

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

Yuri Abuchaim de Oliveira

**Análise do perfil quimiodinâmico da
sobredensidade Triangulum-Andromeda**

São Paulo

2023

Yuri Abuchaim de Oliveira

Análise do perfil quimiodinâmico da sobredensidade Triangulum-Andromeda

Dissertação apresentada ao Departamento de
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas da Universidade de
São Paulo como requisito parcial para a ob-
tenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador(a): Prof. Silvia C. F. Rossi

Coorientador: Dr. Hélio D. Perottoni

São Paulo

2023

A todos que já olharam para o céu imaginando quantos segredos residem nas estrelas.

Agradecimentos

Muitas pessoas me auxiliaram em minha trajetória acadêmica, alguns acreditaram em mim, outros me apoiaram e vários me conduziram.

Um agradecimento especial à minha orientadora Silvia Rossi, minha “prof” que me ajudou a desvendar os segredos das estrelas pobres em metais desde a graduação. Meu co-orientador Hélio Perottoni, pelo companheirismo e ideias que levaram esta pesquisa até à sua conclusão, mesmo em meio à reuniões pelas madrugadas.

Agradeço aos meus pais, Almir e Cláudia, por me apoiarem no caminho da pesquisa científica. À minha tia Silvia, minha segunda mãe, que me acolheu durante esse trajeto.

Meus estimados amigos de graduação, de pesquisa e mesmo os que só me aguentaram até aqui me ouvindo falar sobre estrelas.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por ter me concedido bolsa de estudo sob o projeto 88887.604784/2021-00.

Ao IAG, pelo apoio institucional.

“Minha alma vem de mundos melhores e tenho uma saudade incurável das estrelas.”

Nikos Kazantzakis

Resumo

A sobredensidade Triangulum-Andromeda (TriAnd) é uma das várias subestruturas estelares que povoam o disco externo da Via Láctea, estando localizada a 18 kpc do Sol. Desde sua descoberta, TriAnd foi o cerne de diferentes estudos focados em desvendar detalhes sobre suas características. Entretanto, o complexo perfil químico observado para as estrelas de TriAnd, combinado com o baixo número de estrelas candidatas com espectroscopia de alta resolução disponível, além da escassez de estudos com estrelas de campo no disco externo, são as restrições mais relevantes para estabelecer-se sua história de formação. Neste trabalho, faz-se uma investigação quimiodinâmica de uma amostra maior e atualizada de 31 estrelas candidatas a pertencerem a TriAnd, observadas utilizando o espectrógrafo de alta resolução GRACES ($R = 40.000$) instalado no Gemini Norte (8,1 m), fornecendo mais subsídios para uma melhor compreensão dessa sobredensidade.

As abundâncias químicas de onze elementos foram derivadas para as estrelas deste trabalho, a fim de se comparar o perfil químico de TriAnd com outras populações estelares Galácticas. Além disso, a população de TriAnd foi dinamicamente caracterizada através da análise de seus parâmetros orbitais. No espaço de abundâncias químicas, a maioria das candidatas ao TriAnd apresentam características similares à população do disco fino externo, apresentando também propriedades dinâmicas compatíveis com uma população estelar do disco, sugerindo que a sobredensidade apresenta uma origem *in situ*. No entanto, ao se aplicar um corte em excentricidade, foi possível detectar uma contaminação estelar que parece ser consistente com uma população acretada. Tais contaminantes acretados do halo, que se encontram no mesmo espaço que TriAnd, sugerem a elucidação da discussão histórica sobre a natureza da sobredensidade devido ao seu complexo perfil químico.

Abstract

The Triangulum-Andromeda overdensity (TriAnd) is one of several stellar substructures that populate the outer disk of the Milky Way, located at a distance of 18 kpc from the Sun. Since its discovery, TriAnd has been the focus of different studies aimed at unraveling details about its characteristics. However, the complex chemical profile observed for TriAnd stars, combined with the limited number of available high-resolution spectroscopic candidates, as well as the scarcity of field star studies in the outer disk, are the most relevant constraints for establishing its formation history. In this work, we conduct a chemodynamical investigation of an updated and larger sample of 31 candidate stars belonging to TriAnd, observed using the high-resolution spectrograph GRACES ($R = 40,000$) installed on the Gemini North (8.1 m), providing further insights for a better understanding of this overdensity.

The chemical abundances of eleven elements were derived for the stars in this work's sample to compare TriAnd's chemical profile with other Galactic stellar populations. Besides that, TriAnd population was dynamically characterize through the analysis of the orbital parameters. In chemical abundance space, the majority of the TriAnd candidates are similar to the outer thin-disk population, presenting also dynamical properties compatible with a disk stellar population, suggesting that the overdensity has an *in situ* origin. However, by applying an eccentricity cut, it was possible to detect a stellar contamination that seems to be consistent with an accreted population. Finally, the found accreted halo interlopers spatially overlapping with TriAnd suggest the elucidation of the historical discussion about the overdensity's nature due to its complex chemical pattern.

Lista de Figuras

1.1	Mapa de subestruturas da Via Láctea	21
1.2	Diferentes Subestruturas E vs. L_z	27
1.3	Simulação de Destroços Mareais da Sgr dSph	28
1.4	Diferentes Perfis Químicos da Galáxia	30
2.1	Seleção TriAnd	38
2.2	Seleção APOGEE	40
2.3	Projeção Aitoff	42
3.1	Exemplo de espectro reduzido	48
3.2	Velocidade Radial	49
3.3	Deslocamento Doppler	50
3.4	Correção do deslocamento Doppler	51
3.5	Comparação velocidades radiais TriAnd e GAIA DR3	51
3.6	Medição de largura equivalente	54
3.7	Comparação T_{eff} entre as análises absoluta e diferencial.	56
3.8	Comparação $\log g$ entre as análises absoluta e diferencial.	56
3.9	Comparação $[Fe/H]$ entre as análises absoluta e diferencial.	57
3.10	Comparação vt entre as análises absoluta e diferencial.	57
3.11	Parâmetros estelares $\log g$ e T_{eff}	61
3.12	Curva de crescimento correção NLTE de Fe I e Mg I	65
3.13	Curva de crescimento correção NLTE de Ti I	65
3.14	Síntese Espectral Ba 6141/6496	67
4.1	Seleção em Excentricidade	72

4.2	Diferentes Órbitas	73
4.3	Parâmetros orbitais	75
5.1	Distribuição de Metalicidades	78
5.2	Abundância química dos elementos α	81
5.3	Abundância química dos elementos odd-Z e pico do Ferro	83
5.4	Abundância química dos elementos de captura de nêutrons	86

Lista de Tabelas

2.1	Dados de observações	43
3.1	Velocidades Radiais em comparação com a literatura	52
3.2	Parâmetros Atmosféricos e Velocidades Radiais	60
3.3	Larguras equivalentes	63
A.1	Velocidades Radiais em comparação com a literatura	124

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
1.1 Formação da Galáxia	19
1.2 Inventário de estruturas da Galáxia	20
1.2.1 Correntes mareais	22
1.2.2 Formação de sobredensidades estelares	23
1.2.2.1 Sobredensidades do halo	23
1.2.2.2 Sobredensidades do disco	24
1.3 Arqueologia Galáctica	25
1.3.1 Espaços dinâmicos e cinemáticos	26
1.3.2 Espaços químicos	29
1.4 Triangulum-Andromeda	31
1.5 Resumo das seções do trabalho	34
2. <i>Amostras</i>	37
2.1 Seleção da amostra	37
2.1.1 TriAnd	37
2.1.2 APOGEE	38
2.1.3 SAGA	41
2.2 Observações	41
3. <i>Métodos</i>	45
3.1 Redução de dados	45
3.2 Velocidades Radiais	48
3.3 Larguras Equivalentes	53

3.4	Análise espectral	54
3.4.1	Análise absoluta	54
3.4.2	Análise diferencial	55
3.5	Parâmetros Atmosféricos	58
3.6	Abundâncias Químicas	61
3.6.1	Correções NLTE	64
3.7	Síntese Espectral	66
3.8	Distâncias e Parâmetros Orbitais	69
4.	<i>Análise Dinâmica</i>	71
4.1	Parâmetros Orbitais	71
5.	<i>Análise Química</i>	77
5.1	Abundâncias Químicas	77
5.1.1	Função de Distribuição de Metalicidade	77
5.1.2	Elementos α	79
5.1.3	Elementos odd- Z e pico do Ferro	80
5.1.4	Elementos de captura de nêutrons	83
6.	<i>Conclusões</i>	87
6.1	Principais resultados obtidos na pesquisa	87
6.2	Perspectivas Futuras	89
	<i>Referências</i>	91
	<i>Apêndice</i>	121
A.	<i>Métodos</i>	123

Introdução

1.1 Formação da Galáxia

O estudo da formação da Galáxia é um tema fundamental na astronomia que vem sendo investigado há muito tempo. Desde meados dos anos 60, quando os primeiros dados sobre a cinemática, química e estrutura da Galáxia foram reunidos, diversas tentativas foram feitas para explicar como ela se formou e evoluiu. Um dos trabalhos pioneiros sobre a formação da Via Láctea foi o de [Eggen et al. \(1962\)](#). Os autores propõem que a Galáxia foi formada a partir de uma nuvem primordial de gás isolada e esférica que teria rapidamente colapsado, formando aglomerados globulares e eventualmente formando um disco em rotação.

Outra perspectiva importante sobre a formação da Via Láctea é apresentada por [Searle e Zinn \(1978\)](#). Nesse trabalho, os autores sugerem que a formação da Galáxia envolveu um colapso inicial de uma nuvem de gás e poeira que deu origem a uma população de estrelas antigas em órbitas elípticas. Essas estrelas, conhecidas como halo estelar, são consideradas remanescentes do estágio inicial da formação da Galáxia e fornecem informações valiosas sobre as condições primordiais do sistema.

Além disso, o estudo de [White e Rees \(1978\)](#) também oferece uma perspectiva interessante sobre a formação da Via Láctea. Os autores propõem uma teoria de duas etapas para a formação de galáxias, em que halos escuros de matéria escura se formam primeiro por colapso gravitacional e posteriormente se condensam em núcleos densos, onde as galáxias se formam. Esse processo de condensação de núcleos em halos pesados pode explicar a formação do halo estelar da Via Láctea e sua relação com a matéria escura.

Esses trabalhos representam contribuições importantes para o entendimento da formação da Via Láctea e destacam a diversidade de abordagens e teorias propostas ao longo das

décadas. O modelo mais aceito na atualidade é o chamado de hierárquico, amparado por previsões teóricas do modelo de concordância cósmica padrão Λ *Cold Dark Matter* (Λ CDM; [Spergel et al. 2007](#)) e simulações numéricas ([Somerville e Davé, 2015](#)). Essa estrutura hierárquica de formação de galáxias, impulsionada pela interação gravitacional entre matéria escura e bariônica, tem se mostrado consistente com as observações e nos fornece um quadro compreensivo para a formação tanto da Via Láctea quanto de outras galáxias.

Um evento de acreção que corrobora esse cenário pode ser visto na própria Via Láctea na subestrutura Gaia-Sausage-Enceladus (GSE; [Belokurov et al. 2018](#); [Helmi et al. 2018](#), ver também [Haywood et al. 2018](#)). Estudos recentes apontam esse evento como a última grande acreção da Galáxia ($M_* \simeq 10^9 M_\odot$), tendo acontecido há cerca de 10 Ganos ([Deason et al., 2018](#); [Di Matteo et al., 2019](#); [Iorio e Belokurov, 2019](#); [Belokurov et al., 2020](#)). Tal evento contribuiu radicalmente para a formação e evolução de estruturas da Galáxia, como o disco fino e espesso ([Grand et al., 2020](#); [Ciucă et al., 2023](#)).

[Naidu et al. \(2020\)](#), a partir de análise de dados do levantamento *Hectochelle in the Halo at High Resolution* (H3; [Conroy et al. 2019](#)), sugerem que o halo é externo é majoritariamente formado a partir de acreções de galáxias anãs e a parte interna possui uma pequena contribuição de estrelas do disco que foram aquecidas para órbitas com grande excursão para longe do plano Galáctico. Esses eventos de acreção, que ocorreram e estão ocorrendo, além de serem reconhecidos hoje em dia, sendo os prováveis agentes de perturbações no disco, causando até mesmo a formação de sobredensidades estelares, as quais serão discutidas na Seção [1.2.2](#).

A formação da Via Láctea e suas respectivas subestruturas é uma área de pesquisa complexa e ativa. Ao analisar seus componentes e suas propriedades é possível compreender melhor a história e evolução da Galáxia, assim como de outras galáxias e do Universo em geral ([Helmi, 2020](#)).

1.2 Inventário de estruturas da Galáxia

O cenário atual, corroborado a partir de grandes levantamentos espectroscópicos e fotométricos, como 2MASS (Two Micron All Sky Survey; [Skrutskie et al. 2006](#)), LAMOST (Large Sky Area Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope; [Cui et al. 2012](#)), SDSS (Sloan

Digital Sky Survey; York et al. 2000), APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment; Prieto et al. 2008), GALAH (Galactic Archaeology with HERMES; De Silva et al. 2015) e GAIA (Gaia Collaboration et al., 2016), mostra uma Galáxia complexa. A Figura 1.1 contém um mapa de estrelas feito com a ajuda do levantamento GAIA, onde é possível identificar diversas subestruturas que compõem a Via Láctea.

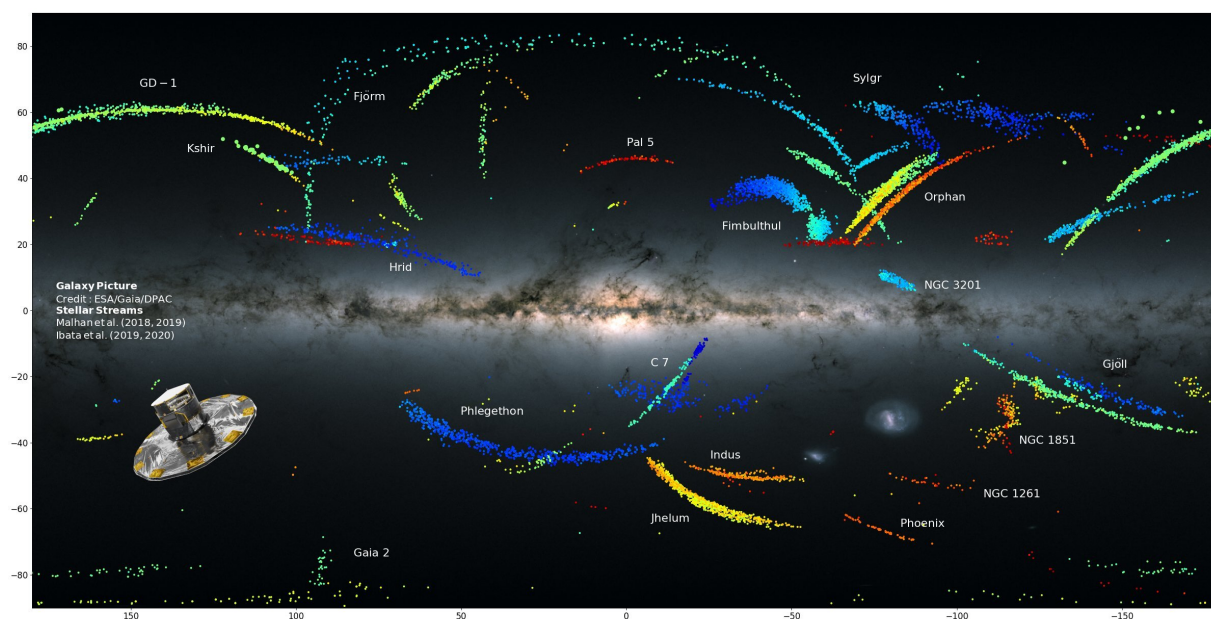


Figura 1.1: Um mapa de estrelas das regiões mais externas da Via Láctea, derivado de imagens do levantamento GAIA. As cores indicam a distância das estrelas, enquanto sua intensidade indica a densidade de estrelas no céu. Crédito da imagem: Gaia Collaboration et al. (2016) e Ibata et al. (2021).

O inventário vigente de estruturas da Galáxia conta com galáxias satélites (Willman et al., 2005; Belokurov et al., 2007; Drlica-Wagner et al., 2015; Darragh-Ford et al., 2020), correntes mareais (Majewski et al., 2003; Grillmair, 2006; Shipp et al., 2018; Perotoni et al., 2019; Ibata et al., 2020), acreções primevas da Galáxia (Helmi e White, 1999; Newberg et al., 2009; Belokurov et al., 2018; Helmi et al., 2018; Yuan et al., 2020) e sobredensidades estelares, como Virgo (Newberg et al., 2002; Jurić et al., 2008), Monoceros (Newberg et al., 2002; Rocha-Pinto et al., 2003), Triangulum-Andromeda (Rocha-Pinto et al., 2004; Majewski et al., 2004; Martin et al., 2007), Hercules-Aquila (Belokurov et al., 2007), Pisces (Sesar et al., 2007; Watkins et al., 2009) e Eridanus-Phoenix (Li et al., 2016).

1.2.1 Correntes mareais

Correntes mareais são subestruturas compostas por estrelas que foram retiradas de galáxias anãs ou aglomerados globulares devido a forças de maré durante interações próximas com galáxias maiores. Essas correntes são caracterizadas por seu formato alongado e fino, um baixo brilho superficial, podendo se estender por um comprimento de centenas de parsecs (Newberg et al., 2016).

O estudo das correntes mareais tem grande importância no entendimento da formação e evolução de galáxias (Martínez-Delgado et al., 2023), pois fornecem informações sobre a história de acreção de uma galáxia (Vera-Casanova et al., 2022), assim como sua distribuição de matéria escura (Bonaca e Hogg, 2018; Pearson et al., 2022). Ao traçar o movimento e propriedades químicas de estrelas de uma corrente mareal, pode-se também inferir as propriedades de sua galáxia progenitora e as condições sob as quais essa corrente foi formada (Johnston, 2002; Helmi, 2008; Tanaka et al., 2017; Bonaca et al., 2021; Panithanpaisal et al., 2021).

A galáxia anã de Sagittarius (Sgr dSph; Ibata et al. 1994, 1995) é um exemplo recente de acreção de uma galáxia anã pela Via Láctea. As perturbações mareais causadas durante sua acreção, a qual vem ocorrendo nos últimos bilhões de anos, formam a chamada *Sagittarius Stream*, uma corrente mareal constituída por estrelas acretadas que circundam a Via Láctea em uma órbita que quase cruza os polos Galácticos.

Tal corrente estelar foi proposta por Lynden-Bell e Lynden-Bell (1995), após analisarem a distribuição de aglomerados globulares na Galáxia. Posteriormente, essa estrutura foi identificada por Newberg et al. (2002) e Majewski et al. (2003) utilizando dados do 2MASS e do SDSS. Purcell et al. (2011), através de simulações, sugeriram que a acreção da Sgr dSph teve impacto direto na formação da Via Láctea, resultando na formação de braços espirais e influenciando a barra central. Em seguida, simulações identificaram a acreção da galáxia anã de Sagittarius como a mais provável candidata para a formação de sobredensidade no disco externo da Galáxia, como Monoceros, TriAnd e A13 (Gómez et al., 2016; Laporte et al., 2018, 2019).

Recentemente, avanços em técnicas tanto observacionais quanto computacionais permitiram a descoberta e estudo de um grande número de correntes mareais, totalizando cerca de uma centena de correntes conhecidas (Mateu, 2023). As informações provenientes

dessas correntes são valiosas e ajudam a expandir cada vez mais o entendimento sobre a formação e evolução de galáxias, ao lado de estudos de outras subestruturas (Martínez-Delgado et al., 2023).

1.2.2 Formação de sobredensidades estelares

1.2.2.1 Sobredensidades do halo

O halo da Via Láctea também é permeado por subestruturas advindas de eventos de acreção muito antigos. Por terem sido formadas via diversas interações de galáxias anãs com o potencial da Via Láctea, essas subestruturas já não são mais discerníveis espacialmente das estrelas que povoam o halo da Galáxia. Apesar disso, ainda podem ser reconhecidas, seja por suas características químicas ou dinâmicas ¹(Helmi e White, 1999; McMillan e Binney, 2008; Morinaga et al., 2019). Exemplos dessas subestruturas são as Helmi Streams (Helmi e White, 1999; Chiba e Beers, 2000a), Gaia-Sausage-Enceladus (GSE; Belokurov et al. 2018; Helmi et al. 2018, ver também Haywood et al. 2018), Sequoia (Myeong et al., 2019) e Thamnos (Koppelman et al., 2019).

A provável causa de formação das sobredensidades encontradas no halo Galáctico é atribuída a eventos de acreções primevas (Donlon et al., 2019; Belokurov et al., 2019; Chang et al., 2020; Naidu et al., 2021; Chandra et al., 2022; Perottoni et al., 2022; Wang et al., 2022). Nesses eventos, estrelas retiradas de uma ou mais galáxias satélites se acumulam em órbitas altamente excêntricas, onde as sobredensidades estelares podem ser reconhecidas na projeção espacial no apocentro de suas órbitas (Li et al., 2016; Deason et al., 2018). A compreensão e associação dessas estruturas com eventos se torna ainda mais complexa pois uma única galáxia satélite pode dar origem a múltiplas sobredensidades (Johnston et al., 2012).

Simon (2019), com dados astrométricos do GAIA (Gaia Collaboration et al., 2016), propõe que a formação das sobredensidades Virgo e Hercules-Aquila estejam conectadas à subestrutura GSE por apresentarem propriedades dinâmicas similares entre si. Tal associação também é sugerida por Balbinot e Helmi (2021), em vista do aparente acúmulo de estrelas do halo local em órbitas congruentes com essas sobredensidades, além de simulações de N-corpos (e.g., Naidu et al. 2021) que envolvem a acreção do GSE.

¹ Na Seção 1.3 serão discutidas técnicas quimiodinâmicas de reconhecimento dessas subestruturas, assim como sua representação no espaço de fases.

Perottoni et al. (2022) expandem esses estudos com uma análise quimiodinâmica da conexão entre as sobredensidades Virgo, Hercules-Aquila e GSE, utilizando uma combinação de dados do SEGUE (Yanny et al., 2009), APOGEE (Prieto et al., 2008), GAIA, aliados a um código de ajuste bayesiano de isócronas para obtenção de distâncias **StarHorse** (Queiroz et al., 2018, 2020). Os autores concluem que as duas sobredensidades apresentam distribuições de excentricidade similares entre si, sendo compostas majoritariamente por estrelas com $e > 0.7$, característica do GSE. Além disso, tanto Hercules-Aquila quanto Virgo apresentam funções de distribuição de metalicidades e abundâncias químicas² similares ao GSE, sobrepondo-se à subestrutura no tocante às relações de abundâncias $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$, $[\text{Mg}/\text{Mn}]$ – $[\text{Al}/\text{Fe}]$, $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$, e $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ – $[(\text{C}+\text{N})/\text{O}]$.

1.2.2.2 Sobredensidades do disco

Sobredensidades estelares próximas ao disco, por sua vez, apresentaram uma dicotomia sobre sua natureza, sendo discutido se sua origem seria *in situ* ou extragaláctica. Historicamente, foi sugerida uma origem *in situ* (Rocha-Pinto et al., 2003; Momany et al., 2004, 2006; López-Corredoira et al., 2007; Gómez et al., 2013; Dierickx et al., 2014; Price-Whelan et al., 2015; Xu et al., 2015; Li et al., 2017; Deason et al., 2018; Sheffield et al., 2018; Youakim et al., 2020; Carballo-Bello et al., 2021; Li et al., 2021; Ramos et al., 2021; Laporte et al., 2022) para essas subestruturas, as quais teriam se formado como o resultado da interação entre galáxias anãs com a Via Láctea ao longo de sua história, causando o aquecimento do disco (Newberg et al., 2016; Figueras, 2017; Schönrich e Dehnen, 2018). Tal proposta é respaldada por simulações de N-corpos (e.g., Laporte et al. 2018, 2019). Outros autores, ao compararem os perfis químicos e dinâmicos de sobredensidades estelares de baixa latitude Galáctica com galáxias satélites, concluíram que a origem mais provável dessas sobredensidades seria extragaláctica (Martin et al., 2004; Bellazzini et al., 2006; Chou et al., 2011; Meisner et al., 2012; Deason et al., 2014; Morganson et al., 2016; Guglielmo et al., 2018).

Estudos recentes sobre a estrutura do disco da Galáxia sugerem uma ligação entre a formação de sobredensidades e as perturbações verticais, devido à descoberta de sua componente estelar e das assimetrias Norte/Sul espaciais e cinemáticas que podem ser

² Definição da abundância de uma estrela (\star) relativa ao Sol (\odot): $[A/B] = \log(N_A/N_B)_\star - \log(N_A/N_B)_\odot$, onde N_A e N_B são as densidades numéricas dos átomos dos elementos A e B.

provocadas pelas mesmas (e.g., [Widrow et al. 2012](#); [Williams et al. 2013](#); [Carlin et al. 2013](#); [Carrillo et al. 2018](#); [Schönrich e Dehnen 2018](#)). Dentre as sobredensidades do disco que provavelmente são formadas por perturbações verticais, pode-se citar Monoceros, a *Anticentre Stream* ([Grillmair, 2006](#)) e a *Eastern Banded Structure* ([Grillmair, 2006](#)).

Monoceros é um exemplo de sobredensidade localizada na região do Anticentro Galáctico, próxima ao disco Galáctico ($120^\circ < l < 240^\circ, -30^\circ < b < 40^\circ$ ³), a uma distância de 11 kpc do Sol. Primeiramente identificada com uma origem extragaláctica por [Newberg et al. \(2002\)](#) e [Rocha-Pinto et al. \(2003\)](#), essa ideia foi reforçada por trabalhos como o de [Chou et al. \(2010\)](#). No entanto, recentemente, [Laporte et al. \(2020\)](#), em uma análise espectroscópica que envolvia a *Anticentre Stream* e Monoceros, mostraram que ambas as estruturas são quimicamente associadas ao disco fino, em vista da baixa abundância de magnésio ($0.0 < [Mg/Fe] < 0.15$).

Outro exemplo de sobredensidade do disco Galáctico é a sobredensidade Triangulum-Andromeda, objeto de estudo neste trabalho e, portanto, conta com uma descrição dedicada na Seção 1.4. Trata-se de uma estrutura distante ($R_{GC} = 20 \sim 30$ kpc), encontrada em baixa latitude ($b \sim 23^\circ$), na direção das constelações de Triangulum e Andrômeda ([Deason et al., 2014](#)). Sua distância e a falta de um estudo homogêneo e robusto dificultam sua caracterização mesmo com auxílio de espectroscopia de alta resolução. Dessa forma, TriAnd carece de um estudo quimiodinâmico mais completo.

1.3 Arqueologia Galáctica

A arqueologia Galáctica utiliza ferramentas que buscam responder uma das questões-chave da astrofísica: como a Galáxia se formou e evoluiu. A identificação de galáxias satélites, fósseis remanescentes de fusões e de atuais acreções, correntes mareais e sobredensidades estelares fornecem informações sobre a história, distribuição e quantidade de matéria em nossa Galáxia e, também, sobre sua estrutura em grande escala ([Freeman e Bland-Hawthorn, 2002](#); [Helmi, 2008](#); [Belokurov, 2013](#); [Bland-Hawthorn e Gerhard, 2016a](#); [Helmi, 2020](#)).

Uma das técnicas utilizadas na arqueologia Galáctica é a espectroscopia. Através dela, é possível analisar a composição química de estrelas que, dependendo de sua massa, po-

³ l e b representam latitude e longitude galáctica em coordenadas galácticas, respectivamente

dem ter sido formadas nos primórdios do Universo e sobrevivido até hoje. Portanto, a composição química de suas atmosferas são um registro fóssil do ambiente no qual essas estrelas foram formadas. Por esse motivo, estudar via espectroscopia suas atmosferas é como acessar o passado e estudar as condições físicas da Galáxia e, por consequência, do Universo, da época em que essas estrelas se formaram (Frebel e Norris, 2015).

A forma como as estrelas se movimentam também pode preservar valiosas informações sobre sua origem. Quando, por exemplo, uma galáxia anã é destruída por forças de maré pela Via Láctea, as suas estrelas continuam apresentando órbitas similares ao de seu sistema progenitor (Johnston, 1998).

Outra ferramenta utilizada é a medição de idades estelares. Datar a sequência de eventos que leva à formação dos diferentes componentes da Galáxia é muito útil, mas a precisão de obtenção de idades estelares também é complexa, principalmente para estrelas muito antigas (Spitoni et al., 2019). A determinação das idades estelares requer uma amostra estatisticamente significativa que cubra uma ampla faixa de propriedades estelares, como massa, temperatura, composição química e fase evolutiva. Pelo fato dos dados utilizados na amostra deste trabalho não conterem um grande número de estrelas e de se restringirem a uma seleção de estrelas com propriedades estelares muito similares entre si, não foi possível aplicar essa ferramenta para determinar suas idades com precisão. Nas seções 1.3.1 e 1.3.2, discute-se mais a fundo as duas ferramentas aplicadas e como essas técnicas podem ser utilizadas para caracterizar diferentes estruturas.

1.3.1 Espaços dinâmicos e cinemáticos

Como mencionado no tópico anterior, estrelas podem manter características orbitais de seu progenitor mesmo após sua dissolução. Essas características descritas pelas órbitas das estrelas podem ser retratadas através de integrais de movimento, como energia (E), momento angular total (L) ou um de seus componentes (L_X , L_Y e L_Z)⁴, ou ainda pelas ações associadas, como J_R , J_Φ e J_Z (Binney e Tremaine, 2008). Energia (E) e momento angular (L_z), por exemplo, são parâmetros geralmente utilizados para tipificar diferentes populações da Via Láctea (e.g., Helmi e White 1999; Chiba e Beers 2000b; Gómez e Helmi 2010; Helmi et al. 2018; Myeong et al. 2018). É possível observar na Figura 1.2 exemplos de várias subestruturas que compõem a Via Láctea, identificadas através do espaço de E

⁴ e.g., $L_Z = X * V_Y - Y * V_X$, as demais componentes podem ser obtidas por permutação cíclica.

vs. L_z .

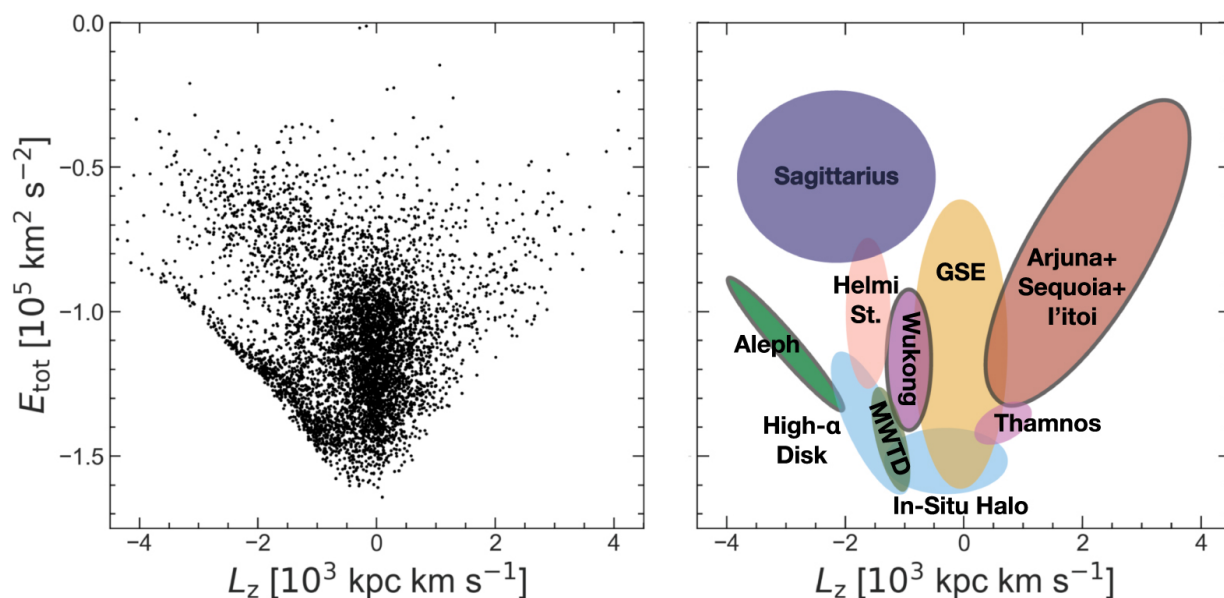


Figura 1.2: Diferentes subestruturas da Via Láctea representadas no espaço de E vs. L_z . Figura extraída de Naidu et al. (2020).

Um exemplo do fenômeno citado no parágrafo anterior são as correntes mareais, formadas por destroços de galáxias anãs ou aglomerados globulares. Tais correntes são constituídas por estrelas com posições e velocidades similares, fazendo com que suas integrais de movimento e órbitas também sejam equivalentes. Como uma galáxia é um sistema não colisional, espera-se que essas integrais de movimento sejam conservadas ao longo do tempo, de modo que estrelas arrancadas por forças de maré sigam órbitas parecidas com as de seu progenitor, resultando na formação de uma corrente mareal. É possível observar em <https://www.youtube.com/watch?v=WW-ps2zg89s> (ver Vasiliev et al. 2021 para mais detalhes) uma simulação de N-corpos da disrupção da galáxia anã de Sagittarius, causando assim a formação de uma corrente mareal, a *Sagittarius Stream*, na presença da Via Láctea e da Grande Nuvem de Magalhães.

Simulações numéricas são ferramentas importantes no estudo da forma das correntes mareais. Caso o sistema progenitor seja pequeno, ou tenha se formado recentemente, a corrente tende a ser estreita e longa. Para objetos mais massivos, as estrelas retiradas por forças de maré apresentam um maior intervalo de integrais de movimento, resultando em correntes mais espessas que podem ser mais difíceis de se distinguir espacialmente. A aparência visual e complexidade de uma corrente mareal depende tanto dos detalhes da configuração da acreção quanto do tipo de órbita do sistema. Se a órbita do progenitor

é radial, o formato de concha (en. shell) dos destroços fica mais pronunciado; por outro lado, órbitas circulares não apresentam essa característica (Helmi e White, 1999; Law et al., 2005; Gómez et al., 2013; Hendel e Johnston, 2015; Amorisco, 2017; Simpson et al., 2019). Pode-se ver na Figura 1.3 uma simulação de N-corpos representando a dissolução da Sgr dSph pelo potencial da Via Láctea. As cores representando as várias órbitas da galáxia satélite facilitam a discriminação de seus destroços mareais, seja pela forma ou pela idade esperada dos destroços em qualquer ponto ao longo da corrente mareal.

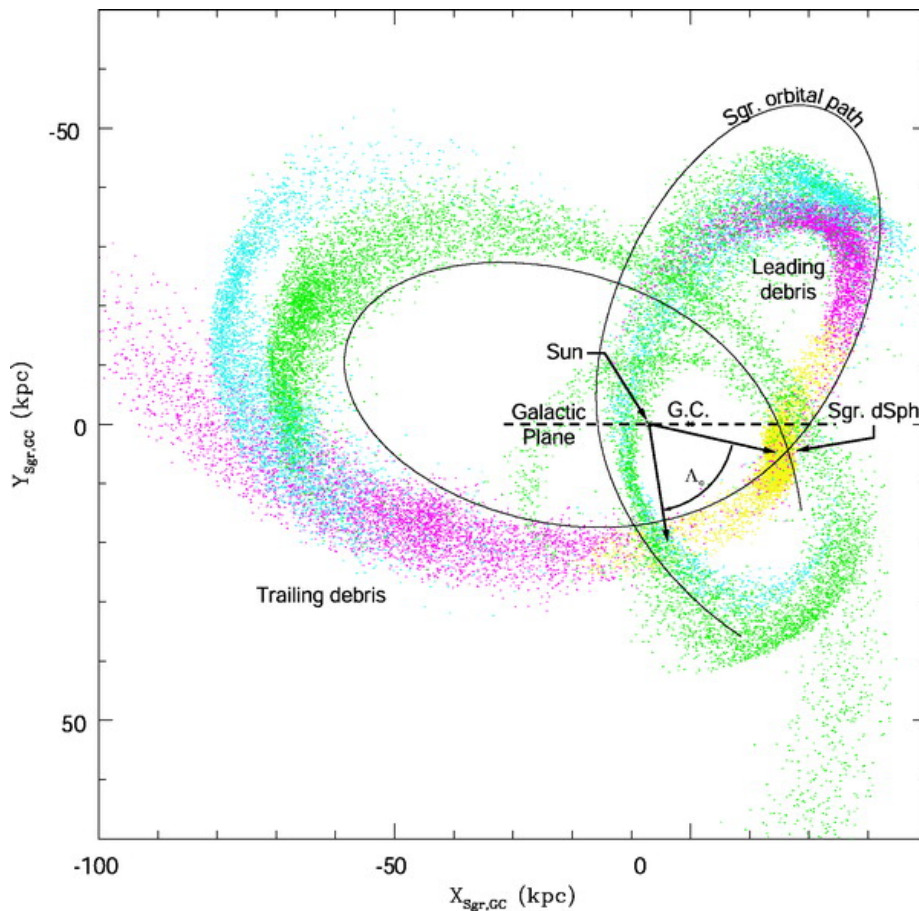


Figura 1.3: Simulação com modelo de N-corpos de destroços mareais após a dissolução da Sgr dSph pelo potencial da Via Láctea durante uma órbita radial. O sistema de coordenadas cartesiano adotado se encontra no plano da Sgr dSph e do centro da Galáxia ($X_{Sgr,GC}$, $Y_{Sgr,GC}$), ilustrando a orientação do sistema de coordenadas esférico com respeito ao plano Galáctico. As cores representam diferentes “épocas”, i.e., órbitas nas quais os destroços são retirados do satélite. Pontos amarelos representam destroços retirados há 0.5 Ganos, enquanto pontos magenta, ciano e verdes representam destroços retirados da galáxia anã há dois, três e quatro órbitas, respectivamente. As linhas sólidas representam a órbita projetada do núcleo da galáxia de Sgr, enquanto os vetores representam o sistema de coordenada longitudinal adotado. Figura extraída de Law et al. (2005).

