

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

Guilherme Fabricio Bolutavicius

**Caracterização das distribuições de
metalicidade de sub-estruturas do halo da
Galáxia utilizando o S-PLUS**

São Paulo

2023

Guilherme Fabricio Bolutavicius

Caracterização das distribuições de metalicidade de sub-estruturas do halo da Galáxia utilizando o S-PLUS

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

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Claudia Lucia Men-
des de Oliveira

Co-orientador: Dr. Felipe de Almeida Fer-
nandes

São Paulo

2023

à minha família, meus amigos e todos que me ajudaram nesse caminho.

Agradecimentos

À minha família por todo o amor e carinho por mim, além da ilimitada curiosidade no meu trabalho;

Aos meus pais, Estela Fabricio Bolutavicius e Marcelo Bolutavicius, em especial, pelo apoio incondicional e incentivo em tudo que me proponho a aventurar;

A Sâmara Cecilia Rocha de Carvalho, meu amor, por todo o apoio emocional nesses tempos conturbados;

A minha orientadora Claudia Lucia Mendes de Oliveira por ter me acolhido no S-PLUS e pela confiança em mim;

Ao meu co-orientador Felipe de Almeida Fernandes por toda a paciência comigo e ensinamentos de vida nesses anos que trabalhamos juntos;

A todos os professores e funcionários do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP.

*“Equipado com seus cinco sentidos, a humanidade explora o universo ao seu redor e
chama a aventura de ciência.”*

Edwin P. Hubble.

“Quanto mais o universo parece compreensível, mais também parece sem sentido.”

Steven Weinberg.

Resumo

O modelo da concordância cósmica Λ CDM prevê uma formação hierárquica das galáxias, a partir de *mergers* de maior e menor escala. Diversas sub-estruturas encontradas no halo da Galáxia são usualmente associadas a esses processos de canibalização de outras galáxias anãs. Este trabalho tem como objetivo estudar as distribuições de metalicidade (*Metallicity Distribution Functions*, ou MDFs) obtidas para algumas dessas sub-estruturas. Neste estudo, utilizamos metalicidades fotométricas obtidas a partir das magnitudes do levantamento S-PLUS (4th Data Release interno). Consideramos metalicidades determinadas através de vários métodos como *random forest*, redes neurais ou ajuste de isócronas. A classificação das estrelas do halo em cada subestrutura foi baseada em dados cinemáticos do 3rd Data Release do Gaia, convertidos em integrais de movimento (E , L_z e L_\perp) e informações gerais da órbita (e.g. excentricidade) com o pacote **galpy**. A seleção então foi feita a partir de critérios estabelecidos previamente na literatura. Foi possível observar que, de modo geral, a escolha entre diferentes seleções usualmente empregadas não impacta severamente as MDFs, e as metalicidades médias de cada subestrutura são compatíveis não só entre as seleções, mas também com os valores reportados em estudos espectroscópicos (e.g. utilizando o APOGEE). As magnitudes do S-PLUS permitem uma boa estimativa das metalicidades, principalmente devido aos filtros estreitos que são centrados em linhas sensíveis aos parâmetros atmosféricos das estrelas. Obtivemos idades similares entre si, em torno de 10 Gyr, para todas as seleções. Apesar de as amostras fotométricas, em geral, serem menos precisas na determinação de parâmetros estelares, obtivemos uma vantagem numérica considerável. O estudo destas sub-estruturas contribui para uma melhor descrição da série de eventos que formaram o halo da nossa galáxia.

Abstract

The cosmic concordance model Λ CDM predicts a hierarchical formation of galaxies, with larger and smaller scale mergers. Various substructures found in the halo of the Galaxy are usually associated with these processes of cannibalization of other dwarf galaxies. This work aims to study the metallicity distributions (MDFs) obtained for some of these substructures. In this study, we use photometric metallicities obtained from the magnitudes of the S-PLUS survey (4th Internal Data Release). We consider metallicities determined through several methods such as random forest, neural networks or isochrone fitting. The classification of halo stars in each substructure was based on the kinematic data from the 3rd Gaia Data Release, converted into integrals of motion (E , L_z and L_\perp) and general information of the orbit (e.g. eccentricity) with the code `galpy`. The selection is then made based on criteria previously established in the literature. It was possible to observe that, in general, the choice between different, usually employed, selections does not severely impact MDFs, and the average metallicities of each substructure are compatible not only between different selections, but also with the values reported in spectroscopic studies (e.g. based on APOGEE data). The magnitudes of S-PLUS allow a good estimate of metallicities, mainly due to the narrow-band filters that are centered on lines sensitive to the stellar atmospheric parameters. We obtained similar ages, around 10 Gyr, for all selections. Despite photometric samples, in general, being less accurate in determining parameters, we have obtained a considerable numerical advantage. The study of these sub-structures contributes to a better description of the series of events that formed the halo of our galaxy.

Lista de Figuras

2.1	Curvas de transmissibilidade dos filtros do S-PLUS	21
2.2	Comparação entre as metalicidades obtidas com ANN e RF	24
3.1	Diagrama [Mg/Mn] por [Al/Fe]	27
3.2	Distribuições das cores escolhidas separando a população acretada e in Situ	29
3.3	Diagrama da seleção de estrelas acretadas com o S-PLUS	29
3.4	Diagrama de Kiel com as isócronas do MIST utilizadas	31
4.1	Painel com informações características da seleção de F+21 para GES . . .	35
4.2	Painel com informações características da seleção de H+23 para GES . . .	36
4.3	Painel com informações características da seleção de M+19 para GES . . .	36
4.4	MDF para Gaia-Enceladus/Sausage utilizando 3 seleções diferentes	37
4.5	Painel com informações características da seleção de K+19 para Sequoia .	39
4.6	Painel com informações características da seleção de M+19 para Sequoia .	39
4.7	Painel com informações características da seleção de N+20 para Sequoia .	40
4.8	MDF para Sequoia utilizando 3 seleções diferentes	41
4.9	Painel com informações características da seleção de K+19 para Thamnos-1 e 2	42
4.10	Painel com informações características da seleção de H+23 para Thamnos .	43
4.11	MDF para Thamnos utilizando 3 seleções diferentes	44
4.12	Painel com informações características das seleções de H+23 e K+19 para as Helmi Streams	45
4.13	MDF para as Helmi Streams utilizando 2 seleções diferentes	45
4.14	Painel com informações características da seleção de H+23 para Nyx . . .	46

4.15	Painel com informações características da seleção de H+23 para LMS-1/Wukong e Pontus	48
4.16	MDF para Nyx, LMS-1/Wukong e Pontus	49
4.17	Número de estrelas em comum entre as diferentes seleções estudadas	50
A.1	Erros nas magnitudes simuladas para validação do método isocronal	66
A.2	Comparação das idades obtidas com os dados do GCS	66
B.1	Estrutura estelar próxima a Sequoia	67

Lista de Tabelas

2.1	Informações sobre as velocidades radiais no catálogo base utilizado	23
3.1	Cores escolhidas para o estudo da separação entre estrelas acretadas e in Situ	28
4.1	Fontes das velocidades radiais nas seleções	49
4.2	Idade e metalicidade médias de cada sub-estrutura.	51
4.3	Comparação das metalicidades obtidas com a literatura.	52

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
2. <i>Base de Dados</i>	21
2.1 Dados Fotométricos	21
2.2 Parâmetros Cinemáticos	22
2.3 Metalicidades e Outras Abundâncias	23
3. <i>Metodologia</i>	25
3.1 Obtenção dos parâmetros orbitais	25
3.2 Estrelas Acretadas e Formadas in Situ	26
3.2.1 Classificação com base na fotometria do S-PLUS	27
3.3 Ajuste Bayesiano de Isócronas	30
4. <i>Resultados e Discussão</i>	33
4.1 Gaia-Enceladus/Sausage	33
4.2 Halo retrógrado	38
4.2.1 Sequoia	38
4.2.2 Thamnos	41
4.3 Helmi Streams	43
4.4 Nyx	46
4.5 LMS-1/Wukong e Pontus	47
4.6 Intersecções	48
4.7 Idades e Metalicidades	50

5. Conclusão	53
Referências	55
Apêndice	63
A. Validação do Método Bayesiano Para Ajuste de Isócronas	65
B. Estrutura Próxima à Sequoia	67

Introdução

O modelo cosmológico mais aceito atualmente, Λ -*Cold Dark Matter* (Λ CDM), prevê que as estruturas físicas do universo foram formadas em um processo hierárquico *bottom-up*, i.e., de baixo para cima (Bullock e Johnston, 2005; Bell et al., 2008). Desta forma, ao longo da história do universo, estruturas menores se formam primeiro, e em um momento em que estruturas estão mais próximas umas das outras, processos de fusão (*merges*) de galáxias e canibalização de galáxias menores foram muito abundantes. A Via Láctea não é exceção para este cenário. Portanto, se queremos estudar a história de formação da nossa galáxia é necessário levarmos em conta as colisões, no passado, com outras galáxias satélites.

Desde estudos como Searle e Zinn (1978) e White e Rees (1978), tem-se evidências que a formação do halo da Galáxia foi dada por uma sucessão de eventos de fusão com outras galáxias anãs. Um exemplo muito conhecido deste processo é da galáxia anã esferoidal *Sagittarius* (Ibata et al., 1994; Majewski et al., 2003) que se encontra em um estágio avançado de disrupção por maré, e neste caso temos acesso tanto à galáxia originária quanto à corrente estelar correspondente (Mateo et al., 1998).

Neste trabalho analisamos as propriedades dinâmicas e as distribuições de metalicidades (e idades) de algumas das sub-estruturas conhecidas do halo próximo ao Sol, como por exemplo *Gaia-Enceladus/Sausage* (Helmi et al., 2018; Belokurov et al., 2018), que deve ser responsável por 15-25% da massa estelar do halo da Galáxia (Lane et al., 2023). Estudamos também uma série de outras sub-estruturas descobertas independentemente.

Apesar de se estimar que o halo próximo ao sol deve conter centenas de corrente estelares (Helmi et al., 1999), devemos ter cuidado ao analisar a origem destes elementos, já que uma mesma galáxia progenitora pode criar várias sub-estruturas durante a canibalização,

ou ainda os fósseis de vários eventos podem se sobrepor nos espaços de fase (Jean-Baptiste et al., 2017). De toda forma um passo importante para a reconstrução da história de formação da Galáxia é estudar as propriedades dinâmicas e químicas destas sub-estruturas.

Já se demonstrou (Helmi e White, 1999) que em um potencial quasi-axisimétrico como o da Galáxia (McMillan, 2017), as integrais de movimento como energia, momento angular, ações e outras, não se alteraram significativamente desde a colisão. Assim, mesmo que as estrelas capturadas se espalhem pelo halo da Galáxia, é possível distingui-las das demais estrelas a partir dos parâmetros dinâmicos de suas orbitas (Helmi e de Zeeuw, 2000).

Desde o advento do levantamento Gaia, que está agora em seu terceiro *Data Release* (DR), temos acesso às informações cinemáticas de centenas de milhões de estrelas, como velocidade radial, movimento próprio, além da posição precisa no céu e distância medida com paralaxe. A partir destas informações e transformações do sistema de coordenadas, já é possível calcular parâmetros, como o momento angular. Mas para determinar a energia orbital, é necessário um modelo de potencial gravitacional. Neste estudo, adotamos o de McMillan (2017), que se baseia em um bojo, disco fino e disco espesso, axissimétricos e um perfil tipo Navarro–Frenk–White (NFW; Navarro et al. 1996) para o halo.

Além do Gaia, estudos recentes no assunto (e.g. em Horta et al. 2023; Myeong et al. 2019) se utilizam de outros levantamentos espectroscópicos, principalmente do APOGEE-2 (Majewski et al., 2017), em particular devido à gama de abundâncias químicas determinadas com precisão. Contudo, neste trabalho, mostramos como se pode fazer um estudo similar com a fotometria do S-PLUS (Mendes de Oliveira et al., 2019), trazendo principalmente uma vantagem estatística com relação aos estudos anteriores, já que com fotometria é possível observar uma área muito maior do céu em menor tempo e com mais estrelas, levando a um volume muito maior de dados. Além disto, os filtros estreitos do S-PLUS possibilitam a determinação de parâmetros atmosféricos das estrelas como T_{eff} , $\log g$ e $[\text{Fe}/\text{H}]$ (com métodos de aprendizado de máquina, por exemplo), além de massas e idades (com ajustes de isócronas).

No Capítulo 2 detalho a base de dados fotométricos e cinemáticos utilizada. Já no Capítulo 3 descrevo a metodologia empregada neste trabalho para a classificação das estrelas entre acretadas e formadas *in Situ*, além do método de obtenção dos parâmetros dinâmicos e idades das estrelas. Por fim, no Capítulo 4 apresento a aplicação dos métodos para um conjunto de sub-estruturas do halo conhecidas da literatura.

Base de Dados

2.1 Dados Fotométricos

O *Southern Photometric Local Universe Survey* (S-PLUS; Mendes de Oliveira et al. 2019) é um levantamento de estrelas do céu do Sul, utilizando 12 filtros fotométricos (Figura 2.1). Destes, 5 (u , g , r , i e z) são de banda larga e similares aos utilizados no *SLOAN Digital Sky Survey* (SDSS; York et al. 2000) e os demais 7 ($J0378$, $J0395$, $J0410$, $J0430$, $J0515$, $J0660$, $J0861$) são de banda estreita e equivalentes aos respectivos utilizados no J-PLUS (Cenarro et al., 2019), um levantamento auxiliar do *Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey* (J-PAS, Benitez et al. 2014; miniJPAS, Bonoli et al. 2021).

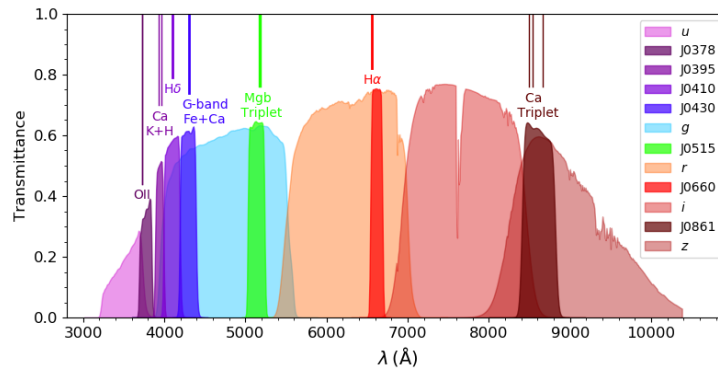


Figura 2.1: Curvas de transmissibilidade do sistema de 12 filtros do S-PLUS. Destes filtros 5 são de banda larga (u , g , r , i , z) e os 7 restantes de banda estreita, centrados em linhas espectrais relevantes. Fonte: Almeida-Fernandes et al. (2022)

Por *design*, os filtros estreitos ficam em regiões onde há linhas espectrais importantes, que por sua vez são sensíveis a parâmetros atmosféricos. Um exemplo disso é o filtro J0378 (O II) que é sensível à metalicidade e o filtro J0515 sensível às mudanças no $\log g$. Dito isso é possível utilizar as magnitudes do S-PLUS em estudos que idealmente se baseariam em

informações espectrais. Apesar de a fotometria ser menos precisa do que a espectroscopia, existe uma clara vantagem numérica para a primeira, já que é possível observar mais estrelas e em menor tempo do que com espectrógrafos.

Neste trabalho utilizamos as magnitudes $PStotal$ do quarto *data release* interno (iDR4) do S-PLUS. Esta escolha corresponde à abertura de 3 segundos de arco corrigida de tal forma que o fluxo fosse equivalente ao fluxo total da estrela (calculado a partir das magnitudes com outras aberturas variadas). Em Almeida-Fernandes et al. (2022) estão descritas as opções de fotometria de abertura e PSF, além das técnicas de calibração utilizadas no levantamento. É importante mencionar também que usamos um *dataset* no qual os dados já foram previamente corrigidos pela extinção da poeira interestelar.

2.2 Parâmetros Cinemáticos

A partir dos dados do terceiro *data release* do telescópio Gaia (DR3, Gaia Collaboration et al. 2023), temos informações precisas sobre parâmetros cinemáticos como velocidade radial e movimento próprio para um conjunto muito grande de estrelas. Desta forma, cruzamos o catálogo do iDR4 do S-PLUS (~ 15 milhões de estrelas) com o DR3 do Gaia (~ 1.8 bilhão de estrelas), utilizando uma distância máxima no céu de 3 segundos de arco¹, e depois com o catálogo (~ 1.4 bilhão de estrelas) do Bailer-Jones et al. 2021, com distâncias recalibradas para o Gaia eDR3.

