

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

Elvis William Carvalho Cantelli

**Decifrando a construção quimiodinâmica:
um mapeamento do disco da Via-Láctea**

São Paulo

2024

Elvis William Carvalho Cantelli

Decifrando a construção quimiodinâmica: um mapeamento do disco da Via-Láctea

Tese apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Ramachrisna Teixeira

Versão corrigida. A original encontra-se disponível na unidade.

São Paulo

2024

*à minha avã negra Pandora, que jaz no infinito, e minha α CMa Biaba.
ao tio Abinel, que sempre acompanhou meu progresso.
ao meu pai, que fomentou minha paixão pelo Universo.*

Agradecimentos

Ao “dotô” Gustavo “Zang” Beneduzi por ter me introduzido no mundo da ciência de dados e aprendizado de máquina ao me conduzir à Somar Meteorologia e me fazer acreditar novamente em mim mesmo com sua maneira carinhosa e divertida de ser.

Ao Marcio Custodio por sua maestria e espírito ao conduzir nossa equipe da Clima-tempo, e a todo nosso time do MetOps: Marrafa, Chico, Max, Marcão, Rebelo, Ismael, Marten, Mazim, Pedro, e antigo time Felipe, Jonathan, Raulzito e Vini que tanto contribuíram para os dias mais alegres.

Aos meus compadres da astronomia 2011 do IAG e os momentos divertidos que passamos juntos nas antigas salinhas de IC do departamento.

Ao Lucas Damasceno pela amizade e todo apoio dado em nossa jornada cruspiana, e por se fazer presente como meu parceiro de doutorado.

Ao Caio Silva e Felipe Nardi por sempre salientarem o quão orgulhosos eram de mim, o que ajudou muito a me motivar e continuar em frente.

à Luana Ferrari pelo companheirismo e apoio durante todo o processo.

Ao Guido van Rossum por ter inventado o Python, Laurens van der Maaten por desenvolver o t-SNE e ao Friedrich Anders pelo seu uso na astrofísica.

Por último e mais especialmente ao Prof. Ramachrisna Teixeira por ter me estendido a mão no momento em que todos deram as costas, pela inestimável paciência e parcimônia durante meu difícil processo, por acreditar e incentivar as ideias e o trabalho desenvolvidos, e acima de tudo pelo exemplo de professor, pesquisador, orientador e pessoa maravilhosa que é.

“There is a theory which states that if ever anyone discovers exactly what the Universe is for and why it is here, it will instantly disappear and be replaced by something even more bizarre and inexplicable. There is another theory which states that this has already happened..”

Douglas Adams, *The Hitchhiker’s Guide to The Galaxy*, 1979

“Archaeology is like a jigsaw puzzle, except that you can’t cheat and look at the box, and not all the pieces are there.”

Stephen Dean

“Why don’t machine learning models ever play hide and seek? Because they always find themselves in a local minimum.”

Machine learning jokes

Resumo

A formação e estrutura da Via Láctea tem um papel fundamental na nossa compreensão do universo e da sua evolução, e graças à missão espacial Gaia e aos *surveys* espectroscópicos como APOGEE e GALAH, vivemos um momento excepcional de abundância e qualidade de dados, permitindo-nos rastrear os blocos de construção do disco Galáctico e suas relações. Nesse sentido, propomos aqui a exploração de um grande conjunto de dados a uma moda "top-down", elaborando um mapa de similaridade do volume Galáctico local a fim de segregar e caracterizar seus principais componentes, buscando pistas sobre suas relações. Usando o algoritmo t-SNE no estudo de propriedades químicas, orbitais e cinemáticas das estrelas, foram produzidos mapas de similaridade (*manifolds*) para dissecar sua rica estrutura, encontrando componentes conhecidos e isolando-os para analisar seu comportamento e subestruturas. O disco fino pode ser claramente separado do disco espesso, dinamicamente quente, mostrando também uma zona de transição distinta e intrigante com pistas sobre as consequências da fusão com Gaia-Sausage-Enceladus (GSE). *Moving groups* e características ressonantes também aparecem com destaque nos mapas, dividindo o disco em porções interna e externa como consequência da presença da barra Galáctica, e mostrando grupos excêntricos como Hercules. O halo dinâmico aparece como um extremo relacionado à porção aquecida do disco espesso, mostrando subestruturas que podem ser identificadas como as já conhecidas GSE, Sequoia e Splash. Aglomerados abertos e globulares também aparecem no seu contexto químico/evolutivo, onde NGC 6121 apresenta um comportamento muito distinto. São apresentadas ideias sobre a ligação entre a barra e os braços espirais, detalhes da estratégia desenvolvida, uma visão geral das diferentes populações segregadas e suas relações, bem como uma discussão e interpretação especulativa dos nossos resultados no cenário de evolução Galáctica.

Abstract

The formation and structure of the Milky Way has a fundamental role in our understanding of the universe and its evolution, and mainly thanks to the Gaia space mission and spectroscopic surveys like APOGEE and GALAH, we are experiencing an exceptional moment of abundance and quality of data, allowing us to trace the building blocks of the Galactic disk and their relations. In this sense, we propose here the exploitation of a large dataset in a top-down fashion, elaborating a similarity map of the local Galactic volume in order to segregate and characterise its main components, searching for hints about their relations. We have used the t-SNE algorithm with chemical, orbital and kinematic properties of the stars to produce 2D manifolds and dissect their rich structure by finding known components and isolating them to further analyse their behaviour and sub-structures. The young metal-rich thin disk could be clearly separated from the older dynamically hot thick disk, also showing a distinguishable and puzzling transition zone with hints about the aftermath of the Gaia-Sausage-Enceladus (GSE) merger. Moving groups and resonant features also appear prominently in the maps, splitting the disk into inner and outer portions as consequence of the resonances produced by the Galactic bar and showing eccentric groups like Hercules. The dynamical halo appears as an extreme end related to the heated portion of the thick disk, showing sub-structures that could be identified as the already known GSE, Sequoia and Splash populations. Open and globular clusters also appear in their chemical/evolutionary context, where NGC 6121 shows a very distinct behaviour. We present insights about the connection between the bar and the spiral arms, details of the developed strategy, an overview of the different segregated populations and their relations, as well as a discussion and speculative interpretation of our results in the scenario of galactic evolution.

Lista de Figuras

1.1	Universo de Wright	22
1.2	Galáxia de Herschel	23
1.3	Galáxia de Easton	24
2.1	Seleção de sub-amostras do CM e Kiel	36
2.2	Cobertura das amostras na projeção galáctica	38
2.3	Padrões de abundâncias dos elementos leves	40
2.4	Padrões de abundâncias dos elementos pesados	41
3.1	Cristas de velocidades e densidade de \bar{R}_o	45
4.1	Convergência t-SNE	52
5.1	Idades BSTEP vs. astroNN em cores Fe/H e Y/Mg	56
5.2	Idades StarHorse vs. astroNN e BSTEP em cores Y/Mg	57
5.3	Idades K2 vs. astroNN e BSTEP em cores Y/Mg	58
5.4	Sub-amostras de surveys de idade no diagrama de Kiel	58
5.5	<i>Manifolds</i> de idade	60
6.1	<i>Manifolds</i> finais	64
6.2	Mapas de variáveis APOGEE	65
6.3	Mapas de variáveis APOGEE	66
6.4	Mapas de dispersão de velocidades	67
6.5	Planos $V_\phi - V_r$ e manifolds	69
7.1	Distribuição de Z_{max}	72

7.2	Distribuição de \bar{R}_o com potenciais diferentes	73
7.3	Distribuições radiais com raio apocêntrico e pericêntrico	73
7.4	Diagramas Mg/Fe vs Fe/H disco fino	75
7.5	Z_{max} vs R do APOGEE	76
7.6	Plano R_{ap} - R_{per} da estrutura <i>cold metal-rich inner disk</i>	77
7.7	Distribuições de abundancia e idades do GALAH	78
7.8	Diagramas Mg/Fe vs Fe/H do disco espesso	81
7.9	Distribuições de idade e elementos pesados do GALAH	82
7.10	Divisão da zona de transição	84
7.11	Diagramas Mg/Fe vs Fe/H da zona de transição	85
7.12	Distribuição de raio pericêntrico das populações - zona de transição	86
7.13	<i>Manifolds</i> e Diagramas Mg/Fe vs Fe/H para o halo	87
7.14	<i>Manifolds</i> e Diagramas Mg/Fe vs Fe/H para populações acretadas	88
7.15	<i>Manifolds</i> com aglomerados estelares	89

Lista de Tabelas

2.1	Erros das grandezas consideradas nas amostras finais	37
4.1	Parâmetros da cascata de convergência do t-SNE	50
A.1	Lista de vértices dos polígonos desenhados para os cortes de seleção do ramo das gigantes vermelhas nos diagramas CM e Kiel para ambas amostras APOGEE e GALAH. BP-RP e G são as magnitudes do Gaia, e as unidades de Teff e log G estão em K e dex, respectivamente.	108
A.2	Lista de vértices dos polígonos desenhados para os cortes de seleção da sequência principal nos diagramas CM e Kiel para APOGEE e GALAH separadamente. Apenas o segundo e terceiro pontos têm diferenças no polígono de Kiel. BP-RP e G são as magnitudes do Gaia, e as unidades de Teff e log G estão em K e dex, respectivamente.	109

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
1.1 Uma breve história do estudo da Via-Láctea	19
1.1.1 Pré-História	19
1.1.2 Antiguidade e Idade Média	20
1.1.3 Modernidade	20
1.1.4 Contemporaneidade	22
1.2 Contexto histórico da estrutura da Via-Láctea	26
1.3 Proposta do presente trabalho	30
2. <i>Aquisição e tratamento de dados</i>	33
2.1 Dados dos surveys	33
2.2 Abundâncias elementais	38
3. <i>Parâmetros orbitais</i>	43
3.1 Integração das órbitas	43
3.2 Validação do potencial	44
4. <i>t-SNE</i>	47
4.1 Parametrização	48
4.2 Convergência dos <i>manifolds</i>	49
5. <i>Análise de idades</i>	55
5.1 Comparação de métodos de determinação de idade	55
5.2 Relógios químicos	57

6. <i>Resultados</i>	63
6.1 Visualização por grandezas físicas	63
6.2 Identificação de estruturas	64
6.2.1 Disco espesso	67
6.2.2 Disco fino	68
7. <i>Análise e discussão</i>	71
7.1 Disco fino	71
7.1.1 Aspectos cinemáticos	72
7.1.2 Aspectos químicos	74
7.2 População interna rica em Sódio	76
7.3 Disco espesso	79
7.4 Zona de transição	83
7.5 Halo dinâmico	86
7.6 Aglomerados estelares	88
8. <i>Conclusões</i>	91
<i>Referências</i>	93
<i>Apêndice</i>	105
A. <i>Polígonos de seleção das sub-amostras RGB e SP</i>	107

Introdução

1.1 Uma breve história do estudo da Via-Láctea

1.1.1 Pré-História

A busca pela compreensão e descrição da natureza acompanha a humanidade desde seus primórdios, sendo feita inicialmente por uma via mitológica que se desdobra com base no empirismo, porém mantendo uma finalidade pragmática onde o conhecimento dos fenômenos naturais favorece a relação humana com o ambiente e provém prosperidade. Ao contrário dos fenômenos terrestres onde é possível o contato, experimentação e observação direta de consequências, os fenômenos celestes eram envoltos em mistério e contemplação devido a sua total inacessibilidade física. Os ciclos diurnos, sazonais e anuais decorrentes do arranjo do sistema terra-sol e as fases lunares, já muito bem conhecidos devido a seus importantes papéis na vida terrestre, guiavam os hábitos humanos, porém seus mecanismos e a existência das estrelas e da nuvem galáctica no céu noturno estavam longe de serem compreendidos e descritos na pré história e em grande parte da antiguidade.

Os primeiros registros da observação do céu foram datados no paleolítico superior nas cavernas de Lascaux, França, com representações das Pleiades, Triângulo do Verão (Deneb, Altair e Vega) e Corona Borealis (Rappenglück, 2004), porém registros da Via-Láctea remontam às mais diversas mitologias de povos ao redor de todo o mundo, sendo descrita ora como um rio celestial (ex. civilizações Mapuche, Hindu, aborígene Australiana, leste asiático), ora como uma estrada ou caminho (ex. Cherokees, Armenos, Húngaros), associada ao leite (ex. Greco-romanos e egípcios) e até mesmo como o rabo do dragão Tiamat, no caso da Mesopotâmia, e a combinação de vários no caso dos Irlandeses (reflexão do rio Boyne e o “caminho da vaca”).

1.1.2 *Antiguidade e Idade Média*

O início de uma transição de um cenário mitológico para uma abordagem naturalista começa a se materializar entre os pensadores gregos pré-socráticos Anaxágoras e Demócrito (século V a.C.), que preservados pelas palavras de Macrobius descreviam a Via-Láctea como “inúmeras estrelas, todas elas pequenas, eram comprimidas em uma massa por seus limites estreitos, de modo que os escassos espaços entre eles ficavam ocultos; estando assim próximos, eles espalham a luz em todas as direções e conseqüentemente dão a aparência de um feixe contínuo de luz.” (Hoskin, 1985). Aristóteles (século IV a.C.) já descrevia cometas e a própria Via-Láctea como fenômenos da meteorologia ao invés da astronomia, já que em sua cosmologia a Terra permanecia no centro do Universo com suas várias esferas, e eventos mutáveis como cometas não pertenciam à esfera imutável e perfeita das estrelas, sendo a Via-Láctea considerada como uma nuvem de aparência semelhante à de um cometa. Olimpiodoro, o Jovem (século VI d.C.) já colocava a Via-Láctea como objeto celestial, já que se fosse sublunar (na cosmologia aristotélica, a esfera lunar possuía, em seu interior, os elementos terrestres que observamos, a terra em si, e a natureza em constante mudança) deveria se mostrar diferente conforme o lugar e o tempo, e deveria apresentar alguma paralaxe (neste contexto, a olho nu), o que não era verdade em nenhum dos casos. São escassos os registros de visões e descrições durante a Idade das Trevas, porém mais ao final deste período (cerca do século IX d.C.) o número de manuscritos científicos começa a aumentar (Buringh e Van Zanden, 2009), e após 1000 d.C. temos astrônomos islâmicos como Al-Biruni, Nasir al-Din, Ibn Qayyim al-Jawziyya, bem como o andaluz Avempace retornando com a ideia da Via-Láctea sendo composta de inúmeras estrelas concentradas.

1.1.3 *Modernidade*

A discussão aqui apresentada é majoritariamente baseada na descrição de Hoskin (1985) e no plano de aula de Nemiroff e Bonnell (2010). A confirmação observacional destas proposições veio com Galileu e seu telescópio em 1610, tendo passado como quase irrelevante até mesmo por Newton, que praticamente ignora as estrelas em seu maior trabalho, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. A relevância da Via-Láctea ressurge apenas no século XVIII com as primeiras confirmações de medição dos movimentos próprios das estrelas (uma discussão interessante é feita por Verbunt e van der Sluys 2019, comparando

medições e erros entre as determinações de Edmond Halley e Jacques Cassini) abrindo portas para as proposições de Thomas Wright e Immanuel Kant. O fato de que as estrelas se movem, embora já proposto e especulado na antiguidade por Hiparco e Macrobius, coloca em jogo toda a cosmologia até então vigorante das “estrelas fixas”, e representa uma importantíssima peça para o presente trabalho onde estas determinações são base para o estudo cinemático das populações estelares.

Wright, em busca por uma descrição unificada do cosmos, tenta unir as evidências observacionais e sua visão teológica para produzir um modelo de universo onde o divino reside no centro, cercado por uma gigantesca “casca” fina de estrelas onde nosso Sol estaria embutido, explicando assim que a Via-Láctea seria a projeção dessa “casca” no céu quando a olhamos em um ângulo mais tangencial. O desenho apresentado por Wright (Figura 1.1) levou a uma interpretação errônea por parte de muitos escritores de que o universo era representado por um disco em sua leitura, e curiosamente acabou se tornando também uma explicação alternativa pelo próprio Wright (em que os sistemas estelares estariam distribuídos em arranjo de anel, similar a Saturno, em torno do centro divino), embora seu modelo de preferência fosse, de longe, o inicial por preservar a simetria esférica tida com perfeita.

Quando um resumo do livro de Wright sem ilustrações aparece em um periódico de Hamburgo e chega ao conhecimento de Kant, não fica clara a geometria descrita por Wright, e Kant não vê motivos para que as estrelas não estejam distribuídas por todo um disco e preenchendo-o. Partindo da ideia de que Maupertuis já havia observado “nebulosas” elípticas e que estas também poderiam ser outros sistemas estelares, isto levou-o a aceitar a Via-Láctea como um sistema estelar em disco, com suas estrelas sendo outros sóis, e estes sóis com outros planetas e luas, bem como uma hierarquia superior igualmente possível, com estes sistemas estelares (galáxias) podendo fazer parte de estruturas maiores e etc, descrevendo a faixa da Via-Láctea no céu como a projeção do disco do nosso sistema estelar (Kant, 1755).

Independentemente, Johann Lambert chega a uma conclusão parecida ao observar a Via-Láctea no céu e construir uma analogia com a eclíptica, onde as estrelas, assim como os planetas, ficam próximas a um plano e orbitam o centro de um grande sistema estelar. Para ele, o Sol e as estrelas próximas formariam um aglomerado que por sua vez orbitaria o centro da Via-Láctea, se localizando não somente fora de seu plano, mas também mais

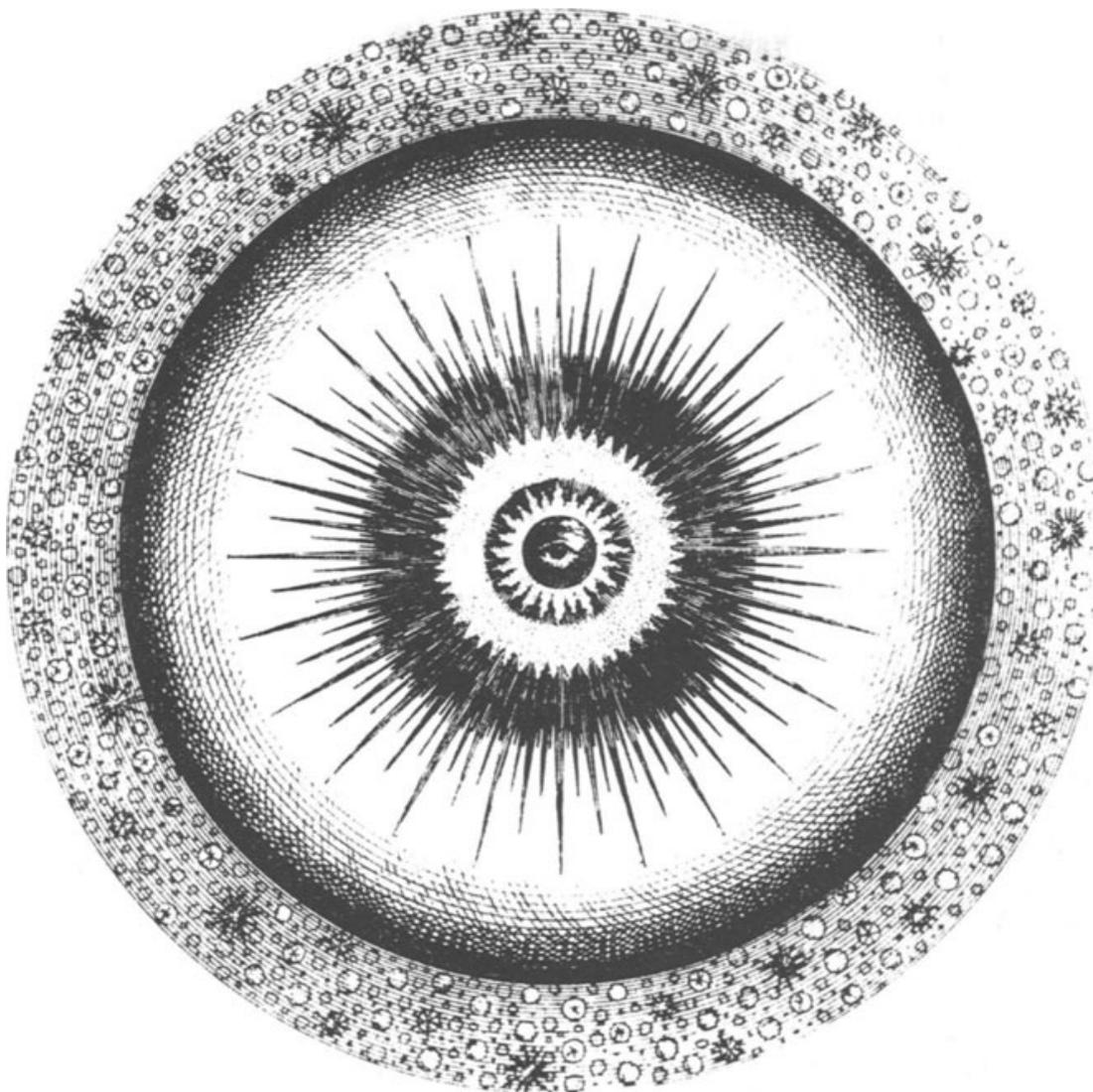


Figura 1.1: Imagem original do modelo de Wright. A figura apresenta uma secção transversal do Universo, evidenciando o divino ao centro e a “casca” estelar ao redor.

próximo de sua periferia do que de seu centro.

1.1.4 Contemporaneidade

Ainda no século XVIII, William Herschel de forma independente também investigava “a construção dos céus”, tendo tido contato com as obras de Wright e Lambert somente mais tarde em sua carreira, no início do século XIX. Diferentemente de seus contemporâneos, Herschel elaborava suas especulações em campanhas observacionais faraônicas, utilizando telescópios cada vez maiores e mais potentes. Sua descoberta de Urano como um corpo do sistema solar lhe concedeu um trabalho como astrônomo da corte inglesa, o que o ha-

bilitou à construção de seu famoso refletor de 18", revolucionário na época, permitindo o mapeamento de uma quantidade gigantesca de estrelas em um primeiro exercício de astroestatística. Sua tentativa de delinear as fronteiras da Via-Láctea culminou na descoberta de inúmeras nebulosas, aglomerados estelares e o que viria a ser o primeiro esboço realista de uma seção da Galáxia (Figura 1.2)

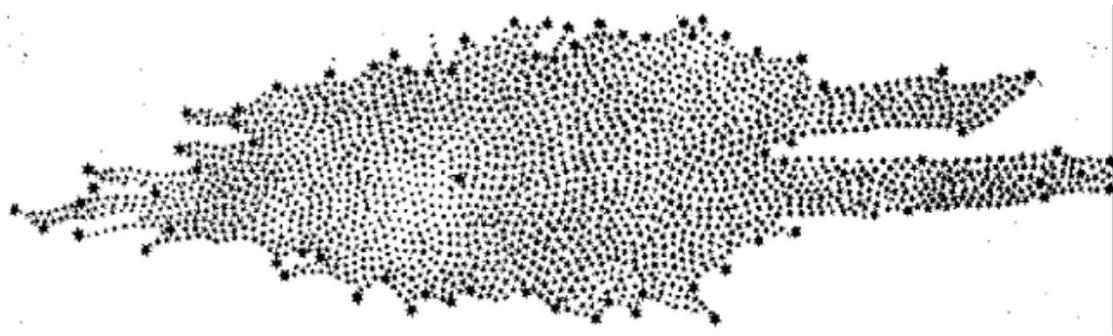


Figura 1.2: Imagem original do esboço de Herschel. Esta é a primeira representação de uma seção transversal do disco da Galáxia feita com a contagem de estrelas.

A observação das nebulosas o fez questionar se estas seriam por si só outros sistemas estelares não-resolvidos, podendo ser outros sistemas ainda maiores que a Via-Láctea, visão que depois de muitas idas-e-vindas foi abandonada, muito devido às observações do que viria a ser o maior telescópio dos próximos 50 anos, com seu espelho de 48" e 40 pés de distância focal. A vastidão e objetos e estrelas lhe fez perceber que não seria possível chegar aos limites da Galáxia apenas dependendo de densidades estelares, fato este percebido após resolver os aglomerados globulares e concluindo que a densidade poderia de fato ser variável, portanto não havia argumento observacional de que certos tipos de "nebulosa" eram de fato outras galáxias. Mesmo assim, também não lhe era razoável afirmar que nossa Galáxia era única em um universo infinito, deixando esta questão, portanto, em aberto. Em 1834 John Herschel, seu filho, levou o telescópio de 18" para o hemisfério sul e com ele descobriu "vazios" em regiões da Via-Láctea, que muito mais tarde viriam a ser redescobertas como nuvens moleculares.

Em 1845 o conde de Rosse William Parsons construiu um telescópio de 72" e com ele resolveu a estrutura espiral de muitas "nebulosas", e até clamou ter resolvido estrelas na mais brilhante delas, o que o levou a concluir que estas eram de fato "universos-ilha", como chamaram à época. Vários astrônomos chegaram também a sugerir que nossa própria Galáxia teria esta estrutura espiral, como representado no desenho de Cornelis Easton

(Figura 1.3).

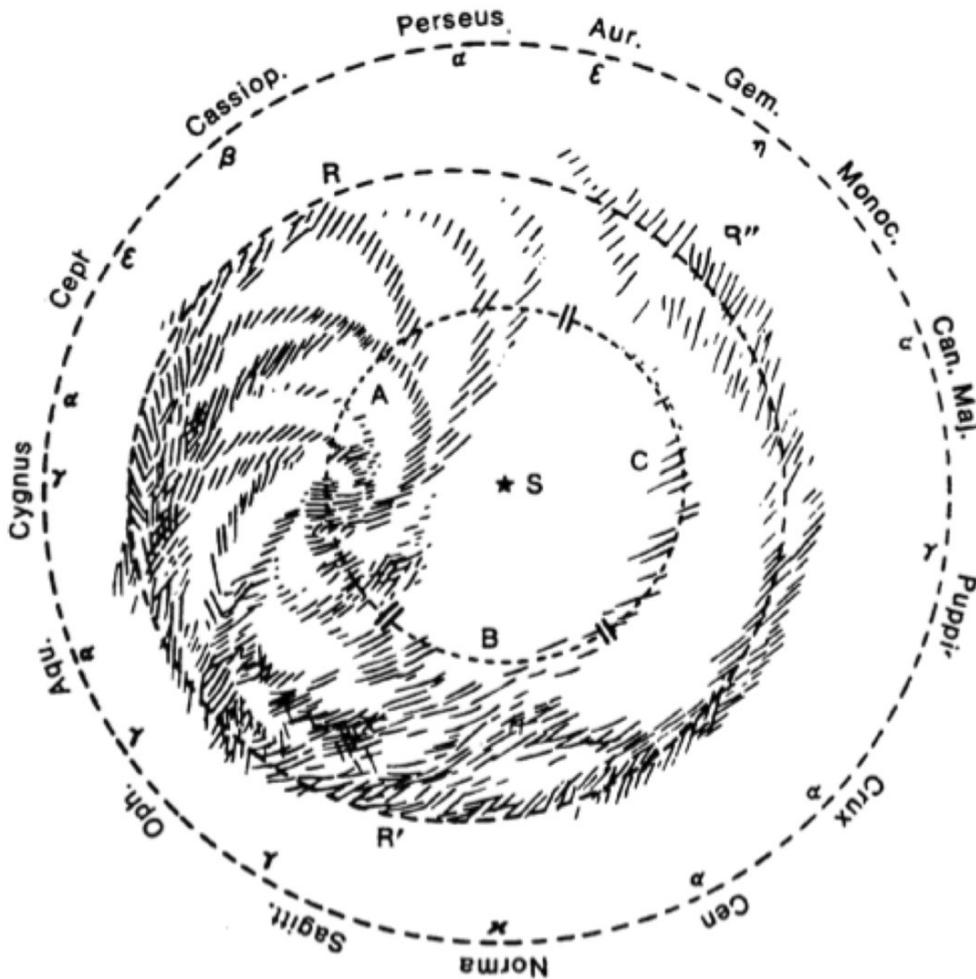


Figura 1.3: Imagem original do esboço de Cornelis Easton com estrutura espiral.

No início do século XX, Jacobus Kapteyn usou os mais recentes dados de paralaxe, movimento próprio e brilho aparente das estrelas para postular um modelo de Galáxia que consistia em um sistema achatado com 10 kpc de diâmetro e 2 kpc de espessura com o Sol próximo ao seu centro, o que ficou conhecido como o “Universo de Kapteyn“. Em Kapteyn (1905), baseado nos estudos dos *moving groups* (Mädler 1846 e Proctor 1869) apresentou o conceito dos *streams*, ou correntes estelares, enquadrando os conhecidos grupos de Pleiades, Hyades e Sirius. Nesta época, a controvérsia sobre a real forma do Universo já era grande, muito também devido à estimativa de distância da nebulosa de Andrômeda feita por Lundmark (1919) (650.000 anos-luz), e dois proeminentes astrônomos

com concepções bastante diferentes deram origem a um debate científico em torno de suas idéias: Harlow Shapley, um jovem prodígio com um trabalhos inovadores, e Heber Curtis, um experiente pesquisador com um extenso trabalho consolidado.