1.3.2 Espaços químicos

A composição química das diferentes populações estelares também carrega valiosas informações sobre os diferentes sítios de formação estelar. O perfil químico de uma estrela pode variar devido às diferentes condições, tanto ambientais quanto de escalas de tempo, envolvidas para a produção dos diferentes elementos químicos que a compõem (McWilliam, 1997). Os chamados elementos- α , como O, Mg, Si, Ca, S e Ti, são formados em eventos de explosões de estrelas massivas, como Supernovas do Tipo II (SNII) (Woosley e Weaver, 1995), enquanto elementos do pico do Ferro, como Ni, Cr e o próprio Fe, são produzidos em explosões term nucleares que envolvem um sistema binário formado por uma anã branca e uma estrela de massa intermediária (e.g. gigante vermelha), as chamadas Supernovas do Tipo Ia (SNIa) (Iwamoto et al., 1999).

Os dois fenômenos altamente energéticos mencionados, SNII e SNIa, apresentam escalas de tempo dramaticamente discrepantes pois abarcam massas estelares diferentes. Enquanto estrelas massivas evoluem mais rapidamente, da ordem de alguns milhões de anos, em direção à sua eventual explosão como SNII, o tempo necessário para ocorrer uma SNIa leva entre 100 milhões a alguns bilhões de anos (Matteucci e Recchi, 2001), pois está relacionada à evolução de sistemas binários com estrelas de baixa massa. À medida que o meio interestelar de um sistema é poluído por SNIa, espera-se que a relação $[\alpha/Fe]$ diminua gradualmente ao longo do tempo, uma vez que o denominador da relação aumenta com o passar do tempo.

Elementos mais pesados do que o Fe não são sintetizados por fusão nuclear, sendo necessário outros mecanismos, como a captura de nêutrons. Os chamados elementos de captura de nêutrons podem ser formados por dois processos: o processo-s, que produz elementos entre Sr e Pb por captura de nêutrons lentos em relação ao decaimento β^5 , majoritariamente formados em estrelas AGB de baixa massa (Karakas e Lattanzio, 2014), e o processo-r, onde a formação dos elementos se dá por captura de nêutrons rápidos em relação ao decaimento β , cujo consenso atual envolve eventos altamente energéticos, como fusão de objetos compactos (Lattimer e Schramm, 1974; Rosswog et al., 1999; Wanajo et al., 2009; Drout et al., 2017; Thielemann et al., 2017, 2020; Cowan et al., 2021) e/ou supernovas magneto-rotacionais (Winteler et al., 2012; Mösta et al., 2014; Reichert et al.,

⁵ Decaimento β é um processo radioativo no qual um nêutron ou próton é transformado em um elétron ou pósitron, respectivamente, emitindo um neutrino ou antineutrino.

2021).

Estrelas formadas em diferentes cenários apresentam diferentes perfis químicos (De Silva et al., 2015). A análise dos espaços químicos pode revelar os elementos químicos presentes nas atmosferas das estrelas, e conseqüentemente, da população estelar aonde elas foram formadas. Na Figura 1.4 estão apresentados diferentes relações $[Mg/Fe]$ - $[Fe/H]$ para diferentes subestruturas que povoam o halo da Via Láctea. Diferenças entre a composição química de estrelas e suas nuvens moleculares originárias podem ajudar a revelar os processos físicos pelos quais essas estrelas passaram. Tais características, aliadas ao estudo dinâmico, constituem uma poderosa ferramenta para reconstruir a história de formação não só da população estelar estudada, mas também de toda a Galáxia.

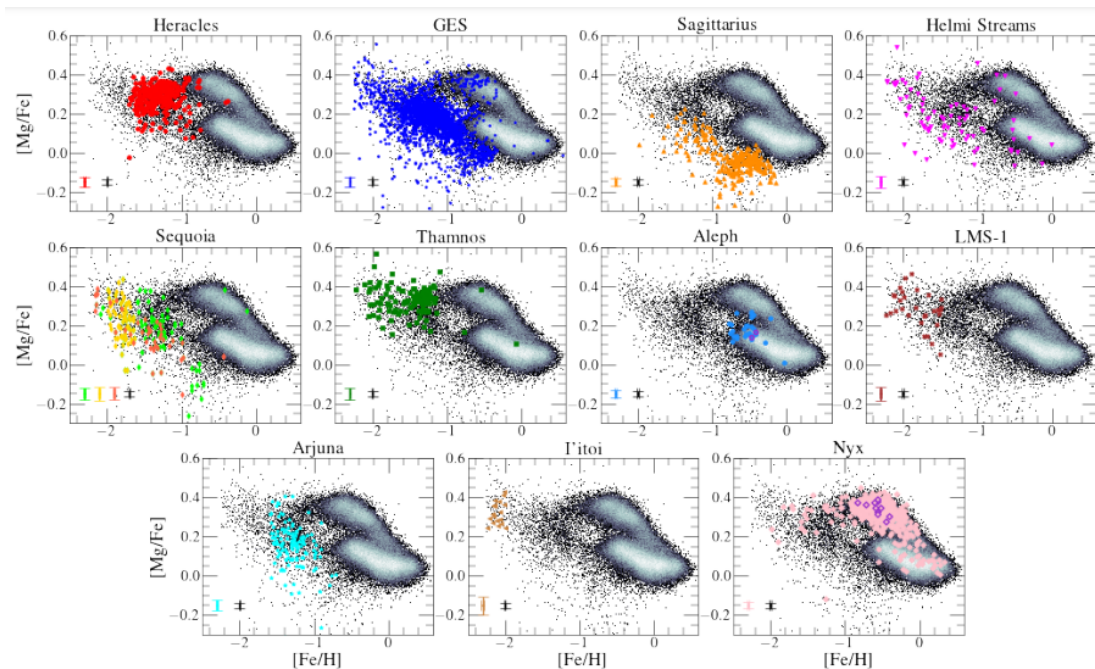


Figura 1.4: Relação $[Mg/Fe]$ - $[Fe/H]$ de diferentes subestruturas da Galáxia. Figura extraída de Horta et al. (2023).

1.4 Triangulum-Andromeda

Dentre as diversas sobredensidades que se encontram no disco externo da Via Láctea está Triangulum-Andromeda (TriAnd), objeto de estudo deste trabalho. Desde sua descoberta, TriAnd foi o foco de diferentes estudos que tentaram explicar sua origem, mas devido à diversos motivos que serão discutidos ao decorrer desta seção, a natureza de sua população estelar sempre foi controversa. Utilizando-se de ferramentas da arqueologia Galáctica para analisar uma amostra grande e homogênea de candidatas, tanto nos espaços químicos quanto nos cinemáticos, pretende-se entender melhor a história de formação de TriAnd. Segue uma breve história da sobredensidade, desde sua descoberta até os seus mais recentes estudos espectroscópicos em alta resolução.

TriAnd foi identificada por [Rocha-Pinto et al. \(2004\)](#) como um excesso de estrelas entre $100^\circ < l < 150^\circ$; $40^\circ < b < 20^\circ$, em uma amostra de candidatas a estrelas gigantes M, selecionadas via fotometria 2MASS. A estrutura não pôde ser bem definida inicialmente utilizando as estrelas gigantes M do 2MASS, devido ao baixo número de objetos da amostra e, conseqüentemente, foi descrita como uma estrutura estelar muito difusa com aspecto de “nuvem”, com uma massa luminosa de $\sim 1.6 \times 10^6 M_\odot$. Na mesma época, [Majewski et al. \(2004\)](#) identificaram o que seria a sequência principal (MS) e *turnoff* (MSTO) da população estelar em diagramas cor-magnitude (CMDs) construídos a partir de dados fotométricos profundos na direção de M31. A distância estimada por esses autores foi de $16 \sim 25$ kpc do Sol, sendo a densidade estelar aproximadamente constante na região inspecionada, usada para estimar uma luminosidade total $\sim 1000 \text{ deg}^2$ de $\sim 5 \times 10^5 L_\odot$.

[Rocha-Pinto et al. \(2004\)](#), via espectroscopia de baixa resolução de estrelas gigantes M ($R \sim 3300$), identificaram que TriAnd é uma estrutura cinematicamente fria, com metalicidade $[Fe/H] = -1.2 \pm 0.5$ dex. Além disso, notaram uma inclinação na variação da velocidade ao longo da linha de visada com a longitude Galáctica que parece uma extensão da tendência de velocidades da sobredensidade Monoceros. Entretanto, devido à incompatibilidade de distâncias, foi descartada a conexão entre ambas sobredensidades.

A natureza da população estelar de TriAnd foi estudada com espectroscopia de alta resolução ($R = 32.000$ e 35.000) pela primeira vez por [Chou et al. \(2011\)](#). Os autores analisaram seis espectros de estrelas candidatas selecionadas por [Rocha-Pinto et al. \(2004\)](#) e identificaram que TriAnd é mais rica em metal ($[Fe/H] = -0.64 \pm 0.19$ dex) do que

as estimativas obtidas em baixa resolução. No CMD, essas seis estrelas se mostraram compatíveis com uma isócrona com 8 Ganos e $[Fe/H] = -0.7$ dex, correspondente à sua metalicidade espectroscópica. Além disso, os autores identificaram que três dos alvos apresentavam $[Ti/Fe]$ compatíveis com abundâncias do disco, enquanto os outros três alvos mostraram valores menores dessa razão que os encontrados para objetos do disco, concluindo que TriAnd poderia ter uma origem extragaláctica.

Os estudos de [Martin et al. \(2014\)](#), com dados do levantamento fotométrico Pan-Andromeda Archaeological Survey (PAndAS; [McConnachie 2009](#)), analisaram o CMD na direção de M31, indicando que TriAnd parecia ser uma população rarefeita localizada numa pequena área do céu, contradizendo os estudos anteriores que indicavam que a estrutura se distribuía por centenas de graus. Por outro lado, [Sheffield et al. \(2014\)](#) e [Deason et al. \(2014\)](#) concluíram que TriAnd compreende uma vasta região do céu, considerando o fato de que sua assinatura cinemática e química cobre uma grande área, similar à descrita por [Rocha-Pinto et al. \(2004\)](#).

[Sheffield et al. \(2014\)](#), utilizando dados do 2MASS, identificaram e analisaram uma amostra de estrelas gigantes M na região de TriAnd em magnitudes aparentes mais brilhantes do que as previamente definidas por [Rocha-Pinto et al. \(2004\)](#). Os autores mostraram que TriAnd é aparentemente limitada por $b > -35^\circ$ e pode se estender a distâncias de até 30 kpc do centro Galáctico. Já [Deason et al. \(2014\)](#) mostraram que as estrelas do SDSS, que são compatíveis com o excesso de estrelas de TriAnd, apresentam metalicidade variando entre -1.3 e -0.5 dex, dentro dos limites estabelecidos para essa estrutura na literatura ([Rocha-Pinto et al., 2004](#); [Martin et al., 2007](#); [Chou et al., 2011](#)).

Uma outra hipótese surgiu com [Xu et al. \(2015\)](#) ao estudarem a região do anticentro galáctico entre $110^\circ < |l| < 230^\circ$ e $10^\circ < |b| < 30^\circ$ com os dados do SDSS. Esses autores identificaram uma assimetria oscilatória na contagem de estrelas de sequência principal em ambos os lados do plano Galáctico. Concluíram que as assimetrias mais distantes estudadas correspondem às sobredensidades de Monoceros e TriAnd. Isso indica que as sobredensidades estelares mais próximas ao plano galáctico, como TriAnd, são resultado de perturbação do disco, tendo assim uma origem galáctica. Tal hipótese ganhou suporte quando [Price-Whelan et al. \(2015\)](#) mostraram que a razão entre estrelas RR Lyrae e gigantes M em TriAnd ($f_{RR:MG} < 0.38$) é mais parecida com as proporções típicas do disco Galáctico ($f_{RR:MG} < 0.01$) do que com as encontradas em populações estelares acretadas

($f_{RR:MG} \approx 0.5 \pm 0.1$ para os satélites maiores e $f_{RR:MG} \gg 1$ para os menores).

A possibilidade de conexão com outras subestruturas no espaço de velocidades foi novamente trazida para discussão por [Li et al. \(2017\)](#), sugerindo que TriAnd pode estar associada com Monoceros e A13 ([Sharma et al., 2010](#)). Ao comparar os resultados de A13 com as gigantes M de TriAnd estudadas por [Sheffield et al. \(2014\)](#), os autores mostraram que, mesmo as estrelas de TriAnd se localizando no hemisfério Galáctico sul, a orientação geral das respectivas estruturas são similares. Tais estruturas apresentam velocidades na linha de visada consistentes com uma direção prógrada em órbitas circulares com $V_{GSR} = 236 \text{ km s}^{-1}$. Concluíram que as estrelas de A13 com $l > 180^\circ$ tendem a apresentar distâncias similares à Monoceros, enquanto as estrelas com $l < 180^\circ$ têm a tendência de se encontrarem em distâncias maiores, assim como as estrelas de TriAnd.

Um mapeamento da região de TriAnd foi feito por [Perottoni et al. \(2018\)](#) que, ao analisarem os dados fotométricos do SDSS DR9, identificaram que a estrutura se distribuía por uma região de 500 deg^2 e que ela não era uniformemente distribuída. Compatível com [Deason et al. \(2014\)](#), os mapas obtidos mostraram que TriAnd se estende de $-100^\circ < l < -145^\circ$ e $-24^\circ > b > -34^\circ$, mas a limitação em longitude pode estar atribuída a maior extinção na região. Os autores localizaram flutuações de densidade dentro da sobredensidade de TriAnd, não sendo possível distinguir uma origem diferente para TriAnd apenas com dados fotométricos. Posteriormente, via espectroscopia de alta resolução de estrelas gigantes M, foi descartada uma origem distinta para objetos nessas protuberâncias dentro da sobredensidade ([Sales Silva et al., 2019](#)).

Recentemente, pesquisas com espectroscopia em alta resolução foram feitas para entender em mais detalhes a complexa natureza de TriAnd ([Bergemann et al., 2018](#); [Hayes et al., 2018](#); [Sales Silva et al., 2019, 2020](#)). [Bergemann et al. \(2018\)](#), expandindo os estudos espectroscópicos iniciados por [Chou et al. \(2011\)](#), detectaram perfis de abundâncias químicas similares entre as estrelas de TriAnd e as estrelas do disco local Galáctico, especialmente para os elementos O, Na, Mg, Ti, Ba e Eu, considerando uma amostra de estrelas de metalicidades $-0.66 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.44$. Já [Hayes et al. \(2018\)](#), ao utilizarem resultados do APOGEE DR14 ([Abolfathi et al., 2018a](#)), observaram que o perfil químico (Mg, (C+N), K, Ca, Mn e Ni) das estrelas de TriAnd representaria uma extensão do gradiente de metalicidade radial do disco até o raio de TriAnd.

[Sales Silva et al. \(2019\)](#) investigaram a cinemática e abundância química dos elementos

Na, Al, Ni, Cr, Fe, Ba e Eu de 13 estrelas candidatas de TriAnd selecionadas fotometricamente pelo 2MASS e observadas com o espectrógrafo GRACES do telescópio Gemini Norte. As velocidades radiais foram obtidas via dados espectroscópicos e astrométricos do levantamento GAIA, resultando em uma amostra estelar capaz de cobrir uma maior extensão de metalicidades ($-1.34 \leq [Fe/H] \leq -0.78$) que estudos prévios espectroscópicos em alta resolução.

Expandindo seus estudos anteriores, [Sales Silva et al. \(2020\)](#) determinaram as abundâncias de Mg, O, Si, Ca e Ti para as mesmas estrelas de TriAnd estudadas em [Sales Silva et al. \(2019\)](#), a fim de melhor entender os perfis de abundância de $[\alpha/Fe]$. A amostra contou com dois membros de baixa metalicidade do TriAnd ($[Fe/H] \sim -1.3$), possibilitando estudar elementos alfa em uma faixa de metalicidades nunca antes analisada para a população estelar de TriAnd.

A conclusão desses autores foi de que a população estelar de TriAnd é composta por estrelas com órbitas semelhantes às do disco Galáctico e com um perfil químico único, que não se assemelha totalmente às abundâncias observadas em estrelas do disco Galáctico local, nem em galáxias anãs, mesmo analisando diferentes metalicidades. A complexidade dos perfis de abundâncias de estrelas na sobredensidade TriAnd, conforme sugerido por [Sales Silva et al. \(2019, 2020\)](#), aliada ao baixo número de estrelas candidatas a TriAnd observadas com espectroscopia de alta resolução e, ainda a escassez de estudos sobre estrelas de campo nas regiões mais externas ao disco, são os principais obstáculos para se estabelecer a história de formação da sobredensidade.

A análise conjunta tanto dos padrões de abundância química e parâmetros orbitais de TriAnd em uma amostra maior e homogênea é a chave para melhor compreender sua história de formação, assim como de estrelas nessa faixa de distâncias ($R_{GC} = 20 \sim 30$ kpc). O presente trabalho faz uma investigação quimiodinâmica de 31 estrelas candidatas dessa estrutura observadas em alta resolução a fim de tentar superar esses obstáculos.

1.5 Resumo das seções do trabalho

O presente trabalho visa estudar o complexo perfil químico observado em TriAnd, através de uma investigação quimiodinâmica da maior amostra homogênea observada em alta resolução. O disco externo da Via Láctea ainda é pouco compreendido, o que torna

o estudo dessa estrutura de grande importância para melhor compreender sua formação e evolução.

Esta dissertação é compilada conforme os tópicos a seguir: no Capítulo 2 são apresentados os dados e a seleção da amostra de estrelas candidatas ao TriAnd utilizadas neste trabalho; apresenta-se no Capítulo 3 a metodologia utilizada para a análise da amostra; nos Capítulos 4 e 5 expõem-se a análise dinâmica e química da amostra, respectivamente, em comparação com outras populações estelares; as considerações finais do trabalho estão apresentadas no Capítulo 6.

Amostras

Neste capítulo são apresentados os dados observacionais utilizados neste estudo. A seleção da amostra de estrelas candidatas ao TriAnd, os dados de campo e as observações realizadas estão descritos nas seções a seguir.

2.1 Seleção da amostra

2.1.1 TriAnd

Os alvos foram selecionados a partir do catálogo do 2MASS, utilizando o mesmo critério de cores de [Rocha-Pinto et al. \(2004\)](#) (ver também [Majewski et al. 2003](#)) no diagrama (J-H) vs. (J-K) que separa estrelas gigantes M de anãs:

$$\begin{aligned} J - K_s &> 0.85, \\ J - H &< 0.561(J - K_s) + 0.36, \\ J - H &> 0.561(J - K_s) + 0.22, \end{aligned} \tag{2.1}$$

onde todas as magnitudes se encontram no sistema intrínseco do 2MASS, com seu avermelhamento corrigido. O resultado dessa seleção pode ser observado no painel direito da [Figura 2.1](#). Em pesquisas anteriores, tal critério obteve sucesso ao ser utilizado para selecionar estrelas gigantes M distantes, levando à descoberta das correntes mareais de Sgr ([Majewski et al., 2003](#)), ao mapeamento de Monoceros ([Rocha-Pinto et al., 2003](#)), à descoberta de TriAnd ([Rocha-Pinto et al., 2004](#)) e para follow-up espectroscópico ([Sheffield et al., 2014](#); [Bergemann et al., 2018](#); [Hayes et al., 2018](#); [Sales Silva et al., 2019](#)). A amostra final foi selecionada de acordo com os critérios de [Sheffield et al. \(2014\)](#). As estrelas candidatas a pertencer à sobredensidade foram também restritas à região compreendida

entre $90^\circ < l < 160^\circ$ e $-10^\circ > b > -45^\circ$, associada à sobredensidade TriAnd (Rocha-Pinto et al., 2004; Perottoni et al., 2019; Laporte et al., 2022).

A partir de dados do Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018) foram selecionadas candidatas confiáveis de pertencer a TriAnd no espaço de movimentos próprios, apresentado no painel esquerdo da Figura 2.1. Sales Silva et al. (2019) identificaram que algumas estrelas na região de TriAnd com $\mu_\alpha^* = \mu_\alpha \cos \delta > 0.5$ mas yr^{-1} apresentam características similares às encontradas em populações do halo. Para evitarmos contaminação de estrelas do halo na região associada à sobredensidade, foram selecionados alvos dentro de um elipse delimitado por um intervalo de 2σ ao redor do centroide $(\mu_\alpha^*, \mu_\delta) = (-0.11, -0.57)$ mas yr^{-1} estimado a partir do movimento próprio das amostras de Chou et al. (2011), Sheffield et al. (2014) (que contém as amostras de Bergemann et al. 2018 e Hayes et al. 2018), e das estrelas classificadas como membros do TriAnd por Sales Silva et al. (2019).

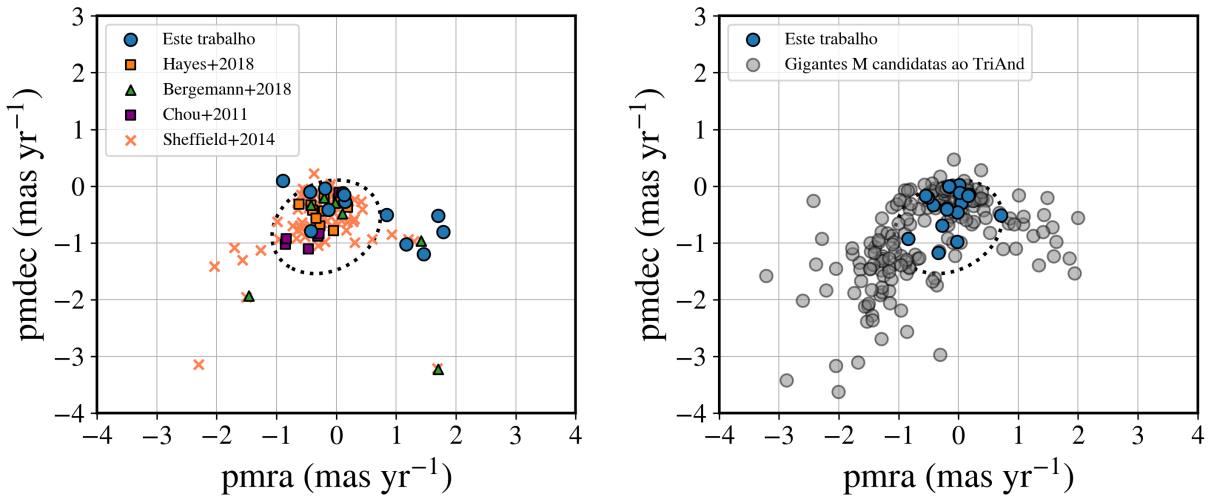


Figura 2.1: No painel à esquerda: o movimento próprio utilizado para a seleção das estrelas candidatas ao TriAnd. O elipsóide de 1.5σ representa o movimento próprio característico identificado por Sales Silva et al. (2019). No painel à direita: o movimento próprio de estrelas gigantes M candidatas na região de TriAnd, selecionadas através do critério de cor no diagrama J-H vs. J-K. Os alvos foram escolhidos através do elipsóide de 1.0σ proposto por Sales Silva et al. (2019)

2.1.2 APOGEE

O APOGEE (Prieto et al., 2008) é um projeto que visa mapear a composição química de milhares de estrelas frias na Via Láctea. Utilizando os espectrógrafos de alta resolução

¹ Os componentes que descrevem o movimento próprio no sistema de coordenadas equatorial são dadas pela ascensão reta (μ_α) e declinação (μ_δ), sendo sua unidade milliarcosegundos por ano (mas yr^{-1}).

APOGEE-N e APOGEE-S ($R \sim 22.500$), instalados no telescópio de 2.5 metros do Observatório Apache Point, o projeto coleta dados espectroscópicos de alta qualidade em uma ampla faixa de comprimentos de onda no infravermelho. Com essas observações, é possível a obtenção de informações homogêneas detalhadas sobre as abundâncias de elementos químicos em estrelas, permitindo estudos abrangentes sobre a formação e evolução da Galáxia.

Foram utilizados dados do APOGEE DR17 (Abolfathi et al., 2022) para selecionar amostras de campo para comparação entre as abundâncias derivadas para a amostra deste trabalho e populações da Via Láctea, tanto *in situ* quanto acretadas. Afim de garantir a qualidade dos dados das amostras de estrelas de campo, uma série de cortes foram aplicados: sinal-ruído relativamente alto ($S/N > 50 \text{ pixel}^{-1}$); ajuste espectral confiável ($\text{STARFLAG} = 0$ e $\text{ASPCAPFLAG} = 0$); estrelas gigantes foram selecionadas ($3500 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 6000 \text{ K}$ e $\log g < 3.5$); todas as estrelas com estimativas problemáticas de $[\text{Fe}/\text{H}]$, $[\text{Mg}/\text{Fe}]$, $[\text{Al}/\text{Fe}]$ e $[\text{Mn}/\text{Fe}]$ foram descartadas. Tais cortes são similares aos aplicados em trabalhos recentes que usam dados do APOGEE DR17 (Hasselquist et al., 2021; Queiroz et al., 2021; Horta et al., 2022).

Para excluir aglomerados globulares e galáxias anãs das estrelas *in situ* foram adotados os critérios de Limberg et al. (2022). Aglomerados globulares foram separados de acordo com o catálogo de Vasiliev et al. (2021), que fornece probabilidades de pertencimento baseadas em dados astrométricos do GAIA EDR3 (Gaia Collaboration et al., 2020). Estrelas associadas com galáxias satélites, incluindo a *Sagittarius Stream*, foram removidas utilizando-se $\text{parallax over error} > 2$ (Beaton et al., 2021; Santana et al., 2021; Abolfathi et al., 2022).

Os dados astrométricos foram cruzados com o catálogo completo do GAIA EDR3, em um raio de $1.5''$, para se obter valores de paralaxes e movimentos próprios. Apenas estrelas com $\text{RUWE} \leq 1.4$ foram utilizadas, para garantir a qualidade das soluções astrométricas (Lindgren et al., 2021), segundo as práticas padrões para a utilização de dados do GAIA EDR3 (Fabricius et al., 2021). As distâncias solares espectrofotométricas foram estimadas utilizando-se o código `StarHorse` (ver Seção 3.8 para maiores informações sobre o código e sua utilização). A amostra também foi restrita a estrelas com incertezas fracionais moderadas ($< 20\%$), assumindo distribuições gaussianas, de seus valores de distâncias solares nominais.

A partir dessa amostra, os seguintes critérios foram aplicados para selecionar estrelas de campo do disco externo: $5 < Y_{GC}/\text{kpc} < 15$, $|Z_{GC}| < 2 \text{ kpc}$ e $R_{GC} = \sqrt{X_{GC}^2 + Y_{GC}^2} > 15 \text{ kpc}$. Tal seleção pode ser visualizada na Figura 2.2, em comparação com a amostra completa do APOGEE DR17, excluindo-se aglomerados globulares e estrelas de galáxias anãs. Esses critérios são mais conservativos dos que os utilizados por Hayes et al. (2018) com dados do APOGEE DR14 (Abolfathi et al., 2018b), portanto mais representativos da população do disco externo na mesma distância e localização de TriAnd.

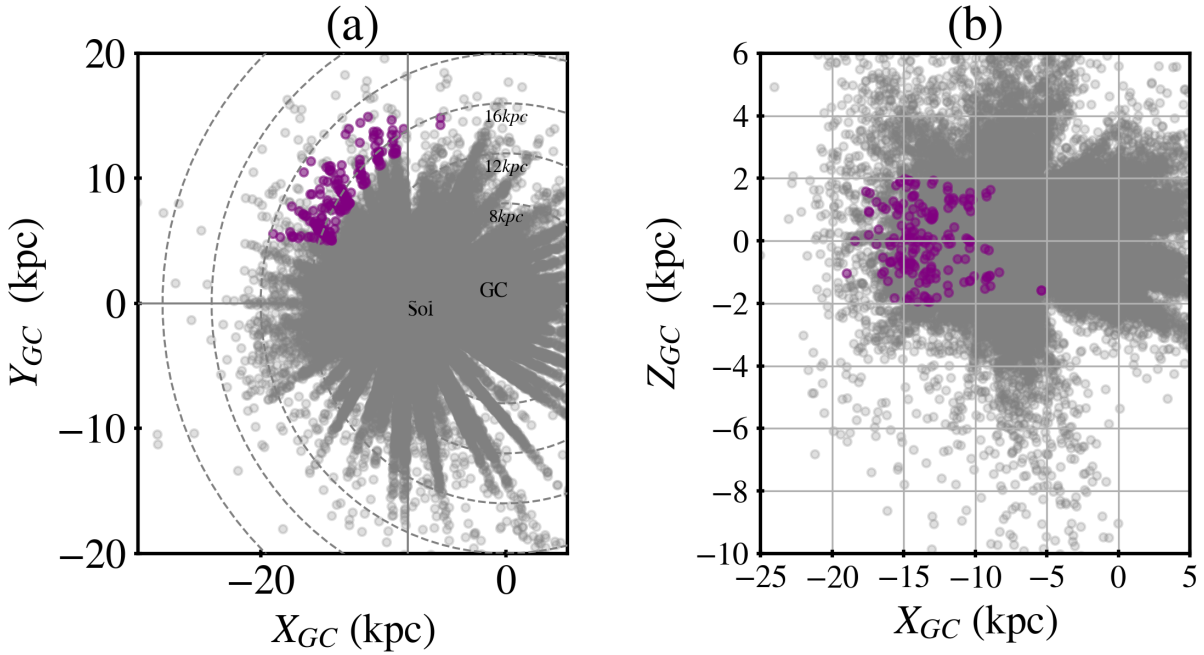


Figura 2.2: Apresenta-se em (a) e (b) projeções (X_{GC}, Y_{GC}) e (X_{GC}, Z_{GC}) , respectivamente. A amostra completa do APOGEE DR17, excluindo-se aglomerados globulares e estrelas de galáxias anãs, está representada em cinza. A seleção restrita do disco externo está representada em lilás ($5 < Y_{GC}/\text{kpc} < 15$, $|Z_{GC}| < 5 \text{ kpc}$ e $R_{GC} > 15 \text{ kpc}$).

Para analisar se TriAnd apresenta perfil químico similar a objetos acretados, foi utilizado o critério quimiodinâmico de Limberg et al. (2022) para selecionar membros da subestrutura GSE, construído para abundâncias disponíveis no banco de dados do APOGEE:

$$GSE = \begin{cases} -500 \leq L_Z \leq +500 \text{ kpc km s}^{-1} \\ 30 \leq \sqrt{J_R} \leq 50 \text{ (kpc kms)}^{1/2} \\ [\text{Mg}/\text{Mn}] > +0.25 \\ [\text{Mg}/\text{Mn}] > 5 \times [\text{Al}/\text{Fe}] + 0.5, \end{cases} \quad (2.2)$$

selecionando-se assim dados com mínima contaminação de estrelas *in situ*.

2.1.3 SAGA

A base de dados Stellar Abundances for Galactic Archaeology (SAGA) (Suda et al., 2008, 2017) é uma compilação de dados de abundâncias químicas de estrelas, desenvolvida para apoiar estudos de Arqueologia Galáctica. Essa base de dados reúne informações detalhadas sobre as abundâncias de elementos químicos em estrelas da Via Láctea, coletadas a partir de diversos levantamentos espectroscópicos.

O SAGA foi utilizado neste trabalho para obtenção das abundâncias de Ba e Eu das estrelas de campo, já que a base de dados do APOGEE não apresenta esses elementos. Não foi possível aplicar as mesmas restrições para a seleção das estrelas do disco externo como apresentado na Figura 2.2, pois as estrelas presentes no SAGA não atingem altos valores de R_{GC} . Portanto, todos os dados de Ba e Eu para estrelas da Via Láctea foram utilizados, excluindo-se os valores listados na base de dados do SAGA como limites superiores. Os valores adotados para esses elementos químicos são apresentados na Figura 5.4.

2.2 Observações

As 31 estrelas candidatas ao TriAnd, que compõem a amostra deste trabalho, foram observadas utilizando o espectrógrafo de alta resolução Gemini Remote Access to CFHT ESPaDOnS Spectrograph (GRACES) acoplado ao telescópio Gemini Norte (8.1 m). Todos os alvos foram observados no modo fila (GN-2019B-Q-211, GN-2020B-Q-112, GN-2020B-Q-211; P.I. Perottoni), na configuração de 2-fibras (objeto+céu) com resolução $R \sim 40000$ na região óptica ($4000 < \lambda/\text{Å} < 10000$), excetuando-se 5 estrelas que por um erro técnico foram observadas em modo de 1-fibra. A observação de estrelas do TriAnd nas configurações supracitadas permite a análise de elementos como Na, Al, Eu, Ba, pico do Ferro e elementos α .

O conjunto de instrumento e modo de observação escolhidos para a amostra deste trabalho levou a uma relação sinal-ruído típica de cerca de $S/N \sim 50-70 \text{ pixel}^{-1}$ em 6000 Å. Esse valor de S/N é considerado adequado para o propósito deste estudo, permitindo obter abundâncias confiáveis das estrelas observadas. É importante destacar que as estrelas analisadas nesta investigação são gigantes vermelhas frias. Essas estrelas possuem espectros complexos, com características de absorção acentuadas causadas por moléculas, camadas circunstelares e perda de massa. Essas características requerem observações em

alta resolução com um alto sinal-ruído para a determinação confiável das abundâncias químicas.

Os valores de S/N obtidos são considerados adequados para atingir os objetivos de pesquisa, permitindo uma análise detalhada das estrelas gigantes vermelhas frias. A detecção e análise precisa das características espectrais relevantes para a determinação das abundâncias químicas dessas estrelas é fundamental para compreender sua história evolutiva e a influência de processos físicos e químicos em seu ambiente estelar. Os valores individuais da razão S/N estão listados na Tabela 2.1, assim como respectivas informações dos alvos, como tempo de exposição, coordenadas e fluxos.

A amostra consiste de 13 estrelas candidatas ao TriAnd apresentadas em Sales Silva et al. (2019) e 18 estrelas novas, totalizando 31 estrelas. A fim de garantir homogeneidade nas observações, foi utilizada a mesma configuração que em Sales Silva et al. (2019). Na Figura 2.3, apresenta-se a projeção espacial em coordenadas Galácticas dessas estrelas dentro da região associada com a sobredensidade.