O catálogo conjunto, apesar de conter ~ 13 milhões de estrelas, tem uma quantidade muito menor de estrelas com informação sobre a velocidade radial. Desta forma, para maximizar os dados que teremos para analisar, utilizamos um procedimento similar ao que foi feito por Lövdal et al. (2022), completando as velocidades radiais faltantes com outros catálogos. Utilizamos o GALAH (DR3; Buder et al. 2022), o APOGEE-2 (DR17; Abdurro'uf et al. 2022), o RAVE (DR6; Steinmetz et al. 2020) e o LAMOST (DR8; Wang et al. 2022), nesta ordem. Removemos, por fim, as estrelas que não tinham informação sobre a velocidade radial em nenhum desses catálogos, restando um total de 698798 estrelas. Na Tabela 2.1 podemos ver a proporção das velocidades radiais extraídas de cada catálogo.

¹ Todos os *crossmatches* neste trabalhos utilizam a mesma distância máxima de 3 arcsec.

Tabela 2.1 - Quantidade e porcentagem de estrelas com velocidades radiais retiradas do Gaia e outros catálogos.

Fonte	Número de estrelas	
Gaia (DR3)	656363	(93.9%)
GALAH (DR3)	1372	(0.2%)
APOGEE-2 (DR17)	2129	(0.3%)
RAVE (DR6)	217	(0.03%)
LAMOST (DR8)	38717	(5.5%)

Como podemos ver na Tabela 2.1, quando analisamos a amostra completa, a proporção de estrelas com velocidades radiais, não sendo do Gaia, é bem diminuta, mas como veremos mais a frente, para as sub-estruturas selecionadas, a quantidade destas estrelas se torna considerável.

2.3 Metalicidades e Outras Abundâncias

Ao longo deste trabalho utilizamos 4 medidas de metalicidade diferentes, das quais duas são determinadas independentemente deste trabalho, por outros grupos dentro da colaboração S-PLUS. A primeira é obtida a partir de um projeto que utiliza uma rede neural artificial (ANN), liderado por Vinicius Placco (NOIRLab), aplicando a mesma metodologia de Whitten et al. (2021) e a outra de um projeto que utiliza um método de *random forest* (RF), liderado por Marcos Vinicius Emanuel Cordeiro da Silva (Observatório Nacional) ².

Outra metalicidade independente que vai servir de referência e critério de seleção mais a frente, foi obtida do DR17 do APOGEE-2. Comparando $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{ANN}}$ e $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}$ com $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{APOGEE2}}$ (Figura 2.2) percebemos que, para estrelas pobres em metais existe um *offset* médio levemente maior em $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{ANN}}$ de -0.114 dex, comparado a 0.094 para $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}$. Como podemos ver na Figura 2.2, existe um conjunto de estrela que no APOGEE tem metalicidade entre -0.25 e 0.25 dex, mas que tem um erro de quase -1.0 dex ao utilizarmos RF. No contexto deste estudo, esse viés não é tão importante, já que as sub-estruturas que vamos analisar são mais pobres em metais do que o intervalo de metalicidade onde ocorre este problema. Optamos então por dar preferência a utilizar $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}$, quando possível.

Além disto, para a classificação das estrelas da amostra entre acretadas e formadas *in Situ*, utilizamos outras abundâncias químicas também do APOGEE-2, como $[\text{Al}/\text{Fe}]$,

² Ambos compartilhados em comunicações particulares dentro do *Milky Way Group* do S-PLUS

$[\text{Mg}/\text{Fe}]$ e $[\text{Mn}/\text{Fe}]$.

Como será descrito na Seção 3.3, parte deste trabalho é utilizar um método Bayesiano de ajuste de isócronas, que por sua vez também produz estimativas dos parâmetros atmosféricos das estrelas, e a metalicidade resultante deste processo ($[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{isoc}}$) foi a escolhida para fazer algumas das análises, contudo sempre estará indicado a qual metalicidade nos referimos.

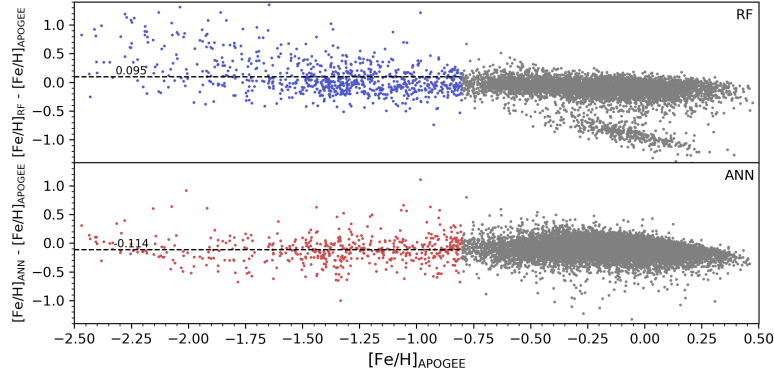


Figura 2.2: Comparação das metalicidades obtidas com os dois métodos de aprendizado de máquina, RF (painel de cima) e ANN (painel de baixo), com relação aos dados do APOGEE-2. Podemos ver que para as metalicidades mais baixas (< -0.8 , colorido) existe um offset médio de -0.114 dex para $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{ANN}}$ e 0.094 dex para $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}$.

Metodologia

3.1 Obtenção dos parâmetros orbitais

Com as informações cinemáticas descritas na Seção 2.2, utilizamos o pacote de python `galpy`¹ (Bovy, 2015), com as entradas RA, DEC (do S-PLUS), distância (`rpgeo`, do catálogo de Bailer-Jones et al. 2021), movimento próprio (do Gaia) e velocidade radial (selecionado como descrito na Seção 2.2), adotando $R_{\odot} = 8.21$ kpc para a distância do Sol ao centro galáctico, $V_{\text{LSR}} = 233.1$ km s⁻¹ para a velocidade do sistema local, e $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11.1, 12.24, 7.25)$ para as velocidades cartesianas (Schönrich et al., 2010).

A partir disso, podemos determinar as coordenadas e velocidades em diferentes sistemas de referência, além de quantidades como os momentos angulares (L). Utilizando o potencial axissimétrico de McMillan (2017), que consiste de um bojo, um disco fino, um disco espesso, dois discos gasosos e um halo de matéria escura tipo Navarro–Frenk–White (NFW; Navarro et al. 1996) calculamos a energia da órbita (E), e com a ajuda de uma aproximação tipo Stäckel (Binney, 2012), no próprio `galpy`, calculamos as ações (J_r , J_z e J_{ϕ}), além da altura máxima da órbita (z_{max}) e os raios perigaláctico (r_{peri}) e apogaláctico (r_{apo}), que utilizamos para calcular excentricidade (e) com

$$e = \frac{r_{\text{apo}} - r_{\text{peri}}}{r_{\text{apo}} + r_{\text{peri}}}. \quad (3.1)$$

Outro parâmetro utilizado que é importante mencionar é a circularidade (η), dada por

$$\eta = \frac{L_z}{|L_{z,\text{circ}}(E)|}, \quad (3.2)$$

onde $L_{z,\text{circ}}(E)$ é o momento angular na direção z para uma órbita circular de mesma energia (E).

¹ <https://docs.galpy.org/en/v1.9.1/index.html>

3.2 Estrelas Acretadas e Formadas *in Situ*

Parte importante do estudo das estruturas que compõe a Galáxia é determinar sua origem. O mesmo pode ser dito sobre as subestruturas do halo que são o foco deste trabalho. Historicamente a separação das estruturas da Galáxia é feita utilizando dados cinemáticos e composição química. Hawkins et al. (2015) propôs que essa separação seja feita utilizando apenas as abundâncias químicas, que agora estão muito mais disponíveis do que antigamente pelo advento de levantamentos espectroscópicos de ponta como o APOGEE. Das et al. (2020) mostrou que as estrelas ocupam 3 grandes regiões no espaço de $[\text{Mg}/\text{Mn}]$ por $[\text{Al}/\text{Fe}]$ (Figura 3.1), correspondentes a populações do disco com alta e baixa abundância de elementos α , além de uma população mais difusa associada às estrelas acretadas.

Foi Hawkins et al. (2015) que originalmente identificou essa população mais difusa como sendo as estrelas acretadas já que majoritariamente tinham baixo $[\alpha/\text{Fe}]$ mas tinham velocidades radiais que distoam muito do esperado para estrelas do disco.

Como mostrado por Horta et al. (2021), é esperado nesta região do diagrama apenas estrelas de baixíssima metalicidade, que não evoluíram quimicamente com a Galáxia, e isto pode incluir estrelas muito antigas de baixa massa da Galáxia (formadas *in Situ*) ou populações de estrelas provenientes de galáxias anãs que são não evoluídas quimicamente. Dito isto, para simplificar, vamos apenas chamar as estrelas desta região de acretadas.

Também utilizando os dados do APOGEE-2, cruzados com o S-PLUS, selecionamos a região das estrelas acretadas com:

- (i). $[\text{Mg}/\text{Mn}] > 0.25$,
- (ii). $[\text{Mg}/\text{Mn}] > 5 * [\text{Al}/\text{Fe}] + 0.5$,
- (iii). $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{APOGEE}} \leq -0.8$,

similar à seleção aplicada por Limberg et al. (2022), Horta et al. (2021), Queiroz et al. (2021) e outros estudos no assunto. Esta seleção é completamente inspirada no trabalho de Hawkins et al. (2015) e Das et al. (2020) como previamente mencionado. As demais estrelas que não foram classificadas como acretadas foram supostas como sendo formadas *in Situ*. É importante mencionar também que para este estudo fizemos um corte nos erros absolutos das abundâncias do APOGEE e nos erros das magnitudes (m) do S-PLUS:

- (i). $\sqrt{\sigma_{[\text{Al}/\text{Fe}] }^2 + \sigma_{[\text{Mg}/\text{Fe}] }^2 + \sigma_{[\text{Mn}/\text{Fe}] }^2} < 0.08 \text{ dex},$
- (ii). $\sigma_m < 0.1 \text{ mags.}$

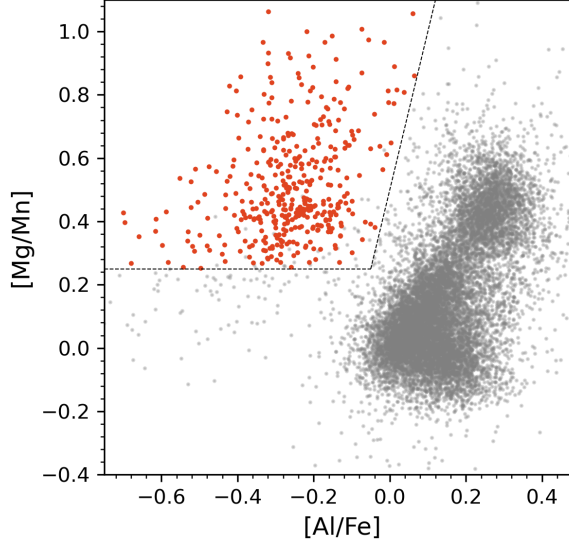


Figura 3.1: Diagrama de $[\text{Mg}/\text{Mn}]$ por $[\text{Al}/\text{Fe}]$ para as estrelas do crossmatch entre o APO-GEE e o S-PLUS (cortando os erros). Em vermelho temos a seleção das estrelas acretadas.

3.2.1 Classificação com base na fotometria do S-PLUS

Tendo esta classificação em mãos, utilizamos os dados do S-PLUS para reproduzir a seleção com apenas as cores obtidas com as 12 magnitudes. Para começar, selecionamos quais das cores que podem ser formadas com o S-PLUS são interessantes para este estudo. Isso é feito medindo a diferença das distribuições entre as estrelas acretadas e formadas *in Situ* em cada cor. Quantitativamente, podemos utilizar a estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), dada, neste caso, por

$$D = \sup_c |F_{\text{acc}}(c) - F_{\text{is}}(c)|, \quad (3.3)$$

i.e., a maior diferença entre as distribuições cumulativas (F) da respectiva cor (c) nas amostras de estrelas acretadas (acc) e formadas *in Situ* (is). Como o teste KS é feito para avaliar a similaridade de suas amostras, da mesma forma podemos o utilizar para avaliar quão diferente são as duas distribuições considerando a maior estatística (D) possível. Aplicamos o teste KS sobre as cores do S-PLUS e escolhemos as com maior D , exigindo que todas magnitudes aparecessem ao menos uma vez na seleção das cores.

Assim, na Figura 3.2, temos a distribuição das cores selecionadas neste processo, ordenadas pela estatística mencionada, para o conjunto de estrelas acretadas e formadas *in Situ*. Note como para as primeiras cores a separação é mais significativa. Na Tabela 3.1 temos as cores escolhidas e as respectivas estatísticas D . Note como $u - J0378$ e $g - J0515$ separam bem os dois grupos, isto porque são sensíveis a metalicidade e $\log g$, e as estrelas acretadas, por serem pobres em metais, se separam das demais estrelas também em diagramas de $T_{\text{eff}} \times \log g$.

Tabela 3.1 - Cores escolhidas para o estudo da separação entre estrelas acretadas e formadas *in Situ*, e respectivas estatísticas D do teste KS entre as distribuições das duas populações.

Cor	D
u - j378	0.848
g - j515	0.594
j378 - j395	0.577
j660 - z	0.380
r - i	0.351
j515 - z	0.303
i - z	0.300
j430 - j515	0.280
j410 - z	0.256
j861 - z	0.236
j395 - z	0.211

Podemos então combinar estas cores para obter um par de novos dados para montar um diagrama onde possamos otimizar a separação destas estrelas. Utilizamos um método de *Support Vector Machines* (SVM) para determinar um plano nas 11 dimensões que melhor separasse as duas populações. A partir da equação do plano, separamos duas combinações de cores diferentes

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_1 = & -0.635(u - J0378) - 0.495(g - J0515) + 0.514(J0378 - J0395) \\ & - 0.097(i - z) + 0.042(J0515 - z) - 0.246(J0430 - J0515) \\ & - 0.131(j410 - z), \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\mathcal{C}_2 = 0.342(J0861 - z) + 0.940(J0395 - z). \quad (3.5)$$

Note como na Figura 3.3 utilizando uma seleção do tipo

- (i). $\mathcal{C}_1 < -0.65$,

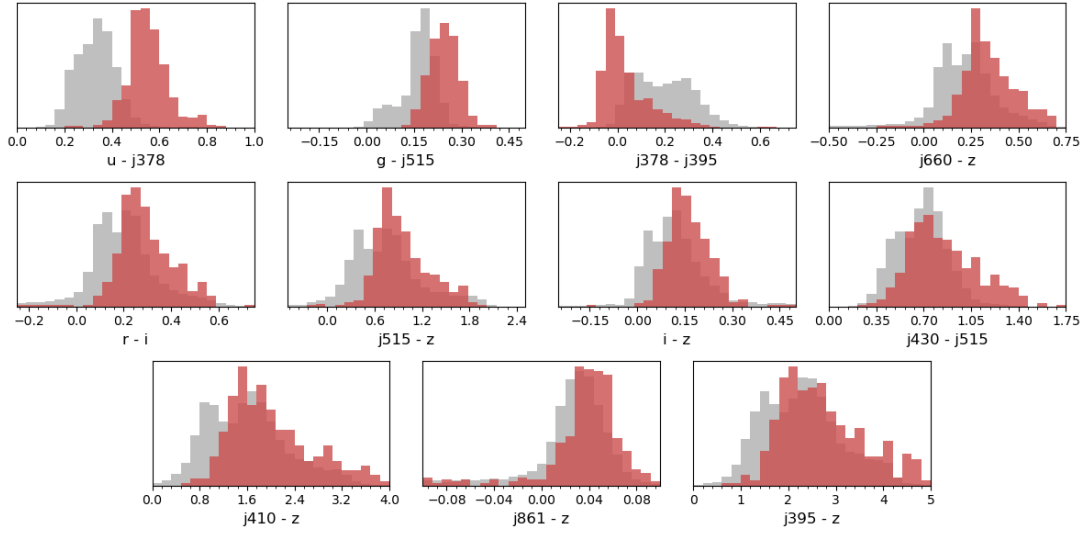


Figura 3.2: Distribuições das cores inicialmente escolhidas com o teste KS. Em vermelho temos o histograma para a população acretada, e em cinza temos a população formada *in Situ*.

(ii). $\mathcal{C}_2 + 5.5 \mathcal{C}_1 < -0.21$,

(iii). $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}} < -0.8$,

(totalmente baseada nos dados do S-PLUS) reproduz bem a seleção de estrelas acretadas feita originalmente. Obtemos, neste caso, uma completude de 79% e uma precisão de 69%, porém mais que a própria classificação estamos interessados em analisar como uma população específica que vamos estudar ocupa este diagrama.