Shapley havia usado a relação período-luminosidade das cefeidas para determinar as distâncias de aglomerados globulares, e com isto, estimar um tamanho muito maior (100 kpc, que considerando a extensão do halo, não é uma medida absurda) que o determinado anteriormente para a nossa Galáxia, onde esta seria a extensão total do nosso universo, excluindo a possibilidade de “universos-ilha”, e também colocou o Sol a uma distância de 20 kpc do centro. Shapley levou em consideração a determinação errônea de Adriaan van Maanen sobre a rotação das nebulosas espirais para justificar que estas seriam nebulosas locais, e que se fossem muito distantes elas girariam com velocidades próximas às da luz, o que seria absurdo.

Curtis por outro lado, desacreditava das cefeidas como fontes confiáveis para distância, e colocava o tamanho da Galáxia em 10 kpc como proposto por Kapteyn, porém este era um dos argumentos que sustentava sua defesa do modelo de “universos-ilha”, onde argumentava que as novas (explosões cataclísmicas por acreção de hidrogênio em anãs brancas) observadas em nebulosas espirais eram similares às observadas na nossa Galáxia, porém fracas e portanto muito distantes, sinalizando sua composição estelar. Também, usou as determinações espectroscópicas feitas por Vesto Slipher de altas velocidades radiais para estas nebulosas espirais, implicando que estas não sendo tão baixas quanto as locais, deveriam ser de origem extragaláctica. As faixas escuras de absorção (a poeira interestelar nos discos das galáxias quando vistas *edge-on*) nas fotografias também foram um argumento para afirmar que estas nebulosas eram outras galáxias como a nossa.

Ao final, este episódio que ficou conhecido como “O Grande Debate” trouxe à tona para a comunidade científica os dois modelos de universo da época, ao que em 1924 Edwin Hubble utiliza o telescópio Hooker para medir as variáveis cefeidas nas nebulosas espirais e finalmente determinar suas distâncias, validando não somente a técnica usada por Shapley, mas também a concepção de Curtis sobre as nebulosas espirais serem de fato outras distantes galáxias como a nossa ao cravar a distância de 285 kpc para Andrômeda (Hubble, 1925). Finalmente estava consolidado o modelo de Universo como o conhecemos hoje: estamos imersos em um sistema estelar em formato de disco, com o Sol deslocado de seu centro, onde este sistema é uma ilha em um vasto oceano de outras incontáveis ilhas.

1.2 Contexto histórico da estrutura da Via-Láctea

A descrição da estrutura e mecânica da nossa Galáxia vinha tornando-se um tópico cada vez mais estudado, e nos anos seguintes à descoberta de Edwin Hubble, Bertil Lindblad pôs-se a estudar o movimento das estrelas, deduzindo seu movimento rotacional na dinâmica da Galáxia (Lindblad, 1927), confirmado logo em seguida por Oort (1927). Lindblad também inferiu a distância de 30.000 anos-luz do Sol ao centro da Via-Láctea.

Cecilia Payne apresenta sua tese em 1924 (Payne, 1925) com o estudo das atmosferas estelares e a conclusão de que o Sol e as outras estrelas seriam compostas majoritariamente de hidrogênio, abrindo as portas para os estudos de abundâncias químicas fotosféricas que mais tarde seriam das ferramentas mais importantes para traçar populações estelares.

Trumpler (1930) detectou e descreveu a absorção interestelar de luz, e a associou à pequenas partículas de poeira presentes no meio interestelar, também mostrando que sua distribuição não era isotrópica.

Zwicky (1933) utilizou pela primeira vez o teorema de virial ao estudar os movimentos internos de aglomerados de galáxias, e conclui que a massa necessária para produzir tais dispersões de velocidades deveria ser muito mais alta que a inferida pelo brilho de suas galáxias, propondo a existência da matéria escura (já apontada em Lundmark 1930), resultado este que viria a ser consolidado mais tarde por Vera Rubin. Oort (1932) reporta movimentos de rotação mais rápidos que o esperado para a vizinhança solar, enquanto vários outros astrônomos medem a curva de rotação de Andrômeda nos anos subsequentes, mas apenas quando Rubin e Ford (1970) mede as velocidades de rotação espectroscópicas e mostra que após determinado raio galactocêntrico as velocidades permanecem quase constantes, a mecânica newtoniana falha se assumida apenas a distribuição de massa bariônica, sugerindo que a concentração de matéria se estende muito além das regiões centrais. Estes resultados, juntamente com a observação da radiação cósmica de fundo (Penzias e Wilson, 1965) fundamentaram o posterior modelo cosmológico Λ -CDM (Blumenthal et al., 1984), que invoca os halos de matéria escura como principais blocos de construção das galáxias e fundamenta o cenário de evolução da Via-Láctea aqui apresentado.

Em 1944 Walter Baade apresenta o conceito de populações estelares via a observação do bojo e disco de Andrômeda, estabelecendo a população I como estrelas jovens, hoje observáveis como a vasta maioria da luminosidade do disco azulado das galáxias espirais,

e a população II como as estrelas mais velhas, gigantes, dominando o brilho avermelhado dos bojos despídos de gás (Baade, 1944). Baade (1951) argumenta a existência dos braços espirais da nossa galáxia em comparação direta com Andrômeda, seguido por Vyssotsky (1951) que investiga os movimentos de estrelas do volume local, que com base nas estrelas de baixa inclinação orbital, demonstra a concentração delas em estruturas locais. Isto, somado às primeiras medidas radioastronômicas de hidrogênio neutro (Ewen e Purcell, 1951) e seus mapeamentos, finalmente evidenciou a confirmação da estrutura espiral. Porém, a maior relevância de Vyssotsky (1951) foi no que diz respeito às estrelas gigantes com altas velocidades e excentricidades, sugerindo uma possível origem extragaláctica, e Schwarzschild (1952) também aponta estas estrelas como originárias de regiões muito externas, inaugurando o estudo do halo da Galáxia.

Os primeiros modelos e evidências sobre o cenário de formação da Via-Láctea se iniciam logo com Eggen et al. (1962), onde é proposto que a Galáxia se origina a partir de um grande colapso de matéria, evidenciado pela cinemática e composição das estrelas do halo em comparação com as do disco. Logo após, partindo de observações prévias de Oort e Rougoor, de Vaucouleurs (1964) propõe que nossa galáxia possui uma estrutura barrada em seu centro, usando como argumento as observações de velocidades obtidas a partir da linha de 21 cm do hidrogênio e comparações com outras galáxias barradas, sendo confirmada diretamente por Blitz e Spergel (1991). Searle e Zinn (1978) analisam a composição química de 19 aglomerados globulares e concluem que sua evolução não seria suportada pela proposta em Eggen et al. (1962), estabelecendo o modelo de formação hierárquico, onde galáxias anãs são constantemente acregadas pela galáxia mais massiva (no caso, a Via-Láctea) após um colapso inicial que formaria suas regiões centrais, deixando estes aglomerados como corpos remanescentes compondo o halo. Tinsley (1980) utiliza medidas de Wallerstein (1962) e suas próprias conclusões de Tinsley (1979) para demonstrar que o contexto de formação e evolução das populações estelares pode ser traçado pelas abundâncias de elementos- α (O, Mg, etc) quando comparados aos produtos de supernovas de tipo Ia (Fe, Mn, etc), onde populações com excesso de elementos- α indicam uma contribuição de estrelas mais massivas em curtas escalas de tempo. Este viria a ser, após a consolidação do Λ -CDM, uma forte contribuição para descrever a formação das galáxias, porém a discussão entre o modelo de colapso monolítico de Eggen, Lynden-Bell & Sandage e o hierárquico de Searle & Zinn perdurou por décadas, com diversas propostas e com-

binacões destas que explicassem as observacões que cresciam rapidamente em quantidade e qualidade, e onde o estudo da estrutura e da evolucão da Galáxia era tratado de forma cada vez mais conjunta.

A descoberta do que viria a ser classificado como o disco espesso por Gilmore e Reid (1983) aqueceu o debate sobre o cenário de formacão galáctico, onde a funçao de luminosidade das estrelas do disco não é representável por uma lei de potências simples, mas sim uma distribuicão de estrelas mais brilhantes mais concentrada no disco até cerca de 300 pc, e uma outra distribuicão mais extensa, dominada por estrelas mais velhas. Carney et al. (1989) confirmam os resultados de Gilmore e Reid (1983) com a análise de abundâncias químicas e propriedades cinemáticas de uma grande amostra de estrelas, encontrando três populações na distribuicão de metalicidades, e propõe que o disco espesso se formou em um evento de fusão (*merger*) com uma galáxia menor logo depois da formacão do disco, sugerindo que este tipo de evento tem um papel importante no cenário de formacão e evolucão das galáxias no geral. Burkert et al. (1992) revisita o modelo monolítico de formacão, porém apresentando um cenário de formacão de "dentro para fora" (*inside-out*), em que o disco espesso se forma pela deposicão gravitacional das nuvens em volta de um disco fino primordial, logo após o disco fino "velho" se forma pela deposicão do gás no plano do disco, e o disco fino jovem se forma pela evolucão secular e queda da taxa de formacão estelar. A descoberta da galáxia esferoidal de Sagittarius (Ibata et al., 1994) e o *stream* associado à sua ruptura devido à acreçao pela Galáxia (Helmi et al., 1999) também forneceram fortes evidências para o cenário hierárquico. Chiappini et al. (1997), usando um modelo quimio-dinâmico, apresentaram um cenário de formacão que se aproxima mais do atual consenso, onde a Galáxia primordial é formada pelo colapso inicial de matéria, com rápida formacão estelar e esgotamento de gás, seguido de contínuos eventos de acreçao (*infall*) de matéria que formam o disco fino, mais jovem, em uma escala de tempo bem mais longa, o que apresenta consistência com a análise e proposicão de Carney et al. (1989).

Em 1997 foi lançado publicamente o catálogo astrométrico da missao Hipparcos (Esa, 1997), revolucionando o estudo das mais diversas áreas da astronomia estelar e galáctica com um volume amostral de magnitudes, paralaxes e movimentos próprios sem precedentes, cumprindo um papel fundamental no estudo da cinemática estelar, formacão e estrutura do disco espesso e halo, aglomerados abertos e globulares, e uma infinidade de áreas da astronomia compiladas em Perryman (2009).

Kormendy e Kennicutt (2004) classifica bojos de galáxias espirais em dois tipos principais: os bojos clássicos que se assemelham a galáxias elípticas com perfis de brilho acentuados e rotação esferoidal, frutos de processos de fusão, e pseudo-bojos que se mostram mais achatados, com perfil de brilho exponencial indicando lenta injeção de massa, fruto da evolução secular. Wegg e Gerhard (2013) mediu posições de 8 milhões de estrelas do bojo para descrever um perfil alongado de "caixa" (*boxy*), de formato popularmente conhecido como "amendoim" (*peanut-like*), enquadrado como bojo clássico, fato este que fomenta o cenário hierárquico de processos de *mergers*.

Em 2005, foram publicados os resultados do que veio a ser conhecido como "simulação do milênio" (Springel et al., 2005), uma simulação numérica de n-corpos usando microhalos de matéria escura como partículas para reconstruir e servir de modelo teórico para a estrutura em larga escala do universo. Com base em seus resultados, foi possível estabelecer vínculos ainda mais fortes para o cenário hierárquico, estrutura e formação das galáxias, bem como seus halos e galáxias-satélite. Modelos semi-analíticos de formação de galáxias baseados em halos de matéria escura também tiveram papel importante durante os anos 2000, com simulações detalhadas de formação de estruturas em discos, barras e halos, conforme revisto por Baugh (2006).

Em 2007, o já consolidado Sloan Digital Sky Survey publicou os catálogos espectroscópicos do SEGUE, sua extensão para estudo da Via-Láctea (Yanny et al., 2009) com abundâncias químicas para mais de 240 mil estrelas, marcando outro largo passo na descoberta e descrição de estruturas na Galáxia. O halo da Galáxia guardava peças importantes para decifrar seu histórico, e Nissen e Schuster (2010) identificou duas populações distintas: uma rica em elementos- α , interpretada como sendo composta por antigas estrelas do disco ou bojo possivelmente dispersadas por eventos de *merger*, e outra mais pobre em elementos- α , estrelas poderiam ter sido acretadas de galáxias anãs durante o processo de fusão. Deason et al. (2013) fomenta este cenário comparando, com o auxílio de simulações, os perfis de densidade do halo de Andrômeda, homogêneo, com o da Via-Láctea, que apresenta um perfil com quebra, onde nas simulações indicava um *major merger* em seu histórico de formação.

A missão espacial Gaia marcou outra revolução na astronomia com catálogos astrométricos que aumentam até hoje a cada *release*, contando com aproximadamente 2 bilhões de fontes estelares e outros objetos com paralaxes, movimentos próprios, veloci-

des radiais, dentre outras propriedades. Fazendo uso do recém-lançado terceiro *release* do Gaia e outros *surveys*, praticamente ao mesmo tempo Belokurov et al. (2018), Haywood et al. (2018a) e (Helmi et al., 2018) apresentam as evidências do grande evento de fusão que formou o disco espesso e halo da Galáxia, com Belokurov et al. (2018) encontrando-o via cinemática e chamando-o de "Gaia-Sausage" devido ao formato da estrutura no plano U-V de velocidades, e Helmi et al. (2018) chamando de "Gaia-Enceladus" a galáxia satélite que originou o evento.

1.3 Proposta do presente trabalho

Chega-se aos dias contemporâneos à concepção deste trabalho com um panorama muito favorável em termos da compreensão da estrutura e evolução da Via-Láctea, com componentes principais razoavelmente bem descritos e peças mais definidas sobre seu histórico de formação. Contudo, a identificação de traços e as primeiras concepções de anomalias que apontavam para componentes importantes da Galáxia se deram por árdua batalha em busca de maiores amostras, inúmeras técnicas de seleção e segregação de componentes, custosas simulações e modelos computacionais para fundamentar e explicar as descobertas, rendendo muito trabalho e discussão para conectar as peças e explicar suas origens e relações, como feito por exemplo em de Souza e Teixeira (2007).

Ultimamente, o uso de algoritmos de aprendizagem não-supervisionada está crescendo rapidamente entre os astrônomos como um método eficiente para classificar e caracterizar dados observados e simulados em uma vasta e diversificada gama de aplicações. O algoritmo de redução de dimensionalidade t-distributed stochastic neighbour embedding (t-SNE, van der Maaten e Hinton 2008) é um dos algoritmos mais úteis para visualizar e caracterizar dados de alta dimensão, já empregado em diversas áreas, incluindo galáxias formadoras de estrelas (Steinhardt et al., 2020), espectroscopia estelar (Traven et al., 2017), morfologia de galáxias (Dai e Tong, 2018), e até instrumentação (House et al., 2023). Anders et al. (2018) empregaram o t-SNE para uma amostra de estrelas do HARPS-GTO com abundâncias químicas de alta qualidade para separar diferentes componentes galácticas em um espaço químico multidimensional, e foi capaz de separar as subpopulações do disco na vizinhança solar com visualizações mais confiáveis do que diagramas químicos 2D comuns. da Silva e Smiljanic (2023) utilizaram recentemente o t-SNE para analisar estrelas pobres

em metais com um espaço composto por parâmetros cinemáticos e abundâncias químicas, permitindo a caracterização de grupos do halo galáctico e suas conexões com os principais eventos de acreção (Sequoia e Gaia-Enceladus). Queiroz et al. (2023) aplicaram o t-SNE para amostras de subgigantes de três grandes surveys espectroscópicos usando informações químicas e de idade, separando o disco fino do disco espesso e classificando o *manifold* resultante via o algoritmo de clusterização HDBSCAN.

O objetivo aqui é caracterizar os diferentes componentes galácticos com subamostras de dois surveys espectroscópicos de alta resolução, nomeadamente APOGEE (Apache-POINT Galactic Evolution Experiment, Majewski et al. 2017) e GALAH (GALactic Archaeology with HERMES, De Silva et al. 2015), utilizando parâmetros cinemáticos calculados a partir do catálogo Gaia (energias orbitais, momentos angulares, raios, excentricidades e velocidades, uma vez que estas propriedades podem resumir os perfis orbitais) e diferentes conjuntos de razões de abundâncias químicas (metalicidade, elementos-alfa, Z-ímpar, pico do ferro e processo-s, resumindo os mais importantes recursos de *chemical tagging*), assumindo que este espaço quimiodinâmico de parâmetros é capaz de descrever a formação e evolução das principais populações da Via Láctea e permitir sua segregação dentro de uma grande área ao redor do sol. Aqui é proposta uma abordagem multi dimensional panorâmica para a estrutura e evolução da Galáxia, compondo mapas de similaridade que possam ao mesmo tempo segregar populações e fornecer pistas para encontrar relações dinâmicas e temporais entre elas, e para isto, utilizamos o t-SNE para produzir visualizações e mapas das estrelas com base no espaço quimiodinâmico aqui descrito, onde assume-se que populações estelares se agrupem no *manifold* resultante e exibam proximidade de outras populações similares ou relacionadas. Com isto, podemos classificar as regiões dos mapas com base nas componentes galácticas conhecidas, isolá-las para poder descrevê-las detalhadamente, estabelecer relações e possíveis vínculos entre populações, contextualizar estruturas no cenário evolutivo e encontrar novas populações e evidências que métodos mais clássicos se ocultariam nos dados. Esta proposta de tratamento da informação se enquadra em uma abordagem *top-down*, onde partindo de uma visão geral da estrutura, segmentamos partes claramente distintas para depois caracterizá-las, já dentro de um contexto relacional, lógica que se mostra inversa à maneira abordada na astrofísica até hoje, que parte da observação/descoberta de estruturas para depois encaixá-las em nosso modelo de Galáxia. A utilização desta técnica da maneira aqui descrita pode oferecer grande contribuição não

somente para o estudo da astronomia galáctica, mas também qualquer área da astronomia que se enquadre em um problema de multi-dimensionalidade, fornecendo uma ferramenta visual e intuitiva.

Aquisição e tratamento de dados

Este estudo foi baseado no terceiro *data release* da missão Gaia, que conta com quase 2 bilhões de estrelas catalogadas e cerca de 30 milhões de velocidades radiais determinadas. Deste conjunto, foi possível selecionar quase 20 milhões de estrelas com as 6 componentes do espaço de fase (posições e velocidades) e obter seus parâmetros orbitais com base em observações e medidas homogêneas. Os *surveys* espectroscópicos APOGEE e GALAH foram escolhidos devido sua alta resolução espectral e grande quantidade de estrelas observadas, possibilitando um cruzamento com o Gaia e a aplicação de critérios de qualidade que ainda resultassem em uma amostra final de tamanho considerável, como descrito mais adiante na seção 2.1. A obtenção dos dados do Gaia foi feita com o uso do software TOPCAT (Taylor, 2005) via query ADQL, bem como o cruzamento de amostras e vasta parte da análise de dados via as inúmeras ferramentas de visualização e manipulação disponíveis.

2.1 Dados dos surveys

Os dados foram obtidos do Gaia DR3 (Gaia Collaboration et al., 2023) aplicando os critérios de seleção descritos em Gaia Collaboration et al. (2018) (utilizando os filtros propostos em Lindegren et al. (2018) por χ^2 astrométrico, numero de períodos de visibilidade, limpeza de prováveis binárias, erros fotométricos, e erro relativo da paralaxe), exigindo um valor determinado para a velocidade radial e uma magnitude na banda G de até 15, onde a amostra de velocidade radial do DR3 é essencialmente completa. Esta amostra primária contava com 20 milhões de estrelas com espaço de fase 6D completo. As distâncias foram calculadas utilizando o formalismo de Bailer-Jones et al. (2018) através do código disponibilizado por F. Anders em <https://github.com/fjaellet/abj2016>, com 0,3

pc de resolução para a função de distribuição probabilística (PDF) da distância. Os dados dos *surveys* espectroscópicos foram obtidos do APOGEE DR17 (Abdurro'uf et al. 2022, Wilson et al. 2019a, Gunn et al. 2006) e GALAH DR3 (Buder et al., 2021) baixando os catálogos completos disponíveis em seus respectivos sites.

APOGEE é um *survey* espectroscópico de alta resolução ($R \sim 22500$) infravermelho próximo operado principalmente no hemisfério norte com o telescópio Sloan (Gunn et al., 2006) e posteriormente no hemisfério sul com o telescópio duPont (Bowen e Vaughan, 1973) utilizando um espectrógrafo dedicado (Wilson et al., 2019b). Ele foi projetado para observar estrelas do ramo das gigantes vermelhas (*red giant branch*, RGB), ramo assintótico das gigantes (*asymptotic giant branch*, AGB), RR-Lyrae, entre muitos outros objetos estelares. Os campos são subdivididos em dois tipos: apontamentos que amostram uma grade semi-regular na longitude e latitude galáctica sobre uma determinada componente da Via Láctea (como o disco e o bojo), e apontamentos em objetos de interesse específico (galáxias anãs, *streams* estelares, aglomerados). Os parâmetros estelares e abundâncias elementais são obtidos através da *pipeline* automática ASPCAP (García Pérez et al., 2016), que compara os espectros observados com bibliotecas de espectros sintéticos calculados com modelos de atmosferas (descritas em detalhes em Jönsson et al. 2020) e listas de linhas espectrais (Smith et al., 2021).

O GALAH é um *survey* espectroscópico de alta resolução ($R \sim 28000$) na região do óptico operado no hemisfério sul com o espectrógrafo HERMES do Telescópio Anglo-Australiano (Sheinis et al., 2015). A seleção dos alvos teve duas fases: a primeira sendo um levantamento limitado por magnitude, cobrindo estrelas com magnitude entre $12 < V < 15$, declinação $\delta < 10^\circ$ e distância angular ao plano galáctico $|b| > 10^\circ$; e a segunda mais focado na estimativa de idade, amostragem do ponto de *turnoff* da sequência principal (*main-sequence turnoff*, MSTO), e o plano galáctico anteriormente não coberto. Em seu terceiro *data release*, os parâmetros estelares e abundâncias foram obtidos via o código *Spectroscopy Made Easy* (Piskunov e Valenti, 2016), onde os principais parâmetros estelares são estimados ajustando-se espectros sintéticos a 46 segmentos contendo linhas espectrais com dados confiáveis para esta análise, melhorando ainda mais o resultado em uma segunda iteração. As abundâncias elementais são obtidas separadamente para cada elemento, usando a mesma estratégia orientada por segmento para os parâmetros. A descrição completa é fornecida em Buder et al. (2021).

O cruzamento dos *surveys* com a amostra primária do Gaia pelo seu *source_id* resultou em uma redução de 733.901 para 342.263 estrelas para o APOGEE e 588.571 a 491.790 para GALAH. Esta redução pronunciada foi devida à função de seleção do Gaia, que exigiu uma velocidade radial medida, magnitude $G < 15$ (aplicando um corte mais permissivo, dada a queda da amostragem de velocidade radial em torno de $G = 14,5$ Katz et al. 2023). Depois disso, foi aplicado um filtro de seleção às abundâncias de $[\text{Fe}/\text{H}]$ e $[\text{Mg}/\text{Fe}]$, exigindo que os erros fossem $< 0,2$ dex sem *flags* de pipeline, resultando em uma redução para 307.871 estrelas no APOGEE e 391.710 no GALAH. Embora as velocidades radiais dos *surveys* espectroscópicos têm erros menores devido a resolução mais alta, optou-se por usar o Gaia RVS para manter a homogeneidade do espaço de fase da amostra.

O RGB foi separado com base nos critérios de Gaia Collaboration et al. (2018) para estrelas com magnitude absoluta na banda G $M_G < 3,9$ e cor intrínseca $(G_{BP} - G_{RP})_0 > 0,95$, porém optou-se por realizar um corte visual no diagrama cor-magnitude (*colour-magnitude diagram*, CMD) para compensar o avermelhamento das subgigantes acima de $M_G > 4$, e também por conta da presença de estrelas espúrias de sequência principal (*main sequence*, MS) na parte superior dos diagramas de Kiel (plano T_{eff} vs $\log G$) destas amostras. Estes cortes são apresentados como polígonos no Apêndice A.

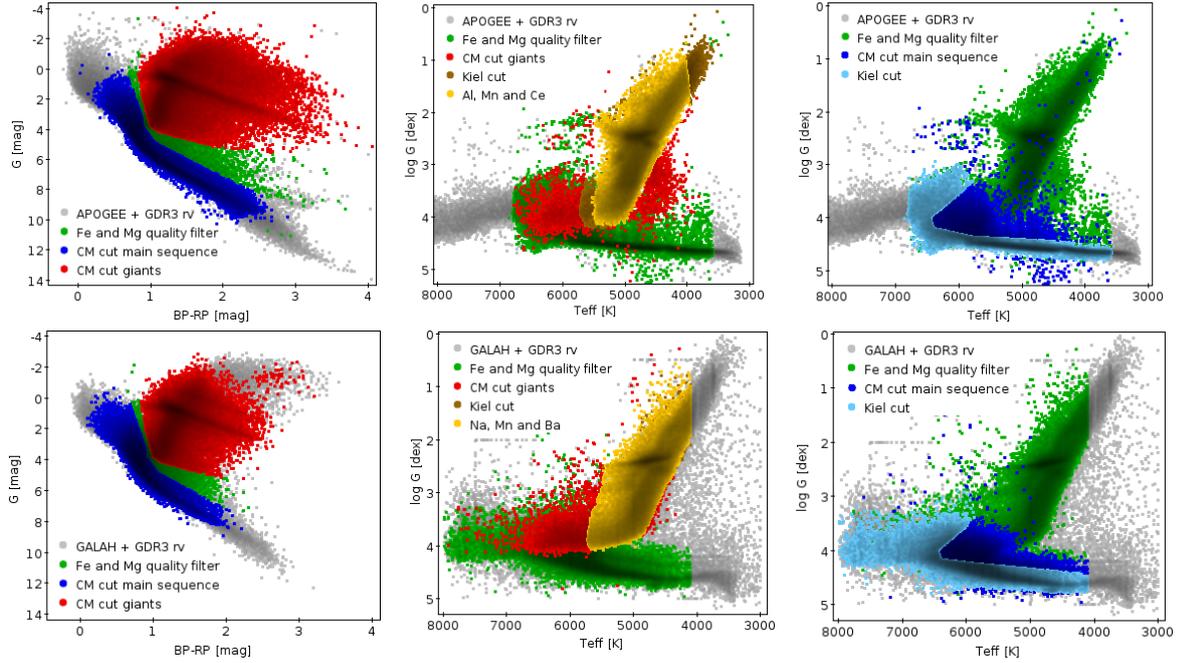


Figura 2.1: Seleções aplicadas às das subamostras da sequência principal e gigantes das amostras APOGEE (acima) e GALAH (abaixo). Painéis esquerdos: correlação cruzada com o Gaia em cinza, com RGB selecionado em vermelho, MS selecionada em azul, sendo ambos subconjuntos do filtro de qualidade de abundância em verde. Painéis centrais: diagrama de Kiel com a correlação cruzada do Gaia em cinza e subconjuntos representando o filtro de abundância (verde), RGB selecionado por CMD (vermelho), RGB filtrado pelo diagrama de Kiel (marrom) e as estrelas com abundâncias determinadas para os elementos discutidos na Seção 2.2 em amarelo. O mesmo se aplica aos painéis da direita, porém para o corte CMD da sequência principal (azul) e respectivo corte do diagrama de Kiel (azul claro).

Os cortes primários no CMD são mostrados nos painéis superiores da Figura 2.1 juntamente com a seleção da MS. Esta seleção de magnitudes foi filtrada posteriormente através do diagrama de Kiel com um corte visual evitando o MSTO e a contaminação por estrelas MS, conforme mostrado nos painéis do meio e inferiores da Figura 2.1, resultando em uma redução para 155.773 e 132.468 estrelas na amostra RGB e 99.037 e 161.668 estrelas na amostra MS para APOGEE e GALAH respectivamente. Todas as seleções foram feitas aproveitando o mesmo polígono em ambos os *surveys*, exceto para o corte do diagrama de Kiel na MS do GALAH com apenas um vértice modificado para admitir mais estrelas. O último passo foi impor que as amostras RGB tivessem abundâncias determinadas para os elementos usados nas entradas do t-SNE, conforme discutido na Seção 2.2, onde foi obtido um catálogo RGB final de 141.534 estrelas para o APOGEE e 124.686 para o GALAH.

A análise principal e os mapas t-SNE foram feitos com a amostra RGB, uma vez que essas estrelas possuem velocidades radiais, movimentos próprios e abundâncias químicas

Tabela 2.1 - Mediana, 5^o e 95^o percentis das distribuições de erros de paralaxes, movimentos próprios (pm), velocidades radiais (RV), temperaturas efetivas (T_{eff}), gravidades, abundâncias e relações sinal-ruído (SNR) nas subamostras de sequência principal e das gigantes para APOGEE e GALAH.