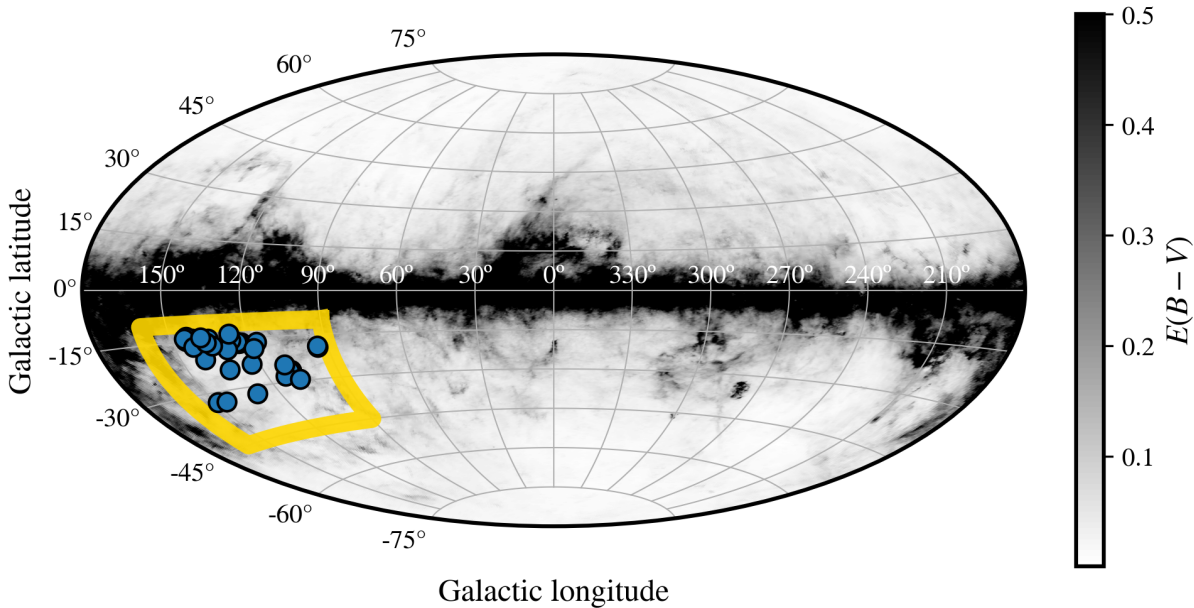


Figura 2.3: Projeção espacial em coordenadas Galácticas de estrelas candidatas ao TriAnd utilizadas neste trabalho, representadas por círculos azuis. Linhas amarelas identificam a região associada com a sobredensidade ($-90^\circ < l < -160^\circ$ e $-10^\circ > b > -45^\circ$). As estrelas estão sobrepostas ao mapa de extinção interestelar de Schlegel et al. (1998), enquanto a barra de cor representa o avermelhamento. Figura extraída de Abuchaim et al. (2023).

Os dados obtidos em alta resolução direcionaram os métodos escolhidos que serão abordados no próximo capítulo.

Tabela 2.1 - Estrelas candidatas ao TriAnd utilizadas neste trabalho, observadas com o Gemini/GRACES.

2MASS ID	RA (deg)	DEC (deg)	l (deg)	b (deg)	J (mag)	H (mag)	K (mag)	S/N	exp (s)
23495808+3445569	357.49	34.77	108.86	-26.42	11.74	10.90	10.73	56.02	880
00534976+4626089	13.46	46.44	123.36	-16.43	11.91	11.03	10.87	57.52	1250
00594094+4614332	14.92	46.24	124.42	-16.61	12.20	11.38	11.18	61.95	1270
23535441+3449575	358.48	34.83	109.76	-26.56	11.94	11.15	10.98	63.45	1000
00075751+3359414	1.99	33.99	112.73	-28.01	12.35	11.56	11.42	61.91	980
01020943+4643251	15.54	46.72	124.84	-16.11	12.27	11.48	11.29	50.44	1300
02350813+4455263	38.78	44.92	141.55	-14.17	12.40	11.67	11.44	69.09	1270
02475442+4429269	41.98	44.49	143.86	-13.60	11.97	11.11	10.93	63.52	980
23481637+3129372	357.07	31.49	107.47	-29.47	12.08	11.27	11.06	54.91	1140
01151944+4713512	18.83	47.23	127.13	-15.45	12.17	11.34	11.19	63.85	1000
02463235+4314481	41.63	43.25	144.20	-14.82	12.34	11.56	11.35	63.43	1240
02485891+4312154	42.25	43.20	144.63	-14.66	11.40	10.51	10.28	59.49	1100
02510349+4342045	42.76	43.70	144.74	-14.05	12.00	11.12	10.96	68.87	1400
22344771+3545006	338.70	35.75	94.05	-19.35	11.63	10.80	10.51	48.89	775
22333278+3605357	338.39	36.09	94.02	-18.92	11.02	10.09	9.83	47.56	600
23534927+3659173	358.46	36.99	110.32	-24.47	12.16	11.23	11.04	50.85	1290
00523040+3933030	13.13	39.55	123.16	-23.32	11.72	10.91	10.68	55.91	900
02165554+3921295	34.23	39.36	140.45	-20.59	12.01	11.21	11.03	67.68	1080
02025792+4628148	30.74	46.47	135.56	-14.64	11.49	10.60	10.38	60.54	780
01180060+3014151	19.50	30.24	129.72	-32.28	11.76	10.96	10.75	57.9	780
02273411+2515043	36.89	25.25	148.90	-32.73	11.87	11.04	10.85	49.87	830
00194223+4559569	4.93	46.00	117.19	-16.52	11.89	11.04	10.83	62.55	1300
01282462+4413349	22.10	44.23	129.89	-18.15	12.02	11.18	11.01	54.4	1300
01390736+3739126	24.78	37.65	133.27	-24.26	11.73	10.94	10.73	66.83	1100
01564607+4442296	29.19	44.71	134.97	-16.63	11.60	10.73	10.54	56.68	1100
01151093+4918038	18.80	49.30	126.91	-13.39	11.34	10.44	10.21	63.88	1250
00313809+4416285	7.91	44.27	119.20	-18.45	11.73	10.89	10.65	61.54	1040
02143193+2608327	33.63	26.14	145.27	-33.10	12.11	11.33	11.15	63.69	1400
02343917+4217408	38.66	42.29	142.57	-16.61	12.00	11.19	11.02	59.34	1300
02082272+4512126	32.09	45.20	136.88	-15.57	11.53	10.67	10.48	54.78	1100
02184143+4612011	34.67	46.20	138.31	-14.05	10.73	9.77	9.52	53.8	1050

RA - ascensão reta; DEC - declinação; l - longitude Galáctica; b - latitude Galáctica; J, H e K - magnitude em cada banda; S/N - relação sinal-ruído; exp - tempo de exposição.

Métodos

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para a análise dos dados referentes a este estudo: descrição sobre a redução dos dados, medição das velocidades radiais e larguras equivalentes, assim como análises química e dinâmica.

3.1 Redução de dados

Antes de se fazer a análise de dados espectroscópicos, é necessário primeiramente reduzir os dados multi-dimensionais. As imagens obtidas através do espectrógrafo GRACES são bidimensionais e devem ser convertidas em espectros unidimensionais, calibrados em fluxo de energia e comprimento de onda.

Até o momento, existem duas opções de software que podem ser utilizados para a redução de dados obtidos através do espectrógrafo GRACES: (a) O software em python Open source Pipeline for ESPaDOnS Reduction and Analysis¹ (OPERA; Martioli et al. 2012) que apresenta em modo 2 fibras resolução de 36.000 ~ 40.000, com a maior resolução entre 6500 e 9000Å; (b) o software em IDL Data Reduction and Analysis for GRACES² (DRAGraces; Chené et al. 2021) que apresenta uma resolução de 37.000 em modo 2 fibras.

Diante dessas possibilidades, optou-se pelo software OPERA para a redução dos dados. Tal escolha foi devida não somente às características melhor consolidadas no tocante a uma maior resolução no modo 2 fibras utilizado neste trabalho, como também à familiaridade com a linguagem. Os procedimentos adotados encontram-se listados no tutorial dedicado ao software³. O OPERA foi desenvolvido para processar imagens produzidas pelo instru-

¹ <https://www.cfht.hawaii.edu/en/projects/opera/>

² <https://github.com/AndreNicolasChene/DRAGRACES>

³ [http://wiki.lna.br/wiki/espectro/index.php/GRACES_\(Gemini\)](http://wiki.lna.br/wiki/espectro/index.php/GRACES_(Gemini))

mento Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars (ESPaDOnS) e, em seguida, adaptado para também acomodar redução de dados do GRACES, e fornecer espectros unidimensionais calibrados.

Para uma redução prudente, é necessário entender os passos envolvidos no processo. O software OPERA tem capacidade de reduzir dados obtidos em uma mesma noite de observação de forma automatizada. Alguns parâmetros precisam ser especificados:

- Modo do Instrumento:
 - somente estrela: 1 fibra, 4 fendas, $R=65.000$;
 - estrela+céu: 2 fibras, 2 fendas, $R=40.000$.

- Modo de Velocidade de Leitura:
 - Rápido : ruído = $4.7 e^-$, ganho = $1.6 e^-/ADU$, tempo de leitura = 32 s;
 - Normal: ruído = $4.2 e^-$, ganho = $1.3 e^-/ADU$, tempo de leitura = 38 s;
 - Lento: ruído = $2.9 e^-$, ganho = $1.2 e^-/ADU$, tempo de leitura = 60 s.

O chamado Modo de Observação é, portanto, um Modo de Instrumento combinado com um Modo de Velocidade de Leitura. Após especificado o Modo de Observação, com seus respectivos dados obtidos ao inspecionar os arquivos recebidos do Gemini Observatory Archive⁴ (GOA), reuni-se os dados de calibração para efetuar de fato a redução.

Os dados de calibração consistem em:

1. FLAT (mínimo 5, recomendado 20):
 - (a) exposição à lâmpada halógena de quartzo;
 - (b) contagem média adequada acima de 30% e abaixo de 90% da saturação;
 - (c) todos os *flats* precisam ter o mesmo tempo de exposição.

2. BIAS (mínimo 3, recomendado 5):
 - (a) imagem feita com o obturador fechado e sem tempo de integração;
 - (b) necessário apresentar o mesmo modo de velocidade de leitura que os objetos de ciência.

⁴ <https://archive.gemini.edu/searchform>

3. ARC (mínimo 1, recomendado 3):

- (a) exposição à lâmpada de Th-Ar;
- (b) não deve apresentar problemas de saturação;
- (c) pode apresentar diferentes tempos de exposição.

O software combina todas as imagens de calibração de um mesmo tipo em uma única imagem “mestre”. Por exemplo, se existem 10 exposições de lâmpadas de ThAr para comparação, então elas serão combinadas e utilizadas como uma única imagem para a calibração em comprimentos de onda.

O software conta com ferramentas para corrigir e adaptar os modos de observação caso haja algum problema, como por exemplo, caso os *bias* não estejam todos no mesmo modo de velocidade de leitura que os arquivos de ciência. Por fim, utiliza-se estrelas de calibração observadas diretamente antes ou depois das observações de ciência, sem ter ocorrido mudança no modo do instrumento.

Após todos os preparativos, é possível efetuar a redução dos dados para obter espectros unidimensionais calibrados. Os dados de calibração utilizados para a amostra deste trabalho estão de acordo com as recomendações do tutorial, ou seja, 20 *flat*, 5 *bias* e 3 *arc* para cada noite de observação. Ao todo foram reduzidos os dados referentes a 13 noites de observação, totalizando 31 estrelas candidatas ao TriAnd, que compõem a amostra de estrelas estudadas nesta pesquisa. Na Figura 3.1 apresenta-se um exemplo de espectro unidimensional de uma estrela da amostra, após redução obtida utilizando o software OPERA.

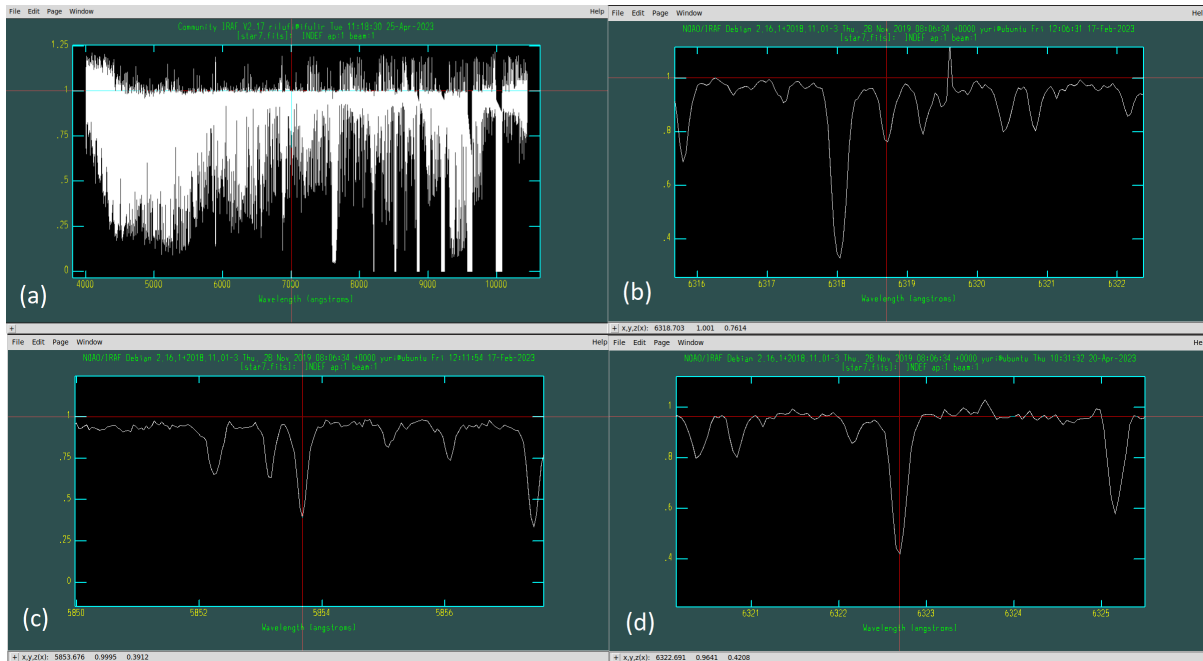


Figura 3.1: Espectro unidimensional final reduzido da estrela 23535441+3449575. Na imagem são apresentados 4 painéis com diferentes regiões do espectro de uma das estrelas da amostra deste trabalho, em (a): o espectro total; em (b): a região do tripleto de Mg em 6318.7 Å, 6319.2 Å e 6319.4 Å; em (c): uma das linhas de Ba II que foi utilizada para síntese espectral em 5853.6 Å; em (d) uma das linhas utilizadas de Fe I em 6322.69 Å.

3.2 Velocidades Radiais

As velocidades radiais foram calculadas utilizando-se a ferramenta `fxcor` do software Image Reduction and Analysis Facility (IRAF; Tody 1986). Esta ferramenta executa uma correlação cruzada de Fourier, comparando um *template* (base de espectros conhecidos ou sintéticos) com o espectro estelar que se deseja calcular a velocidade radial. Os espectros sintéticos escolhidos foram os de Munari et al. (2005), a fim de homogeneizar a comparação com o trabalho de Sales Silva et al. (2019).

A análise empregada pela ferramenta `fxcor` necessita de uma lista de objetos e seu respectivo *template* para comparação. Os objetos podem ser tanto unidimensionais, como bidimensionais, em modos *echelle* ou *multispec*, como lidos pelo software, e podem ser correlacionados com *templates* de uma ou duas dimensões. Caso o *template* seja unidimensional, mas o objeto seja bidimensional, o *template* é utilizado para correlacionar cada uma das aberturas especificadas pelos parâmetros do objeto. *Templates* bidimensionais irão correlacionar com as aberturas correspondentes.

Como o *template* pode diferir em vários aspectos do objeto a ser analisado, a ferra-

menta `fxcor` dispõe de operações que podem ser aplicadas para preparar os dados para a correlação e eventual cálculo da velocidade radial. Uma das opções é a dispersão em comprimento de onda dos dados em comparação com o *template*, que podem ser reajustados utilizando-se o parâmetro `interp`. Outra opção seria a normalização do contínuo para melhorar a correlação, que pode ser especificada pelo parâmetro `continuum`.

Após as devidas correções, a correlação cruzada pode ser de fato computada e a velocidade radial calculada. Primeiramente, o pico máximo entre a janela especificada pelos parâmetros `wincenter` e `window` é encontrado e ajustado de acordo com os parâmetros de largura, altura e pico. Um pequeno gráfico da função de correlação cruzada total é feito, além de um gráfico centrado no pico da distribuição. As informações finais exibidas e retornadas pela ferramenta incluem a velocidade radial e sua incerteza associada.

Como os espectros que compõem a amostra deste trabalho já haviam sido previamente reduzidos e normalizados, foi empregada a análise unidimensional, sem ser necessário aplicar mais correções. Na Figura 3.2 apresenta-se um exemplo de utilização da ferramenta `fxcor` para uma das estrelas da amostra deste trabalho.

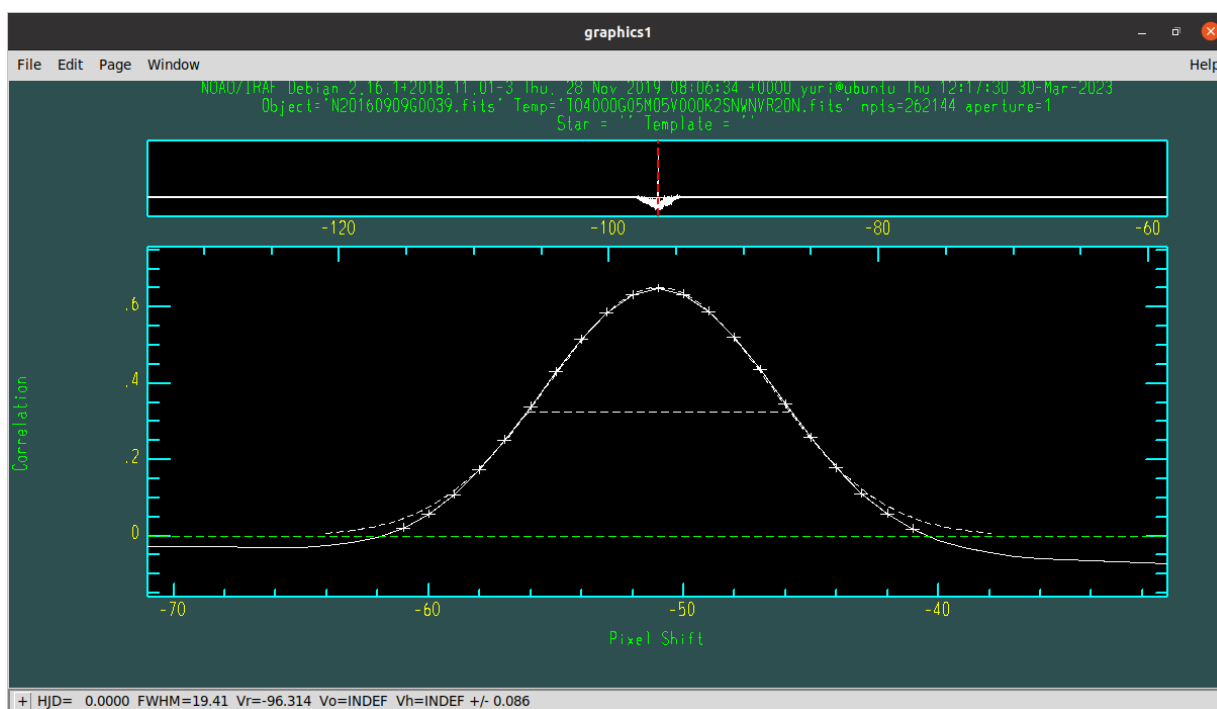


Figura 3.2: Espectro da estrela 23535441+3449575 utilizando a ferramenta `fxcor` para medição da velocidade radial apresentando resultado de -96.31 km s^{-1} .

Para confirmar o valor das velocidades radiais calculadas, é possível medir o deslocamento Doppler através da posição de linhas de absorção facilmente reconhecidas, como

as linhas de Balmer. Representada na Figura 3.3, está a linha $H\alpha$ (6562.8 Å) de um dos espectros da amostra deste trabalho. Após a medição, compara-se com o comprimento de onda da linha em repouso, através do *redshift* (z) dado por:

$$z = v/c = \lambda - \lambda_o/\lambda_o, \quad (3.1)$$

onde c é a velocidade da luz, v é a velocidade do objeto, λ é o comprimento de onda medido e λ_o é o comprimento de onda em repouso.

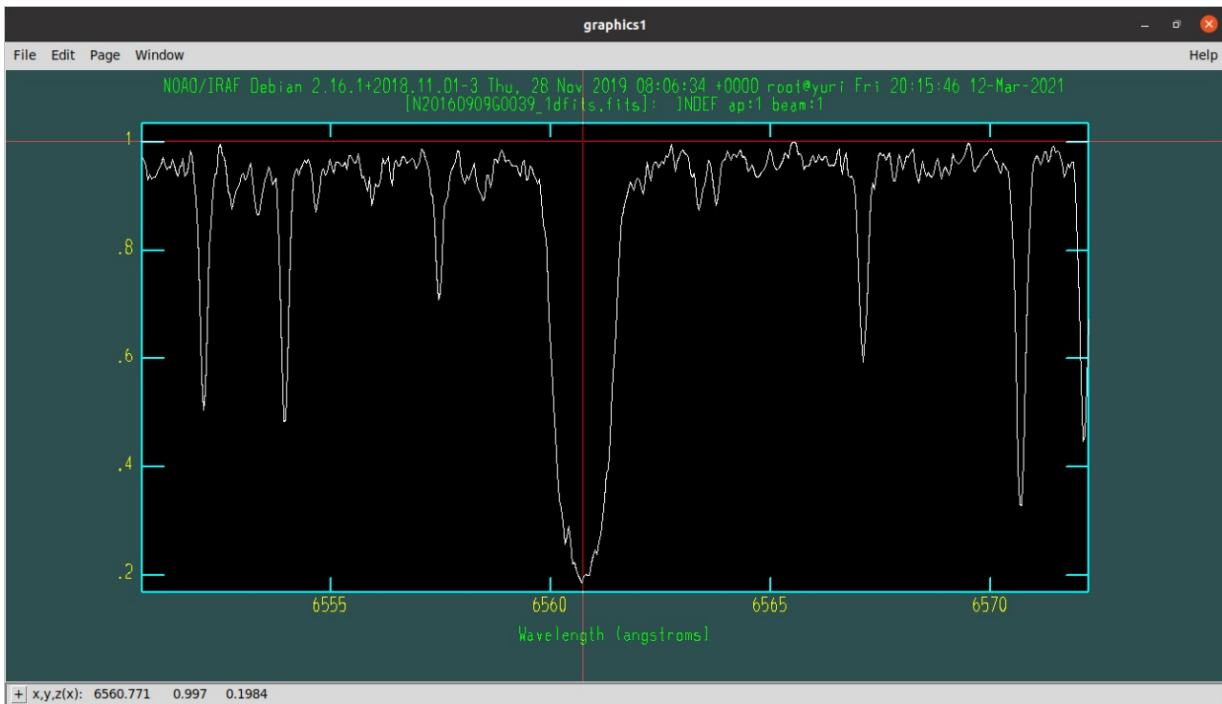


Figura 3.3: Espectro da estrela 23535441+3449575 apresentando um deslocamento Doppler de ~ -2 Å da linha de absorção de H-alfa em 6560.77 Å, em comparação com a medida de repouso em 6562.8 Å.

Após o cálculo das velocidades radiais, é possível corrigir o deslocamento Doppler dos espectros, para proceder-se à medição das larguras equivalentes. Para tal, foi utilizada a ferramenta do IRAF *dopcor*, que utiliza como parâmetro a velocidade radial para corrigir o deslocamento Doppler. Na Figura 3.4 pode-se ver o mesmo espectro apresentado na Figura 3.3 após a aplicação da ferramenta *dopcor*.

Para se verificar a consistência dos métodos utilizados, as velocidades radiais das estrelas da amostra foram comparadas com os valores da literatura e do banco de dados do GAIA DR3. Pode-se ver na Figura 3.5 que a maioria dos valores de velocidades radiais determinadas para a amostra deste trabalho são compatíveis, dentro das incertezas, com os valores obtidos do levantamento GAIA.

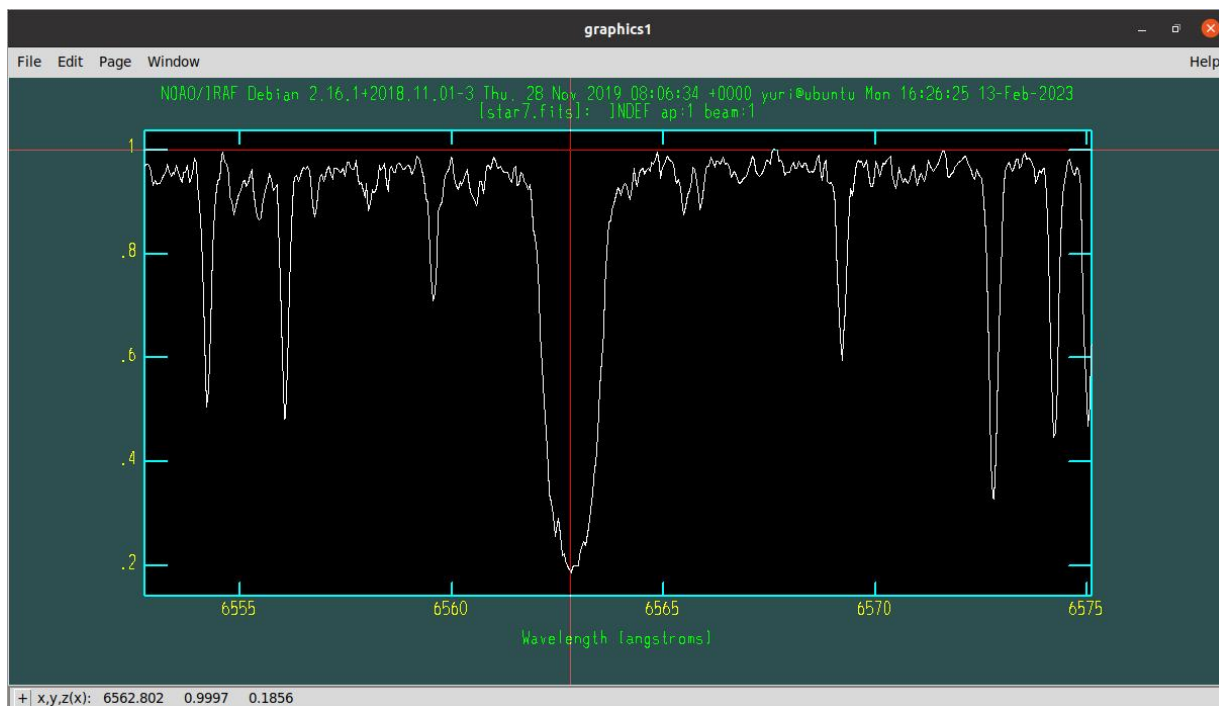


Figura 3.4: Espectro da estrela 23535441+3449575 após aplicação da ferramenta dopcor para correção do deslocamento Doppler, apresentando a linha de H-alfa em 6562.8 Å, compatível com a medida de repouso.

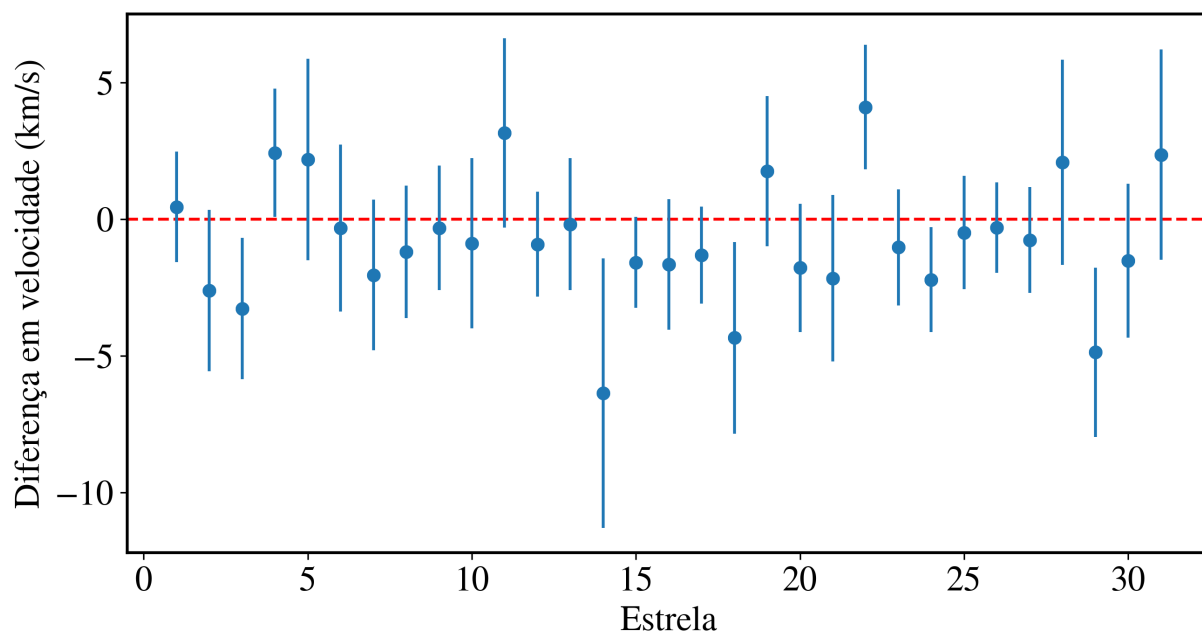


Figura 3.5: Gráfico de resíduos com a comparação entre as velocidades radiais determinadas para as estrelas deste trabalho e do banco de dados do GAIA DR3. A Tabela A.1 contendo os dados, e suas respectivas incertezas, pode ser encontrada no Apêndice A.

As 13 estrelas da amostra que têm velocidades radiais calculadas em Sales Silva et al. (2019) apresentam diferenças entre as velocidade calculadas neste trabalho e as velocidades encontradas no banco de dados do GAIA DR3. A incompatibilidade dos resultados se

dá por conta de um erro na aplicação da correção heliocêntrica das velocidades em [Sales Silva et al. \(2019\)](#). Para certificar essa conclusão, uma vez que o software OPERA aplica as correções automaticamente durante a redução, as correções heliocêntricas foram calculadas e aplicadas manualmente em todos os espectros da amostra. Na Tabela 3.1, são apresentados os valores obtidos para as 13 estrelas deste trabalho em comum com [Sales Silva et al. \(2019\)](#), os valores da literatura e as respectivas correções heliocêntricas.

Tabela 3.1 - Velocidades Radiais e correções heliocêntricas calculadas para a amostra deste trabalho, assim como as Velocidades Radiais calculadas em [Sales Silva et al. \(2019\)](#).

2MASS ID	RV ¹ (km/s)	σ_{RV} ¹ (km/s)	RV (km/s) ²	σ_{RV} ² (km/s)	Correção (km/s)
23495808+3445569	-21.76	0.73	-43.4	0.6	10.94
00534976+4626089	-211.68	0.62	-245.3	1.5	16.93
00594094+4614332	-131.08	0.75	-165.6	0.5	17.29
23535441+3449575	-96.31	0.8	-118.6	0.6	11.08
00075751+3359414	-209.02	0.94	-233.6	0.5	12.31
01020943+4643251	-109.52	0.78	144	0.8	17.33
02350813+4455263	-93.29	0.73	-139.7	0.9	23.2
02475442+4429269	-97.36	0.9	-145.2	1	23.85
23481637+3129372	-178.07	0.86	-196.9	0.6	9.45
01151944+4713512	-127.03	1.22	-162.4	0.5	17.82
02463235+4314481	-134.65	0.83	-182.1	0.5	23.8
02485891+4312154	-91.89	0.64	-139.5	1.4	23.87
02510349+4342045	-119.96	0.91	-106.2	0.7	-6.87

1 - Dados referentes a este trabalho.

2 - Dados retirados de [Sales Silva et al. \(2019\)](#).

3.3 Larguras Equivalentes

Uma das maneiras⁵ de se determinar tanto parâmetros atmosféricos quanto abundâncias químicas é utilizar as larguras equivalentes das linhas espectrais. Uma vez que o perfil da linha é de difícil medição, esse método permite substituir a área preenchida pelo perfil de uma linha por um retângulo, onde um dos lados é a altura do contínuo e a largura deve corresponder à área preenchida pela linha espectral.

A equação para o cálculo da largura equivalente (EW) é dada por:

$$EW = \int \frac{F_c - F_s}{F_c} d\lambda = \int (1 - F_s/F_c) d\lambda, \quad (3.2)$$

onde F_c e F_s são o fluxo no contínuo e na linha, respectivamente.

A medição das larguras equivalentes foi realizada para as linhas de absorção de Fe I e Fe II, assim como para os demais elementos da amostra (Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr, Ni), excetuando-se Ba e Eu, onde foi aplicado o método da síntese espectral. Para este fim, foi utilizada a ferramenta `splot` do software IRAF, medindo-se cada elemento estrela-por-estrela, em uma base linha-por-linha. Um exemplo dessa tarefa pode ser visto na Figura 3.6, onde há sobreposição de linhas (*blending*) e foi utilizada a técnica de *deblend* para se medir a largura equivalente de Fe I, a qual separa a linha sobreposta da linha desejada.

⁵ Outra forma é a síntese espectral, que será explorada na Seção 3.7.

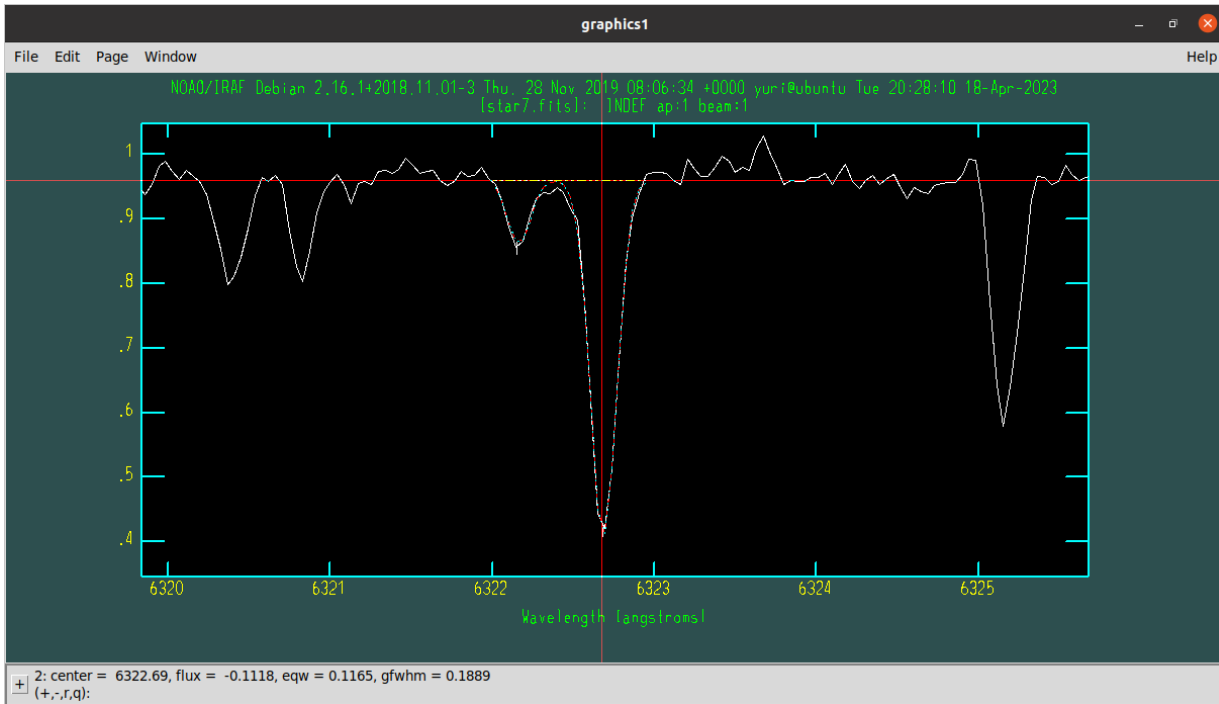


Figura 3.6: Medição de uma linha de Fe I em 6322.69 mÅ da estrela 23535441+3449575 com largura equivalente de 116.5 mÅ utilizando a técnica de *deblend*.

3.4 Análise espectral

Existem duas formas de se efetuar a determinação tanto dos parâmetros atmosféricos, como das abundâncias químicas da amostra: a análise absoluta e a análise diferencial. A análise absoluta não necessita de uma estrela de referência, levando em conta apenas os dados de larguras equivalentes. A análise diferencial leva em conta uma estrela de referência para comparação, contando que a estrela de referência seja similar à estrela estudada e tenha parâmetros bem conhecidos e estimados com alta precisão, melhorando assim a precisão dos parâmetros e abundâncias estimados.