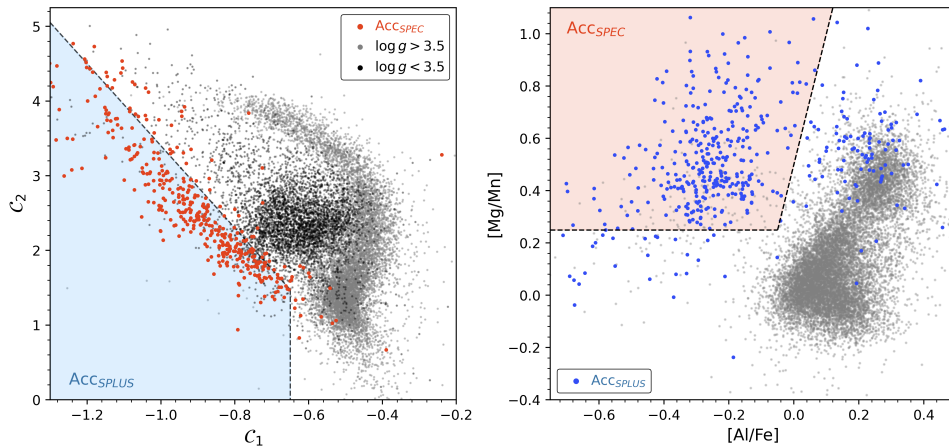


Figura 3.3: **a.** Diagrama de $\mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2$. **b.** Diagrama de $[\text{Mg}/\text{Mn}]$ por $[\text{Al}/\text{Fe}]$. Em vermelho está a seleção das estrelas acretadas utilizando dados espectroscópicos (Acc_{SPEC}) e em azul a seleção de estrelas acretadas utilizando a fotometria do S-PLUS (Acc_{PLUS}).

Vale a pena ressaltar alguns aspectos. Primeiramente, \mathcal{C}_2 é altamente correlacionado com a temperatura, mesmo tendo filtros estreitos. Além disso, é possível ver duas populações distintas, na Figura 3.3, entre as estrelas formadas *in Situ*. Estas são correspondentes às populações de estrelas anãs (mais exterior, em forma de foice) e de estrelas gigantes (mais interior, em forma mais circular).

3.3 Ajuste Bayesiano de Isócronas

O método utilizado aqui é uma adaptação de Almeida-Fernandes et al. (2023), que por sua vez é uma generalização de Jørgensen e Lindegren (2005). A grande diferença é que neste trabalho utilizamos as magnitudes do S-PLUS como informação inicial, em vez de parâmetros atmosféricos obtidos com espectroscopia. O método é baseado em uma estratégia Bayesiana, i.e., levando em conta um prior, já que como alguns estudos (e.g. Soderblom 2010) mostram, esta é a melhor estratégia quando tem-se apenas parâmetros estelares, ou, neste caso, apenas as magnitudes.

O conjunto de isócronas escolhido foi do *MESA Isochrones & Stellar tracks* (MIST; Dotter 2016). Utilizamos a mesma escolha de isócronas que Almeida-Fernandes et al. (2023), i.e., com velocidade de rotação superficial $\nu/\nu_{\text{crit}} = 0.4$ (pico da distribuição de velocidade para estrelas B jovens) para incluir casos com baixa metalicidade, que é todo o foco deste trabalho. O *grid* de isócronas cobre um intervalo de 0.1 a 15 Gyrs com passos de 0.2 Gyr e de -4.0 à 0.5 dex de metalicidade, com passos de 0.1 dex (Figura 3.4).

Podemos considerar cada ponto do *grid* de isócronas como um conjunto de parâmetros contendo a idade (τ), metalicidade, massa inicial (m) ou ainda parâmetros como $[\alpha/\text{Fe}]$, ν/ν_{crit} , e outros. Para usar a mesma notação de Almeida-Fernandes et al. (2023), chamaremos este conjunto de \mathbf{h} , e os observáveis utilizados como *input* de \mathbf{q} (mais a frente discuto quais exatamente são os observáveis utilizados). Desta forma, a probabilidade à posteriori de um dado modelo ser o melhor para descrever os dados é

$$p(\mathbf{h}) \propto \mathcal{L}(\mathbf{q}|\mathbf{h}) p_0(\mathbf{h}) \quad (3.6)$$

onde p_0 é uma probabilidade à priori do modelo e o termo \mathcal{L} corresponde à verossimilhança, calculada de maneira clássica

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}|\mathbf{h}) = \prod_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{q_{i,\text{obs}} - \mathbf{q}_i}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad (3.7)$$

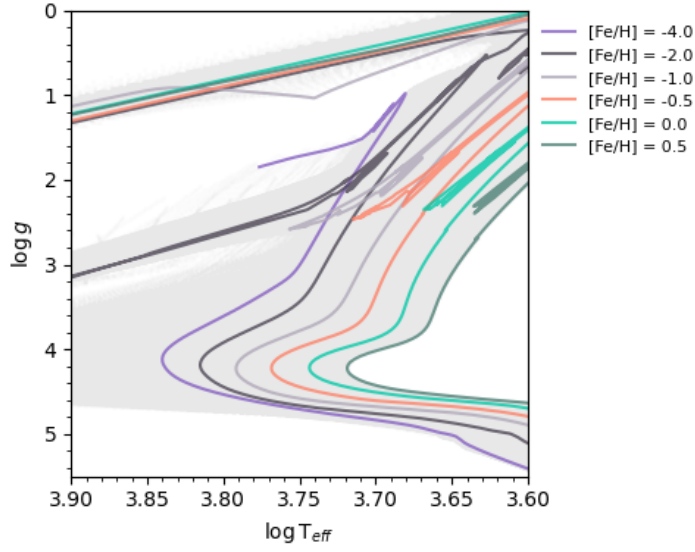


Figura 3.4: Diagrama de $\log T_{\text{eff}}$ por $\log g$ para os pontos do *grid* de isócronas do MIST, cobrindo idades de 0.1 a 15 Gyr e metalicidades de -4.0 a 0.5 dex. Em destaque estão, como exemplo, as isócronas de 15 Gyr com $[\text{Fe}/\text{H}] = -4.0, -2.0, -1.0, -0.5, 0.0$ e 0.5 dex.

sendo \mathbf{q}_i os parâmetros observacionais preditos pelo modelo.

No caso, optamos por um prior apenas na massa, onde utilizamos a função de massa inicial (IMF) de Kroupa (2001), ou seja, $p_0(\mathbf{h}) = \xi_{\text{kroupa}}(m)$. Esta IMF, tem a forma de lei de potência

$$\xi(m) \propto m^{-\alpha}, \quad (3.8)$$

assim como de Salpeter ($\alpha = 2.35$), contudo as potências são diferentes para cada regime de massa, melhor representando a queda na IMF para as baixas massas (não presente no modelo mais simples de Salpeter). Os coeficientes são então dados por

$$\alpha = \begin{cases} 0.3, & m < 0.08, \\ 1.3, & 0.08 \leq m < 0.5, \\ 2.3, & m \geq 0.5. \end{cases} \quad (3.9)$$

A partir disso se obtêm as distribuições gerais de probabilidade. Como estamos interessados em determinar os parâmetros individualmente, precisamos marginalizar as distribuições de $p(\mathbf{h})$ com respeito aos demais parâmetros. Por exemplo, para a distribuição de

probabilidade das idades, temos

$$p(\tau_j)\delta\tau_j = \sum_{\substack{i=0 \\ \tau \in [\tau_j, \tau_j + \delta\tau_j]}}^N p(\mathbf{h}_i)\delta\mathbf{h}_i, \quad (3.10)$$

sendo, para $\mathbf{h}_i = \{\tau, [Fe/H], m, \dots\}_i$,

$$\delta\mathbf{h}_i = (\tau_{i+1} - \tau_i)([Fe/H]_{i+1} - [Fe/H]_i)(m_{i+1} - m_i) \dots \quad (3.11)$$

Tendo em mãos as distribuições marginalizadas de probabilidade de cada parâmetro de interesse, caracterizamos um único valor estimado para cada parâmetro a partir das medianas das distribuições (τ_{50} , $[Fe/H]_{50}$, m_{50} , \dots).

Como a ideia é utilizar magnitudes do S-PLUS como parâmetros, escolhemos a magnitude absoluta M_r , calculada a partir das distâncias do Gaia DR3, e as combinações de cores \mathcal{C}_1 e \mathcal{C}_2 , como os observáveis (\mathbf{q}). Optamos também por incluir uma metalicidade fotométrica, como entrada do ajuste (o que melhora consideravelmente o resultado). Para as estrelas com $[Fe/H]_{\text{RF}}$ disponível, o utilizamos, mas para as que não tinham esta metalicidade calculada, optamos por $[Fe/H]_{\text{ANN}}$.

Após esta primeira etapa, fazemos o ajuste novamente, mas agora utilizando os resultados da primeira etapa ($T_{\text{eff},50}$, $\log g_{50}$, $[Fe/H]_{50}$ e m_{50}). No Apêndice A discuto a validação deste método com um catálogo de referência.

Resultados e Discussão

Neste capítulo vamos recorrer à literatura para selecionar, entre os dados do S-PLUS, algumas sub-estruturas de estrelas do halo próximo ao sol, descobertas recentemente a partir de agrupamentos em espaços de fase e/ou espaços de integrais de movimento (IoM). Vamos particularmente estudar as estruturas *Gaia-Enceladus/Sausage*, *Sequoia*, *Thamnos*, as *Helmi Streams*, *LMS-1*, *Nyx* e *Pontus*, discutindo alguns aspectos acerca das suas propriedades dinâmicas e particularidade de diferentes seleções para uma mesma sub-estrutura. Mostramos também as distribuições de metalicidades (MDFs) e idades obtidas com os métodos descritos no Capítulo 3.

4.1 *Gaia-Enceladus/Sausage*

Estudos recentes mostraram a presença de uma população de estrelas caracterizada principalmente por órbitas muito excêntricas e por um $[\alpha/\text{Fe}]$ menor do que o esperado para estrelas formadas *in Situ* na mesma faixa de metalicidade. Acredita-se que estas estrelas provêm de um antigo (~ 10 Gyr atrás) evento de acreção de uma outra galáxia anã, conhecida hoje por *Gaia-Enceladus* (Helmi et al., 2018; Belokurov et al., 2018), ou algumas vezes por *Gaia-Sausage* pelo formato alongada de sua distribuição no espaço de velocidades $V_\phi \times V_r$ (portando daqui em diante usaremos o nome *Gaia-Enceladus/Sausage*, ou mais brevemente, GES). Esta sub-estrutura do halo é uma das mais populosas dentre as estudadas neste trabalho, e pode se referir a um dos grandes eventos de acreção que formaram a nossa Galáxia, sendo responsável por 15-25% da massa estelar do halo da Galáxia (Lane et al., 2023).

Assim como para as demais populações, temos um problema, “*como selecionar as estrelas que pertencem à subestrutura?*”. Recentemente Carrillo et al. (2023) mostrou

como diferentes escolhas de seleções são melhores em certos aspectos e piores em outros. De modo geral, para GES existem algumas formas mais comuns de seleção: (1) utilizando as integrais de movimento, como energia orbital e momento angular (e.g. Helmi et al. 2018; Koppelman et al. 2019; Horta et al. 2023), (2) utilizando a excentricidade da órbita (e.g. Naidu et al. 2020; Mackereth et al. 2019), (3) com abundâncias como $[\text{Mg}/\text{Mn}]$ e $[\text{Al}/\text{Fe}]$, ou $[\text{Na}/\text{Fe}]$ (e.g. Buder et al. 2022) ou (4) utilizando o espaço de ações, $(J_r, J_z$ e $J_\phi = L_z)$, (e.g., Limberg et al. 2022; Feuillet et al. 2021).

Vamos analisar 3 seleções diferentes para GES. A primeira delas, similar ao que foi feito por Feuillet et al. (2021), daqui em diante F+21, é dada por

- (i). $\sqrt{J_z} \in [30, 50]$ ($\text{kpc}^{1/2} \text{ km}^{1/2} \text{ s}^{-1/2}$),
- (ii). $L_z \in [-0.5, 0.5]$ ($10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$).

Na Figura 4.1 temos um painel com algumas das propriedades dinâmicas das estrelas selecionadas desta forma, dentre elas: **(a.)** Diagrama de E [$10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$] por L_z [$10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$], com linhas de circularidade constante ($\eta = \pm 1, \pm 0.75, \pm 0.5, \pm 0.25, \pm 0.1$); **(b.)** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$) com circunferências de velocidade total constante, sendo $\Delta V = V - V_{\text{LSR}}$; **(c.)** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$ com retas de excentricidade constante ($e = 0.0, 0.1, 0.2, \dots, 0.8, 0.9$); **(d.)** Diagrama de $\mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2$, com curvas de nível demarcando a região de estrelas anãs (topo), gigantes (intermediária) e estrelas pobres em metais (inferior); **(e.)** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$ (coordenadas cilíndricas no sistema galáctico); **(f.)** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$ obtidos a partir do ajuste de isócronas, com curvas nos eixos mostrando a densidade de pontos.

Podemos perceber na Figura 4.1 que GES tem uma distribuição de velocidades em torno de $V_{\text{tot}} \sim 300 \text{ km s}^{-1}$ mas com uma grande dispersão. Apresenta uma alta excentricidade (0.8-0.9) e, apesar de larga, sua distribuição em $\mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2$ fica bem no *locus* das estrelas pobres em metais. Discutiremos as idades obtidas de maneira mais geral nas próximas seções, mas vemos que obtemos (depois da remoção de estrelas mal ajustadas, como descrito no Apêndice A), uma idade da ordem de 10 Gyr, condizente com o esperado.

A segunda seleção é feita inteiramente nas integrais de movimento E e L_z . Assim como em Horta et al. (2023), daqui para frente H+23, selecionamos

- (i). $E \in [-1.6, -1.1]$ ($10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$)
- (ii). $L_z \in [-0.5, 0.5]$ ($10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$).

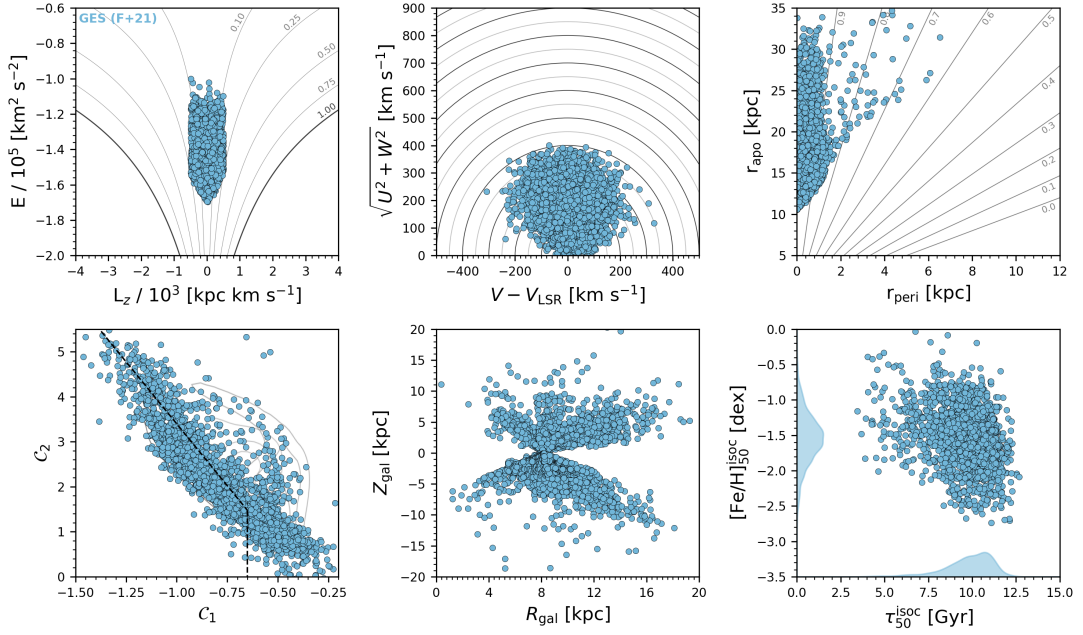


Figura 4.1: Painele com informações características da seleção de F+21 para GES. **a.** Diagrama de $E \text{ [} 10^5 \text{ km}^2 \text{s}^{-2}]$ por $L_z \text{ [} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}]$. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

Podemos ver na Figura 4.2 que as propriedades da seleção de F+21 se mantêm neste caso, a menos da peculiar quantidade de estrelas com maiores raios perigalácticos (e portanto menores excentricidades).

Enquanto isso, a terceira seleção considerada é inteiramente feita utilizando as ações, e é similar ao que foi feito no trabalho de Myeong et al. (2019), daqui em diante M+19,

- (i). $J_\phi / J_{\text{tot}} \in [-0.07, 0.07]$,
- (ii). $(J_z - J_r) / J_{\text{tot}} \in [-1.0, -0.3]$.

Como vemos na Figura 4.3, a seleção de M+19 é consideravelmente diferente das demais, tomando um intervalo de L_z muito menor mas ao mesmo tempo selecionando estrelas de energia bem mais negativa. Em termos da excentricidade esta é de longe a seleção que obtém a maior delas (> 0.9).

Contudo, note que esta seleção inclui também estrelas de baixo r_{apo} . Além de que podemos ver uma parte significativa da amostra ocupando o ramo das anãs não-pobres em metais em $C_1 \times C_2$.