Parâmetro	APOGEE			GALAH		
	p05	p50	p95	p05	p50	p95
Sequência principal						
paralaxe [mas]	0.01	0.018	0.039	0.01	0.015	0.03
pm _α [mas/yr]	0.01	0.018	0.042	0.01	0.016	0.032
pm _δ [mas/yr]	0.011	0.016	0.037	0.01	0.014	0.029
RV [km/s]	0.3	1.53	5.74	0.5	1.94	5.15
T_{eff} [K]	9	20	54	75	94	123
log G [dex]	0.017	0.025	0.045	0.178	0.183	0.195
[Fe/H]	0.005	0.009	0.016	0.052	0.084	0.132
[Mg/Fe]	0.011	0.016	0.025	0.037	0.094	0.181
SNR	42	126	397	22	42	101
Gigantes						
paralaxe [mas]	0.01	0.015	0.025	0.01	0.015	0.024
pm _α [mas/yr]	0.009	0.015	0.028	0.009	0.015	0.026
pm _δ [mas/yr]	0.01	0.014	0.023	0.01	0.013	0.022
RV [km/s]	0.16	0.61	2.93	0.18	0.72	2.81
T_{eff} [K]	6	9	18	74	93	130
log G [dex]	0.02	0.025	0.038	0.185	0.206	0.281
[Fe/H]	0.007	0.008	0.013	0.046	0.071	0.114
[Mg/Fe]	0.009	0.012	0.021	0.034	0.075	0.172
SNR	77	219	703	26	55	135

mais confiáveis, onde os erros típicos são menores que na amostra MS com maiores relações sinal-ruído, como mostrado na Tabela 2.1.

Apresentamos os erros medianos para as amostras selecionadas de cada *survey* juntamente com os percentis 5 e 95, uma vez que as distribuições de erros são majoritariamente assimétricas. Além disso, o APOGEE possui aproximadamente ~ 300 estrelas na amostra da MS com medidas de todos os elementos requisitados, permitindo apenas o uso do RGB para ambos os *surveys* de forma a manter a consistência da amostragem. A amostra da MS do GALAH foi usada na validação do potencial galáctico para os parâmetros orbitais descritos na Seção 3, uma vez que esta amostra abrange cerca de $\sim 1,2$ kpc ao redor do

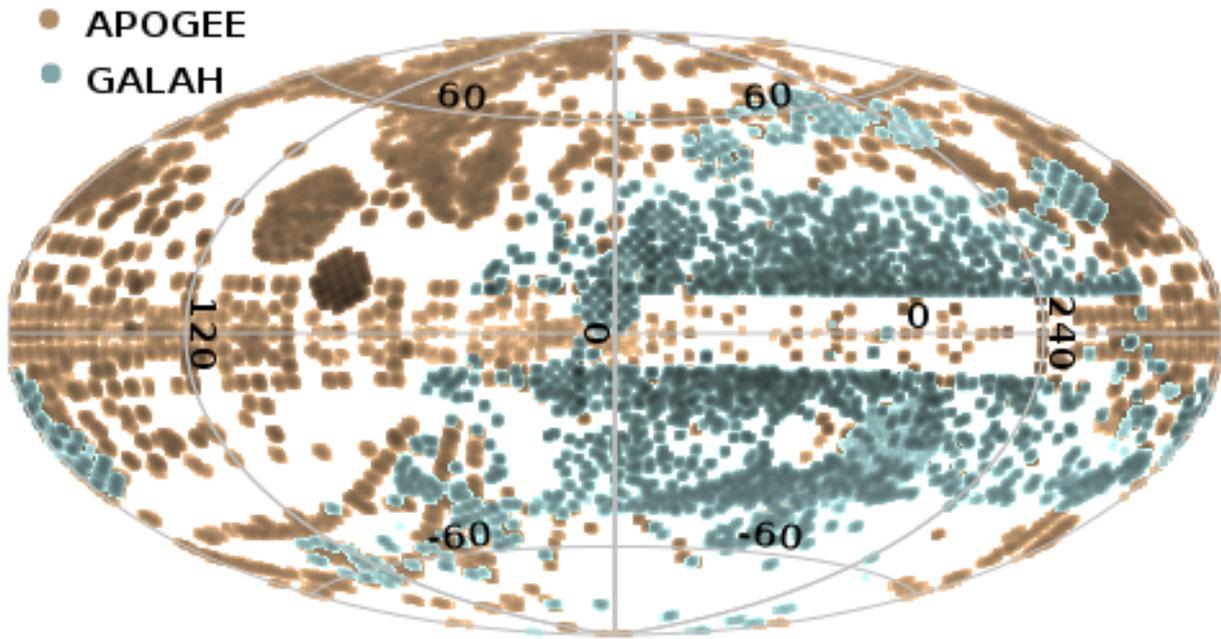


Figura 2.2: Cobertura das amostras finais RGB APOGEE (ocres) e GALAH (ciano) em coordenadas galácticas.

Sol, em contraste com cerca de $\sim 0,6$ kpc da amostra MS do APOGEE. Além disso, a amostra MS do GALAH é muito maior e inclui estrelas mais jovens, mais quentes e mais massivas, como pode ser visto nos painéis inferiores da Figura 2.1, que captura mais do comportamento cinemático do disco fino.

A distribuição final da amostra de estrelas RGB é apresentada na projeção da Figura 2.2, com o espaço amostral representando essencialmente a cobertura do APOGEE DR17 e GALAH DR3. Nesta visualização podemos notar uma separação entre os dois catálogos APOGEE e GALAH, que se deve ao fato do GALAH estar concentrado no hemisfério sul e o APOGEE majoritariamente concentrado no hemisfério norte. Também se nota uma diminuição na densidade de estrelas no plano galáctico, sobretudo na amostra do GALAH.

2.2 Abundâncias elementais

Se estivermos segregando diferentes populações na Galáxia, traçando eventos astrofísicos, como uma grande fusão ou acreção de galáxias anãs, a inclusão de mais dados químicos (além da metalicidade e dos elementos α) é muito útil, uma vez que injeções (*inflows*) de massa podem causar eventos de alta taxa de formação estelar (*starbursts*) in-situ e as abundâncias dos próprios satélites fornecem pistas sobre sua massa e história evolu-

tiva. Em particular, os elementos de número atômico (Z) ímpar e elementos pesados de processo-s são bastante úteis, uma vez que associações de elementos leves como Na e Al juntamente com Mn e Mg são capazes de segregar o halo/população acumulada (Hawkins et al. 2015, Das et al. 2020, Feuillet et al. 2021), enquanto os elementos do processo s e r podem rastrear diferentes cenários astrofísicos, populações mais antigas e estrelas do halo (Aguado et al. 2021, Carrillo et al. 2022 e da Silva e Smiljanic 2023), além de servirem como bons relógios químicos (Spina et al. 2017, Magrini et al. 2018, ver seção 5).

Nandakumar et al. (2022) produziu catálogos de calibração para escalar entre as abundâncias APOGEE e GALAH, mas como a presente seleção de elementos vai além de $[Fe/H]$ e $[\alpha/Fe]$, com espécies químicas diferentes representando cada grupo elemental (Al como elemento leve e Ce como pesado para o APOGEE, e Na como leve e Ba como pesado para o GALAH), optou-se por usar as abundâncias originais. Além disso, a utilização de diferentes catálogos químicos na mesma metodologia de segregação pode ser uma boa validação dos resultados produzidos por cada um.

O principal desafio neste cenário de abundâncias é selecionar adequadamente os elementos disponíveis dentro de cada *survey*, pois cada um possui um conjunto diferente de elementos além de $[Fe/H]$ e $[Mg/Fe]$. Na Figura 2.3 são exibidos os elementos de Z -ímpar e Mn de ambos os *surveys*, a fim de comparar sua qualidade e usabilidade para detectar populações acretadas.

No APOGEE, o Al é bem determinado e apresenta baixas razões de $[Al/Fe]$ e $[Mg/Mn]$, o que caracteriza baixas taxas de formação estelar, típicas de galáxias de baixa massa, como indicativo de estrelas acretadas, onde no GALAH esta população é superestimada para o Al e pode ser melhor vista com Na e Cu (ver por exemplo, Giribaldi e Smiljanic 2023). Kobayashi et al. (2020) mostra que esses elementos Z -ímpar variam de formas semelhantes conforme a metalicidade, e para a amostra GALAH, o Cu parece produzir uma melhor distinção da população acretada do que o Na (painel inferior direito da Figura 2.3).

No entanto, embora o Cu tenha uma origem nucleossintética semelhante, ele está mais relacionado ao pico do ferro do que a elementos leves como Al e Na, e este uso do Cu é mostrado na Figura 27 de Buder et al. (2021) no plano $[Mg/Cu]$ vs $[Na/Fe]$ como uma alternativa a $[Mg/Mn]$ vs $[Al/Fe]$ para segregar as populações acretadas. Mesmo que este plano seja capaz de segregar o halo acretado, o disco colapsa para uma concentração central em $[Na/Fe] \sim 0,1$ e $[Mg/Cu] \sim 0$, enquanto que nos planos $[Mg/Mn]$ vs $[Z\text{-ímpar}/Fe]$ da

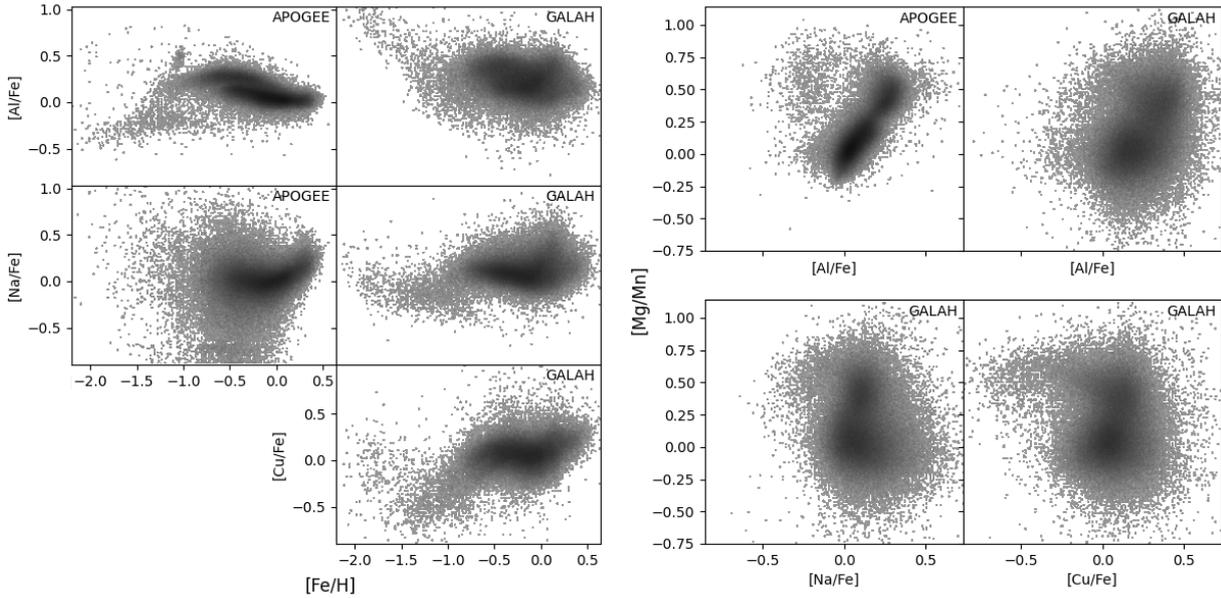


Figura 2.3: Padrões de abundâncias elementais nas sub-amostras do RGB dos *surveys* espectroscópicos. Painéis à esquerda: elementos de Z-ímpar vs $[\text{Fe}/\text{H}]$, onde a "cauda" esparsa representa o halo dinâmico com populações acretadas. Painéis à direita: $[\text{Mg}/\text{Mn}]$ vs Z-ímpar, mostrando a separabilidade das populações acumuladas em diferentes casos. Os painéis esquerdos mostram o APOGEE e os painéis direitos mostram o GALAH.

Figura 2.3 há uma divisão de duas concentrações principais, uma em torno do valor solar para ambas as razões, que está associada ao disco fino, e a outra em $[\text{Al}/\text{Fe}] \sim 0,25$ e $[\text{Mg}/\text{Mn}] \sim 0,5$ que está associada ao disco espesso (discutido posteriormente na seção 7.5 e exibido na Figura 7.13). Portanto, foi escolhido o Mn como elemento de pico de ferro e Na como Z-ímpar leve para a análise do GALAH, e assim preservamos alguma consistência com o APOGEE.

Os elementos de pico de ferro são produzidos principalmente durante a explosão termonuclear de supernovas do tipo Ia e, neste caso, o Mn é produzido mais do que o Fe (Kobayashi e Nomoto, 2009), onde Hawkins et al. (2015) mostrou que a abundância de Mn pode ser usada para distinguir entre estrelas de disco fino e espesso, traçando a população enriquecida de supernovas do tipo Ia.

Para os elementos pesados, o único disponível no APOGEE é o Ce, que é um elemento do processo-s pesado (segundo pico, bem como La, Ba, Nd). Na amostra GALAH, a distribuição $[\text{Ce}/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$ diverge muito do esperado em comparação com as tendências de Kobayashi et al. (2020) e com a contraparte APOGEE, como mostrado na Figura 2.4. O elemento correspondente mais próximo (processo-s pesado) na amostra GALAH é o Ba, que apresenta uma distribuição mais semelhante e tem a mesma origem nucleossintética,

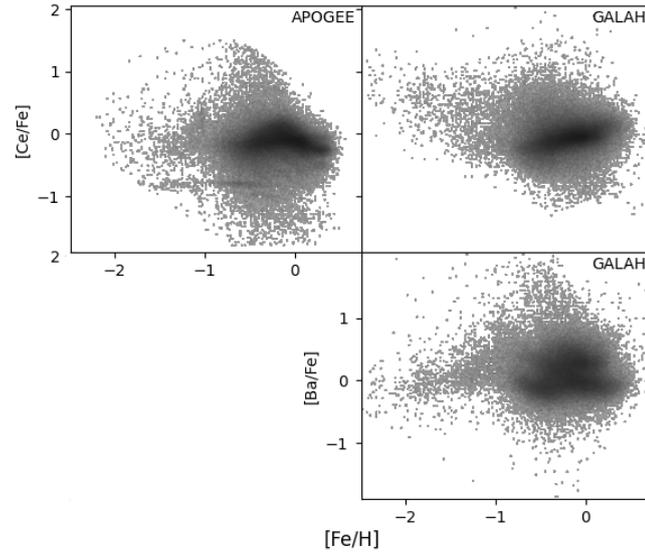


Figura 2.4: Abundâncias de elementos pesados do processo-s vs $[Fe/H]$ para as subamostras gigantes das pesquisas. O padrão monotônico de GALAH $[Ce/Fe]$ não corresponde ao APOGEE $[Ce/Fe]$, onde a relação GALAH $[Ba/Fe]$ mostra uma concordância muito melhor.

e devido isso adotou-se o Ce para o APOGEE e Ba para o GALAH.

Parâmetros orbitais

A estrutura da Via-láctea apresenta elementos complexos como braços espirais, uma barra central, e diversos efeitos dinâmicos que decorrem dessas estruturas. Estudar as órbitas das estrelas de um sistema como o da nossa Galáxia requer que consideremos o máximo de informação possível acerca do potencial gravitacional do sistema, de modo a descrever da melhor maneira possível os parâmetros orbitais. Como já afirmado por Antoja et al. (2018), a era Gaia mostrou que assumir um potencial axissimétrico e independente do tempo em equilíbrio dinâmico para a Via-láctea é definitivamente incorreto, exigindo uma abordagem mais rica para extrair parâmetros orbitais. O método de integração de órbitas utiliza um modelo de potencial da Galáxia e os componentes iniciais do espaço de fase das estrelas (posição e velocidade), de modo a iterar sobre os passos de tempo, traçando a geometria da órbita e calculando seus parâmetros. Neste estudo, foi utilizado um potencial galáctico variante no tempo que leva em consideração a barra central e sua velocidade de grupo (*pattern speed*, Ω_b)

3.1 Integração das órbitas

Para calcular as trajetórias e os parâmetros orbitais, foi empregado o código *galpy* (Bovy, 2015) usando o potencial *MWPotential2014* modificado, com uma massa de halo $M_h = 1,4 \times 10^{12} M_\odot$, o dobro do valor original, juntamente com uma barra usando o *DehnenBarPotential* parametrizado com $\Omega_b = 39$ km/s/kpc, $R_\Omega = 3,5$ kpc, e ângulo azimutal de 28° da linha Sol - Centro Galáctico, com o sol a $R = 8,3$ kpc do centro, seguindo os resultados de Lucey et al. (2023) e o movimento solar de Schönrich (2012). A integração foi realizada retroativamente no tempo com 1000 passos até -800 Myr do

presente, o que equivale aproximadamente a 5 períodos de barra. Os parâmetros obtidos foram os raios apocêntrico e pericêntrico R_{ap} e R_{per} , excentricidade e , distância máxima do plano galáctico Z_{max} , energia orbital E , momentos angulares total e no eixo Z L e L_z , velocidades radial, tangencial e vertical galactocêntricas V_r , V_ϕ , V_z , bem como o raio orbital médio \bar{R}_o .

O uso de um potencial de barra consistente é necessário para reproduzir e melhor caracterizar populações cinemáticas que se originam das ressonâncias da barra, como Hércules, Hyades e Sirius (Khoperskov e Gerhard 2022, Pérez-Villegas et al. 2017) que são grupos móveis (*moving groups*) bem estabelecidos. A conexão das ressonâncias com seus *moving groups* associados pode validar os possíveis efeitos cinemáticos que surgem dessa estrutura de barra e sua influência nas porções externas e componentes dominados pela dispersão, como o disco espesso.

3.2 Validação do potencial

Para verificar o raio galáctico das ressonâncias da barra que surgem das órbitas calculadas e corresponder às suas posições esperadas, foi utilizada a sub-amostra MS do GALAH (muito maior do que sua contraparte no APOGEE) para inspecionar as cristas de densidade produzidas pelo acúmulo de \bar{R}_o (Figura 3.1), já que a amostra MS contém estrelas mais jovens e mais azuis, sendo assim mais adequada para investigar o disco fino dominado por rotação com os efeitos dinâmicos produzidos pela presença de uma barra.

Nesta análise foram feitos cortes de seleção fiduciais em torno das cristas de densidade (R1 a R5) que aparecem ao longo de \bar{R}_o , que também são visíveis como cristas de V_r , ambas nos painéis superiores da Figura 3.1, e ajustando tendências lineares a essas cristas, é possível relacionar marginalmente a localização destes elementos em outros planos, como o plano V-R colorido por -U (Chen et al., 2022). Nesta visualização, são projetadas as linhas fiduciais correspondentes a cada grupo de cristas de densidade selecionados, possibilitando a comparação dos efeitos orbitais do potencial de barra (principalmente \bar{R}_o) com parâmetros diretamente observáveis (R, U, V), onde as cristas de densidade de \bar{R}_o coincidem com a localização das cristas de velocidade -U. Esse acordo qualitativo é uma indicação de que os parâmetros da barra empregados no potencial são uma boa representação do verdadeiro potencial de barra galáctica, já que altas velocidades de grupo Ω_b

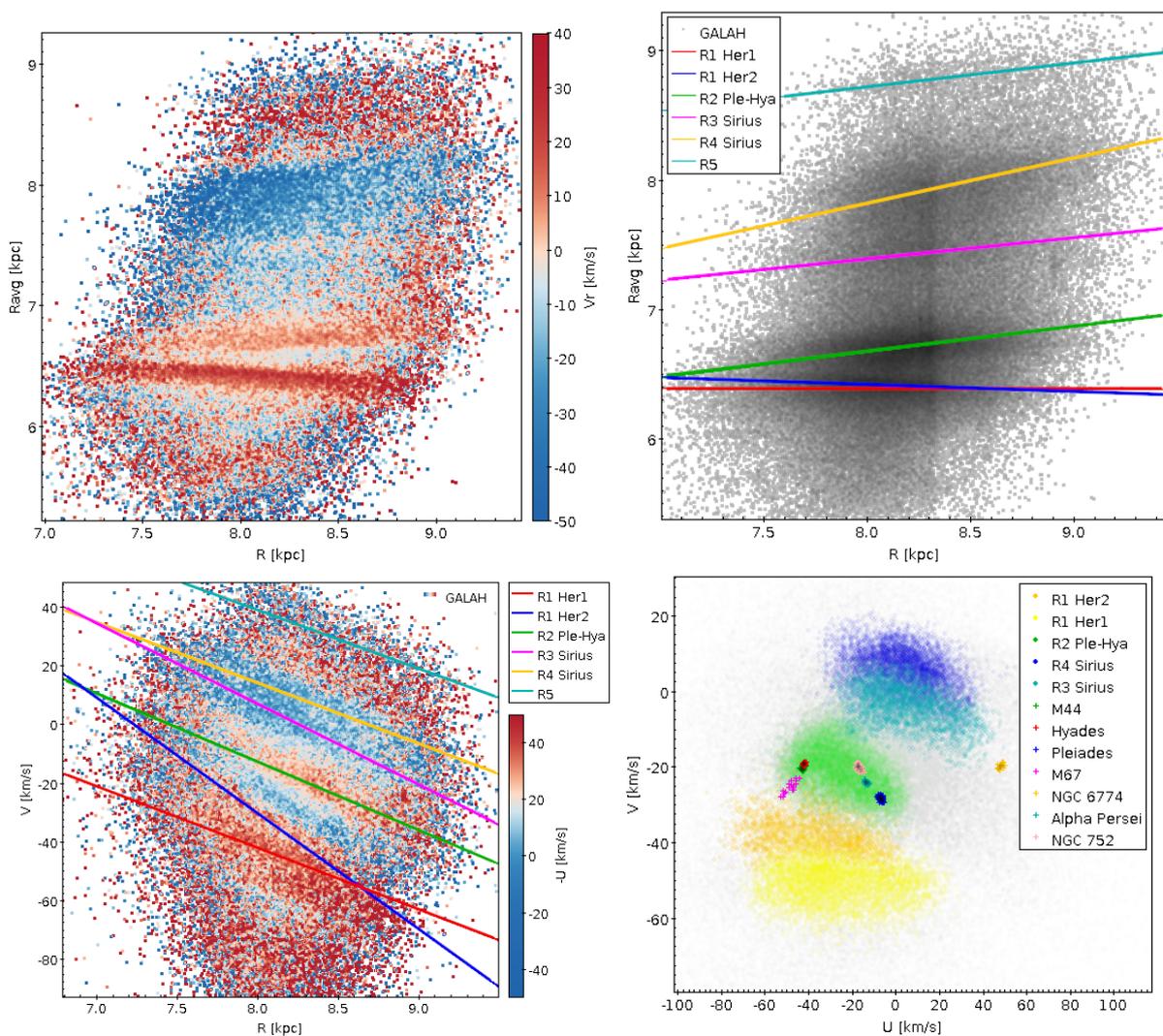


Figura 3.1: Planos de raio galactocêntrico e velocidades para a sub-amostra GALAH. As cristas de velocidade radial galactocêntrica são mostradas no painel superior esquerdo, onde as cristas de densidade estelar correspondentes (R1 a R5) induzidas pelo acúmulo de \bar{R}_o são mostradas com linhas-guia no painel superior direito. As cristas selecionadas nos painéis superiores são projetadas no painel inferior esquerdo como as linhas-guia, e as estrelas correspondentes da seleção fiducial das cristas são mostradas no plano U-V junto com aglomerados abertos no painel inferior direito.

deslocam as ressonâncias de Lindblad (e conseqüentemente a posição das cristas de $\bar{R}o$) em direção ao centro galáctico, dissociando as cristas de velocidade $-U$ das cristas de densidade de $\bar{R}o$. Além disso, essas seleções fiduciais são mostradas na Figura 3.1 no plano U-V juntamente com estrelas de aglomerados abertos disponíveis em nossa amostra, em posições que coincidem com as localizações dos grupos móveis de Hércules, Hyades e Sirius, e as posições das cristas em bom acordo com as detectadas por Bernet et al. (2022). As linhas vermelha e azul royal, antes correspondendo a uma única crista de densidade (R1) em $\bar{R}_o \sim 6.5$ kpc (R1 Her1), foram divididas com a ajuda do plano V-R, onde o alto valor de $-U$ em torno de -40 km/s em V associado a essa crista mostra uma outra crista adicional pequena (R1 Her2) com uma inclinação mais pronunciada. Essa duplicidade pode representar os dois primeiros componentes (Hércules 1 e 2) da estrutura multimodal do *stream* de Hércules mostrado por Asano et al. (2020). Posteriormente, será discutido o *moving group* de Hércules em mais detalhes na seção 7.1.

t-SNE

O algoritmo de incorporação estocástica de vizinhos t-distribuída (*t-distributed stochastic neighbour embedding*, ou *t-SNE*, van der Maaten e Hinton 2008) é um algoritmo não-linear de redução de dimensionalidade para visualizar dados em espaços de alta dimensão em um espaço de baixa dimensão. Isto se dá modelando cada objeto em um ponto bidimensional onde amostras semelhantes são mapeadas em grupos próximos, criando assim ilhas e lacunas de modo que, para o presente propósito, resulte em um plano 2-D onde componentes galácticos distintos devem aparecer agrupados em regiões distintas.

O mecanismo por trás do algoritmo é complexo, porém pode ser resumido da seguinte forma: para cada ponto x_i , calcula-se a distância euclidiana a todos os outros pontos x_n , que é escalada por uma gaussiana em torno de x_i (a variância desta gaussiana é especificada, e é proporcional ao hiper-parâmetro chamado *perplexidade*, discutido mais além no texto), e a isso se dá o nome de probabilidades condicionais, e pode ser entendida como a similaridade entre pontos de uma mesma família no espaço de alta dimensão. Para uma primeira estimativa da distribuição dos pontos no espaço de dimensão reduzida, é usado o método de PCA (*principal component analysis*) para projetar as 2 primeiras componentes principais e mapear os pontos em 2D, e após isso, calculam-se as probabilidades condicionais neste espaço, porém ao invés de utilizar uma gaussiana centrada em cada ponto, é adotada uma distribuição t de Student, afim de evitar problemas de concentração excessiva (*crowding*). Por fim, é iniciado o processo de iteração para modificar as localizações dos pontos no espaço 2D (via *gradient descent*) para que suas distribuições de probabilidades condicionais se aproximem o máximo possível das distribuições no espaço hiperdimensional, minimizando a divergência de Kullback-Leibler como função de custo. Como resultado, ele retorna os pontos dispostos no espaço de baixa dimensão (chamado de *manifold*) que

pode ser visto como um espaço de similaridade, onde *clusters* semelhantes se agrupam e se relacionam com grupos vizinhos. Um bom tutorial para entender a mecânica de como o t-SNE funciona é delineado em Erdem (2020).

4.1 Parametrização

Anders et al. (2018) definiu uma parametrização padrão para a implementação do *sklearn* (Pedregosa et al., 2011) do t-SNE onde dois dos três principais parâmetros (*learning_rate*, doravante *lr* e *early_exaggeration*, doravante *ee*) devem ser definidos como 1 e $0,1 \cdot N_{\text{pontos}}$, respectivamente, o que foi satisfatório para uma amostra de 530 estrelas. O *learning_rate* governa quão rápido o *gradient descent* muda as posições das amostras no espaço 2D ao longo das iterações, e o *ee* governa quão rápido as concentrações (*clusters*) de pontos se movem pelo espaço na fase inicial da convergência, ou como definido na documentação do *openTSNE* (Poličar et al., 2019), ele aumenta as "forças atrativas" entre pontos e torna os *clusters* mais comprimidos. A *perplexidade* (doravante *pp*) é o parâmetro que ajusta a largura de banda das gaussianas centradas em cada amostra que admitirá os pontos para calcular similaridades, e pode ser pensado como um análogo aos *k* vizinhos mais próximos. Na prática, ele governa a preservação das estruturas, onde valores grandes preservam estruturas globais e valores menores preservam estruturas locais, pois regula a quantidade de vizinhos "vistos" por um ponto para ser compreendido no que a distribuição admite como um *cluster* local.

Em testes preliminares deste estudo, tendo a amostra com significativamente mais estrelas (em comparação a Anders et al. (2018), Queiroz et al. (2023) e da Silva e Smiljanic (2023)), o parâmetro *ee* mostrou-se mais apropriado em torno de $0,005 \cdot N_{\text{pontos}}$, e *lr* com valores variando entre 600 e 800, já que os mapas devem se assemelhar a nuvens dispersas em vez de fitas entrelaçadas ou globos uniformes de pontos, seguindo os exemplos da documentação do *sklearn*, onde valores na faixa de 100-150 eram apropriados para manter tanto as estruturas globais quanto as locais. Outro bom tutorial com vários exemplos sobre como a convergência se comporta com base na perplexidade está disponível em Wattenberg et al. (2016). Belkina et al. (2019) mostrou que aumentar o número de iterações na fase de *early_exaggeration* levou a melhores acomodações de estruturas globais, onde aglomerados pertencentes ao mesmo grupo tendiam a não se dispersar em torno do *manifold* final.

Também foi testado modificar a implementação do *sklearn* para permitir a especificação do número de iterações da fase de *early_exaggeration* afim de realizar mais testes, alcançando resultados ligeiramente melhores, mas como discutido mais adiante, isto contribuiu para a escolha de usar outra implementação do t-SNE.