3.4.1 Análise absoluta

A análise absoluta (por vezes chamada de análise clássica) utiliza apenas dados de larguras equivalentes: comprimento de onda, potencial de excitação e $\log gf$. Os valores de $\log gf$ são obtidos em laboratório (ou teoricamente) e são as principais fontes de incertezas nas determinações de abundâncias químicas. Portanto, caso não estejam bem estimados, a dependência desses valores pode aumentar o erro na determinação dos parâmetros estelares e abundâncias químicas.

3.4.2 Análise diferencial

A análise diferencial é a comparação de abundâncias químicas entre duas ou mais estrelas, feita com uma estrela de referência cujos parâmetros atmosféricos e abundâncias sejam bem conhecidos. Esse tipo de análise, além de não depender de dados teóricos, como a probabilidade de transição entre níveis de energia de um átomo ($\log gf$ ⁶), é menos suscetível a efeitos atômicos e atmosféricos. Como exemplo, algumas linhas atômicas de Fe podem sofrer efeitos de não-equilíbrio local termodinâmico (NLTE), além de serem influenciadas pela gravidade superficial da estrela.

Esta análise apresenta uma maior precisão tanto na determinação dos parâmetros atmosféricos quanto das abundâncias. Para a análise absoluta, a incerteza atingida na abundância é da ordem de 0.05 dex, enquanto na análise diferencial, utilizando por exemplo gêmeas solares, a incerteza é da ordem de 0.01 dex (Yana Galarza, 2016). Entretanto, ela depende de alguns fatores essenciais, como a proximidade entre os parâmetros da estrela de referência com as estrelas a serem analisadas e a qualidade dos espectros das estrelas analisadas.

A fim de se confirmar qual o tipo de análise é a mais indicada para a amostra deste trabalho, foi feita a análise diferencial utilizando-se Arcturus como referência, por ser uma estrela gigante K com parâmetros atmosféricos da ordem dos da amostra das estrelas candidatas ao TriAnd e abundâncias químicas bem estabelecidas na literatura. Os parâmetros atmosféricos adotados para Arcturus foram determinados por Ramírez e Allende Prieto (2011): $T_{\text{eff}} = 4286\text{K}$; $\log g = 1.66$; $[Fe/H] = -0.52$; $vt = 1.74$.

Os resultados obtidos através da aplicação da análise diferencial e absoluta, tanto para o cálculo dos parâmetros atmosféricos quanto para as metalicidades, podem ser visualizados nas Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10. É possível notar uma clara diferença entre os dois métodos quando aplicados à amostra deste trabalho.

⁶ gf é a força ponderada do oscilador, definido como o produto da força do oscilador f de uma transição atômica e o peso estatístico g do nível inferior de um átomo.

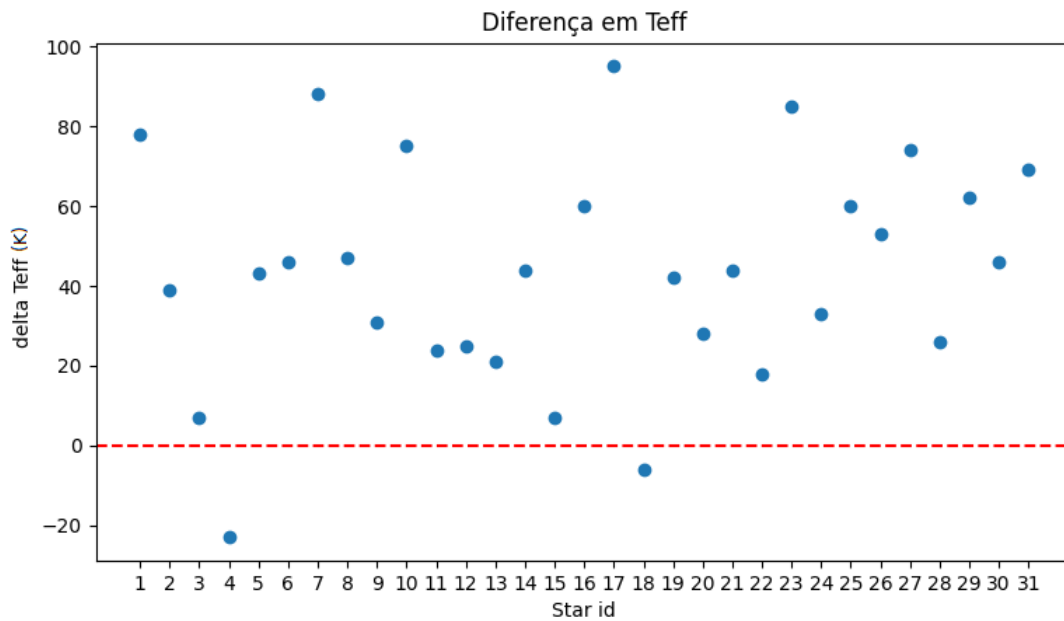


Figura 3.7: Comparação T_{eff} entre as análises absoluta e diferencial.

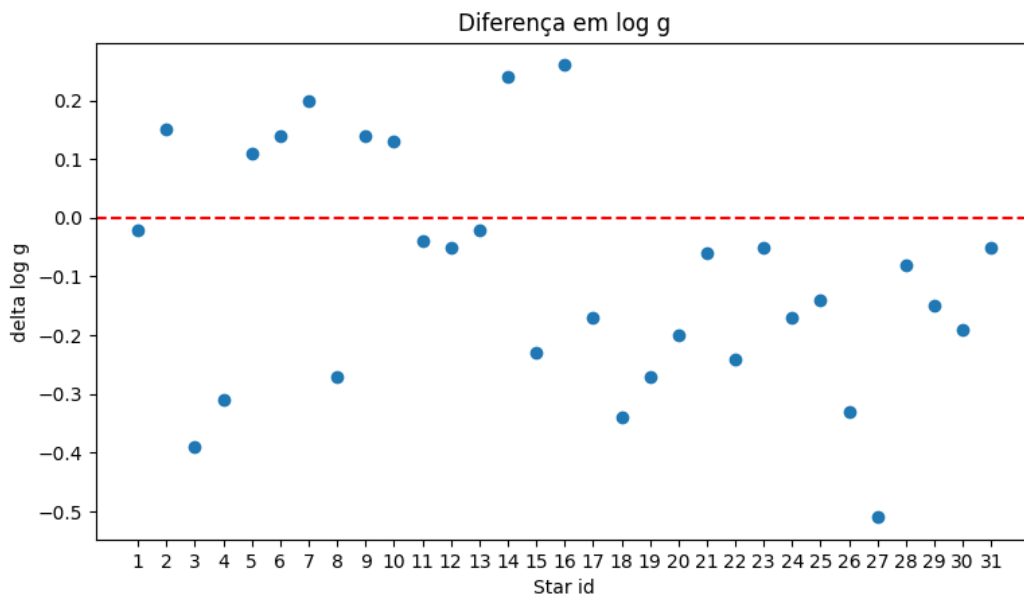


Figura 3.8: Comparação $\log g$ entre as análises absoluta e diferencial.

Reggiani (2019) realizou um teste de análise diferencial com estrelas que não são gêmeas solares e que não apresentam abundâncias e parâmetros tão precisos como o Sol. A comparação entre a análise absoluta e diferencial foi feita com uma amostra de 11 estrelas pobres em metal, observadas com o espectrógrafo UVES instalado no VLT ($R = 50.000$ e $S/N = 180$) e o par de estrelas G 64-12/G 64-37 observadas com o HIRES ($R = 67.000$). A

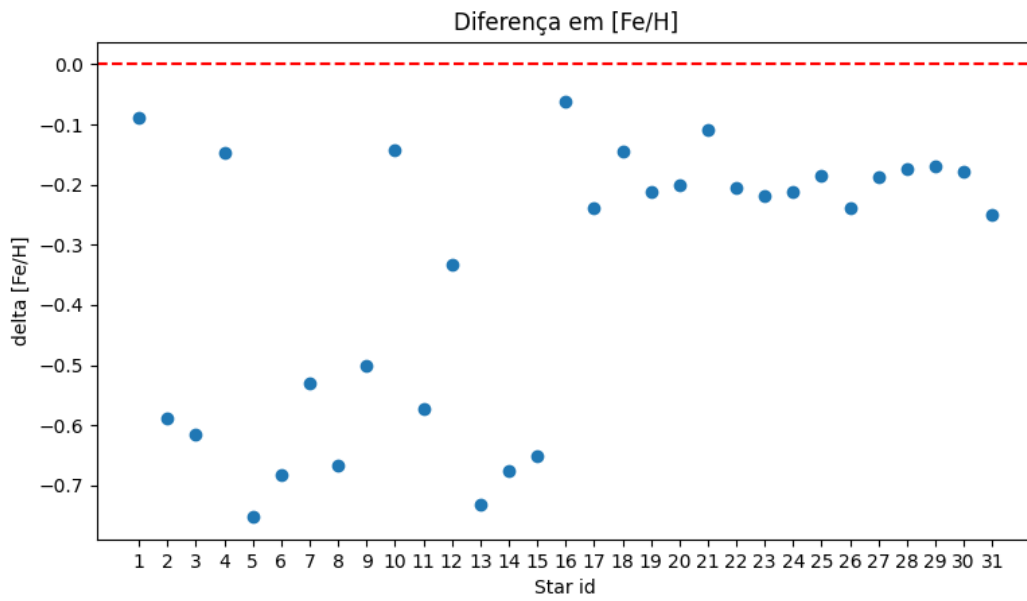


Figura 3.9: Comparação $[Fe/H]$ entre as análises absoluta e diferencial.

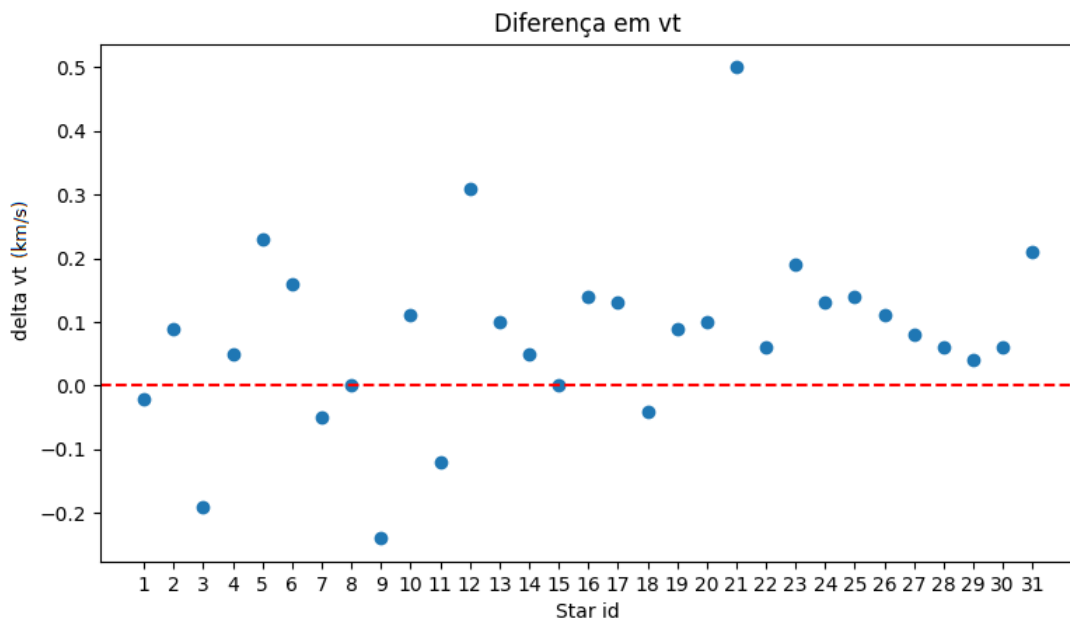


Figura 3.10: Comparação vt entre as análises absoluta e diferencial.

estrela de referência HD 338529 foi selecionada com base na disponibilidade dos parâmetros estelares na literatura das mesmas fontes não-espectroscópicas usadas para uma das estrelas da amostra, G 64-12.

A diferença das duas análises pode ser calculada através do ganho de precisão, onde o

erro é dado por:

$$\sigma(A_x) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{obs}}{\sqrt{N}}\right)^2 + \sigma_{sp}^2}, \quad (3.3)$$

sendo $\sigma(A_x)$ o erro na abundância de A na espécie x, σ_{obs} é a dispersão nas abundâncias estimadas devido à dispersão nas larguras equivalentes medidas, N é o número de linhas medidas da espécie x, e σ_{sp} é o erro quadrático nas abundâncias quando trocado o parâmetro estelar da estrela por suas respectivas incertezas e tendo suas abundâncias químicas recalculadas.

Foi analisada a razão entre os erros das análises absolutas e diferenciais e estimado o ganho de precisão ao se usar a análise diferencial, definido como:

$$\sigma_Z = \frac{\sigma_Z^{absol}}{\sigma_Z^{difer}}, \quad (3.4)$$

onde Z é um parâmetro estelar (T_{eff} , $\log g$, $[Fe/H]$ ⁷ ou vt ⁸) ou a abundância química $A(X)$.

A conclusão de [Reggiani \(2019\)](#) é que a análise diferencial é mais precisa do que a absoluta, caso a estrela de referência tenha os parâmetros bem estabelecidos e a amostra analisada apresente parâmetros atmosféricos bem próximos de uma estrela de referência. Como as estrelas candidatas a pertencerem à TriAnd que compõem a amostra deste trabalho são encontradas em um intervalo de cerca de 1 dex de metalicidade ($-1.5 < [Fe/H] < -0.5$), não seria possível utilizar-se uma única estrela de referência sem comprometer os dados obtidos. Diante do exposto, a análise mais indicada para a amostra deste trabalho é, portanto, a análise absoluta.

3.5 Parâmetros Atmosféricos

Para a determinação dos parâmetros atmosféricos foi utilizado o código em python qoyllur-quipu⁹ ([Ramírez et al. 2014](#); `q2`), o qual utiliza os modelos de [Castelli e Kurucz \(2004\)](#) e o código de análise espectral MOOG¹⁰ ([Snedden, 1973](#)). A temperatura efetiva foi calculada a partir do equilíbrio de excitação definido através da independência entre

⁷ Neste trabalho utiliza-se a notação $[Fe/H]$ para metalicidade, definida por: $[Fe/H] = [\log(N_{Fe}/N_H)] - [\log(N_{Fe}/N_H)]_{\odot}$, onde N_{Fe} e N_H são os números de partículas de Ferro e Hidrogênio, respectivamente, por unidade de volume.

⁸ vt é a velocidade de microturbulência

⁹ <https://github.com/astroChasqui/q2>

¹⁰ <https://www.as.utexas.edu/~chris/moog.html>

as abundâncias de Fe I e o respectivo potencial de excitação de cada linha. A gravidade superficial foi determinada através do equilíbrio de ionização entre as abundâncias médias de Fe I e Fe II. O equilíbrio de ionização está ligado diretamente com a pressão eletrônica, que por sua vez, está relacionada à gravidade a partir do equilíbrio hidrostático. A metalicidade foi estabelecida a partir do valor final fixado pelo equilíbrio de ionização obtido do modelo de atmosfera em Equilíbrio Termodinâmico Local (LTE) utilizado. A velocidade de microturbulência foi encontrada a partir da independência das abundâncias de Fe I com as larguras equivalentes reduzidas (W_l/λ). Essa condição explicita o fato da velocidade de microturbulência influenciar o alargamento Doppler da linha.

O erro total calculado para os parâmetros atmosféricos foi derivado adicionando-se em quadratura os erros estatísticos calculados pelo código `q2` aos erros sistemáticos adotados de $\Delta T_{\text{eff}} = 200\text{K}$ e $\Delta \log g = 0.2$. A incerteza média para cada parâmetro é: T_{eff} : $\pm 216\text{K}$; $\log g \pm 0.39\text{ dex}$; $vt \pm 0.19\text{ km s}^{-1}$. Na Tabela 3.2 apresenta-se os resultados para os parâmetros atmosféricos e velocidades radiais calculadas para a amostra deste trabalho.

Na Figura 3.11 estão graficados os valores de $\log g$ and T_{eff} obtidos para cada estrela da amostra. Em vermelho estão sobrepostas isócronas do Dartmouth Stellar Evolution Database (Dotter et al., 2008) com 8 Ganos, $[\alpha/Fe] = 0$ e metalicidades variadas ($[Fe/H] = -1.5, -1$ e -0.5). Os parâmetros atmosféricos calculados confirmam que os critérios de seleção previamente discutidos, de fato, selecionaram estrelas gigantes M.

Em espectroscopia, um dos obstáculos de se trabalhar com estrelas de baixa T_{eff} é a presença de bandas moleculares que afetam o cálculo de abundâncias químicas. No entanto, as estrelas gigantes M da amostra deste trabalho abrangem tipos espectrais M tardios, fazendo com que a presença de bandas moleculares não seja forte o suficiente para afetar a precisão da análise química.

Tabela 3.2 - Parâmetros Atmosféricos e Velocidades Radiais calculados para a amostra deste trabalho.

2MASS ID	Nome	T_{eff}	$\sigma_{T_{\text{eff}}}$	$\log g$	$\sigma_{\log g}$	vt	σ_{vt}	RV	σ_{RV}
23495808+3445569	star10	3931	46	1.3	0.22	1.94	0.1	-21.76	0.73
00534976+4626089	star2	3891	73	1.08	0.19	1.77	0.11	-211.68	0.62
00594094+4614332	star3	4044	29	0.34	0.17	1.8	0.08	-131.08	0.75
23535441+3449575	star7	4336	56	1.4	0.33	1.63	0.12	-96.31	0.80
00075751+3359414	star1	4111	116	0.51	0.42	1.96	0.3	-209.02	0.94
01020943+4643251	star4	4130	43	0.96	0.3	2.25	0.15	-109.52	0.78
02350813+4455263	star9	4124	58	0.94	0.35	1.65	0.15	-93.29	0.73
02475442+4429269	star12	4053	119	1.13	0.32	2.33	0.34	-97.36	0.90
23481637+3129372	star8	3935	22	0.27	0.12	2.03	0.06	-178.07	0.86
01151944+4713512	star5	4020	48	0.66	0.16	2.04	0.08	-127.03	1.22
02463235+4314481	star13	4045	41	0.64	0.14	2.03	0.08	-134.65	0.83
02485891+4312154	star6	3874	64	0.51	0.23	1.83	0.11	-91.89	0.64
02510349+4342045	star11	4020	36	0.91	0.22	1.72	0.09	-119.96	0.91
22344771+3545006	New1	4003	196	0.58	0.51	1.95	0.5	-153.58	2.94
22333278+3605357	Star2	4200	192	1.4	0.68	1.28	0.5	-270.27	0.89
23534927+3659173	Star25	3947	86	0.68	0.37	2.23	0.21	-147.23	0.68
00523040+3933030	Star24	3959	99	0.69	0.41	1.89	0.21	-139.41	0.62
02165554+3921295	Star17	3955	117	0.58	0.36	1.85	0.18	-88.6	0.71
02025792+4628148	Star3	3928	115	0.62	0.37	1.67	0.19	-113.14	0.84
01180060+3014151	Star4	3991	81	0.7	0.36	2.04	0.17	-106.45	0.81
02273411+2515043	Star5	4183	54	1.36	0.35	2	0.18	-58.4	0.75
00194223+4559569	Star19	3839	78	0.23	0.31	1.87	0.16	-143.59	0.65
01282462+4413349	Star11	4153	89	1.11	0.29	2.12	0.17	-107.64	0.57
01390736+3739126	Star6	4077	99	0.6	0.31	1.91	0.16	-118.47	0.62
01564607+4442296	Star9	4003	120	0.65	0.39	1.8	0.21	-113.24	0.64
01151093+4918038	Star16	3923	130	0.52	0.41	2.18	0.27	-139.84	0.86
00313809+4416285	Star15	3963	48	0.47	0.35	1.81	0.19	-132.68	0.76
02143193+2608327	Star14	4027	81	0.51	0.25	2.07	0.14	-76.01	0.70
02343917+4217408	Star10	4048	54	0.89	0.38	2.01	0.16	-110.93	0.72
02082272+4512126	Star1	4009	80	0.73	0.33	1.98	0.16	-112.93	0.77
02184143+4612011	Star7	3943	104	0.19	0.59	2.4	0.51	-116.02	2.97

T_{eff} - temperatura efetiva; $\log g$ - logaritmo da gravidade superficial; v_t - velocidade de microturbulência; RV - velocidade radial.

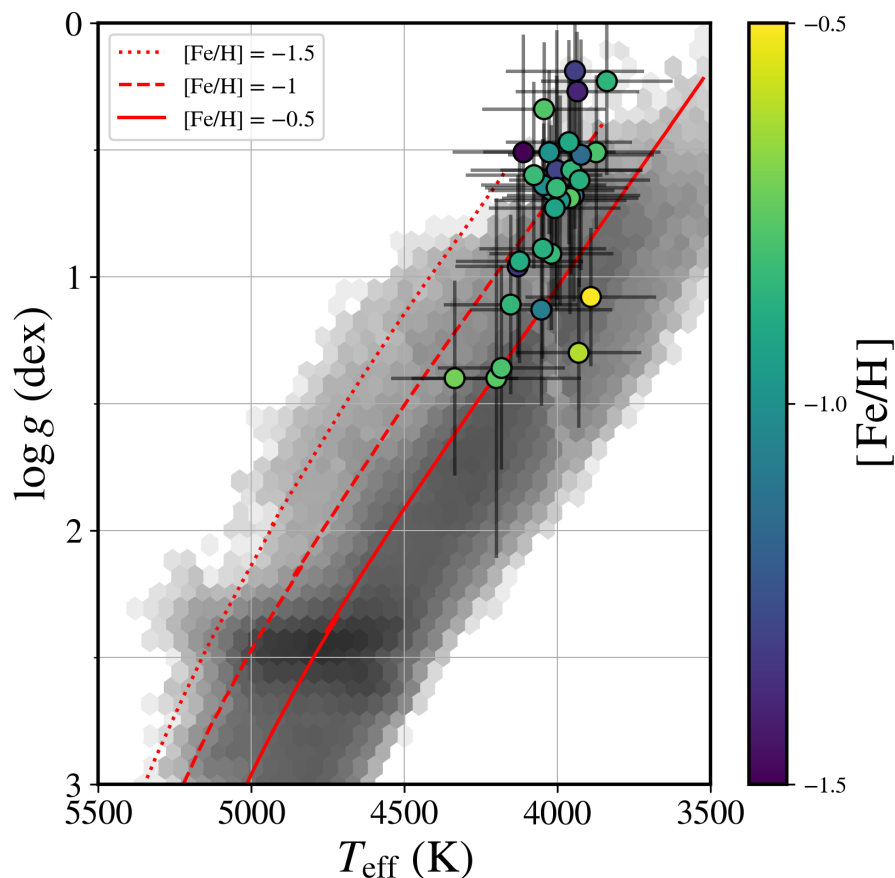


Figura 3.11: Parâmetros estelares $\log g$ e T_{eff} obtidos para as estrelas candidatas ao TriAnd analisadas neste trabalho. A barra de cor indica a metalicidade das estrelas da amostra. As barras de erro indicam as incertezas correspondentes. Estrelas de campo do banco de dados do APOGEE DR17 são apresentadas em escala de cinza. Isócronas do Dartmouth Stellar Evolution Database com 8 Ganos, $[\alpha/Fe] = 0$ e metalicidades variadas estão apresentadas sobrepostas em vermelho.

3.6 Abundâncias Químicas

As abundâncias químicas podem ser derivadas após a determinação dos parâmetros atmosféricos. Neste trabalho foram estimadas as abundâncias de 11 elementos: Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Ba e Eu. Utilizou-se a lista de linhas apresentada em [Sales Silva et al. \(2019\)](#). No entanto, devido ao baixo número de linhas de absorção para alguns elementos, onde as linhas presentes se apresentavam saturadas e/ou com sobreposição, adicionou-se linhas dos levantamentos espectroscópicos GALAH ([Buder et al., 2021](#)) e Southern Stellar Stream Spectroscopic Survey (S5; [Ji et al. 2020](#)) para Mg, Si, Ca e Na.

Após a obtenção das larguras equivalentes, discutidas na Seção 3.3, as abundâncias químicas podem ser derivadas a partir do código q^2 . Para tal, é necessário, além dos dados obtidos de larguras equivalentes, fornecer o potencial de excitação e a probabilidade de

transição ($\log gf$) das linhas de absorção dos respectivos elementos químicos. Esses dados são obtidos em laboratório e são cruciais para a melhor estimativa da análise química.

Para estimar o erro das abundâncias químicas, o q^2 considera dois tipos de contribuições: o erro observado ($\sigma_{obs} = \sigma / \sqrt{n}$) e o erro devido às incertezas dos parâmetros atmosféricos. O primeiro é estimado calculando o desvio padrão da abundância média de um conjunto de linhas do mesmo elemento, já o segundo é determinado avaliando o erro nas abundâncias diferenciais que é introduzido por cada parâmetro (Epstein et al., 2010; Bensby et al., 2014). O erro final das abundâncias químicas σ_{abund} pode ser escrito como:

$$\sigma_{abund} = \sqrt{\sigma_{obs}^2 + \sigma_{Teff}^2 + \sigma_{logg}^2 + \sigma_{vt}^2}, \quad (3.5)$$

sendo σ_{Teff} , σ_{logg} e σ_{vt} os erros devido às incertezas na temperatura efetiva, gravidade superficial e velocidade de microturbulência, respectivamente.

Como os resultados são dados em valores absolutos, utilizou-se os valores solares de Grevesse et al. (2007) para se calcular as abundâncias relativas ao Sol. Todos os cálculos foram feitos assumindo a hipótese de LTE com modelos atmosféricos ODFNEW (Castelli e Kurucz, 2003). A lista de linhas com suas respectivas larguras equivalentes está apresentada na Tabela 3.3.

A incerteza típica para as abundâncias químicas derivadas para a amostra deste trabalho, utilizando-se o método de larguras equivalentes, é de ± 0.14 dex. A incerteza média para cada elemento é: Na I: ± 0.16 dex; Mg I: ± 0.11 dex; Al I: ± 0.10 dex; Si I: ± 0.15 dex; Ca I: ± 0.17 dex; Ti I: ± 0.18 dex; Cr I: ± 0.17 dex; Ni I: ± 0.11 dex.

3.6.1 Correções NLTE

A maioria das estrelas pode ser modelada usando as aproximações de LTE, que assume que o número de átomos em cada estado quântico de energia obedece à distribuição de Boltzmann. No entanto, em regiões de baixa densidade e alta temperatura, como a atmosfera estelar externa, o LTE pode não ser mais uma boa aproximação, e as emissões espectrais podem ser afetadas por desvios de NLTE. Por esse motivo, o NLTE é um modelo mais preciso, que leva em conta a interação dos elétrons com os fótons, podendo ser crucial para uma melhor determinação de abundâncias de elementos químicos em estrelas (Bergemann et al., 2012, 2021; Lind et al., 2012, 2022).

Aplicou-se correções NLTE para toda a amostra estudada neste trabalho. As abundâncias LTE previamente derivadas para os elementos Fe, Ca, Mg, Si e Cr foram corrigidas linha-por-linha utilizando os modelos espectrais de Kovalev et al. (2018)¹¹, os quais são baseados nos trabalhos de Mashonkina et al. (2007), Bergemann e Cescutti (2010), Bergemann et al. (2012), Bergemann et al. (2013) e Bergemann et al. (2017).

As correções NLTE calculadas por essa ferramenta dependem de alguns dados de entrada, como por exemplo: modelo atmosférico a ser utilizado, parâmetros estelares e lista de linhas. Mais especificamente, dentre os modelos atmosféricos, é possível escolher entre modelos 1D plano-paralelo e esféricos. A lista de linhas inserida é cruzada automaticamente com as linhas da base de dados que contém correções NLTE. Na Figura 3.12 pode-se observar a solução final da correção NLTE, em formato de curva de crescimento, para dois elementos químicos calculados para uma das estrelas da amostra deste trabalho.

Correções NLTE para o Ti não puderam ser aplicadas, pois como observado por Bergemann et al. (2018), modelos NLTE para o Ti não fornecem soluções consistentes para modelos hidrostáticos unidimensionais (Bergemann, 2011). De qualquer forma, a fim de se testar as soluções para Ti, os modelos foram aplicados, gerando de fato correções não consistentes próximas de -0.4 dex, como pode-se observar na Figura 3.13. A média da correção NLTE para cada elemento é: Mg I: -0.01 dex; Si I: -0.02 dex; Ca I: 0.03 dex; Cr I: 0.06 dex; Fe I: 0.02 dex.

¹¹ <https://nlte.mpia.de/>

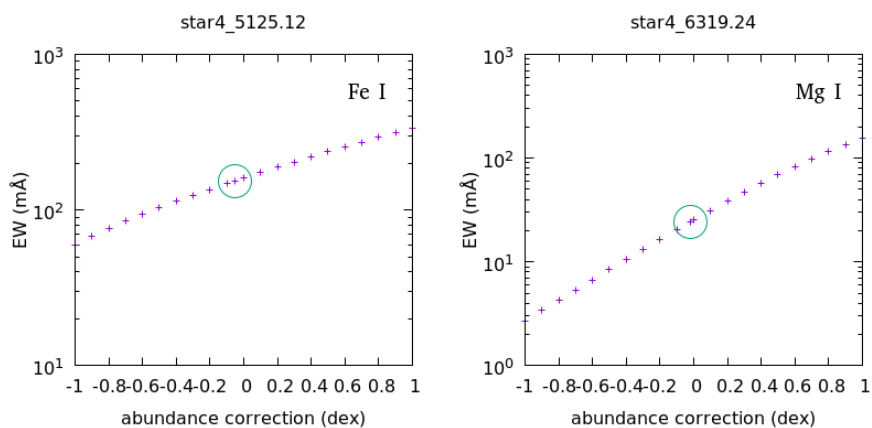


Figura 3.12: Curvas de crescimento apontando a correção NLTE de Fe I (linha 5125.12 Å) e Mg I (linha 6319.24 Å) para a estrela 01020943+4643251. Os círculos azuis correspondem ao intervalo de incerteza de 3σ . Figuras geradas a partir de <https://nlte.mpia.de/>.

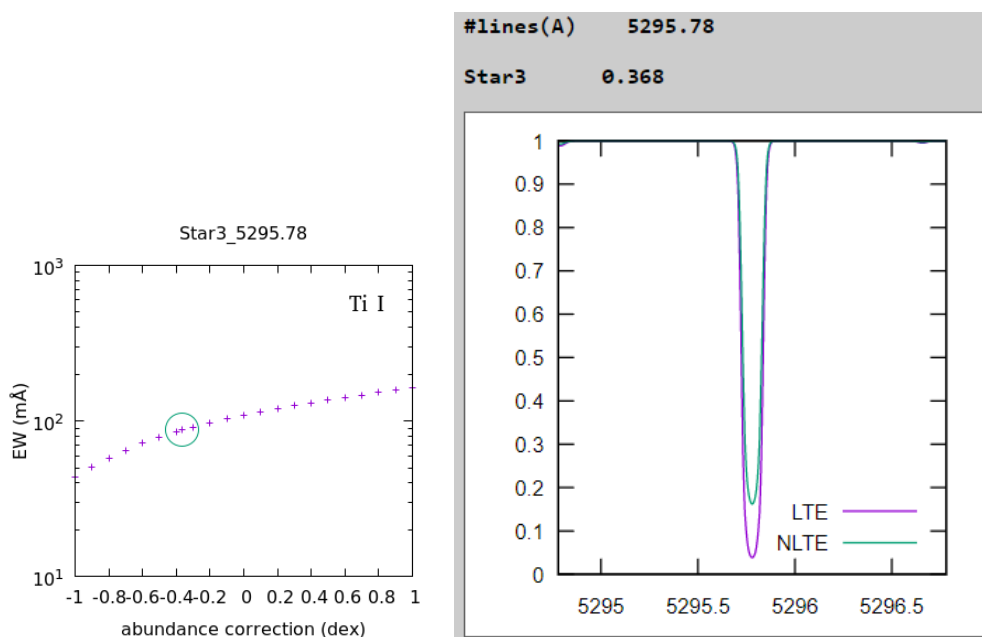


Figura 3.13: Correção NLTE de Ti I (linha 5295.78 Å) para a estrela 02025792+4628148. O painel esquerdo representa a curva de crescimento, onde o círculo azul corresponde ao intervalo de incerteza de 3σ e o painel direito apresenta o espectro sintético do formato da linha 5295.78 Å adotando-se LTE e NLTE. Figuras geradas a partir de <https://nlte.mpia.de/>.

3.7 Síntese Espectral

O método da síntese espectral, diferentemente do método das larguras equivalentes, utiliza espectros sintéticos para reproduzir os espectros teóricos, obtendo assim a abundância de um determinado elemento. A partir do software MOOG, utilizou-se o método de síntese espectral para os elementos de captura de nêutrons Ba (linhas 5853, 6141 e 6496 Å) e Eu (linha 6645 Å), devido à estrutura hiperfina e da contribuição de diferentes isótopos para esses elementos.

Através da ferramenta `synth` do software MOOG, é possível gerar um espectro sintético utilizando-se linhas atômicas e moleculares, obtidas através do código `linemake`¹², e um modelo de atmosfera como parâmetros de entrada. Um exemplo do método para o cálculo de Ba II de uma das estrelas da amostra deste trabalho está apresentado na Figura 3.14. Nota-se que, além do ajuste da linha do elemento químico em questão, pode ser necessário ajustar a linha que se apresenta próxima e/ou sobreposta, para se certificar que as abundâncias estejam bem estimadas. Os resultados para as abundâncias calculadas pelos métodos de largura equivalente e síntese espectral assim como os valores das abundâncias corrigidos pela aplicação da hipótese de NLTE para cada elemento são apresentados na Tabela 3.7.

¹² <https://github.com/vmplacco/linemake>

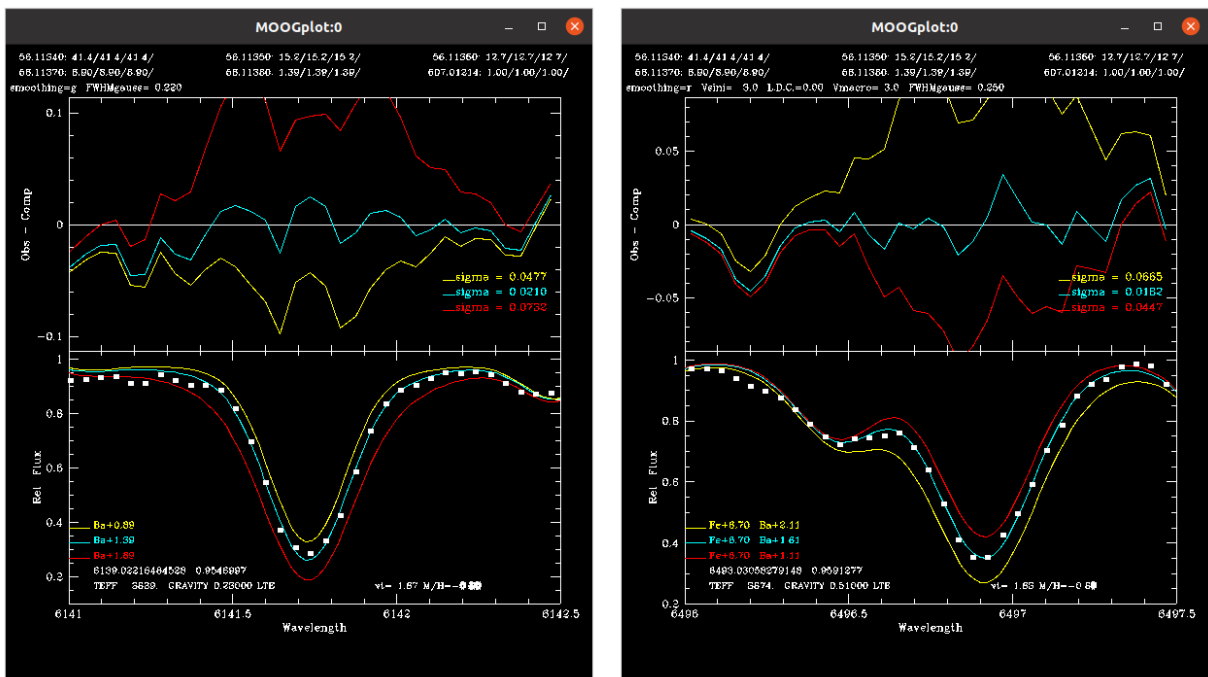


Figura 3.14: Exemplos do método de síntese espectral para o cálculo de Bário pela linha 6141 Å da estrela 00194223+4559569 (esquerda) e pela linha 6496 Å da estrela 02485891+4312154 (direita).

