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

Débora Ribeiro Alves

Análise de Abundância Química Estelar por Espectroscopia

São Paulo
2023

Débora Ribeiro Alves

Análise de Abundância Química Estelar por Espectroscopia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Astronomia, Geofísica 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

São Paulo
2023

Dedico este trabalho aos meus pais, Marinês da Trindade Alves e Sebastião Paula Alves, pois é graças ao seu esforço e dedicação que hoje posso concluir mais uma etapa da minha vida.

Agradecimentos

À minha família, por ser a base na qual firmei meus alicerces e por ter me ensinado, ao longo do tempo, o verdadeiro significado da vida.

Ao meu orientador, Jorge Luis Meléndez Moreno, pela paciência em ensinar e o comprometimento em fazer um bom trabalho;

Agradeço a todos os professores com os quais tive contato ao longo da graduação, por todo o conhecimento e motivação transmitidos.

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

"*A matemática é a linguagem na qual Deus escreveu o universo.*"

Galileo Galilei

"*Nós tornamos o nosso mundo significativo pela coragem de nossas perguntas e pela profundidade de nossas respostas.*"

Carl Sagan

Resumo

O estudo da química estelar possui várias aplicações significativas na astronomia. Entre elas, destacam-se o entendimento do processo de nascimento e evolução das estrelas, bem como a descoberta de novos sistemas planetários. A técnica de espectroscopia é utilizada para obter a abundância de elementos químicos estelares, consistindo na separação da luz coletada em diferentes comprimentos de onda pelo espectrógrafo. As linhas espectrais fornecem informações sobre os elementos químicos presentes e indicam os processos que ocorrem na atmosfera estelar.

A análise das estrelas também pode ser útil para estimar a idade das mesmas com base nas mudanças nos parâmetros atmosféricos na sequência principal, durante a fusão do hidrogênio em hélio em seu interior. Nesse contexto, estudamos as propriedades das estrelas, utilizando a análise espectroscópica de uma amostra de 15 estrelas. O objetivo é obter parâmetros atmosféricos, como temperatura efetiva (T_{eff}), gravidade superficial ($logg$), metalicidade ($[Fe/H]$) e velocidade de microturbulência (V_t), e compará-los com os dados obtidos na literatura.

Por meio dos espectros obtidos no High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher (HARPS), com o telescópio de 3,6 metros do European Southern Observatory (ESO), foram coletados os dados necessários para a obtenção das larguras equivalentes (EW) das linhas espectrais, utilizando o Image Reduction and Analysis Facility (IRAF). Usando os dados de EW, foram obtidos os parâmetros atmosféricos da amostra. As comparações realizadas demonstram um bom acordo entre os resultados obtidos e a literatura. Novas medidas foram feitas para aprimorar a precisão dos reultados, mas as incertezas ainda apresentaram uma grande variação. De forma geral, conclui-se que o método utilizado é eficaz, demonstrando alta acurácia.

Abstract

The study of stellar chemistry has several significant applications in astronomy. Among them, the understanding of the birth and evolution process of stars stands out, as well as the discovery of new planetary systems. The spectroscopy technique is employed to obtain the abundance of stellar chemical elements, involving the separation of collected light into different wavelengths by the spectroscope. Spectral lines provide information about the present chemical elements and indicate the processes occurring in the stellar atmosphere.

Stellar analysis can also be useful for estimating their age based on changes in atmospheric parameters on the main sequence during the fusion of hydrogen into helium in their interior. In this context, we investigate stellar properties using spectroscopic analysis of a sample of 15 stars. The goal is to obtain atmospheric parameters such as effective temperature (T_{eff}), surface gravity ($logg$), metallicity ($[Fe/H]$), and microturbulence velocity (V_t), comparing them with literature data.

Through the spectra obtained with the High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher (HARPS) on the 3.6-meter telescope of the European Southern Observatory (ESO), the necessary data for obtaining equivalent widths (EW) of spectral lines were collected using the Image Reduction and Analysis Facility (IRAF). Atmospheric parameters of the sample were derived using EW data. Comparisons demonstrate a good agreement between the obtained results and the literature. New measurements were taken to enhance result accuracy, but uncertainties still showed significant variation. In general, it is concluded that the method used is effective, demonstrating high accuracy.

Lista de Figuras

2.1 Exemplo da base de dados do SIMBAD para a estrela HD 75318 24
2.2 Base de dados do ESO. 25
2.3 Imagens das estrelas da amostra obtidas pelo DSS. 27

3.1 Espectro combinado para HD224619. 30
3.2 Espectro para as faixas 1 a 4 de HD224619. 31
3.3 Espectro para as faixas 5 a 7 de HD224619. 31
3.4 Espectro normalizado e combinado para HD224619. 32
3.5 Medida de linha para a estrela HD224619. 33

4.1 Temperatura Efetiva - 1 39
4.2 Metalicidade - 1 39
4.3 Logaritmo da Gravidade - 1 39
4.4 Velocidade de Microturbulência - 1 39
4.5 Temperatura Efetiva - 2 40
4.6 Metalicidade - 2 40
4.7 Logaritmo da Gravidade - 2 40
4.8 Velocidade de Microturbulência - 2 40

A.1 Scipt1. 49
A.2 HD224619 50
A.3 HD011505 51
A.4 HD020766 52
A.5 HD028701 53
A.6 HD030278 54

A.7 HD038858 55
A.8 HD085119 56
A.9 HD090156 57
A.10 HD114853 58
A.11 HD157830 59
A.12 HD161098 60
A.13 HD172051 61
A.14 HD189567 62
A.15 HD224619 63
A.16 HD224619 64
A.17 HD189567 64
A.18 Gráficos dos parâmetros adicionais. 64
A.19 HD172051 65
A.20 HD161098 65
A.21 Gráficos dos parâmetros adicionais. 65
A.22 HD157830 66
A.23 HD114853 66
A.24 Gráficos dos parâmetros adicionais. 66
A.25 HD102365 67
A.26 HD090156 67
A.27 Gráficos dos parâmetros adicionais. 67
A.28 HD085119 68
A.29 HD038858 68
A.30 Gráficos dos parâmetros adicionais. 68
A.31 HD030278 69
A.32 HD028701 69
A.33 Gráficos dos parâmetros adicionais. 69
A.34 HD020766 70
A.35 HD011505 70
A.36 Gráficos dos parâmetros adicionais. 70
A.37 HD224619 71
A.38 HD189567 71

A.39 Gráficos dos parâmetros adicionais. 71
A.40 HD224619 72

Lista de Tabelas

2.1 Amostra final de estrelas e seus parâmetros. 26

3.1 Resultado dos Parâmetros Atmosféricos Estelares 33
3.2 Resultado dos Parâmetros Atmosféricos Estelares Revisados 34
3.3 Resultado dos Parâmetros Estelares Adicionais 35

4.1 Comparação dos Parâmetros Atmosféricos Estelares Revisados 38

Sumário

1. Introdução 21

2. Base de Dados 23

3. Tratamento de Dados 29

3.1 Preparação da Amostra 29

3.2 Obtenção das Larguras Equivalentes (EW) no IRAF 32

4. Análise de Resultados 37

4.1 Compreensão dos Resultados 37

4.2 Comparação de Dados 38

5. Análise e Conclusões 41

Referências 45

Apêndice 47

A. Script e Gráficos 49

Capítulo 1

Introdução

Desde tempos remotos, a humanidade recorria ao céu para buscar respostas para suas questões mais essenciais. Na ausência de instrumentos tecnológicos, a observação a olho nu era a única opção disponível. Porém, devido à falta de poluição luminosa, era mais fácil perceber as variações no céu noturno e estabelecer padrões para se orientar no espaço e no tempo. Utilizando conjuntos de estrelas que formam constelações de referência, as pessoas podiam identificar as melhores épocas de plantio ou até mesmo se localizar em regiões distantes.

Atualmente, a humanidade conta com instrumentos muito mais precisos para se orientar, e o conhecimento das estrelas tem se mostrado útil para diversas finalidades, como o estudo da formação e evolução da Via Láctea e do universo como um todo. Na área da astronomia, é possível obter as propriedades químicas e atmosféricas de um conjunto de estrelas utilizando telescópios de alta precisão e técnicas avançadas, como a espectroscopia.

Para compreender a estrutura da Via Láctea, é necessário examinar suas subestruturas distintas. Essa galáxia em espiral é composta por um disco fino, um disco espesso e um halo, e cada região possui populações estelares com propriedades cinemáticas e químicas diferentes. Nos discos fino e espesso, as populações estelares apresentam cinemática e composição química distintas. Especificamente no disco espesso, encontram-se estrelas mais antigas e com menor abundância de elementos metálicos (T. Bensby et al., 2010).

Os parâmetros atmosféricos de uma estrela, como temperatura efetiva ($T_{\rm eff}$), gravidade superficial (log g), metalicidade ([Fe/H]) e velocidade de microturbulência (V_t), podem ser determinados utilizando as larguras equivalentes (EW) das linhas de ferro neutro (Fe I) e ionizado (Fe II). Essas medidas são geralmente realizadas na região do espectro visível, que é facilmente observada.

Neste estudo, iremos analisar 15 espectros estelares coletados pelo espectrógrafo HARPS, provenientes de uma amostra de estrelas com baixa metalicidade e massas inferiores à do Sol. O objetivo é obter os parâmetros atmosféricos e propriedades químicas dessas estrelas. Os resultados serão comparados com os obtidos na literatura pelo grupo SAMPA (Stellar Atmospheres, Planets and Abundances). Para obter as larguras equivalentes das linhas espectrais, faremos uso dos espectros obtidos pelo espectrógrafo HARPS, que é instalado no telescópio de 3.6m do Observatório La Silla do ESO. A análise dos espectros será realizada utilizando o software Image Reduction and Analysis Facility (IRAF). A partir desses dados, será possível obter os parâmetros estelares e, assim, aprofundar nosso conhecimento sobre a origem e evolução dessas estrelas.

Iniciamos com a seleção e definição da amostra, e depois com a obtenção dos espectros no ESO. Os espectros devem ser adaptados para medir as larguras equivalentes (EW) de cada conjunto de estrelas no IRAF. Para calcular a abundâncias de [Fe/H] a partir das EWs, usaremos o código MOOG (Christopher Sneden, 1974) e o modelo de atmosfera estelar de Kurucz (Robert L. Kurucz e Fiorella Castelli, 2003) utilizado no código q2 por (Ramirez, 2015).

Capítulo 2

Base de Dados

Para selecionar a amostra deste trabalho foi utilizada a base de dados desenvolvida pelo grupo SAMPA-IAG (Stellar Atmospheres, Planets and Abundances), que possui um total de 11004 estrelas com informações gerais sobre as estrelas, incluindo parâmetros atmosféricos como logaritmo da gravidade (Logg), temperatura efetiva (Teff), metalicidade (Fe/H) e velocidade de microturbulência (Vt).

Para este estudo, foram usadas estrelas de metalicidade e massa inferiores ao Sol. É uma região do espaço de parâmetros ainda não explorada pelo SAMPA. No doutorado das alunas Anne Rathsam (evolução do elemento lítio) e Gabriela Carvalho Silva (evolução da atividade magnética e rotação estelar), estão sendo estudadas estrelas de massa inferior ao Sol, mas de metalicidade solar. As estrelas selecionadas também serão úteis para ampliar a amostra sendo estudada pela pós-doutoranda Shejeelammal Jameela, sobre o relógio químico [Y/Mg]; essa razão de abundância química é sensível à evolução química da Galáxia, e portanto pode ser usada como indicador de idade. Portanto, a nova amostra permitirá ampliar a cobertura de parâmetros estelares, para diferentes estudos do SAMPA relacionados com evolução estelar e a evolução química da Via Láctea. A amostra selecionada tem os seguintes intervalos de parâmetros:

$$4.1 \leq \log g \leq 4.6.$$

$$5350 \leq \text{Teff (K)} \leq 5850$$

$$-0.3 \leq (Fe/H) \leq -0.1$$

$$0.85 \leq \text{Massa}(M_{Sol}) \leq 0.95$$

Estes intervalos foram aplicados a um programa escrito em Python juntamente com

a tabela total de estrelas do grupo SAMPA. A saída do programa forneceu um arquivo com a amostra inicial de 66 estrelas dentro dos limites pré definidos. No entanto, algumas estrelas precisaram ser removidas por apresentar possíveis problemas como as binárias espectroscópicas, as estrelas da pré-sequência principal ou de alta rotação. As binárias espectroscópicas podem apresentar importante contaminação de suas linhas espectrais devido à presença de uma estrela companheira muito próxima (< 1 segundo de arco), que acaba sendo observada junto com a estrela primária. As estrelas de pré-sequência principal (PMS) apresentam rotação altíssima, o que causa um forte alargamento das linhas e consequentemente uma mistura (blend) entre linhas próximas, além de um achatamento do perfil da linha; isso impossibilita ou dificulta a obtenção de medidas precisas. As estrelas de alta rotação costumam ser estrelas bem jovens (tipicamente < 100 Myr), que embora não apresentem rotação tão elevada como as PMS, causam uma mistura importante das linhas, dificultando a obtenção de medidas precisas.

Para a seleção das estrelas potencialmente problemáticas foi utilizado o Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data (SIMBAD[1]), mostrado na Figura 2.1, para a verificação de cada estrela da amostra.

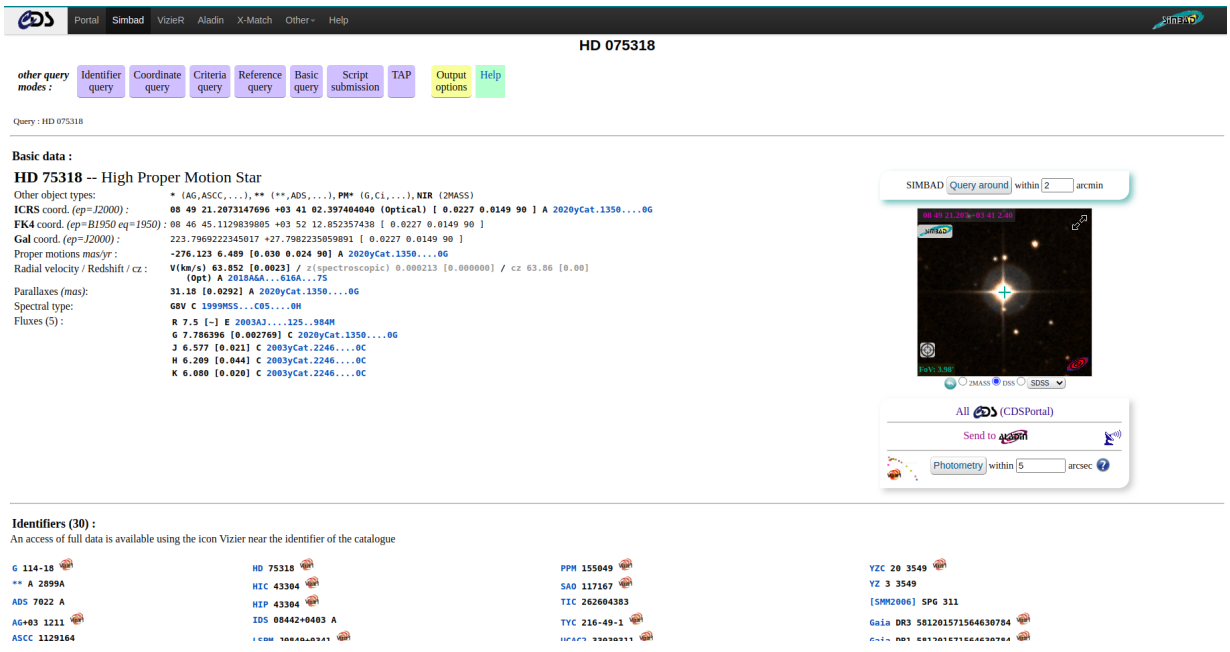

Figura 2.1: Exemplo da base de dados do SIMBAD para a estrela HD 75318

Após a seleção, restaram 49 estrelas. A partir da base de dados públicos do European

[1] https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-fid

Southern Observatory (ESO[2]), mostrada na Figura 2.2, foi possível obter um conjunto de espectros reduzidos de alta precisão. Estes espectros foram aquisitados pelo High Accuracy Radial velocity Planet Searcher (HARPS) que é um espectrógrafo acoplado ao telescópio de 3,6 m do ESO, localizado no Observatório de La Silla, no Chile.

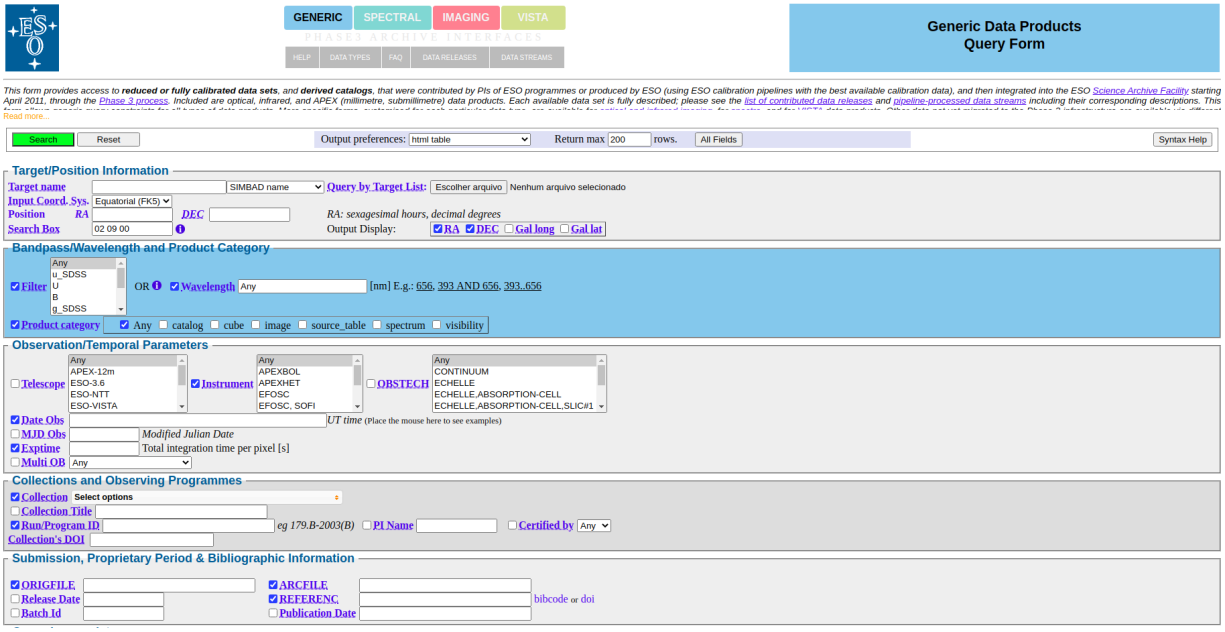

Figura 2.2: Base de dados do ESO.

Para realizar a busca na base de dados do ESO, selecionamos um poder resolvedor (R) de 115.000, o instrumento HARPS e a data dos dados anterior ou posterior a 3 de junho de 2015, correspondente a uma Data Juliana Modificada (MJD) de 57176.5. Nesta data ocorreu a atualizacão das fibras ópticas para melhoria da qualidade dos dados, então essa separação é importante devido a mudança na forma do contínuo do espectro, causada pela diferente curva de sensibilidade da nova fibra óptica. Depois, foi preciso baixar a lista completa de espectros para cada estrela no formato compactado.

Para algumas estrelas, o número de observações é grande, enquanto para outras, a quantidade de informações é muito escassa. Por isso, foi necessário verificar a relação sinal ruído (SNR) do total de espectros individuais, para obter espectros de alta precisão com SNR total maior que 250. Parte das 49 estrelas não tinham espectros HARPS na base de dados do ESO, ou a quantidade de espectros era muito baixa. A amostra final é de 15 estrelas, que foi um compromisso entre o SNR das estrelas e um tamanho de amostra que

[2] https://www.eso.org/public/

poderia ser analisada em detalhe durante o Trabalho de Conclusão de Curso. A amostra final é apresentada na Tabela 2.1 com suas respectivas identificações (ID), parâmetros atmosféricos e magnitudes na banda V. Como um alto SNR é requerido, as estrelas são relativamente brilhantes (V $\leq$ 7.90).

Para cada estrela, foi obtido um conjunto de espectros. Dentro de cada espectro, existe um conjunto de cinco arquivos, dos quais apenas dois foram utilizados: o arquivo de espectro reduzido (*s1dA.fits) e o arquivo de informações de velocidade radial (*ccfG2A.fits: CCF). Para cada conjunto de espectros das 15 estrelas, foram extraídos esses dois arquivos.

Tabela 2.1 - Amostra final de estrelas e seus parâmetros.