A implementação do *sklearn* tem várias limitações em comparação com a implementação mais recente do *openTSNE* (Poličar et al., 2019), onde esta possui maior velocidade, especificação do número de iterações de *early_exaggeration* (nativamente, em vez de modificar o código-fonte), diferentes configurações de *exaggeration* para cada fase, a possibilidade de obter o estado do sistema ao longo das iterações por meio de funções de *callback* (permitindo a inspeção da convergência), bem como novos recursos, como o anelamento da perplexidade (a modificação da perplexidade ao longo da execução) e a adição de novos dados a uma convergência já pronta. Uma classificação preliminar dos componentes galácticos pode ser usada como controle ao longo das iterações do t-SNE e diferentes parametrizações (como discutido mais adiante na Seção 4.2), usando diferentes espaços de variáveis e seleções de subamostras, permitindo verificações de consistência dos *manifolds* produzidos. Tendo o poder de ajustar os parâmetros e personalizar a convergência, é possível separar antecipadamente grandes estruturas (como disco fino, disco espesso e halo) com uma grande perplexidade, para em seguida, sub-classificá-las reduzindo a perplexidade para continuar as iterações, produzindo um resultado que melhor representa dos componentes galácticos com base na hierarquia de suas propriedades físicas. Uma descrição dos parâmetros e procedimentos usados para ajustar o t-SNE e os mapas de convergência serão apresentados na Seção 4.2.

4.2 Convergência dos manifolds

O processo de convergência para o t-SNE implicou em testes exaustivos de parametrização para obter uma cascata de iterações satisfatória, no qual fosse possível observar a separação gradual das estruturas pré-rotuladas por sua hierarquia relacional. Por exemplo, poderíamos esperar que o componente rico em elementos- α , dinamicamente quente (nomeadamente o disco espesso canônico), se separasse logo no início do disco fino jovem, rico em metais e subsequentemente mostrasse algumas outras estruturas, como o halo dinâmico. Com a habilidade do *openTSNE* de mudar e ajustar hiper-parâmetros em um

Tabela 4.1 - Hiperparâmetros *early exaggeration* (ee), *exaggeration* (ex), *learning rate* (lr), *perplexity* (pp), e iterações utilizadas em cada etapa de convergência para APOGEE e GALAH.

Step	ee	ex	lr	pp	ee iter.	normal iter.
APOGEE						
primário	80	2	auto	250	500	1000
anelamento 1	-	2	90	170	-	200
anelamento 2	-	5	70	130	-	300
anelamento 3	-	1.6	auto	50	-	2000
GALAH						
primário	90	1.7	auto	150	500	1000
anelamento	9	1.8	auto	25	300	2000

processo de iteração contínua, e de se comunicar com o objeto iterador via os *callbacks*, foi possível construir uma cascata de parâmetros para cada um dos conjuntos de dados RGB (APOGEE e GALAH) e obter os *manifolds* finais, detalhados nas seções seguintes.

Foi feita uma primeira separação de populações conhecidas para acompanhar a convergência em cada um dos *surveys* (APOGEE e GALAH) e definir o melhor conjunto de hiper-parâmetros em cada passo da cascata de convergência, que consistiu em diferentes anelamentos (mostrados na Tabela 4.1), ilustrados na Figura 4.1.

A divisão das concentrações muda no início de cada anelamento, especialmente para o GALAH, e vemos que os grupos identificados tendem a se acomodar e se definir mais quando o novo valor de *early exaggeration* começa no estágio de anelamento. A concentração em laranja claro representando o *outer thick disk* transita entre a porção laranja (parte interna do disco espesso) e a porção inferior esquerda que representa as populações externas, e mostra alguma relação com o *scattered metais-poor outer disk*.

Os parâmetros cinemáticos e químicos a serem utilizados como as dimensões de entrada do t-SNE foram E , Z_{max} , L , L_z/L , V_ϕ , e , R_{ap} , R_{per} , $[Fe/H]$, $[Mg/Fe]$, um elemento leve ímpar-Z ($[Na/Fe]$ para GALAH e $[Al/Fe]$ para APOGEE), $[Mn/Fe]$ e um elemento pesado de processo-s ($[Ba/Fe]$ para o GALAH e $[Ce/Fe]$ para o APOGEE). A distância máxima do plano galáctico Z_{max} é extremamente útil para rastrear dinamicamente os discos fino e espesso, assim como o halo. Apresenta-se L_z/L como uma medida direta da inclinação orbital, com base em quanto a componente Z (em relação ao plano galáctico) do momento angular contribui para o momento angular total, onde valores próximos de 0 se aproximam de órbitas perpendiculares ao plano galáctico, e valores negativos representam movimentos

retrógrados. E e L_z são tipicamente usados no diagrama de Lindblad, e são capazes de separar populações acretadas e/ou dominadas por dispersão, e embora foi incluído apenas L , L_z é recuperado pelo uso de L_z/L , com V_ϕ não apenas reforçando seu caráter, mas também sendo capaz de segregar os *moving groups* conhecidos no plano U-V (como mostrado na Figura 6.5 mais adiante). Aqui usamos os momentos angulares e excentricidades instantâneos, já que estas grandezas não se conservam em um potencial não axissimétrico. Os raios apocêntrico e pericêntrico colocam as restrições sobre quão fundo uma estrela pode mergulhar para o centro da galáxia ou se alongar até as partes mais externas do disco, e a excentricidade e é fundamental para traçar órbitas circulares ou alongadas. Pode-se argumentar que R_{ap} , R_{per} seriam suficientes para mapear este parâmetro orbital, mas como o espaço euclidiano (onde opera o t-SNE) é linear, e não pode ser obtido como uma combinação linear dos raios, o que não é o caso de L_z , que é linearmente dependente de L_z/L e L . Realizamos uma normalização min-max em todos os parâmetros (exceto L_z/L e e que já estão na faixa de valores entre 0 e 1) antes de realizar a execução do procedimento, um passo muito importante não apenas para o t-SNE, mas também para algoritmos de aprendizado de máquina em geral.

A inicialização foi definida como *pca*, onde a convergência não é afetada por um estado aleatório (no caso da inicialização *random*), produzindo um resultado determinístico que se sustenta para qualquer execução, dependendo apenas dos hiper-parâmetros de entrada. A métrica usada foi a distância cosseno (*cosine-distance*), como recomendado pela documentação do *openTSNE*. A cascata usada para o APOGEE consistiu em uma parametrização primária do t-SNE com *early exaggeration* (correspondendo aos primeiros 5 e subsequentes 10 quadros da Figura 4.1), seguida por duas etapas de anelamento (*anneal₁* e *anneal₂* na Figura 4.1), e um anelamento final (*anneal₃*), ambos sem *early exaggeration*. Para o GALAH foram feitas duas etapas, ambas com *early exaggeration*, com a primeira correspondendo ao mesmo padrão que APOGEE na Figura 4.1, e a segunda rotulada como *anneal₁* para a fase de *early exaggeration* e *anneal₂* para a fase de iterações normais.

Para determinar a melhor parametrização, foram produzidos inúmeros mapas via *grid-search*, primeiramente para o estágio de *early exaggeration* e depois para os demais passos da cascata, escolhendo-se o mapa que produzia a melhor separabilidade visual dos pontos. Os hiper-parâmetros finais usados em cada etapa de convergência são resumidos na Tabela 4.1.

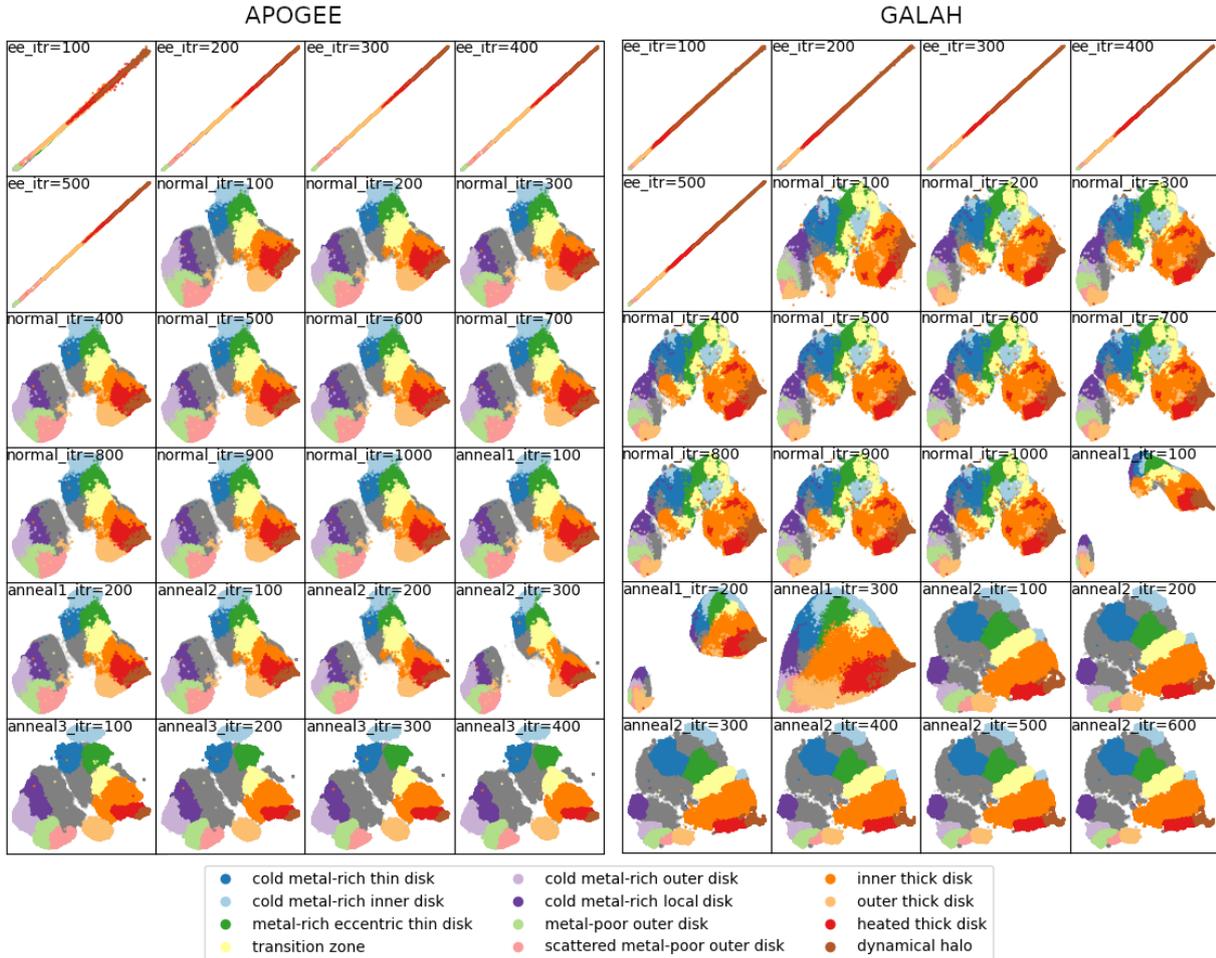


Figura 4.1: Iterações da convergência do *t*-SNE com mapeamento colorido das populações de referência para a amostra APOGEE no painel esquerdo, e para a amostra GALAH no painel direito. As regiões nomeadas foram escolhidas em um processo iterativo durante a convergência do *manifold*. Aqui é exibida a segregação final das populações, identificando e comparando visualmente os dados APOGEE e GALAH. As últimas iterações do anelamento são mostradas apenas até o passo 600, uma vez que o *manifold* atinge um estado muito próximo de sua forma final. Os estágios de iteração são anotados em cada quadro, representando um quadro a cada 100 iterações, conforme esquema da Tabela 4.1, e seguem uma ordem da esquerda para a direita e de cima para baixo. Os pontos em cinza-escuro representam grupos não classificados.

Seguindo esta ideia de hierarquia relacional, rastreamos a convergência do *manifold* colorindo e rotulando grupos de referência para alguns componentes galácticos bem conhecidos (disco espesso, disco fino rico em metais e halo dinâmico, por exemplo), monitorando o comportamento de deslocamento das estruturas no *manifold* em um processo iterativo em cada teste, como mostrado na Figura 4.1 para as duas amostras dos *surveys*. A identificação dos grupos de referência foi feita visualmente inspecionando mapas coloridos por parâmetros (como mostrado, por exemplo, nas Figuras 6.2 e 6.3, discutidas detalhadamente na Seção 6), e comparando as localizações desses grupos entre os *manifolds* do APOGEE e GALAH de tal maneira que ambos mostrassem as mesmas estruturas, acomodadas em locais similares do espaço, e com padrões químicos e cinemáticos muito semelhantes. Os nomes foram escolhidos para os grupos de modo a facilitar a relação de ideias por meio do jargão astronômico.

A divisão das massas de pontos muda no início de cada anelamento, especialmente para o GALAH, e vemos que os grupos identificados tendem a se acomodar e se definir mais quando o novo *early exaggeration* começa na fase de anelamento. O blob laranja claro representando o *outer thick disk* transita entre a porção laranja (parte interna do disco espesso) e a parte inferior esquerda que representa as populações externas do disco fino, e mostra alguma relação com o *scattered metal-poor outer disk*, discutido mais detalhadamente na Seção 7.1.

Análise de idades

No processo de segregação e caracterização de populações, as idades estelares podem desempenhar um papel importante ao ajudar a determinar a sequência de eventos que ocorreram em um cenário astrofísico, e com esses parâmetros é possível separar populações que seriam outrora indistinguíveis por compartilharem propriedades semelhantes em outras variáveis, e assim estabelecer uma linha do tempo da constituição da Galáxia.

5.1 Comparação de métodos de determinação de idade

A amostra GALAH tem idades estimadas a partir do código bayesiano BSTEP (Sharma et al., 2017), com base em parâmetros estelares observados e nas isócronas PARSEC-COLIBRI (Marigo et al., 2017). Por outro lado, as idades do APOGEE foram estimadas usando o método astroNN (Leung e Bovy, 2018) treinado com as idades asterossísmicas de Montalbán et al. (2021) e Mackereth et al. (2019). No entanto, existem algumas inconsistências entre as duas estimativas de idade se as compararmos usando as estrelas comuns entre os dois *surveys*. Diante da heterogeneidade entre os métodos de determinação de idade padrão do APOGEE e GALAH (astroNN e BSTEP), e a falta de uma amostra correspondente grande o suficiente de outras fontes, como StarHorse (Queiroz et al., 2023), optamos por não usar as idades como principal parâmetro de entrada para t-SNE, pois introduziria mais erros e efeitos indesejados em um espaço de parâmetros dimensional já grande, deixando a idade como parâmetro de validação. Em vez disso, optamos por usar as razões $[\text{Ce}/\text{H}]$ e $[\text{Ba}/\text{H}]$ que, conforme discutido a seguir, também podem funcionar como um estimador de idade melhor que a metalicidade ($[\text{Fe}/\text{H}]$).

Aqui são exibidas comparações entre as estimativas de idade do APOGEE e do GA-

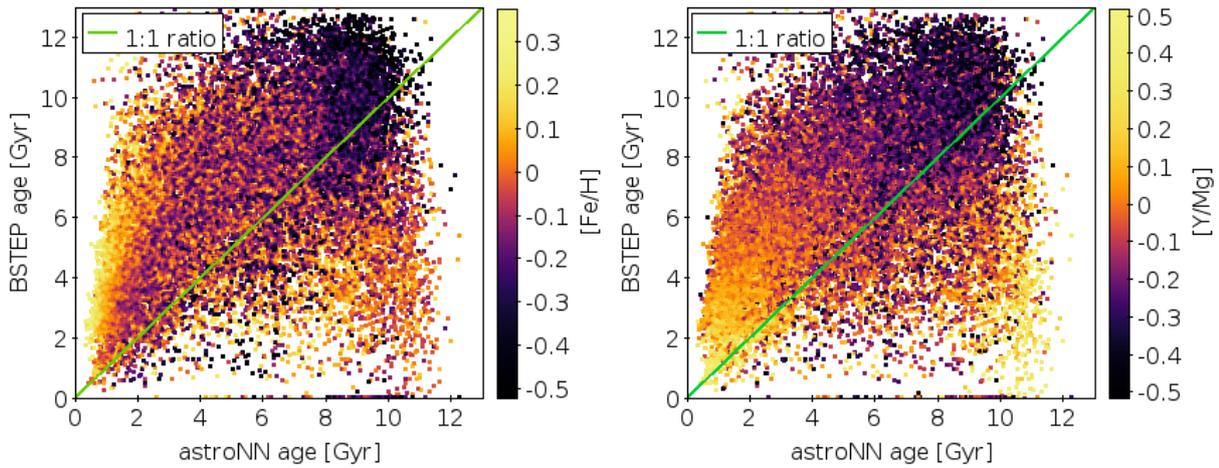


Figura 5.1: Idades do BSTEP vs. idades do astroNN, coloridas por [Fe/H] no painel esquerdo e por [Y/Mg] (Spina et al., 2017) no painel direito.

LAH juntamente com outros catálogos relacionados de idades com os mesmos métodos de determinação. Também são apresentadas comparações e algumas ideias sobre o uso de relógios químicos na estimativa de idade, sua relação com o astroNN e BSTEP, e seu comportamento nos *manifolds* em comparação com as idades do BSTEP.

Spina et al. (2017) encontraram um relógio químico baseado nas razões [Y/Mg] para determinar idades de gêmeas solares, que podem ser usados junto com [Fe/H] como um guia para inspecionar o comportamento da relação idade BSTEP x astroNN, e mais geralmente, de estimativas baseadas em isócronas vs. asterossismologia. A Figura 5.1 mostra as idades das estrelas comuns entre APOGEE e GALAH.

Embora haja alguma correlação entre as idades ($r_{Pearson} = 0.4$), há uma tendência em aspecto de "cotovelo", e uma cauda de estrelas ricas em metais dispersas na região de maiores idades maiores do astroNN, provavelmente originadas dos diferentes métodos (baseados em isócronas e asterossismologia) e duas amostras diferentes (Montalban et al. 2021 para estrelas de baixa metalicidade e APOKASC-2 de Pinsonneault et al. 2018) na estimativa do APOGEE. Essa grande divergência da proporção 1:1 em estrelas ricas em metais para astroNN x BSTEP sinaliza que é preciso ter cuidado ao usar as idades nessas metalicidades.

Comparando as amostras GALAH e APOGEE (sem cortes de RGB e MS) com idades do StarHorse, que usa uma estimativa bayesiana baseada em isócronas semelhante ao BSTEP (Figura 5.2), é possível notar uma correlação muito maior entre as idades do StarHorse x BSTEP ($r_{Pearson} = 0.99$) do que as idades do StarHorse x astroNN ($r_{Pearson} = 0.67$).

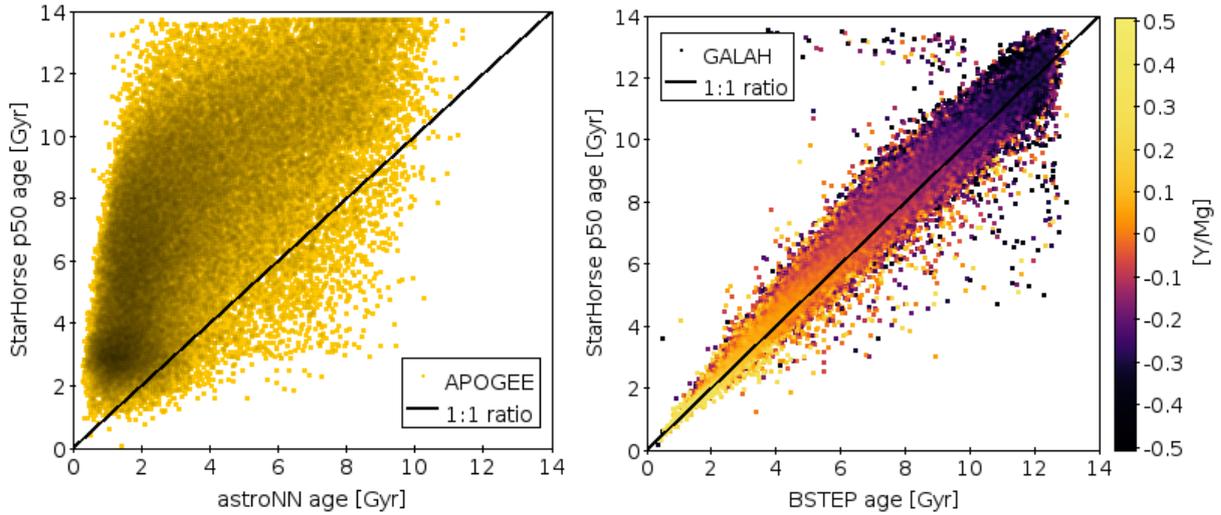


Figura 5.2: Idades do StarHorse vs. idades do astroNN no painel esquerdo e idades do StarHorse vs. BSTEP coloridas por $[Y/Mg]$ no painel direito.

Tanto no APOGEE quanto no GALAH, as estrelas do StarHorse com idades disponíveis estão concentradas na região de *turnoff* do diagrama de Kiel, como mostrado na Figura 5.4.

Na mesma linha, também é exibida uma comparação das idades obtidas a partir da asterossismologia no *survey* K2 para uma subamostra do GALAH (Zinn et al., 2022) com a amostra comum para este estudo (Figura 5.3), onde existe uma correlação maior com astroNN ($r_{Pearson} = 0.57$) do que com BSTEP ($r_{Pearson} = 0.35$). A amostra K2 está concentrada na região do ramo das gigantes do diagrama de Kiel, também na Figura 5.4. O padrão de cotovelo parece surgir de todas as relações de idade asterossismológica vs idade baseada em isócronas presentes nesta análise.

É evidente que os diferentes métodos de estimativa de idade podem levar a grandes vieses e desvios se comparados diretamente, e esta é uma das principais razões pelas quais a idade não foi um parâmetro de entrada para a convergência do t-SNE. Portanto, a comparação direta entre idades somente é recomendada para estimativas feitas com os mesmos métodos.

5.2 Relógios químicos

Durante a convergência dos *manifolds* do t-SNE, foi utilizado um resultado preliminar do GALAH para inspecionar várias razões elementais e comparar seus padrões com a estimativa de idade do BSTEP, como exibido na Figura 5.5. As cores ao longo de diferentes

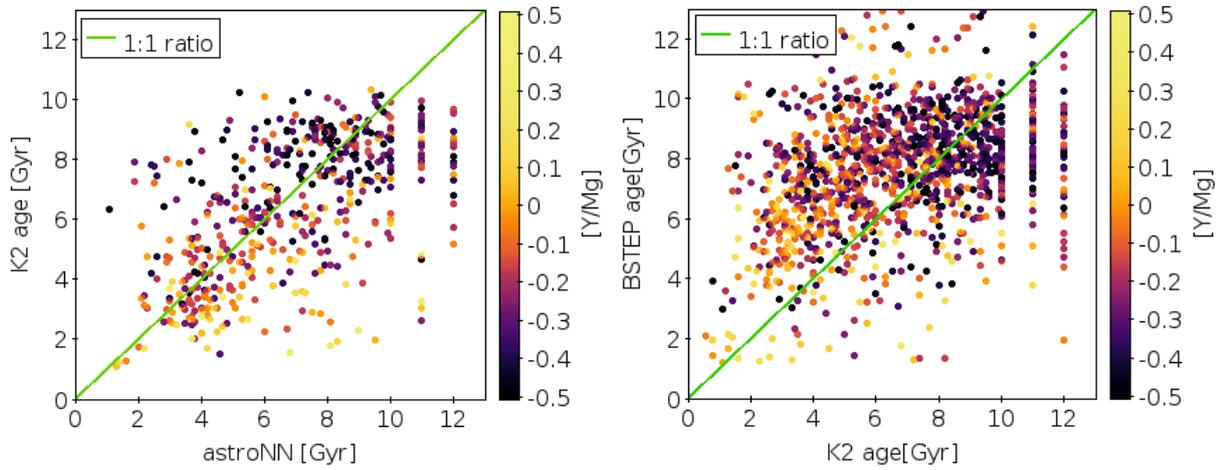


Figura 5.3: Idades do K2 vs. astroNN para as estrelas comuns no painel esquerdo e idades do BSTEP vs. K2 no painel direito, ambos codificados por cor por $[Y/Mg]$.

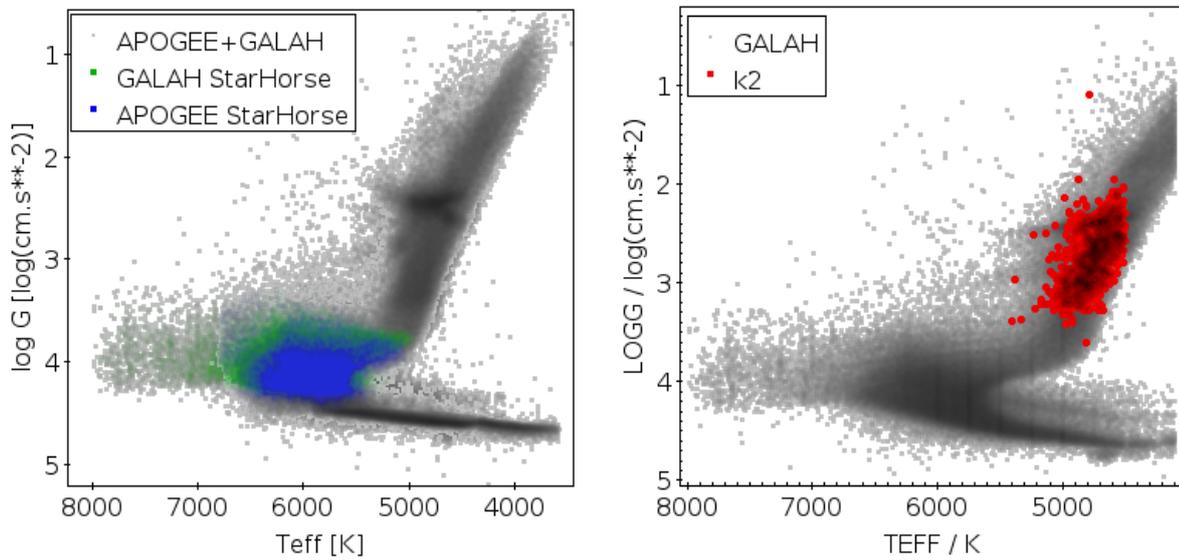


Figura 5.4: Subamostras de estrelas com estimativas de idade externas e seus locais no diagrama de Kiel. As estrelas do StarHorse com idades disponíveis são mostradas no painel esquerdo e as estrelas do K2 são mostradas no painel direito.

razões foram combinadas usando a escala de histograma do TOPCAT (Taylor, 2005) para permitir uma comparação justa e compreensível do padrão, e também como as razões se comportaram ao longo do *manifold*.

Nesses *manifolds*, por comparação qualitativa, podemos ver que a razão $[Y/Mg]$ pode reproduzir de perto a maioria das características das estrelas moderadamente ricas em metais e mais jovens (< 8 Gyr), mas falha para as populações ricas em α mais antigas e pobres em metais, subestimando as idades. O $[Fe/H]$ falha em reproduzir a relação de idade em contraste com $[Ba/H]$, que mostra um padrão muito semelhante à idade no *manifold*. Também vejo uma melhoria para estrelas ricas em metais subtraindo $[Na/Fe]$ de $[Ba/H]$. A relação $[Ba/Eu]$ mostrou a representação mais próxima do padrão de idade para a população rica em α , mas não tão bem para a parte rica em Fe. Além disso, o APOGEE carece de um elemento de processo-r para normalizar o Ce, impossibilitando uma comparação direta com o GALAH.

Como citado por Kobayashi et al. (2020), elementos de processo-s "leves" (Sr, Y, Zr) também são produzidos por estrelas de massa intermediária no ramo assintótico das gigantes (AGB), enquanto elementos de processo-s "pesados" (Ba, La, Ce) são principalmente de estrelas AGB de baixa massa, então uma possível explicação para essa correlação direta $[Ba/H]$ -idade é um enriquecimento contínuo de Ba de estrelas de baixa massa ao longo da evolução da Galáxia, já que os efeitos de supernovas do tipo Ia (principalmente responsáveis pelo enriquecimento do pico do Fe, necessitando de sistemas binários em interação) e supernovas do tipo II não são os principais contribuintes para o enriquecimento de Ba, com exceção da contribuição do processo-r vinda de estrelas massivas, onde o $[Eu/Fe]$ pode ser usado para ajustar esse efeito e filtrar a amostra. Alternativamente, o $[Na/Fe]$ também pode ser útil como um substituto para reduzir esse efeito, já que o Na pode ser produzido tanto pelo processo de *hot-bottom-burning* quanto pela queima de carbono, ambos em estrelas massivas (Boeltzig et al., 2016). Infelizmente, sem quaisquer elementos de processo-r na amostra do APOGEE e o $[Na/Fe]$ não devidamente medido para o extremo pobre em metais, resta apenas o Ce como um elemento de processo-s. Como tanto o Ba quanto o Ce são elementos de processo-s pesados, isso permite o uso de $[Ce/H]$ como um possível traçador de idade auxiliar na amostra do APOGEE comparando seu comportamento com $[Ba/H]$ e a idade do GALAH nos *manifolds* preliminares apresentados.