2MASS ID	[Fe/H] _{LTE}	[Fe/H] _{NLTE}	[Ni/H] _{LTE}	[Ni/H] _{NLTE}	[Mg/H] _{LTE}	[Mg/H] _{NLTE}	[Al/H] _{LTE}	[Si/H] _{LTE}	[Si/H] _{NLTE}	[Ca/H] _{LTE}	[Ca/H] _{NLTE}	[Ti/H] _{LTE}	[Cr/H] _{LTE}	[Cr/H] _{NLTE}	[Cr/H] _{NLTE}	[Ni/H] _{LTE}	[Ba/H] _{LTE}	[Ba/H] _{NLTE}	[Ba/H] _{NLTE}
23495808+3445569	-0.56±0.08	-0.55±0.08	-0.93±0.08	-0.93±0.08	-0.57±0.06	-0.57±0.06	-0.76±0.11	-0.48±0.09	-0.50±0.09	-0.63±0.16	-0.62±0.16	-0.63±0.16	-0.81±0.16	-0.79±0.16	-0.79±0.16	-0.12±0.08	-0.36±0.16	0.08	-0.44
00534976+4626089	-0.39±0.1	-0.38±0.1	-0.53±0.1	-0.47±0.08	-0.47±0.08	-0.32±0.05	-0.42±0.15	-0.44±0.15	-0.44±0.15	-0.55±0.16	-0.55±0.16	-0.51±0.16	-0.64±0.17	-0.58±0.17	-0.58±0.17	-0.06±0.13	-0.38±0.11	-0.12	-0.21
00594094+4614332	-0.74±0.05	-0.74±0.05	-0.55±0.04	-0.59±0.09	-0.56±0.09	-0.52±0.04	-0.73±0.06	-0.73±0.06	-0.67±0.1	-0.65±0.1	-0.65±0.1	-0.59±0.08	-0.74±0.08	-0.67±0.08	-0.67±0.08	-0.09±0.07	-0.6±0.21	-0.62	0.02
23535441+3449575	-0.66±0.09	-0.64±0.09	-0.78±0.21	-0.61±0.05	-0.62±0.05	-0.58±0.05	-0.58±0.11	-0.67±0.12	-0.68±0.11	-0.57±0.12	-0.55±0.12	-0.44±0.12	-0.69±0.11	-0.63±0.11	-0.63±0.11	-0.04±0.09	-0.37±0.18	-0.27	-0.1
00075751+3359414	-1.48±0.1	-1.48±0.1	-1.53±0.14	-1.19±0.14	-1.19±0.14	-1.35±0.23	-1.26±0.09	-1.26±0.09	-1.26±0.09	-1.22±0.2	-1.22±0.2	-1.22±0.2	-1.51±0.23	-1.51±0.23	-1.51±0.23	-0.14±0.11	-1.2±0.07	-0.82	-0.38
01020943+4643251	-1.34±0.07	-1.26±0.07	-1.45±0.08	-1.08±0.06	-1.08±0.06	-1.39±0.23	-1.08±0.1	-1.1±0.1	-1.03±0.07	-0.99±0.07	-0.99±0.07	-1.3±0.1	-1.51±0.16	-1.43±0.16	-1.43±0.16	-0.11±0.08	-1.1±0.07	-0.57	-0.53
02350813+4455263	-0.84±0.1	-0.8±0.1	-0.5±0.09	-0.7±0.07	-0.7±0.07	-0.56±0.05	-0.81±0.15	-0.83±0.15	-0.83±0.15	-0.78±0.16	-0.75±0.16	-0.65±0.16	-0.87±0.15	-0.8±0.15	-0.8±0.15	0±0.11	-0.69±0	-0.62	-0.07
02475442+4429269	-1.03±0.11	-1±0.11	-0.67±0.18	-0.86±0.08	-0.86±0.08	-0.88±0.37	-0.92±0.15	-0.94±0.15	-1±0.22	-1±0.22	-0.96±0.22	-0.95±0.22	-0.99±0.24	-0.91±0.24	-0.91±0.24	0.07±0.1	-1.07±0.02	-0.59	-0.48
23481637+3129372	-1.35±0.03	-1.35±0.03	-1.51±0.04	-1.14±0.14	-1.14±0.14	-1.14±0.14	-1.15±0.12	-1.15±0.12	-1.1±0.08	-1.1±0.08	-1.1±0.08	-1.33±0.08	-1.54±0.06	-1.54±0.06	-1.54±0.06	-0.11±0.06	-1.17±0.07	-0.57	-0.6
01151944+4713512	-0.87±0.06	-0.83±0.06	-0.7±0.06	-0.77±0.07	-0.77±0.07	-0.56±0.07	-0.77±0.12	-0.79±0.12	-0.87±0.11	-0.83±0.11	-0.83±0.11	-0.7±0.11	-0.9±0.08	-0.81±0.08	-0.81±0.08	0.02±0.08	-0.78±0.13	-0.62	-0.16
02463235+4314481	-0.97±0.05	-0.93±0.05	-0.99±0.06	-0.73±0.09	-0.73±0.09	-0.97±0.2	-0.75±0.1	-0.77±0.1	-0.79±0.11	-0.75±0.11	-0.75±0.11	-1±0.11	-1.01±0.09	-0.94±0.09	-0.94±0.09	-0.07±0.06	-0.75±0.13	-0.47	-0.28
02485891+4312154	-0.73±0.09	-0.71±0.09	-0.56±0.13	-0.63±0.1	-0.63±0.1	-0.63±0.1	-0.43±0.1	-0.67±0.15	-0.7±0.15	-0.81±0.12	-0.84±0.12	-0.78±0.12	-0.89±0.11	-0.82±0.11	-0.82±0.11	-0.08±0.11	-0.51±0.15	-0.57	0.06
02510349+4342045	-0.78±0.07	-0.75±0.07	-0.62±0.07	-0.7±0.06	-0.7±0.06	-0.51±0.09	-0.67±0.14	-0.69±0.14	-0.84±0.12	-0.84±0.12	-0.84±0.12	-0.76±0.12	-0.89±0.11	-0.89±0.11	-0.89±0.11	0.04±0.08	-0.59±0.15	-0.48	-0.11
22344771+3545006	-1.25±0.28	-1.25±0.28	-1.2±0.31	-1.02±0.09	-1.02±0.09	-1.02±0.09	-1.35±0.35	-1.11±0.24	-1.11±0.24	-1.07±0.27	-1.07±0.27	-1.31±0.43	-1.51±0.32	-1.51±0.32	-1.51±0.32	-0.11±0.3			
22333278+3605357	-0.71±0.27	-0.69±0.27	-0.79±0.53	-0.7±0.13	-0.7±0.13	-0.74±0.36	-0.61±0.48	-0.62±0.48	-0.64±0.3	-0.64±0.3	-0.61±0.3	-0.73±0.39	-0.88±0.45	-0.82±0.45	-0.82±0.45	-0.09±0.21	-0.94±0.07	-0.52	-0.42
23534927+3659173	-1.06±0.12	-1.01±0.12	-0.57±0.15	-0.8±0.09	-0.8±0.09	-0.82±0.09	-0.71±0.16	-0.86±0.16	-0.88±0.16	-0.84±0.16	-0.84±0.16	-0.79±0.16	-0.92±0.21	-0.96±0.17	-0.96±0.17	-0.08±0.25	-0.94±0.07	-0.52	-0.42
00523040+3933030	-0.7±0.15	-0.68±0.15	-0.49±0.24	-0.7±0.24	-0.7±0.24	-0.49±0.07	-0.68±0.24	-0.7±0.24	-0.7±0.24	-0.77±0.19	-0.77±0.19	-0.72±0.19	-0.84±0.36	-0.75±0.19	-0.67±0.19	-0.02±0.14	-0.42±0.1	-0.5	0.08
02165554+3921295	-0.84±0.13	-0.76±0.13	-0.5±0.15	-0.61±0.13	-0.61±0.13	-0.63±0.13	-0.6±0.18	-0.74±0.17	-0.77±0.17	-0.87±0.19	-0.83±0.19	-0.83±0.19	-0.83±0.24	-0.85±0.18	-0.75±0.18	0.01±0.13	-0.67±0.13	-0.62	-0.05
02025792+4628148	-0.82±0.14	-0.78±0.14	-0.76±0.22	-0.76±0.11	-0.76±0.11	-0.78±0.11	-0.69±0.09	-0.78±0.16	-0.81±0.16	-0.85±0.19	-0.85±0.19	-0.65±0.24	-0.87±0.2	-0.77±0.2	-0.77±0.2	0.04±0.14	-0.59±0.07	-0.64	0.05
01180060+3014151	-0.91±0.11	-0.87±0.11	-0.63±0.14	-0.77±0.07	-0.77±0.07	-0.78±0.07	-0.71±0.11	-0.79±0.14	-0.81±0.14	-0.83±0.17	-0.83±0.17	-0.9±0.17	-0.9±0.17	-0.96±0.15	-0.88±0.15	0.02±0.11	-0.76±0.06	-0.72	-0.05
02273411+2515043	-0.74±0.13	-0.72±0.13	-0.58±0.18	-0.74±0.12	-0.74±0.12	-0.74±0.12	-0.63±0.14	-0.69±0.15	-0.7±0.15	-0.68±0.13	-0.65±0.13	-0.72±0.13	-0.86±0.11	-0.8±0.11	-0.8±0.11	-0.05±0.12	-0.49±0.02	-0.35	-0.14
00194223+4559569	-0.8±0.1	-0.8±0.1	-0.74±0.18	-0.64±0.08	-0.64±0.08	-0.64±0.08	-0.72±0.08	-0.67±0.11	-0.67±0.11	-0.71±0.15	-0.71±0.15	-0.84±0.17	-0.94±0.16	-0.94±0.16	-0.94±0.16	-0.03±0.12	-0.71±0.09	-0.62	-0.09
01282462+4413349	-0.79±0.09	-0.76±0.09	-0.68±0.16	-0.61±0.08	-0.61±0.08	-0.62±0.08	-0.62±0.05	-0.79±0.15	-0.81±0.15	-0.76±0.17	-0.73±0.17	-0.64±0.18	-0.87±0.18	-0.8±0.18	-0.8±0.18	-0.04±0.1	-0.69±0.04	-0.37	-0.32
01390736+3739126	-0.77±0.1	-0.74±0.1	-0.48±0.14	-0.62±0.09	-0.62±0.09	-0.64±0.09	-0.51±0.19	-0.77±0.14	-0.79±0.14	-0.7±0.21	-0.66±0.21	-0.66±0.21	-0.56±0.2	-0.66±0.17	-0.58±0.17	0.01±0.11	-0.62±0.04	-0.62	0
01564607+4442296	-0.78±0.15	-0.74±0.15	-0.57±0.24	-0.72±0.1	-0.72±0.1	-0.73±0.1	-0.48±0.12	-0.69±0.28	-0.72±0.28	-0.66±0.21	-0.62±0.21	-0.62±0.21	-0.66±0.26	-0.68±0.23	-0.59±0.23	-0.01±0.15	-0.57±0.09	-0.62	-0.05
01151063+4918038	-1.1±0.15	-1.1±0.15	-0.71±0.22	-1.11±0.18	-1.11±0.18	-0.8±0.29	-1.08±0.21	-1.08±0.21	-1.18±0.23	-1.18±0.23	-1.18±0.23	-0.85±0.27	-0.9±0.22	-0.9±0.22	-0.9±0.22	-0.01±0.15	-0.92±0.08	-0.87	-0.05
00313809+4416285	-0.85±0.13	-0.82±0.13	-0.7±0.17	-0.67±0.16	-0.67±0.16	-0.65±0.35	-0.84±0.16	-0.86±0.16	-0.86±0.16	-0.73±0.14	-0.69±0.14	-0.69±0.14	-0.71±0.16	-0.58±0.13	-0.52±0.13	0±0.13	-0.55±0.08	-0.77	-0.31
02143103+2608327	-0.94±0.08	-0.91±0.08	-0.56±0.2	-0.79±0.17	-0.79±0.17	-0.73±0.07	-0.85±0.11	-0.87±0.11	-0.9±0.14	-0.9±0.14	-0.89±0.14	-0.89±0.14	-1.05±0.17	-0.99±0.17	-0.99±0.17	-0.04±0.09	-1.08±0.16	-0.77	-0.31
02343917+4217408	-0.82±0.13	-0.78±0.13	-0.61±0.13	-0.62±0.13	-0.62±0.13	-0.72±0.1	-0.74±0.14	-0.76±0.14	-0.82±0.12	-0.82±0.12	-0.78±0.12	-0.66±0.12	-0.86±0.15	-0.86±0.14	-0.78±0.14	0.01±0.13	-0.58±0.14	-0.53	-0.05
02082272+4512126	-0.87±0.11	-0.83±0.11	-0.62±0.09	-0.72±0.08	-0.72±0.08	-0.73±0.08	-0.65±0.08	-0.77±0.13	-0.79±0.13	-0.83±0.15	-0.79±0.15	-0.79±0.15	-0.82±0.18	-0.84±0.18	-0.84±0.18	-0.08±0.11	-0.58±0.11	-0.68	0.11
02184143+4612011	-1.27±0.18	-1.27±0.18	-1.16±0.18	-1.19±0.55	-1.19±0.55	-1.19±0.55	-1.14±0.33	-1.25±0.11	-1.25±0.11	-1.21±0.3	-1.21±0.3	-1.21±0.3	-1.05±0.33	-1.44±0.19	-1.44±0.19	-0.02±0.15			

3.8 Distâncias e Parâmetros Orbitais

O primeiro passo para determinação dos parâmetros orbitais de estrelas é obter suas respectivas distâncias. Algumas grandezas são necessárias para este cálculo e foram previamente derivadas para a amostra deste trabalho. São elas: parâmetros atmosféricos (T_{eff} , $\log g$ e $[Fe/H]$) e velocidades radiais, e dados que foram obtidos do GAIA DR3 como magnitudes, movimentos próprios e paralaxes.

As distâncias heliocêntricas espectrofotométricas foram estimadas com o código **StarHorse** (Queiroz et al., 2018, 2020). Tal software é utilizado para estimar a distância, idade, extinção e massa de estrelas usando dados fotométricos e espectroscópicos. **StarHorse** é uma poderosa ferramenta para o mapeamento de grandes amostras estelares em três dimensões, se beneficiando de dados advindos do GAIA para calcular funções de distribuições estelares no espaço de fases com grande precisão, conseguindo até mesmo calcular distâncias de objetos que sejam pouco brilhantes ou muito distantes para serem medidos diretamente.

O **StarHorse** foi escolhido por se basear em um método bayesiano, que leva em conta a incerteza dos dados, além de fornecer resultados bem acurados para objetos distantes, por meio de melhores calibrações dos dados provenientes do GAIA (Queiroz et al., 2018; Lindegren et al., 2021). As distâncias calculadas são então comparadas com predições de modelos de evolução estelar, a partir de uma aproximação estatística (mais informações em Burnett e Binney 2010; Burnett et al. 2011; Binney et al. 2014; Santiago et al. 2016). O código é configurado a partir de um arquivo de parâmetros, onde o usuário pode escolher os modelos estelares, dados fotométricos e espectroscópicos e extinção.

Utilizou-se a biblioteca em python **AGAMA** (Vasiliev, 2019) para o cálculo das órbitas. **AGAMA** é um código utilizado para dinâmica gravitacional, projetado para simular e analisar vários sistemas astrofísicos, como galáxias, aglomerados estelares e até halos de matéria escura. O programa faz uso da análise de N-corpos, método largamente utilizado em astrofísica, para simular a dinâmica de um grande número de partículas interagentes. Apresenta a capacidade de modelar sistemas tanto gasosos quanto não-colisionais, além de incluir uma gama de algoritmos avançados para simular sistemas complexos de uma forma precisa e eficiente.

O programa necessita de parâmetros básicos para seu funcionamento. Neste trabalho, utilizou-se o modelo de potencial Galáctico descrito em McMillan (2017). Adotou-

se valores para a distância solar Galactocêntrica de $R_{\odot} = 8.2$ kpc (Bland-Hawthorn e Gerhard, 2016a), a velocidade circular local de $v_c = 232.8$ km s⁻¹ (McMillan, 2017) e o movimento solar com respeito ao sistema local de repouso $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11.10, 12.24, 7.25)$ km s⁻¹ (Schönrich et al., 2010).

Os parâmetros orbitais foram obtidos para as 31 estrelas da amostra deste trabalho, sendo que o cálculo das órbitas foi feito para 5 Ganos. Para cada estrela, realizou-se 1000 iterações de Monte Carlo da órbita, de acordo com as distribuições gaussianas de suas incertezas em distância, movimento próprio e velocidade radial.

Outros conjuntos de parâmetros fundamentais Galácticos foram testados, como por exemplo, os recomendados por Bovy (2020). Entretanto, concluiu-se que os principais resultados obtidos não dependem crucialmente dessas escolhas. Como mencionado, utilizando-se os parâmetros Galácticos fundamentais de Bovy (2020), a excentricidade obtida para a amostra deste trabalho apresenta uma mudança em média de apenas 0.015 e $L_Z \sim 100$ km s⁻¹. Tais resultados não alteram a classificação cinemática obtida para as estrelas da amostra.

No próximo capítulo, explana-se sobre a análise dinâmica e discute-se os resultados desta pesquisa em comparação com outras populações estelares da Galáxia.

Análise Dinâmica

Neste capítulo apresenta-se o estudo cinemático dos dados considerados neste trabalho. A análise dos parâmetros orbitais e a seleção em excentricidade utilizada para separar a amostra estão descritas nas seções a seguir.

4.1 Parâmetros Orbitais

O estudo da cinemática de estrelas é uma das ferramentas essenciais da Arqueologia Galáctica. Por exemplo, galáxias anãs que sofreram dissolução quando interagiram com o potencial gravitacional da Via Láctea ainda podem ter seu progenitor identificado através dos parâmetros orbitais de uma amostra de estrelas. Para melhor compreensão da natureza das estrelas candidatas ao TriAnd analisadas neste trabalho foram derivados os parâmetros orbitais das 31 estrelas da amostra.

Uma primeira análise possível para diferenciar estrelas *in situ* de *ex situ* é comparar suas excentricidades e inclinações com outras populações galácticas. Estrelas pertencentes ao disco da Galáxia tendem a ocupar planos com menores excentricidades e inclinações (Freeman e Bland-Hawthorn, 2002; van der Kruit e Freeman, 2011; Bland-Hawthorn e Gerhard, 2016b), diferente de estrelas acretadas que podem apresentar altos valores desses dois parâmetros (Koppelman et al., 2018; Mackereth et al., 2019; Naidu et al., 2020; Limberg et al., 2021; Myeong et al., 2022). Na Figura 4.1 pode-se observar a inclinação e excentricidade das estrelas da amostra deste trabalho, onde as estrelas de campo foram obtidas da base de dados do APOGEE DR17. No painel (a) as estrelas candidatas ao TriAnd, em azul, mostram uma clara distinção entre duas subamostras, que podem ser vistas separadas no painel (b) através de um corte em $e = 0.4$, onde as estrelas com $e > 0.4$ são

representadas em vermelho. A interpretação disto é que as estrelas de menor excentricidade mostram compatibilidade com estrelas do disco, enquanto as de maior excentricidade são mais compatíveis com estrelas acretadas.

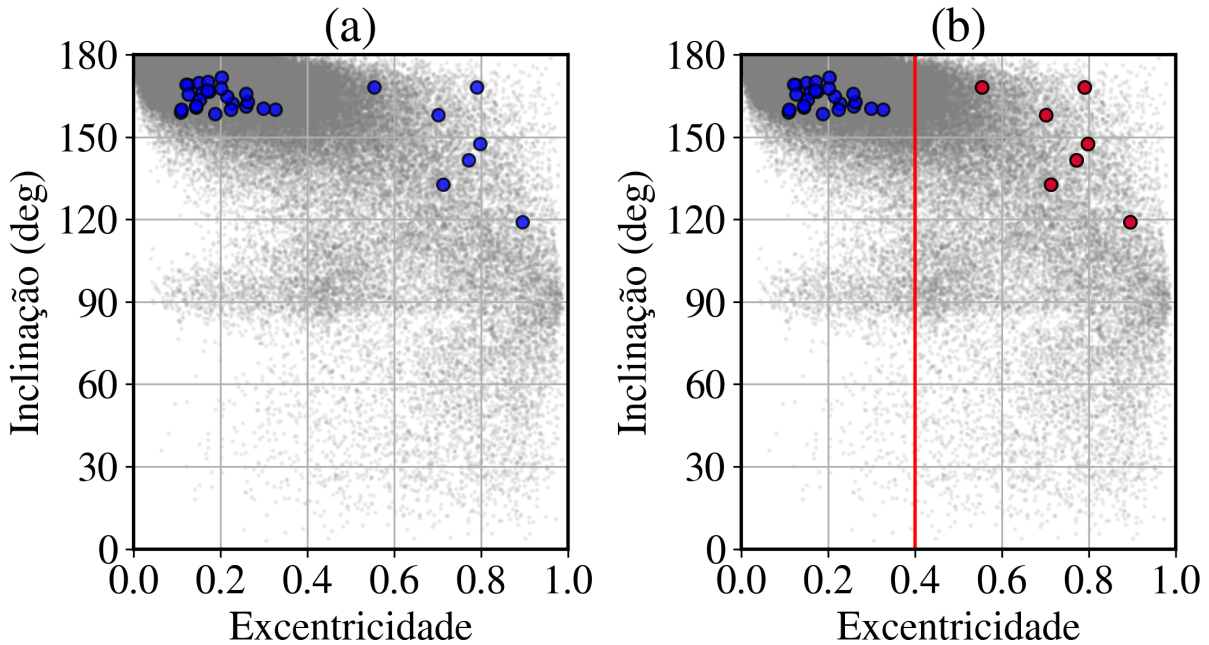


Figura 4.1: Gráfico de Excentricidade vs. Inclinação, demonstrando a seleção em excentricidade para a amostra deste trabalho: em (a) todas as estrelas utilizadas neste trabalho estão representados em azul; em (b) o critério de excentricidade aplicado está simbolizado por uma linha vermelha em $e = 0.4$, enquanto os círculos azuis representam a estrelas classificadas com uma origem *in situ* e os círculos vermelhos representam estrelas classificadas com uma possível origem acretada. Nos painéis (a) e (b) a amostra de estrelas de campo do APOGEE DR17 está representada em cinza para comparação, excluindo-se aglomerados globulares e estrelas de galáxias anãs. Figura adaptada de [Abuchaim et al. \(2023\)](#).

Outra forma de obter informações utilizando a cinemática é comparar as órbitas de estrelas com outras populações galácticas. Na Figura 4.2 podem ser observados exemplos de órbitas das estrelas da amostra deste trabalho, em comparação com a seleção restrita do disco externo do APOGEE DR17 (mencionada na Seção 2.1.2). Nos painéis (a) e (b) são apresentadas projeções (X_{GC} vs. Y_{GC}) com vetores representando suas velocidades nas direções cartesianas Galactocêntricas X , Y e Z . As estrelas contidas no painel (a), representadas em azul, apresentam uma co-rotação com o disco, característica de estrelas com origem *in situ*. Entretanto, as estrelas observadas no painel (b), em vermelho, apresentam órbitas distribuídas aleatoriamente, característica encontrada em estrelas com origem *ex situ*.

Os parâmetros orbitais calculados para todas as estrelas deste trabalho, assim como

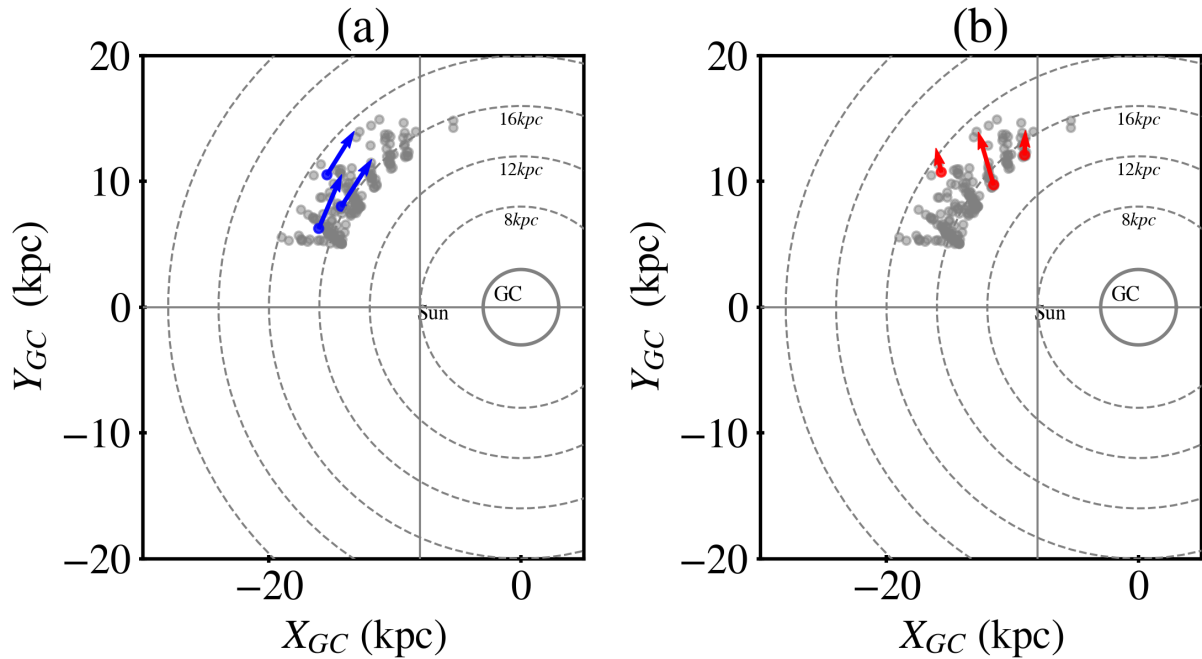


Figura 4.2: Projeções (X_{GC}, Y_{GC}) com vetores representando suas velocidades nas direções cartesianas Galactocêntricas X , Y e Z : em (a) 3 estrelas, em azul, que apresentam uma co-rotação com o disco; em (b) 3 estrelas, em vermelho, que apresentam órbitas distribuídas aleatoriamente. A amostra de estrelas de campo do APOGEE DR17 está representada em cinza para comparação, através de uma seleção restrita do disco externo ($5 < Y_{GC}/\text{kpc} < 15$, $|Z|_{GC} < 5$ kpc e $R_{GC} > 15$ kpc). Figura adaptada de [Abuchaim et al. \(2023\)](#).

suas projeções espaciais, estão apresentados na Figura 4.3. O painel (a) apresenta a excentricidade orbital vs. inclinação¹. Note-se que a maioria das estrelas da amostra apresenta baixa excentricidade, característica do disco Galáctico ([Freeman e Bland-Hawthorn, 2002](#); [van der Kruit e Freeman, 2011](#); [Bland-Hawthorn e Gerhard, 2016b](#)). Essas estrelas foram classificadas como representantes de TriAnd e serão representadas em azul ao longo deste trabalho. Também foram incluídas, em cinza, estrelas do banco de dados do APOGEE DR17 para comparação.

O corte em excentricidade ($e > 0.4$) mencionado foi expandido para os outros espaços orbitais estudados na amostra deste trabalho, evidenciando uma distinção nas estrelas analisadas. O painel (a) da Figura 4.3 mostra que tal seleção classificou 23% da amostra como uma possível contaminação de estrelas *ex situ* na mesma distância e localização de TriAnd. Estrelas pertencentes a essa contaminação serão representadas em vermelho ao longo deste trabalho. Na Seção 5.1, será discutida que essa provável população contaminante do halo

¹ inclinação = $\arccos(L_z/L)$, onde L_z é a componente z do momento angular e L é o momento angular total

também apresenta perfis de abundâncias químicas típicas de populações do halo (Nissen e Schuster, 2010, 2011; Hayes et al., 2018).

O painel (b) da Figura 4.3 apresenta energia orbital total (E) vs. componente z do momento angular (L_z). A partir da seleção em excentricidade, é possível explorar se as duas subamostras de estrelas, *in situ* e acretadas, repetem tais características em outros espaços de parâmetros. Neste painel, é reforçada a hipótese de que a população de alta excentricidade é possivelmente acretada, visto que as estrelas apresentam L_z menor quando comparado às estrelas de TriAnd/disco (círculos azuis/cinzas) em uma mesma E , comportamento típico de populações acretadas (e.g., Koppelman et al., 2018; Naidu et al., 2020; Yuan et al., 2020; Limberg et al., 2021). Por outro lado, candidatas ao TriAnd apresentam tanto E quanto L_z sobrepostas com a região da figura que é ocupada pelo disco externo, indicando uma origem *in situ* em comum.

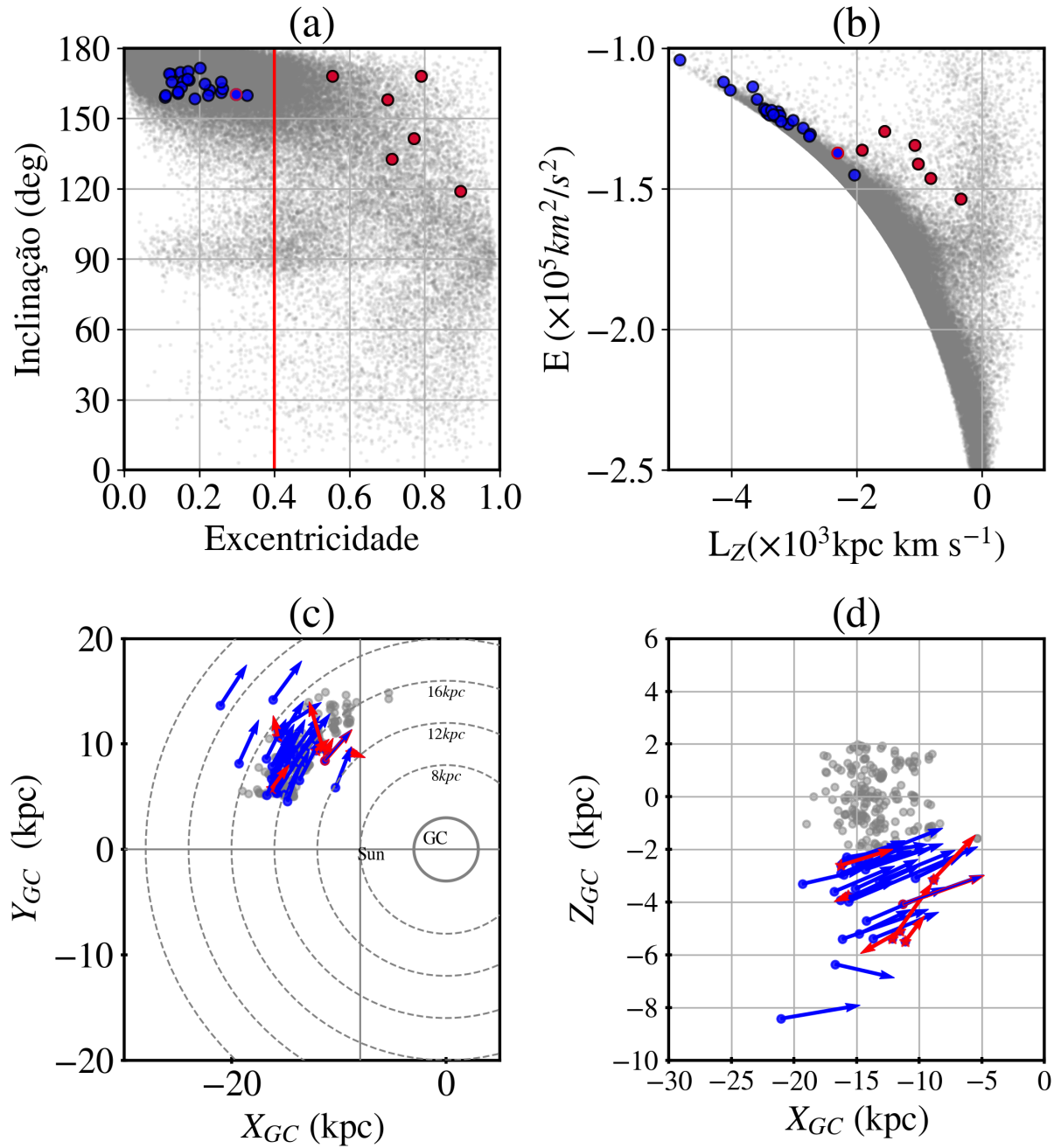


Figura 4.3: Apresenta-se em (a) Excentricidade vs. Inclinação; em (b) (E, L_z) ; em (c) e (d) projeções (X_{GC}, Y_{GC}) e (X_{GC}, Z_{GC}) , respectivamente, com vetores representando suas velocidades nas direções cartesianas Galactocêntricas X , Y e Z . Os parâmetros orbitais de estrelas candidatas ao TriAnd utilizadas neste trabalho estão representados em azul. Os círculos vermelhos representam estrelas classificadas com uma possível origem acretada. O critério de excentricidade aplicado está simbolizado por uma linha vermelha no painel (a). A amostra de estrelas de campo do APOGEE DR17 está representada em cinza para comparação, nos painéis (a) e (b): a amostra completa excluindo-se aglomerados globulares e estrelas de galáxias anãs; em (c) e (d) uma seleção restrita do disco externo ($5 < Y_{GC}/\text{kpc} < 15$, $|Z|_{GC} < 5$ kpc e $R_{GC} > 15$ kpc). Figura extraída de [Abuchaim et al. \(2023\)](#).

Os painéis (c) e (d) da Figura 4.3 apresentam as projeções X_{GC} vs. Y_{GC} e X_{GC} vs.

Z_{GC} , respectivamente, onde os pontos cinza representam uma população do disco externo da Galáxia, cuja seleção foi descrita na Seção 2.1.2. Pode-se observar que os vetores de velocidades da maioria da amostra, em azul, apresentam uma co-rotação com o disco Galáctico. Entretanto, as estrelas possivelmente acretadas da amostra, representadas pelos vetores em vermelho, mostram-se distribuídos aleatoriamente, sem seguir a direção do disco Galáctico, um comportamento esperado para populações *ex situ*.

Conclui-se, a partir da análise cinemática, que a maioria das estrelas da amostra apresenta características dinâmicas indistinguíveis das estrelas do disco fino, indicando uma origem *in situ* para a sobredensidade, que já havia sido sugerida na literatura (Bergemann et al., 2018; Hayes et al., 2018). Também foi possível detectar uma contaminação na amostra deste trabalho através de uma seleção cinemática em excentricidade ($e > 0.4$). Como resultado, verifica-se que algumas estrelas apresentam propriedades de estrelas acretadas, representando uma provável contaminação de estrelas com origem extragaláctica na mesma distância e localização de TriAnd.

A seleção cinemática citada foi explorada tanto no espaço de ações e velocidades, como também nos espaços de abundâncias químicas, descritas no capítulo a seguir.

Análise Química

Neste capítulo apresenta-se a discussão envolvida na análise química da amostra deste trabalho. O perfil químico das estrelas candidatas ao TriAnd foi analisado em comparação com outras populações estelares.

5.1 Abundâncias Químicas

As abundâncias químicas elementais, aliadas ao seu estudo dinâmico para caracterização de uma população estelar, constituem ferramentas essenciais para o campo da Arqueologia Galáctica. Estrelas formadas em um mesmo ambiente costumam compartilhar dos mesmos elementos químicos. Com o intuito de melhor compreender a história de formação de TriAnd, as abundâncias químicas de onze elementos foram analisadas e comparadas com estrelas de outras populações estelares.

5.1.1 Função de Distribuição de Metalicidade

O primeiro passo para realizar uma análise química da população de TriAnd é estudar a função de distribuição de metalicidade (MDF) de suas estrelas. Para atingir esse resultado, foi comparada a razão $[Fe/H]$ derivada desta pesquisa com outras análises espectroscópicas recentes. Apresentada na Figura 5.1 está a distribuição de metalicidades de estrelas candidatas ao TriAnd deste trabalho, de [Bergemann et al. \(2018\)](#), de [Hayes et al. \(2018\)](#) e, para fins de comparação, a seleção do disco externo do APOGEE.