Na Figura 4.4 podemos ver as distribuições de metalicidade para as 3 seleções, tanto

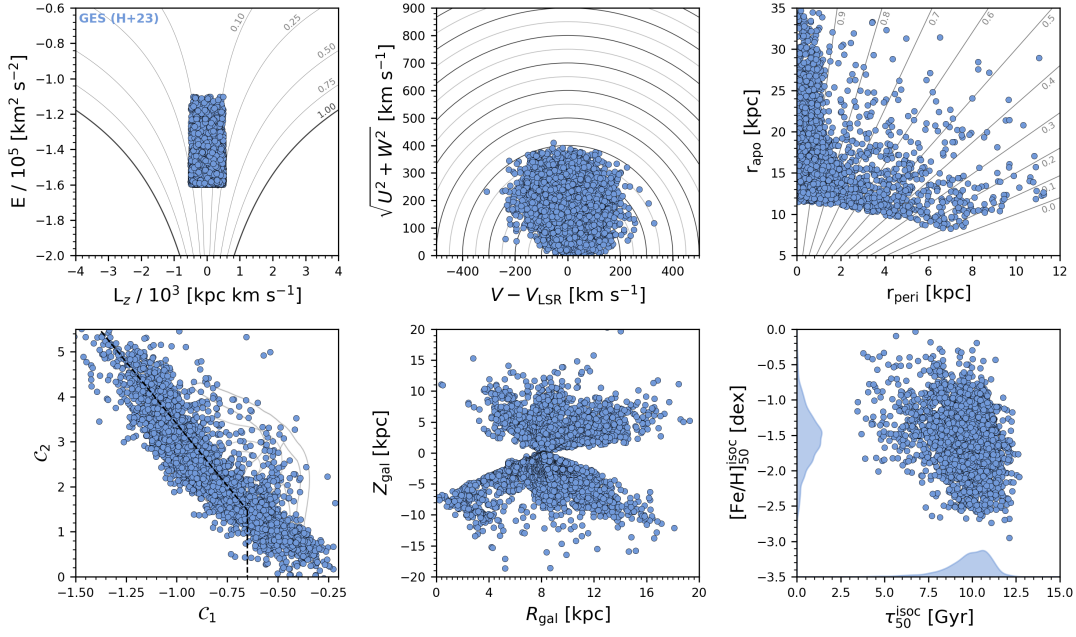


Figura 4.2: Painele com informações características da seleção de H+23 para GES. **a.** Diagrama de $E \text{ [} 10^5 \text{ km}^2 \text{s}^{-2}]$ por $L_z \text{ [} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}]$. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

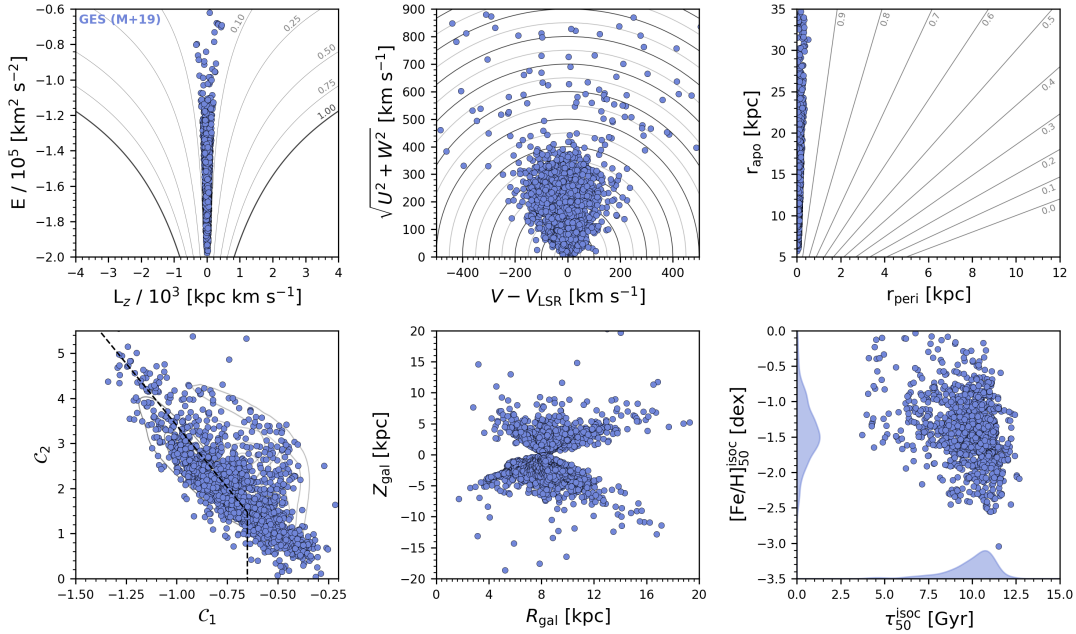


Figura 4.3: Painele com informações características da seleção de M+19 para GES. **a.** Diagrama de $E \text{ [} 10^5 \text{ km}^2 \text{s}^{-2}]$ por $L_z \text{ [} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}]$. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

utilizando $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}$ quanto $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{ANN}}$. Percebemos imediatamente um reflexo do que foi mencionado acima sobre a seleção M+19 já que há um pico menor na MDF em $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.65$ dex que não aparece para as demais seleções. Para além disto M+19 seleciona

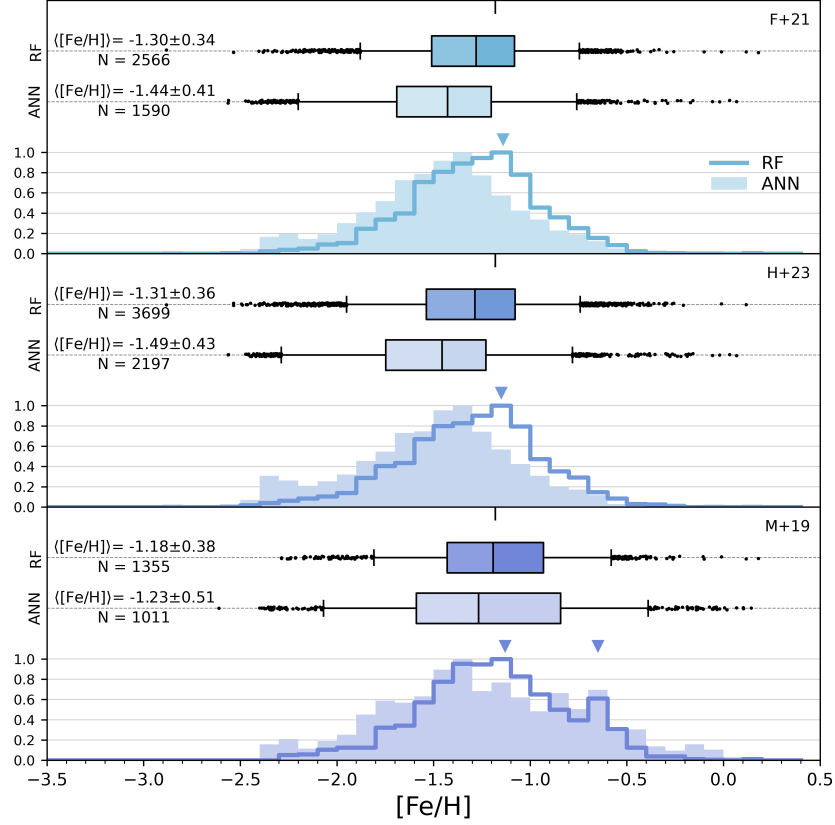


Figura 4.4: Distribuições de metalicidade para as 3 seleções de GES em questão. Na linha contínua e mais escura estão os dados de metalicidade obtidos com RF e na parte sombreada e mais clara estão os dados obtidos com ANN. Na parte superior de cada painel temos um boxplot resumindo a distribuição e o valor médio da metalicidade.

apenas cerca de 1400 estrelas (considerando as com metalicidade calculada por RF) enquanto as demais tem ~ 2600 (F+21) e ~ 3700 (H+23). Considerando o intervalo de erro, todas as amostras possuem uma metalicidade compatível, não só entre si mas também com relação ao valor obtido por H+23 de -1.18 ± 0.42 (muito próximo do obtido pela seleção de M+19 mas onde deve-se considerar a possível contaminação por estrelas de maior metalicidade).

4.2 Halo retrógrado

4.2.1 Sequoia

A partir dos dados cinemáticos é possível perceber um grupo de estrelas do halo retrógradas, i.e., com velocidades contrárias ao movimento natural do disco galáctico. Destas pode-se identificar algumas sub-estruturas, a primeira delas descoberta foi *Sequoia* (Myeong et al., 2019; Barbá et al., 2019), por, interessantemente, estar associada ao grande aglomerado aberto FSR-1758 próximo ao bojo da Galáxia. Em Myeong et al. (2019), é argumentado que é muito provável que as galáxias anãs de Gaia-Enceladus e Sequoia devem ter sido acregadas em épocas parecidas, ou ainda serem em si associadas.

Para Sequoia, a primeira seleção que consideramos vem de Koppelman et al. (2019), K+19 daqui em diante, dada por

- (i). $\eta \in [-0.65, -0.40]$,
- (ii). $E \in [-1.35, -1.0] \text{ (} 10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}\text{)},$

que pode ser visualizada na Figura 4.5. Note como se diferencia das seleções de GES principalmente por ter velocidades bem mais retrógradas e excentricidades mais intermediárias.

Podemos selecionar esta sub-estrutura também utilizando M+19, com

- (i). $E > -1.5 \text{ (} 10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}\text{)},$
- (ii). $J_\phi/J_{\text{tot}} < -0.5,$
- (iii). $(J_z - J_r)/J_{\text{tot}} < 0.1.$

Curiosamente, na Figura 4.6 podemos ver uma situação um pouco diferente, onde temos excentricidades tão altas quanto 0.8 e mais espalhamento nas velocidades.

É importante comentar que em todos estes casos da Sequoia, foi necessário, além do corte descrito, remover uma estrutura espacialmente coesa (muito provavelmente um aglomerado) que era selecionado junto com com as demais estrelas mas cujo padrão dinâmico era completamente diferente. Um detalhamento maior deste objeto é feito no Apêndice B.

Sobre a estrutura de Sequoia, Naidu et al. (2020) (N+20) propõe que, na realidade, existam outras duas sub-estruturas que se sobrepõe com a esta, contudo com metalicidades diferentes, chamadas de I'Itoi ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2 \text{ dex}$) e Arjuna ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1.6 \text{ dex}$). Vamos inicialmente desconsiderar este fato e, diferente de H+23, quando possível, não vamos

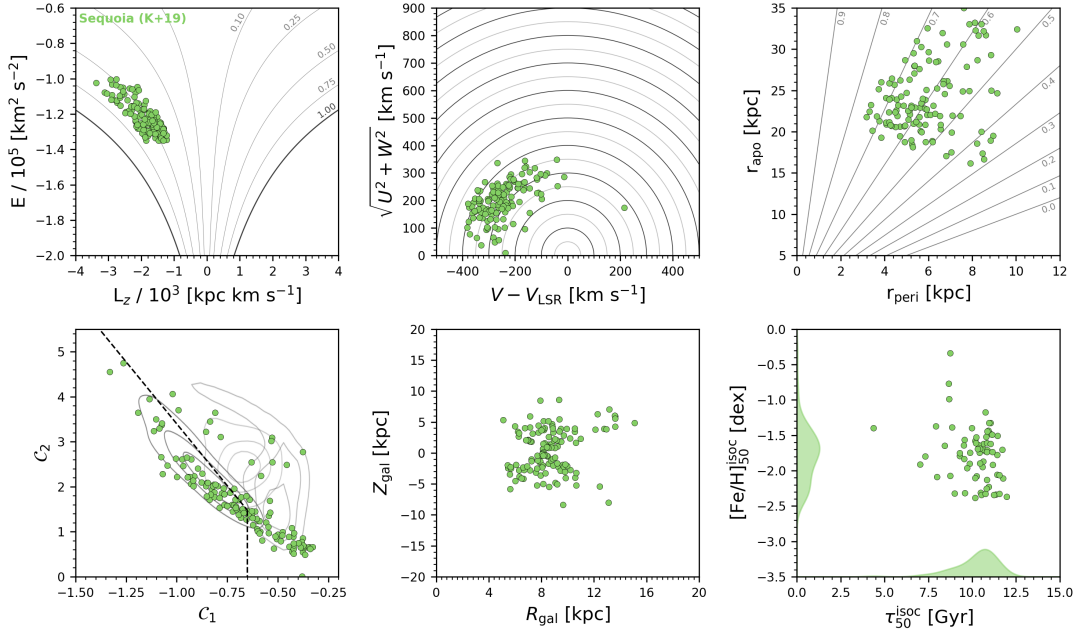


Figura 4.5: Painele com informações características da seleção de K+19 para a Sequoia. **a.** Diagrama de E [$10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$] por L_z [$10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$]. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

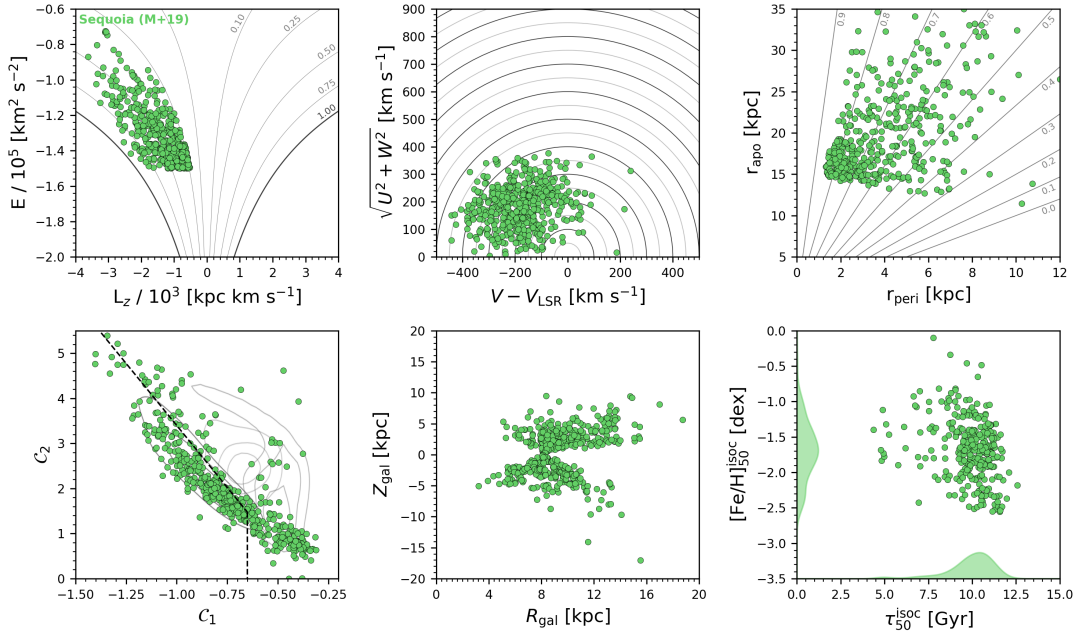


Figura 4.6: Painele com informações características da seleção de M+19 para a Sequoia. **a.** Diagrama de E [$10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$] por L_z [$10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$]. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

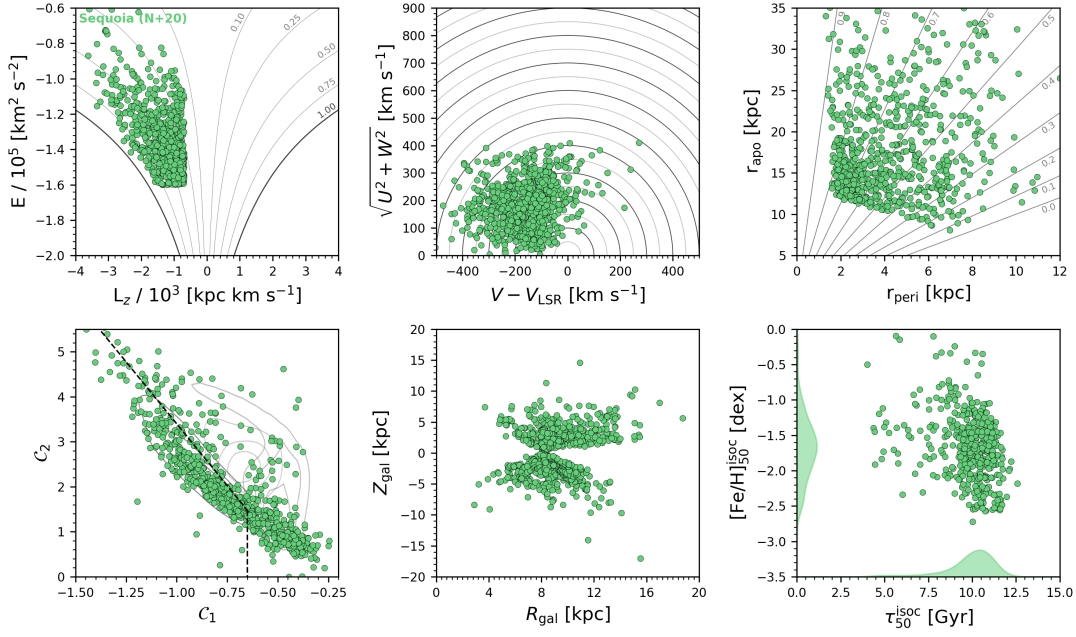


Figura 4.7: Painele com informações características da seleção de N+20 para a Sequoia. **a.** Diagrama de $E \text{ [} 10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}]$ por $L_z \text{ [} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}]$. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

fazer cortes bruscos na metalicidade para preservar a estrutura da distribuição. A seleção, baseada em N+20 foi então

- (i). $\eta < -0.15$,
- (ii). $E > -1.60 \text{ (} 10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}\text{)}$,
- (iii). $L_z < -0.70 \text{ (} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}\text{)}$,

que está representada na Figura 4.7. As propriedades desta são similares a seleção de M+19, mas podemos ver uma dispersão de excentricidade ainda maior.