É bom lembrar que, mesmo que os relógios químicos possam, em geral, ser bons estima-

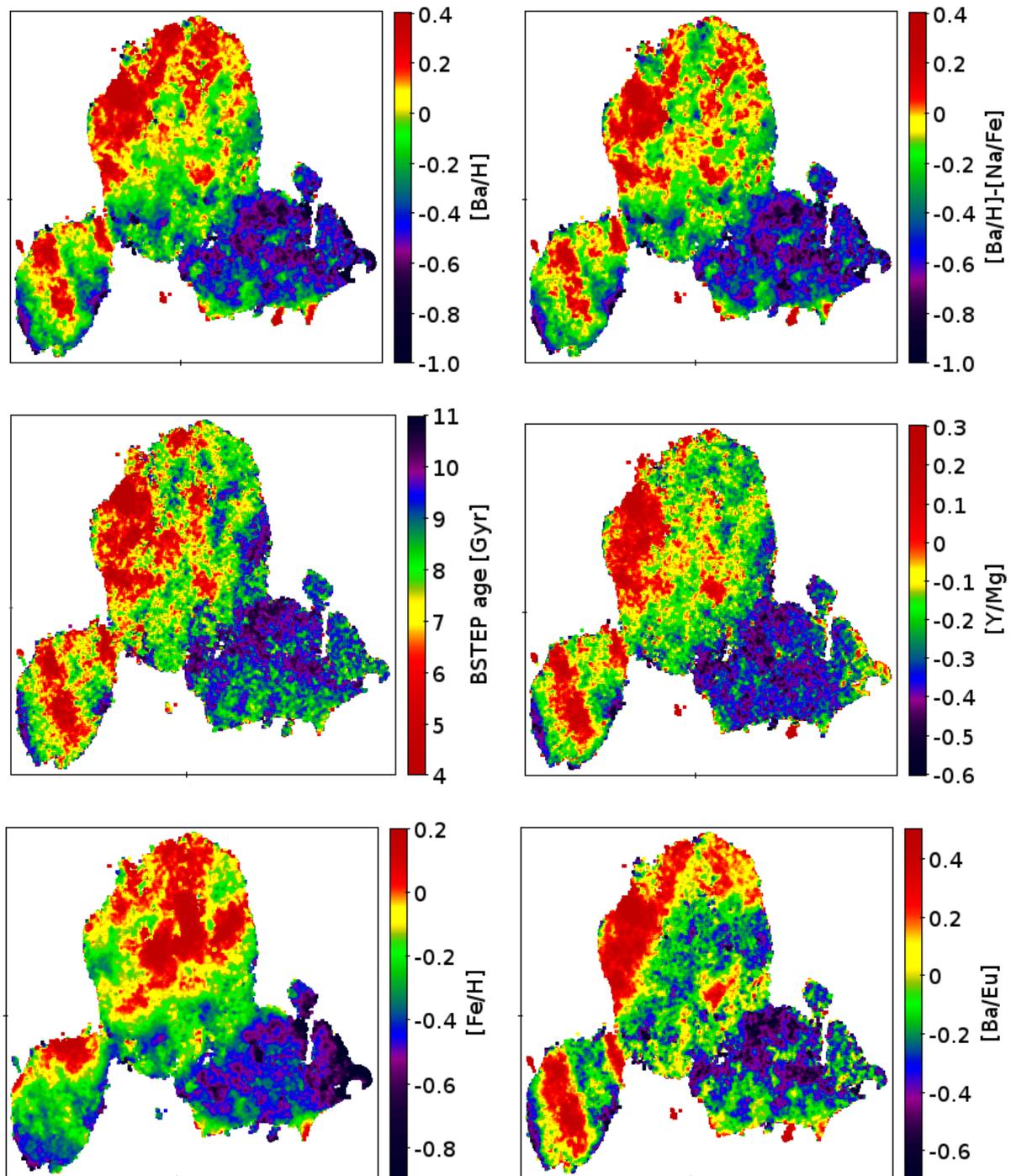


Figura 5.5: Manifolds do t-SNE preliminares para a amostra GALAH coloridos por várias razões de abundância e idades do BSTEP. Nestas visualizações, o *disco externo* (principalmente $R > 8$ kpc) aparece como a mancha inferior esquerda, o *disco interno* rico em metais é a grande concentração central e a população rica em α dinamicamente quente aparece como a concentração inferior direita.

dores de idade na ausência de medidas mais diretas como a asterossismologia, populações com abundâncias anômalas de elementos pesados podem levar a grandes erros ao estimar suas idades quimicamente.

Resultados

O principal objetivo deste trabalho é produzir um mapa onde possamos visualizar a estrutura galáctica de uma forma intuitiva, permitindo-nos identificar subestruturas e relações que de outra forma não seriam facilmente acessíveis. A definição das regiões foi feita visualmente e pode ser extremamente útil para dissecar algumas populações específicas, suas peculiaridades e como elas se enquadram na construção galáctica. Os *manifolds* finais são mostrados na Figura 6.1 com algumas das principais estruturas identificadas rotuladas em cores diferentes para APOGEE e GALAH, com suas posições mapeadas coincidindo entre os *surveys*. A legenda é agrupada em grandes grupos para guiar os olhos.

6.1 Visualização por grandezas físicas

Os *manifolds* coloridos pelas grandezas físicas são as figuras mais importantes que permitem a distinção de grupos de características comuns por meio de uma análise e comparação cuidadosa de cada painel, onde os mapas de cores das variáveis foram escolhidos para destacar diferentes faixas de valores e trazer à tona características nos mapas para segregar as populações. Estes mapas são mostrados e discutidos na Figura 6.2 para o APOGEE e na Figura 6.3 para o GALAH.

Além disso, uma medida importante para a cinemática das populações é a dispersão da velocidade nos componentes V_r , V_ϕ e V_z da velocidade galactocêntrica, e isso foi feito dividindo os mapas em hexágonos e tomando o desvio padrão das velocidades dentro de cada *bin*. Os *manifolds* de dispersão de velocidade com *binagem* hexagonal são mostradas na Figura 6.4 para APOGEE e GALAH. É possível verificar a concordância entre populações com maiores excentricidades e maiores σV_r nos mapas, e também o acordo daquelas com

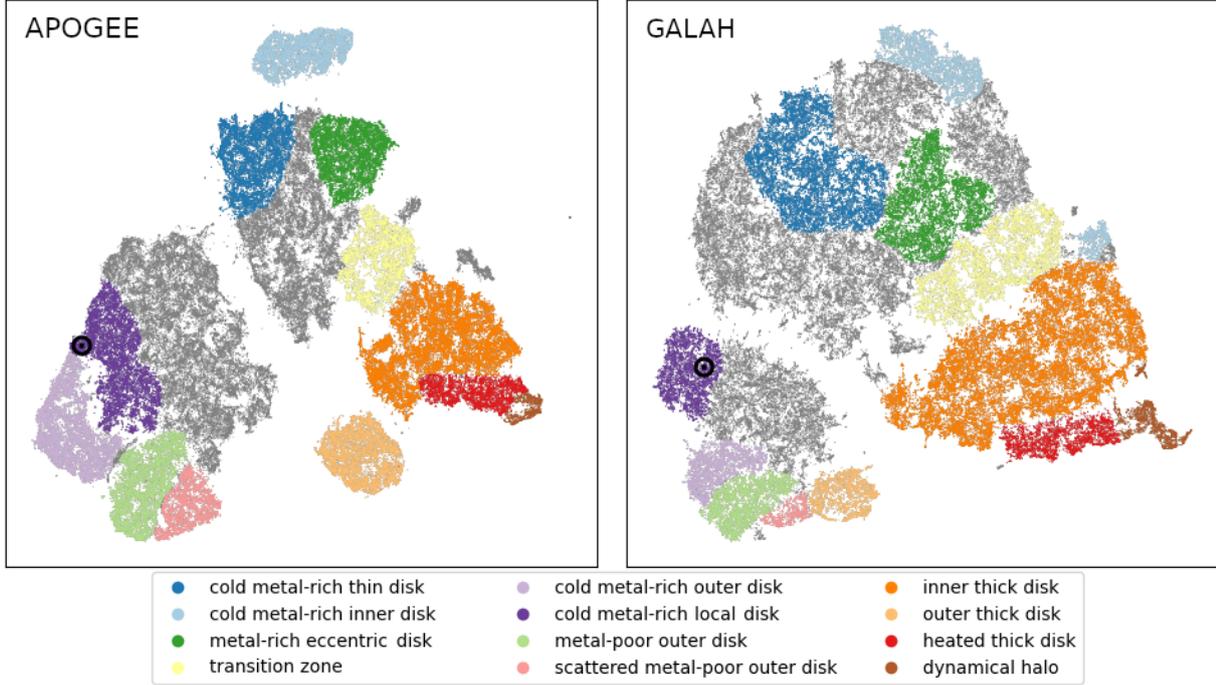


Figura 6.1: *Manifolds* finais alcançados para APOGEE (painel esquerdo) e GALAH (painel direito). A marca \odot representa a localização do sol no *Manifold*. As marcações dos eixos foram omitidas porque as coordenadas do *manifold* não têm significado físico. Os grupos rotulados como "inner" são para $R_{avg} \lesssim 7$ kpc e "outer" são para $R_{avg} \gtrsim 7$ kpc.

maiores Z_{max} e maiores σV_z como um bom teste de sanidade para a consistência cinemática.

Os grupos selecionados foram desenhados à mão, inspecionando cuidadosamente a cor dos parâmetros e os *manifolds* de dispersão de velocidade para produzir populações consistentes para ambos os *surveys* ao mesmo tempo, procurando lacunas nas concentrações e saltos nos valores das variáveis (nos mapas de cor) que poderiam delinear os limites das regiões. Isto foi possível devido à configuração final dos *manifolds*, mostrando as principais componentes galácticas aproximadamente nos mesmos locais tanto para APOGEE quanto para GALAH, o que seria extremamente difícil de alcançar em outras implementações de t-SNE, onde o ajuste fino das etapas de convergência desempenha um papel importante no resultado desejado.

6.2 Identificação de estruturas

Ao analisar as Figuras 6.2 e 6.3, o principal contraste entre as amostras dos *surveys* é o espalhamento de pontos e separabilidade visual. Embora os parâmetros orbitais sejam derivados usando a mesma fonte, as abundâncias químicas têm uma dispersão muito

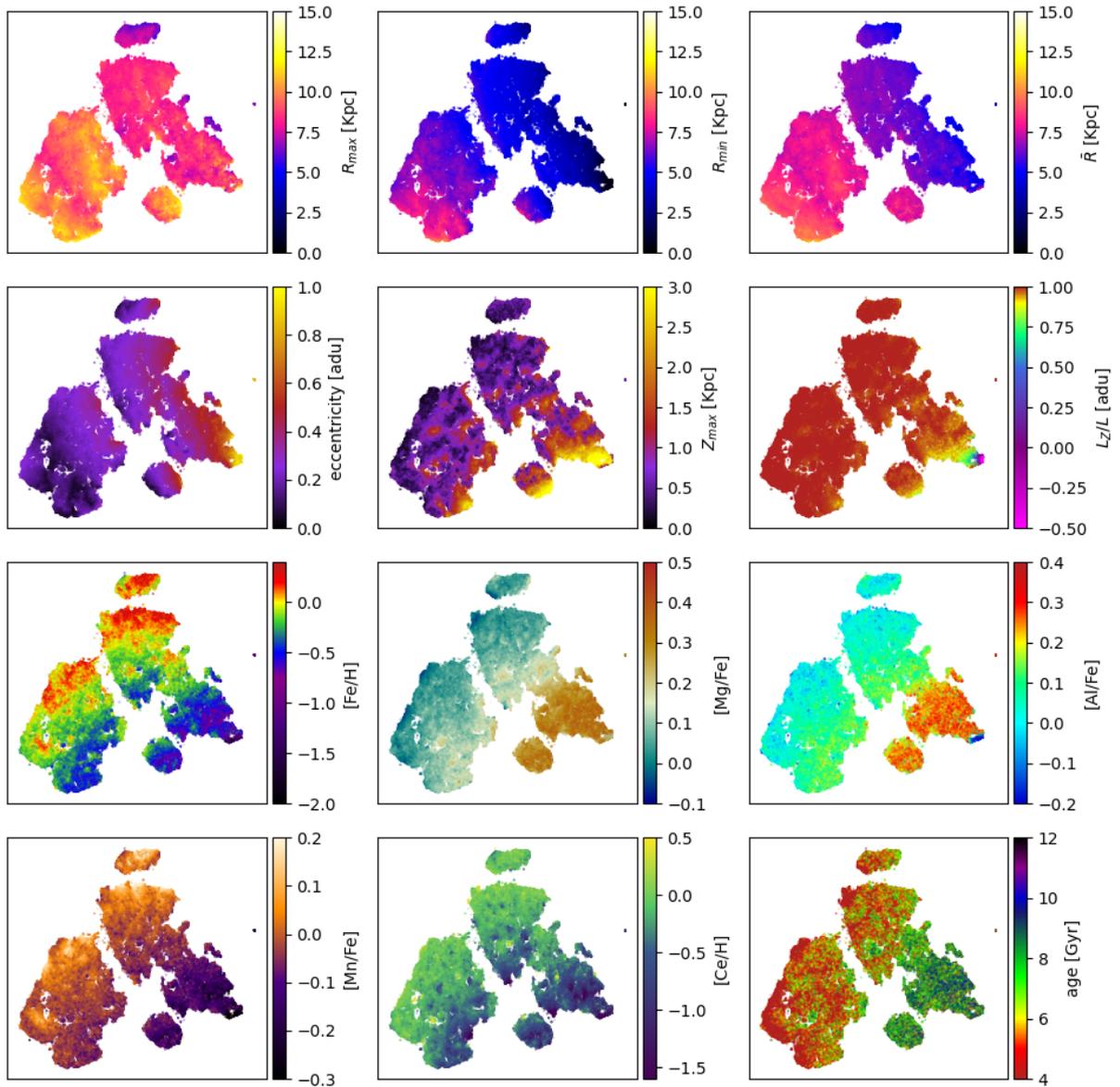


Figura 6.2: *Manifold* do APOGEE colorido pelos parâmetros químicos e dinâmicos selecionados para a análise.

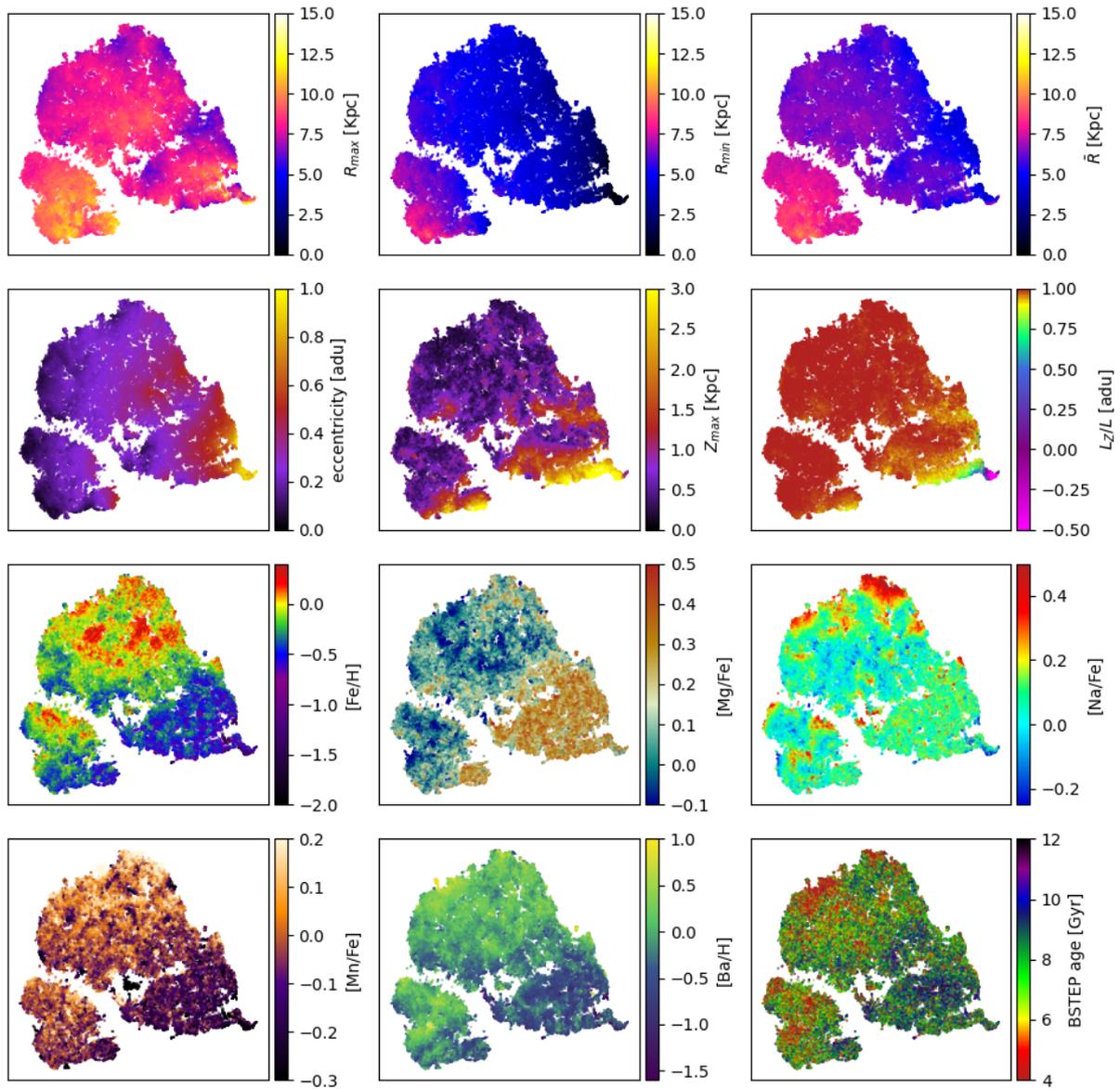


Figura 6.3: *Manifold* do GALAH colorido pelos parâmetros químicos e dinâmicos selecionados para a análise.

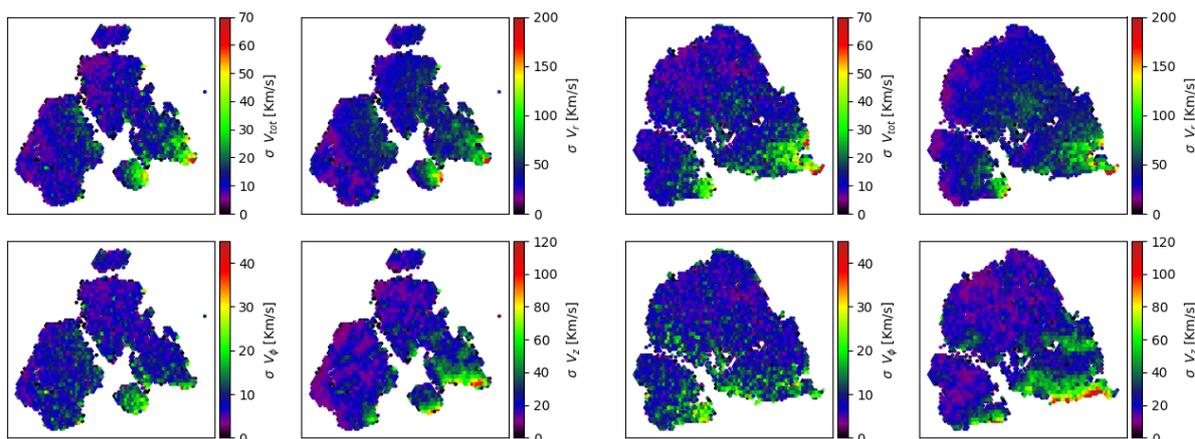


Figura 6.4: *Manifolds* do APOGEE (painel esquerdo) e GALAH (painel direito) coloridos pela dispersão da velocidade total e componentes radial (V_r), tangencial (V_ϕ) e transversal ao plano do disco (V_z).

maior no GALAH do que no APOGEE, o que se traduz em regiões mais concentradas e distintas para o último. As idades, como mencionado anteriormente, não foram usadas como características de entrada do t-SNE, mas são marcadores valiosos para as populações mais antigas e para comparação dentro da amostra de cada *survey*. Muitos dos grupos rotulados carregam uma designação de "interno" (*inner*) ou "externo" (*outer*) que se refere principalmente à sua localização de R_{avg} , aparecendo em contraste nos painéis superior-direitos das Figuras 6.2 e 6.3, e mais adiante na Figura 7.2 como uma distribuição bimodal de toda a amostra do APOGEE. Em geral, os grupos "internos" são para $R_{avg} < 7$ kpc e os "externos" são para $R_{avg} > 7$ kpc.

Uma diferença notável entre os dois *surveys* é a proporção de tamanho das concentrações, que são explicadas pela amostragem do céu de cada um. O APOGEE varre principalmente o céu setentrional, que aponta em direção ao anticentro galáctico e, portanto, há mais estrelas do disco externo. Por outro lado, o GALAH varre o céu meridional na direção do centro galáctico, portanto são esperadas mais estrelas do disco interno (em relação ao raio solar) na amostra. Além disso, o GALAH basicamente evita o plano galáctico (com exceção do centro), enquanto o APOGEE amostra o céu disponível de maneira mais uniforme.

6.2.1 Disco espesso

É fácil identificar o disco espesso devido ao seu caráter enriquecido em elementos- α , à menor metalicidade geral, maior Z_{max} e órbitas inclinadas em relação ao plano galáctico

(menor L_z/L), e especialmente dispersões de velocidades mais altas na porção inferior direita dos mapas, como mostrado nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4. O disco espesso aparece dividido em dois componentes: *inner thick disk* ligado à corotação da barra, e o *outer thick disk* associado à concentração em $\bar{R}_o \sim 8-9$ kpc (identificado aqui como o raio de corotação dos braços espirais, baseado nos resultados de Athanassoula (1980), Garma-Oehmichen et al. (2021) e Dias et al. (2019)), tendo um alto σV_ϕ contrastante com o resto do mapa. Tanto no APOGEE quanto no GALAH é possível detectar uma concentração um pouco mais antiga, que apresenta maiores dispersões de velocidade radial e excentricidades, e será discutida mais adiante. Na região inferior desta população também podemos notar uma porção dinamicamente mais quente com valores ainda maiores de Z_{max} e órbitas altamente inclinadas, atingindo valores negativos (órbitas retrógradas) em sua extremidade direita. Esta porção é o chamado disco espesso *aquecido*, que está associado à fusão com Gaia-Sausage-Enceladus (GSE), onde sua extremidade direita é uma parte do halo dinâmico que inclui as populações acretadas com menores abundâncias de Mn, Na e Al.

Além disso, uma zona de transição (*transition zone*) aparece entre o disco fino, dinamicamente frio, rico em metais e o disco espesso enriquecido em elementos α , com características químicas moderadas para praticamente todos os casos, incluindo as idades, onde esta região é claramente mais antiga quando comparada com o disco fino. Semelhante a algumas das regiões selecionadas, esta zona mostra algumas subestruturas que serão discutidas mais adiante.

6.2.2 Disco fino

A região central superior é composta principalmente por estrelas de disco fino dinamicamente mais frias com metalicidades mais altas, principalmente contidas dentro do raio galactocêntrico solar dentro de um *disco interno*. Existem muitas características interessantes nesta estrutura, e uma delas é a porção de maior excentricidade à direita com maior dispersão de V_ϕ (rotulada *metal-rich eccentric disk*), que poderia ser associada ao *moving group* de Hércules. Pérez-Villegas et al. (2017) apontaram que esta população dinâmica induzida pela barra é composta por estrelas que se movem entre o raio solar e as regiões mais internas da Galáxia, mostrando-se como uma sobredensidade no plano U-V (Figura 2 de seu artigo), atingindo aproximadamente -30 km/s em U e -50 km/s em V, o que se traduz em $(V_r, V_\phi) = (18, 9, 200, 24)$ km/s considerando seu LSR em $(U, V) = (-11, 1, -12, 24)$

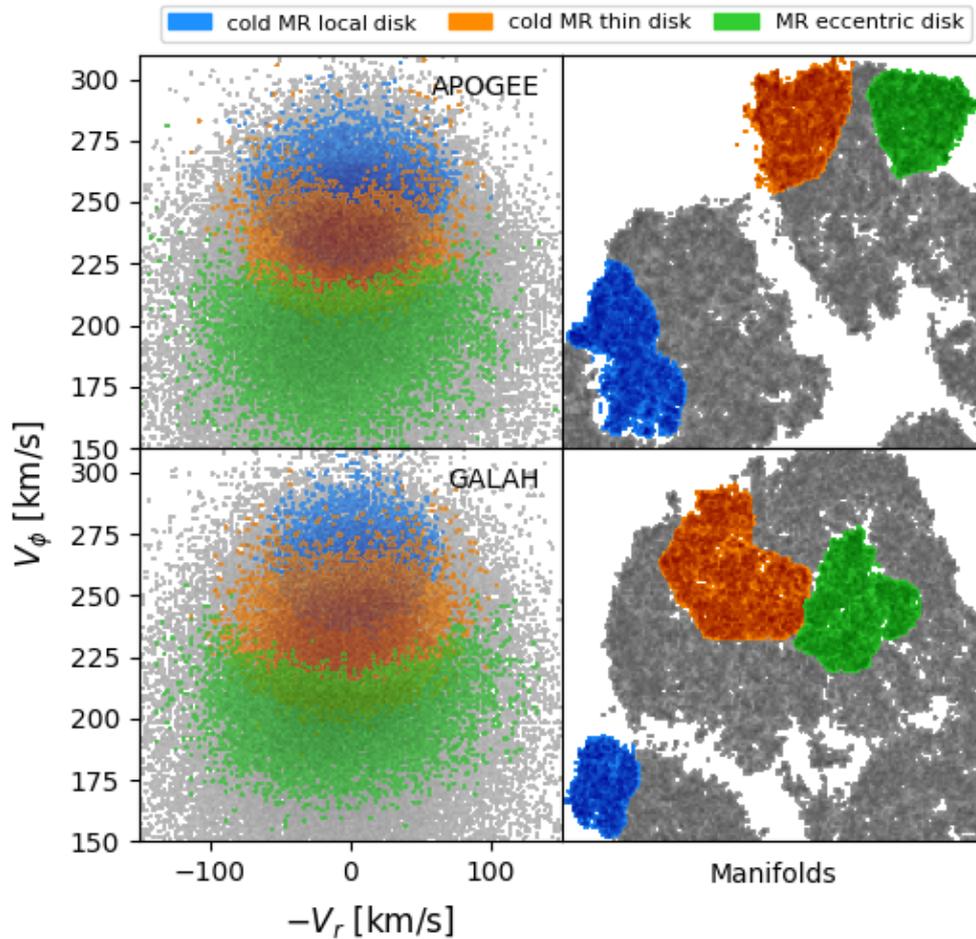


Figura 6.5: Plano $V_\phi - V_r$ (painéis esquerdos) e respectivos *manifolds* (painéis direitos) para populações ricas em metais do APOGEE e GALAH, mostrando as populações *metal-rich eccentric disk* (verde), *dcold metal-rich thin disk* (laranja) e *cold metal-rich local disk* (azul).

km/s, e uma rotação galáctica local de 238 km/s, enquanto a população *metal-rich eccentric disk* atinge picos de densidade em $(V_r, V_\phi) = (24, 34, 200, 28)$ km/s para o APOGEE e $(V_r, V_\phi) = (16, 4, 203, 63)$ km/s para o GALAH. Além disso, os rotulados *cold metal-rich thin disk* e *local metal-rich thin disk* poderiam ser associados aos grupos móveis de Hyades e Sirius, respectivamente, de acordo com suas localizações no plano $V_\phi - V_r$ (análogo ao plano U-V) conforme descrito por Bernet et al. (2022). As localizações destas populações nos *manifolds* e no plano $V_\phi - V_r$ são exibidas na Figura 6.5

Na extremidade inferior desta porção, podemos observar uma pequena cauda de baixa metalicidade, sendo a contraparte interna das populações pobres em metal observadas porção externa (região inferior esquerda). A proporção de estrelas pobres em metal entre as populações interna e externa reproduz o gradiente de metalicidade que aumenta em

direção ao centro galáctico (por exemplo, Sun et al. 2024), onde a porção externa carrega uma fração de estrelas pobres em metais perceptivelmente maior do que a porção interna para o disco fino, e sem um gradiente radial significativo ao considerar o *outer thick disk* e o *inner thick disk*.

A região inferior esquerda é composta principalmente pelo disco fino externo (com exceção da concentração rica em Mg no mapa do GALAH, que está associada ao disco espesso) atingindo o raio galáctico solar e algumas estruturas pobres em metais, consistente com o gradiente de metalicidade negativo em direção às partes externas da Via Láctea. Esta porção chamada *outer thick disk*, como exibido em salmão na Figura 4.1, permanece associada à concentração do disco espesso durante a convergência, mas após o anelamento final com perplexidades mais baixas, tende a se associar com a região do disco externo no GALAH, e como um *cluster* separado no APOGEE, mais próximo da porção do disco espesso.

Análise e discussão

É importante lembrar que, por ser uma técnica que minimiza a divergência da distribuição de similaridade, os *manifolds* do t-SNE aqui apresentados podem ser vistos como mapas de similaridade da Galáxia. Neste contexto, as distâncias relativas entre os grupos selecionados podem dar pistas sobre como eles estão relacionados num cenário de evolução galáctica. Nos tópicos a seguir serão discutidos brevemente os principais componentes do mapa, novos conceitos, e algumas ressalvas intrínsecas ao problema.