ID	Teff	Logg	Fe/H	Vt	Massa	mag V
HD224619	5447 ± 65	4.45 ± 0.07	-0.18 ± 0.07	1	0.853 ± 0.030	7.46
HD189567	5710 ± 57	4.39 ± 0.13	-0.25 ± 0.05	1	0.911± 0.030	6.07
HD172051	5602 ± 58	4.51 ± 0.05	-0.25 ± 0.05	1	0.890 ± 0.029	5.86
HD161098	5598 ± 67	4.44 ± 0.08	-0.25 ± 0.07	1	0.880 ± 0.033	7.67
HD157830	5555 ± 78	4.50 ± 0.09	-0.23 ± 0.09	1	0.872 ± 0.038	7.90
HD114853	5717 ± 57	4.46 ± 0.08	-0.23 ± 0.05	1	0.921 ± 0.029	6.94
HD102365	5628 ± 56	4.45 ± 0.13	-0.30 ± 0.05	1	0.873 ± 0.029	4.88
HD090156	5618 ± 56	4.53 ± 0.07	-0.22 ± 0.05	1	0.908 ± 0.029	6.92
HD085119	5437 ± 76	4.54 ± 0.09	-0.17 ± 0.09	1	0.861 ± 0.036	8.84
HD038858	5738 ± 57	4.47 ± 0.06	-0.23 ± 0.05	1	0.931 ± 0.029	5.97
HD030278	5401 ± 76	4.42 ± 0.09	-0.17 ± 0.09	1	0.851 ± 0.032	7.60
HD028701	5713 ± 57	4.34 ± 0.10	-0.30 ± 0.05	1	0.892 ± 0.029	7.87
HD020766	5722 ± 57	4.52 ± 0.09	-0.22 ± 0.05	1	0.931 ± 0.029	5.54
HD011505	5755 ± 58	4.36 ± 0.06	-0.22 ± 0.05	1	0.930 ± 0.028	7.42
HD004208	5621 ± 56	4.45 ± 0.06	-0.25 ± 0.05	1	0.889 ± 0.028	7.79
Média	5617 ± 62	4.46 ± 0.08	-0.23 ± 0.06	1	0.893 ± 0.031	6.98

Apenas para fins ilustrativos, a Figura A.8 mostra a imagem de cada estrela da amostra, obtida pelo Digital Sky Survey (DSS) por meio da plataforma do SIMBAD. Geralmente, as imagens do DSS incluem dados na faixa do espectro óptico, cobrindo as bandas B (azul), V (visual ou verde) e R (vermelho).

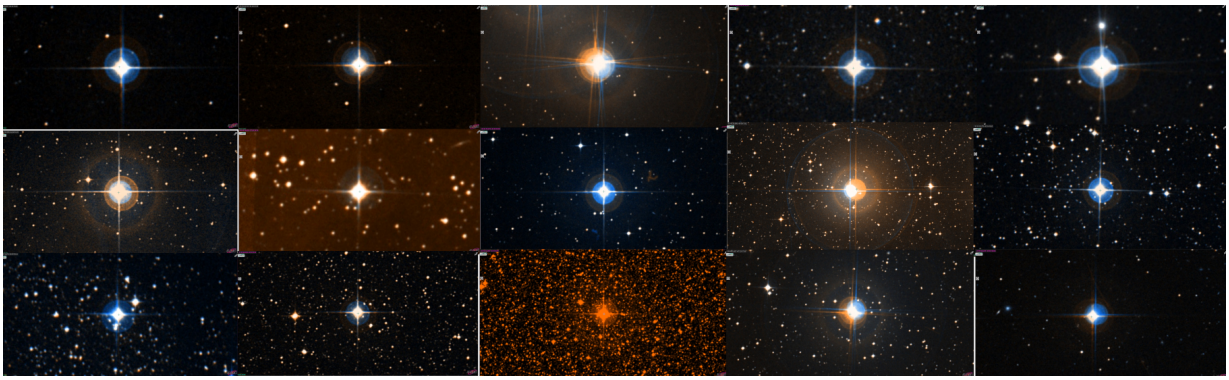

Figura 2.3: Imagens das estrelas da amostra obtidas pelo DSS.

Capítulo 3

Tratamento de Dados

3.1 Preparação da Amostra

Com a amostra definida e todos os espectros referentes a cada estrela baixados, foi necessário ajustá-los para realizar as medidas de linhas no IRAF. O pacote IRAF é um software desenvolvido pelo National Optical Astronomy Observatory (NOAO) com a função geral de reduzir, calibrar, visualizar e analisar dados de imagens e espectroscopia.

É importante observar que, nas análises realizadas, foram aplicadas correções Doppler aos espectros. Temos duas componentes, uma é a velocidade radial da estrela em relação ao Sol, e adicionalmente temos o movimento orbital da Terra ao redor do Sol, ou seja a correção de velocidade heliocêntrica (velocidade da Terra em relação ao Sol), o mais apropriadamente, a correção de velocidade da Terra em relação ao baricentro do Sistema Solar (correção baricêntrica). A correção Doppler baricêntrica é realizada automaticamente como parte da redução dos dados feita pelo ESO. Apenas é necessário realizar a correção de velocidade radial.

Para extrair as velocidades radiais, e então corrigir o deslocamento devido ao efeito Doppler, foi necessário listar os espectros em um único diretório e aplicar um script no terminal do IRAF, que procura por todos os espectros (arquivos tipo *s1dA.fits) no diretório e aplica as velocidades radiais usando os valores disponíveis nos correspondentes arquivos *ccfG2A.fits para cada observação individual.

Após a correção Doppler, foi necessário realizar a combinação do conjunto de espectros de cada estrela para melhorar a qualidade das linhas e obter espectros de maior S/N para a amostra. A combinação foi feita por meio do comando 'scombine' dentro do IRAF, e no final obtivemos um único arquivo com a combinação do conjunto de espectros para cada

estrela. Os espectros são inicialmente combinados pela média, mas depois são ponderados pela mediana.

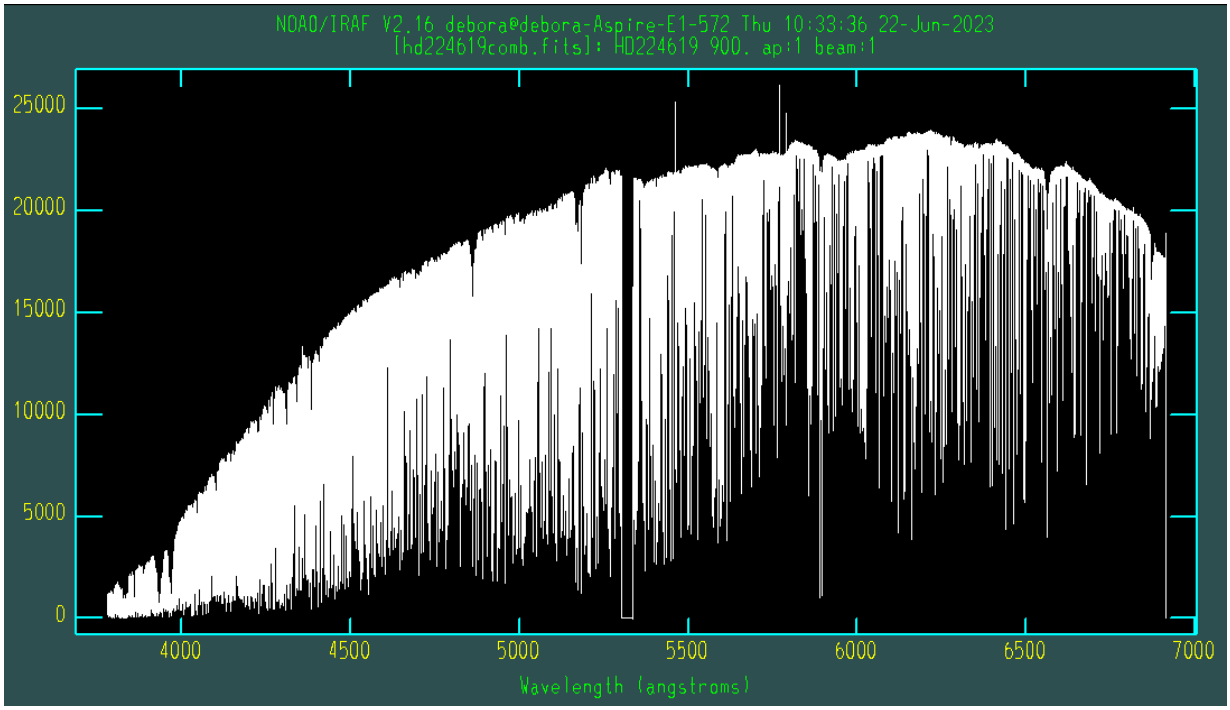

Figura 3.1: Espectro combinado para HD224619. Antes da combinação, as exposições individuais foram corrigidas do efeito Doppler. A região sem sinal por volta de 530nm é a junta entre os CCDs que são mais sensíveis ao azul e ao vermelho.

O próximo passo foi normalizar o conjunto de espectros. Para isso, foi necessário dividi-los em sete segmentos de comprimento de onda que variam no intervalo de $w_1 = 3782$ a $w_2 = 6913$. O motivo para dividir o espectro é que existem importantes variações no contínuo do espectro (Figura 3.1), e dividindo em intervalos menores, conseguimos normalizar melhor, pois se fosse normalizado todo o espectro sem divisão, teria que ser usado um polinômio de grau muito alto, o que poderia acabar afetando o contínuo de linhas mais largas devido a oscilações indesejadas no polinômio. Cada faixa foi normalizada separadamente e, em seguida, combinadas novamente. A Figura 3.2 mostra o gráfico das faixas 1 a 4, e a Figura 3.3 mostra as faixas de 5 a 7, para a estrela HD224619.

No exemplo das Figuras 3.2 e 3.3, o espectro corresponde às linhas em branco, enquanto as linhas pontilhadas em vermelho marcam o ajuste do contínuo. Esse ajuste depende das variáveis: low, high, order, wavescale e niter. A variável usada para ajustar o contínuo é 'order', enquanto as demais são pré-definidas para cada segmento. Foram utilizados polinômios de ordens 1 a 28 para retificar o contínuo dos espectros. Após a normalização,

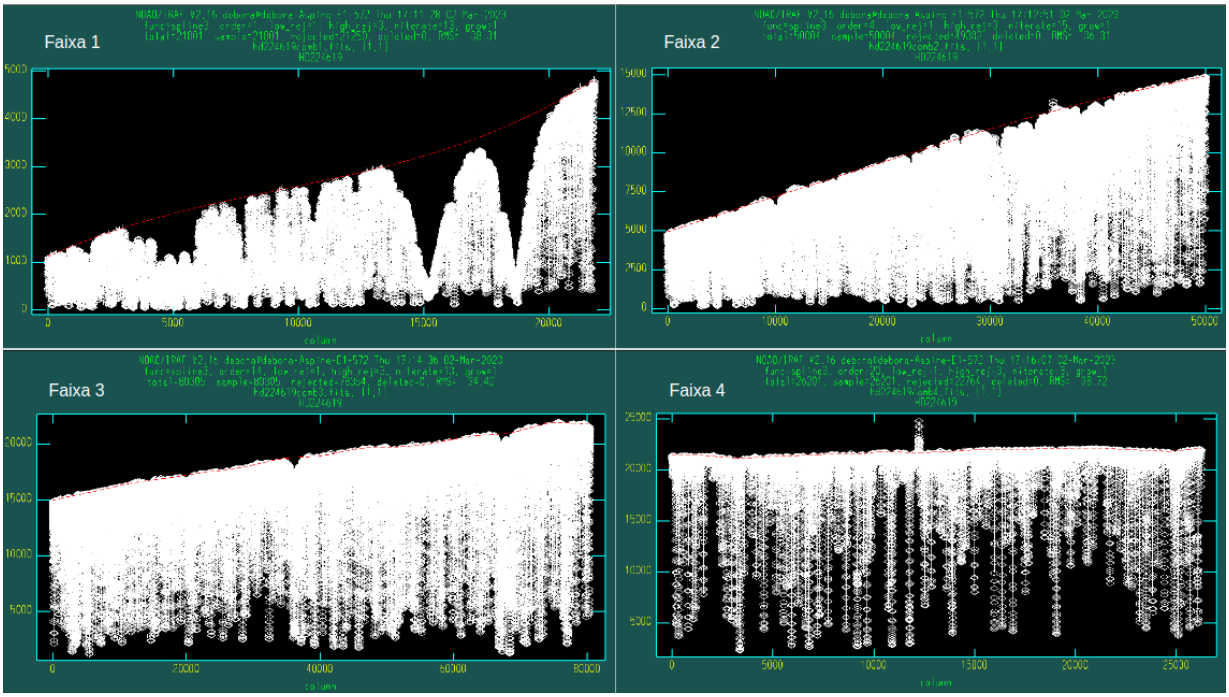

Figura 3.2: Espectro para as faixas 1 a 4 de HD224619. Note-se que no eixo horizontal é mostrada a escala em pixel e não em comprimento de onda.

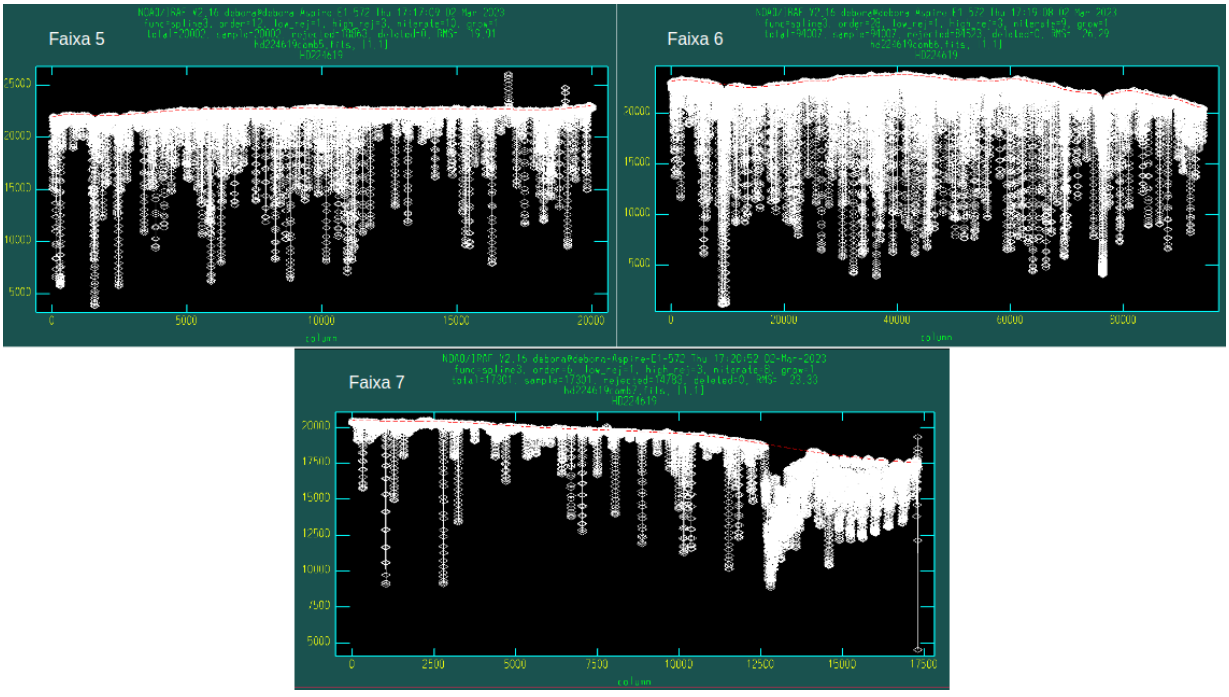

Figura 3.3: Espectro para as faixas 5 a 7 de HD224619

combinamos os espectros novamente com o comando 'scombine', e o resultado é mostrado na Figura 3.4.

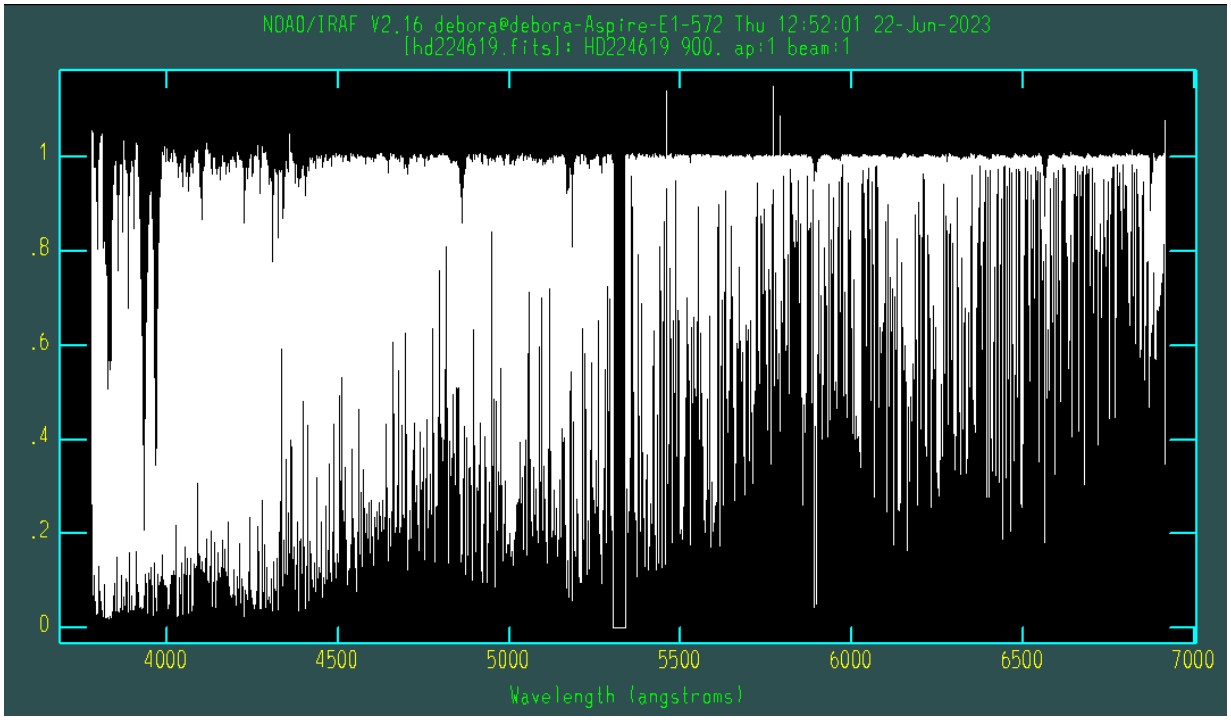

Figura 3.4: Espectro normalizado e combinado para HD224619.

3.2 Obtenção das Larguras Equivalentes (EW) no IRAF

Com os espectros normalizados e agrupados em um único diretório, o próximo passo foi utilizar um código em python desenvolvido ao longo dos anos pelo grupo SAMPA. Esse script, juntamente com uma lista de linhas contendo intervalos de comprimento de onda, foi utilizado para medir as larguras equivalentes (EW) de cada linha de interesse para o conjunto de espectros estelares no IRAF.

Este código cria um arquivo chamado getew.cl, que inclui todas as linhas a serem medidas para todas as estrelas, incluindo o Sol, que será usado como parâmetro de comparação. O arquivo total possui 1840 linhas para medição, que foram divididos usando o próprio script, em 23 arquivos de 80 itens cada, para facilitar a aquisição de dados.

Assim, foi feito o plot de cada gráfico no terminal do IRAF para medir a EW usando o contínuo como linha de referência. A Figura 3.5 mostra um exemplo de medida feita para a estrela HD224619 para comprimentos de onda entre $x_{min} = 4362.90\mathring{A}$ e $x_{max} = 4368\mathring{A}$.