Quanto às distribuições de metalicidade, na Figura 4.8 podemos ver que, de fato existem 3 picos de $[\text{Fe}/\text{H}]$, em todas as seleções, mas muito mais fortemente na seleção de K+19 onde há claramente uma população com $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.5 \text{ dex}$ (Arjuna), uma intermediária com $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.8 \text{ dex}$ (Sequoia “real”) e uma terceira com $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0 \text{ dex}$ (I’Itai). É possível perceber um quarto pico em torno de -1.2 dex que pode ser uma estrutura ainda não identificada.

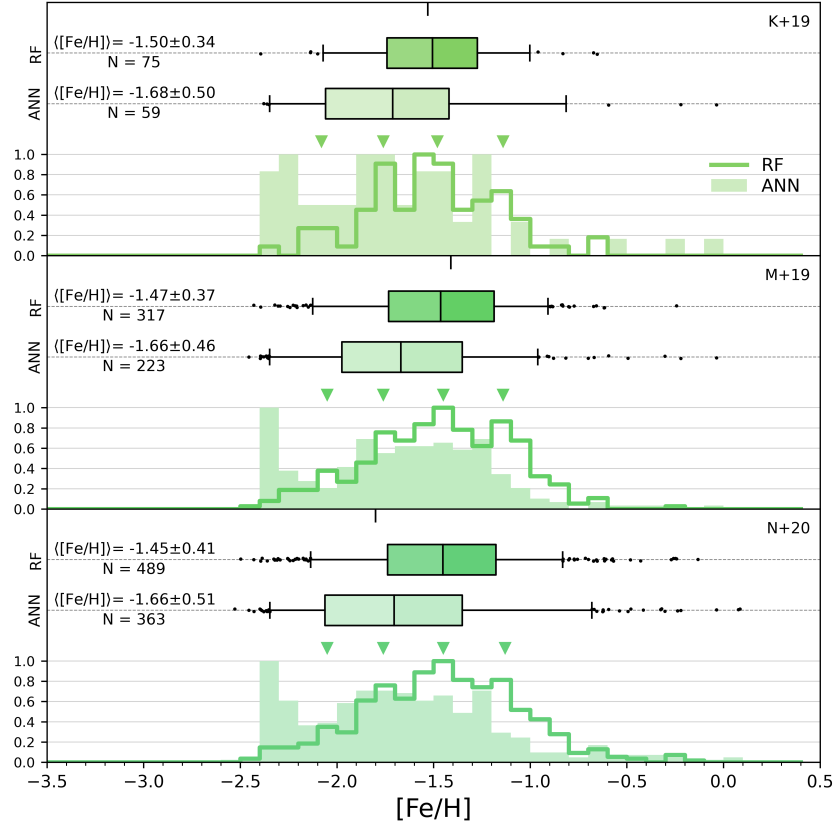


Figura 4.8: Distribuições de metalicidade para as 3 seleções de Sequoia. Na linha contínua e mais escura estão os dados de metalicidade obtidos com RF e na parte sombreada e mais clara estão os dados obtidos com ANN. Na parte superior de cada painel temos um boxplot resumindo a distribuição e o valor médio da metalicidade.

4.2.2 Thamnos

Enquanto a estrutura de *Sequoia* é composta por estrelas com alta energia orbital, Koppelman et al. (2019) argumenta que existe uma outra estrutura (ou duas, separadas em V_ϕ) também retrógradas mas de menor energia, chamada *Thamnos*. Podemos selecionar Thamnos-1 como K+19 com

- (i). $E \in [-1.65, -1.45]$ ($10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$),
- (ii). $\eta \in [-1, -0.75]$,

e Thamnos-2 com

- (i). $E \in [-1.80, -1.60]$ ($10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$),
- (ii). $\eta \in [-0.75, -0.40]$.

Ambas sub-estruturas, Thamnos-1 e 2 estão representadas na Figura 4.9, onde podemos perceber que, apesar de dividirem nome e serem vizinhas no espaço de $E \times L_z$, tem um comportamento diferente. A principal diferença é que Thamnos-1 tem velocidades um pouco maiores, tem estrelas mais afastadas do centro galáctico e com excentricidade entre 0.1-0.5, enquanto Thamnos-2 tem excentricidades até acima de 0.7.

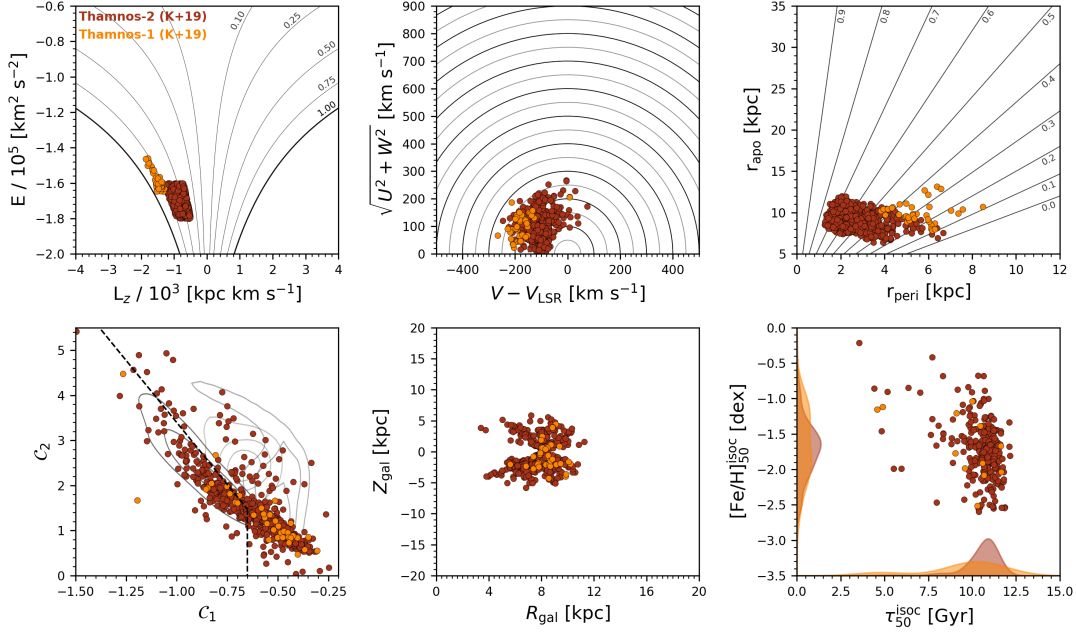


Figura 4.9: Painele com informações características da seleção de K+19 para Thamnos-1 (amarelo) e 2 (vermelho). **a.** Diagrama de E [$10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$] por L_z [$10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$]. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

Horta et al. (2023) trata ambas estruturas (*Thamnos-1* e *Thamnos-2*) como uma única população. A seleção que ele utiliza é então

- (i). $E \in [-1.80, -1.60]$ ($10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$),
- (ii). $L_z < 0.0$ ($10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$),
- (iii). $e < 0.7$,

que engloba a seleção de K+19 para Thamnos-2 a menos do corte em excentricidade (Figura 4.10). Podemos notar, principalmente na seleção de H+23 que as estrelas de Thamnos tem velocidades totais muito coerentes, entre 100 e 250 km s^{-1} , mesmo para a pequena porção de estrelas prógradas que aparecem na seleção.

Na Figura 4.11 temos a MDF das seleções de Thamnos e podemos ver tanto na seleção de K+19 para Thamnos-2 quanto a de H+23 para Thamnos que há uma população se-

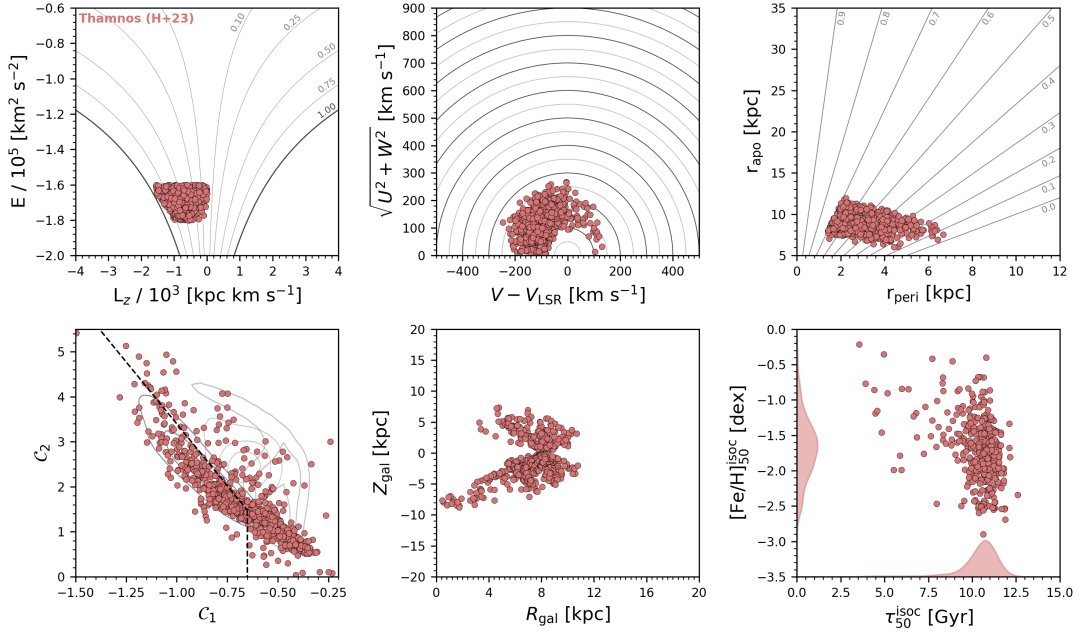


Figura 4.10: Painele com informações características da seleção de H+23 para Thamnos. **a.** Diagrama de E [$10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$] por L_z [$10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$]. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

cundária com metalicidade próxima a -1.1 dex. Não há muito que se possa dizer sobre a MDF de Thamnos-1 já que a seleção deixa um número muito reduzido de estrelas.

4.3 Helmi Streams

Desde Helmi et al. (1999) sabe-se de uma estrutura de alto V_z , que pode ser definida em termos do momento angular das estrelas. Apresentamos aqui duas seleções, sendo a primeira (K+19)

- (i). $L_z \in [1.0, 1.5] \text{ (} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}\text{)}$,
- (ii). $L_{\perp} \in [1.6, 3.2] \text{ (} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}\text{)}$.

com $L_{\perp} = \sqrt{L_x^2 + L_y^2}$. A segunda seleção, de H+23, é similar, mas aumenta o intervalo de L_z ,

- (i). $L_z \in [0.75, 1.70] \text{ (} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}\text{)}$,
- (ii). $L_{\perp} \in [1.6, 3.2] \text{ (} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}\text{)}$.

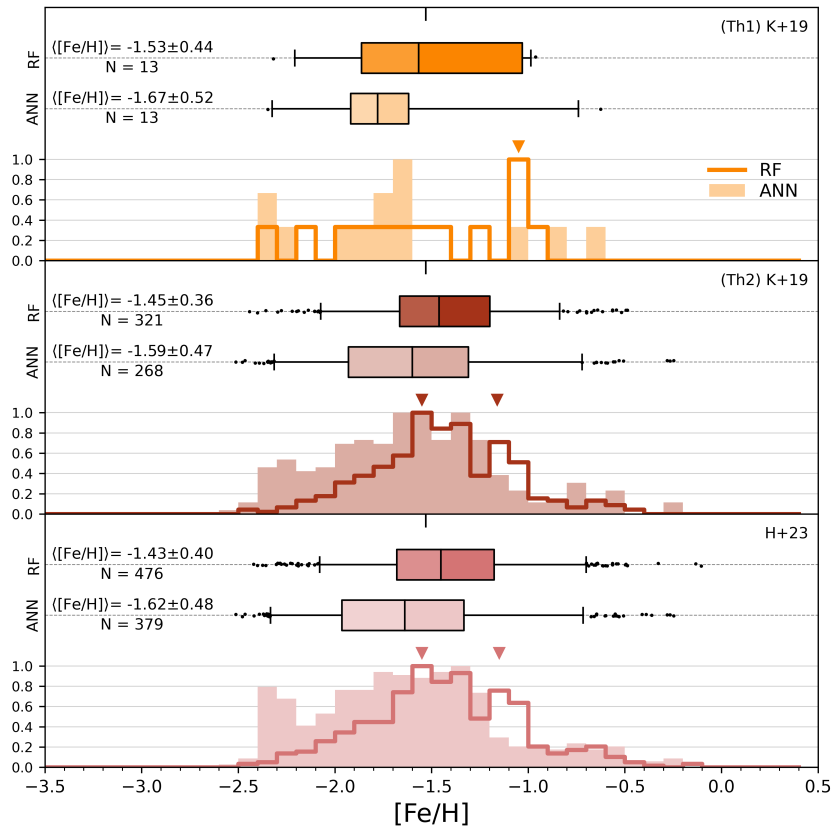


Figura 4.11: Distribuições de metalicidade para as seleções de Thamnos-1 e 2 por K-19 e de Thamnos, de modo geral, por H+23. Na linha contínua e mais escura estão os dados de metalicidade obtidos com RF e na parte sombreada e mais clara estão os dados obtidos com ANN. Na parte superior de cada painel temos um boxplot resumindo a distribuição e o valor médio da metalicidade.

e, por isso, na Figura 4.12 podemos ver as propriedades das duas seleções (Obs: as estrelas em rosa, da seleção K+19, também estão todas em H+23). Pode-se notar que as estrelas que H+23 tem a mais que K+19 complementam a amostra em excentricidades menores, maiores distâncias ao centro galáctico e idades levemente menores. Como vemos na Figura 4.13, mesmo H+23 contendo quase o dobro de estrelas que K+19, as MDFs são similares, se caracterizando por uma distribuição bem alargada de metalicidades.

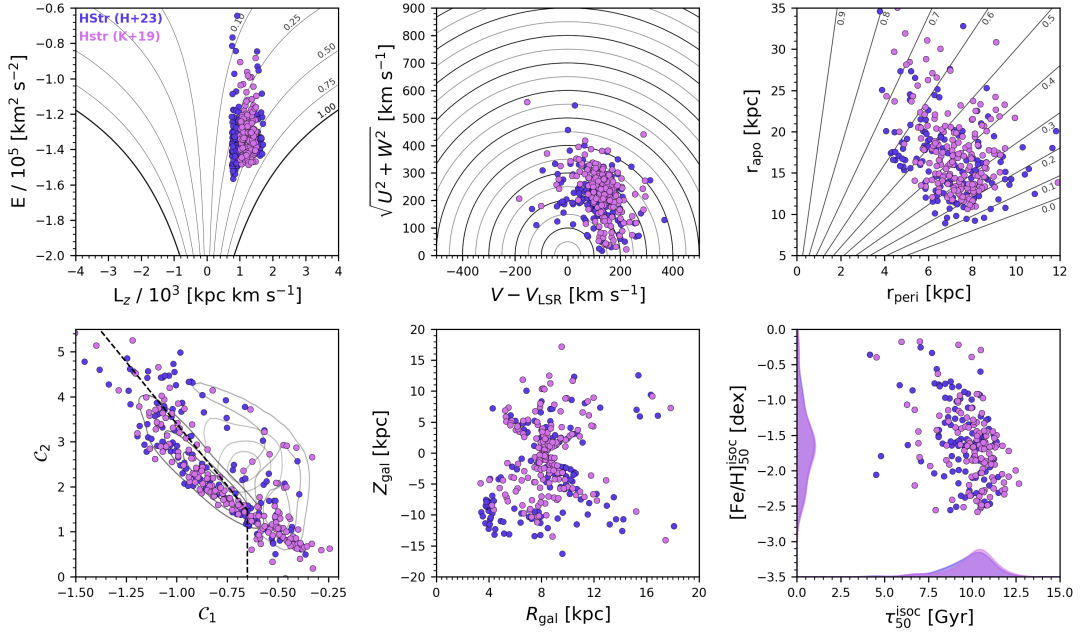


Figura 4.12: Painel com informações características das seleções similares a K+19 (roxo claro) e H+23 (roxo claro e escuro) para as Helmi Streams. **a.** Diagrama de E [$10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$] por L_z [$10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$]. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

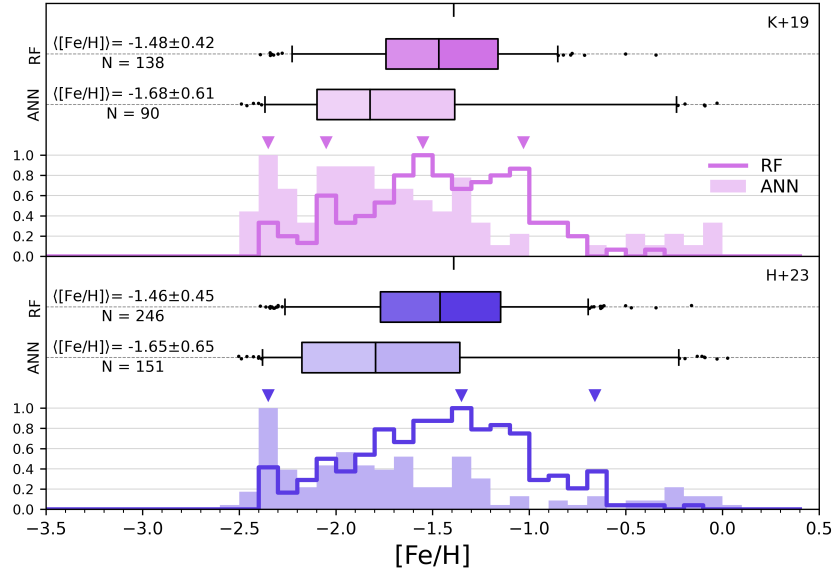


Figura 4.13: Distribuições de metalicidade para as 2 seleções das Helmi Streams. Na linha contínua e mais escura estão os dados de metalicidade obtidos com RF e na parte sombreada e mais clara estão os dados obtidos com ANN. Na parte superior de cada painel temos um boxplot resumindo a distribuição e o valor médio da metalicidade.