As estrelas classificadas como TriAnd na amostra desta pesquisa apresentam uma metalicidade média $[Fe/H] \sim -0.8$ dex, valor similar ao encontrado pelas amostras de [Hayes et al. \(2018\)](#) e [Sales Silva et al. \(2019\)](#), mas mais pobre em metal que a amostra de [Ber-](#)

gemann et al. (2018). Esta metalicidade média indica que, no geral, as candidatas ao TriAnd estudadas nesta pesquisa são mais pobres em metal que a seleção do disco externo do APOGEE. Provavelmente, a população de TriAnd foi dinamicamente aquecida antes de enriquecer, mantendo uma metalicidade mais baixa. Neste cenário, a população estelar mais jovem não seria suficientemente aquecida a ponto de atingir valores de Z_{GC} similares a TriAnd.

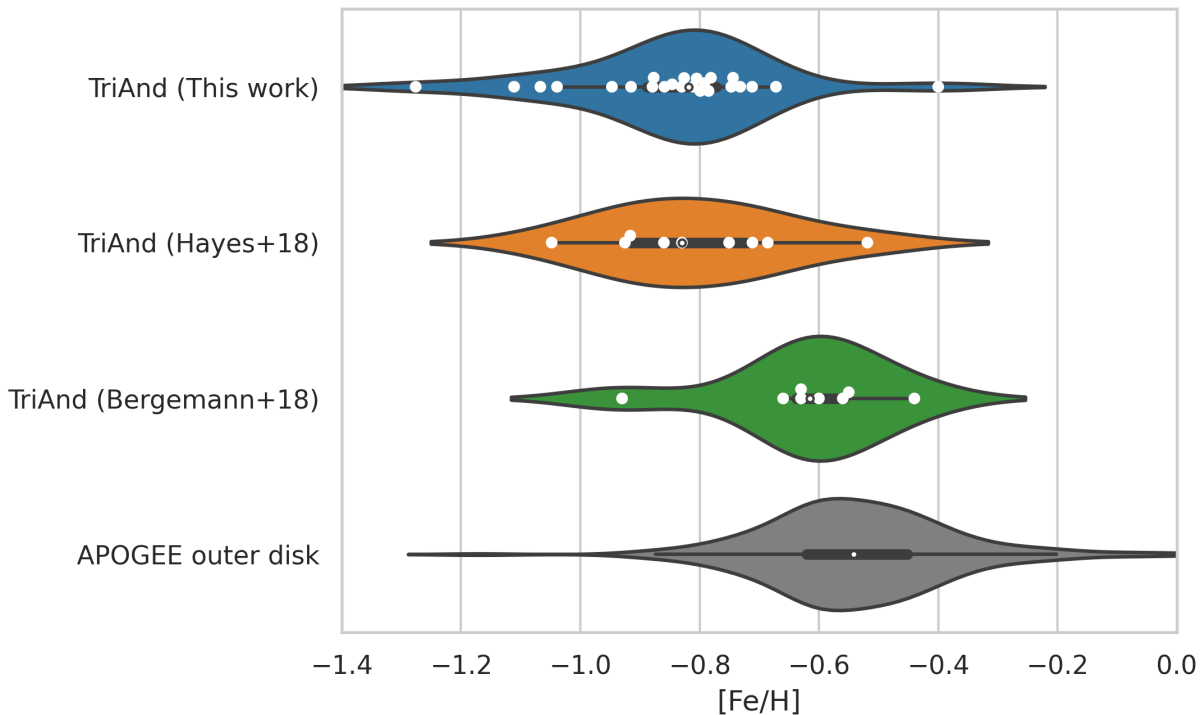


Figura 5.1: Distribuição de metalicidades para diferentes trabalhos espectroscópicos que utilizaram estrelas candidatas ao TriAnd: este trabalho, Bergemann et al. (2018) e Hayes et al. (2018). O gráfico em formato violino apresenta o formato da distribuição de cada amostra, os pontos brancos são os respectivos valores de metalicidade, a barra mais grossa é o intervalo interquartil e a barra mais fina representa o intervalo de 95% de confiança. Figura extraída de Abuchaim et al. (2023).

Também é possível observar da Figura 5.1 que a amostra de Bergemann et al. (2018) apresenta uma metalicidade média maior quando comparada com outras amostras de TriAnd, com uma diferença de ~ 0.2 dex tanto da amostra deste trabalho quando de Hayes et al. (2018). Esta diferença é provavelmente devido ao método utilizado por Bergemann et al. (2018) para estimar os parâmetros atmosféricos para sua amostra, combinando o método de fluxo infravermelho com dados fotométricos do AAVSO Photometric All-Sky Survey (APASS) e 2MASS. O uso de fotometria combinada com espectroscopia pode levar a um valor derivado final mais alto para $[\text{Fe}/\text{H}]$, quando comparado a uma análise puramente

espectroscópica. A utilização de modelos NLTE por Bergemann et al. (2018) também é outra explicação possível para tais diferenças observadas, já que tanto este trabalho quanto Hayes et al. (2018) se utilizam de modelos LTE.

5.1.2 Elementos α

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam as abundâncias de elementos químicos derivadas para as estrelas deste trabalho, assim como comparações com outras populações da Galáxia e outros trabalhos que também estudaram TriAnd. A amostra de estrelas candidatas ao TriAnd está representada por círculos azuis, enquanto a seleção cinemática previamente citada está denotada por círculos vermelhos; as amostras referentes aos trabalhos de Hayes et al. (2018) e Bergemann et al. (2018) estão representadas por quadrados laranja e triângulos verdes, respectivamente. As seleções da base de dados do APOGEE (ver Seção 2.1.2) estão representadas como estrelas de campo, o disco externo em cinza e contornos do GSE em amarelo. Vale notar que as abundâncias encontradas no APOGEE DR17 apresentam correções NLTE para Mg e Ca, portanto somente esses elementos estão representados com sua devida correção NLTE nas figuras mencionadas (Figuras 5.2 e 5.3).

Elementos α (Mg, Si, Ca e Ti) são majoritariamente produzidos por eventos explosivos, como supernovas Tipo II (SNII), em estrelas de alta massa (Woosley e Weaver, 1995). A escala de tempo desses eventos é da ordem de milhões de anos, o que é um curto período em comparação a outros eventos de enriquecimento do meio interestelar. Supernovas do Tipo Ia (SNIa), por exemplo, formadas por fusões de anãs brancas binárias, ocorrem em uma escala de tempo de bilhões de anos, sintetizando majoritariamente elementos do pico do Ferro (Cr, Ni e Fe; Iwamoto et al., 1999). As razões $[X/Fe]$ para os elementos α de uma população estelar são muito importantes para sua caracterização. Essas razões podem fornecer informações sobre o número relativo entre estrelas de alta para baixa massa e as contribuições relativas entre supernovas do tipo II e do tipo Ia no meio interestelar onde essas estrelas se formaram (Matteucci e Brocato, 1990).

Espera-se que os elementos α encontrados em populações *in situ* não apresentem uma alta razão $[\alpha/Fe]$. Isso ocorre devido ao fato de que o disco mantém sua formação estelar, fazendo com que estrelas de baixa massa possam evoluir e povoar o meio interestelar com elementos do pico do Ferro, diminuindo a razão $[\alpha/Fe]$ a cada geração de estrelas. A partir da Figura 5.2, pode-se observar que a maior parte da amostra deste trabalho

acompanha essa tendência. A razão $[\alpha/\text{Fe}]$ observada é similar à seleção do disco externo e às amostras referentes aos trabalhos de [Hayes et al. \(2018\)](#) e [Bergemann et al. \(2018\)](#), mesmo apresentando uma metalicidade mais baixa e, por vezes, sobrepondo-se à zona de menor isodensidade da distribuição química do GSE.

Pode-se ver na Figura 5.2 que as estrelas dinamicamente classificadas como parte de TriAnd apresentam comportamento esperado para estrelas *in situ*. Mesmo apresentando uma metalicidade média um pouco mais baixa ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.8$) que por vezes se sobrepõe aos contornos do GSE, as razões $[\alpha/\text{Fe}]$ da população de TriAnd se comparam tanto à seleção do disco externo do APOGEE quanto às amostras do TriAnd de [Hayes et al. \(2018\)](#) e [Bergemann et al. \(2018\)](#).

Por outro lado, as estrelas dinamicamente classificadas com uma origem acretada, além de se encontrarem nas regiões de maior isodensidade dos contornos do GSE, apresentam uma alta razão $[\alpha/\text{Fe}]$ ($\gtrsim 0.2$ dex) quando comparadas à população do disco fino. Também é possível identificar um padrão de “joelho” na relação entre as razões $[\alpha/\text{Fe}]$ e $[\text{Fe}/\text{H}]$, como sugerido na literatura ([Sales Silva et al., 2020](#)).

Uma estrela em particular, também estudada por [Chou et al. \(2011\)](#), se destaca na amostra deste trabalho. Representada por um círculo azul com contorno vermelho nas Figuras 4.3, 5.2, 5.3 e 5.4, tal estrela não foi classificada com uma origem acretada através da excentricidade ($e > 0.4$), mas mesmo assim apresenta um padrão químico de acreção. Tais características químicas da amostra de [Chou et al. \(2011\)](#) podem ter levado os autores a sugerirem uma origem *ex situ* para TriAnd. Pela localização desta estrela em $R_{\text{GC}} = 14$ kpc e seu padrão químico, é possível que pertença à população do disco espesso/*splashed*.

5.1.3 Elementos odd-Z e pico do Ferro

Os elementos odd-Z (Al e Na) e pico do Ferro (Cr e Ni) estão representados na Figura 5.3. Elementos odd-Z são majoritariamente sintetizados pela evolução de estrelas massivas, assim como elementos α , porém por processos de nucleossíntese distintos, normalmente presentes em fases da evolução estelar de estrelas RGB e AGB ([Herwig, 2005](#); [Ventura et al., 2011](#); [Depalo e LUNA Collaboration, 2016](#)). Por conta desses diferentes processos de nucleossíntese, uma clara diferença entre as abundâncias dos elementos odd-Z e α podem ser observadas na Via Láctea ([Zasowski et al., 2019](#)).

Os padrões de abundâncias de $[\text{Al}/\text{Fe}]$ e $[\text{Na}/\text{Fe}]$ podem ser observados nos painéis

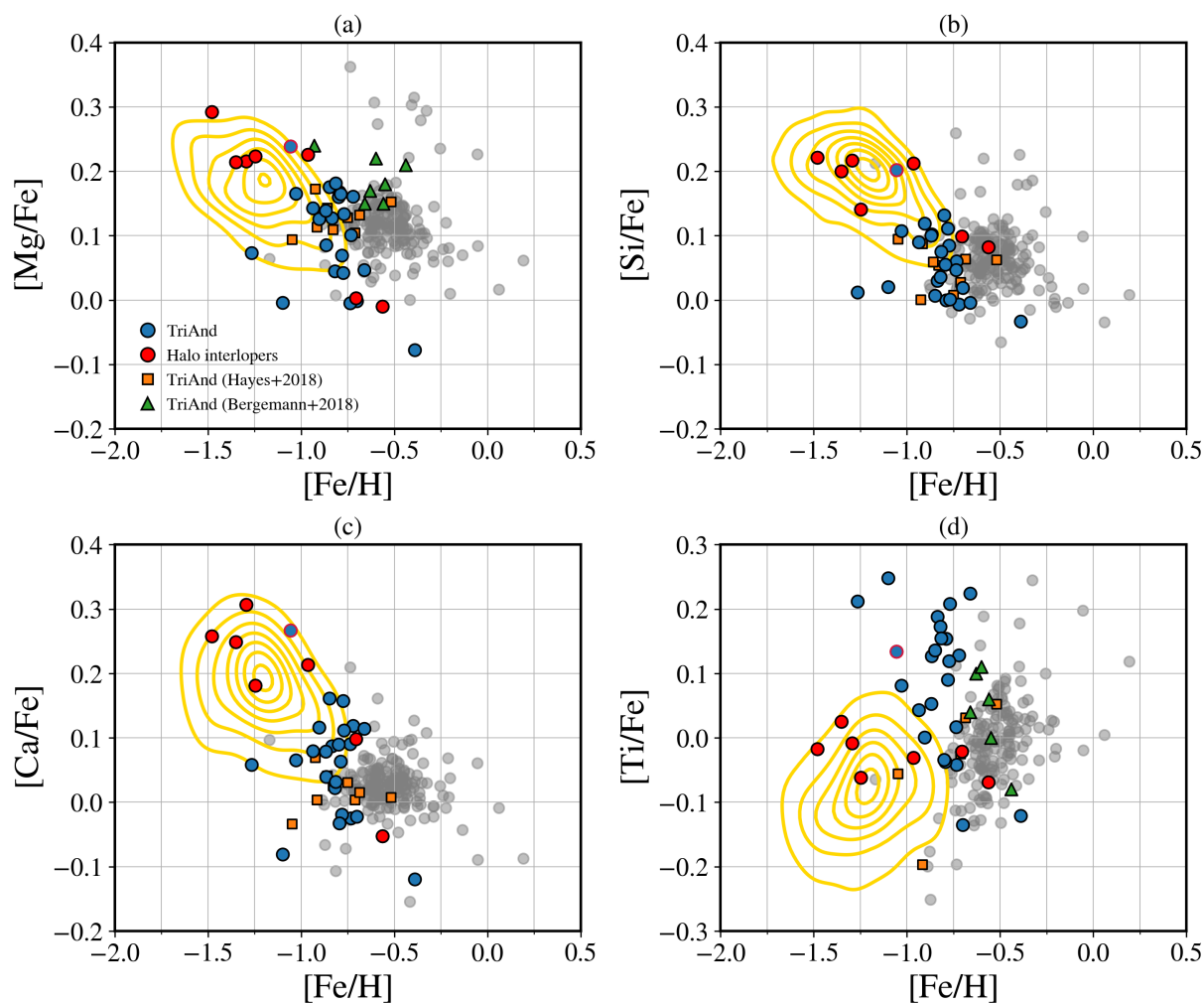


Figura 5.2: Relação $[X/Fe]$ em função da metalicidade para os elementos α : (a) Mg; (b) Si; (c) Ca; (d) Ti. A amostra de estrelas candidatas ao TriAnd deste trabalho está representada por círculos azuis, enquanto a seleção cinemática ($e > 0.4$) está denotada por círculos vermelhos. As amostras referentes aos trabalhos de Hayes et al. (2018) e Bergemann et al. (2018) estão representadas por quadrados laranja e triângulos verdes, respectivamente, estrelas de campo da base de dados do APOGEE DR17 (Abolfathi et al., 2022) em cinza, contornos de isodensidades para o GSE em amarelo. Figura extraída de Abuchaim et al. (2023).

superiores da Figura 5.3. A partir da análise das amostras de campo do APOGEE percebe-se a diferença na distribuição dos elementos Al e Na nas populações estelares que compõem a Galáxia. Os perfis de abundância de Al mostram uma evidente distinção entre a seleção do disco externo, em cinza, e os contornos do GSE, em amarelo, enquanto os perfis de Na apresentam grande dispersão, com alta sobreposição entre as duas populações de campo.

Nas razões $[Al/Fe]$ a distinção mencionada para as amostras de campo do APOGEE (disco externo e GSE) pode também ser observada para as estrelas candidatas ao TriAnd, observadas na amostra deste trabalho. Nota-se que um aparente deslocamento entre as abundâncias derivadas neste trabalho e a amostra do APOGEE está presente. Tal compor-

tamento já foi mencionado na literatura (e.g. [Griffith et al., 2019](#)), ao se comparar dados de abundâncias químicas para elementos odd- Z nas bases de dados do APOGEE e GALAH. Mesmo com o deslocamento é possível observar uma clara diferença na relação $[\text{Al}/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$ entre estrelas com características *in situ* e *ex situ*.

Os padrões de abundâncias de $[\text{Na}/\text{Fe}]$, observados no painel superior direito da Figura 5.3, apresentam uma dispersão (~ 0.25 dex) muito similar à observada por [Bergemann et al. \(2018\)](#). Já a seleção cinemática das estrelas com mais alta excentricidade, além de encontrar-se nas regiões de maior isodensidade dos contornos do GSE, apresenta grande dispersão em $[\text{Na}/\text{Fe}]$ e metalicidade, característica oposta às populações *in situ*, sugerindo uma origem acretada.

Como mencionado, elementos do pico do Ferro são formados a partir de SNIa provenientes de estrelas de baixa massa. Por isso, espera-se que a população *in situ* da Via Láctea apresente características químicas derivadas de um longo tempo de formação estelar, ou seja, onde o enriquecimento do meio interestelar dure longos períodos de tempo (~ 1 Gano, [Matteucci e Francois 1989](#)). Isso faz com que galáxias com história de formação estelar estendida apresentem maiores razões $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ e $[\text{Cr}/\text{Fe}]$ ([Kirby et al., 2019](#); [Larsen et al., 2022](#)).

Os perfis químicos dos elementos do pico do Ferro podem ser observados nos dois painéis inferiores da Figura 5.3. As estrelas dinamicamente classificadas como pertencentes ao TriAnd seguem o padrão de populações do disco externo, apresentando-se com pouca dispersão e similares à seleção do disco externo e ao trabalho de [Hayes et al. \(2018\)](#), que também sugeriram uma origem *in situ*.

As abundâncias de $[\text{Cr}/\text{Fe}]$, apresentadas no painel inferior esquerdo da Figura 5.3, mostram uma leve sobreposição de uma parte da amostra com os contornos do GSE. Isso não necessariamente significa uma característica acretada, pois as estrelas se encontram pouco dispersas nos limites dos contornos, em regiões de menor isodensidade. Em contrapartida, a seleção cinemática de estrelas acretadas segue o perfil de populações *ex situ*, encontrando-se dispersa entre as regiões de maior isodensidade dos contornos do GSE.

A relação $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$ mostrada no painel inferior direito da Figura 5.3, não apresenta sobreposição dos contornos do GSE com a seleção do disco externo, propiciando uma análise mais clara dessas diferentes populações. Estrelas da população de TriAnd e estrelas com a provável origem acretada também seguem esse padrão, apresentando carac-

terísticas bem distintas. Tal comportamento fortalece o cenário em que TriAnd apresenta uma origem *in situ* e uma pequena contaminação de estrelas *ex situ*.

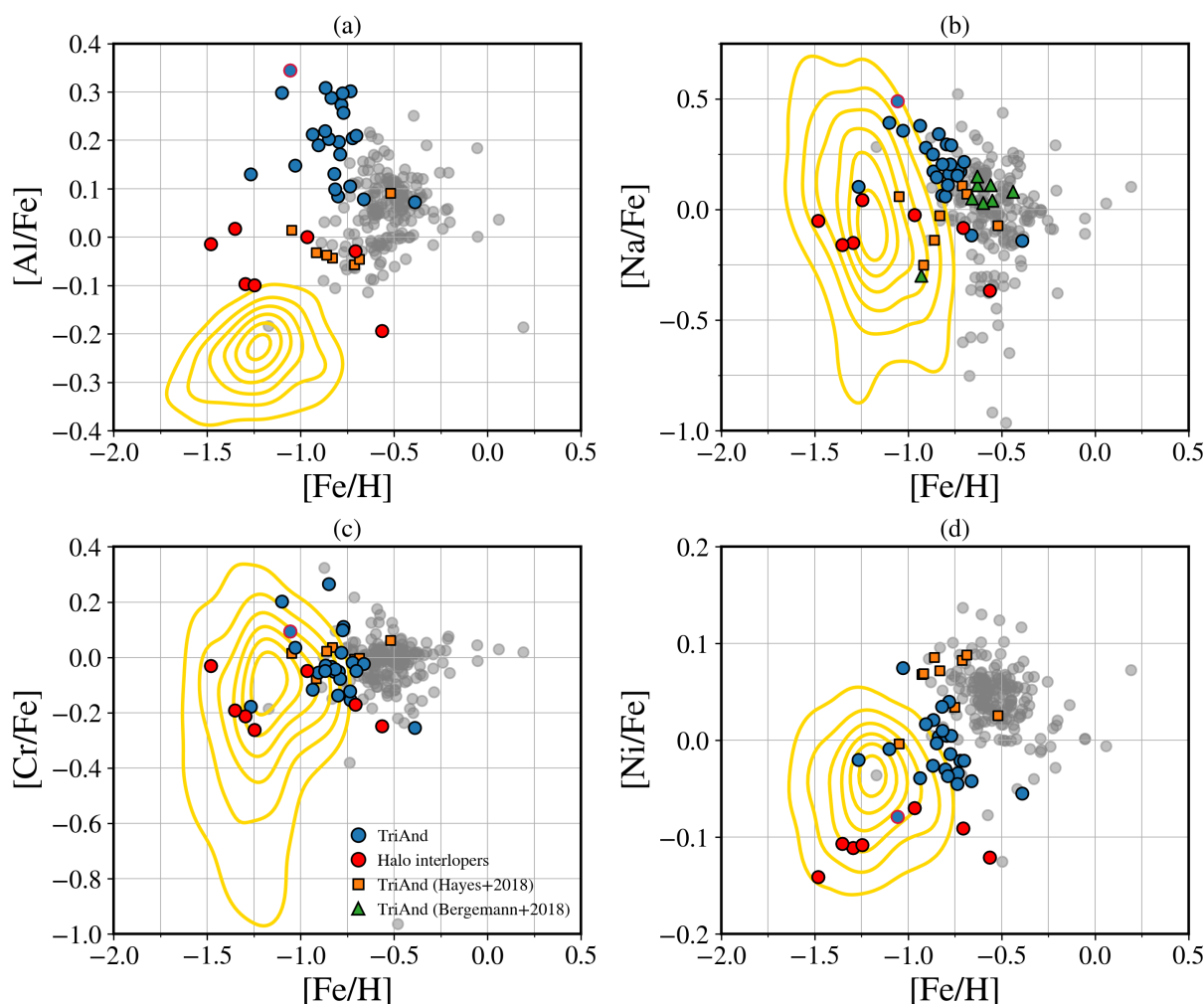


Figura 5.3: Relação $[X/Fe]$ pela metalicidade para os elementos odd-z e pico do Ferro: (a) Al; (b) Na; (c) Cr; (d) Ni. A amostra de estrelas candidatas ao TriAnd deste trabalho está representada por círculos azuis, enquanto a seleção cinemática ($e > 0.4$) está denotada por círculos vermelhos. As amostras referentes aos trabalhos de Hayes et al. (2018) e Bergemann et al. (2018) estão representados por quadrados laranja e triângulos verdes, respectivamente, estrelas de campo da base de dados do APOGEE DR17 (Abolfathi et al., 2022) em cinza, contornos de isodensidades para o GSE em amarelo. Figura extraída de Abuchaim et al. (2023).

5.1.4 Elementos de captura de nêutrons

Elementos mais pesados do que o Fe ($Z > 26$) são tipicamente sintetizados por mecanismos como a captura de nêutrons. Os chamados elementos de captura de nêutrons podem ser divididos em dois tipos de nucleossíntese: o processo-s, que produz elementos entre Sr ($Z = 38$) e Pb ($Z = 82$), majoritariamente formados em estrelas AGB de baixa massa

(Karakas e Lattanzio, 2014) e o processo-r, cujo consenso atual de sua nucleossíntese são eventos altamente energéticos, como fusão de objetos compactos (Lattimer e Schramm, 1974; Rosswog et al., 1999; Wanajo et al., 2009; Drout et al., 2017; Thielemann et al., 2017, 2020; Cowan et al., 2021) e/ou supernovas magneto-rotacionais (Winteler et al., 2012; Mösta et al., 2014; Reichert et al., 2021).

Na Figura 5.4 são apresentadas as abundâncias químicas de Ba e Eu, representando os processos s e r, respectivamente, dentro da faixa de metalicidade considerada ($-1.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.5$). Para comparação com a amostra de TriAnd foram utilizadas estrelas de campo (em cinza), escolhidas a partir da base de dados do SAGA. Os contornos de isodensidade, observados nos painéis à direita da Figura 5.4, representam os discos fino ($[\text{Mg}/\text{Fe}] < 0.2$) e espesso ($[\text{Mg}/\text{Fe}] \geq 0.2$) (Li et al., 2018; Mackereth et al., 2019; Beraldo e Silva et al., 2021; Myeong et al., 2022; Queiroz et al., 2023), em roxo e coral, respectivamente.

Nos painéis superiores da Figura 5.4 encontram-se as abundâncias de $[\text{Ba}/\text{Fe}]$. Observa-se que tanto o Ba derivado para a amostra deste trabalho quanto para as estrelas do disco da base de dados do SAGA apresentam considerável dispersão, dificultando uma análise e distinção mais precisa entre as populações estelares. Ratcliffe e Ness (2022) ao analisarem os diferentes perfis químicos do disco da Galáxia em distâncias galactocêntricas variadas, perceberam que elementos de captura de nêutrons apresentam a maior variação de todos os elementos. Nota-se que a evolução e sítio de enriquecimento desses elementos mais pesados não segue uma tendência simples ao longo do disco.

Mesmo em meio à grande dispersão mencionada, a maioria das abundâncias de $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ calculadas para a amostra deste trabalho se encontram entre $0.1 < [\text{Ba}/\text{Fe}] < 0.3$. Esses altos valores de $[\text{Ba}/\text{Fe}]$, quando comparados com a base de dados do SAGA para estrelas do disco local no mesmo intervalo de metalicidades, concorda com os trabalhos de Bergemann et al. (2018) e Sales Silva et al. (2019) para suas respectivas amostras de candidatas ao TriAnd. O cenário onde TriAnd apresenta uma maior concentração de $[\text{s}/\text{Fe}]$ em comparação com estrelas do disco local, pode ser explicado pelo gradiente positivo da razão $[\text{s}/\text{Fe}]$ presente no disco Galáctico. A população estelar de TriAnd está localizada distante, em altos valores de R_{GC} , apresentando uma razão $[\text{s}/\text{Fe}]$ maior do que a encontrada em estrelas do disco local (como mostrado, e.g. Sales-Silva et al. 2022).

Nos painéis do meio da Figura 5.4 estão representadas as abundâncias de $[\text{Eu}/\text{Fe}]$. O

resultado mais notável a partir de sua análise é de que as abundâncias derivadas seguem os padrões esperados para o disco, concordando muito bem com os resultados de [Bergemann et al. \(2018\)](#), indicando uma origem *in situ* para a sobredensidade. Por outro lado, a seleção cinemática apresenta perfis com características químicas similares às encontradas em populações acretadas, onde a razão $[\text{Eu}/\text{Fe}] \geq 0.5$. Estrelas com origem *ex situ* são geralmente enriquecidas em elementos do processo-r ([Aguado et al., 2021](#)). Também identificou-se que as 3 estrelas mais pobres em metal da amostra deste trabalho ($-1.50 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.25$) são possivelmente estrelas *r-II* ([Barklem et al., 2005](#)), uma classe de estrelas altamente enriquecidas em processo-*r*, provavelmente originadas em ambientes raros, ricos em nêutrons, apresentando valores baixos de $[\text{Ba}/\text{Eu}] (< 0)$ e altos de $[\text{Eu}/\text{Fe}] (\gtrsim 0.7; \text{Holmbeck et al., 2020})$.

A razão $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ é observada nos painéis inferiores da Figura 5.4. Essas abundâncias refletem o número relativo entre estrelas de alta para baixa massa enriquecendo o meio interestelar onde essas estrelas foram formadas. Mesmo em meio a uma alta dispersão, é possível observar que a maioria das estrelas da seleção de TriAnd apresentam uma razão $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ geralmente maior, o que significa um enriquecimento predominante do processo-*s* sobre o processo-*r*. Já as estrelas com uma possível origem *ex situ* apresentam baixo $[\text{Ba}/\text{Eu}]$, onde as estrelas mais pobres em metal com características de acreção apresentam $[\text{Ba}/\text{Eu}] \sim -0.5$ esperado para uma população *ex situ* ([Aguado et al., 2021](#); [Limberg et al., 2021](#); [Matsuno et al., 2021](#); [Ji et al., 2022](#); [Naidu et al., 2022](#)).

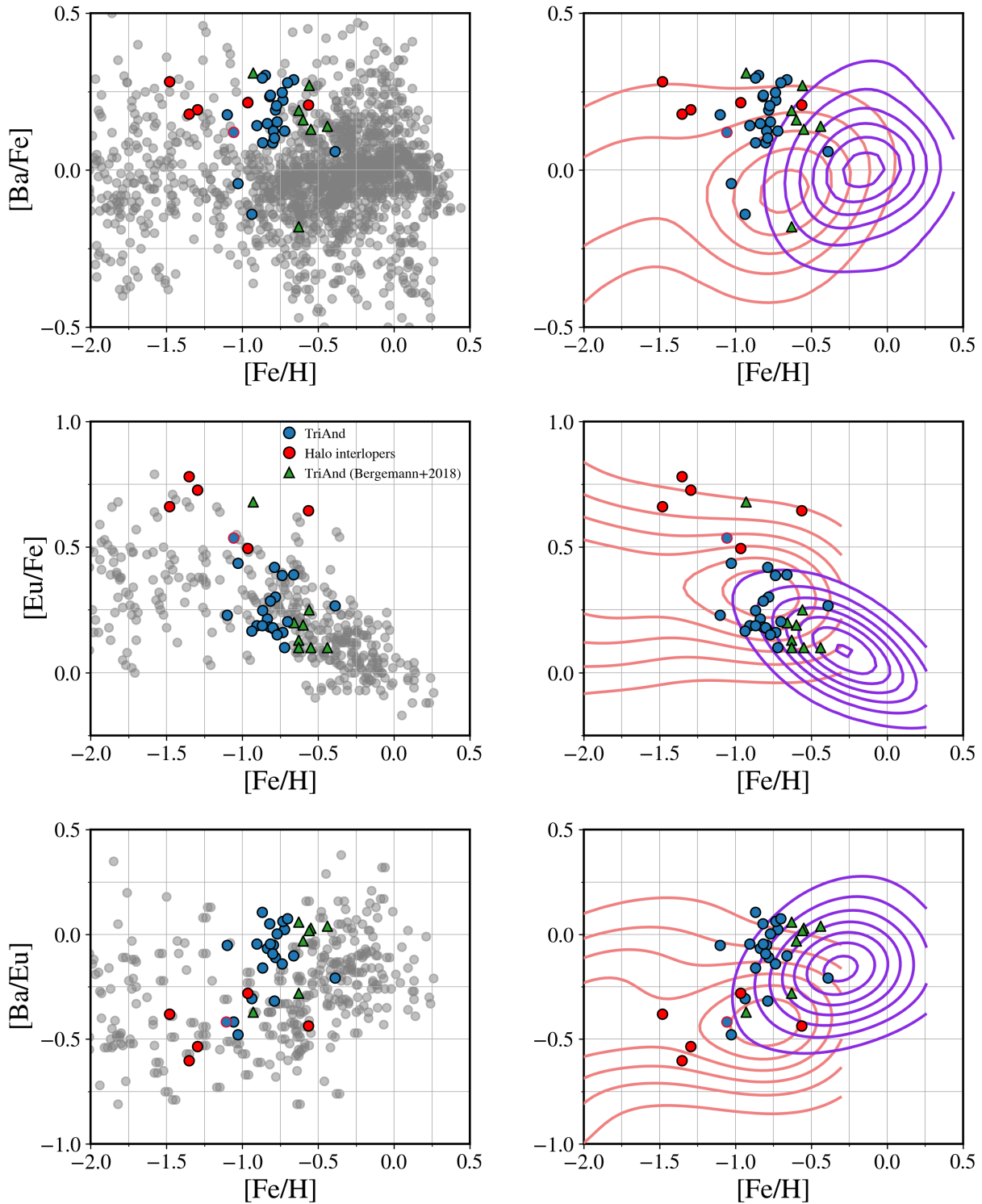


Figura 5.4: Relação $[X/\text{Fe}]$ e $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ pela metalicidade para os elementos de captura de nêutrons (Ba e Eu), onde cada elemento está denotado em seu respectivo painel. Em círculos azuis a amostra utilizada neste trabalho, onde a seleção cinemática é representada por círculos vermelhos, triângulos verdes para a amostra de Bergemann et al. (2018) e estrelas de campo da base de dados do SAGA (Suda et al., 2008, 2017) em cinza e contornos de isodensidade associados ao disco fino e espesso em roxo e coral, respectivamente. Figura extraída de Abuchaim et al. (2023).

Conclusões

A Via Láctea é repleta de sobredensidades estelares, sejam pertencentes ao halo ou ao disco. Dentre elas, TriAnd se destaca, pois desde sua descoberta apresentou várias sugestões acerca de sua natureza. Seus estudos espectroscópicos de alta resolução já sugeriram uma origem *ex situ* (Chou et al., 2011), *in situ* (Bergemann et al., 2018; Hayes et al., 2018) e até complexa, apresentando características tanto do disco como de populações acregadas (Sales Silva et al., 2019, 2020). Devido a esse complexo perfil químico, escolheu-se nessa pesquisa a população estelar de TriAnd para uma análise quimiodinâmica, a fim de melhor compreender sua natureza.

O arcabouço da pesquisa estruturou-se nas seguintes partes: no Capítulo 2 apresentou-se a seleção da amostra de estrelas candidatas ao TriAnd com informações sobre suas respectivas observações e também as seleções de estrelas de campo utilizadas para melhor descrever os dados presentes neste trabalho; apresentou-se no Capítulo 3 a metodologia utilizada para a redução dos dados, cálculo das velocidades radiais, derivação das abundâncias químicas e parâmetros orbitais da amostra; nos Capítulos 4 e 5 explanaram-se a análise dinâmica e química da amostra, respectivamente, onde se compararam as características quimiodinâmicas das estrelas candidatas ao TriAnd tanto com populações *in situ* quanto *ex situ* da Via Láctea.

6.1 Principais resultados obtidos na pesquisa

TriAnd se encontra distante ($R_{GC} = 20 \sim 30$ kpc), no disco externo Galáctico. Por esse motivo, observações de estrelas candidatas em alta resolução são muito difíceis, outra dificuldade se encontra na escassez de estudos com estrelas de campo no disco externo.

Amostras de trabalhos anteriores que também estudaram TriAnd via espectroscopia de alta resolução nunca ultrapassaram 13 estrelas. A presente pesquisa, através do espectrógrafo de alta resolução GRACES ($R = 40.000$) instalado no Gemini Norte (8,1 m), obteve uma amostra maior e atualizada de 31 estrelas candidatas a pertencerem a TriAnd.

A análise química foi feita a partir de diferentes elementos químicos derivados e comparados com outras populações Galácticas. Além do Ferro, foram obtidas as abundâncias de elementos α (Mg, Ca, Si e Ti), odd- Z (Al e Na), pico do Ferro (Cr e Ni) e também elementos de captura de nêutrons (Ba e Eu). A análise dinâmica analisou os parâmetros orbitais das 31 estrelas da amostra para verificar suas características cinemáticas em comparação com populações do disco e acretadas.

A investigação revela que a maioria das estrelas de TriAnd analisadas apresenta características *in situ*. Seus parâmetros orbitais são semelhantes aos de estrelas no disco, apresentando baixa excentricidade e co-rotação com o disco da Galáxia. Através de uma seleção em excentricidade ($e > 0.4$) detectou-se uma contaminação de estrelas possivelmente acretadas na amostra. Os parâmetros orbitais referentes a essas estrelas se apresentam similares ao de estruturas acretadas da Via Láctea, como por exemplo, o GSE.

O estudo dos perfis químicos mostra que as estrelas de baixa excentricidade ($e < 0.4$) se assemelham às estrelas do disco externo da Galáxia. Desta forma, a maioria das estrelas analisadas mantém as características *in situ* previamente observadas em seus parâmetros orbitais. Por outro lado, as estrelas caracterizadas com uma possível origem acretada, apresentam abundâncias químicas similares às populações *ex situ*.

Esta pesquisa concluiu uma origem *in situ* para TriAnd, pois a maioria da amostra analisada apresentou características, tanto dinâmicas quanto químicas, similares à população estelar do disco externo da Via Láctea. Esse resultado concorda com outros da literatura que também sugeriram uma origem *in situ* para TriAnd (e.g., [Bergemann et al. 2018](#); [Hayes et al. 2018](#)). Porém, estudos espectroscópicos em alta resolução de TriAnd já concluíram uma origem *ex situ* para a sobredensidade (e.g., [Chou et al. 2011](#)). A natureza *in situ* com contaminantes acretados na mesma distância e localização de TriAnd sugere uma explicação para o complexo perfil químico desta sobredensidade observado na literatura.