Conforme as linhas foram medidas, os dados foram gravados em um único documento final (splot.log). Esse arquivo foi submetido ao código q2 descrito por (Ramirez et al., 2014), que produziu uma tabela com parâmetros estelares para cada estrela. As primeiras

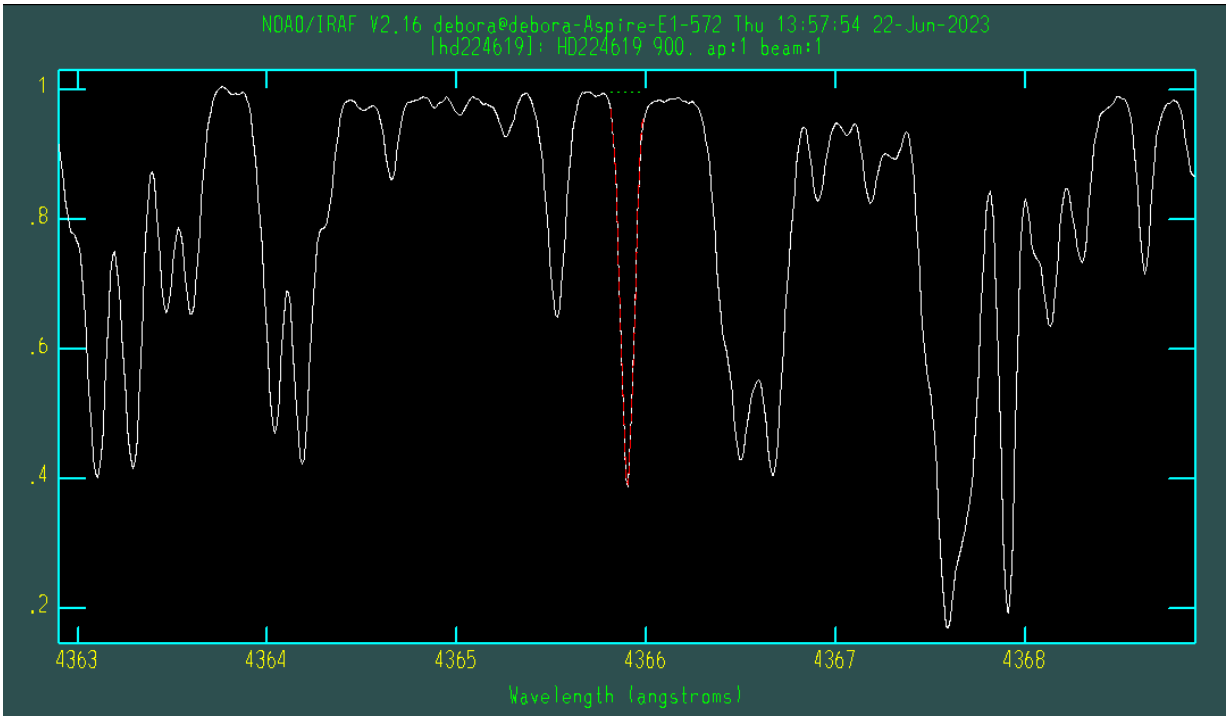

Figura 3.5: Medida de linha para a estrela HD224619

medidas são mostradas na Tabela 3.1.Como o procedimento estava sendo feito pela primeira vez e alguns resultados podiam ser incertos, as medidas foram refeitas e os resultados revisados são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Resultado dos Parâmetros Atmosféricos Estelares

ID	Teff	Logg	[Fe/H]	Vt
HD224619	5464 ± 9	4.410 ± 0.014	-0.170 ± 0.005	0.82 ± 0.01
HD189567	5732 ± 4	4.380 ± 0.014	-0.261 ± 0.004	1.03 ± 0.01
HD172051	5614 ± 4	4.470 ± 0.014	-0.261 ± 0.004	0.92 ± 0.01
HD161098	5595 ± 5	4.450 ± 0.016	-0.248 ± 0.005	0.89 ± 0.01
HD157830	5552 ± 4	4.480 ± 0.014	-0.235 ± 0.004	0.86 ± 0.01
HD114853	5707 ± 4	4.390 ± 0.016	-0.247 ± 0.004	0.99 ± 0.01
HD102365	5643 ± 11	4.470 ± 0.037	-0.310 ± 0.011	0.86 ± 0.03
HD090156	5608 ± 4	4.470 ± 0.013	-0.237 ± 0.004	0.90 ± 0.01
HD085119	5449 ± 10	4.500 ± 0.025	-0.171 ± 0.008	1.04 ± 0.02
HD038858	5728 ± 4	4.470 ± 0.016	-0.233 ± 0.004	0.96 ± 0.01
HD030278	5416 ± 6	4.370 ± 0.018	-0.143 ± 0.007	0.77 ± 0.02
HD028701	5724 ± 7	4.355 ± 0.021	-0.328 ± 0.005	1.02 ± 0.02
HD020766	5737 ± 7	4.530 ± 0.012	-0.225 ± 0.004	0.99 ± 0.01
HD011505	5753 ± 6	4.310 ± 0.017	-0.240 ± 0.006	1.07 ± 0.01

Continua na próxima página...

Tabela 3.1 - Continuação

Coluna1	Coluna2	Coluna3	Coluna4	Coluna5
HD004208	5626 ± 4	4.420 ± 0.014	-0.286 ± -0.004	0.95 ± 0.01
Média	5623 ± 6	4.432 ± 0.017	-0.240 ± 0.005	0.94 ± 0.01

Tabela 3.2 - Resultado dos Parâmetros Atmosféricos Estelares Revisados

ID	Teff	Logg	[Fe/H]	Vt
HD224619	5457 ± 5	4.400 ± 0.017	-0.167 ± 0.006	0.77 ± 0.02
HD189567	5726 ± 5	4.360 ± 0.017	-0.264 ± 0.004	1.03 ± 0.01
HD172051	5611 ± 5	4.440 ± 0.018	-0.260 ± 0.005	0.91 ± 0.01
HD161098	5590 ± 5	4.440 ± 0.016	-0.249 ± 0.005	0.88 ± 0.01
HD157830	5548 ± 5	4.460 ± 0.018	-0.237 ± 0.006	0.86 ± 0.02
HD114853	5702 ± 6	4.395 ± 0.018	-0.251 ± 0.005	1.01 ± 0.01
HD102365	5639 ± 12	4.443 ± 0.039	-0.314 ± 0.011	0.87 ± 0.03
HD090156	5603 ± 5	4.430 ± 0.017	-0.239 ± 0.005	0.90 ± 0.01
HD085119	5455 ± 12	4.500 ± 0.028	-0.178 ± 0.010	1.08 ± 0.03
HD038858	5727 ± 5	4.450 ± 0.019	-0.232 ± 0.004	0.96 ± 0.01
HD030278	5408 ± 7	4.380 ± 0.021	-0.146 ± 0.007	0.76 ± 0.02
HD028701	5723 ± 8	4.370 ± 0.025	-0.329 ± 0.006	1.03 ± 0.02
HD020766	5736 ± 9	4.520 ± 0.016	-0.223 ± 0.006	0.98 ± 0.02
HD011505	5745 ± 7	4.280 ± 0.019	-0.247 ± 0.007	1.06 ± 0.01
HD004208	5623 ± 6	4.400 ± 0.018	-0.287 ± 0.005	0.95 ± 0.01
Média	5620 ± 7	4.418 ± 0.020	-0.242 ± 0.006	0.94 ± 0.02

As Figuras do Apêndice A ilustram os três gráficos da saída do código q2, onde o eixo x representa o potencial de excitação (EP, excitation potential), isto é, a energia do nível a partir do qual será excitado o elétron, a largura equivalente relativa (REW = $\frac{EW}{\lambda}$) e o comprimento de onda em Angstrom, respectivamente. No eixo y, temos a metalicidade das 15 estrelas da amostra obtidas na saída do código.

Além disso, usamos outras funcionalidades do programa para obter parâmetros adicionais: idade, massa, logaritmo da luminosidade (logL), magnitude absoluta (Mv) e raio (R), conforme disposto na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Resultado dos Parâmetros Estelares Adicionais

ID	Idade	Massa	LogL	Mv	R
HD224619	10.2 ± 0.24	0.860 ± 0.007	-0.190 ± 0.007	5.370 ± 0.007	0.900 ± 0.007
HD189567	10.1 ± 0.52	0.910 ± 0.008	0.020 ± 0.021	4.810 ± 0.045	1.040 ± 0.021
HD172051	6.0 ± 0.34	0.890 ± 0.007	-0.170 ± 0.007	5.300 ± 0.016	0.870 ± 0.007
HD161098	0.8 ± 0.07	2.230 ± 0.007	1.570 ± 0.007	0.940 ± 0.007	6.510 ± 0.007
HD157830	0.8 ± 0.07	2.240 ± 0.007	1.560 ± 0.007	0.980 ± 0.161	6.500 ± 0.007
HD114853	9.2 ± 0.60	0.900 ± 0.007	-0.030 ± 0.018	4.890 ± 0.019	0.990 ± 0.020
HD102365	11.9 ± 0.26	0.870 ± 0.013	-0.030 ± 0.007	4.950 ± 0.007	1.010 ± 0.007
HD090156	12.8 ± 0.23	0.870 ± 0.007	-0.020 ± 0.007	4.930 ± 0.007	1.040 ± 0.007
HD085119	2.7 ± 1.10	0.890 ± 0.010	-0.280 ± 0.007	5.600 ± 0.015	0.810 ± 0.007
HD038858	5.5 ± 0.24	0.930 ± 0.008	-0.080 ± 0.007	5.060 ± 0.007	0.930 ± 0.007
HD030278	11.8 ± 0.83	0.850 ± 0.008	-0.200 ± 0.009	5.420 ± 0.009	0.910 ± 0.013
HD028701	11.7± 0.23	0.900 ± 0.007	0.080 ± 0.007	4.640 ± 0.007	1.120 ± 0.007
HD020766	3.4 ± 0.34	0.950 ± 0.008	-0.110 ± 0.009	5.140 ± 0.008	0.890 ± 0.007
HD011505	10.7 ± 0.20	0.930 ± 0.007	0.150 ± 0.007	4.460 ± 0.007	1.200 ± 0.007
HD004208	9.5 ± 0.24	0.880 ± 0.007	-0.100 ± 0.007	5.120 ± 0.007	0.940 ± 0.007

Os gráficos das medidas de parâmetros adicionais se encontram no Apêndice A.

Capítulo 4

Análise de Resultados

4.1 Compreensão dos Resultados

Para compreender os resultados numéricos apresentados na Tabela 3.2 e interpretar os gráficos das Figuras A.2 a A.15, é importante analisar o código do Jupyter notebook "Solving Stellar Parameters"desenvolvido por Ivan Ramirez e utilizado em seu trabalho referenciado em Ramirez (2015).

O código utiliza o q^2 para enviar comandos ao código MOOG, que realiza os cálculos de transferência radiativa para um determinado conjunto de parâmetros atmosféricos. Para executar o programa, é necessário fornecer uma tabela contendo, como chute inicial, os parâmetros atmosféricos de T_{eff}, $Logg$, $[Fe/H]$ e V_t obtidos pelo grupo SAMPA, bem como um arquivo com as medidas de EW para o conjunto de estrelas. Além disso, é necessário verificar a convergência para um resultado único. Foi escolhido um modelo de atmosfera MARCS, e quando os resultados não eram convergentes, foi necessário mudar o número máximo de iterações.

A partir dos dados de entrada, o programa tenta encontrar os valores que minimizam as inclinações da abundância de ferro em relação à linha EP e REW, e que também correspondem às abundâncias médias de Fe I e Fe II. O eixo y dos gráficos das Figuras A.2 a A.15 representa os intervalos de abundância média de ferro.

A cada iteração, os parâmetros são ajustados para se aproximarem do equilíbrio espectroscópico. Para calcular as abundâncias diferenciais e os parâmetros de cada estrela, são utilizados os valores de EW solar como referência. Portanto, os dados do Sol também devem ser fornecidos juntamente com os parâmetros atmosféricos de entrada. Essas medidas do Sol foram realizadas também pela autora. Isso permite comparar as medidas das

estrelas com as do Sol e obter informações sobre suas abundâncias relativas e parâmetros atmosféricos. Como a análise é feita linha-a-linha, na abundância diferencial são eliminadas as incertezas devido à probabilidade de transição (valor gf) da linha, pois aparece no numerador (estrela de interesse) e denominador (o Sol).

Os parâmetros finais de T_{eff}, $Logg$, $[Fe/H]$ e V_t derivados serão influenciados pelos parâmetros de estimativa inicial definidos pelo grupo SAMPA e pelos parâmetros de passo definidos no script para cada variável. No geral a convergência é boa e existe pouca dependência do chute inicial, mas os resultados dos parâmetros finais são dependentes dessas alterações (Ramirez, 2015). É importante considerar essas dependências ao interpretar os resultados e realizar análises subsequentes.

4.2 Comparação de Dados

Para a comparação dos dados, foi feita a diferença entre os dados da literatura e os obtidos nas segundas medidas experimentais. Do resultado, foram calculados média e desvio padrão, conforme é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Comparação dos Parâmetros Atmosféricos Estelares Revisados

ID	Δ Teff	Δ Logg	Δ Fe/H	Δ Vt
HD224619	10	-0.050	0.013	-0.23
HD189567	16	-0.030	-0.014	0.03
HD172051	9	-0.070	-0.010	-0.09
HD161098	-8	0.000	0.001	-0.12
HD157830	-7	-0.040	-0.007	-0.14
HD114853	-15	-0.065	-0.021	0.01
HD102365	11	-0.007	-0.014	-0.13
HD090156	-15	-0.100	-0.019	-0.10
HD085119	18	-0.040	-0.008	0.08
HD038858	-11	-0.020	-0.002	-0.04
HD030278	7	-0.040	0.024	-0.24
HD028701	10	0.030	-0.029	0.03
HD020766	14	0.000	-0.003	-0.02
HD011505	-10	-0.080	-0.027	0.06
HD004208	2	-0.050	-0.037	-0.05
Média	2	-0.037	-0.010	-0.063
Desvio Padrão	12	0.034	0.016	0.098

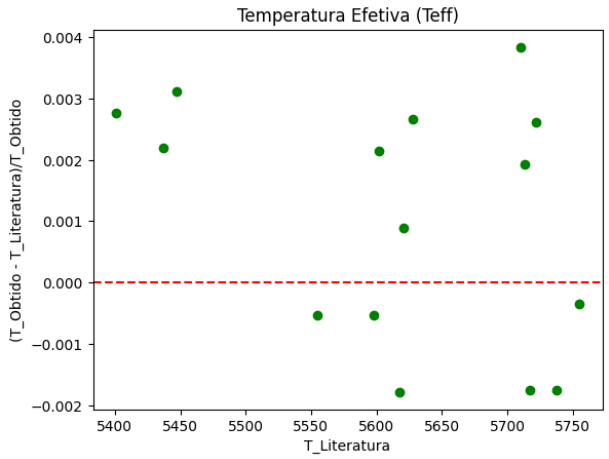

Figura 4.1: Temperatura Efetiva - 1

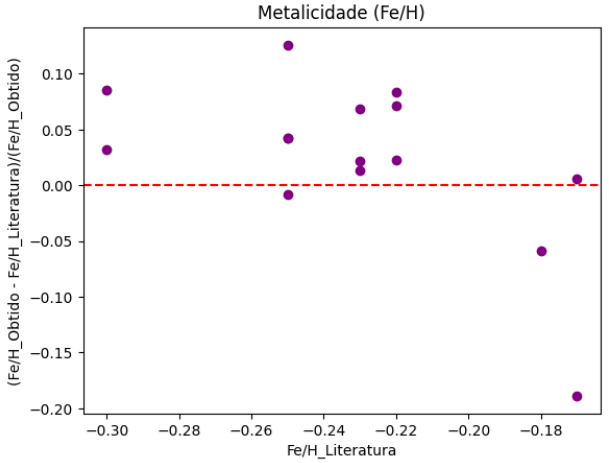

Figura 4.2: Metalicidade - 1

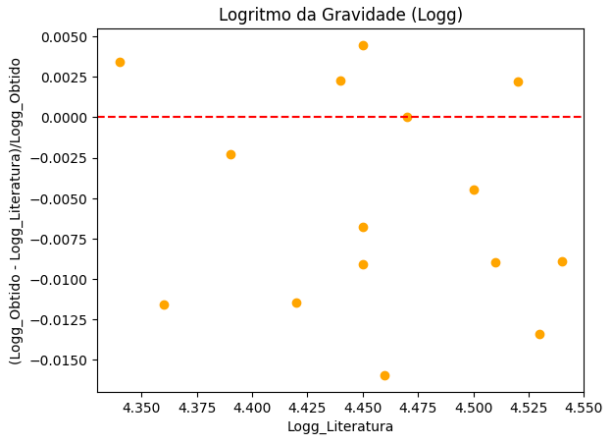

Figura 4.3: Logaritmo da Gravidade - 1

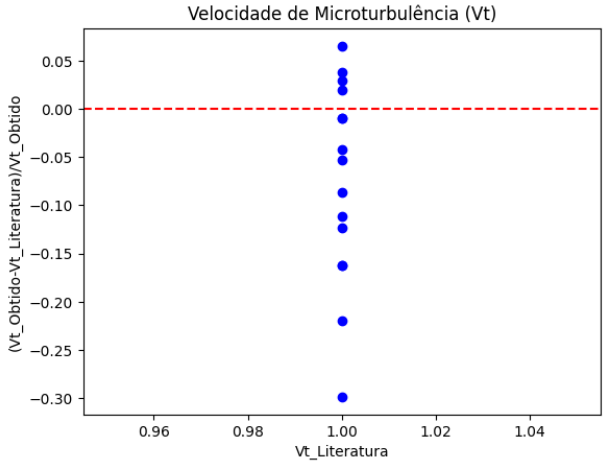

Figura 4.4: Velocidade de Microturbulência - 1

Foram elaborados gráficos comparativos para analisar a relação entre as diferenças obtidas na Tabela 4.1 e os dados da literatura, coletados pelo grupo SAMPA. Esses gráficos proporcionam uma visão mais aprofundada da dispersão em torno do zero, demarcado por uma linha pontilhada vermelha. Os resultados dessa análise estão apresentados nas Figuras 4.1 a 4.4, evidenciando visualmente a consistência ou discrepância entre os conjuntos de dados em questão.

A análise comparativa entre os dados obtidos por espectroscopia e aqueles provenientes da literatura foi estendida à segunda medida, como evidenciado nas Figuras 4.5 a 4.8.

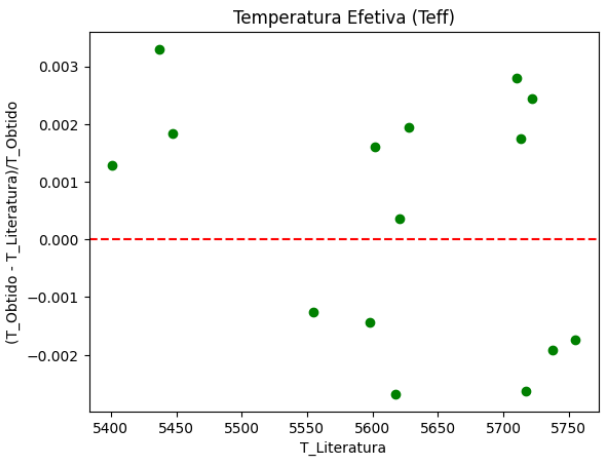

Figura 4.5: Temperatura Efetiva - 2

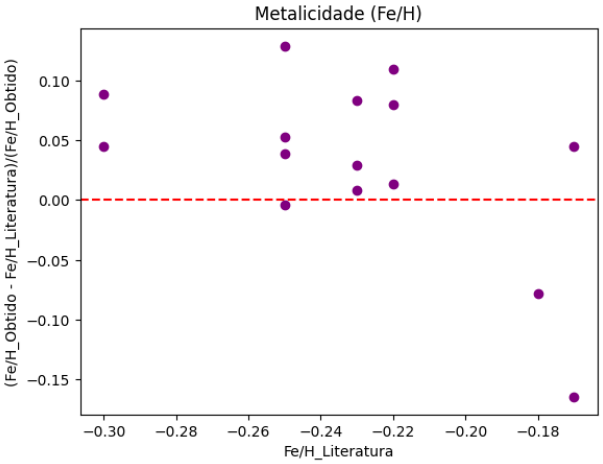

Figura 4.6: Metalicidade - 2

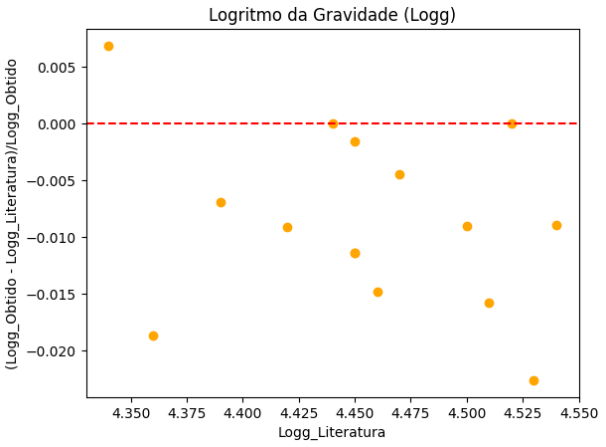

Figura 4.7: Logaritmo da Gravidade - 2

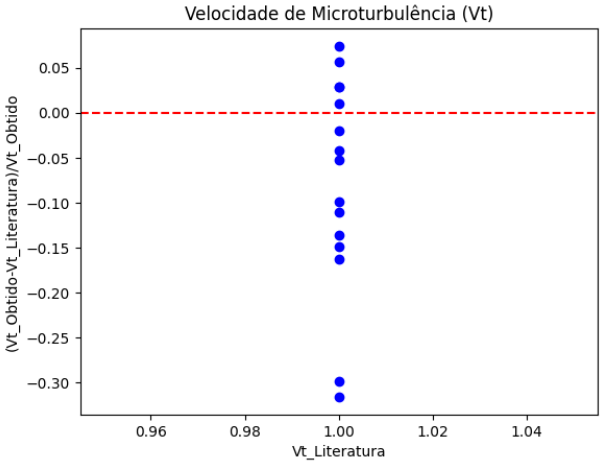

Figura 4.8: Velocidade de Microturbulência - 2

Capítulo 5

Análise e Conclusões

Primeiro, é importante salientar que o valor de microturbulência inicial adotado no grupo é de 1 m/s, e portanto as diferenças com os valores encontrados não significam um desacordo. Ao realizar uma análise quantitativa entre as médias dos parâmetros atmosféricos obtidos nas Tabelas 3.1 e 3.2, é possível notar que as incertezas de Teff, Logg, [Fe/H] e Vt sofreram um leve aumento. Além disso, os gráficos do Apêndice A apresentam um leve aumento na dispersão em torno da reta central. As primeiras medidas experimentais foram mais cautelosas, e, portanto, seus resultados, comparados aos da literatura, são mais precisos.