4.4 Nyx

Nyx é uma sub-estrutura caracterizada principalmente por órbitas bem prógradas e por ter estrelas mais ricas em metais comparando com os demais casos que comentamos. Foi descoberta devido a uma corrente estelar que supostamente esta também associada a um evento de acreção da nossa Galáxia (Necib et al., 2020). O critério de seleção desta amostra foi o mesmo de H+23,

- (i). $V_r \in [110, 205]$ (km s^{-1}),
- (ii). $V_\phi \in [90, 195]$ (km s^{-1}),
- (iii). $|X| < 3$ (kpc), $|Y| < 2$ (kpc), $|Z| < 2$ (kpc).

Note como esta sub-estrutura, é propositalmente selecionada próxima ao Sol.

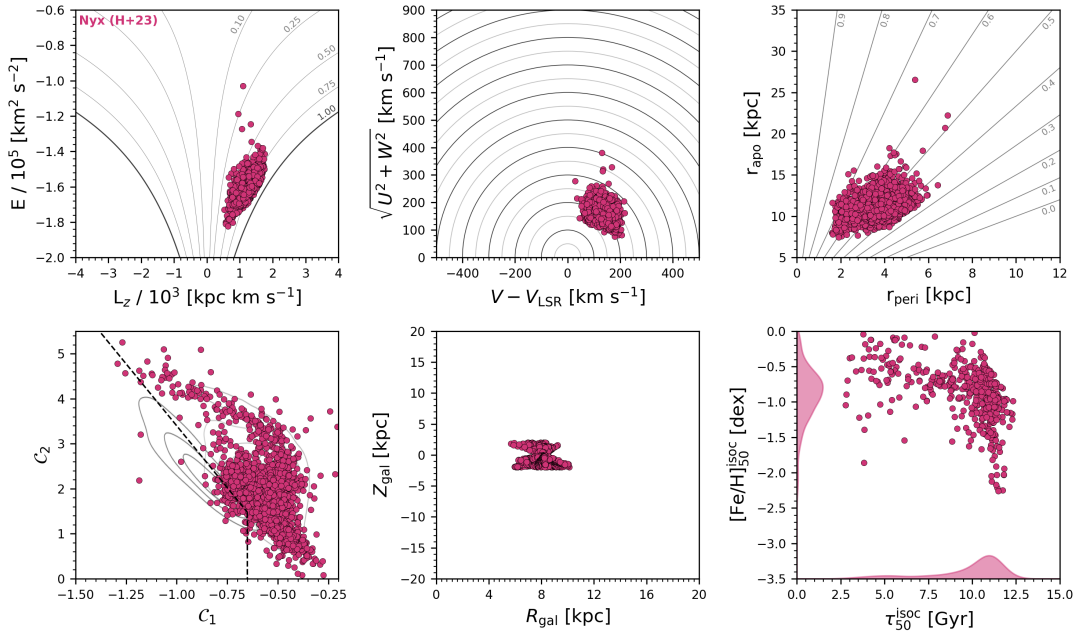


Figura 4.14: Painel com informações características da seleção de H+23 para Nyx. **a.** Diagrama de E [$10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$] por L_z [$10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$]. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

Podemos ver na Figura 4.14 como esta estrutura ocupa completamente a região das estrelas ricas em metais no diagrama de $C_1 \times C_2$, e de fato, como vemos na Figura 4.16, a metalicidade desta população é bem maior que das demais sub-estruturas analisadas, tendo em média $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.6$ dex.

4.5 LMS-1/Wukong e Pontus

LMS-1¹ (Yuan et al., 2020), ou ainda Wukong (Naidu et al., 2020), é uma sub-estrutura próxima à GES no espaço de $E \times L_z$, com estrelas mais pobres em metais.

Selecionamos LMS-1/Wukong com o critério de H+23 que aprimora a seleção de N+20:

- (i). $E \in [-1.7, -1.2] \text{ (} 10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}\text{)},$
- (ii). $L_z \in [0.2, 1.0] \text{ (} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}\text{)},$
- (iii). $e \in [0.4, 0.7],$
- (iv). $|Z_{\text{gal}}| > 3(\text{kpc}),$
- (v). $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}} < -1.45.$

Pontus (Malhan et al., 2022), por outro lado, é uma sub-estrutura retrógrada, também próxima à GES, mas com energias menores. Utilizando uma seleção adaptada da descrição de (Malhan et al., 2022), Ma+22, da sub-estrutura,

- (i). $E \in [-1.72, -1.56] \text{ (} 10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}\text{)},$
- (ii). $L_z \in [0.47, 0.0] \text{ (} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}\text{)},$
- (iii). $J_r \in [245, 725] \text{ (kpc km s}^{-1}\text{)},$
- (iv). $J_z \in [115, 545] \text{ (kpc km s}^{-1}\text{)},$
- (v). $L_{\perp} \in [0.39, 0.87] \text{ (} 10^3 \text{ kpc km s}^{-1}\text{)},$
- (vi). $e \in [0.5, 0.8],$
- (vii). $r_{\text{peri}} \in [1.0, 3.0] \text{ (kpc)},$
- (viii). $r_{\text{apo}} \in [8.0, 13.0] \text{ (kpc)},$
- (ix). $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}} < -1.3.$

(considerando o corte em metalicidade sugerido por H+23) chegamos a apenas 11 estrelas, que ainda assim é uma amostra maior que a utilizada nos artigos de Horta et al. (2023) e do próprio Malhan et al. (2022). Na Figura 4.15 temos a caracterização de LMS-1 e Pontus conjuntamente.

¹ O nome LMS-1, dado por Yuan et al. (2020), vem de *low-mass stellar-debris stream*.

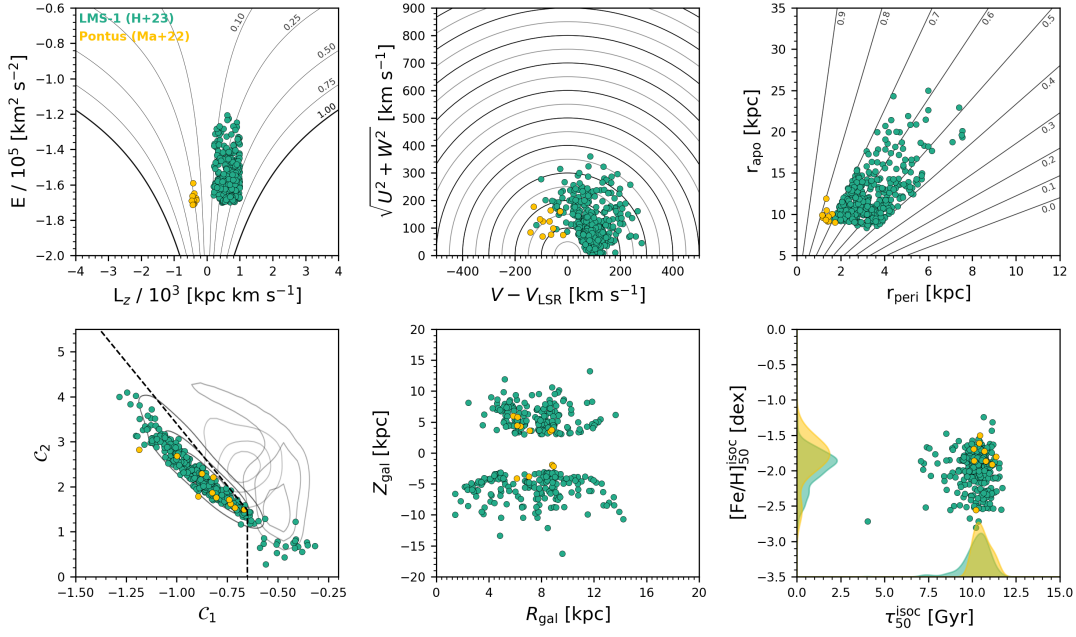


Figura 4.15: Paineis com informações características da seleção de LMS-1/Wukong (H+23, em verde) e Pontus (Ma+22, em amarelo). **a.** Diagrama de E [$10^5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-2}$] por L_z [$10^3 \text{ kpc km s}^{-1}$]. **b.** Diagrama de Toomre ($\sqrt{U^2 + W^2} \times \Delta V$). **c.** Diagrama de $r_{\text{apo}} \times r_{\text{peri}}$. **d.** Diagrama de $C_1 \times C_2$. **e.** Diagrama de $Z_{\text{gal}} \times R_{\text{gal}}$. **f.** Diagrama de $[\text{Fe}/\text{H}] \times \tau$.

Na Figura 4.16 podemos ver a comparação destas 3 sub-estruturas, Nyx, LMS-1/Wukong e Pontus. Podemos ver que de fato LMS-1 e Pontus são estruturas mais pobres em metais que as anteriores e, em contraste, Nyx é uma estrutura muito mais rica em metais.

4.6 Intersecções

Nesta Seção o objetivo é determinar quantas estrelas comuns há em duas seleções de uma mesma estrutura ou ainda em seleções de estruturas diferentes. Contudo, vale a pena primeiramente recobrar a proporção de estrelas selecionadas em cada sub-estrutura em que utilizamos um ou outro catálogo para a velocidade radial, como pode ser visto na Tabela 4.1.

Note como a utilização de outros catálogos para completar as velocidades radiais faltantes de fato contribuiu significativamente para o aumento do número de estrelas selecionadas (principalmente com a utilização do LAMOST).

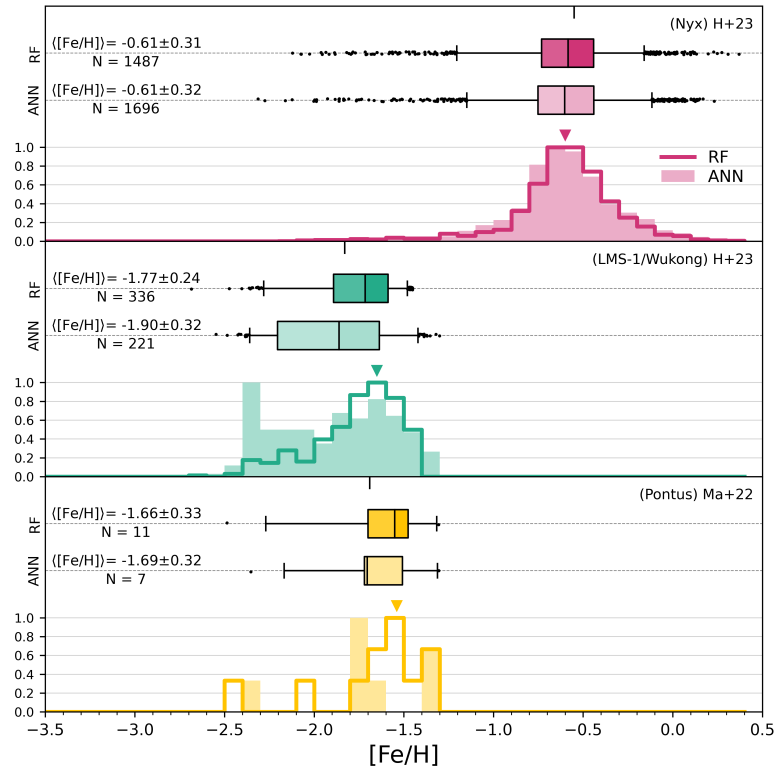


Figura 4.16: Distribuições de metalicidade para as sub-estruturas Nyx, LMS-1/Wukong e Pontus. Na linha contínua e mais escura estão os dados de metalicidade obtidos com RF e na parte sombreada e mais clara estão os dados obtidos com ANN. Na parte superior de cada painel temos um boxplot resumindo a distribuição e o valor médio da metalicidade.

Tabela 4.1 - Quantidade de estrelas, em cada seleção, com velocidades radiais retiradas do Gaia e outros catálogos.

Sub-estrutura	Seleção	Gaia (DR3)	GALAH (DR3)	APOGEE-2 (DR17)	RAVE (DR6)	LAMOST (DR8)
GES	F+21	3012	12	27	1	501
GES	H+23	4142	14	54	1	692
GES	M+19	1702	7	13	0	320
Sequoia	K+19	106	0	0	0	27
Sequoia	M+19	377	1	1	0	94
Sequoia	N+20	593	1	4	0	195
Thamnos-1	K+19	23	0	1	0	13
Thamnos-2	K+19	476	2	2	0	127
Thamnos	H+23	656	5	2	0	174
Helmi Str	K+19	155	0	3	0	36
Helmi Str	H+23	281	0	5	0	55
Nyx	H+23	2445	5	6	2	355
LMS-1/Wukong	H+23	282	1	10	0	48
Pontus	Ma+22	11	0	0	0	0

Além disto, é interessante analisarmos quanto das estrelas aparecem em mais de uma seleção, que é o que podemos ver na Figura 4.17. Note que, como esperado, seleções diferentes de uma mesma sub-estrutura compartilham muitos membros e seleções de sub-estruturas diferentes não tem muita intersecção. Contudo, vale notar o caso da seleção de LMS-1/Wukong que contém 12 estrelas que também estão nas Helmi Streams e 47 que estão em GES, além da seleção de N+20 para Sequoia que inclui 17 estrelas de Thamnos-1 (K+19).

	GES (F+21)	GES (H+23)	GES (M+19)	Sequoia (K+19)	Sequoia (M+19)	Sequoia (N+20)	Thamnos-1 (K+19)	Thamnos-2 (K+19)	Thamnos (H+23)	HStr (K+19)	HStr (H+23)	Nyx (H+23)	LMS-1 (H+23)	Pontus (Ma+22)
GES (F+21)	3553													
GES (H+23)	3260	4903												
GES (M+19)	1016	920	2042											
Sequoia (K+19)	0	0	0	133										
Sequoia (M+19)	0	0	0	119	473									
Sequoia (N+20)	0	0	0	133	415	793								
Thamnos-1 (K+19)	0	0	0	0	3	17	37							
Thamnos-2 (K+19)	0	0	0	0	0	0	0	607						
Thamnos (H+23)	0	0	0	0	0	0	19	534	837					
HStr (K+19)	0	0	2	0	0	0	0	0	0	194				
HStr (H+23)	0	0	3	0	0	0	0	0	0	194	341			
Nyx (H+23)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	7	2813		
LMS-1 (H+23)	0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	341	
Pontus (Ma+22)	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	11

Figura 4.17: Número de estrelas em comum entre a seleção da linha e a da coluna.

4.7 Idades e Metalicidades

Na Tabela 4.2 temos os resultados principais deste trabalho, i.e., as 3 estimativas de metalicidade das sub-estruturas e a idade média.

Como podemos ver, obtivemos idades parecidas para todas as sub-estruturas (~ 10 Gyr), mas em alguns casos com grande desvio padrão devido ao espalhamento dos dados e ao próprio método, já que mesmo em Almeida-Fernandes et al. (2023) podemos ver na validação que para estrelas de $\tau_{\text{adop}} > 8$ Gyr o erro, com relação à amostra de referência se torna da ordem de 1 Gyr ou mais, que é o desvio padrão típico obtido aqui.