7.1 *Disco fino*

Primeiramente, é necessário ressaltar que devido à baixa amostragem do plano Galáctico na direção de seu centro, perde-se a maior parte das estrelas do disco fino confinadas às Z_{max} mais baixas, mas ainda preservando uma faixa razoável considerando as distâncias estelares, movimentos próprios e erros na determinação da velocidade radial, os quais podem afetar amplamente os parâmetros orbitais. O conjunto de amostras do disco fino, devido a isso, apresenta alguma dispersão de Z_{max} , mas ainda mais concentrada em torno de $Z \sim 1$ kpc, como mostrado para uma seleção de porções de estrelas ricas em metais dos *manifolds* na Figura 7.1, juntamente com populações do disco espesso para comparação. Estas populações do disco fino podem ser facilmente identificadas através de baixos Z_{max} , idades jovens, e metalicidade típica variando de $-0,25$ a $+0,3$ dex nos *manifolds* coloridos das Figuras 6.2 e 6.3, assim como os baixos valores de dispersão de velocidade na Figura 6.4. É exibido majoritariamente o APOGEE nas figuras desta seção por conta de sua maior amostragem do disco externo.

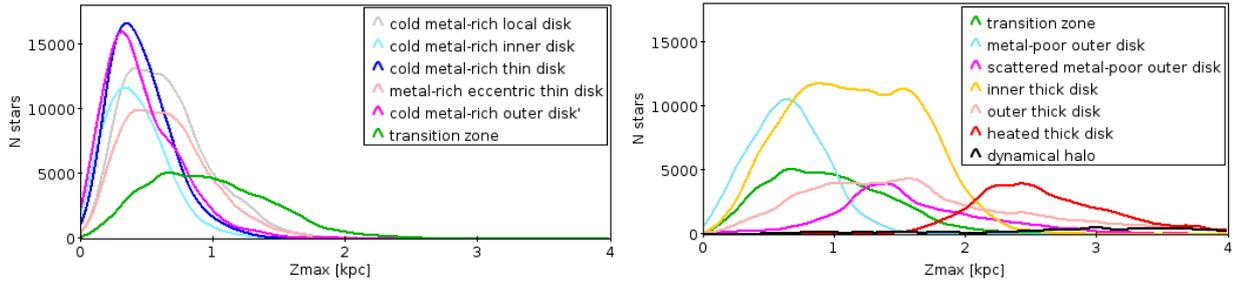


Figura 7.1: Funções de distribuição de Z_{max} para as populações dinamicamente frias ricas em metais (painel esquerdo) e dinamicamente quentes e pobres em metais (painel direito) da amostra APOGEE.

7.1.1 Aspectos cinemáticos

Uma das principais diferenças entre as duas grandes regiões de disco fino da Figura 6.1 que contêm o disco fino é o raio orbital médio \bar{R}_o , onde a porção central do *manifold* está vinculada a uma concentração centrada em $R \sim 6,4$ kpc com uma cauda longa em direção ao centro Galáctico, e a porção inferior esquerda está associada a outra concentração distribuída entre $R \sim 8-9$ kpc, como ilustrado na Figura 7.2 para o caso do APOGEE, que cobre melhor o espaço de raio orbital médio. O disco externo foi dividido em uma porção superior (no *manifold*) mais rica em metais (*outer disk 1* em magenta, incluindo o *cold metal-rich local disk* e o *cold metal-rich outer disk*) e uma porção mais pobre em metais com maior R_{min} na porção inferior (*outer disk 2* em salmão, incluindo o *metal-poor outer disk* e o *scattered metal-poor outer disk*) para mostrar a origem de sua bimodalidade. Na figura 7.2 são exibidos os raios orbitais médios da amostra total do APOGEE calculados com o potencial Galáctico barrado mencionado anteriormente em comparação com o potencial axissimétrico MW2014 (também com o dobro da massa original do halo).

O potencial galáctico assumido para a integração orbital com velocidade de rotação da barra $\Omega_b = 39$ km/s/kpc coloca o raio de corotação em torno de ~ 6 kpc, mas o local (em raio Galáctico) da acumulação dos raios médios orbitais causada pela corotação está sujeito a outros parâmetros e efeitos, como o comprimento da barra e a precisão das medidas do espaço de fase mencionada anteriormente, portanto aqui associamos a sobredensidade de \bar{R}_o em $R \sim 6,4$ kpc como este efeito da corotação da barra. Como já afirmado por Athanassoula (1980), barras Galácticas em crescimento podem impulsionar a consolidação de estruturas de braços espirais, e Garma-Oehmichen et al. (2021) mostraram através de simulações que o padrão dos braços espirais é o resultado coletivo da barra rotativa perturbando as órbitas estelares, formando assim os braços através de um mecanismo

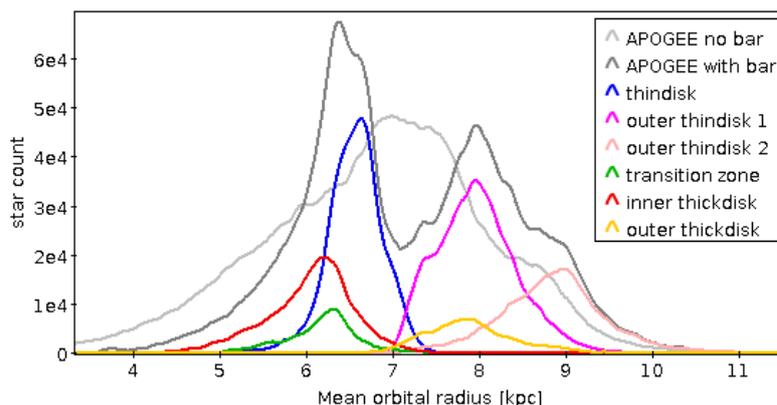


Figura 7.2: Funções de distribuição do raio orbital médio para a amostra APOGEE. Em cinza claro é exibida a amostra total para as órbitas calculadas com o potencial axissimétrico, e em cinza escuro para o potencial barrado usado neste estudo. A linha azul mostra a porção central do manifold (*disco fino interno*). *inner thick disk* (vermelho), *outer thick disk* (amarelo) e *zona de transição* são mostrados para comparação.

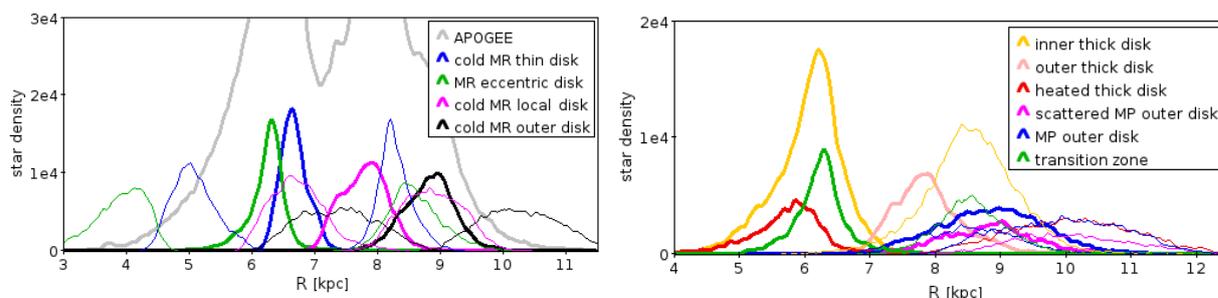


Figura 7.3: Distribuições radiais para as populações ricas em metais (painel esquerdo) e pobres em metais (painel direito) da amostra APOGEE com o raio orbital médio plotado em linhas espessas. As linhas finas representam os raios apocêntrico e pericêntrico das populações ricas em metais, e os raios apocêntricos das populações pobres em metais.

de ondas de densidade. Dias et al. (2019) estudaram a estrutura dos braços espirais e colocaram seu raio de corotação em $R=8,5$ kpc, o que é reproduzido em nossa distribuição de densidade de raio orbital médio (onde as populações *externas* estão localizadas), o que sugere que o espaço de fase observado pelo Gaia combinado com o potencial Galáctico usado aqui pode ser capaz de reproduzir por si só a estrutura de braços espirais do disco Galáctico.

As populações dinamicamente frias ricas em metais mostram este raio orbital médio vinculado à corotação da barra e dos braços espirais, e ao inspecionar os raios apocêntrico e pericêntrico dessas populações (painel esquerdo da Figura 7.3), é possível notar que a maioria de seus raios orbitais extremos está concentrada nas corotações destas estruturas. As ondas de densidade são os principais locais de formação estelar, já que seu potencial

favorece a convergência de fluxos de gás (Pettitt et al., 2019), reforçando o fato de as populações mais jovens se encontrarem nestas estruturas. Lucey et al. (2023) impõe um limite dinâmico para o comprimento da barra (extensão máxima das órbitas confinadas) de 3,5 kpc, com uma sobredensidade podendo se estender até 4,8 kpc, o que representaria um limite superior para a influência direta do efeito de agitação (*churning*) da barra.

O *metal-rich eccentric disk*, associado ao *moving group* de Hércules, penetra mais profundamente na zona de influência da barra e, conseqüentemente, na Galáxia interna, o que pode explicar uma cauda direita ligeiramente mais antiga no manifold de idade da Figura 6.2. Além disso, ao inspecionar de perto as órbitas que pertencem ao grupo de Hércules na Figura 3 de Pérez-Villegas et al. (2017) (painéis (d), (g), (h) e (i)), seus raios apocêntrico e pericêntrico parecem coincidir com os da Figura 7.3, fornecendo mais evidências de que o *metal-rich eccentric thin disk* é o *stream* de Hércules, para além dos picos de concentração coincidentes citados no Capítulo 6.

A população *cold metal-rich local disk*, onde o Sol está localizado, mesmo que associada à porção *externa* do mapa, tem um raio apocêntrico mais contido na região do raio de corotação dos braços espirais, como a maioria das populações ricas em metal, característica também visível nos *manifolds* GALAH na Figura 6.3.

7.1.2 Aspectos químicos

Aprofundando-se mais no comportamento químico destas populações, são exibidas na Figura 7.4 as localizações no diagrama Tinsley-Wallerstein das populações internas e externas selecionadas para o APOGEE (devido à melhor resolução de $[\text{Mg}/\text{Fe}]$), onde as mais externas estão ao longo de uma sequência pobre em metais na porção esquerda da sequência mais pobre de $[\text{Mg}/\text{Fe}]$, e as mais internas povoam sua porção mais rica em metais, comumente associada à população mais jovem. Uma discussão mais aprofundada sobre a população interna rica em metais é apresentada na Seção 7.2.

A população *scattered metal-poor outer disk* mostra um enriquecimento de elementos- α e maiores dispersões de velocidade, e na Figura 7.5 é exibido o comportamento dessa população no APOGEE (pois amostra mais do disco externo) em função do raio galactocêntrico e Z_{max} em comparação com os outros componentes do disco fino. Das et al. (2024) apresentaram resultados do efeito de aquecimento dinâmico causado no disco externo pela interação de uma galáxia satélite (provavelmente a anã esferoidal de Sagitário,

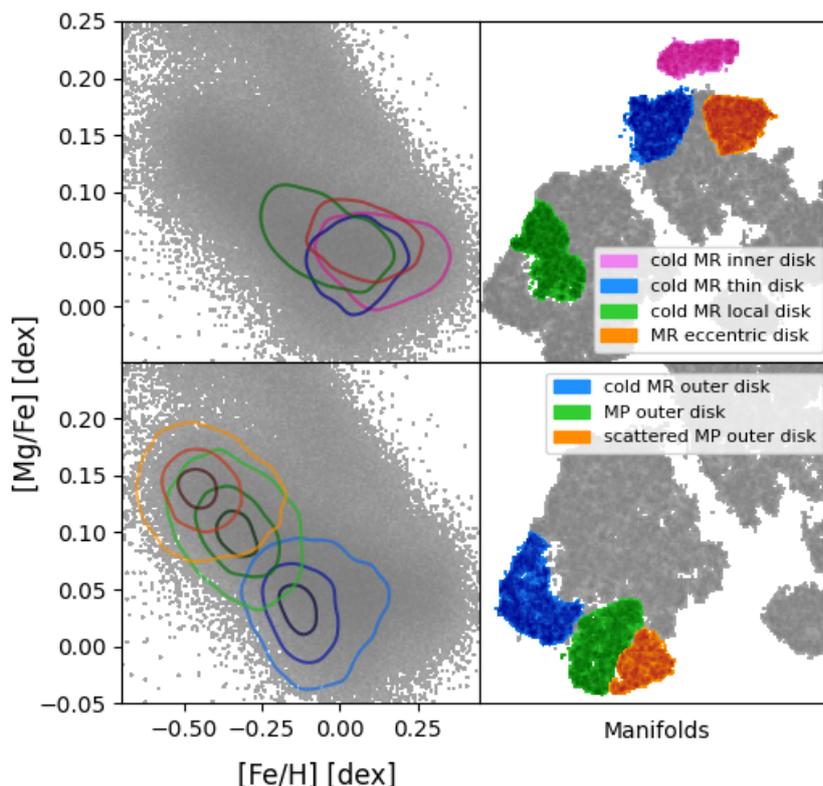


Figura 7.4: Diagramas de Tinsley-Wallerstein (painéis esquerdos) com contornos representando o percentil 50 da sequência rica em metais (superior esquerdo), percentis 16, 50 e 84 da sequência pobre em metais (inferior esquerdo), e respectivas localizações dos *manifolds* (direita) para populações selecionadas do disco fino no APOGEE. Os termos *rico em metais* e *pobre em metais* são abreviados como MR e MP, respectivamente.

Sagittarius dSph), e em sua Figura 4, um claro aumento em σ_z é visível entre $R \sim 9 - 10$ kpc, compreendido no mesmo lugar onde o *scattered metal-poor outer disk* está localizado, mostrando um comportamento mais relacionado ao disco espesso em comparação com as outras populações selecionadas do disco fino. Além das posições, as distribuições de idade no painel inferior da Figura 7.5 mostram o *scattered metal-poor outer disk* perto de ~ 6 Gyr, e também a razão $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.5$ juntamente com $[\alpha/\text{Fe}] \sim +0.14$ (ver Figura 7.4) estão de acordo com os resultados de Das et al. (2024).

Isto sugere que essa população pode ter de fato conexão com a passagem de *Sagittarius dSph*. Neste painel também são exibidas populações pertencentes ao disco fino e ao disco espesso para comparação. Na Seção 7.4, são discutidas algumas ideias sobre a zona de transição e sua possível relação com este evento de perturbação do disco.

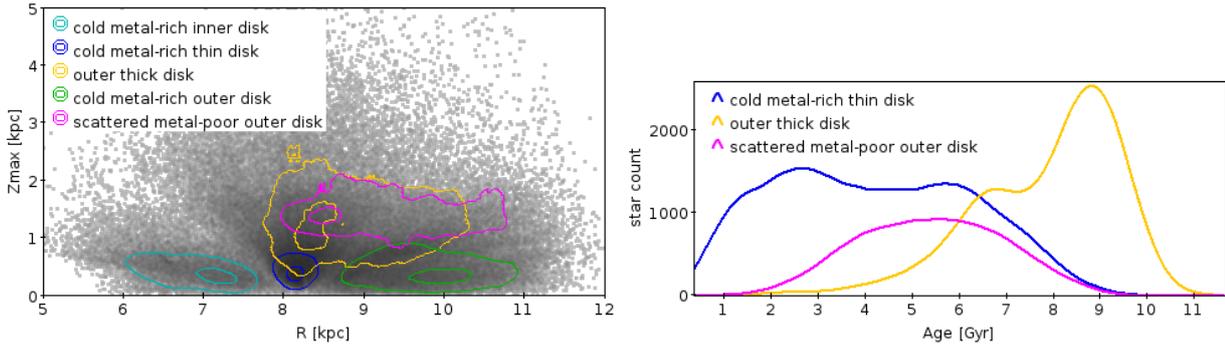


Figura 7.5: Plano Z_{max} vs R para a amostra APOGEE (pontos dispersos cinza) com plots de contorno do *scattered metal-poor outer disk* comparado com outros componentes selecionados no painel esquerdo, e distribuições de idade no painel direito.

7.2 População interna rica em Sódio

Como mencionado anteriormente, a homogeneidade cinemática foi mantida usando apenas medidas do Gaia DR3 para os parâmetros orbitais, mas alguns artefatos podem surgir do uso de dados químicos diferentes ao comparar os resultados dos *manifolds*, e também da amostragem espacial diferente entre APOGEE e GALAH. Como exemplo, a estrutura chamada *cold metal-rich inner disk* aparece como uma ilha isolada no APOGEE, mas para o GALAH, a definição de uma estrutura análoga não é trivial, já que a amostragem dos *surveys* não é uniforme em uma região específica do plano R_{ap} - R_{per} , como mostrado na Figura 7.6. Além disso, o elemento leve usado para o GALAH foi o Na, enquanto para o APOGEE foi o Al, tornando difícil fazer uma comparação direta para esta população específica rica em metais e Na. Esta população *cold metal-rich inner disk* tem um R_{ap} menor, confinado às partes internas da Galáxia, e foi encontrada dividida no manifold do GALAH em 3 subestruturas, também mostradas na Figura 7.6. Essas 3 subestruturas mostram uma coincidência razoável no plano R_{ap} - R_{per} com o análogo do APOGEE, e após reprojeter as estrelas coincidentes entre os 2 *surveys* um no *manifold* do outro, foi possível perceber que correspondem às mesmas estruturas. Além disso, ainda enfatizando as ressalvas de incompatibilidade entre *surveys*, esta população interna rica em metais não aparece como enriquecida em alfa no APOGEE, e uma possível razão é a menor amostragem das direções centrais da Galáxia em comparação com o GALAH.

Uma característica interessante desta porção selecionada é o alto Na e Mn juntamente com conteúdo moderado de Mg (Figura 6.3), onde sua função de distribuição está centrada em $\sim 0,1$ dex, com Mn e Ba/Eu enriquecidos, como mostrado na Figura 7.7.

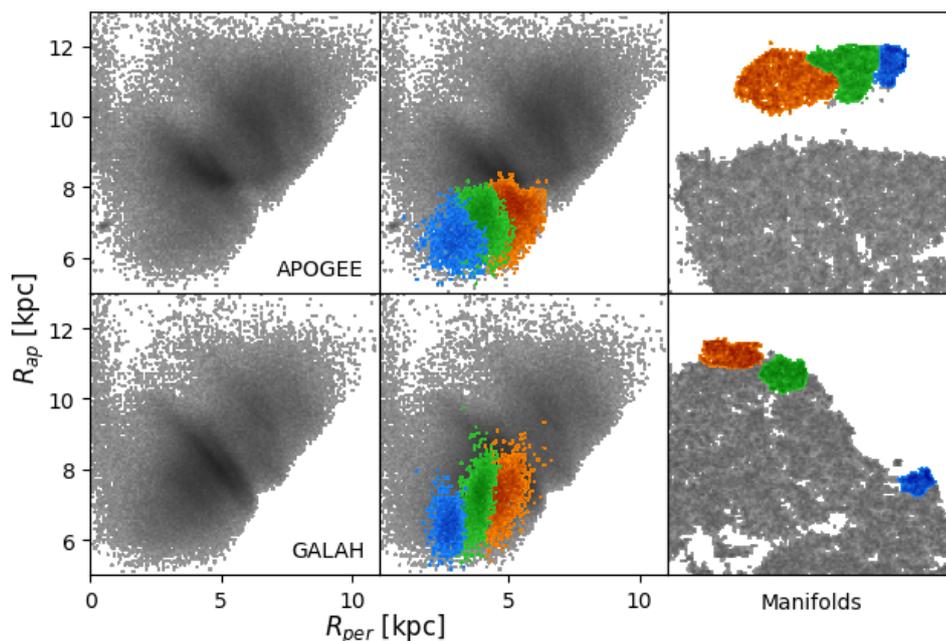


Figura 7.6: Plano $R_{\text{ap}}-R_{\text{per}}$ para APOGEE e GALAH, com detalhes da estrutura *cold metal-rich inner disk* subdividido em 3 partes. A subestrutura azul é uma porção mais interna e mais excêntrica da região que aparece separada das outras 2 no *manifold* do GALAH.

O alto Mn e o Mg moderado apontam para um enriquecimento rápido em um ambiente já rico em metais, já que o *yield* de Na começa a aumentar acima de 2 massas solares (Smiljanic et al., 2016), mas o maior [Ba/Eu] indica que o processo-s operou significativamente no enriquecimento desta população. Este mesmo comportamento de [Ba/Eu] é observado no *cold metal-rich thin disk* e ainda mais forte nas estruturas *cold metal-rich outer disk*, mas com distribuições mais baixas de Na, Mg e Mn. Karakas et al. (2018) mostra que a produção mais significativa dos elementos pesados de processo-s ocorre em estrelas de ~ 1.15 a 4 massas solares, o que cobre uma faixa de escala de tempo evolutiva entre ~ 0.3 a 7 Gyr. Este resultado favorece o enriquecimento secular de Ba mencionado, levando em conta o cenário galáctico que, para as partes internas da galáxia, a formação estelar mais ativa recicla rapidamente o Ba disponibilizado pelas estrelas em constante evolução, enquanto que nas porções externas, a taxa de formação estelar mais baixa e, portanto, os *yields* também mais baixos de elementos de processo-r advindos de supernovas, aumentam a proporção [Ba/Eu] a um ritmo mais lento.

Se considerarmos que a fusão do GSE ocorreu entre 10-8 Gyr atrás, uma grande infusão (*infall*) de gás deve ter ocorrido (Deason et al., 2013), e se tomarmos o pico de idade do disco espesso (em torno de ~ 9 Gyr no último painel da Figura 7.7) como marco para o

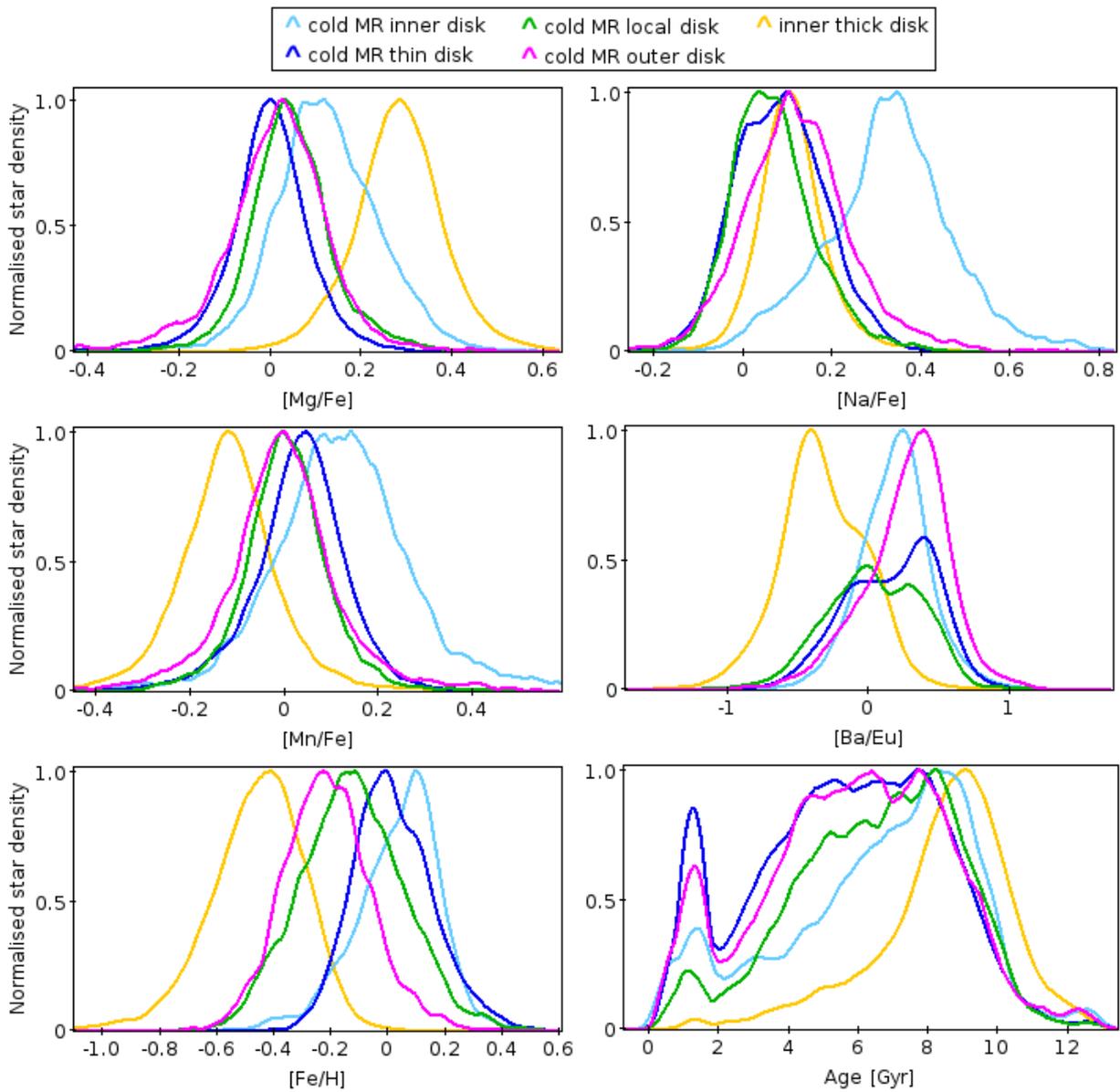


Figura 7.7: Funções de distribuição de abundância e idade no GALAH para as populações ricas em metais ($[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -0.2$) *cold metal-rich inner disk*, *cold metal-rich thin disk* e *cold metal-rich outer disk*, juntamente com uma representante do disco espesso e do disco local para comparação. o termo *rico em metais* é abreviado como MR na legenda.

evento de fusão, a distância de pico entre o disco espesso e o *cold metal-rich inner disk* é aproximadamente ~ 1 Gyr. O pico na distribuição de abundâncias de Na para o *cold metal-rich inner disk* em torno de $\sim 0,4$ dex se traduz aproximadamente em ~ 3 massas solares de estrelas progenitoras via a relação apresentada em Smiljanic et al. (2016), representando uma vida estelar em torno de ~ 650 Myr, o que é razoável o suficiente para considerar o cenário de reciclagem rápida que levou às abundâncias observadas de Na e Ba desta população.

Juntando essas peças, não é absurdo sugerir que esta população pode ser a causa direta da fusão do GSE refletida no disco interno da Galáxia. É claro que as estimativas de idade estelar do BSTEP (metodologia baseada em isócronas utilizada para o GALAH) têm grandes erros associados de cerca de ~ 3 Gyr para essas populações, mas trabalhar com as distribuições de idade e seus deslocamentos são as melhores ferramentas disponíveis para este tipo de análise.

Quanto ao *cold metal-rich local disk*, abrangendo a vizinhança solar, a razão $[\text{Ba}/\text{Eu}]$ mostra uma distribuição ampla em torno do valor solar, talvez sinalizando que o Sol está em uma região onde as taxas de produção de Eu são suficientes para reduzir a razão $[\text{Ba}/\text{Eu}]$, o que faz sentido ao considerar que o raio de corotação dos braços espirais se localiza próximo ao raio galáctico solar, e como citado anteriormente, seu potencial pode acumular mais matéria e ter uma taxa de formação estelar mais elevada.

7.3 Disco espesso

Até hoje, a maioria dos estudos de segregação trabalhou dividindo diagramas 2D (por exemplo, Tinsley-Wallerstein, Toomre, etc.) para distinguir entre disco fino e disco espesso e conduzir suas análises, mas claramente alguma contaminação é esperada dessas metodologias. Aqui, é usada uma seleção de propriedades cinemáticas e químicas para segregar esses componentes mais antigos com uma fronteira mais clara, sendo possível visualizar até que ponto admitimos estrelas a uma seleção específica usando os *manifolds* coloridos das Figuras 6.2 e 6.3.

Ainda a partir da amostra do APOGEE (devido à sua melhor separação $[\text{Mg}/\text{Fe}]$), são traçadas as distribuições de Z_{max} das populações pobres em metais no painel direito da Figura 7.1, evidenciando o caráter dinamicamente quente do disco espesso canônico, e

a presença evidente do disco espesso aquecido (ou *espalhado*) com uma longa cauda em direção a maiores Z .

Também podemos ver a população *metal-poor outer disk* exibindo maiores elongações em Z , onde o raio orbital médio e o raio apocêntrico das populações pobres em metais são mostrados no painel direito da Figura 7.3. A elongação máxima em Z é alcançada perto do apocentro da órbita, que pode ser de até $R \sim 12$ kpc para esta amostra local aqui utilizada. O raio orbital médio e a acumulação apocêntrica perto dos raios de corotação também aumentam para o disco espesso, indicando que a estrutura da barra e dos braços espirais também afeta as populações dinamicamente quentes.