Para analisar essa comparação, os resultados da Tabela 4.1 apresentam essa variação. É possível concluir que a média na variação da Teff é de apenas 2 K, e o desvio padrão é de 12 K. A média da diferença entre Logg foi de -0.037, com desvio padrão de 0.034. A média da diferença de metalicidade foi de -0.010, com desvio padrão de 0.016. Para a velocidade de microturbulência, a média foi de -0.063, e o desvio padrão foi de 0.098, mas como mencionado acima, essas variações não indicam necessariamente desacordo, pois foi adotado arbitrariamente um valor de 1 m/s para a microturbulência. Isso foi feito pois esse parâmetro depende das linhas espectrais usadas, e podem mudar entre diferentes análises. Por esse motivo adotamos 1 m/s como valor inicial da literatura.

Os gráficos das Figuras 4.1 a 4.8 destacam a dispersão das variações nos dados em torno do ponto zero, marcado por uma linha pontilhada vermelha. Ao examinar os gráficos das Figuras 4.1 e 4.5, que representam a temperatura efetiva, observamos uma notável semelhança no padrão dos pontos para ambas as medidas. Essa consistência sugere alta confiabilidade nos dados. Em geral, a distribuição dos pontos é mais equilibrada em relação a zero, quando comparada aos demais gráficos. No entanto, pequenas variações

nesse padrão são atribuíveis à subjetividade nas medidas das larguras equivalentes.

A precisão dos resultados depende dos erros nas medidas e de erros sistemáticos da modelagem. Para minimizar os erros das medidas, restringimos a amostra para estrelas com SNR alto. Já os erros sistemáticos, são minimizados parcialmente pela técnica de análise diferencial. O código q2 leva em conta ambos os tipos de erro, para calcular o erro total.

Nos gráficos das Figuras 4.2 e 4.6, relacionados à metalicidade, percebemos que, das 14 medidas, 11 apresentam uma variação positiva, resultando em um maior número de dados posicionados acima do eixo zero. Contrastando com isso, os gráficos das Figuras 4.3 e 4.7 indicam uma predominância de pontos abaixo do eixo zero, apontando para uma variação negativa mais acentuada. Em relação à velocidade de microturbulência, observa-se uma variação entre -0.030 e 0.05 para ambas as medidas, com 4 pontos posicionados acima do eixo zero. De maneira geral, os gráficos revelam uma considerável concordância entre as duas medidas, porém, o equilíbrio em torno do zero é distintamente diferente para cada parâmetro atmosférico, sugerindo variações únicas em relação aos dados da literatura.

Pelas idades mostradas na Tabela 3.3, podemos observar que elas cobrem um intervalo de 2,7 a 12,8 Gyr (para os resultados das estrelas HD161098 e HD157830 aconteceu algum problema que precisamos verificar), o que sugere que a amostra poderá ser usada pelo grupo para estudar aspectos relacionados à evolução estelar e evolução química da Galáxia. Em particular, podemos observar que a maioria das estrelas é mais velha, o que é compatível com a metalicidade subsolar dessa amostra.

Analisando as tabelas 3.1 e 3.2, é possível notar que atingimos erros muito inferiores aos da literatura, o que mostra a alta precisão obtida com o método. Portanto, concluímos que a análise foi desenvolvida com sucesso.

No futuro, pretendemos explorar mais detalhadamente a amostra estudada. Por exemplo, planejamos realizar estudos específicos sobre determinados elementos químicos, como o lítio. Além disso, consideramos a possibilidade de expandir a análise para outras amostras, contribuindo assim para os estudos de alta precisão em andamento no grupo. No âmbito do grupo SAMPA, outras amostras de estrelas estão sendo investigadas utilizando as mesmas técnicas empregadas neste trabalho, porém, para parâmetros atmosféricos distintos. A comparação dos dados entre diferentes amostras possibilita a identificação de padrões variados entre os grupos estelares. Por exemplo, compreender a relação entre a

abundância de um elemento químico e sua massa pode revelar-se muito interessante.

Referências Bibliográficas

Christopher Sneden B., Carnon and Nitrogen Abundances in Metal-Poor Stars, University of Texas at Austin, 1974, Tese de Doutorado, 239 p.

Ramirez I., , 2015 GitHub AstroChasqui

Ramirez I., Meléndez J., Bean J., Asplund M., Bedell M., Monroe T., Casagrande L., Schirbel L., Dreizler S., Teske J., Tucci Maia M., Alves-Brito A., Baumann P., The Solar Twin Planet Search. I. Fundamental parameters of the stellar sample, A&A, 2014, vol. 572, p. A48

Robert L. Kurucz A., Fiorella Castelli B., New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres, Astronomical Society of the Pacific, 2003, vol. xxx, p. xxxx

T. Bensby A., S. Feltzing B., J.A. Johnson C., A. Gould D., D. Adén E., M. Asplund F., J. Meléndez G., A. Gal-Yam H., S. Lucatello I., H. Sana J., T. Sumi K., N. Miyake L., D. Suzuki M., C. Han N., I. Bond O., A. Udalski P., Chemical evolution of the Galactic bulge as traced by microlensed d warf and subgiant stars, A&A, 2010, vol. 512, p. A41

Apêndice

Apêndice A

Script e Gráficos

```
!ls -1 *ccf*.fits > lista1
!sed -e 's/HARPS/imhead HARPS/g' -e 's/.fits/.fits l+ >/g' lista1 > lista2
!sed -e 's/HARPS./header/g' -e 's/_ccf_G2_A.fits//g' lista1 > lista3
!paste -d " " lista2 lista3 > listaimhead
cl < listaimhead
!cat header* | grep RVC > rvc.txt
!sed -e 's/HIERARCH ESO DRS CCF RVC =//g' -e 's/\/ Baryc RV (drift corrected) (km\/s)/isvel+/g' rvc.txt > rvc2.txt
!ls -1 *s1d_A.fits > spectra1
!sed -e 's/HARPS/dopcor HARPS/g' spectra1 > spectra2
!sed -e 's/HARPS/H/g' -e 's/_s1d_A/d/g' spectra1 > spectra3
!paste -d " " spectra2 spectra3 rvc2.txt > listadopcor
cl < listadopcor
```

Figura A.1: Script1.