6.2 Perspectivas Futuras

Uma das maiores dificuldades no estudo de sobredensidades estelares encontradas nas regiões mais distantes do disco da Via Láctea é a dificuldade em obter dados em alta resolução de estrelas nessas distâncias ($R_{GC} > 9$ kpc). A história do estudo em alta resolução da população de TriAnd, por exemplo, contou com amostras de 6 (Chou et al., 2011), 8 (Bergemann et al., 2018), 12 (Hayes et al., 2018), 13 (Sales Silva et al., 2019, 2020) e 31 (Abuchaim et al. 2023) estrelas candidatas até hoje. O avanço na tecnologia e disponibilidade de novos espectrógrafos e levantamentos espectroscópicos ajudam a expandir o acesso à estrelas do disco externo, possibilitando um estudo mais aprofundado de sobredensidades estelares no disco da Galáxia. Esses novos instrumentos têm capacidades que permitem a obtenção de espectros de alta resolução para um grande número de estrelas, fornecendo informações detalhadas sobre suas características químicas, cinemáticas e estruturais.

O aprimoramento de espectrógrafos em alta resolução e levantamentos espectroscópicos, como o Gemini High-resolution Optical SpecTrograph (GHOST; Sheinis et al. 2017) e o Sloan Digital Sky Survey V (SDSS-V; Almeida et al. 2023), contribui continuamente com o entendimento geral dessas populações estelares mais distantes. Além dos citados, existem levantamentos e telescópios que têm o potencial de realizar observações espectroscópicas em larga escala, abrangendo diferentes regiões da Via Láctea, como: Dark Energy Survey (DES; Sánchez e Des Collaboration 2010) acoplado com a Dark Energy Camera (DECam; Diehl et al. 2014, 2018); WHT Enhanced Area Velocity Explorer (WEAVE; Bonifacio et al. 2016); 4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope (4MOST; de Jong et al. 2019); Large Synoptic Survey Telescope (LSST; Jha et al. 2019); Maunakea Spectroscopic Explorer (MSE; Marshall et al. 2019); Spectroscopic Survey Telescope (SpecTel; Ellis e Dawson 2019); MegaMapper (Schlegel et al., 2022). Ademais, espectrógrafos como o Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph (MOONS; Cirasuolo et al. 2014) e o Fiber-Optic Broadband Optical Spectrograph (FOBOS; Bundy et al. 2019) também têm como objetivo a realização de levantamentos espectroscópicos de grande escala, permitindo uma análise detalhada das propriedades de estrelas, incluindo aquelas que se encontram nas regiões mais distantes do disco Galáctico.

Além da carência de dados de estrelas candidatas à sobredensidades estelares com provável origem *in situ*, como Monocerus e TriAnd, estudos recentes têm se dedicado ao

melhor entendimento sobre sua formação (Cheng et al., 2020). Essas estruturas têm sido associadas a diferentes processos de formação, incluindo a conexão com o *warp* do disco galáctico e *bending waves* provocadas por impactos e oscilações verticais do disco. Essas interpretações são respaldadas por diversos estudos (e.g. Momany et al. 2006; Kazantzidis et al. 2008, 2009; Figueras 2017) que sugerem a relação entre as sobredensidades e o *warp*, além de simulações (e.g. Laporte et al. 2018), que demonstram como a interação com galáxias satélites, como a Sgr dSph, pode reproduzir sobredensidades estelares no disco da Via Láctea.

Observações também fornecem evidências de oscilações verticais no disco galáctico e sua provável associação com sobredensidades estelares (Xu et al., 2015; Newberg et al., 2016). Além disso, estudos recentes sugerem que essas estruturas possuem uma origem comum no disco Galáctico, sendo deslocadas para suas posições atuais ao longo do tempo (e.g. Johnston et al. 2017; Poggio et al. 2021). A obtenção de novos dados tanto químicos quanto cinemáticos de sobredensidades *in situ*, além da evolução de simulações numéricas e análises observacionais, permitirão um maior entendimento dos processos de formação e evolução de sobredensidades estelares no disco da Galáxia.

Referências Bibliográficas

- Abolfathi Accetta K., Aerts C., Aguirre V. S., Ahumada R., Ajgaonkar N., Ak N. F., Alam S., Prieto C. A., Almeida A., Anders F., et al., The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data, *ApJS*, 2022, vol. 259, p. 35
- Abolfathi B., Aguado D., Aguilar G., Prieto C. A., Almeida A., Ananna T. T., Anders F., Anderson S. F., Andrews B. H., Anguiano B., et al., The fourteenth data release of the Sloan Digital Sky Survey: First spectroscopic data from the extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the second phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, *ApJS*, 2018a, vol. 235, p. 42
- Abolfathi B., Aguado D., Aguilar G., Prieto C. A., Almeida A., Ananna T. T., Anders F., Anderson S. F., Andrews B. H., Anguiano B., et al., The Fourteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the Second Phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, *ApJS*, 2018b, vol. 235, p. 42
- Abuchaim Y., Perottoni H. D., Rossi S., Limberg G., Pérez-Villegas A., Santucci R. M., Placco V. M., Sales-Silva J. V., Anders F., Rocha-Pinto H. J., The Chemodynamical Nature of the Triangulum-Andromeda Overdensity, *ApJ*, 2023, vol. 949, p. 48
- Aguado D. S., Belokurov V., Myeong G. C., Evans N. W., Kobayashi C., Sbordone L., Chanamé J., Navarrete C., Koposov S. E., Elevated r-process Enrichment in Gaia Sausage and Sequoia, *ApJ*, 2021, vol. 908, p. L8
- Aguado D. S., Myeong G. C., Belokurov V., Evans N. W., Koposov S. E., Allende Prieto

- C., Lanfranchi G. A., Matteucci F., Shetrone M., Sbordone L., Navarrete C., González Hernández J. I., Chanamé J., Peralta de Arriba L., Yuan Z., The S2 stream: the shreds of a primitive dwarf galaxy, *MNRAS*, 2021, vol. 500, p. 889
- Almeida A., Anderson S. F., Argudo-Fernández M., Badenes C., Barger K., Barrera-Ballesteros J. K., Bender C. F., Benitez E., Besser F., Bizyaev D., Blanton M. R., Bochanski J., Bovy The Eighteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Targeting and First Spectra from SDSS-V, arXiv e-prints, 2023, p. arXiv:2301.07688
- Amorisco N. C., Contributions to the accreted stellar halo: an atlas of stellar deposition, *MNRAS*, 2017, vol. 464, p. 2882
- Balbinot E., Helmi A., Linking nearby stellar streams to more distant halo overdensities, *A&A*, 2021, vol. 654, p. A15
- Barklem P. S., Christlieb N., Beers T. C., Hill V., Bessell M. S., Holmberg J., Marsteller B., Rossi S., Zickgraf F. J., Reimers D., The Hamburg/ESO R-process enhanced star survey (HERES). II. Spectroscopic analysis of the survey sample, *A&A*, 2005, vol. 439, p. 129
- Beaton R. L., Oelkers R. J., Hayes C. R., Covey K. R., Chojnowski S. D., De Lee N., Sobek J. S., Majewski S. R., Cohen R. E., et al., Final Targeting Strategy for the Sloan Digital Sky Survey IV Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment 2 North Survey, *AJ*, 2021, vol. 162, p. 302
- Bellazzini M., Ibata R., Martin N., Lewis G. F., Conn B., Irwin M. J., The core of the Canis Major galaxy as traced by red clump stars, *MNRAS*, 2006, vol. 366, p. 865
- Belokurov V., Galactic Archaeology: The dwarfs that survived and perished, *New A Rev.*, 2013, vol. 57, p. 100
- Belokurov V., Deason A. J., Erkal D., Koposov S. E., Carballo-Bello J. A., Smith M. C., Jethwa P., Navarrete C., The Pisces Plume and the Magellanic wake, *MNRAS*, 2019, vol. 488, p. L47
- Belokurov V., Erkal D., Evans N., Koposov S., Deason A., Co-formation of the disc and the stellar halo, *MNRAS*, 2018, vol. 478, p. 611

- Belokurov V., Evans N. W., Bell E. F., Irwin M. J., Hewett P. C., Koposov S., Rockosi C. M., Gilmore G., Zucker D. B., Fellhauer M., Wilkinson M. I., Bramich D. M., Vidrih S., Rix H. W., Beers T. C., Schneider D. P., Barentine J. C., Brewington H., Brinkmann J., Harvanek M., Krzesinski J., Long D., Pan K., Snedden S. A., Malanushenko O., Malanushenko V., The Hercules-Aquila Cloud, *ApJ*, 2007, vol. 657, p. L89
- Belokurov V., Sanders J. L., Fattahi A., Smith M. C., Deason A. J., Evans N. W., Grand R. J. J., The biggest splash, *MNRAS*, 2020, vol. 494, p. 3880
- Belokurov V., Zucker D. B., Evans N. W., Kleyana J. T., Koposov S., Hodgkin S. T., Irwin M. J., Gilmore G., Wilkinson M. I., Fellhauer M., Bramich D. M., Hewett P. C., Vidrih S., De Jong J. T. A., Smith J. A., Rix H. W., Bell E. F., Wyse R. F. G., Newberg H. J., Mayeur P. A., Yanny B., Rockosi C. M., Gnedin O. Y., Schneider D. P., Beers T. C., Barentine J. C., Brewington H., Brinkmann J., Harvanek M., Kleinman S. J., Krzesinski J., Long D., Nitta A., Snedden S. A., Cats and Dogs, Hair and a Hero: A Quintet of New Milky Way Companions, *ApJ*, 2007, vol. 654, p. 897
- Bensby T., Feltzing S., Oey M. S., Exploring the Milky Way stellar disk. A detailed elemental abundance study of 714 F and G dwarf stars in the solar neighbourhood, *A&A*, 2014, vol. 562, p. A71
- Beraldo e Silva L., Debattista V. P., Nidever D., Amarante J. A. S., Garver B., Co-formation of the thin and thick discs revealed by APOGEE-DR16 and Gaia-DR2, *MNRAS*, 2021, vol. 502, p. 260
- Bergemann M., Ionization balance of Ti in the photospheres of the Sun and four late-type stars, *MNRAS*, 2011, vol. 413, p. 2184
- Bergemann M., Cescutti G., Chromium: NLTE abundances in metal-poor stars and nucleosynthesis in the Galaxy, *A&A*, 2010, vol. 522, p. A9
- Bergemann M., Collet R., Amarsi A. M., Kovalev M., Ruchti G., Magic Z., Non-local Thermodynamic Equilibrium Stellar Spectroscopy with 1D and β 3D₂ Models. I. Methods and Application to Magnesium Abundances in Standard Stars, *ApJ*, 2017, vol. 847, p. 15

- Bergemann M., Hoppe R., Semanova E., Carlsson M., Yakovleva S. A., Voronov Y. V., Bautista M., Nemer A., Belyaev A. K., Leenaarts J., Mashonkina L., Reiners A., Ellwarth M., Solar oxygen abundance, *MNRAS*, 2021, vol. 508, p. 2236
- Bergemann M., Kudritzki R.-P., Würl M., Plez B., Davies B., Gazak Z., Red Supergiant Stars as Cosmic Abundance Probes. II. NLTE Effects in J-band Silicon Lines, *ApJ*, 2013, vol. 764, p. 115
- Bergemann M., Lind K., Collet R., Magic Z., Asplund M., Non-LTE line formation of Fe in late-type stars - I. Standard stars with 1D and $\text{j}3\text{D}_\ell$ model atmospheres, *MNRAS*, 2012, vol. 427, p. 27
- Bergemann M., Sesar B., Cohen J. G., Serenelli A. M., Sheffield A., Li T. S., Casagrande L., Johnston K. V., Laporte C. F. P., Price-Whelan A. M., Schönrich R., Gould A., Two chemically similar stellar overdensities on opposite sides of the plane of the Galactic disk, *Nature*, 2018, vol. 555, p. 334
- Binney J., Burnett B., Kordopatis G., McMillan P. J., Sharma S., Zwitter T., Bienaymé O., Bland-Hawthorn J., Steinmetz M., Gilmore G., Williams M. E. K., Navarro J., Grebel E. K., Helmi A., Parker Q., Reid W. A., Seabroke G., Watson F., Wyse R. F. G., New distances to RAVE stars, *MNRAS*, 2014, vol. 437, p. 351
- Binney J., Tremaine S., *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton university press, 2008
- Bland-Hawthorn J., Gerhard O., The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties, *ARA&A*, 2016a, vol. 54, p. 529
- Bland-Hawthorn J., Gerhard O., The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties, *ARA&A*, 2016b, vol. 54, p. 529
- Bonaca A., Hogg D. W., The Information Content in Cold Stellar Streams, *ApJ*, 2018, vol. 867, p. 101
- Bonaca A., Naidu R. P., Conroy C., Caldwell N., Cargile P. A., Han J. J., Johnson B. D., Kruijssen J. M. D., Myeong G. C., Speagle J. S., Ting Y.-S., Zaritsky D., Orbital Clustering Identifies the Origins of Galactic Stellar Streams, *ApJ*, 2021, vol. 909, p. L26

- Bonifacio P., Dalton G., Trager S., Aguerri A. L., Carrasco E., Vallenari A., Abrams D. C., Middleton K., Sayède F., WEAVE an overview and status update. In SF2A-2016: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics , 2016, p. 267
- Bovy J., , 2020 A purely acceleration-based measurement of the fundamental Galactic parameters
- Buder S., Sharma S., Kos J., Amarsi A. M., Nordlander T., Lind K., Martell S. L., Asplund M., Bland-Hawthorn J., Casey A. R., et al., The GALAH+ survey: Third data release, MNRAS, 2021, vol. 506, p. 150
- Bundy K., Westfall K., MacDonald N., Kupke R., Savage M., Poppett C., Alabi A., Becker G., Burchett J., Capak P., Coil A., Cooper M., Cowley D., Deich W., Dillon D., Edelstein J., Guhathakurta FOBOS: A Next-Generation Spectroscopic Facility. In Bulletin of the American Astronomical Society , vol. 51, 2019, p. 198
- Burnett B., Binney J., Stellar distances from spectroscopic observations: a new technique, MNRAS, 2010, vol. 407, p. 339
- Burnett B., Binney J., Sharma S., Williams M., Zwitter T., Bienaymé O., Bland-Hawthorn J., Freeman K. C., Fulbright J., Gibson B., Gilmore G., Grebel E. K., Helmi A., Munari U., Navarro J. F., Parker Q. A., Seabroke G. M., Siebert A., Siviero A., Steinmetz M., Watson F. G., Wyse R. F. G., Distance determination for RAVE stars using stellar models. III. The nature of the RAVE survey and Milky Way chemistry, A&A, 2011, vol. 532, p. A113
- Carballo-Bello J. A., Martínez-Delgado D., Corral-Santana J. M., Alfaro E. J., Navarrete C., Vivas A. K., Catelan M., A revised view of the Canis Major stellar overdensity with DECam and Gaia: new evidence of a stellar warp of blue stars, MNRAS, 2021, vol. 501, p. 1690
- Carlin J. L., DeLaunay J., Newberg H. J., Deng L., Gole D., Grabowski K., Jin G., Liu C., Liu X., Luo A. L., Yuan H., Zhang H., Zhao G., Zhao Y., Substructure in Bulk Velocities of Milky Way Disk Stars, ApJ, 2013, vol. 777, p. L5

- Carrillo I., Minchev I., Kordopatis G., Steinmetz M., Binney J., Anders F., Bienaymé O., Bland-Hawthorn J., Famaey B., Freeman K. C., Gilmore G., Gibson B. K., Grebel E. K., Helmi A., Just A., Kunder A., McMillan P., Monari G., Munari U., Navarro J., Parker Q. A., Reid W., Seabroke G., Sharma S., Siebert A., Watson F., Wojno J., Wyse R. F. G., Zwitter T., Is the Milky Way still breathing? RAVE-Gaia streaming motions, *MNRAS*, 2018, vol. 475, p. 2679
- Castelli F., Kurucz R. L., New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres. In *Modelling of Stellar Atmospheres*, vol. 210, 2003, p. A20
- Castelli F., Kurucz R. L., New grids of ATLAS9 model atmospheres, arXiv preprint *astro-ph/0405087*, 2004
- Chandra V., Naidu R. P., Conroy C., Ji A. P., Rix H.-W., Bonaca A., Cargile P., Han J. J., Johnson B. D., Ting Y.-S., Woody T., Zaritsky D., Distant Echoes of the Milky Way's Last Major Merger, arXiv e-prints, 2022, p. arXiv:2212.00806
- Chang J., Yuan Z., Xue X.-X., Simion I. T., Kang X., Li T. S., Zhao J.-K., Zhao G., Is NGC 5824 the Core of the Progenitor of the Cetus Stream?, *ApJ*, 2020, vol. 905, p. 100
- Chéné A.-N., Mao S., Lundquist M., Gemini Collaboration Martioli E., Opera Collaboration Carlin J. L., Usability Testing DRAGraces: A Pipeline for the GRACES High-resolution Spectrograph at Gemini, *AJ*, 2021, vol. 161, p. 109
- Cheng X., Anguiano B., Majewski S. R., Hayes C., Arras P., Chiappini C., Hasselquist S., de Andrade Queiroz A. B., Nitschelm C., García-Hernández D. A., Lane R. R., Roman-Lopes A., Frinchaboy P. M., Exploring the Galactic Warp through Asymmetries in the Kinematics of the Galactic Disk, *ApJ*, 2020, vol. 905, p. 49
- Chiba M., Beers T. C., Kinematics of Metal-poor Stars in the Galaxy. III. Formation of the Stellar Halo and Thick Disk as Revealed from a Large Sample of Nonkinematically Selected Stars, *AJ*, 2000a, vol. 119, p. 2843
- Chiba M., Beers T. C., Kinematics of Metal-poor Stars in the Galaxy. III. Formation of the Stellar Halo and Thick Disk as Revealed from a Large Sample of Nonkinematically Selected Stars, *AJ*, 2000b, vol. 119, p. 2843

- Chou M.-Y., Majewski S. R., Cunha K., Smith V. V., Patterson R. J., Martínez-Delgado D., The Chemical Evolution of the Monoceros Ring/Galactic Anticenter Stellar Structure, *ApJ*, 2010, vol. 720, p. L5
- Chou M.-Y., Majewski S. R., Cunha K., Smith V. V., Patterson R. J., Martínez-Delgado D., First Chemical Analysis of Stars in the Triangulum–Andromeda Star Cloud, *ApJ*, 2011, vol. 731, p. L30
- Cirasuolo M., Afonso J., Carollo M., Flores H., Maiolino R., Oliva E., Paltani S., Vanzani L., Evans C., Abreu M., Atkinson D., Babusiaux C., Beard S., Bauer F., Bellazzini M., Bender MOONS: the Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph for the VLT. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, vol. 9147 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2014, p. 91470N
- Ciucă I., Kawata D., Ting Y.-S., Grand R. J. J., Miglio A., Hayden M., Baba J., Fragkoudi F., Monty S., Buder S., Freeman K., Chasing the impact of the Gaia-Sausage-Enceladus merger on the formation of the Milky Way thick disc, *MNRAS*, 2023
- Conroy C., Naidu R. P., Zaritsky D., Bonaca A., Cargile P., Johnson B. D., Caldwell N., Caldwell N., Caldwell N., Caldwell N., Resolving the Metallicity Distribution of the Stellar Halo with the H3 Survey, *ApJ*, 2019, vol. 887, p. 237
- Cowan J. J., Sneden C., Lawler J. E., Aprahamian A., Wiescher M., Langanke K., Martínez-Pinedo G., Thielemann F.-K., Origin of the heaviest elements: The rapid neutron-capture process, *Reviews of Modern Physics*, 2021, vol. 93, p. 015002
- Cui X.-Q., Zhao Y.-H., Chu Y.-Q., Li G.-P., Li Q., Zhang L.-P., Su H.-J., Yao Z.-Q., Wang Y.-N., Xing X.-Z., et al., The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST), *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, vol. 12, p. 1197
- Darragh-Ford E., Nadler E. O., McLaughlin S., Wechsler R. H., Searching for Dwarf Galaxies in *Gaia* DR2 Phase-Space Data Using Wavelet Transforms, *arXiv e-prints*, 2020
- de Jong R. S., Agertz O., Berbel A. A., Aird J., Alexander D. A., Amarsi A., Anders F., Andrae R., Ansarinejad B., Ansorge W., Antilogus P., Anwand-Heerwart H., Arentsen A., Arnadottir A., Asplund M., Auger M., Azais N., Baade D., Baker G., Baker S.,

- Balbinot E., Baldry I. K., Banerji M., Barden S., Barklem et al., 4MOST: Project overview and information for the First Call for Proposals, *The Messenger*, 2019, vol. 175, p. 3
- De Silva G. M., Freeman K. C., Bland-Hawthorn J., Martell S., De Boer E. W., Asplund M., Keller S., Sharma S., Zucker D. B., Zwitter T., et al., The GALAH survey: scientific motivation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 449, p. 2604
- Deason A. J., Belokurov V., Hamren K. M., Koposov S. E., Gilbert K. M., Beaton R. L., Dorman C. E., Guhathakurta P., Majewski S. R., Cunningham E. C., TriAnd and its siblings: satellites of satellites in the Milky Way halo, *MNRAS*, 2014, vol. 444, p. 3975
- Deason A. J., Belokurov V., Koposov S. E., Cresting the wave: proper motions of the Eastern Banded Structure, *MNRAS*, 2018, vol. 473, p. 2428
- Deason A. J., Belokurov V., Koposov S. E., Lancaster L., Apocenter Pile-up: Origin of the Stellar Halo Density Break, *ApJ*, 2018, vol. 862, p. L1
- Depalo R., LUNA Collaboration Towards a study of $^{22}\text{Ne}(p\gamma)^{23}\text{Na}$ at LUNA. In *Journal of Physics Conference Series* , vol. 665 of *Journal of Physics Conference Series*, 2016, p. 012017
- Di Matteo P., Haywood M., Lehnert M. D., Katz D., Khoperskov S., Snaith O. N., Gómez A., Robichon N., The Milky Way has no in-situ halo other than the heated thick disc. Composition of the stellar halo and age-dating the last significant merger with Gaia DR2 and APOGEE, *A&A*, 2019, vol. 632, p. A4
- Diehl H. T., Abbott T. M. C., Annis J., Armstrong R., Baruah L., Bermeo A., Bernstein G., Beynon E., Bruderer C., Buckley-Geer E. J., Campbell H., Capozzi D., Carter M., Casas R., Clerkin L., Covarrubias R., Cuhna The Dark Energy Survey and operations: Year 1. In *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems V* , vol. 9149 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2014, p. 91490V
- Diehl H. T., Neilsen E., Gruendl R. A., Abbott T. M. C., Allam S., Alvarez O., Annis J., Balbinot E., Bhargava S., Bechtol K., Bernstein G. M., Bhatawdekar R., Bocquet

- S., Brout D., Capasso R., Cawthon R., Chang Dark energy survey operations: years 4 and 5. In *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VII*, vol. 10704 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2018, p. 107040D
- Dierickx M., Blecha L., Loeb A., Signatures of the M31-M32 Galactic Collision, *ApJ*, 2014, vol. 788, p. L38
- Donlon Thomas I., Newberg H. J., Weiss J., Amy P., Thompson J., The Virgo Overdensity Explained, *ApJ*, 2019, vol. 886, p. 76
- Dotter A., Chaboyer B., Jevremović D., Kostov V., Baron E., Ferguson J. W., The Dartmouth Stellar Evolution Database, *ApJS*, 2008, vol. 178, p. 89
- Drlica-Wagner A., Bechtol K., Rykoff E. S., Luque E., Queiroz A., Mao Y.-Y., Wechsler R. H., Simon J. D., Santiago B., Yanny B., et al. EIGHT ULTRA-FAINT GALAXY CANDIDATES DISCOVERED IN YEAR TWO OF THE DARK ENERGY SURVEY, *ApJ*, 2015, vol. 813, p. 109
- Drout M. R., Piro A. L., Shappee B. J., Kilpatrick C. D., Simon J. D., Contreras C., Coulter D. A., Foley R. J., Siebert M. R., Morrell N., Boutsia K., Mille F. D., Holoien T. W.-S., Kasen D., Kollmeier J. A., Madore B. F., Monson A. J., Murguia-Berthier A., Pan Y.-C., Prochaska J. X., Ramirez-Ruiz E., Rest A., Adams C., Alatalo K., Bañados E., Baughman J., Beers T. C., Bernstein R. A., Bitsakis T., Campillay A., Hansen T. T., Higgs C. R., Ji A. P., Maravelias G., Marshall J. L., Bidin C. M., Prieto J. L., Rasmussen K. C., Rojas-Bravo C., Strom A. L., Ulloa N., Vargas-González J., Wan Z., Whitten D. D., Light curves of the neutron star merger GW170817/SSS17a: Implications for r-process nucleosynthesis, *Science*, 2017, vol. 358, p. 1570
- Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed., *ApJ*, 1962, vol. 136, p. 748
- Ellis R., Dawson K., SpecTel: A 10-12 meter class Spectroscopic Survey Telescope. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 51, 2019, p. 45

- Epstein C. R., Johnson J. A., Dong S., Udalski A., Gould A., Becker G., Chemical Composition of Faint ($I \sim 21$ mag) Microlensed Bulge Dwarf OGLE-2007-BLG-514S, *ApJ*, 2010, vol. 709, p. 447
- Fabrizius C., Luri X., Arenou F., Babusiaux C., Helmi A., Muraveva T., Reylé C., Spoto F., Vallenari A., Antoja T., Balbinot E., Barache C., Bauchet N., et al., Gaia Early Data Release 3. Catalogue validation, *A&A*, 2021, vol. 649, p. A5
- Figueras F., Outer Regions of the Milky Way. In *Outskirts of Galaxies*, vol. 434 of *Astrophysics and Space Science Library*, 2017, p. 1
- Frebel A., Norris J. E., Near-Field Cosmology with Extremely Metal-Poor Stars, *ARA&A*, 2015, vol. 53, p. 631
- Freeman K., Bland-Hawthorn J., The New Galaxy: Signatures of Its Formation, *ARAA*, 2002, vol. 40, p. 487
- Gaia Collaboration Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties, *A&A*, 2018, vol. 616, p. A1
- Gaia Collaboration Brown A. G. A., Vallenari A., Prusti T., de Bruijne J. H. J., Babusiaux C., Biermann M., Gaia Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties, arXiv e-prints, 2020, p. arXiv:2012.01533
- Gaia Collaboration Prusti T., de Bruijne J. H. J., Brown A. G. A., Vallenari A., Babusiaux
The Gaia mission, *A&A*, 2016, vol. 595, p. A1
- Gómez F. A., Helmi A., On the identification of substructure in phase space using orbital frequencies, *MNRAS*, 2010, vol. 401, p. 2285
- Gómez F. A., Helmi A., Cooper A. P., Frenk C. S., Navarro J. F., White S. D. M., Streams in the Aquarius stellar haloes, *MNRAS*, 2013, vol. 436, p. 3602
- Gómez F. A., White S. D. M., Marinacci F., Slater C. T., Grand R. J. J., Springel V., Pakmor R., A fully cosmological model of a Monoceros-like ring, *MNRAS*, 2016, vol. 456, p. 2779

- Grand R. J. J., Kawata D., Belokurov V., Deason A. J., Fattahi A., Fragkoudi F., Gómez F. A., Marinacci F., Pakmor R., The dual origin of the Galactic thick disc and halo from the gas-rich Gaia-Enceladus Sausage merger, *MNRAS*, 2020, vol. 497, p. 1603
- Grevesse N., Asplund M., Sauval A. J., The Solar Chemical Composition, *Space Sci. Rev.*, 2007, vol. 130, p. 105
- Griffith E., Johnson J. A., Weinberg D. H., Abundance Ratios in GALAH DR2 and Their Implications for Nucleosynthesis, *ApJ*, 2019, vol. 886, p. 84
- Grillmair C. J., Substructure in Tidal Streams: Tributaries in the Anticenter Stream, *ApJ*, 2006, vol. 651, p. L29–L32
- Guglielmo M., Lane R. R., Conn B. C., Ho A. Y. Q., Ibata R. A., Lewis G. F., On the origin of the Monoceros Ring - I. Kinematics, proper motions, and the nature of the progenitor, *MNRAS*, 2018, vol. 474, p. 4584
- Hasselquist S., Hayes C. R., Lian J., Weinberg D. H., Zasowski G., Horta D., Beaton R., Feuillet D. K., Garro E. R., Gallart C., Smith V. V., et al., APOGEE Chemical Abundance Patterns of the Massive Milky Way Satellites, *ApJ*, 2021, vol. 923, p. 172
- Hayes C. R., Majewski S. R., Hasselquist S., Beaton R. L., Cunha K., Smith V. V., Price-Whelan A. M., Anguiano B., Beers T. C., Carrera R., Fernández-Trincado J. G., Frinchaboy P. M., García-Hernández D. A., Lane R. R., Nidever D. L., Nitschelm C., Roman-Lopes A., Zamora O., Disk-like Chemistry of the Triangulum-Andromeda Overdensity as Seen by APOGEE, *ApJ*, 2018, vol. 859, p. L8
- Hayes C. R., Majewski S. R., Shetrone M., Fernández-Alvar E., Allende Prieto C., Schuster W. J., Carigi L., Cunha K., Smith V. V., Sobeck J., Almeida A., Beers T. C., Carrera R., Fernández-Trincado J. G., García-Hernández D. A., Geisler D., Lane R. R., Lucatello S., Matthews A. M., Minniti D., Nitschelm C., Tang B., Tissera P. B., Zamora O., Disentangling the Galactic Halo with APOGEE. I. Chemical and Kinematical Investigation of Distinct Metal-poor Populations, *ApJ*, 2018, vol. 852, p. 49
- Haywood M., Di Matteo P., Lehnert M. D., Snaith O., Khoperskov S., Gómez A., In Disguise or Out of Reach: First Clues about In Situ and Accreted Stars in the Stellar Halo of the Milky Way from Gaia DR2, *ApJ*, 2018, vol. 863, p. 113

- Helmi A., The stellar halo of the Galaxy, *A&A Rev.*, 2008, vol. 15, p. 145
- Helmi A., Streams, Substructures, and the Early History of the Milky Way, *ARA&A*, 2020, vol. 58, p. 205
- Helmi A., Babusiaux C., Koppelman H. H., Massari D., Veljanoski J., Brown A. G., 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, *MNRAS*, 1999, vol. 307, p. 495
- Hendel D., Johnston K. V., Tidal debris morphology and the orbits of satellite galaxies, *MNRAS*, 2015, vol. 454, p. 2472
- Herwig F., Evolution of Asymptotic Giant Branch Stars, *ARA&A*, 2005, vol. 43, p. 435
- Holmbeck E. M., Hansen T. T., Beers T. C., Placco V. M., Whitten D. D., Rasmussen K. C., Roederer I. U., Ezzeddine R., Sakari C. M., Frebel A., Drout M. R., Simon J. D., Thompson I. B., Bland-Hawthorn J., Gibson B. K., Grebel E. K., Kordopatis G., Kunder A., Meléndez J., Navarro J. F., Reid W. A., Seabroke G., Steinmetz M., Watson F., Wyse R. F. G., The R-Process Alliance: Fourth Data Release from the Search for R-process-enhanced Stars in the Galactic Halo, *ApJS*, 2020, vol. 249, p. 30
- Horta D., Ness M. K., Rybizki J., Schiavon R. P., Buder S., Neutron-capture elements record the ordered chemical evolution of the disc over time, *MNRAS*, 2022, vol. 513, p. 5477
- 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, *MNRAS*, 2023, vol. 520, p. 5671
- Ibata R., Malhan K., Martin N., Aubert D., Famaey B., Bianchini P., Monari G., Siebert A., Thomas G. F., Bellazzini M., Bonifacio P., Caffau E., Renaud F., Charting the

- Galactic acceleration field I. A search for stellar streams with Gaia DR2 and EDR3 with follow-up from ESPaDOnS and UVES, arXiv e-prints, 2020
- Ibata R., Malhan K., Martin N., Aubert D., Famaey B., Bianchini P., Monari G., Siebert A., Thomas G. F., Bellazzini M., Bonifacio P., Caffau E., Renaud F., Charting the Galactic Acceleration Field. I. A Search for Stellar Streams with Gaia DR2 and EDR3 with Follow-up from ESPaDOnS and UVES, *ApJ*, 2021, vol. 914, p. 123
- Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., A dwarf satellite galaxy in Sagittarius, *Nature*, 1994, vol. 370, p. 194
- Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., Sagittarius: the nearest dwarf galaxy, *MNRAS*, 1995, vol. 277, p. 781
- Iorio G., Belokurov V., The shape of the Galactic halo with Gaia DR2 RR Lyrae. Anatomy of an ancient major merger, *MNRAS*, 2019, vol. 482, p. 3868
- Iwamoto K., Brachwitz F., Nomoto K., Kishimoto N., Umeda H., Hix W. R., Thielemann F.-K., Nucleosynthesis in Chandrasekhar Mass Models for Type IA Supernovae and Constraints on Progenitor Systems and Burning-Front Propagation, *ApJS*, 1999, vol. 125, p. 439
- Jha S., Bianco F., Brandt W. N., Galaz G., Gawiser E., Gizis J., Hložek R., Kaviraj S., Newman J. A., Verma A., Wood-Vasey W. M., Next Generation LSST Science. In *Bulletin of the American Astronomical Society* , vol. 51, 2019, p. 268
- Ji A. P., Li T. S., Hansen T. T., Casey A. R., Koposov S. E., Pace A. B., Mackey D., Lewis G. F., Simpson J. D., Bland-Hawthorn J., Cullinane L. R., Da Costa G. S., Hattori K., Martell S. L., Kuehn K., Erkal D., Shipp N., Wan Z., Zucker D. B., The Southern Stellar Stream Spectroscopic Survey (S⁵): Chemical Abundances of Seven Stellar Streams, *AJ*, 2020, vol. 160, p. 181
- Ji A. P., Naidu R. P., Brauer K., Ting Y.-S., Simon J. D., Chemical abundances of the typhon stellar stream, *MNRAS*, 2022
- Johnston K. V., A Prescription for Building the Milky Way's Halo from Disrupted Satellites, *ApJ*, 1998, vol. 495, p. 297

- Johnston K. V., Telling Tails about the Milky way. In *The Shapes of Galaxies and their Dark Halos*, 2002, p. 194
- Johnston K. V., Price-Whelan A. M., Bergemann M., Laporte C., Li T. S., Sheffield A. A., Majewski S. R., Beaton R. S., Sesar B., Sharma S., *Disk Heating, Galactoseismology, and the Formation of Stellar Halos, Galaxies*, 2017, vol. 5, p. 44
- Johnston K. V., Sheffield A. A., Majewski S. R., Sharma S., Rocha-Pinto H. J., *Probing the Halo from the Solar Vicinity to the Outer Galaxy: Connecting Stars in Local Velocity Structures to Large-scale Clouds, ApJ*, 2012, vol. 760, p. 95
- Jurić M., Ivezić Ž., Brooks A., Lupton R. H., Schlegel D., Finkbeiner D., Padmanabhan N., Bond N., Sesar B., Rockosi C. M., et al., *The Milky Way tomography with SDSS. I. Stellar number density distribution, ApJ*, 2008, vol. 673, p. 864
- Karakas A. I., Lattanzio J. C., *The Dawes Review 2: Nucleosynthesis and Stellar Yields of Low- and Intermediate-Mass Single Stars, PASA*, 2014, vol. 31, p. e030
- Kazantzidis S., Bullock J. S., Zentner A. R., Kravtsov A. V., Moustakas L. A., *Cold Dark Matter Substructure and Galactic Disks. I. Morphological Signatures of Hierarchical Satellite Accretion, ApJ*, 2008, vol. 688, p. 254
- Kazantzidis S., Zentner A. R., Kravtsov A. V., Bullock J. S., Debattista V. P., *Cold Dark Matter Substructure and Galactic Disks. II. Dynamical Effects of Hierarchical Satellite Accretion, ApJ*, 2009, vol. 700, p. 1896
- Kirby E. N., Xie J. L., Guo R., de los Reyes M. A. C., Bergemann M., Kovalev M., Shen K. J., Piro A. L., McWilliam A., *Evidence for Sub-Chandrasekhar Type Ia Supernovae from Stellar Abundances in Dwarf Galaxies, ApJ*, 2019, vol. 881, p. 45
- Koppelman H., Helmi A., Veljanoski J., *One Large Blob and Many Streams Frosting the nearby Stellar Halo in Gaia DR2, ApJ*, 2018, vol. 860, p. L11
- 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, A&A*, 2019, vol. 631, p. L9