O chamado disco espesso aquecido (aqui referido como *heated thick disk*) foi interpretado por Di Matteo et al. (2019) como a marca deixada por um grande evento de fusão (GSE) aquecendo o disco Galáctico antigo. Aqui, isolamos essa população que é significativamente mais quente dinamicamente, e com dispersões de velocidades muito maiores que as do disco espesso canônico, como mostrado nas Figuras 6.4 e 7.1. Esta população pode ser distinguida não apenas por sua cinemática, mas também pelas propriedades químicas, onde sua distribuição de $[Mg/Fe]$ está claramente deslocada para valores mais altos, e para $[Fe/H]$, deslocada para valores mais baixos (mostrado na Figura 7.8), o que corrobora com a proposição de que este disco espesso aquecido era um disco mais antigo sendo espalhado por um evento de fusão. Aqui, podemos ver o espaço de similaridade entrando em ação quando se trata das relações entre populações, mostrando o *heated thick disk* como uma ponte entre o disco espesso (*thick disk*) e o halo dinâmico (*dynamical halo*).

Em uma inspeção mais detalhada dos *manifolds* coloridos na região do disco espesso (também na Figura 7.8), foi possível identificar 2 subestruturas do disco espesso interno (*inner thick disk*), que são o *circular thick disk* com baixas excentricidades, e o *old thick disk* com idades ligeiramente maiores.

A separabilidade das populações é mais clara para o APOGEE, e podemos ver que o *old thick disk* se concentra no extremo mais pobre em metais e rico em alfa, seguido pelo *heated thick disk*. O *old thick disk*, juntamente com o *inner thick disk* e o *outer thick disk*, ocupam aproximadamente a mesma distribuição ao longo da população rica em elementos- α , enquanto a população marcada como o bojo (*bulge*) se estende até o extremo mais rico em metais como esperado para o centro da Galáxia.

Aparentemente, as órbitas mais circulares são a única característica que distingue

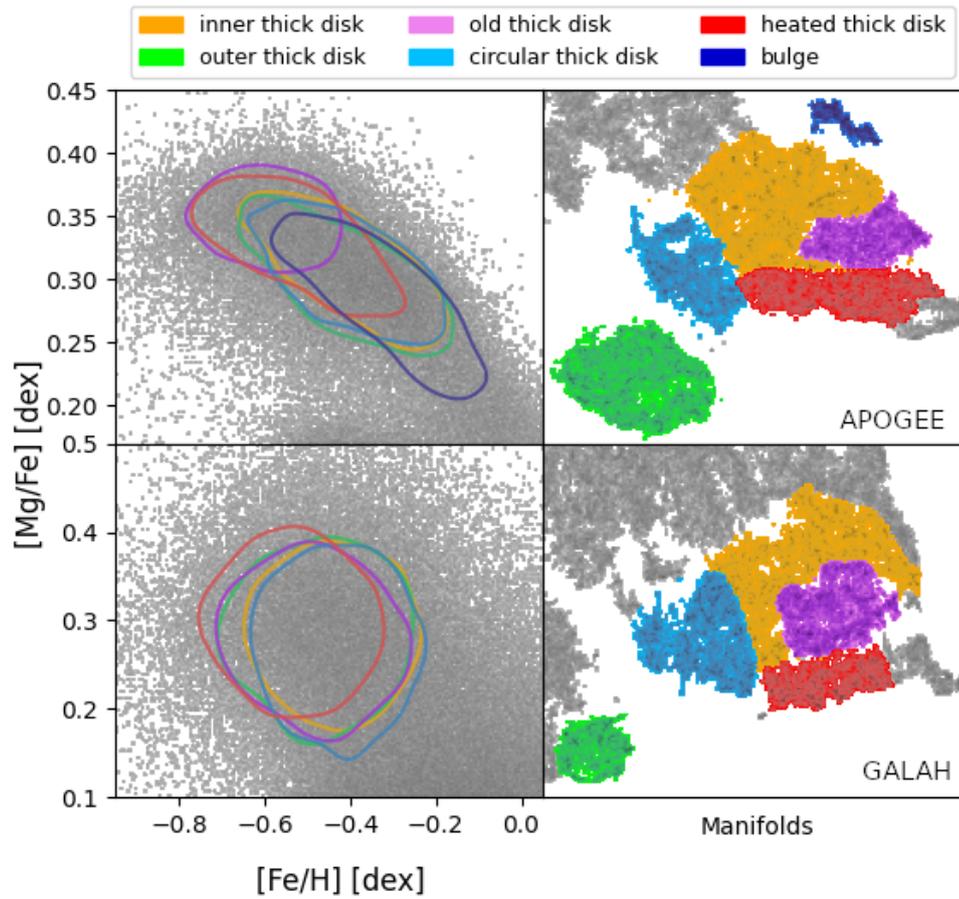


Figura 7.8: Diagramas de Tinsley-Wallerstein (painéis esquerdos) com contornos representando o percentil 50, e manifolds (painéis direitos) para populações do disco espesso selecionadas do APOGEE (painéis superiores) e do GALAH (painéis inferiores). O *circular thick disk* e o *old thick disk* aparecem sobrepostos ao *inner thick disk*.

esta população *circular thick disk*, e não foram encontrados outros sinais químicos ou cinemáticos únicos além dos raios apocêntricos e pericêntricos coincidindo com a população de *cold metal-rich thin disk* e as distribuições de $[Mg/Fe]$ e $[Fe/H]$ correspondendo às do *outer thick disk*.

Quanto ao *old thick disk*, este pode ser observado como uma região de idade inferior no meio da porção do disco espesso dos *manifolds* coloridos por parâmetros (Figuras 6.2 e 6.3), sendo as distribuições de $[Mg/Fe]$ e $[Fe/H]$ na Figura 7.8 ainda mais deslocadas do que o *heated thick disk*.

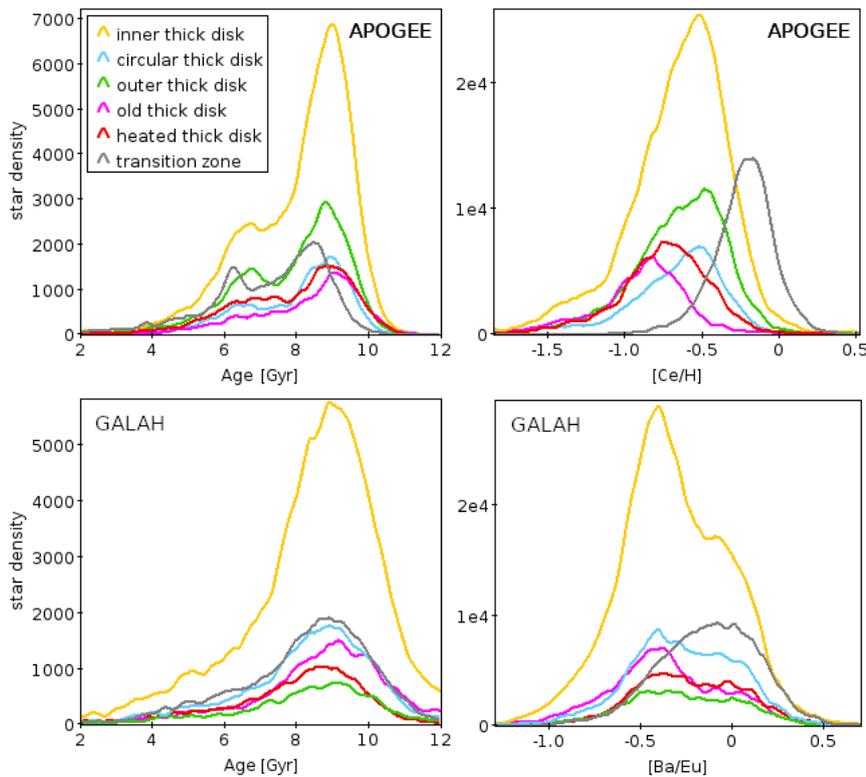


Figura 7.9: Distribuições de idade (painéis esquerdos) e elementos pesados (painéis direitos) para as subpopulações do disco espesso no GALAH (painéis inferiores) e APOGEE (painéis superiores). A saliência em ~ 6 Gyr no astroNN do APOGEE aparece como uma assimetria leve nas distribuições do GALAH, e uma bimodalidade pode ser vista na distribuição de $[Ba/Eu]$.

Além disso, se inspecionarmos as distribuições de idade do disco espesso (Figura 7.9), esta população parece ligeiramente deslocada para idades mais antigas em ambas as amostras (APOGEE e GALAH), efeito que também é observado nas razões de $[processo-s/H]$, conforme proposto aqui como um possível relógio químico. Esta população pode ser apenas uma cauda mais antiga do disco espesso ou um registro fóssil de uma configuração Galáctica primordial.

Uma pequena porção das extensões mais externas do bojo também aparece, mas apenas clara e isolada no APOGEE. Nossa seleção do GALAH até amostra a região central Galáctica, mas é possível que o bojo esteja muito ligado ao disco espesso, de forma a dificultar seu isolamento de forma confiável. A população do bojo pode ser observada como uma aglomeração alongada acima da região do disco espesso no *manifold* do APOGEE, e como mostrado na Figura 6.2, está entre os raios apocêntricos e pericêntricos mais baixos, e compartilha o mesmo padrão químico do disco espesso, porém com Z_{\max} contido dentro de ~ 1.5 kpc.

7.4 Zona de transição

A chamada *zona de transição* é uma população intermediária com propriedades que ficam entre o disco fino e o disco espesso, e foi interpretada por Recio-Blanco et al. (2014) como um processo de acomodação pelo qual o disco espesso passou, aumentando sua rotação e reduzindo a dispersão tangencial da velocidade, o que de fato pode ser observado na Figura 6.4. A amostra do APOGEE é referenciada para esta análise, já que a zona de transição aparece mais clara e definida nos *manifolds*. A distribuição de Z_{\max} é comparada com outras populações na Figura 7.1, e segue um padrão que fica entre as populações pobres em metais e o disco espesso, mostrando uma cauda mais longa em direção a valores maiores. Seus padrões químicos e de idade são bastante intrigantes, como pode ser explorado na Figura 6.2, mostrando uma metalicidade moderada em torno de $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0,25$, $[\alpha/\text{Fe}]$ moderado $\sim 0,15$, mas enriquecido em $[\text{Ce}/\text{Fe}]$ (em comparação às populações ricas em metal) e idades mais antigas (quando comparadas ao disco fino) como visto nos *manifolds*. A zona de transição e suas proximidades são sub-divididas no *manifold* para melhor dissecar suas propriedades, conforme exibido na Figura 7.10.

Além de sua porção principal (mostrada em amarelo na Figura 6.1, conectando o disco fino *interno* e a maior parte do disco espesso), a porção *externa* do *manifold* também tem uma contraparte (rotulada como *outer heated transition zone*) que compartilha algumas características da zona de transição, já desconectada da concentração do disco espesso *externo*. Ao inspecionarmos o mapa de convergência do APOGEE da Figura 4.1, podemos ver na 100^a iteração do terceiro anelamento (*annealing3*, painel mais à direita da parte de baixo) que a *outer heated transition zone* e o disco espesso *externo* já estiveram conectados,

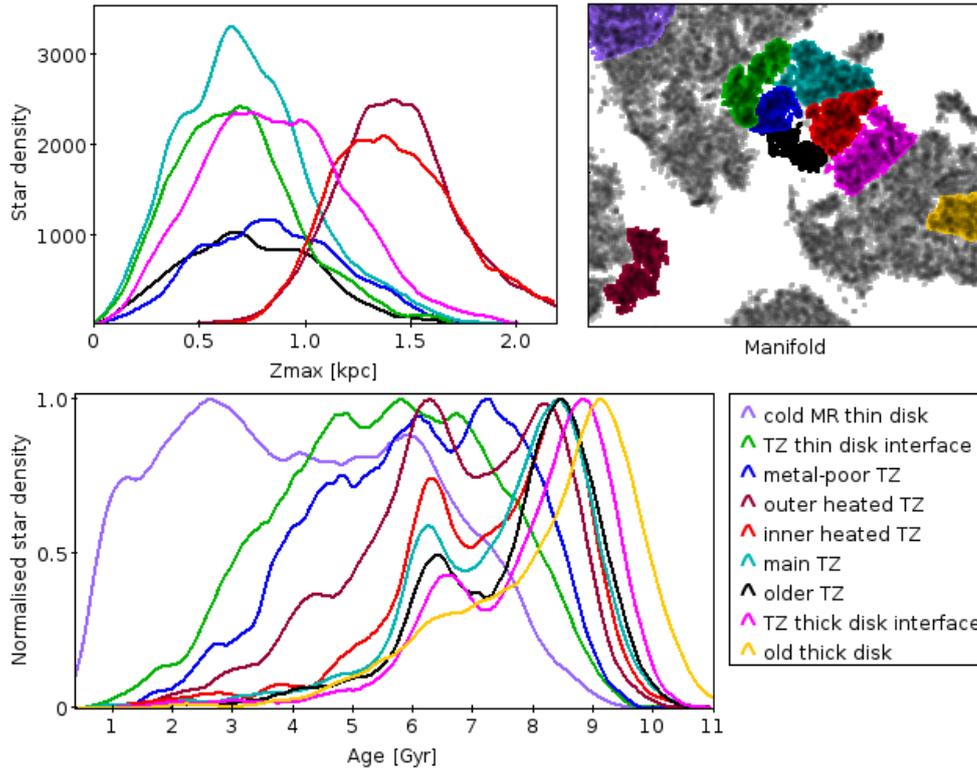


Figura 7.10: Divisão da zona de transição mostrando distribuições de Z_{max} no painel superior esquerdo, *manifolds* com as regiões selecionadas no painel superior direito, distribuições de idade no painel inferior esquerdo e regiões codificadas por cor na legenda inferior direita, com a *zona de transição* abreviada para TZ e o termo *rico em metais* para MR. Para comparação, também mostramos o *cold metal-rich thin disk* e o *old thick disk* nos extremos.

representando sua relação de similaridade que pode ser vista como a contraparte *externa* da zona de transição. Além disso, o *scattered metal-poor outer disk* mencionado anteriormente, aparece também muito próximo e até alongado em direção ao disco espesso *externo*, o que também favorece a ideia de que haja alguma relação entre estes grupos.

Nas distribuições de Z_{max} da Figura 7.10, o caráter "aquecido" das populações rotuladas como *inner heated transition zone* e *outer heated transition zone* fica claro e contrasta com as populações restantes da zona de transição. Essas duas populações também têm a bimodalidade mais forte entre as distribuições de idade, cujos picos estão localizados em ~ 6 Gyr e $\sim 8-9$ Gyr, o que coincide com a perturbação da Sagitário dSph (Das et al., 2024) e a fusão do GSE, respectivamente. A *outer heated transition zone* mostra a maior proporção do pico de 6 Gyr em comparação com o pico de 8 Gyr, corroborando com os resultados de Das et al. (2024) de um efeito de aquecimento nas regiões externas do disco. Por outro lado, essa razão diminui gradualmente para a *inner heated transition zone*, *main transition zone*, *old transition zone*, até atingir a interface do disco espesso (*thick disk interface*) e

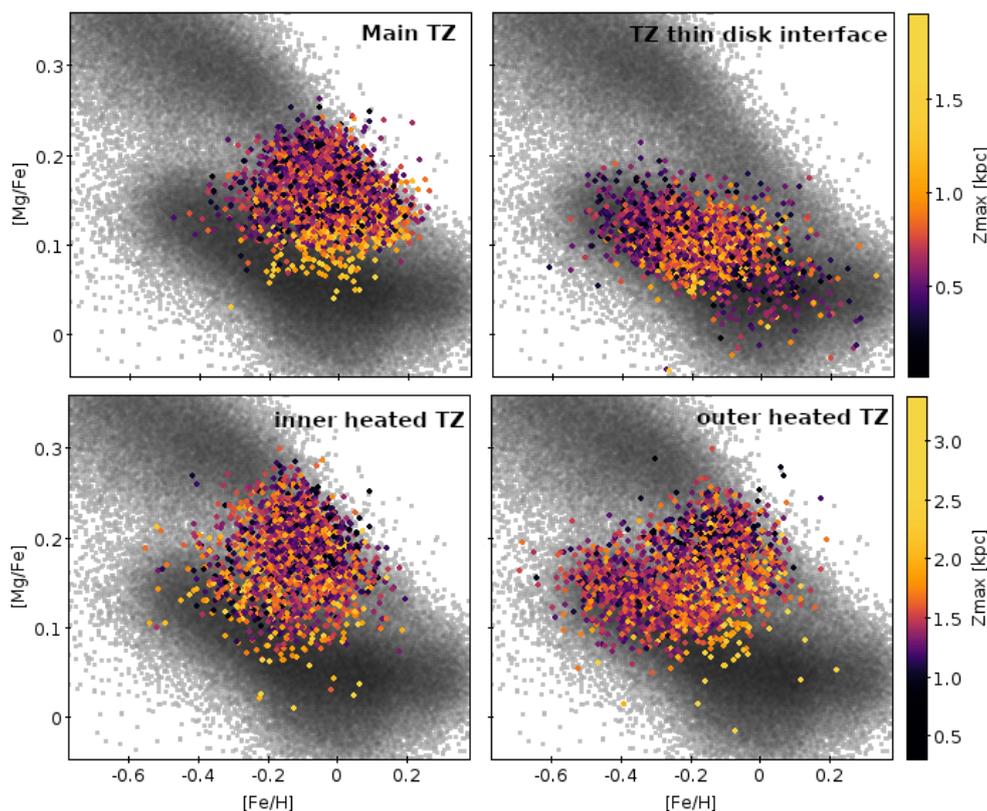


Figura 7.11: Diagramas de Tinsley-Wallerstein com populações da *zona de transição* coloridas por Z_{max} , mostrando seus gradientes para o caso do APOGEE.

um caráter muito fraco no *old thick disk*.

Se inspecionarmos o comportamento de Z_{max} de algumas dessas populações no diagrama de Tinsley-Wallerstein da Figura 7.11, um efeito ainda mais intrigante aparece: para todos os casos mostrados, o valor de Z_{max} aumenta para valores menores de $[Mg/Fe]$, o oposto do que seria esperado no sentido evolutivo.

Isso contradiz em parte o processo de acomodação proposto por Recio-Blanco et al. (2014), que leva a um cenário onde estrelas de disco fino com baixo $[\alpha/Fe]$ foram espalhadas para órbitas de Z_{max} mais altas, e as estrelas mais antigas e dinamicamente mais frias na sequência de $[\alpha/Fe]$ moderado são aquelas que provavelmente foram formadas em um ambiente pós-fusão (após o GSE), como visto nas distribuições de idade da Figura 7.10. A população *metal-poor transition zone* pode dar algumas pistas sobre este cenário de formação, e foi nomeada principalmente devido à sua tonalidade mais azul no painel $[Fe/H]$ da Figura 6.2, em contraste com o restante da *zona de transição*. Embora seu perfil de idade pareça mais semelhante à interface do disco fino (*thin disk interface*), sua estrutura trimodal tem picos em idades que coincidem com o que seria uma "consequência" de cada

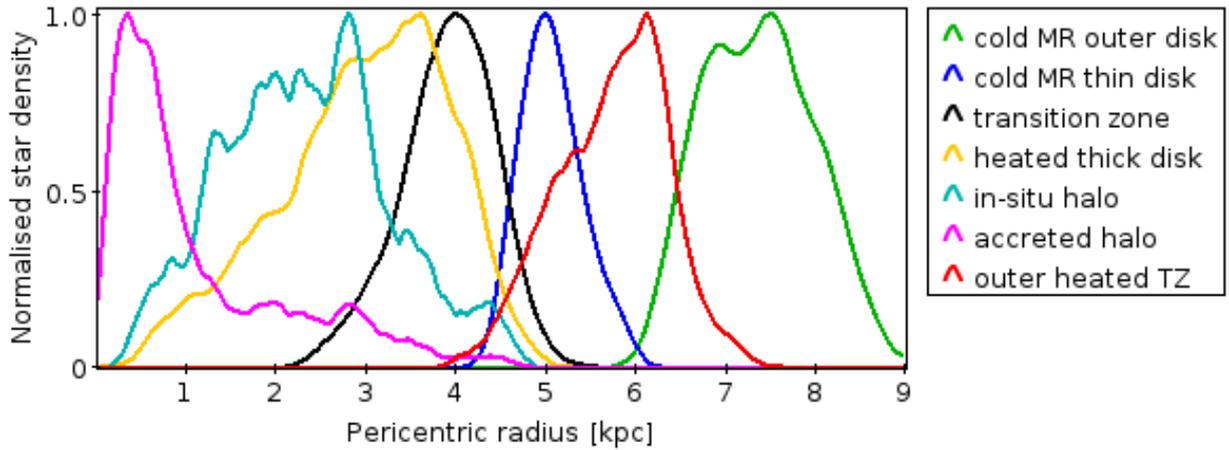


Figura 7.12: Funções de distribuição de raio pericêntrico das populações dinamicamente frias e dinamicamente quentes, com a *zona de transição* abreviada para TZ e *rica em metais* para MR.

perturbação do disco, possivelmente devido ao *infall* de gás pobre em metais.

Para entender melhor o mecanismo de aquecimento de Z_{max} , inspecionamos os raios pericêntricos da zona de transição na Figura 7.12 juntamente com populações dinamicamente quentes e frias.

A contraparte externa da zona de transição "aquecida" (*outer heated transition zone*) evita os efeitos de *churning* mais fortes (citados anteriormente na Seção 7.1), com raios pericêntricos localizados principalmente em ~ 6 kpc, o que poderia explicar a preservação da razão do pico de ~ 6 Gyr. Em geral, esta parece estar principalmente ligada à corotação da barra para raios pericêntricos, corotação dos braços espirais para raio orbital médio e ressonância de Lindblad externa em $\sim 10,5$ kpc para raios apocêntricos. Além disso, Das et al. (2024) mostra distribuições químicas e de idade com um pico em $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,5$, $[\alpha/\text{Fe}] = 0,1$ e idade = 7,2 Gyr, onde a *outer heated transition zone* tem um dos picos de idade exatamente em 7,2 Gyr e $[\alpha/\text{Fe}] = 0,1$, mas em $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,3$.

Juntando estas peças, proponho que a zona de transição poderia ter uma história de formação mais conectada à perturbação do disco por fusões de satélites seguida por uma subsequente explosão de formação estelar (*starburst*) pelo *infall* de gás pobre em metais.

7.5 Halo dinâmico

Na extremidade direita das estruturas do *heated thick disk* nos *manifolds* mostrados na Figura 6.1, há estrelas com órbitas altamente inclinadas, juntamente com abundâncias muito baixas de $[\text{Fe}/\text{H}]$. Esta porção representa as estrelas pertencentes ao halo dinâmico

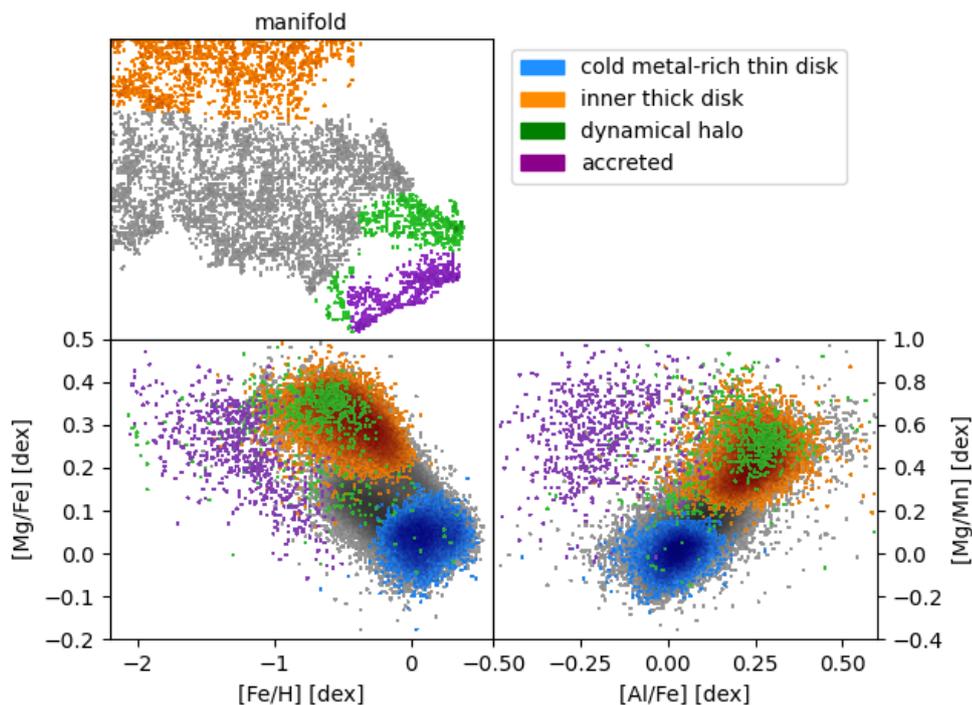


Figura 7.13: *Manifolds* (superior esquerdo), diagramas de Tinsley-Wallerstein (inferior esquerdo) e $[\text{Mg}/\text{Mn}]$ vs $[\text{Al}/\text{Fe}]$ (inferior direito) para o halo dinâmico e população acretada para o APOGEE. A população *acretada* é sobreposta à totalidade do *halo dinâmico*. Representantes do disco fino e espesso também são plotadas para comparação.

(*dynamical halo*) da Galáxia, onde elas se aproximam da vizinhança solar ao longo de suas alongadas órbitas dinamicamente quentes, contendo populações com excentricidades altas, movimentos retrógrados e altas dispersões de velocidade. Para o APOGEE, a parte com abundâncias muito baixas de $[\text{Al}/\text{Fe}]$ representa a população acretada, como mostrado por Das et al. (2020), onde parte dela foi interpretada por Haywood et al. (2018b), Belokurov et al. (2018) e Helmi et al. (2018) como a remanente de uma grande fusão galáctica (*major merger*) com uma galáxia anã entre 8 e 10 Gyr atrás, nomeada como *Gaia-Enceladus*. Na Figura 7.13, são apresentadas as localizações nos *manifolds* e diagramas químicos para o halo dinâmico e a população acretada, representados juntamente com os outros principais componentes da Galáxia.

Se continuarmos a dividir esta população dinâmica no *manifold*, é possível identificar mais estruturas como *Splash* (e.g., Myeong et al. 2022) e *Sequoia* (e.g., Feuillet et al. 2021), conforme exibido na Figura 7.14.

No caso de *Sequoia*, ela é tipicamente associada a órbitas retrógradas, mas o padrão químico representa de perto o encontrado por Feuillet et al. (2021) e as excentricidades

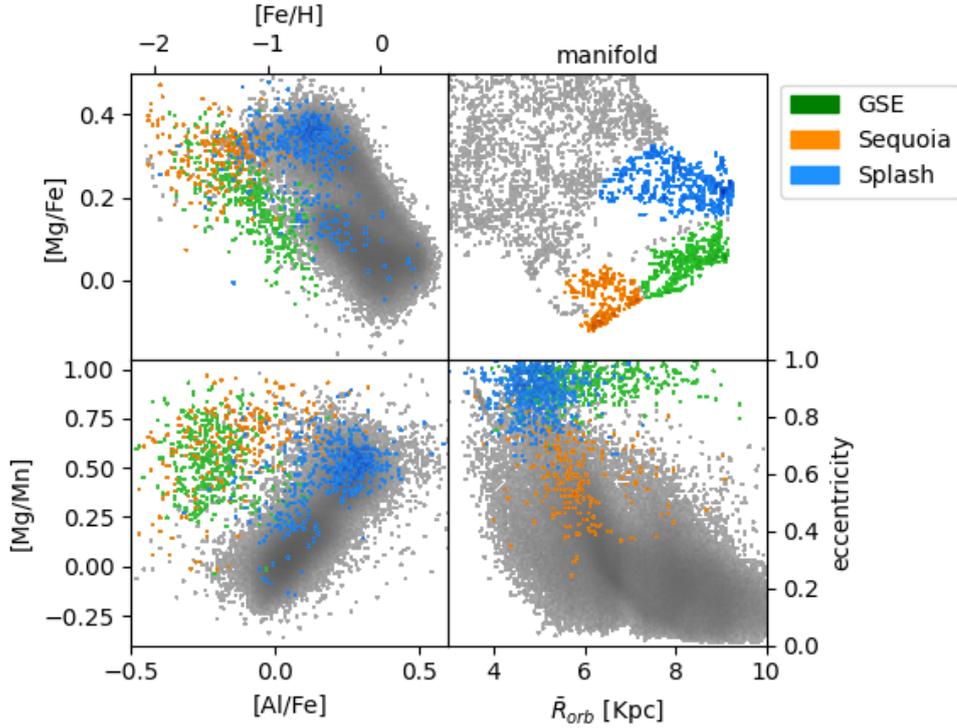


Figura 7.14: *Manifold* (painel superior direito), diagrama Tinsley-Wallerstein (painel superior esquerdo), plano [Mg/Mn] vs [Al/Fe] (painel inferior esquerdo) e excentricidade vs raio orbital médio (painel inferior direito) para as populações segregadas do halo dinâmico.

moderadas relatadas por da Silva e Smiljanic (2023). Verificando o comportamento de L_z de *Sequoia* contra as órbitas integradas com potencial axissimétrico, estas mostram os mesmos padrões apresentados na Figura 7.14, então o potencial de barra não é o responsável pela aparente discrepância. Além disso, a seleção restritiva dos dados pode ter eliminado a parte retrógrada, já que as correntes estelares (*streams*) são sensíveis à amostragem espacial. É possível também que *Sequoia* não seja exclusivamente uma população retrógrada, como resultado dos cortes de seleção de estudos anteriores, mas sim distribuída ao longo de uma ampla faixa de L_z positivos e negativos.