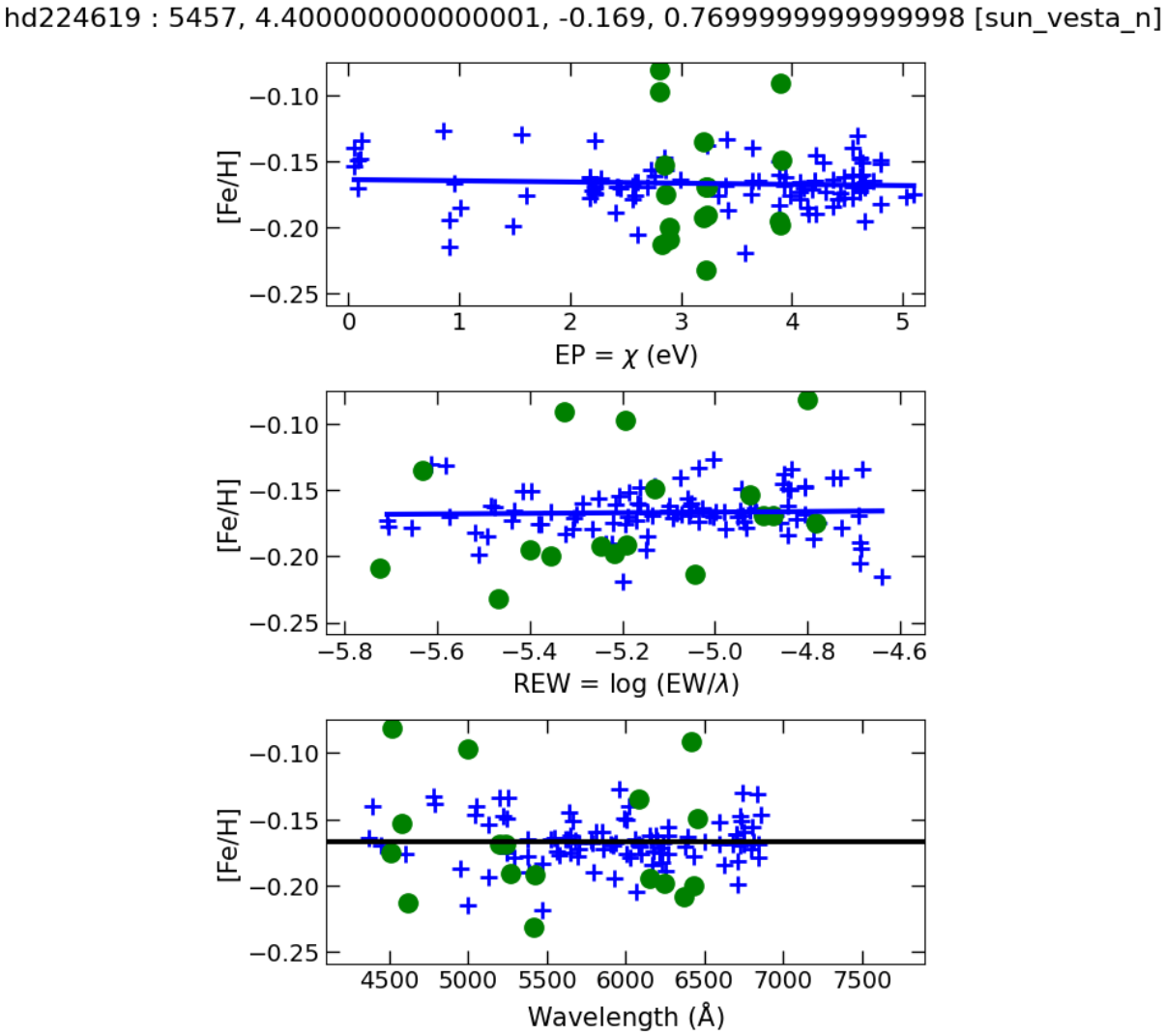

Figura A.2: HD224619

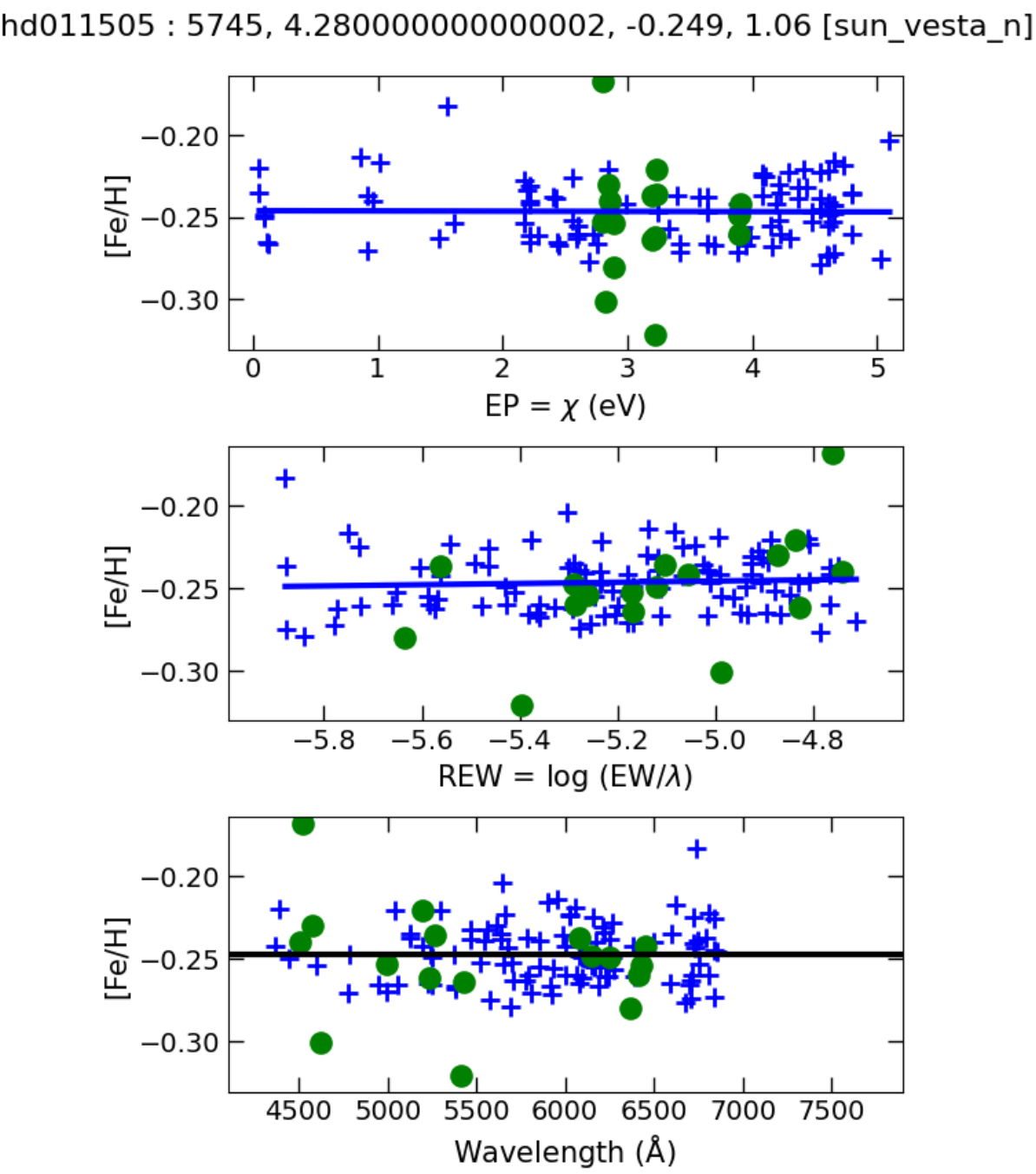

Figura A.3: HD011505

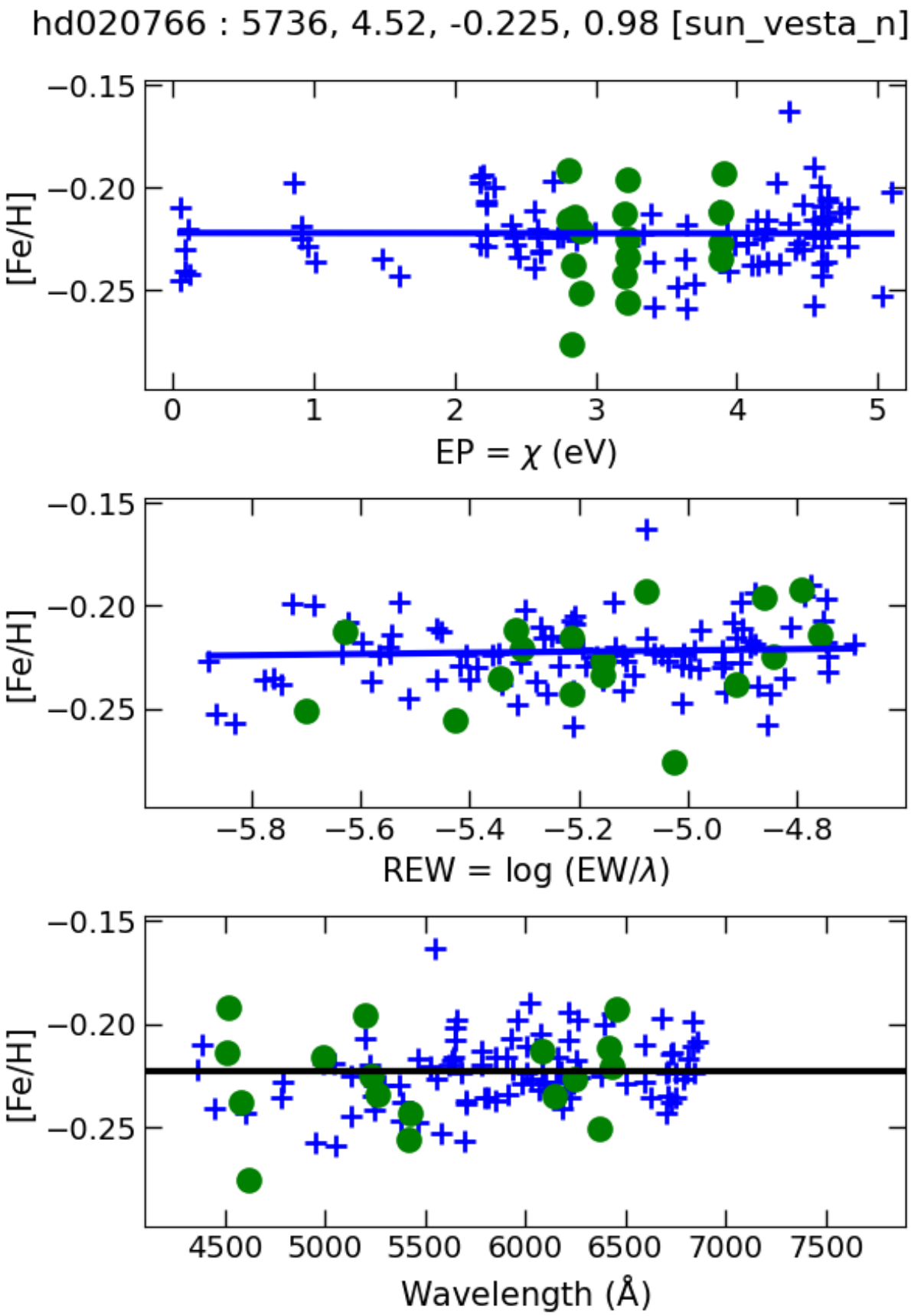

Figura A.4: HD020766

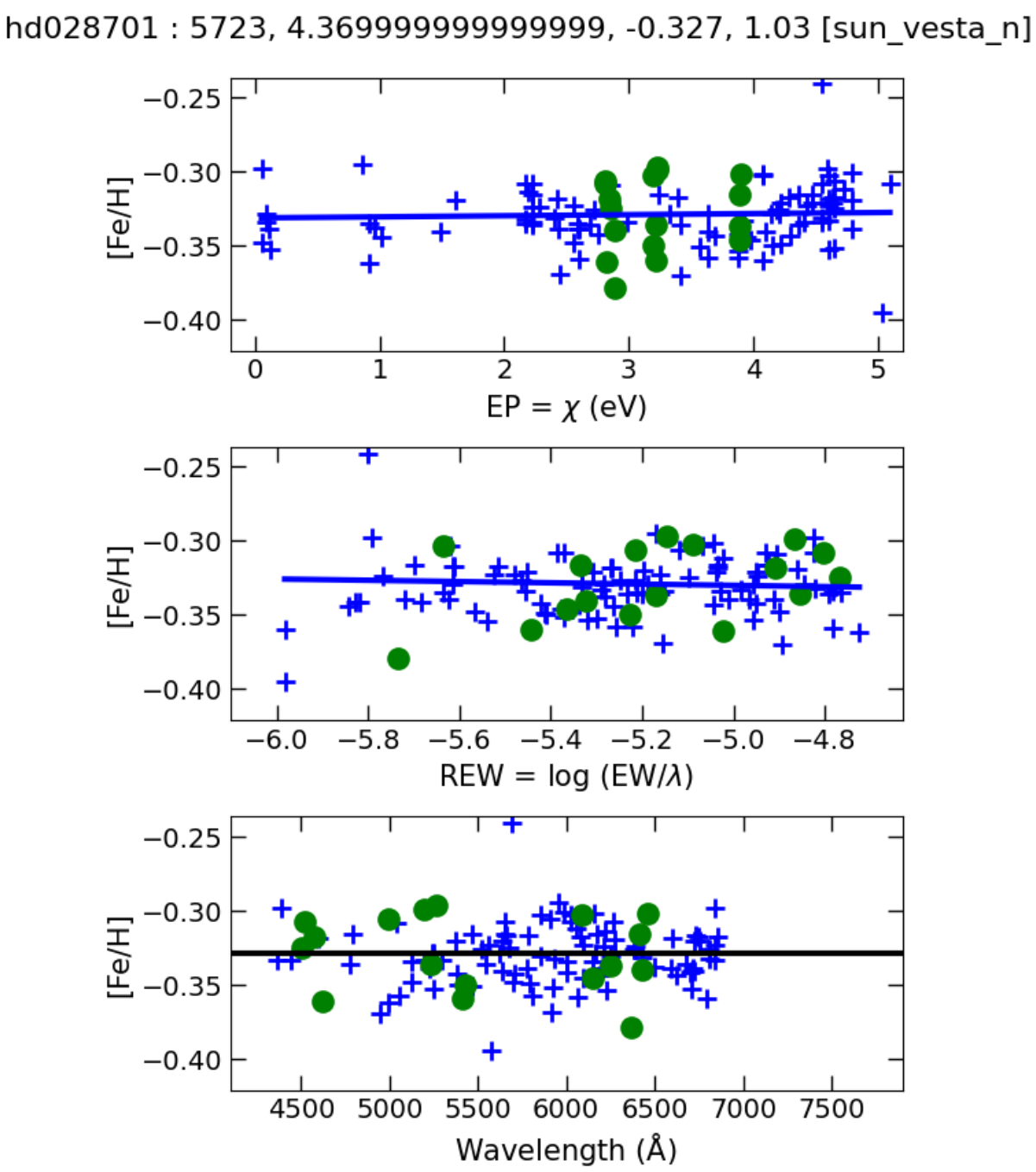

Figura A.5: HD028701

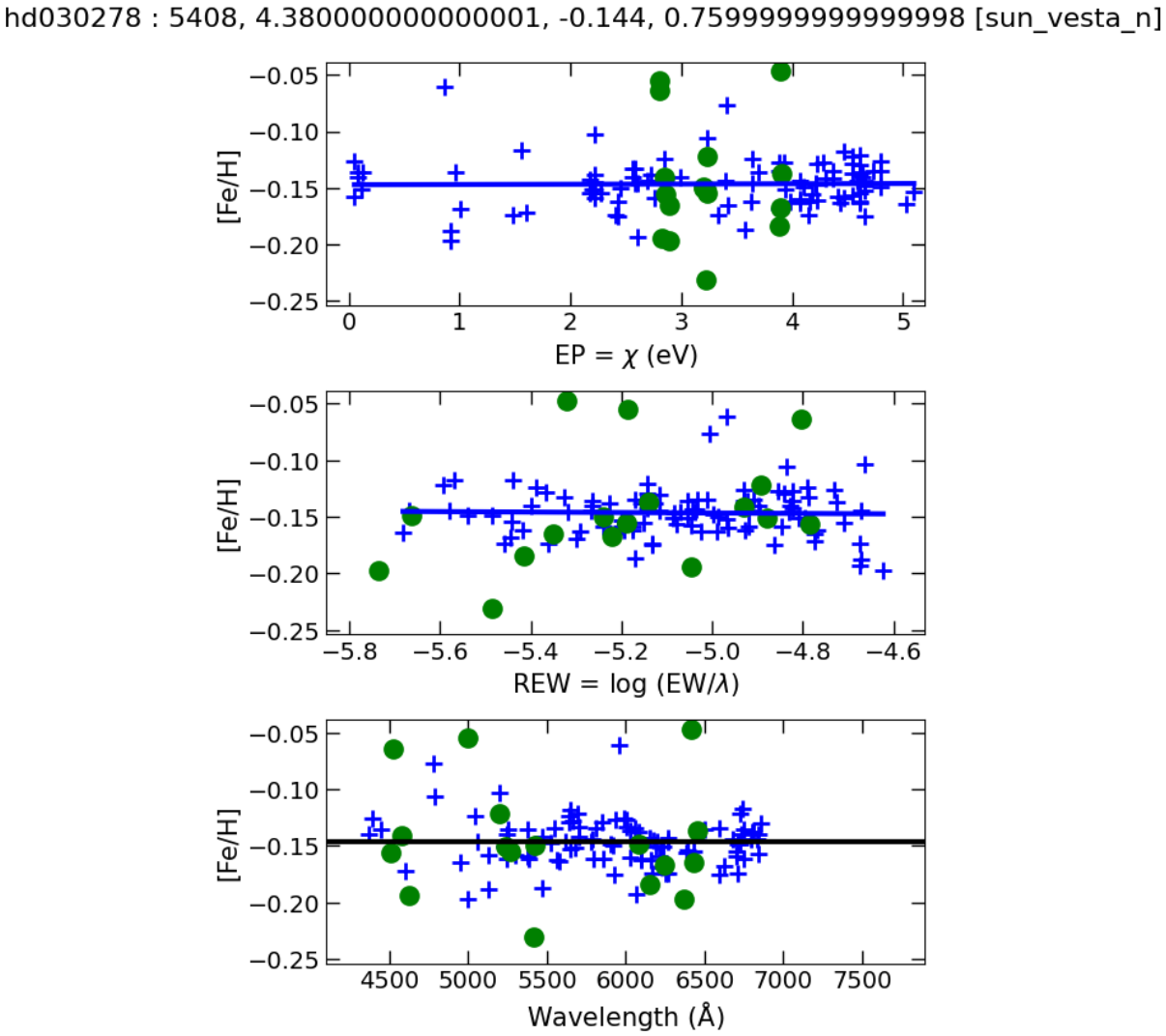

Figura A.6: HD030278

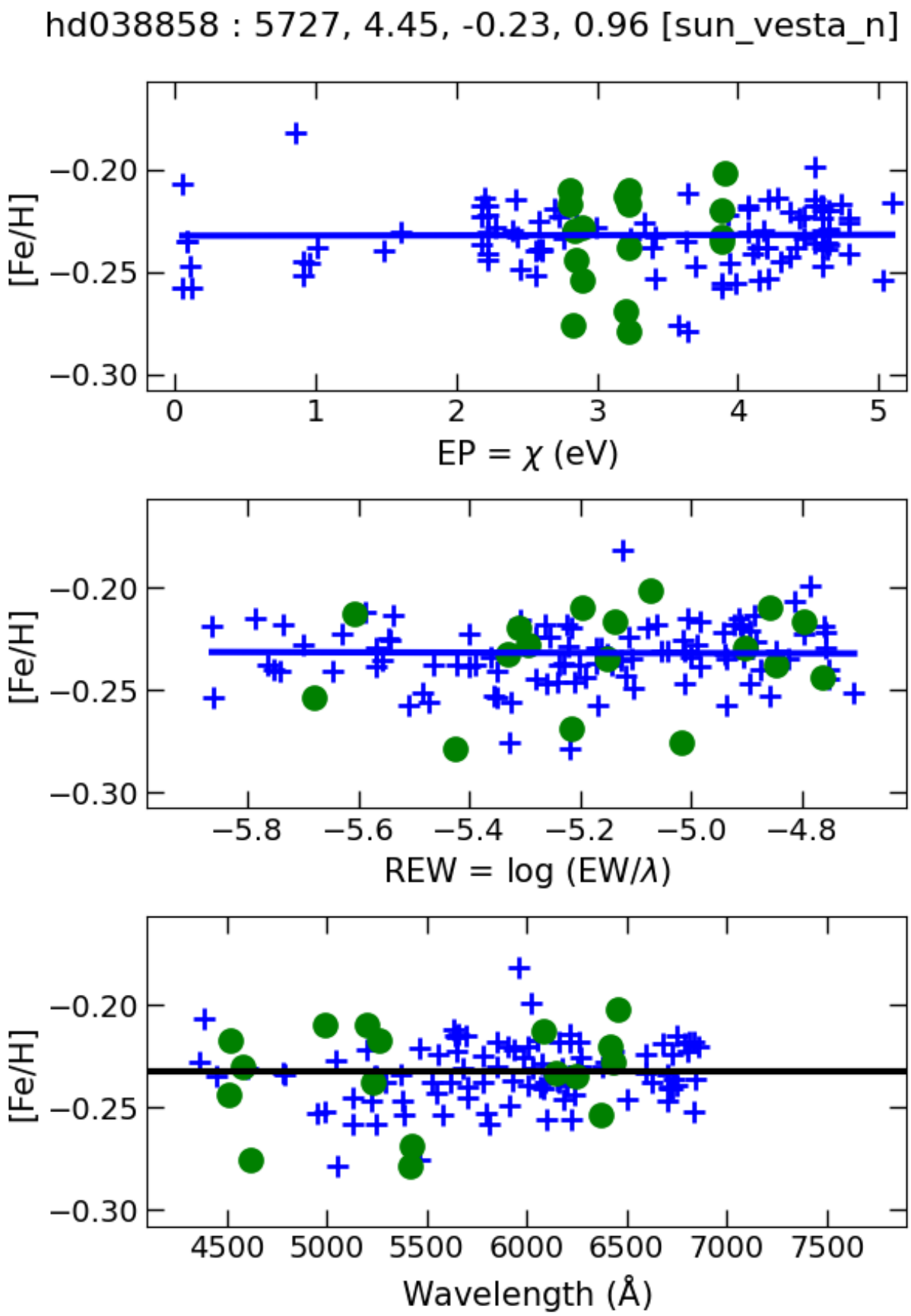

Figura A.7: HD038858

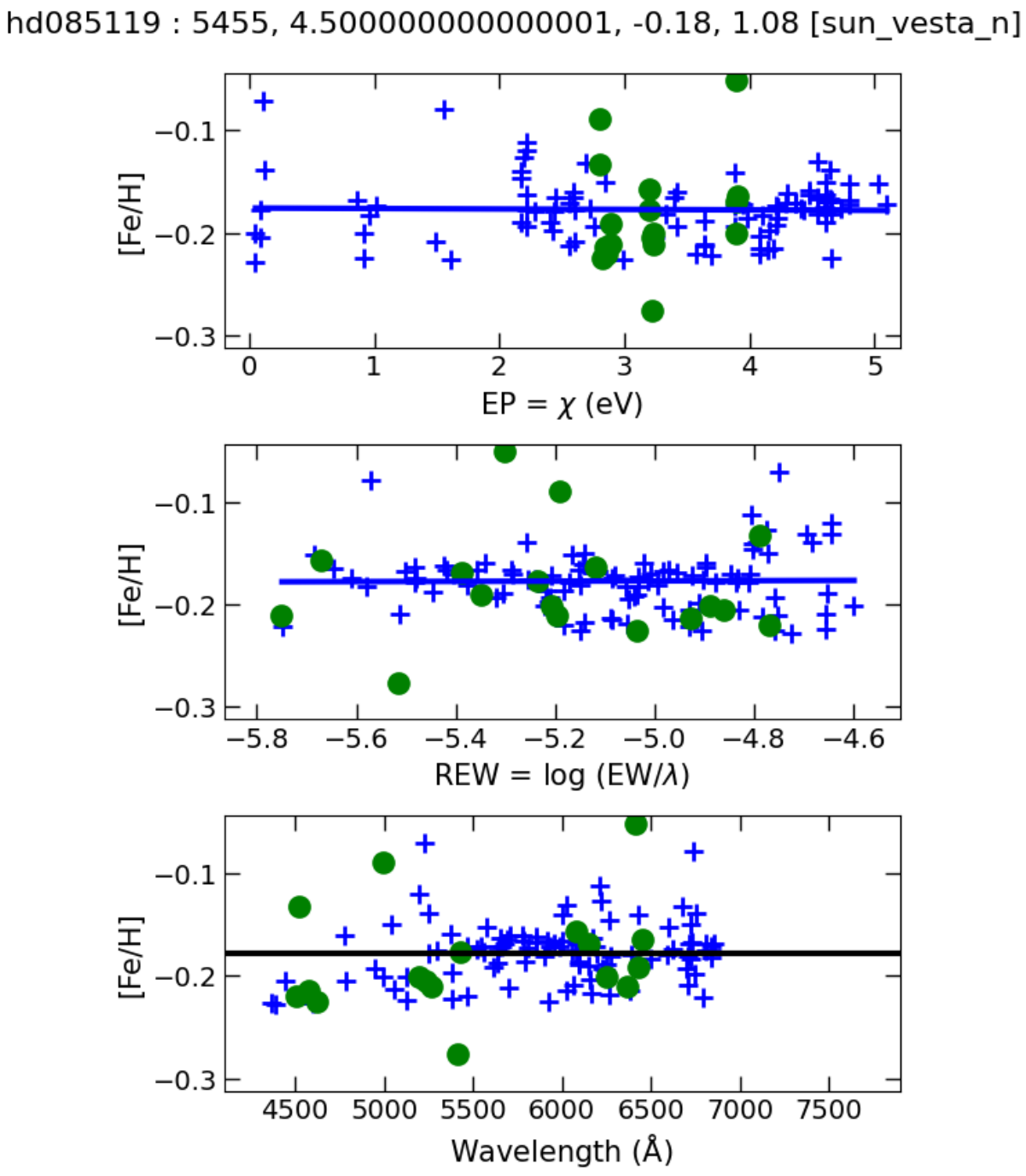

Figura A.8: HD085119

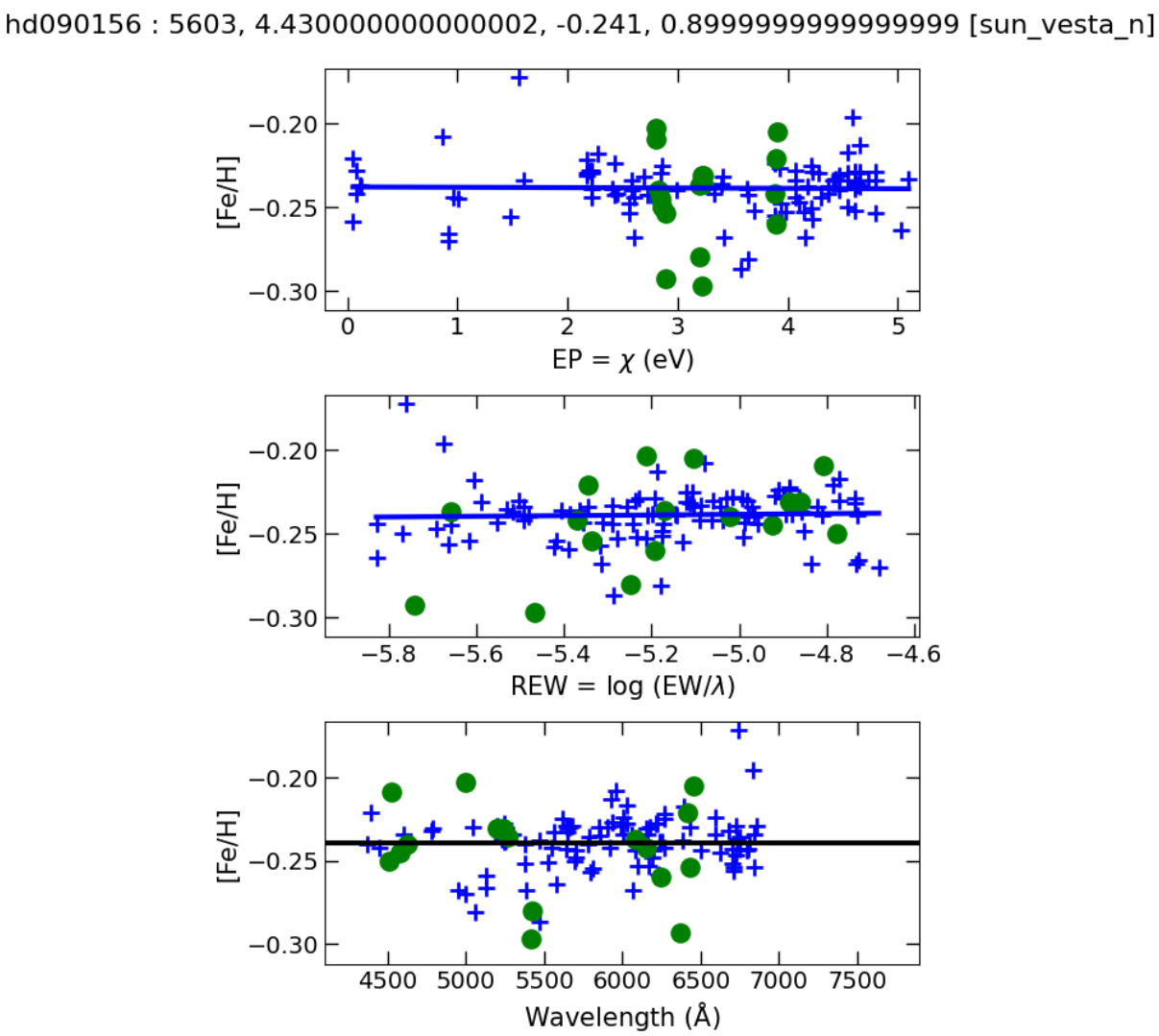

Figura A.9: HD090156

hd102365 : 5639, 4.442500000000001, -0.312, 0.8724999999999998 [sun_vesta_n]