Tabela 4.2 - Média e desvio padrão das metalicidades de cada sub-estrutura, obtidas com *random forest*, rede neural ou ajuste Bayesiano de isócronas, além da média da idade também obtida pelo último método.

Seleção	$\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle_{\text{RF}}$ [dex]	$\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle_{\text{ANN}}$ [dex]	$\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle_{50}^{\text{isoc}}$ [dex]	$\langle\tau\rangle_{50}^{\text{isoc}}$ [Gyr]
GES (F+21)	-1.30 ± 0.34	-1.44 ± 0.41	-1.50 ± 0.41	9.8 ± 1.4
GES (H+23)	-1.31 ± 0.36	-1.49 ± 0.43	-1.51 ± 0.42	9.8 ± 1.3
GES (M+19)	-1.18 ± 0.38	-1.23 ± 0.51	-1.36 ± 0.47	9.9 ± 1.5
Sequoia (K+19)	-1.50 ± 0.34	-1.68 ± 0.50	-1.65 ± 0.53	10.2 ± 1.3
Sequoia (M+19)	-1.47 ± 0.37	-1.66 ± 0.46	-1.64 ± 0.48	9.9 ± 1.4
Sequoia (N+20)	-1.45 ± 0.41	-1.66 ± 0.51	-1.60 ± 0.52	9.9 ± 1.4
Thamnos-1 (K+19)	-1.53 ± 0.44	-1.67 ± 0.52	-1.61 ± 0.50	9.4 ± 2.2
Thamnos-2 (K+19)	-1.45 ± 0.36	-1.59 ± 0.47	-1.63 ± 0.48	10.5 ± 1.2
Thamnos (H+23)	-1.43 ± 0.40	-1.62 ± 0.48	-1.62 ± 0.49	10.3 ± 1.3
HStr (K+19)	-1.48 ± 0.42	-1.68 ± 0.61	-1.66 ± 0.51	10.0 ± 1.4
HStr (H+23)	-1.46 ± 0.45	-1.65 ± 0.65	-1.59 ± 0.56	9.7 ± 1.4
Nyx (H+23)	-0.61 ± 0.31	-0.61 ± 0.32	-0.86 ± 0.41	9.7 ± 2.2
LMS-1 (H+23)	-1.77 ± 0.24	-1.90 ± 0.32	-1.97 ± 0.28	10.2 ± 0.9
Pontus (Ma+22)	-1.66 ± 0.33	-1.69 ± 0.32	-1.92 ± 0.36	10.6 ± 0.4

Podemos ver também na Tabela 4.2 que em todos os casos $\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle_{\text{RF}} \geq \langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle_{\text{ANN}} \geq \langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle_{\text{isoc}}$, mas as 3 são compatíveis entre si considerando o desvio padrão.

Obtivemos que Gaia-Enceladus/Sausage tem metalicidade de -1.28 ± 0.38 dex (combinando o resultado das 3 seleções e utilizando RF), Sequoia tem metalicidade de -1.45 ± 0.40 dex, similar a Thamnos com -1.44 ± 0.40 dex e as Helmi Streams com -1.46 ± 0.45 dex. Por outro lado, a estrutura Nyx é muito mais rica em metais, com uma metalicidade média de -0.61 ± 0.31 dex e tanto LMS-1/Wukong quanto Pontus são consideravelmente mais pobres em metais (-1.77 ± 0.24 e -1.66 ± 0.33 , respectivamente).

Estes valores são compatíveis com outros estudos (Tabela 4.3), como de Horta et al. (2023) que estimou -1.18 ± 0.42 dex para GES, -1.41 ± 0.36 para Sequoia (com a seleção de M+19), -1.53 ± 0.36 para Thamnos, -1.39 ± 0.55 para as Helmi Streams, -0.55 ± 0.29 para Nyx e -1.83 ± 0.25 . Horta et al. (2023) não tem uma estimativa para a metalicidade de Pontus já sua seleção só rendeu 2 estrelas.

Tabela 4.3 - Comparação entre as metalicidades médias (com desvios padrão) e o número de membros entre este trabalho e a literatura. A menos de Pontus, cuja referência é Malhan et al. (2022), todos os outros valores de referência foram retirados de Horta et al. (2023). As amostras de cada sub-estrutura foram obtidas combinando todas suas respectivas seleções e considerando os casos com $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}$.

Sub-estrutura	$\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle$ [dex]	$\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle_{\text{REF}}$ [dex]	N	N_{REF}
Gaia-Enceladus/Sausage	-1.28 ± 0.38	-1.18 ± 0.42	4477	2353
Sequoia	-1.45 ± 0.40	-1.41 ± 0.36	534	116
Thamnos	-1.44 ± 0.40	-1.53 ± 0.36	510	121
Helmi Streams	-1.46 ± 0.45	-1.39 ± 0.55	246	85
Nyx	-0.61 ± 0.31	-0.55 ± 0.29	1487	589
LMS-1/Wukong	-1.77 ± 0.24	-1.83 ± 0.25	336	31
Pontus	-1.66 ± 0.33	-1.72 ± 0.44	11	9

Conclusão

Utilizando as informações cinemáticas do Gaia (DR3) e um potencial galáctico (McMillan, 2017), calculamos, para o iDR4 do S-PLUS, informações dinâmicas, como energia, momento angular, ações, excentricidade da órbita e outros, utilizando o pacote em python `galpy`.

A partir destas informações pudemos então selecionar, utilizando critérios da literatura, algumas das sub-estruturas conhecidas que compõe o halo da Galáxia. Neste trabalho comparamos as propriedades dinâmicas e de metalicidades fotométricas das sub-estruturas selecionadas e entre diferentes seleções da mesma estrutura.

Utilizando cores do S-PLUS, conseguimos montar um diagrama que separa bem estrelas anãs, gigantes e, mais importante, as estrelas pobres em metais, de modo que é possível pensar em um corte neste espaço ($\mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2$) que separa as estrelas acretadas (originalmente selecionadas com abundancias do APOGEE) das etrelas formadas *in Situ* (com uma completeza de 79% e precisão de 69%). Além disso, podemos utilizar o diagrama para avaliar possíveis contaminações nas seleções das sub-estruturas.

Utilizando um método de ajuste Bayesiano de isócronas, conseguimos obter parâmetros como idade, massa inicial e metalicidade utilizando o S-PLUS como entrada ($\{M_r, \mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}\}$). Após isto, para melhorar o resultado do ajuste utilizamos ainda uma outra etapa que utiliza os resultados da primeira como entrada ($\{T_{\text{eff},50}, \log g_{50}, [\text{Fe}/\text{H}]_{50}, m_{\text{ini},50}\}$).

Obtivemos para todas as sub-estruturas idades médias similares, ~ 10 Gyr. Para as metalicidades vale mencionar que das 3 estimativas que utilizamos, consistentemente $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{ANN}}$ é mais pobre em metais do que $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}$ e $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{isoc}}$ é ainda menor que as demais. Dito isso, utilizamos principalmente $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{RF}}$ ao longo deste trabalho e obtivemos que a estrutura de Gaia-Enceladus/Sausage tem metalicidade de -1.28 ± 0.38 dex (combi-

nando o resultado das 3 seleções), Sequoia tem metalicidade de -1.45 ± 0.40 dex, similar a Thamnos com -1.44 ± 0.40 dex e as Helmi Streams com -1.46 ± 0.45 dex. É interessante comentar que a hipótese de Naidu et al. (2020) de haver outras duas estruturas junto com Sequoia parece se verificar, já que pôde ser visto 3 picos bem distintos nas MDFs (principalmente na seleção de K+19) referentes a I'Itoi, Sequoia e Arjuna, além de um quarto pico em torno de -1.2 dex de metalicidade que deve ser investigado mais a fundo, podendo ser uma estrutura ainda não identificada.

Por outro lado, a estrutura Nyx é muito mais rica em metais, com uma metalicidade média de -0.61 ± 0.31 dex e tanto LMS-1/Wukong quanto Pontus são consideravelmente mais pobres em metais (-1.77 ± 0.24 e -1.66 ± 0.33 , respectivamente), apesar de que nestes dois últimos casos houve um corte proposital na metalicidade durante a seleção da amostra.

Desta forma mostramos como é possível razoavelmente utilizar dados fotométricos para fazer análises destas sub-estruturas do halo da Galáxia, principalmente com parâmetros estelares como T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, τ , m_{ini} e outros. Partimos de um número bem maior de estrelas nas amostras selecionadas do que em estudos que utilizam dados espectroscópicos. Além disso, este estudo foi todo feito a partir do iDR4 do S-PLUS, que cobre apenas $\sim 25\%$ da área total planejada para o levantamento. Assim, esta análise pode ser aprimorada com mais dados dos próximos *data releases*.

Referências Bibliográficas

- Abdurro'uf Accetta K., Aerts C., Silva Aguirre V., Ahumada R., Ajgaonkar N., Filiz Ak N., Alam S., Allende Prieto C., Almeida A., Anders F., Anderson S. F., Andrews B. H., Anguiano B., Aquino-Ortíz E., Aragón-Salamanca A., Argudo-Fernández M., Ata M., et al. The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, vol. 259, p. 35
- Almeida-Fernandes F., Placco V. M., Rocha-Pinto H. J., Fernandes M. B., Limberg G., Beraldo e Silva L., Amarante J. A. S., Perottoni H. D., Overzier R., Schoenell W., Ribeiro T., Kanaan A., Mendes de Oliveira C., *Chemodynamical Properties and Ages of Metal-Poor Stars in S-PLUS*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, vol. 523, p. 2934
- Almeida-Fernandes F., SamPedro L., Herpich F. R., Molino A., Barbosa C. E., Buzzo M. L., Overzier R. A., de Lima E. V. R., Nakazono L. M. I., Oliveira Schwarz G. B., Perottoni H. D., Bolutavicius G. F., Gutiérrez-Soto L. A., Santos-Silva T., Vitorelli A. Z., Werle A., Whitten D. D., Costa Duarte M. V., Bom C. R., Coelho P., Sodré L., Placco V. M., Teixeira G. S. M., Alonso-García J., Barbosa C. L., Beers T. C., Bonatto C. J., Chies-Santos A. L., Hartmann E. A., Lopes de Oliveira R., Navarete F., Kanaan A., Ribeiro T., Schoenell W., Mendes de Oliveira C., *Data Release 2 of S-PLUS: Accurate Template-Fitting Based Photometry Covering 1000 Deg² in 12 Optical Filters*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, vol. 511, p. 4590
- Bailer-Jones C. A. L., Rybizki J., Fouesneau M., Demleitner M., Andrae R., *Estimating Distances from Parallaxes. V. Geometric and Photogeometric Distances to 1.47 Billion*

- Stars in Gaia Early Data Release 3, *The Astronomical Journal*, 2021, vol. 161, p. 147
- Barbá R. H., Minniti D., Geisler D., Alonso-García J., Hempel M., Monachesi A., Arias J. I., Gómez F. A., A Sequoia in the Garden: FSR 1758—Dwarf Galaxy or Giant Globular Cluster?, *The Astrophysical Journal*, 2019, vol. 870, p. L24
- Bell E. F., Zucker D. B., Belokurov V., Sharma S., Johnston K. V., Bullock J. S., Hogg D. W., Jahnke K., de Jong J. T. A., Beers T. C., Evans N. W., Grebel E. K., Ivezić Ž., Koposov S. E., Rix H.-W., Schneider D. P., Steinmetz M., Zolotov A., The Accretion Origin of the Milky Way's Stellar Halo, *The Astrophysical Journal*, 2008, vol. 680, p. 295
- Belokurov V., Erkal D., Evans N. W., Koposov S. E., Deason A. J., Co-Formation of the Disc and the Stellar Halo, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, vol. 478, p. 611
- Benitez N., Dupke R., Moles M., Sodre L., Cenarro J., Marin-Franch A., Taylor K., Cristobal D., Fernandez-Soto A., Mendes de Oliveira C., Cepa-Nogue J., Abramo L. R., Alcaniz J. S., Overzier R., Hernandez-Monteagudo C., Alfaro E. J., Kanaan A., Carvano J. M., Reis R. R. R., et al., 2014 J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey
- Bianchini P., Ibata R., Famaey B., Exploring the Outskirts of Globular Clusters: The Peculiar Kinematics of NGC 3201, *The Astrophysical Journal*, 2019, vol. 887, p. L12
- Binney J., Actions for Axisymmetric Potentials, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, vol. 426, p. 1324
- Bonoli S., Marín-Franch A., Varela J., Vázquez Ramió H., Abramo L. R., Cenarro A. J., Dupke R. A., Vilchez J. M., Cristóbal-Hornillos D., González Delgado R. M., Hernández-Monteagudo C., López-Sanjuan C., Muniesa D. J., Civera T., Ederoclite A., Hernán-Caballero A., Marra V., Baqui P. O., Cortesi A., Cypriano E. S., Daflon S., et al. The miniJPAS Survey: A Preview of the Universe in 56 Colors, *Astronomy and Astrophysics*, 2021, vol. 653, p. A31
- Bovy J., Galpy: A Python Library for Galactic Dynamics, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, vol. 216, p. 29

- Buder S., Lind K., Ness M. K., Feuillet D. K., Horta D., Monty S., Buck T., Nordlander T., Bland-Hawthorn J., Casey A. R., de Silva G. M., D’Orazi V., Freeman K. C., Hayden M. R., Kos J., Martell S. L., Lewis G. F., Lin J., Schlesinger K. J., Sharma S., Simpson J. D., Stello D., Zucker D. B., Zwitter T., Ciucă I., Horner J., Kobayashi C., Ting Y.-S., Wyse R. F. G., Wyse G. C., The GALAH Survey: Chemical Tagging and Chrono-Chemodynamics of Accreted Halo Stars with GALAH+ DR3 and Gaia eDR3, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, vol. 510, p. 2407
- Bullock J. S., Johnston K. V., Tracing Galaxy Formation with Stellar Halos. I. Methods, *The Astrophysical Journal*, 2005, vol. 635, p. 931
- Carrillo A., Deason A. J., Fattahi A., Callingham T. M., Grand R. J. J., Can We Really Pick and Choose? Benchmarking Various Selections of Gaia Enceladus/Sausage Stars in Observations with Simulations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023
- Casagrande L., Schönrich R., Asplund M., Cassisi S., Ramírez I., Meléndez J., Bensby T., Feltzing S., New Constraints on the Chemical Evolution of the Solar Neighbourhood and Galactic Disc(s). Improved Astrophysical Parameters for the Geneva-Copenhagen Survey, *Astronomy and Astrophysics*, 2011, vol. 530, p. A138
- Cenarro A. J., Moles M., Cristóbal-Hornillos D., et al. J-PLUS: The Javalambre Photometric Local Universe Survey, *Astronomy and Astrophysics*, 2019, vol. 622, p. A176
- Das P., Hawkins K., Jofré P., Ages and Kinematics of Chemically Selected, Accreted Milky Way Halo Stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, vol. 493, p. 5195
- Dotter A., MESA Isochrones and Stellar Tracks (MIST) 0: Methods for the Construction of Stellar Isochrones, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2016, vol. 222, p. 8
- Feuillet D. K., Sahlholdt C. L., Feltzing S., Casagrande L., Selecting Accreted Populations: Metallicity, Elemental Abundances, and Ages of the Gaia-Sausage-Enceladus and Sequoia Populations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, vol. 508, p. 1489

- Gaia Collaboration Vallenari A., Brown A. G. A., Prusti T., de Bruijne J. H. J., Arenou F., Babusiaux C., Biermann M., Creevey O. L., Ducourant C., Evans D. W., Eyer L., Guerra R., Hutton A., Jordi C., Klioner S. A., Lammers U. L., Lindegren L., Luri X., Mignard F., et al. Gaia Data Release 3. Summary of the Content and Survey Properties, *Astronomy and Astrophysics*, 2023, vol. 674, p. A1
- Harris W. E., A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way, *The Astronomical Journal*, 1996, vol. 112, p. 1487
- Hawkins K., Jofré P., Masseron T., Gilmore G., Using Chemical Tagging to Redefine the Interface of the Galactic Disc and Halo, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 453, p. 758
- Helmi A., Babusiaux C., Koppelman H. H., Massari D., Veljanoski J., Brown A. G. A., The Merger That Led to the Formation of the Milky Way's Inner Stellar Halo and Thick Disk, *Nature*, 2018, vol. 563, p. 85
- Helmi A., White S. D. M., Building up the Stellar Halo of the Galaxy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1999, vol. 307, p. 495
- Helmi A., White S. D. M., de Zeeuw P. T., Zhao H., Debris Streams in the Solar Neighbourhood as Relicts from the Formation of the Milky Way, *Nature*, 1999, vol. 402, p. 53
- Helmi A., de Zeeuw P. T., Mapping the Substructure in the Galactic Halo with the next Generation of Astrometric Satellites, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2000, vol. 319, p. 657
- Horta D., Schiavon R. P., Mackereth J. T., Pfeffer J., Mason A. C., Kisku S., Fragkoudi F., Allende Prieto C., Cunha K., Hasselquist S., Holtzman J., Majewski S. R., Nataf D., O'Connell R. W., Schultheis M., Smith V. V., Evidence from APOGEE for the Presence of a Major Building Block of the Halo Buried in the Inner Galaxy, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, vol. 500, p. 1385
- Horta D., Schiavon R. P., Mackereth J. T., Weinberg D. H., Hasselquist S., Feuillet D., O'Connell R. W., Anguiano B., Allende-Prieto C., Beaton R. L., Bizyaev D., Cunha K.,