-
- Kovalev M., Brinkmann S., Bergemann M., MPIA IT-department, 2018 NLTE MPIA web server, [Online]. Available: <http://nlte.mpia.de> Max Planck Institute for Astronomy, Heidelberg.
- Laporte C. F. P., Belokurov V., Koposov S. E., Smith M. C., Hill V., Chemo-dynamical properties of the Anticenter Stream: a surviving disc fossil from a past satellite interaction., *MNRAS*, 2020, vol. 492, p. L61
- Laporte C. F. P., Johnston K. V., Gómez F. A., Garavito-Camargo N., Besla G., The influence of Sagittarius and the Large Magellanic Cloud on the stellar disc of the Milky Way Galaxy, *MNRAS*, 2018, vol. 481, p. 286
- Laporte C. F. P., Koposov S. E., Belokurov V., Kinematics beats dust: unveiling nested substructure in the perturbed outer disc of the Milky Way, *MNRAS*, 2022, vol. 510, p. L13
- Laporte C. F. P., Minchev I., Johnston K. V., Gómez F. A., Footprints of the Sagittarius dwarf galaxy in the Gaia data set, *MNRAS*, 2019, vol. 485, p. 3134
- Larsen S. S., Eitner P., Magg E., Bergemann M., Moltzer C. A. S., Brodie J. P., Romanowsky A. J., Strader J., The chemical composition of globular clusters in the Local Group, *A&A*, 2022, vol. 660, p. A88
- Lattimer J. M., Schramm D. N., Black-Hole-Neutron-Star Collisions, *ApJ*, 1974, vol. 192, p. L145
- Law D. R., Johnston K. V., Majewski S. R., A Two Micron All-Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. IV. Modeling the Sagittarius Tidal Tails, *ApJ*, 2005, vol. 619, p. 807
- Li C., Zhao G., Zhai M., Jia Y., The Formation and Evolution of Galactic Disks with APOGEE and the Gaia Survey, *ApJ*, 2018, vol. 860, p. 53
- Li J., Xue X.-X., Liu C., Zhang B., Rix H.-W., Carlin J. L., Yang C., Mendez R. A., Zhong J., Tian H., Zhang L., Xu Y., Wu Y., Zhao G., Chang R., Exploring the Galactic Anticenter Substructure with LAMOST and Gaia DR2, *ApJ*, 2021, vol. 910, p. 46

- Li T., Balbinot E., Mondrik N., Marshall J. L., Yanny B., Bechtol K., Drlica-Wagner A., Oscar D., Santiago B., Simon J. D., et al., Discovery of a stellar overdensity in Eridanus–Phoenix in the Dark Energy Survey, *ApJ*, 2016, vol. 817, p. 135
- Li T. S., Sheffield A. A., Johnston K. V., Marshall J. L., Majewski S. R., Price-Whelan A. M., Damke G. J., Beaton R. L., Bernard E. J., Richardson W., Sharma S., Sesar B., Exploring Halo Substructure with Giant Stars. XV. Discovery of a Connection between the Monoceros Ring and the Triangulum-Andromeda Overdensity?, *ApJ*, 2017, vol. 844, p. 74
- Limberg G., Rossi S., Beers T. C., Perottoni H. D., Pérez-Villegas A., Santucci R. M., Abuchaim Y., Placco V. M., Lee Y. S., Christlieb N., Norris J. E., Bessell M. S., Ryan S. G., Wilhelm R., Rhee J., Frebel A., Dynamically Tagged Groups of Very Metal-poor Halo Stars from the HK and Hamburg/ESO Surveys, *ApJ*, 2021, vol. 907, p. 10
- Limberg G., Santucci R. M., Rossi S., Queiroz A. B. A., Chiappini C., Souza S. O., Perottoni H. D., Pérez-Villegas A., Barbosa F. O., Abundance Patterns of α and Neutron-capture Elements in the Helmi Stream, *ApJ*, 2021, vol. 913, p. L28
- 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, *ApJ*, 2022, vol. 935, p. 109
- Lind K., Bergemann M., Asplund M., Non-LTE line formation of Fe in late-type stars - II. 1D spectroscopic stellar parameters, *MNRAS*, 2012, vol. 427, p. 50
- Lind K., Nordlander T., Wehrhahn A., Montelius M., Osorio Y., Barklem P. S., Afşar M., Sneden C., Kobayashi C., Non-LTE abundance corrections for late-type stars from 2000 Å to 3 μ m. I. Na, Mg, and Al, *A&A*, 2022, vol. 665, p. A33
- Lindgren L., Bastian U., Biermann M., Bombrun A., de Torres A., Gerlach E., Geyer R., Hernández J., Hilger T., Hobbs D., Klioner S. A., Lammers U., McMillan P. J., Ramos-Lerate M., Steidelmüller H., Stephenson C. A., et al., Gaia Early Data Release 3. Parallax bias versus magnitude, colour, and position, *A&A*, 2021, vol. 649, p. A4
- Lindgren L., Klioner S. A., Hernández J., Bombrun A., Ramos-Lerate M., Steidelmüller

-
- H., Bastian U., Biermann M., de Torres A., Gerlach E., Geyer R., et al., Gaia Early Data Release 3. The astrometric solution, *A&A*, 2021, vol. 649, p. A2
- López-Corredoira M., Momany Y., Zaggia S., Cabrera-Lavers A., Re-affirming the connection between the Galactic stellar warp and the Canis Major over-density, *A&A*, 2007, vol. 472, p. L47
- Lynden-Bell D., Lynden-Bell R., Ghostly streams from the formation of the Galaxy's halo, *MNRAS*, 1995, vol. 275, p. 429
- 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, *MNRAS*, 2019, vol. 482, p. 3426
- Majewski S. R., Ostheimer J. C., Rocha-Pinto H. J., Patterson R. J., Guhathakurta P., Reitzel D., Detection of the Main-Sequence Turnoff of a Newly Discovered Milky Way Halo Structure in the Triangulum-Andromeda Region, *ApJ*, 2004, vol. 615, p. 738
- 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, *ApJ*, 2003, vol. 599, p. 1082–1115
- Marshall J., Bolton A., Bullock J., Burgasser A., Chambers K., DePoy D., Dey A., Flagey N., Hill A., Hillenbrand The Maunakea Spectroscopic Explorer. In *Bulletin of the American Astronomical Society* , vol. 51, 2019, p. 126
- Martin N. F., Ibata R. A., Bellazzini M., Irwin M. J., Lewis G. F., Dehnen W., Why the Canis Major overdensity is not due to the Warp: analysis of its radial profile onto the Milky Way. In *SF2A-2004: Semaine de l'Astrophysique Francaise* , 2004, p. 619
- Martin N. F., Ibata R. A., Irwin M., Galactic Halo Stellar Structures in the Triangulum-Andromeda Region, *ApJ*, 2007, vol. 668, p. L123
- Martin N. F., Ibata R. A., Rich R. M., Collins M. L. M., Fardal M. A., Irwin M. J., Lewis G. F., McConnachie A. W., Babul A., Bate N. F., Chapman S. C., Conn A. R.,

- Crnojević D., Ferguson A. M. N., Mackey A. D., Navarro J. F., Peñarrubia J., Tanvir N. T., Valls-Gabaud D., The PAndAS Field of Streams: Stellar Structures in the Milky Way Halo toward Andromeda and Triangulum, *ApJ*, 2014, vol. 787, p. 19
- Martínez-Delgado D., Cooper A. P., Román J., Pillepich A., Erkal D., Pearson S., Moustakas J., Laporte C. F. P., Laine S., Akhlaghi M., Lang D., Makarov D., Borlaff A. S., Donatiello G., Pearson W. J., Miró-Carretero J., Cuillandre J.-C., Domínguez H., Roca-Fàbrega S., Frenk C. S., Schmidt J., Gómez-Flechoso M. A., Guzman R., Libeskind N. I., Dey A., Weaver B. A., Schlegel D., Myers A. D., Valdes F. G., Hidden depths in the local Universe: The Stellar Stream Legacy Survey, *A&A*, 2023, vol. 671, p. A141
- Martioli E., Teeple D., Manset N., Devost D., Withington K., Venne A., Tannock M., Open source pipeline for ESPaDOnS reduction and analysis. In *Software and Cyberinfrastructure for Astronomy II* , vol. 8451 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2012, p. 84512B
- Mashonkina L., Korn A. J., Przybilla N., A non-LTE study of neutral and singly-ionized calcium in late-type stars, *A&A*, 2007, vol. 461, p. 261
- Mateu C., galstreams: A library of Milky Way stellar stream footprints and tracks, *MNRAS*, 2023, vol. 520, p. 5225
- Matsuno T., Hirai Y., Tarumi Y., Hotokezaka K., Tanaka M., Helmi A., R-process enhancements of Gaia-Enceladus in GALAH DR3, *A&A*, 2021, vol. 650, p. A110
- Matteucci F., Brocato E., Metallicity Distribution and Abundance Ratios in the Stars of the Galactic Bulge, *ApJ*, 1990, vol. 365, p. 539
- Matteucci F., Francois P., Galactic chemical evolution : abundance gradients of individual elements., *MNRAS*, 1989, vol. 239, p. 885
- Matteucci F., Recchi S., On the Typical Timescale for the Chemical Enrichment from Type Ia Supernovae in Galaxies, *ApJ*, 2001, vol. 558, p. 351
- McConnachie A. W., The Pan-Andromeda Archaeological Survey: Galaxy Formation In The Near-Field. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #213* , vol. 213 of American Astronomical Society Meeting Abstracts, 2009, p. 307.05

-
- McMillan P. J., The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way, *MNRAS*, 2017, vol. 465, p. 76
- McMillan P. J., Binney J. J., Disassembling the Galaxy with angle-action coordinates, *MNRAS*, 2008, vol. 390, p. 429
- McWilliam A., Abundance Ratios and Galactic Chemical Evolution, *ARA&A*, 1997, vol. 35, p. 503
- Meisner A. M., Frebel A., Jurić M., Finkbeiner D. P., The Metallicity of the Monoceros Stream, *ApJ*, 2012, vol. 753, p. 116
- Momany Y., Zaggia S., Gilmore G., Piotto G., Carraro G., Bedin L. R., de Angeli F., Outer structure of the Galactic warp and flare: explaining the Canis Major over-density, *A&A*, 2006, vol. 451, p. 515
- Momany Y., Zaggia S. R., Bonifacio P., Piotto G., De Angeli F., Bedin L. R., Carraro G., Probing the Canis Major stellar over-density as due to the Galactic warp, *A&A*, 2004, vol. 421, p. L29
- Morganson E., Conn B., Rix H.-W., Bell E. F., Burgett W. S., Chambers K., Dolphin A., Draper P. W., Flewelling H., Hodapp K., Kaiser N., Magnier E. A., Martin N. F., Martinez-Delgado D., Metcalfe N., Schlafly E. F., Slater C. T., Wainscoat R. J., Waters C. Z., Mapping the Monoceros Ring in 3D with Pan-STARRS1, *ApJ*, 2016, vol. 825, p. 140
- Morinaga Y., Ishiyama T., Kirihara T., Kinjo K., Statistical properties of substructures around Milky Way-sized haloes and their implications for the formation of stellar streams, *MNRAS*, 2019, vol. 487, p. 2718
- Mösta P., Richers S., Ott C. D., Haas R., Piro A. L., Boydston K., Abdikamalov E., Reisswig C., Schnetter E., Magnetorotational Core-collapse Supernovae in Three Dimensions, *ApJ*, 2014, vol. 785, p. L29
- Munari U., Sordo R., Castelli F., Zwitter T., An extensive library of 2500 10 500 Å synthetic spectra, *A&A*, 2005, vol. 442, p. 1127

- Myeong G. C., Belokurov V., Aguado D. S., Evans N. W., Caldwell N., Bradley J., Milky Way's Eccentric Constituents with Gaia, APOGEE, and GALAH, *ApJ*, 2022, vol. 938, p. 21
- Myeong G. C., Evans N. W., Belokurov V., Sanders J. L., Koposov S. E., The Milky Way Halo in Action Space, *ApJ*, 2018, vol. 856, p. L26
- 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, *MNRAS*, 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, *ApJ*, 2020, vol. 901, p. 48
- Naidu R. P., Conroy C., Bonaca A., Zaritsky D., Weinberger R., Ting Y.-S., Caldwell N., Tacchella S., Han J. J., Speagle J. S., Cargile P. A., Reconstructing the Last Major Merger of the Milky Way with the H3 Survey, *ApJ*, 2021, vol. 923, p. 92
- Naidu R. P., Ji A. P., Conroy C., Bonaca A., Ting Y.-S., Zaritsky D., van Son L. A. C., Broekgaarden F. S., Tacchella S., Chandra V., Caldwell N., Cargile P., Speagle J. S., Evidence from Disrupted Halo Dwarfs that r-process Enrichment via Neutron Star Mergers is Delayed by $\gtrsim 500$ Myr, *ApJ*, 2022, vol. 926, p. L36
- Newberg H. J., Carlin J. L., et al., Tidal Streams in the Local Group and Beyond, *Astrophysics and Space Science Library*, 2016, vol. 420
- Newberg H. J., Yanny B., Rockosi C., Grebel E. K., Rix H.-W., Brinkmann J., Csabai I., Hennessy G., Hindsley R. B., Ibata R., Ivezić Z., Lamb D., Nash E. T., Odenkirchen M., Rave H. A., Schneider D. P., Smith J. A., Stolte A., York D. G., The Ghost of Sagittarius and Lumps in the Halo of the Milky Way, *ApJ*, 2002, vol. 569, p. 245
- Newberg H. J., Yanny B., Willett B. A., Discovery of a New, Polar-Orbiting Debris Stream in the Milky Way Stellar Halo, *ApJ*, 2009, vol. 700, p. L61
- Nissen P. E., Schuster W. J., Two distinct halo populations in the solar neighborhood. Evidence from stellar abundance ratios and kinematics, *A&A*, 2010, vol. 511, p. L10

- Nissen P. E., Schuster W. J., Two distinct halo populations in the solar neighborhood. II. Evidence from stellar abundances of Mn, Cu, Zn, Y, and Ba, *A&A*, 2011, vol. 530, p. A15
- Panithanpaisal N., Sanderson R. E., Wetzel A., Cunningham E. C., Bailin J., Faucher-Giguère C.-A., The Galaxy Progenitors of Stellar Streams around Milky Way-mass Galaxies in the FIRE Cosmological Simulations, *ApJ*, 2021, vol. 920, p. 10
- Pearson S., Price-Whelan A. M., Hogg D. W., Seth A. C., Sand D. J., Hunt J. A. S., Crnojević D., Mapping Dark Matter with Extragalactic Stellar Streams: The Case of Centaurus A, *ApJ*, 2022, vol. 941, p. 19
- Perottoni H. D., Limberg G., Amarante J. A. S., Rossi S., Queiroz A. B. A., Santucci R. M., Perez-Villegas A., Chiappini C., The Unmixed Debris of Gaia-Sausage/Enceladus in the Form of a Pair of Halo Stellar Overdensities, *arXiv e-prints*, 2022, p. arXiv:2207.11869
- Perottoni H. D., Limberg G., Amarante J. A. S., Rossi S., Queiroz A. B. A., Santucci R. M., Pérez-Villegas A., Chiappini C., The Unmixed Debris of Gaia-Sausage/Enceladus in the Form of a Pair of Halo Stellar Overdensities, *ApJ*, 2022, vol. 936, p. L2
- Perottoni H. D., Martin C., Newberg H. J., Rocha-Pinto H. J., Almeida-Fernandes F. d., Gomes-Júnior A. R., A cold stellar stream in Pegasus, *MNRAS*, 2019, vol. 486, p. 843
- Perottoni H. D., Rocha-Pinto H. J., Girardi L., Balbinot E., Santiago B. X., Majewski S. R., Anders F., Da Costa L., Maia M. A. G., Cartography of Triangulum-Andromeda using SDSS stars, *MNRAS*, 2018, vol. 473, p. 1461
- Poggio E., Laporte C. F. P., Johnston K. V., D’Onghia E., Drimmel R., Grion Filho D., Measuring the vertical response of the Galactic disc to an infalling satellite, *MNRAS*, 2021, vol. 508, p. 541
- Price-Whelan A. M., Johnston K. V., Sheffield A. A., Laporte C. F. P., Sesar B., A reinterpretation of the Triangulum-Andromeda stellar clouds: a population of halo stars kicked out of the Galactic disc, *MNRAS*, 2015, vol. 452, p. 676
- Prieto C. A., Majewski S., Schiavon R., Cunha K., Frinchaboy P., Holtzman J., Johnston K., Shetrone M., Skrutskie M., Smith V., et al., APOGEE: the Apache point observatory

- galactic evolution experiment, *Astronomische Nachrichten: Astronomical Notes*, 2008, vol. 329, p. 1018
- Purcell C. W., Bullock J. S., Tollerud E. J., Rocha M., Chakrabarti S., The Sagittarius impact as an architect of spirality and outer rings in the Milky Way, *Nature*, 2011, vol. 477, p. 301
- Queiroz A. B. A., Anders F., Chiappini C., Khalatyan A., Santiago B. X., Nepal S., Steinmetz M., Gallart C., Valentini M., Dal Ponte M., Barbuy B., Pérez-Villegas A., Masseron T., Fernández-Trincado J. G., Khoperskov S., Minchev I., Fernández-Alvar E., Lane R. R., Nitschelm C., StarHorse results for spectroscopic surveys + Gaia DR3: Chrono-chemical populations in the solar vicinity, the genuine thick disk, and young-alpha rich stars, arXiv e-prints, 2023, p. arXiv:2303.09926
- Queiroz A. B. A., Anders F., Chiappini C., Khalatyan A., Santiago B. X., Steinmetz M., Valentini M., Miglio A., Bossini D., Barbuy B., Minchev I., Minniti D., García Hernández D. A., Schultheis M., Beaton R. L., Beers T. C., Bizyaev D., Brownstein J. R., Cunha K., Fernández-Trincado J. G., Frinchaboy P. M., Lane R. R., Majewski S. R., Nataf D., Nitschelm C., Pan K., Roman-Lopes A., Sobeck J. S., Stringfellow G., Zamora O., From the bulge to the outer disc: StarHorse stellar parameters, distances, and extinctions for stars in APOGEE DR16 and other spectroscopic surveys, *A&A*, 2020, vol. 638, p. A76
- Queiroz A. B. A., Anders F., Santiago B. X., Chiappini C., Steinmetz M., Dal Ponte M., Stassun K. G., da Costa L. N., Maia M. A. G., Crestani J., Beers T. C., Fernández-Trincado J. G., García-Hernández D. A., Roman-Lopes A., Zamora O., StarHorse: a Bayesian tool for determining stellar masses, ages, distances, and extinctions for field stars, *MNRAS*, 2018, vol. 476, p. 2556
- 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., et al., The Milky Way bar and bulge revealed by APOGEE and Gaia EDR3, *A&A*, 2021, vol. 656, p. A156
- Ramírez I., Allende Prieto C., Fundamental parameters and chemical composition of Arcturus, *The Astrophysical Journal*, 2011, vol. 743, p. 135

- Ramírez 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
- Ramos P., Antoja T., Mateu C., Anders F., Laporte C. F. P., Carballo-Bello J. A., Famaey B., Ibata R., The outer disc in shambles: Blind detection of Monoceros and the ACS with Gaia’s astrometric sample, *A&A*, 2021, vol. 646, p. A99
- Ratcliffe B., Ness M., , 2022 The chemical enrichment of the Milky Way disk evaluated using conditional abundances
- Reggiani H. M., Differential abundances in metal-poor stars: impact in the study of the Galaxy, stellar evolution and Big Bang nucleosynthesis, Universidade de São Paulo, 2019, Tese de Doutorado
- Reichert M., Obergaulinger M., Eichler M., Aloy M. Á ., Arcones A., Nucleosynthesis in magneto-rotational supernovae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021
- Rocha-Pinto H. J., Majewski S. R., Skrutskie M., Crane J. D., Tracing the Galactic anti-center stellar stream with 2MASS M giants, *ApJ*, 2003, vol. 594, p. L115
- Rocha-Pinto H. J., Majewski S. R., Skrutskie M. F., Crane J. D., Patterson R. J., Exploring Halo Substructure with Giant Stars: A Diffuse Star Cloud or Tidal Debris around the Milky Way in Triangulum-Andromeda, *ApJ*, 2004, vol. 615, p. 732
- Rosswog S., Liebendörfer M., Thielemann F. K., Davies M. B., Benz W., Piran T., Mass ejection in neutron star mergers, *A&A*, 1999, vol. 341, p. 499
- Sales Silva J. V., Cunha K., Perottoni H. D., Rocha-Pinto H. J., Daflon S., Almeida-Fernandes F., Souto D., Majewski S. R., The Abundance Pattern of α Elements in the Triangulum-Andromeda Overdensity, *ApJ*, 2020, vol. 901, p. 27
- Sales-Silva J. V., Daflon S., Cunha K., Souto D., Smith V. V., Chiappini C., Donor J., Frinchaboy P. M., García-Hernández D. A., Hayes C., Majewski S. R., Masseron T., Schiavon R. P., Weinberg D. H., Beaton R. L., Fernández-Trincado J. G., Jönsson H.,

- Lane R. R., Minniti D., Machado A., Moni Bidin C., Nitschelm C., O'Connell J., Villanova S., Exploring the S-process History in the Galactic Disk: Cerium Abundances and Gradients in Open Clusters from the OCCAM/APOGEE Sample, *ApJ*, 2022, vol. 926, p. 154
- Sales Silva J. V., Perottoni H. D., Cunha K., Rocha-Pinto H. J., Almeida-Fernandes F., Souto D., Majewski S. R., Triangulum-Andromeda Overdensity: a Region with a Complex Stellar Population, *ApJ*, 2019, vol. 886, p. 113
- Sánchez E., Des Collaboration The Dark Energy Survey. In *Journal of Physics Conference Series*, vol. 259 of *Journal of Physics Conference Series*, 2010, p. 012080
- Santana F. A., Beaton R. L., Covey K. R., O'Connell J. E., et al., Final Targeting Strategy for the SDSS-IV APOGEE-2S Survey, *AJ*, 2021, vol. 162, p. 303
- Santiago B. X., Brauer D. E., Anders F., Chiappini C., Queiroz A. B., Girardi L., Rocha-Pinto H. J., Balbinot E., da Costa L. N., Maia M. A. G., Schultheis M., Steinmetz M., Miglio A., Montalbán J., Schneider D. P., Beers T. C., Frinchaboy P. M., Lee Y. S., Zasowski G., Spectro-photometric distances to stars: A general purpose Bayesian approach, *A&A*, 2016, vol. 585, p. A42
- Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M., Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds, *ApJ*, 1998, vol. 500, p. 525
- Schlegel D. J., Kollmeier J. A., Aldering G., Bailey S., Baltay C., Bebek C., BenZvi S., Besuner R., Blanc G., Bolton A. S., Bonaca A., Bouri M., Brooks D., Buckley-Geer E., Cai Z., Crane J., Demina R., DeRose J., Dey A., Doel P., Fan The MegaMapper: A Stage-5 Spectroscopic Instrument Concept for the Study of Inflation and Dark Energy, *arXiv e-prints*, 2022, p. arXiv:2209.04322
- Schönrich R., Binney J., Dehnen W., Local kinematics and the local standard of rest, *MNRAS*, 2010, vol. 403, p. 1829
- Schönrich R., Dehnen W., Warp, waves, and wrinkles in the Milky Way, *MNRAS*, 2018, vol. 478, p. 3809

- Searle L., Zinn R., Composition of halo clusters and the formation of the galactic halo., *ApJ*, 1978, vol. 225, p. 357
- Sesar B., Ivezić Ž., Lupton R. H., Jurić M., Gunn J. E., Knapp G. R., De Lee N., Smith J. A., Miknaitis G., Lin H., et al., Exploring the variable sky with the Sloan Digital Sky Survey, *AJ*, 2007, vol. 134, p. 2236
- Sharma S., Johnston K. V., Majewski S. R., Muñoz R. R., Carlberg J. K., Bullock J., Group Finding in the Stellar Halo Using M-giants in the Two Micron All Sky Survey: An Extended View of the Pisces Overdensity?, *ApJ*, 2010, vol. 722, p. 750
- Sheffield A. A., Johnston K. V., Majewski S. R., Damke G., Richardson W., Beaton R., Rocha-Pinto H. J., Exploring Halo Substructure with Giant Stars. XIV. The Nature of the Triangulum-Andromeda Stellar Features, *ApJ*, 2014, vol. 793, p. 62
- Sheffield A. A., Price-Whelan A. M., Tzanidakis A., Johnston K. V., Laporte C. F. P., Sesar B., A Disk Origin for the Monoceros Ring and A13 Stellar Overdensities, *ApJ*, 2018, vol. 854, p. 47
- Sheinis A. I., Anthony A., Baker G., Burley G. S., Churilov V., Edgar M., Ireland M., Kondrat Y., Pazder J., Robertson G., et al., The gemini high-resolution optical spectrograph (ghost). In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI* , vol. 9908, 2017, p. 332
- Shipp N., Drlica-Wagner A., Balbinot E., Ferguson P., Erkal D., Li T. S., Bechtol K., Belokurov V., Buncher B., Carollo D., et al. Stellar Streams Discovered in the Dark Energy Survey, *ApJ*, 2018, vol. 862, p. 114
- Simon J. D., The faintest dwarf galaxies, *ARAA*, 2019, vol. 57, p. 375
- Simpson C. M., Gargiulo I., Gómez F. A., Grand R. J. J., Maffione N., Cooper A. P., Deason A. J., Frenk C., Helly J., Marinacci F., Pakmor R., Simulating cosmological substructure in the solar neighbourhood, *MNRAS*, 2019, vol. 490, p. L32
- Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R., Weinberg M. D., Schneider S., Carpenter J. M., Beichman C., Capps R., Chester T., Elias J., Huchra J., Liebert J., Lonsdale C., Monet D. G., Price S., Seitzer P., Jarrett T., Kirkpatrick J. D., Gizis J. E., Howard E., Evans

- T., Fowler J., Fullmer L., Hurt R., Light R., Kopan E. L., Marsh K. A., McCallon H. L., Tam R., Van Dyk S., Wheelock S., The Two Micron All Sky Survey (2MASS), *AJ*, 2006, vol. 131, p. 1163
- Snedden C. A., Carbon and Nitrogen Abundances in Metal-Poor Stars., University of Texas, Austin, 1973, Tese de Doutorado
- Somerville R. S., Davé R., Physical Models of Galaxy Formation in a Cosmological Framework, *ARA&A*, 2015, vol. 53, p. 51
- Spiegel D. N., Bean R., Doré O., Nolta M. R., Bennett C. L., Dunkley J., Hinshaw G., Jarosik N., Komatsu E., Page L., Peiris H. V., Verde L., Halpern M., Hill R. S., Kogut A., Limon M., Meyer S. S., Odegard N., Tucker G. S., Weiland J. L., Wollack E., Wright E. L., Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications for Cosmology, *ApJS*, 2007, vol. 170, p. 377
- Spitoni E., Silva Aguirre V., Matteucci F., Calura F., Grisoni V., Galactic Archaeology with asteroseismic ages: Evidence for delayed gas infall in the formation of the Milky Way disc, *A&A*, 2019, vol. 623, p. A60
- Suda T., Hidaka J., Aoki W., Katsuta Y., Yamada S., Fujimoto M. Y., Ohtani Y., Masuyama M., Noda K., Wada K., Stellar Abundances for Galactic Archaeology Database. IV. Compilation of stars in dwarf galaxies, *PASJ*, 2017, vol. 69, p. 76
- Suda T., Katsuta Y., Yamada S., Suwa T., Ishizuka C., Komiya Y., Sorai K., Aikawa M., Fujimoto M. Y., Stellar Abundances for the Galactic Archeology (SAGA) Database — Compilation of the Characteristics of Known Extremely Metal-Poor Stars, *PASJ*, 2008, vol. 60, p. 1159
- Tanaka M., Chiba M., Komiyama Y., Resolved Stellar Streams around NGC 4631 from a Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey, *ApJ*, 2017, vol. 842, p. 127
- Thielemann F. K., Eichler M., Panov I. V., Wehmeyer B., Neutron Star Mergers and Nucleosynthesis of Heavy Elements, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2017, vol. 67, p. 253

- Thielemann F.-K., Wehmeyer B., Wu M.-R., r-Process Sites, their Ejecta Composition, and their Imprint in Galactic Chemical Evolution. In *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1668 of *Journal of Physics Conference Series*, 2020, p. 012044
- Tody D., The IRAF Data Reduction and Analysis System. In *Instrumentation in astronomy VI*, vol. 627 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 1986, p. 733
- van der Kruit P. C., Freeman K. C., *Galaxy Disks*, *ARA&A*, 2011, vol. 49, p. 301
- Vasiliev E., AGAMA: action-based galaxy modelling architecture, *MNRAS*, 2019, vol. 482, p. 1525
- Vasiliev E., Belokurov V., Erkal D., Tango for three: Sagittarius, LMC, and the Milky Way, *MNRAS*, 2021, vol. 501, p. 2279
- Ventura P., Carini R., D'Antona F., A deep insight into the Mg-Al-Si nucleosynthesis in massive asymptotic giant branch and super-asymptotic giant branch stars, *MNRAS*, 2011, vol. 415, p. 3865
- Vera-Casanova A., Gómez F. A., Monachesi A., Gargiulo I., Pallerò D., Grand R. J. J., Marinacci F., Pakmor R., Simpson C. M., Frenk C. S., Morales G., Linking the brightest stellar streams with the accretion history of Milky Way like galaxies, *MNRAS*, 2022, vol. 514, p. 4898
- Wanajo S., Nomoto K., Janka H. T., Kitauro F. S., Müller B., Nucleosynthesis in Electron Capture Supernovae of Asymptotic Giant Branch Stars, *ApJ*, 2009, vol. 695, p. 208
- Wang F., Zhang H.-W., Xue X.-X., Huang Y., Liu G.-C., Zhang L., Yang C.-Q., Probing the Galactic halo with RR Lyrae stars – II. The substructures of the Milky Way, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, vol. 513, p. 1958
- Watkins L. L., Evans N. W., Belokurov V., Smith M., Hewett P. C., Bramich D. M., Gilmore G. F., Irwin M., Vidrih S., Wyrzykowski L., et al., Substructure revealed by RR Lyraes in SDSS Stripe 82, *MNRAS*, 2009, vol. 398, p. 1757
- White S. D. M., Rees M. J., Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering., *MNRAS*, 1978, vol. 183, p. 341

- Widrow L. M., Gardner S., Yanny B., Dodelson S., Chen H.-Y., Galactoseismology: Discovery of Vertical Waves in the Galactic Disk, *ApJ*, 2012, vol. 750, p. L41
- Williams M. E. K., Steinmetz M., Binney J., Siebert A., Enke H., Famaey B., Minchev I., de Jong R. S., Boeche C., Freeman K. C., Bienaymé O., Bland-Hawthorn J., Gibson B. K., Gilmore G. F., Grebel E. K., Helmi A., Kordopatis G., Munari U., Navarro J. F., Parker Q. A., Reid W., Seabroke G. M., Sharma S., Siviero A., Watson F. G., Wyse R. F. G., Zwitter T., The wobbly Galaxy: kinematics north and south with RAVE red-clump giants, *MNRAS*, 2013, vol. 436, p. 101
- Willman B., Blanton M. R., West A. A., Dalcanton J. J., Hogg D. W., Schneider D. P., Wherry N., Yanny B., Brinkmann J., A New Milky Way Companion: Unusual Globular Cluster or Extreme Dwarf Satellite?, *AJ*, 2005, vol. 129, p. 2692–2700
- Winteler C., Käppeli R., Perego A., Arcones A., Vasset N., Nishimura N., Liebendörfer M., Thielemann F. K., Magnetorotationally Driven Supernovae as the Origin of Early Galaxy r-process Elements?, *ApJ*, 2012, vol. 750, p. L22
- Woosley S. E., Weaver T. A., The Evolution and Explosion of Massive Stars. II. Explosive Hydrodynamics and Nucleosynthesis, *ApJS*, 1995, vol. 101, p. 181
- Xu Y., Newberg H. J., Carlin J. L., Liu C., Deng L., Li J., Schönrich R., Yanny B., Rings and Radial Waves in the Disk of the Milky Way, *ApJ*, 2015, vol. 801, p. 105
- Yana Galarza J., Análise da composição química das gêmeas solares HIP 100963, HD 45184 e a descoberta da gêmea solar Inti 1, Universidade de São Paulo, 2016, Tese de Doutorado
- Yanny B., Rockosi C., Newberg H. J., Knapp G. R., Adelman-McCarthy J. K., Alcorn B., Allam S., Allende C. P., An D., Anderson K. S., et al., SEGUE: a spectroscopic survey of 240,000 stars with $g=14-20$, *AJ*, 2009, vol. 137, p. 4377
- York D. G., Adelman J., Anderson Jr J. E., Anderson S. F., Annis J., Bahcall N. A., Bakken J., Barkhouser R., Bastian S., Berman E., et al., The sloan digital sky survey: Technical summary, *The Astronomical Journal*, 2000, vol. 120, p. 1579

-
- Youakim K., Starckenburg E., Martin N. F., Matijevič G., Aguado D. S., Prieto C. A., Arentsen A., Bonifacio P., Carlberg R. G., Hernández J. I. G., Hill V., Kordopatis G., Lardo C., Navarro J. F., Jablonka P., Janssen R. S., Sestito F., Thomas G. F., Venn K., The Pristine Survey – VIII. The metallicity distribution function of the Milky Way halo down to the extremely metal-poor regime, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, vol. 492, p. 4986
- Yuan Z., Chang J., Beers T. C., Huang Y., A Low-mass Stellar-debris Stream Associated with a Globular Cluster Pair in the Halo, *ApJ*, 2020, vol. 898, p. L37
- Yuan Z., Myeong G. C., Beers T. C., Evans N. W., Lee Y. S., Banerjee P., Gudin D., Hattori K., Li H., Matsuno T., Placco V. M., Smith M. C., Whitten D. D., Zhao G., Dynamical Relics of the Ancient Galactic Halo, *ApJ*, 2020, vol. 891, p. 39
- Zasowski G., Schultheis M., Hasselquist S., Cunha K., Sobeck J., Johnson J. A., Rojas-Arriagada A., Majewski S. R., Andrews B. H., Jönsson H., Beers T. C., Chojnowski S. D., Frinchaboy P. M., Holtzman J. A., Minniti D., Nidever D. L., Nitschelm C., APOGEE DR14/DR15 Abundances in the Inner Milky Way, *ApJ*, 2019, vol. 870, p. 138

Apêndice

Apêndice A

Métodos

2MASS ID	Este trabalho		GAIA DR3	
	RV (km/s)	σ_{RV}	RV (km/s)	σ_{RV}
23495808+3445569	-21.76	0.73	-22.21	1.29
00534976+4626089	-211.68	0.62	-209.07	2.33
00594094+4614332	-131.08	0.75	-127.81	1.84
23535441+3449575	-96.32	0.80	-98.75	1.55
00075751+3359414	-209.02	0.94	-211.21	2.75
01020943+4643251	-109.52	0.78	-109.20	2.27
02350813+4455263	-93.29	0.73	-91.25	2.02
02475442+4429269	-97.36	0.90	-96.17	1.52
23481637+3129372	-178.07	0.86	-177.75	1.42
01151944+4713512	-127.03	1.22	-126.15	1.89
02463235+4314481	-134.65	0.83	-137.81	2.63
02485891+4312154	-91.89	0.64	-90.97	1.28
02510349+4342045	-119.96	0.91	-119.78	1.50
22344771+3545006	-153.58	2.94	-147.21	1.99
22333278+3605357	-270.27	0.89	-268.69	0.78
23534927+3659173	-147.23	0.68	-145.57	1.71
00523040+3933030	-139.41	0.62	-138.10	1.16
02165554+3921295	-88.60	0.71	-84.26	2.80
02025792+4628148	-113.14	0.84	-114.90	1.91
01180060+3014151	-106.45	0.81	-104.67	1.54
02273411+2515043	-58.40	0.75	-56.24	2.30
00194223+4559569	-143.59	0.65	-147.69	1.63
01282462+4413349	-107.64	0.57	-106.61	1.55
01390736+3739126	-118.47	0.62	-116.26	1.30
01564607+4442296	-113.24	0.64	-112.75	1.43
01151093+4918038	-139.84	0.86	-139.53	0.80
00313809+4416285	-132.68	0.76	-131.92	1.18
02143193+2608327	-76.01	0.70	-78.09	3.06
02343917+4217408	-110.93	0.72	-106.06	2.38
02082272+4512126	-112.93	0.77	-111.41	2.04
02184143+4612011	-116.02	2.97	-118.38	0.88

Tabela A.1 - Velocidades Radiais derivadas para as estrelas da amostra deste trabalho em comparação com a database do GAIA DR3.