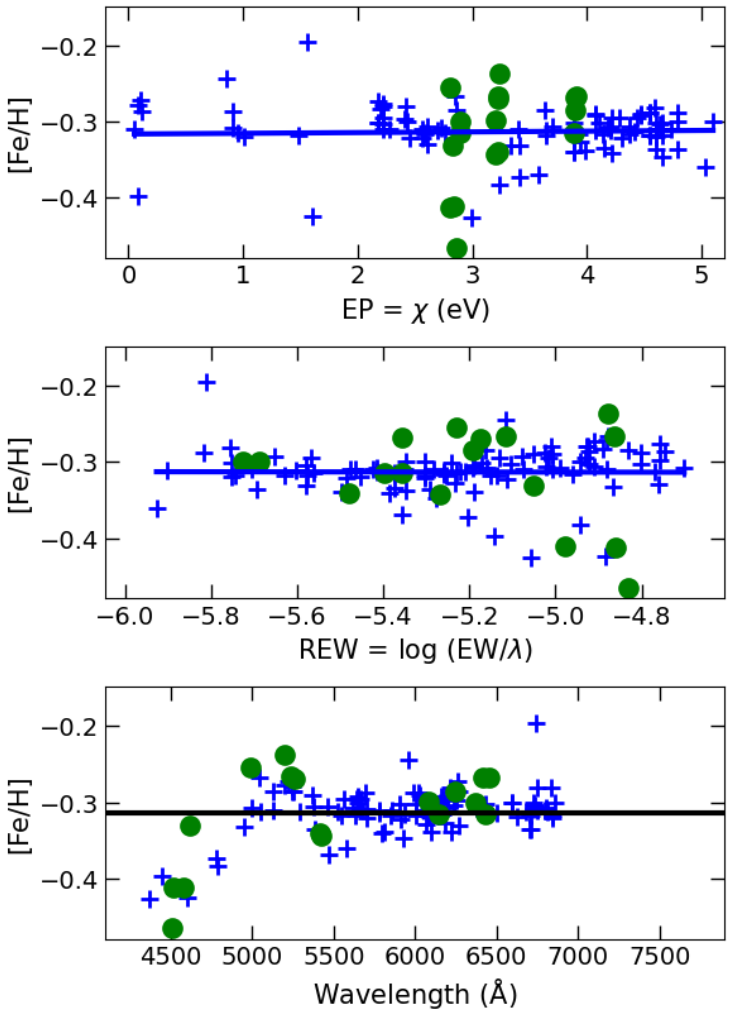

Figura A.10: HD114853

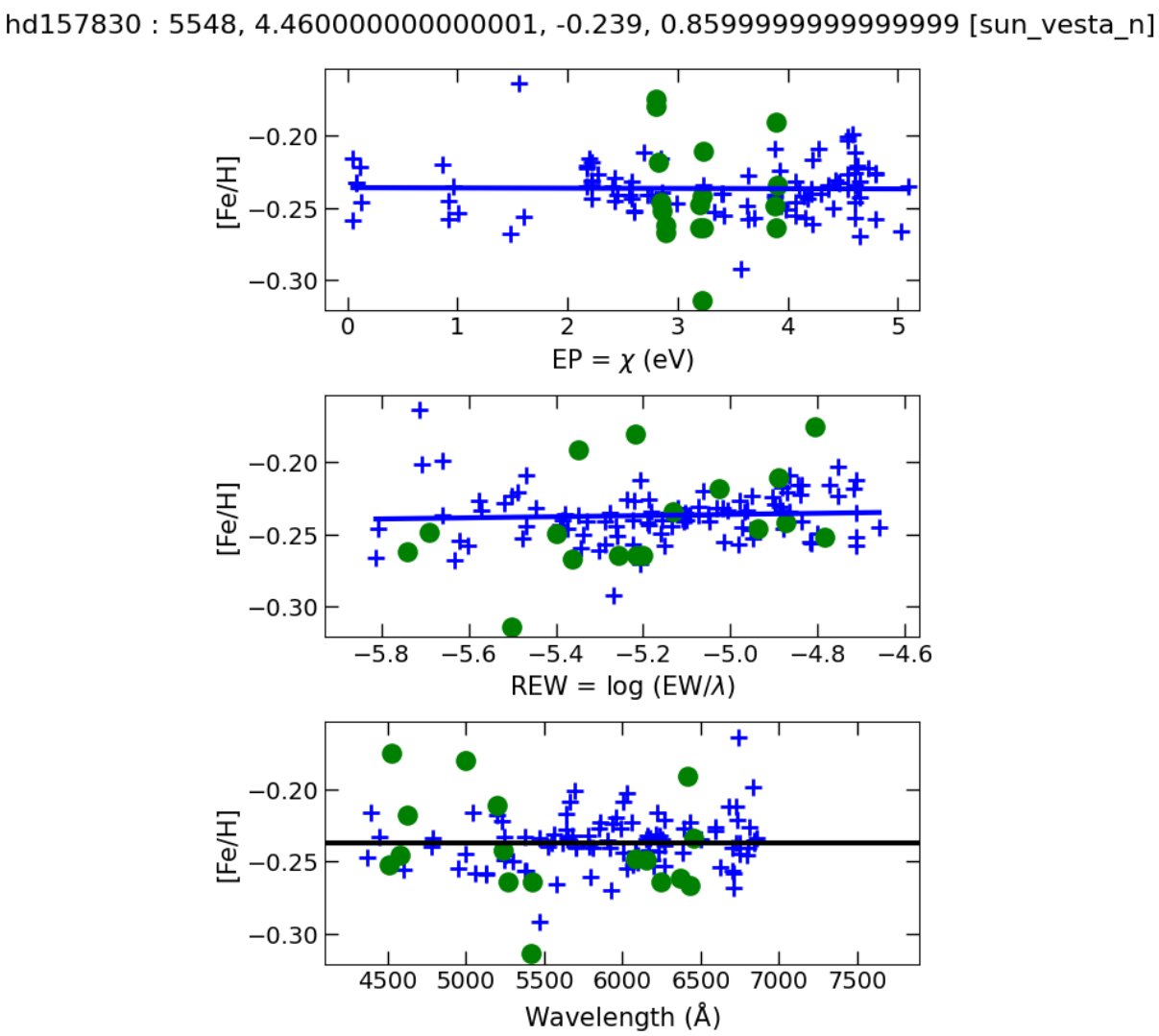

Figura A.11: HD157830

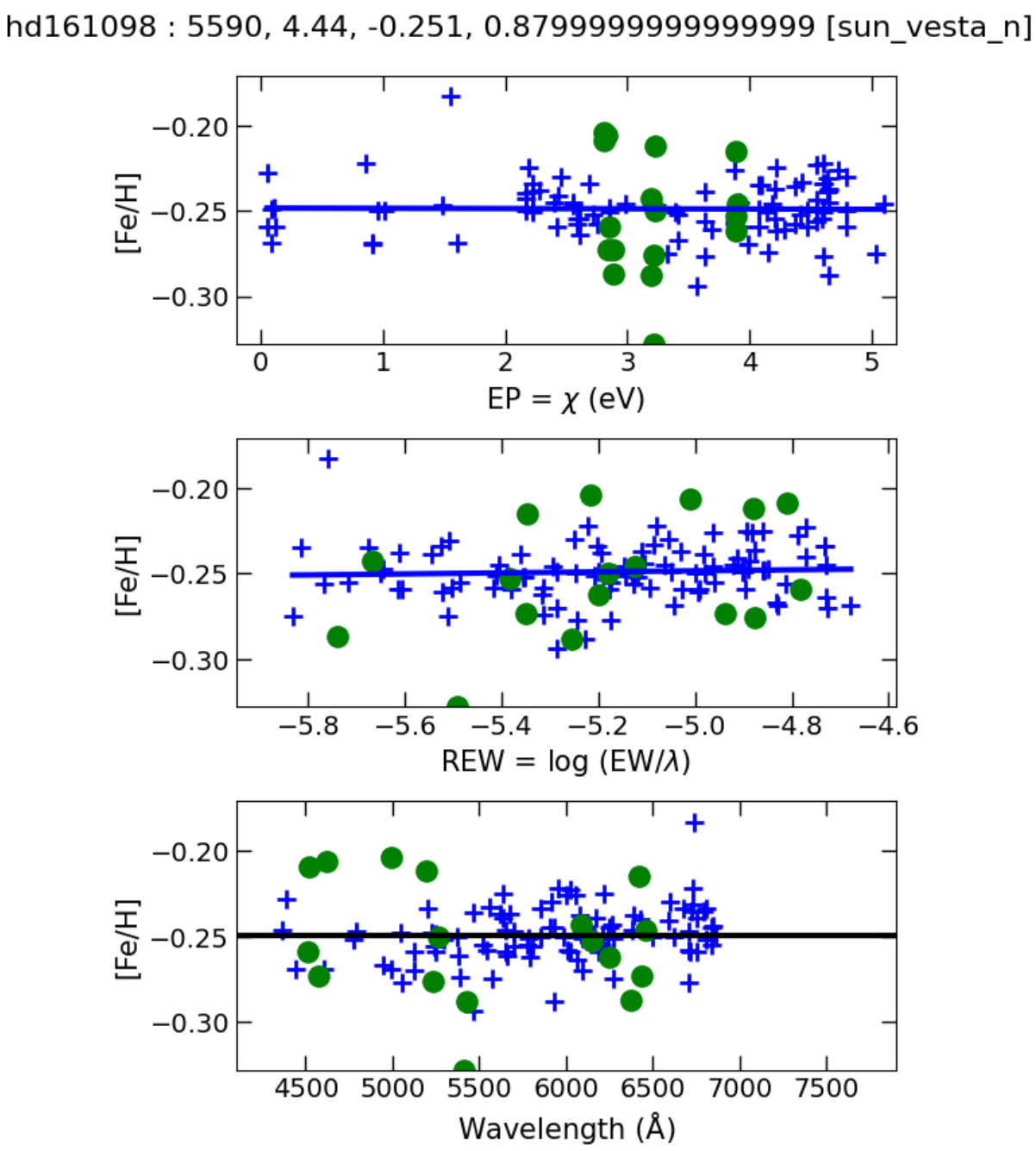

Figura A.12: HD161098

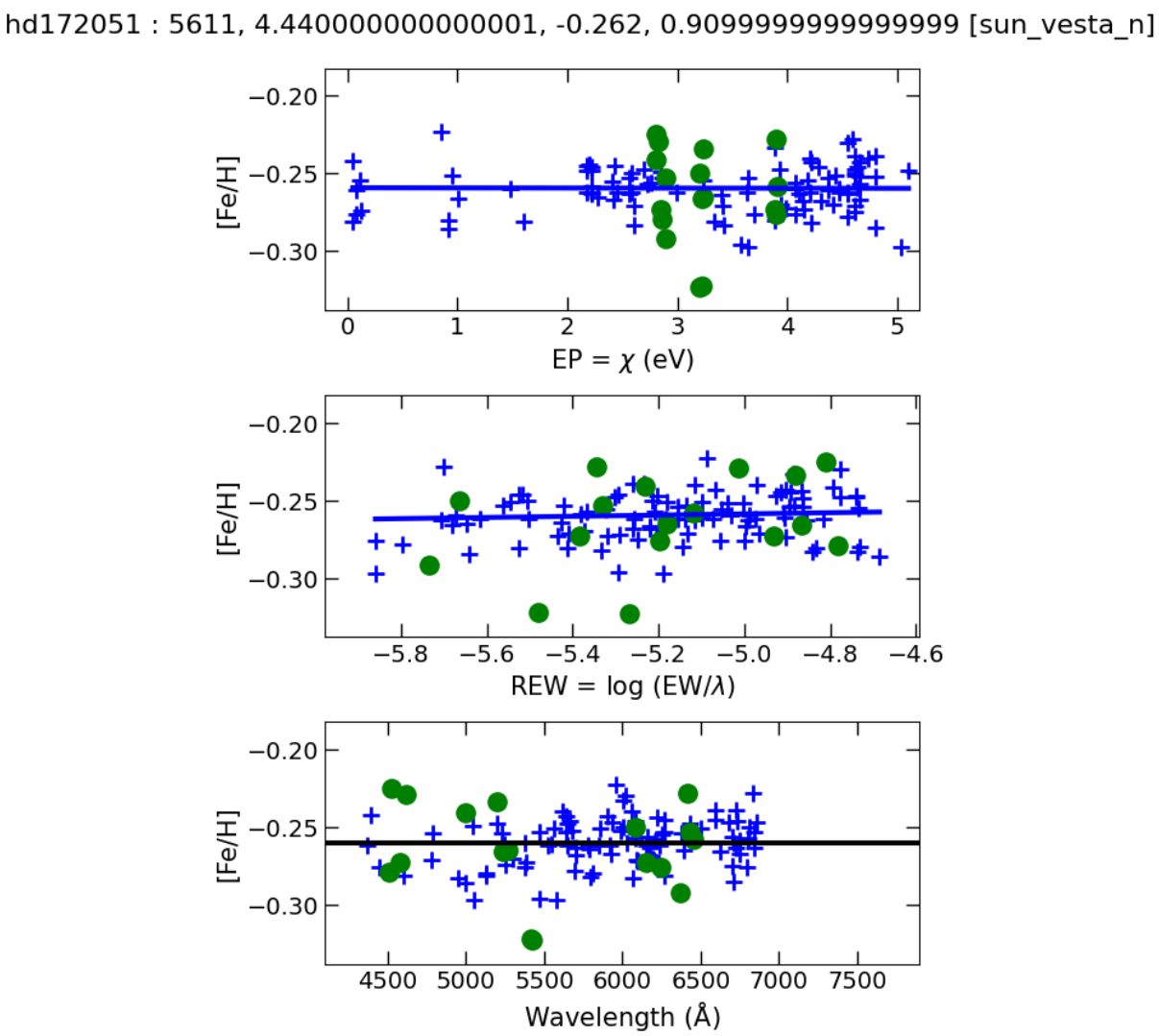

Figura A.13: HD172051

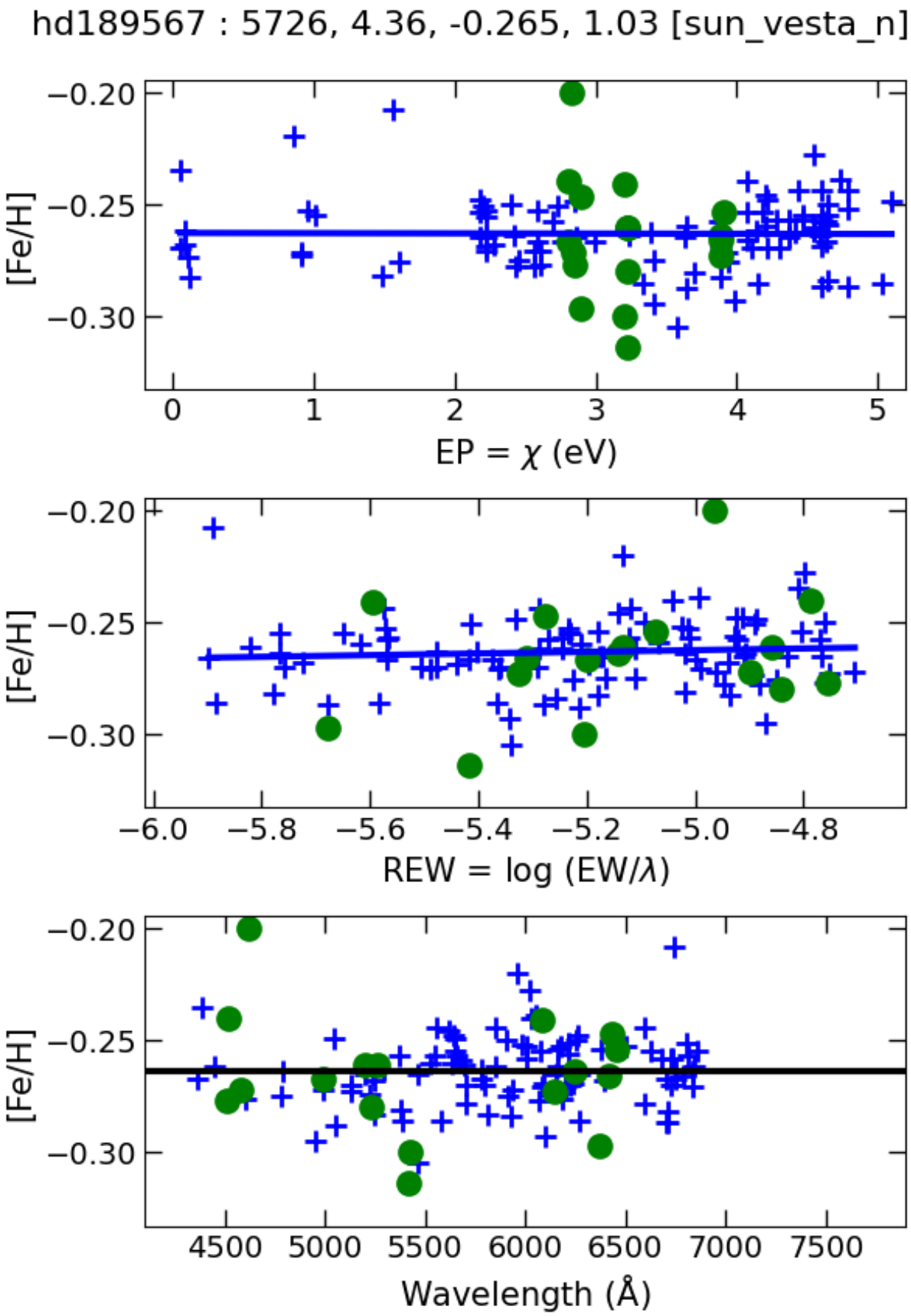

Figura A.14: HD189567

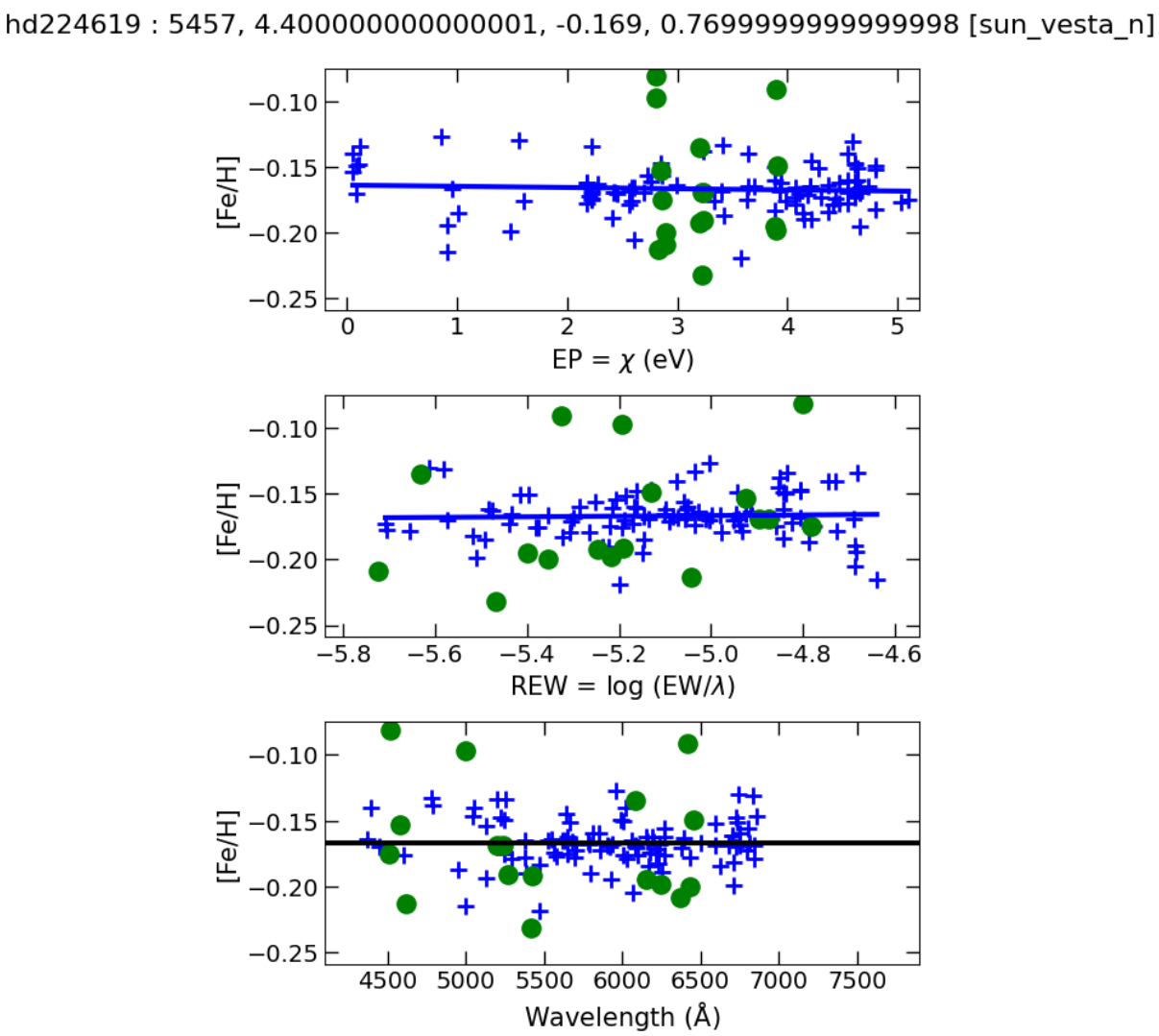

Figura A.15: HD224619

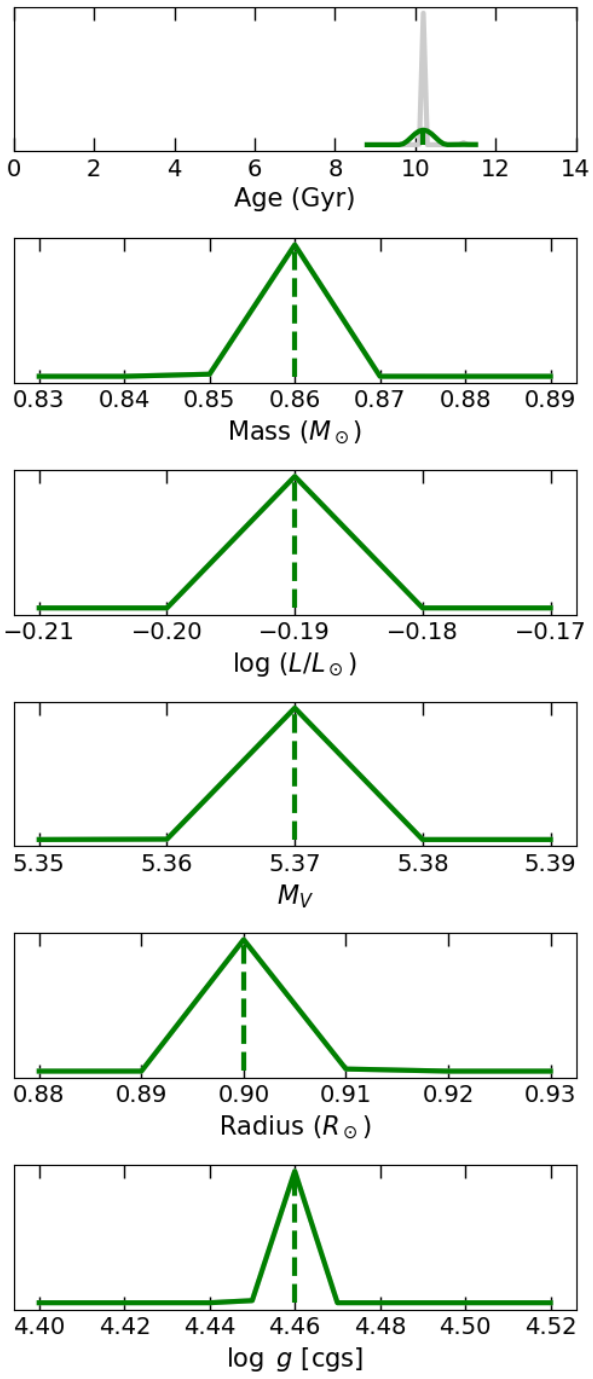

Figura A.16: HD224619

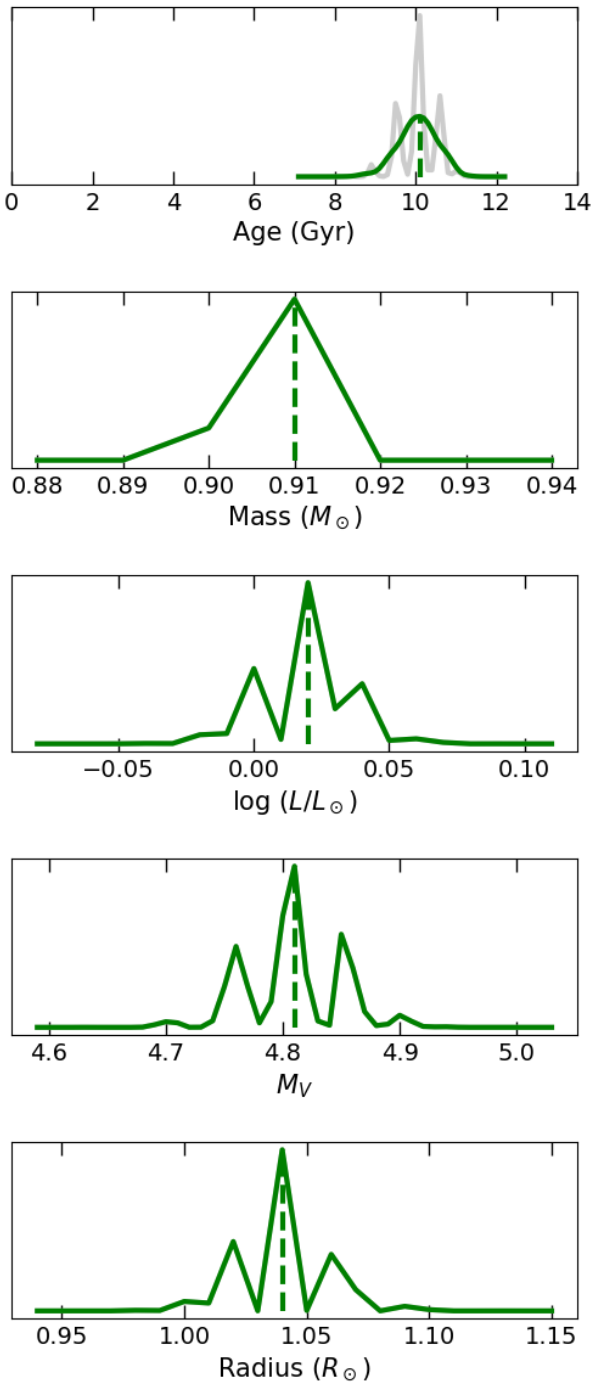

Figura A.17: HD189567

Figura A.18: Gráficos dos parâmetros adicionais.