- Geisler D., García-Hernández D. A., Holtzman J., Jönsson H., Lane R. R., Majewski S. R., Mészáros S., Minniti D., Nitschelm C., Shetrone M., Smith V. V., Zasowski G., The Chemical Characterization of Halo Substructure in the Milky Way Based on APOGEE, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, vol. 520, p. 5671
- Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., A Dwarf Satellite Galaxy in Sagittarius, *Nature*, 1994, vol. 370, p. 194
- Jean-Baptiste I., Di Matteo P., Haywood M., Gómez A., Montuori M., Combes F., Semelin B., On the Kinematic Detection of Accreted Streams in the Gaia Era: A Cautionary Tale, *Astronomy and Astrophysics*, 2017, vol. 604, p. A106
- Jørgensen B. R., Lindegren L., Determination of Stellar Ages from Isochrones: Bayesian Estimation versus Isochrone Fitting, *Astronomy and Astrophysics*, 2005, vol. 436, p. 127
- Koppelman H. H., Helmi A., Massari D., Price-Whelan A. M., Starkenburg T. K., Multiple Retrograde Substructures in the Galactic Halo: A Shattered View of Galactic History, *Astronomy and Astrophysics*, 2019, vol. 631, p. L9
- Kroupa P., On the Variation of the Initial Mass Function, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2001, vol. 322, p. 231
- Lane J., Bovy J., Mackereth T., The Stellar Mass of the Gaia-Sausage/Enceladus Accretion Remnant, 2023
- Limberg G., Souza S. O., Pérez-Villegas A., Rossi S., Perottoni H. D., Santucci R. M., Reconstructing the Disrupted Dwarf Galaxy Gaia-Sausage/Enceladus Using Its Stars and Globular Clusters, *The Astrophysical Journal*, 2022, vol. 935, p. 109
- Lövdal S. S., Ruiz-Lara T., Koppelman H. H., Matsuno T., Dodd E., Helmi A., Substructure in the Stellar Halo near the Sun. I. Data-driven Clustering in Integrals-of-Motion Space, *Astronomy and Astrophysics*, 2022, vol. 665, p. A57
- Mackereth J. T., Schiavon R. P., Pfeffer J., Hayes C. R., Bovy J., Anguiano B., Allende Prieto C., Hasselquist S., Holtzman J., Johnson J. A., Majewski S. R., O'Connell R., Shetrone M., Tissera P. B., Fernández-Trincado J. G., The Origin of Accreted Stellar

- Halo Populations in the Milky Way Using APOGEE, Gaia, and the EAGLE Simulations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 482, p. 3426
- McMillan P. J., The Mass Distribution and Gravitational Potential of the Milky Way, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, vol. 465, p. 76
- Majewski S. R., Schiavon R. P., Frinchaboy P. M., Allende Prieto C., Barkhouser R., Bizyaev D., Blank B., Brunner S., Burton A., Carrera R., Chojnowski S. D., Cunha K., Epstein C., Fitzgerald G., García Pérez A. E., Hearty F. R., Henderson C., Holtzman J. A., Johnson J. A., Lam C. R., et al. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE), *The Astronomical Journal*, 2017, vol. 154, p. 94
- Majewski S. R., Skrutskie M. F., Weinberg M. D., Ostheimer J. C., A Two Micron All Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. I. Morphology of the Sagittarius Core and Tidal Arms, *The Astrophysical Journal*, 2003, vol. 599, p. 1082
- Malhan K., Ibata R. A., Sharma S., Famaey B., Bellazzini M., Carlberg R. G., D'Souza R., Yuan Z., Martin N. F., Thomas G. F., The Global Dynamical Atlas of the Milky Way Mergers: Constraints from Gaia EDR3-based Orbits of Globular Clusters, Stellar Streams, and Satellite Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 2022, vol. 926, p. 107
- Mateo M., Olszewski E. W., Morrison H. L., Tracing the Outer Structure of the Sagittarius Dwarf Galaxy: Detections at Angular Distances between 10° and 34° , *The Astrophysical Journal*, 1998, vol. 508, p. L55
- Mendes de Oliveira C., Ribeiro T., Schoenell W., Kanaan A., Overzier R. A., Molino A., Sampedro L., Coelho P., Barbosa C. E., Cortesi A., Costa-Duarte M. V., Herpich F. R., Hernandez-Jimenez J. A., Placco V. M., Xavier H. S., Abramo L. R., Saito R. K., Chies-Santos A. L., Ederoclite A., et al. The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): Improved SEDs, Morphologies, and Redshifts with 12 Optical Filters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 489, p. 241
- Myeong G. C., Vasiliev E., Iorio G., Evans N. W., Belokurov V., Evidence for Two Early Accretion Events That Built the Milky Way Stellar Halo, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 488, p. 1235

- Naidu R. P., Conroy C., Bonaca A., Johnson B. D., Ting Y.-S., Caldwell N., Zaritsky D., Cargile P. A., Evidence from the H3 Survey That the Stellar Halo Is Entirely Comprised of Substructure, *The Astrophysical Journal*, 2020, vol. 901, p. 48
- Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., The Structure of Cold Dark Matter Halos, *The Astrophysical Journal*, 1996, vol. 462, p. 563
- Necib L., Ostdiek B., Lisanti M., Cohen T., Freytsis M., Garrison-Kimmel S., Hopkins P. F., Wetzel A., Sanderson R., Evidence for a Vast Prograde Stellar Stream in the Solar Vicinity, *Nature Astronomy*, 2020, vol. 4, p. 1078
- Nordström B., Mayor M., Andersen J., Holmberg J., Pont F., Jørgensen B. R., Olsen E. H., Udry S., Mowlavi N., The Geneva-Copenhagen Survey of the Solar Neighbourhood. Ages, Metallicities, and Kinematic Properties of $\sim 14\,000$ F and G Dwarfs, *Astronomy and Astrophysics*, 2004, vol. 418, p. 989
- Queiroz A. B. A., Chiappini C., Perez-Villegas A., Khalatyan A., Anders F., Barbuy B., Santiago B. X., Steinmetz M., Cunha K., Schultheis M., Majewski S. R., Minchev I., Minniti D., Beaton R. L., Cohen R. E., da Costa L. N., Fernández-Trincado J. G., Garcia-Hernández D. A., Geisler D., Hasselquist S., Lane R. R., Nitschelm C., Rojas-Arriagada A., Roman-Lopes A., Smith V., Zasowski G., The Milky Way Bar and Bulge Revealed by APOGEE and Gaia EDR3, *Astronomy and Astrophysics*, 2021, vol. 656, p. A156
- Schlafly E. F., Finkbeiner D. P., Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD, *The Astrophysical Journal*, 2011, vol. 737, p. 103
- Schönrich R., Binney J., Dehnen W., Local Kinematics and the Local Standard of Rest, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, vol. 403, p. 1829
- Searle L., Zinn R., Composition of Halo Clusters and the Formation of the Galactic Halo., *The Astrophysical Journal*, 1978, vol. 225, p. 357
- Soderblom D. R., The Ages of Stars, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2010, vol. 48, p. 581

- Steinmetz M., Matijević G., Enke H., Zwitter T., Guiglion G., McMillan P. J., Kordopatis G., Valentini M., Chiappini C., Casagrande L., Wojno J., Anguiano B., Bienaymé O., Bijaoui A., Binney J., Burton D., Cass P., de Laverny P., Fiegert K., RAVE Collaboration The Sixth Data Release of the Radial Velocity Experiment (RAVE). I. Survey Description, Spectra, and Radial Velocities, *The Astronomical Journal*, 2020, vol. 160, p. 82
- Wang C., Huang Y., Yuan H., Zhang H., Xiang M., Liu X., The Value-added Catalog for LAMOST DR8 Low-resolution Spectra, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, vol. 259, p. 51
- White S. D. M., Rees M. J., Core Condensation in Heavy Halos: A Two-Stage Theory for Galaxy Formation and Clustering., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1978, vol. 183, p. 341
- Whitten D. D., Placco V. M., Beers T. C., An D., et al. The Photometric Metallicity and Carbon Distributions of the Milky Way's Halo and Solar Neighborhood from S-PLUS Observations of SDSS Stripe 82, *The Astrophysical Journal*, Volume 912, Issue 2, id.147, <NUMPAGES>20</NUMPAGES> pp., 2021, vol. 912, p. 147
- York D. G., Adelman J., Anderson Jr. J. E., Anderson S. F., Annis J., Bahcall N. A., Bakken J. A., Barkhouser R., Bastian S., Berman E., Boroski W. N., Bracker S., Briegel C., Briggs J. W., Brinkmann J., Brunner R., Burles S., Carey L., Carr M. A., Castander F. J., Chen B., SDSS Collaboration The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary, *The Astronomical Journal*, 2000, vol. 120, p. 1579
- Yuan Z., Chang J., Beers T. C., Huang Y., A Low-mass Stellar-debris Stream Associated with a Globular Cluster Pair in the Halo, *The Astrophysical Journal*, 2020, vol. 898, p. L37

Apêndice

Validação do Método Bayesiano Para Ajuste de Isócronas

Para validar o método de ajuste Bayesiano de isócronas, descrito na Seção 3.3, utilizamos o catálogo do *Geneva-Copenhagen Survey* (GCS; Nordström et al. 2004; Casagrande et al. 2011) como referência, já que este tem determinações muito precisas de idades utilizando a cromodinâmica das estrelas. Contudo, um cruzamento direto do S-PLUS (iDR4) com o GCS não termina com muitas estrelas, portanto é necessário adotar uma etapa intermediária.

Utilizando os espectros Bp/Rp de baixa resolução do Gaia podemos obter magnitudes sintéticas do S-PLUS convoluindo estes com as curvas de transmissibilidade dos filtros. Isto pode ser feito utilizando o próprio pacote python do Gaia para lidar com os espectros (`gaiaxy`¹). Mais especificamente utilizamos a função `generate`, que foi feita justamente para gerar magnitudes sintéticas, com o sistema de filtros do J-PLUS (Cenarro et al., 2019), a contrapartida do S-PLUS no hemisfério Norte (que utiliza os mesmos filtros).

Para ter certeza que estávamos utilizando dados similares, fizemos uma mini-calibração destes dados gerados utilizando ~ 100 mil estrelas escolhidas aleatoriamente na STRIPE-82, e que tinham esses espectros do Gaia. Como os dados do S-PLUS que utilizamos neste trabalho já são corrigidos pela extinção por poeira interestelar, corrigimos também estas magnitudes sintéticas, utilizando mapas de extinção (Schlafly e Finkbeiner, 2011). Determinamos, com estes dados corrigidos, quais eram os *offsets* entre as magnitudes do S-PLUS (iDR4) e as geradas com o Gaia (DR3) (Figura A.1).

A partir disso, utilizamos um catálogo de estrelas do GCS que tinha espectros corres-

¹ <https://gaiaxy.readthedocs.io/en/latest/gaiaxy.generator.html>

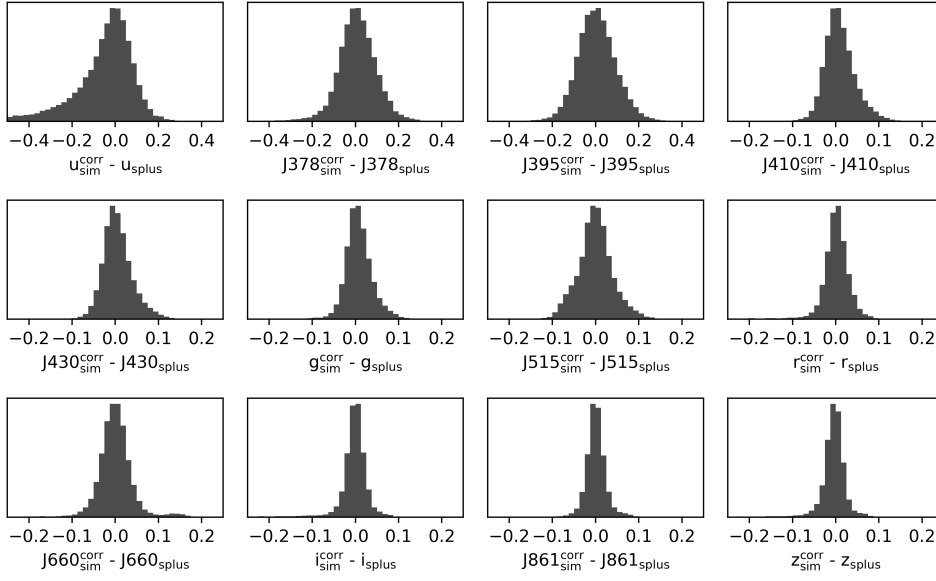


Figura A.1: Histogramas das diferenças entre as magnitudes simuladas com o Gaia, já corrigidas, e as magnitude originais do S-PLUS, para estrelas da STRIPE-82

pondentes do Gaia (~ 12 mil) e tomamos as magnitudes do S-PLUS sintéticas (corrigidas com os *offsets* anteriores) para utilizar de *input*, dada a prescrição da Seção 3.3. Na Figura A.2 podemos ver a comparação das idades obtidas com o nosso método e as idades do GCS.

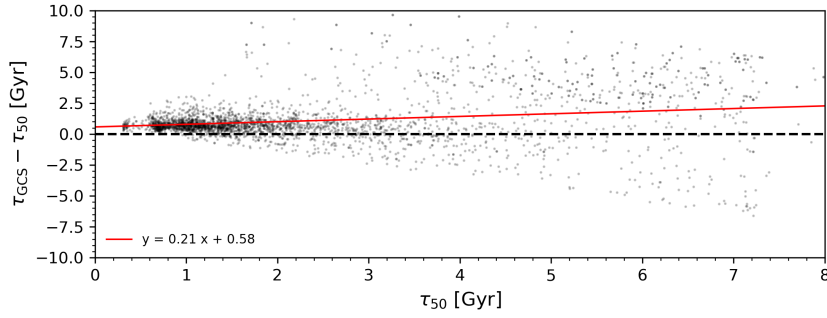


Figura A.2: Comparação entre as idades obtidas com a amostra de validação (com magnitudes simuladas) e os dados do GCS.

Estrutura Próxima à Sequoia

As seleções, para a sub-estrutura do halo próximo ao Sol, Sequoia, dadas na Seção 4.2.1, acabam todas incluindo uma sequência de estrelas com uma distribuição peculiar em $E \times L_z$, e distribuição de excentricidade bem distinta das outras estrelas da seleção. Na Figura B.1 podemos ver somente a estrutura em questão (que foi removida das seleções de Sequoia).

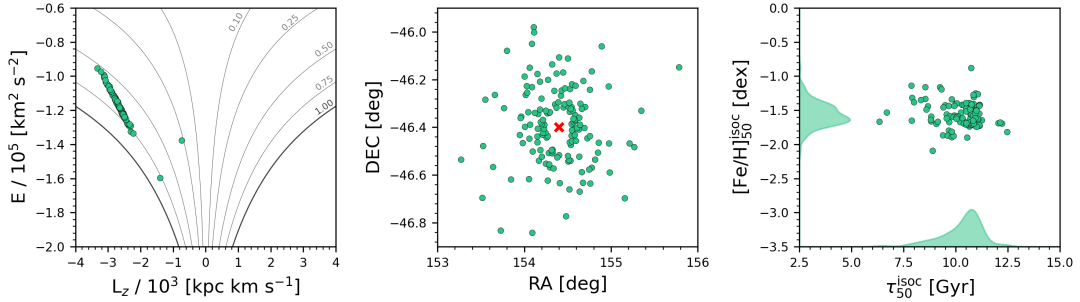


Figura B.1: Diagramas de (a) energia por momento angular, (b) posição no céu (ra \times dec), com a posição de NGC 3201 marcada em vermelho, e (c) metalicidade por idade obtidas a partir do método isocronal.

Diferente das sub-estruturas estudadas neste trabalho, que já se espalharam por todo o halo, esta estrutura é espacialmente coerente. Confinada em

- (i). $\text{RA} \in [153, 156] \text{ (deg)}$,
- (ii). $\text{DEC} \in [-46.9, -45.9] \text{ (deg)}$.

Podemos associar esta estrutura a um aglomerado globular, NGC 3201, a $\sim 4.9 \text{ kpc}$ de distância (Harris, 1996), que vem sendo re-estudado nos últimos anos (e.g., Bianchini et al. 2019) devido à sua dinâmica peculiar, tendo altíssimas velocidades e um movimento bem retrógrado, como podemos ver na Figura B.1.