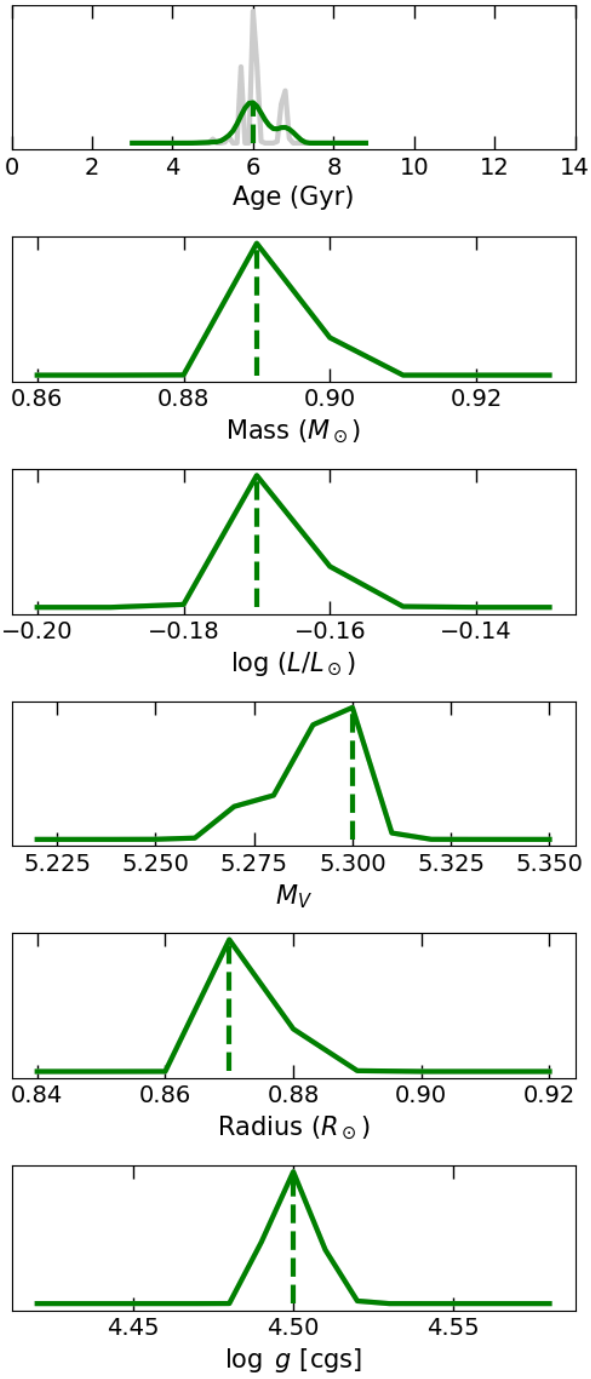

Figura A.19: HD172051

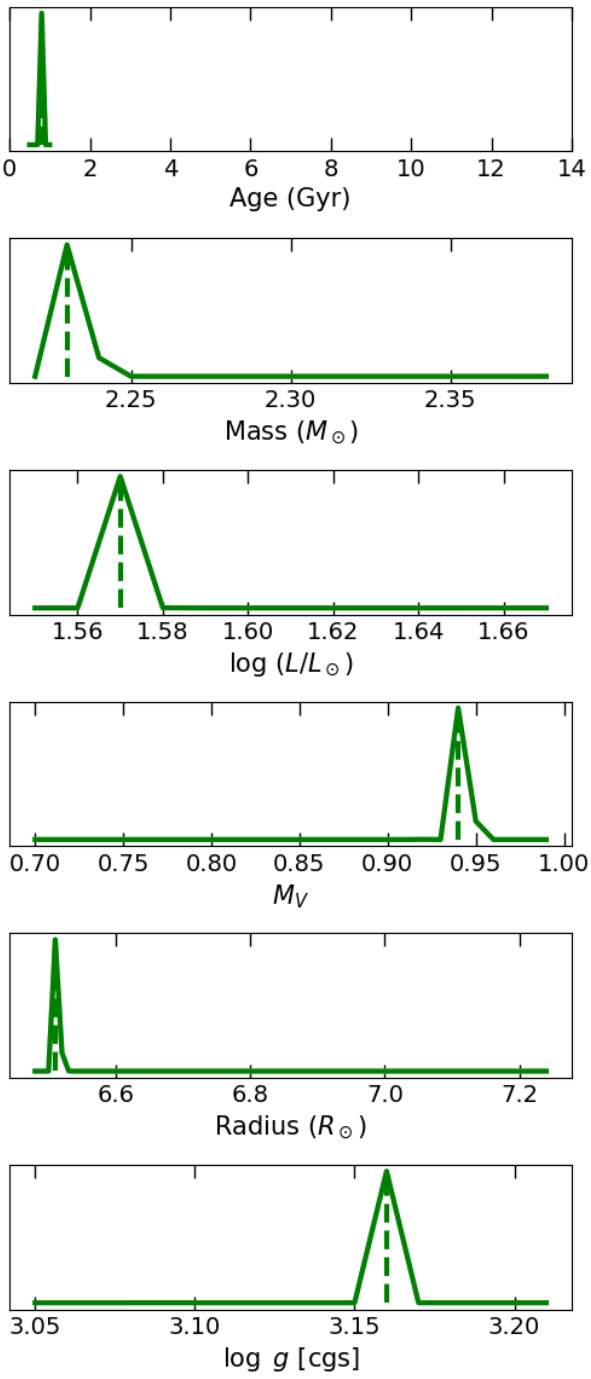

Figura A.20: HD161098

Figura A.21: Gráficos dos parâmetros adicionais.

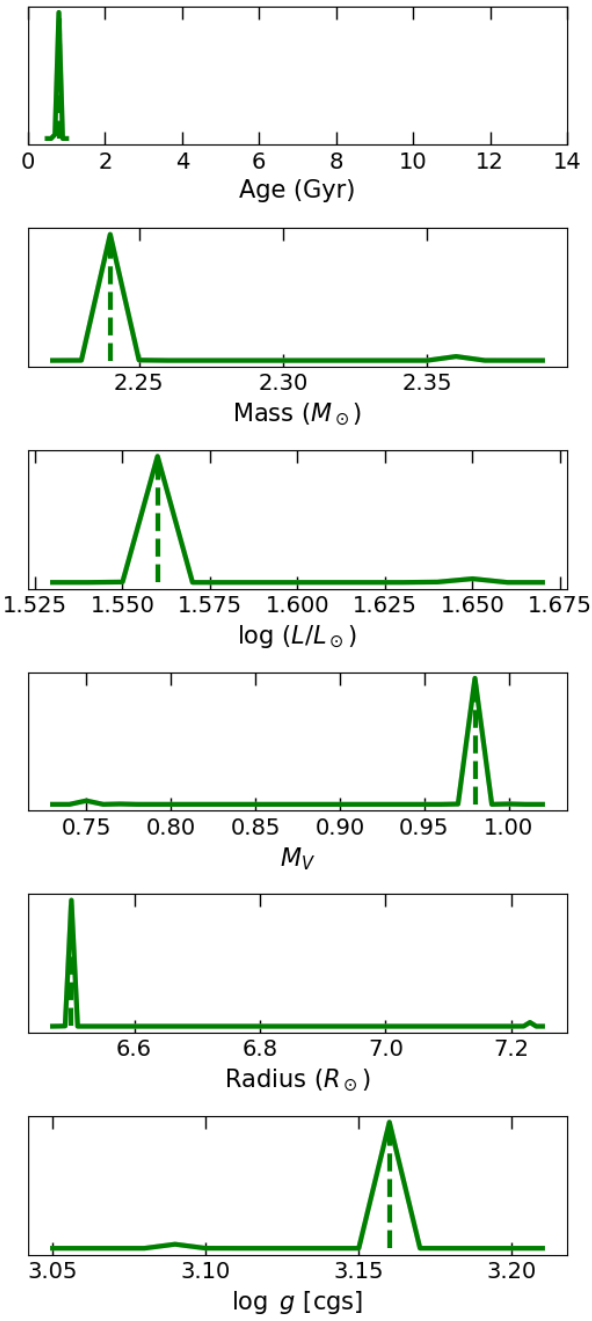

Figura A.22: HD157830

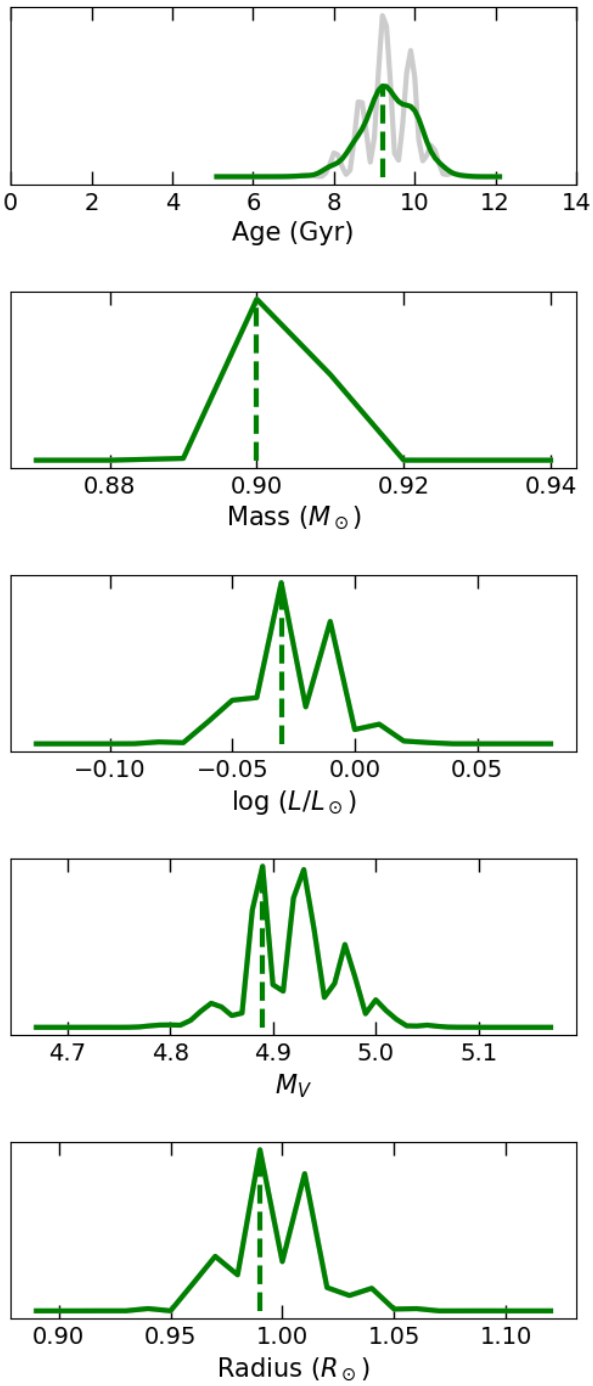

Figura A.23: HD114853

Figura A.24: Gráficos dos parâmetros adicionais.

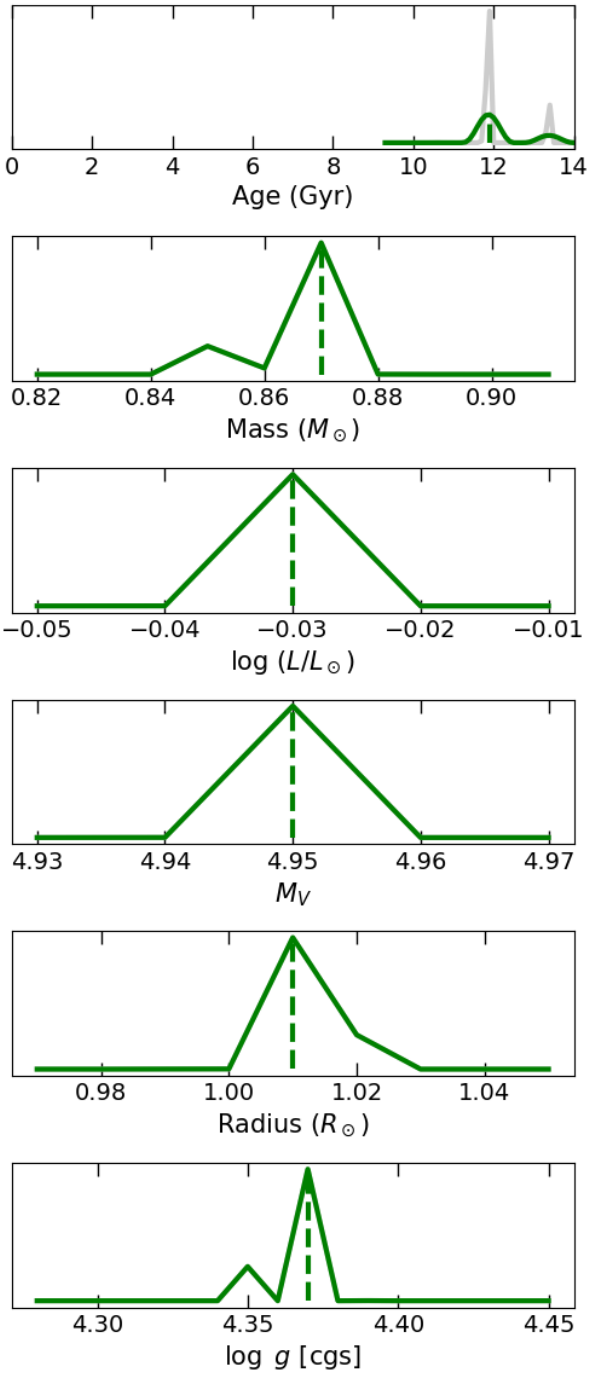

Figura A.25: HD102365

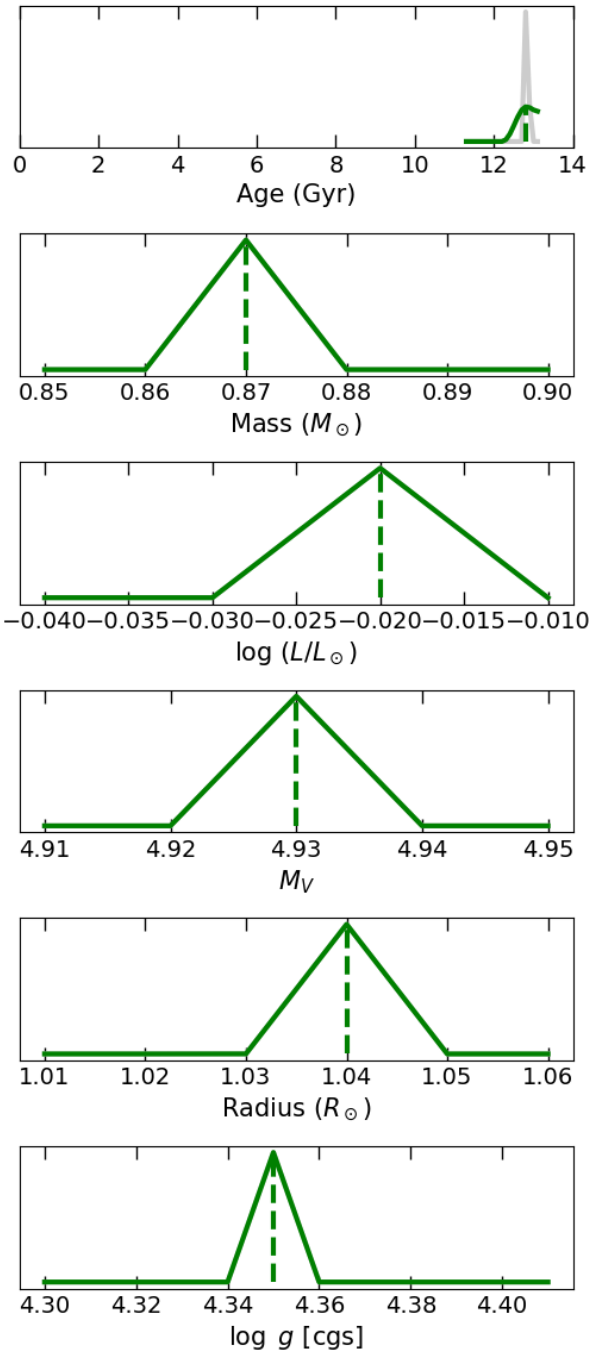

Figura A.26: HD090156

Figura A.27: Gráficos dos parâmetros adicionais.

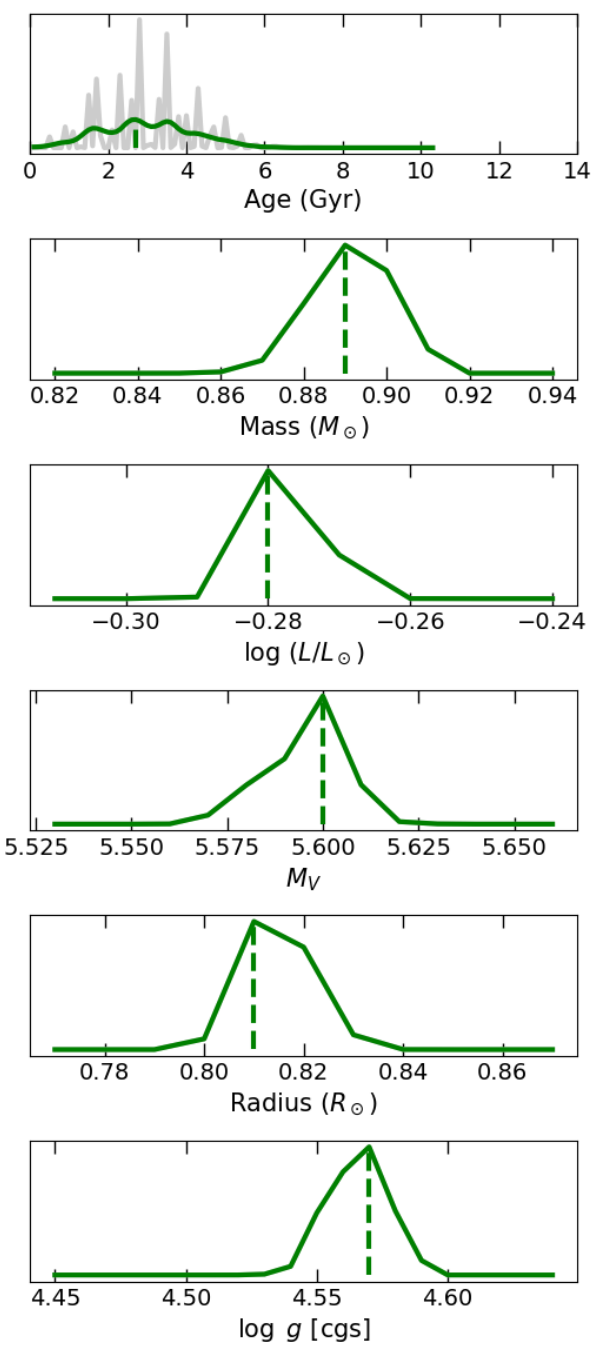

Figura A.28: HD085119

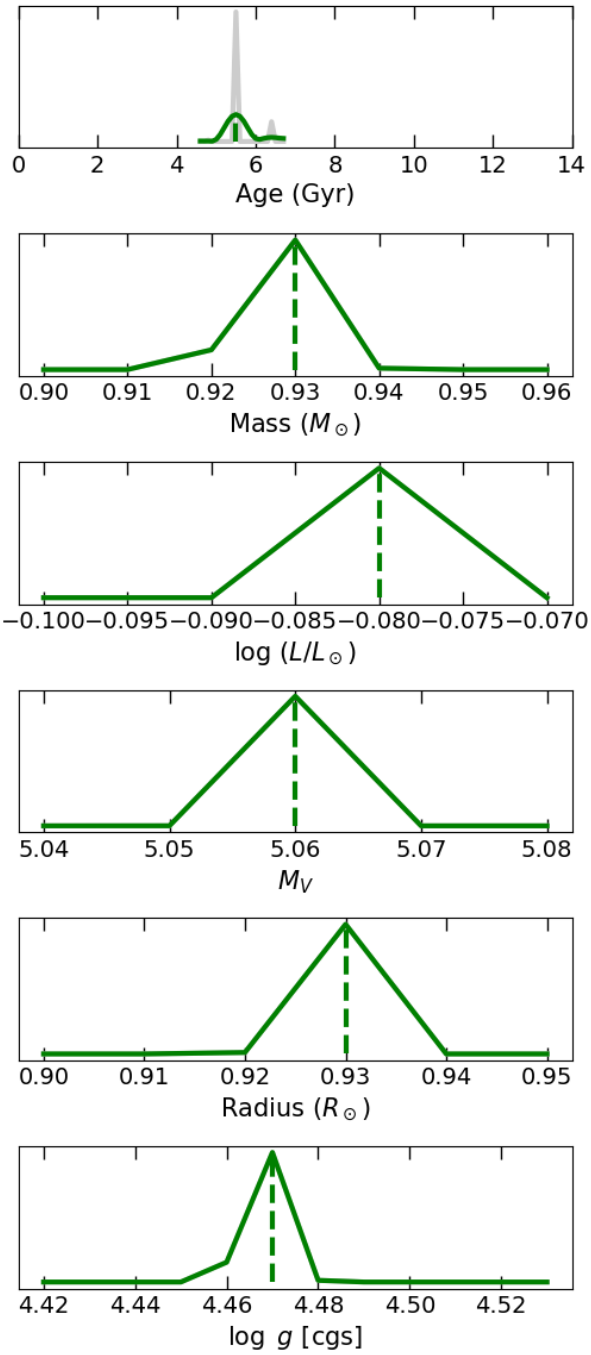

Figura A.29: HD038858

Figura A.30: Gráficos dos parâmetros adicionais.

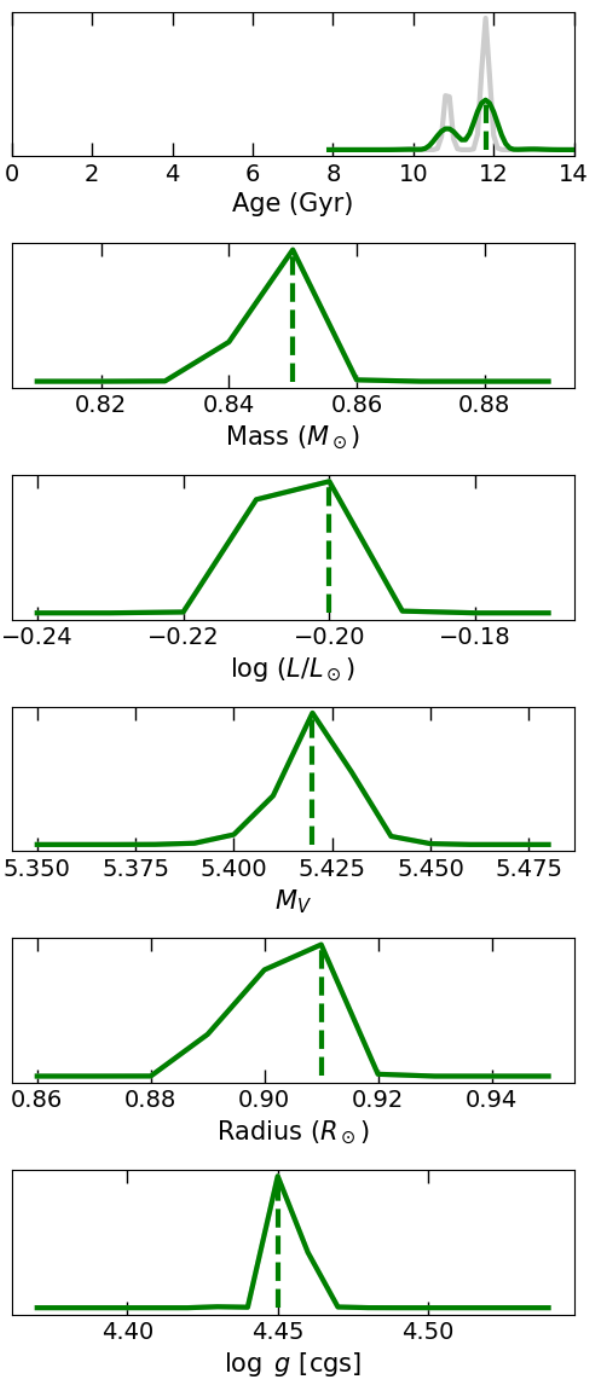

Figura A.31: HD030278

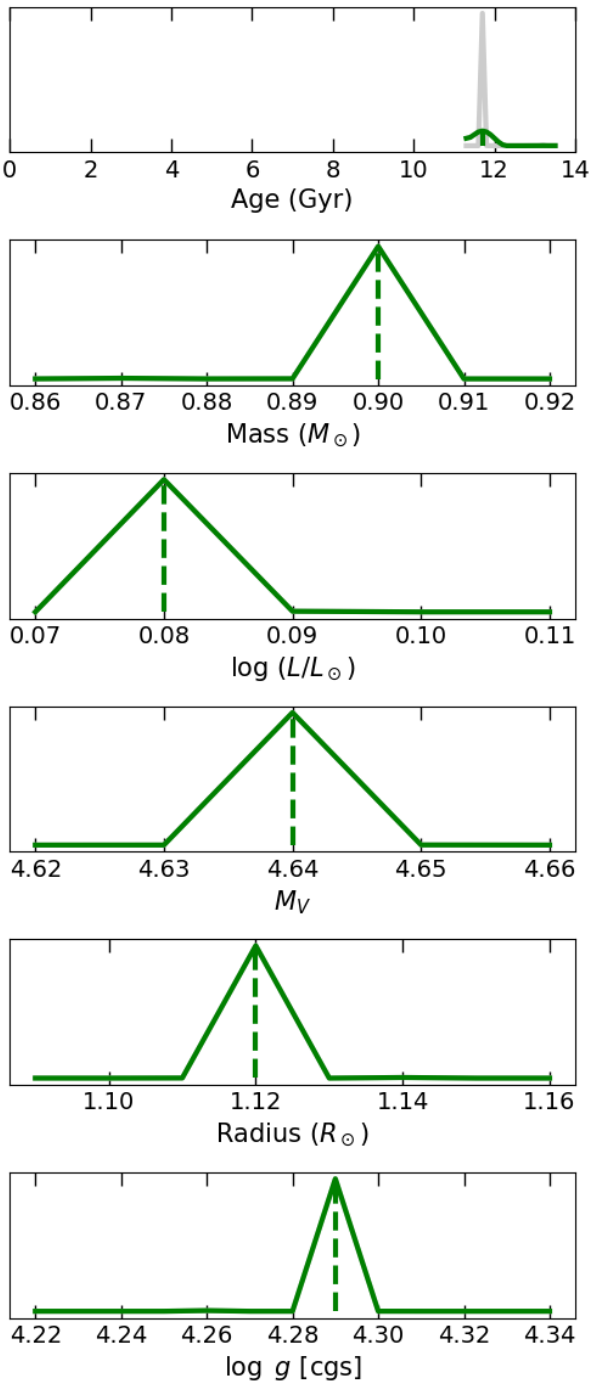

Figura A.32: HD028701

Figura A.33: Gráficos dos parâmetros adicionais.

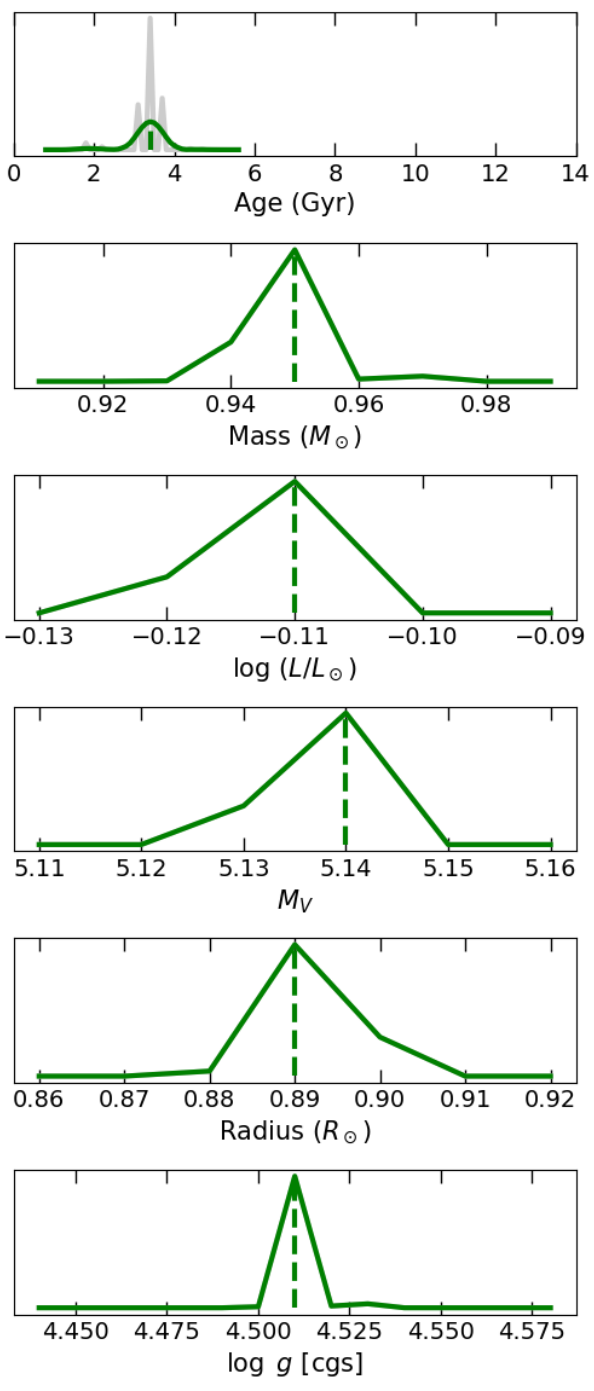

Figura A.34: HD020766

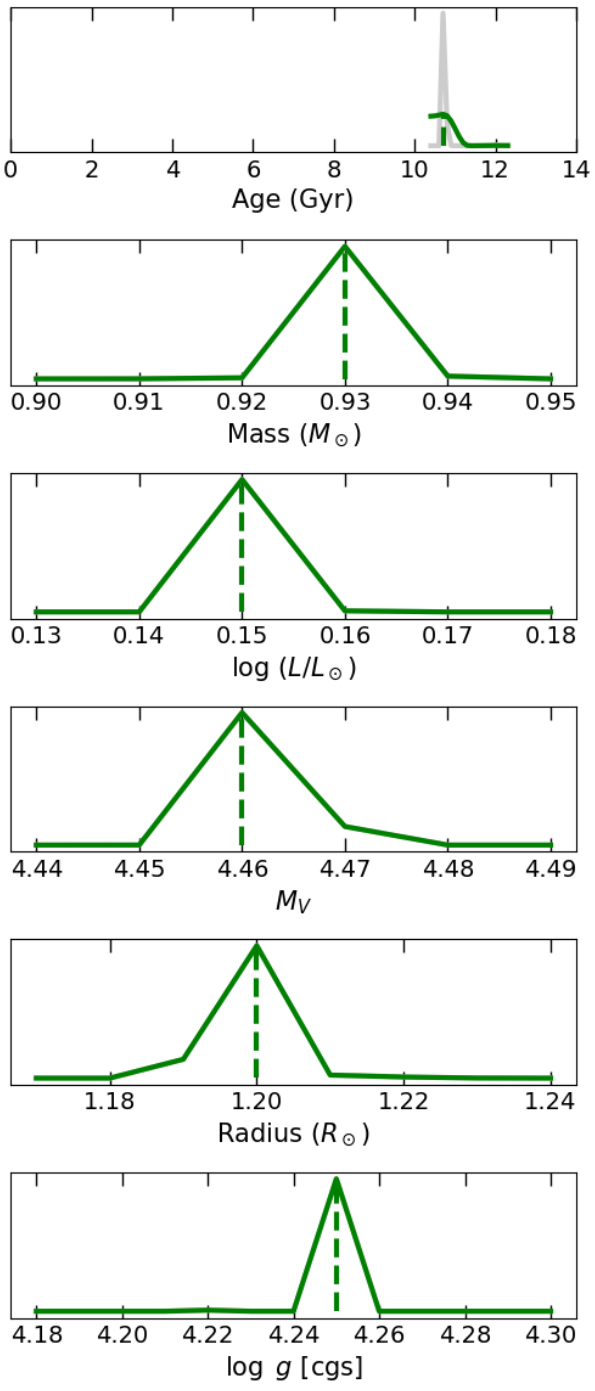

Figura A.35: HD011505

Figura A.36: Gráficos dos parâmetros adicionais.

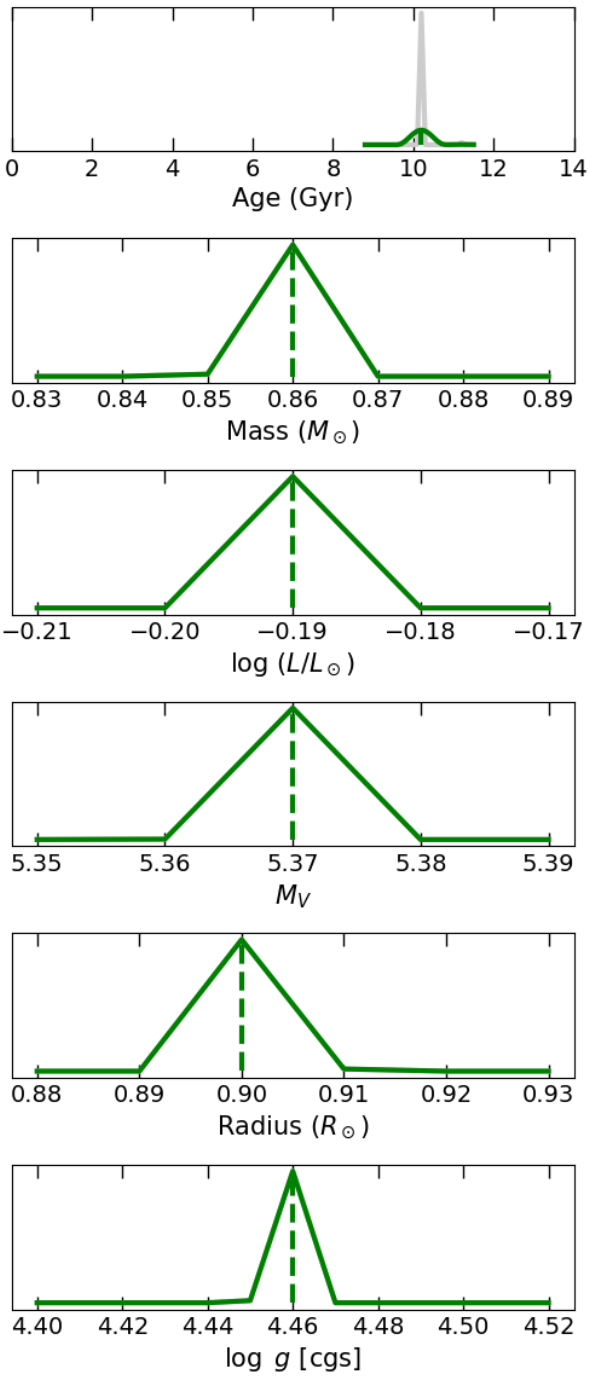

Figura A.37: HD224619

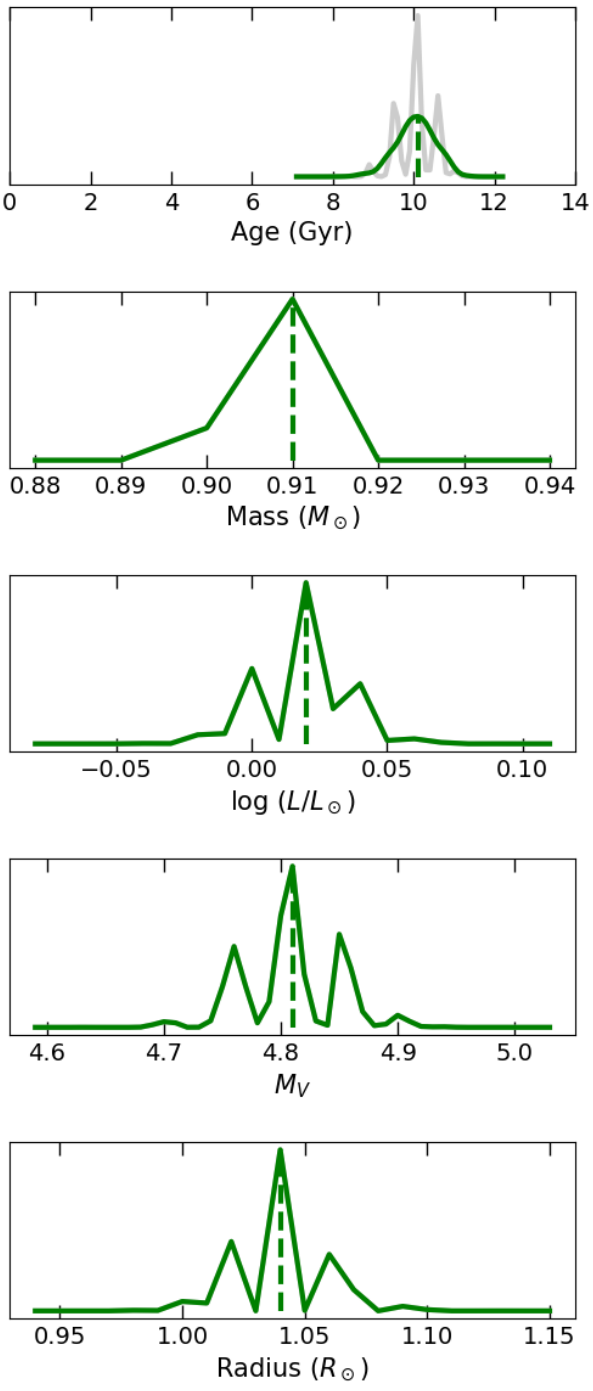

Figura A.38: HD189567

Figura A.39: Gráficos dos parâmetros adicionais.

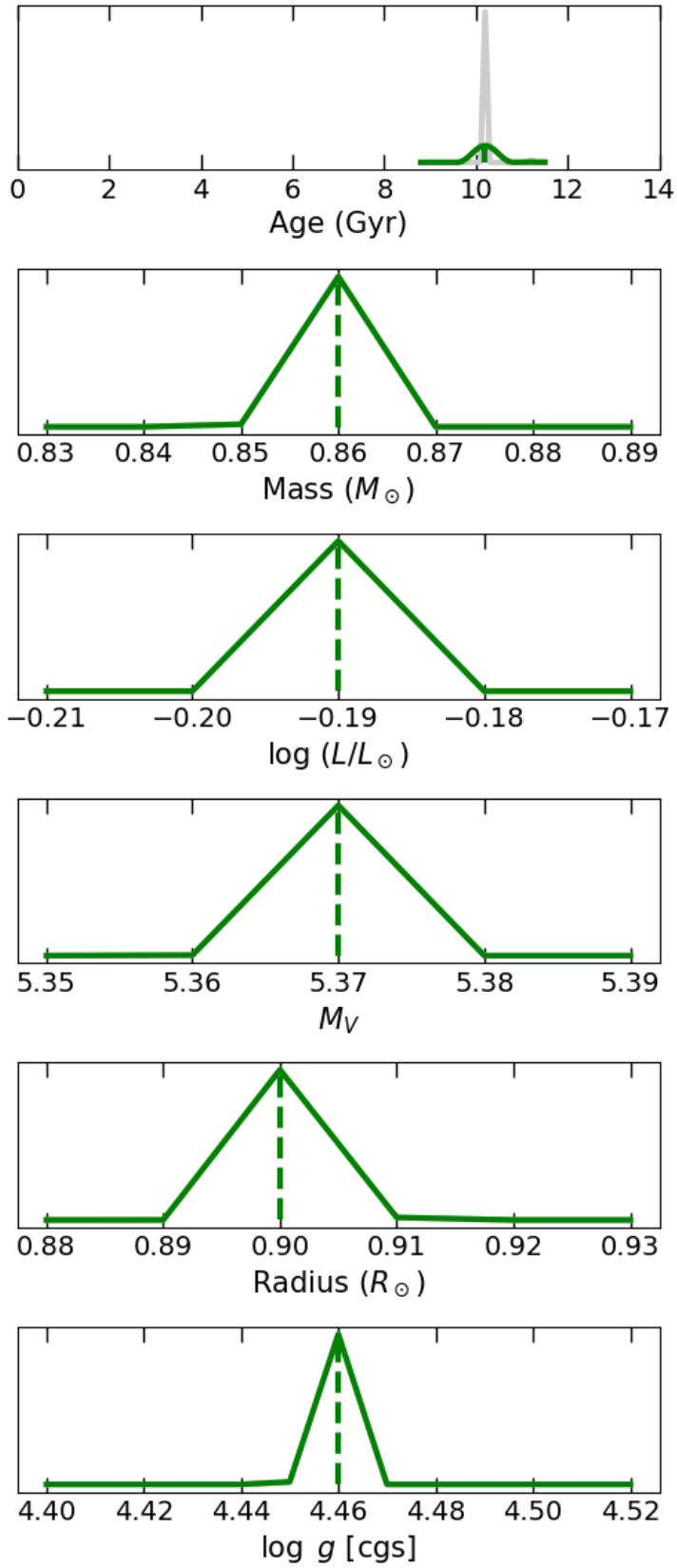

Figura A.40: HD224619