Fica claro que as concentrações dos *manifolds* representam as estruturas reais que foram identificadas nos trabalhos anteriores por planos quimiodinâmicos bivariados, mas sem depender de cortes secos ou vários planos em conjunto para filtrar ainda mais a amostra.

7.6 Aglomerados estelares

Ambas as amostras APOGEE e GALAH contêm estrelas pertencentes a aglomerados, onde os aglomerados abertos estão localizados juntamente com a população do *disco fino*,

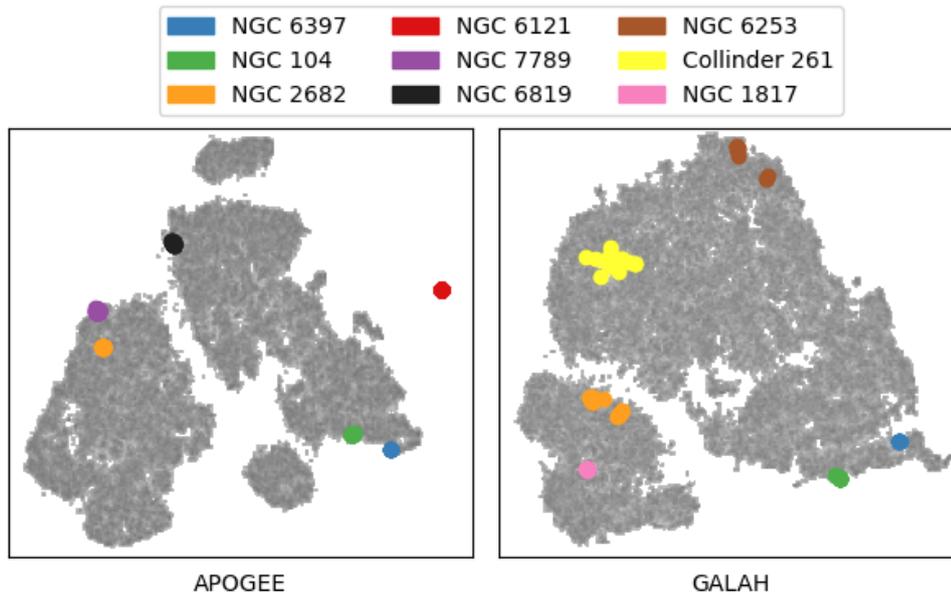


Figura 7.15: *Manifolds* do APOGEE e GALAH com os aglomerados abertos e globulares de cada amostra.

enquanto os aglomerados globulares estão dentro da região do *disco espesso*, ou mesmo isolados, como no caso de NGC 6121 (Messier 4). Na Figura 7.15, mostramos as localizações dos aglomerados nos *manifolds* para APOGEE e GALAH.

Os aglomerados globulares comuns NGC 6397 e NGC 104 aparecem nas mesmas regiões dos *manifolds*, que são os dois extremos do *heated thick disk*, enquanto o aglomerado aberto comum NGC 2682 aparece na porção superior do *disco externo*. Os outros aglomerados abertos NGC 6819, NGC 7789, NGC 6253, NGC 1817 e Collinder 261 também estão localizados nas porções dinamicamente frias do disco.

O aglomerado NGC 6121 aparece isolado, e nos *manifolds* codificados por cor da Figura 6.2, é possível ver seu tom amarelado, indicando uma alta excentricidade, com raios apocêntricos de até 7 kpc e raios pericêntricos se aproximando do centro Galáctico em $\sim 0,5$ kpc. Nordlander et al. (2024) mediu novas abundâncias para este aglomerado, com $[\text{Fe}/\text{H}] = -1,13 \pm 0,07$ e $[\text{Mg}/\text{Fe}] = +0,35 \pm 0,06$ em concordância dentro das incertezas com nossos valores baseados no APOGEE, de $[\text{Fe}/\text{H}] = -1,06 \pm 0,05$ e $[\text{Mg}/\text{Fe}] = +0,34 \pm 0,05$. Song et al. (2018) relataram uma idade baseada em isócronas entre 12 e 13,3 Gyr para o NGC 6121, caracterizando-o como um aglomerado muito antigo. Vitral et al. (2023) relataram parâmetros estruturais para o NGC 6121 através de modelagem de massa-anisotropia de Jeans, e encontraram um excesso de massa central de $\sim 800 M_{\odot}$, apontando para a existência de um buraco negro de massa intermediária ou uma população de buracos ne-

gros supercompactos. Devido à sua órbita altamente excêntrica, química pobre em metais e enriquecida em elementos- α , idade muito antiga, possível conteúdo central exótico, juntamente com sua posição isolada no contexto de similaridade Galáctica do *manifold*, não é absurdo sugerir que o NGC 6121 tenha uma origem extragaláctica, possivelmente sendo a remanescente de uma galáxia satélite acretada.

Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma abordagem multi-variáveis para construir um mapa de similaridade do volume local da Galáxia, tornando possível descrevê-lo em termos de características orbitais, cinemáticas, químicas e de idade, possibilitando a distinção e isolamento de estruturas importantes para análise posterior.

Por meio da integração orbital dos dados observados de Gaia, foi possível validar a barra galáctica e sua parametrização como uma característica indispensável no estudo do disco da Via Láctea, e como um possível agente na formação da estrutura dos braços espirais.

Mostramos que os principais grupos móveis surgem de ressonâncias orbitais e sobre-densidades produzidas pela barra e pelos braços espirais, uma vez que estas estruturas desempenham um papel importante na formação estelar.

Propõe-se que a população rica em Na na porção interna da Galáxia pode ser a consequência, no disco fino, do evento de fusão com a GSE, devido à sua escala de tempo e padrões químicos.

O gradiente radial de metalicidade e as dispersões de velocidades também puderam ser mapeados com a ajuda da segregação de populações, mostrando o aquecimento dinâmico de uma população externa do disco como um provável efeito de perturbação pela passagem de *Sagittarius dSph*.

As populações mais antigas do disco, nomeadamente o disco espesso canônico e o aquecido, foram claramente definidas e isoladas como regiões muito distintas do disco fino, apresentando também conexão com as ressonâncias orbitais.

Também, a análise sugere que a zona de transição pode ter sido formada a partir das interações/fusões de galáxias-satélites e do conseqüente *infall* de gás.

Além disso, as populações agregadas que compõem o halo dinâmico local puderam ser

facilmente mapeadas devido às suas órbitas altamente inclinadas e características químicas, mostrando uma estreita conexão com o disco espesso aquecido.

A distribuição espacial dos *manifolds*, como consequência das similaridades, permitem a visualização de relações hierárquicas entre os componentes do disco e suas subestruturas, dando dicas sobre o processo de formação da Via Láctea em um quadro geral e pode até contextualizar aglomerados de estrelas.

Como continuidade do trabalho, existe a possibilidade de exploração das estrelas de sequência principal para encontrar novas relações e conexões do disco fino jovem com a estrutura espiral e o cenário de formação galáctica, bem como utilizar *surveys* individualmente, com amostras ainda maiores (por utilizar as velocidades radiais destes) para explorar estruturas específicas em mais detalhes. Pode-se também utilizar as segregações dos mapas para treinar modelos de aprendizado de máquina e obter probabilidades de pertinência de estrelas a esses grupos utilizando apenas parâmetros cinemáticos.

Os resultados aqui obtidos foram publicados em Cantelli e Teixeira (2024)

Com este trabalho indicamos à comunidade mais um caminho que nos parece bastante promissor, para segregar populações estelares com base em uma série de características e em uma grande quantidade de dados observacionais oriundos da missão espacial Gaia, e os surveys APOGEE e GALAH. O t-SNE revelou-se um algoritmo bastante adequado para o desenvolvimento deste trabalho que contou também com uma ferramenta extremamente útil, o TOPCAT (Taylor, 2005). Esperamos com nossos resultados, termos desanuviado um pouco mais o cenário da formação dessas populações estelares e de alguns aglomerados. A comunidade em geral e nós mesmos, diante da perspectiva de ter em breve novos e melhores dados, temos em mãos um quadro consistente a ser ampliado e esmiuçado em futuro próximo.

Referências Bibliográficas

- Abdurro'uf Accetta K., Aerts C., 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
- Aguado D. S., Belokurov V., Myeong G. C., et al. Elevated r-process Enrichment in Gaia Sausage and Sequoia*, *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, vol. 908, p. L8
- Anders F., Chiappini C., Santiago B. X., et al. Dissecting stellar chemical abundance space with t-SNE, *Astronomy & Astrophysics*, 2018, vol. 619, p. A125
- Antoja T., Helmi A., Romero-Gómez M., et al. A dynamically young and perturbed Milky Way disk, *Nature*, 2018, vol. 561, p. 360–362
- Asano T., Fujii M. S., Baba J., et al. Trimodal structure of Hercules stream explained by originating from bar resonances, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, vol. 499, p. 2416–2425
- Athanassoula E., Bar-Driven Spiral Structure, *Astronomy and Astrophysics*, 1980, vol. 88, p. 184
- Baade W., The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula., *ApJ*, 1944, vol. 100, p. 137
- Baade W., Galaxies - Present Day Problems, *Publications of Michigan Observatory*, 1951, vol. 10, p. 7
- Bailer-Jones C. A. L., Rybizki J., Fouesneau M., Mantelet G., Andrae R., Estimating

- Distance from Parallaxes. IV. Distances to 1.33 Billion Stars in Gaia Data Release 2, *The Astronomical Journal*, 2018, vol. 156, p. 58
- Baugh C. M., A primer on hierarchical galaxy formation: the semi-analytical approach, *Reports on Progress in Physics*, 2006, vol. 69, p. 3101
- Belkina A. C., Ciccolella C. O., Anno R., et al. Automated optimized parameters for T-distributed stochastic neighbor embedding improve visualization and analysis of large datasets, *Nature Communications*, 2019, vol. 10, p. 5415
- Belokurov V., Erkal D., Evans N. W., Koposov S. E., Deason A. J., Co-formation of the disc and the stellar halo, *MNRAS*, 2018, vol. 478, p. 611
- Bernet M., Ramos P., Antoja T., et al. From ridges to manifolds: 3D characterization of the moving groups in the Milky Way disc, *Astronomy Astrophysics*, 2022, vol. 667, p. A116
- Blitz L., Spergel D. N., Direct Evidence for a Bar at the Galactic Center, *ApJ*, 1991, vol. 379, p. 631
- Blumenthal G. R., Faber S. M., Primack J. R., Rees M. J., Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter., *Nature*, 1984, vol. 311, p. 517
- Boeltzig A., Bruno C. G., Cavanna F., et al. Shell and explosive hydrogen burning, *The European Physical Journal A*, 2016, vol. 52
- Bovy J., galpy: A python LIBRARY FOR GALACTIC DYNAMICS, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, vol. 216, p. 29
- Bowen I. S., Vaughan A. H., The Optical Design of the 40-in. Telescope and of the Irene DuPont Telescope at Las Campanas Observatory, Chile, *Appl. Opt.*, 1973, vol. 12, p. 1430
- Buder S., Sharma S., Kos J., et al. The GALAH survey: Third data release, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, vol. 506, p. 150
- Buringh E., Van Zanden J. L., Charting the “Rise of the West”: Manuscripts and Printed Books in Europe, A Long-Term Perspective from the Sixth through Eighteenth Centuries, *The Journal of Economic History*, 2009, vol. 69, p. 409–445

- Burkert A., Truran J. W., Hensler G., The Collapse of Our Galaxy and the Formation of the Galactic Disk, *ApJ*, 1992, vol. 391, p. 651
- Cantelli E., Teixeira R., Disentanglement of the chemodynamical assembly: mapping the Milky Way discs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, vol. 530, p. 2648–2669
- Carney B. W., Latham D. W., Laird J. B., A Survey of Proper-Motion Stars. VIII. On the Galaxy's Third Population, *AJ*, 1989, vol. 97, p. 423
- Carrillo A., Hawkins K., Jofré P., et al. The detailed chemical abundance patterns of accreted halo stars from the optical to infrared, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, vol. 513, p. 1557–1580
- Chen Y., Zhao G., Zhang H., Evidence for Corotation Origin of Super-metal-rich Stars in LAMOST-Gaia: Multiple Ridges with a Similar Slope in the v versus $L_{\text{sub}z}/\text{sub} \text{Plane}$, *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, vol. 936, p. L7
- Chiappini C., Matteucci F., Gratton R., The Chemical Evolution of the Galaxy: The Two-Infall Model, *The Astrophysical Journal*, 1997, vol. 477, p. 765–780
- da Silva A. R., Smiljanic R., Exploring the chemodynamics of metal-poor stellar populations, *Astronomy and Astrophysics*, 2023, vol. 677, p. A74
- Dai J.-M., Tong J., , 2018 Visualizing the Hidden Features of Galaxy Morphology with Machine Learning
- Das P., Hawkins K., Jofré P., Ages and kinematics of chemically selected, accreted Milky Way halo stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, vol. 493, p. 5195–5207
- Das P., Huang Y., Ciucă I., Fragkoudi F., The outer low- α disc of the Milky Way - I: evidence for the first pericentric passage of Sagittarius?, *MNRAS*, 2024, vol. 527, p. 4505
- De Silva G. M., Freeman K. C., Bland-Hawthorn J., et al. The GALAH survey: scientific motivation, *MNRAS*, 2015, vol. 449, p. 2604

- de Souza R. E., Teixeira R., Kinematic segregation of nearby disk stars from the Hipparcos database, *Astronomy and Astrophysics*, 2007, vol. 471, p. 475–484
- de Vaucouleurs G., Interpretation of velocity distribution of the inner regions of the Galaxy. In *The Galaxy and the Magellanic Clouds*, vol. 20, 1964, p. 195
- Deason A. J., Belokurov V., Evans N. W., Johnston K. V., Broken and Unbroken: The Milky Way and M31 Stellar Halos, *ApJ*, 2013, vol. 763, p. 113
- Di Matteo P., Haywood M., Lehnert M. D., et al. 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, *Astronomy and Astrophysics*, 2019, vol. 632, p. A4
- Dias W. S., Monteiro H., Lépine J. R. D., Barros D. A., The spiral pattern rotation speed of the Galaxy and the corotation radius with Gaia DR2, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 486, p. 5726–5736
- 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
- Erdem K., , 2020 t-SNE clearly explained <https://towardsdatascience.com/t-sne-clearly-explained-d84c537f53a>
- Esa ., VizieR Online Data Catalog: The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA 1997), *VizieR Online Data Catalog*, 1997, p. I/239
- Ewen H. I., Purcell E. M., Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc./sec., *Nature*, 1951, vol. 168, p. 356
- Feillet D. K., Sahlholdt C. L., Feltzing S., Casagrande L., Selecting accreted populations: metallicity, elemental abundances, and ages of the iGaia/i-Sausage-Enceladus and Sequoia populations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, vol. 508, p. 1489
- Gaia Collaboration Babusiaux C., van Leeuwen F., Barstow M. A., et al. *Gaia* Data Release 2: Observational Hertzsprung-Russell diagrams, *Astronomy & Astrophysics*, 2018, vol. 616, p. A10

-
- Gaia Collaboration Katz D., Antoja T., Romero-Gómez M., et al. Gaia Data Release 2. Mapping the Milky Way disc kinematics, *A&A*, 2018, vol. 616, p. A11
- Gaia Collaboration Vallenari A., Brown A. G. A., Prusti T., et al. Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties, *A&A*, 2023, vol. 674, p. A1
- García Pérez A. E., Prieto C. A., Holtzman J. A., Shetrone M., et al. ASPCAP: THE APOGEE STELLAR PARAMETER AND CHEMICAL ABUNDANCES PIPELINE, *The Astronomical Journal*, 2016, vol. 151, p. 144
- Garma-Oehmichen L., Martínez-Medina L., Hernández-Toledo H., Puerari I., How the bar properties affect the induced spiral structure, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, vol. 502, p. 4708–4722
- Gilmore G., Reid N., New light on faint stars - III. Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc., *MNRAS*, 1983, vol. 202, p. 1025
- Giribaldi R. E., Smiljanic R., Chronology of the chemical enrichment of the old Galactic stellar populations, *Astronomy and Astrophysics*, 2023, vol. 673, p. A18
- Gunn J. E., Siegmund W. A., Mannery E. J., et al. The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey, *The Astronomical Journal*, 2006, vol. 131, p. 2332–2359
- Gunn J. E., Siegmund W. A., Mannery E. J., et al. The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey, *AJ*, 2006, vol. 131, p. 2332
- Hawkins K., Jofré P., Masseron T., Gilmore G., Using chemical tagging to redefine the interface of the Galactic disc and halo, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 453, p. 758
- Haywood M., Matteo P. D., 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, *The Astrophysical Journal*, 2018a, vol. 863, p. 113
- Haywood M., Matteo P. D., 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 iGaia/i DR2, *The Astrophysical Journal*, 2018b, vol. 863, p. 113
- Helmi A., Babusiaux C., Koppelman H. H., Massari D., Veljanoski J., Brown A. G. A., The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk, *Nature*, 2018, vol. 563, p. 85–88
- Helmi A., White S. D. M., de Zeeuw P. T., Zhao H., Debris streams in the solar neighbourhood as relicts from the formation of the Milky Way, *Nature*, 1999, vol. 402, p. 53
- Hoskin M., The Milky Way from Antiquity to modern times. In *The Milky Way Galaxy*, vol. 106, 1985, p. 11
- House L. R., Gebhardt K., Finkelstein K., et al. Using Dark Energy Explorers and Machine Learning to Enhance the Hobby–Eberly Telescope Dark Energy Experiment, *The Astrophysical Journal*, 2023, vol. 950, p. 82
- Hubble E. P., Cepheids in spiral nebulae, *The Observatory*, 1925, vol. 48, p. 139
- Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., A dwarf satellite galaxy in Sagittarius, *Nature*, 1994, vol. 370, p. 194
- Jönsson H., Holtzman J. A., Prieto C. A., et al. APOGEE Data and Spectral Analysis from SDSS Data Release 16: Seven Years of Observations Including First Results from APOGEE-South, *The Astronomical Journal*, 2020, vol. 160, p. 120
- Kant I., *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*. Kant im Original, Fischer, 1755
- Kapteyn J. C., Star Streaming, *Reports of the British Association for the Advancement of Science*, 1905, p. 264
- Karakas A. I., Lugaro M., Carlos M., Cseh B., Kamath D., García-Hernández D. A., Heavy-element yields and abundances of asymptotic giant branch models with a Small Magellanic Cloud metallicity, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, vol. 477, p. 421–437

-
- Katz D., Sartoretti P., Guerrier A., et al. iGaia/i Data Release 3, *Astronomy and Astrophysics*, 2023, vol. 674, p. A5
- Khoperskov S., Gerhard O., Chemo-kinematics of the Milky Way spiral arms and bar resonances: Connection to ridges and moving groups in the solar vicinity, *Astronomy and Astrophysics*, 2022, vol. 663, p. A38
- Kobayashi C., Karakas A. I., Lugaro M., The Origin of Elements from Carbon to Uranium, *The Astrophysical Journal*, 2020, vol. 900, p. 179
- Kobayashi C., Nomoto K., THE ROLE OF TYPE Ia SUPERNOVAE IN CHEMICAL EVOLUTION. I. LIFETIME OF TYPE Ia SUPERNOVAE AND METALLICITY EFFECT, *The Astrophysical Journal*, 2009, vol. 707, p. 1466
- Kormendy J., Kennicutt Robert C. J., Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies, *ARA&A*, 2004, vol. 42, p. 603
- Leung H. W., Bovy J., Deep learning of multi-element abundances from high-resolution spectroscopic data, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018
- Lindblad B., Cosmogonic consequences of a theory of the stellar system, *Meddelanden fran Astronomiska Observatorium Uppsala*, 1927, vol. 13
- Lindgren L., Hernández J., Bombrun A., et al. Gaia Data Release 2. The astrometric solution, *A&A*, 2018, vol. 616, p. A2
- Lucey M., Pearson S., Hunt J. A. S., et al. Dynamically constraining the length of the Milky way bar, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, vol. 520, p. 4779
- Lundmark K., Die Stellung der kugelförmigen Sternhaufen und Spiralnebel zu unserem Sternsystem, *Astronomische Nachrichten*, 1919, vol. 209, p. 369
- Lundmark K., Über die Bestimmung der Entfernungen, Dimensionen, Massen und Dichtigkeit für die nächstgelegenen anagalactischen Sternsysteme., *Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie I*, 1930, vol. 125, p. 1

- Mackereth J. T., Bovy J., et al. H. W. L., Dynamical heating across the Milky Way disc using APOGEE and Gaia, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 489, p. 176
- Mädler J., *Die Centralsonne*. J. C. Schünmann's Wittwe, 1846
- Magrini L., Spina L., Randich S., et al. The iGaia/i-ESO Survey: the origin and evolution of is/i-process elements, *Astronomy and Astrophysics*, 2018, vol. 617, p. A106
- Majewski S. R., Schiavon R. P., Frinchaboy P. M., et al. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE), *The Astronomical Journal*, 2017, vol. 154, p. 94
- Marigo P., Girardi L., et al. A. B., A NEW GENERATION OF PARSEC/COLIBRI/STELLAR ISOCHRONES INCLUDING THE TP-AGB PHASE, *The Astrophysical Journal*, 2017, vol. 835, p. 77
- Montalbán J., Mackereth J. T., Miglio A., et al. Chronologically dating the early assembly of the Milky Way, *Nature Astronomy*, 2021, vol. 5, p. 640
- Myeong G. C., Belokurov V., Aguado D. S., et al. Milky Way's eccentric constituents with *Gaia*, APOGEE & GALAH, *The Astrophysical Journal*, 2022, vol. 938, p. 21
- Nandakumar G., Hayden M. R., Sharma S., et al. Combined APOGEE-GALAH stellar catalogues using the Cannon, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, vol. 513, p. 232
- Nemiroff R. J., Bonnell J. T., , 2010 'Great Debate' Lesson Plan for Undergraduates
- 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
- Nordlander T., Gruyters P., Richard O., Korn A. J., Atomic diffusion and mixing in old stars - VIII. Chemical abundance variations in the globular cluster M4 (NGC 6121), *MNRAS*, 2024, vol. 527, p. 12120
- Oort J. H., Observational evidence confirming Lindblad's hypothesis of a rotation of the galactic system, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 1927, vol. 3, p. 275

- Oort J. H., The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 1932, vol. 6, p. 249
- Payne C. H., *Stellar Atmospheres; a Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars.*, RADCLIFFE COLLEGE., 1925, Tese de Doutorado
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, p. 2825
- Penzias A. A., Wilson R. W., A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s., *ApJ*, 1965, vol. 142, p. 419
- Perryman M., *Astronomical Applications of Astrometry: Ten Years of Exploitation of the Hipparcos Satellite Data.* Cambridge University Press, 2009
- Pettitt A. R., Ragan S. E., Smith M. C., Young stars as tracers of a barred-spiral Milky Way, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019
- Pinsonneault M. H., Elsworth Y. P., Tayar J., et al. The Second APOKASC Catalog: The Empirical Approach, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, vol. 239, p. 32
- Piskunov N., Valenti J. A., *Spectroscopy Made Easy: Evolution, Astronomy and Astrophysics*, 2016, vol. 597, p. A16
- Poličar P. G., Stražar M., Zupan B., openTSNE: a modular Python library for t-SNE dimensionality reduction and embedding, *bioRxiv*, 2019
- Proctor R. A., A new Theory of the Milky Way, *MNRAS*, 1869, vol. 30, p. 50
- Pérez-Villegas A., Portail M., Wegg C., Gerhard O., Revisiting the Tale of Hercules: How Stars Orbiting the Lagrange Points Visit the Sun, *The Astrophysical Journal*, 2017, vol. 840, p. L2
- Queiroz A. B. A., Anders F., Chiappini C., et al. StarHorse results for spectroscopic surveys and iGaia/i DR3: Chrono-chemical populations in the solar vicinity, the genuine thick disk, and young alpha-rich stars, *Astronomy and Astrophysics*, 2023, vol. 673, p. A155

- Rappenglück M., A Palaeolithic Planetarium Underground - The Cave of Lascaux, Migration & Diffusion an international Journal, 2004, vol. 5 issue 18, p. 93
- Recio-Blanco A., de Laverny P., Kordopatis G., et al. TheiGaia/i-ESO Survey: the Galactic thick to thin disc transition, Astronomy and Astrophysics, 2014, vol. 567, p. A5
- Rubin V. C., Ford W. Kent J., Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions, ApJ, 1970, vol. 159, p. 379
- Schwarzschild M., Perigalactic and apogalactic distances of high-velocity stars, AJ, 1952, vol. 57, p. 57
- Schönrich R., Galactic rotation and solar motion from stellar kinematics, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, vol. 427, p. 274–287
- Searle L., Zinn R., Composition of halo clusters and the formation of the galactic halo., ApJ, 1978, vol. 225, p. 357
- Sharma S., Stello D., et al. S. B., The TESS–HERMES survey data release 1: high-resolution spectroscopy of the TESS southern continuous viewing zone, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, vol. 473, p. 2004
- Sheinis A., Anguiano B., Asplund M., et al. First light results from the High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph at the Anglo-Australian Telescope, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2015, vol. 1, p. 035002
- Smiljanic R., Romano D., Bragaglia A. e. a., TheGaia-ESO Survey: Sodium and aluminium abundances in giants and dwarfs, Astronomy and Astrophysics, 2016, vol. 589, p. A115
- Smith V. V., Bizyaev D., Cunha K., et al. The APOGEE Data Release 16 Spectral Line List, The Astronomical Journal, 2021, vol. 161, p. 254
- Song F., Li Y., Wu T., Pietrinferni A., Poon H., Xie Y., The Influence of the Metal Mass Fraction Z , Age, and Mixing-length Parameter on the RGB Bump Magnitude for the M4 Cluster, ApJ, 2018, vol. 869, p. 109
- Spina L., Meléndez J., Karakas A. I., et al. The temporal evolution of neutron-capture elements in the Galactic discs, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017

- Springel V., White S. D. M., Jenkins A., et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars, *Nature*, 2005, vol. 435, p. 629
- Steinhardt C. L., Weaver J. R., Maxfield J., et al. A Method to Distinguish Quiescent and Dusty Star-forming Galaxies with Machine Learning, *The Astrophysical Journal*, 2020, vol. 891, p. 136
- Sun W., Shen H., Jiang B., Liu X., , 2024 Mapping the Chemo-dynamics of the Galactic disk using the LAMOST and APOGEE red clump stars
- Taylor M. B., TOPCAT & STIL: Starlink Table/VOTable Processing Software. In *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV* , vol. 347 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2005, p. 29
- Tinsley B. M., Stellar lifetimes and abundance ratios in chemical evolution., *ApJ*, 1979, vol. 229, p. 1046
- Tinsley B. M., Evolution of the Stars and Gas in Galaxies, *Fund. Cosmic Phys.*, 1980, vol. 5, p. 287
- Traven G., Matijević G., Zwitter T., et al. The Galah Survey: Classification and Diagnostics with t-SNE Reduction of Spectral Information, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, vol. 228, p. 24
- Trumpler R. J., Absorption of Light in the Galactic System, *PASP*, 1930, vol. 42, p. 214
- van der Maaten L., Hinton G., Visualizing data using t-SNE, *Journal of Machine Learning Research*, 2008, vol. 9, p. 2579
- Verbunt F., van der Sluys M., Why Halley Did Not Discover Proper Motion and Why Cassini Did, *Journal for the History of Astronomy*, 2019, vol. 50, p. 383
- Vitral E., Libralato M., Kremer K., et al. An elusive dark central mass in the globular cluster M4, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, vol. 522, p. 5740–5757
- Vysotsky A. N., An investigation of stellar motions - XII. an interpretation of peculiar motions in terms of galactic structure, *AJ*, 1951, vol. 56, p. 62

- Wallerstein G., Abundances in G. Dwarfs.VI. a Survey of Field Stars., *ApJS*, 1962, vol. 6, p. 407
- Wattenberg M., Viégas F., Johnson I., How to Use t-SNE Effectively, *Distill*, 2016
- Wegg C., Gerhard O., Mapping the three-dimensional density of the Galactic bulge with VVV red clump stars, *MNRAS*, 2013, vol. 435, p. 1874
- Wilson J. C., Hearty F. R., Skrutskie M. F., et al. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE) Spectrographs, *PASP*, 2019a, vol. 131, p. 055001
- Wilson J. C., Hearty F. R., Skrutskie M. F., et al. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE) Spectrographs, *PASP*, 2019b, vol. 131, p. 055001
- Yanny B., Rockosi C., Newberg H. J., et al. SEGUE: A Spectroscopic Survey of 240,000 Stars with $g = 14-20$, *AJ*, 2009, vol. 137, p. 4377
- Zinn J. C., Stello D., Elsworth Y., et al. The K2 Galactic Archaeology Program Data Release 3: Age-abundance Patterns in C1–C8 and C10–C18, *The Astrophysical Journal*, 2022, vol. 926, p. 191
- Zwicky F., Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, *Helvetica Physica Acta*, 1933, vol. 6, p. 110

Apêndice

Apêndice A

Polígonos de seleção das sub-amostras RGB e SP

Os polígonos utilizados para seleção das sub-amostras do ramo das gigantes e sequência principal são exibidos neste apêndice em formato de listas de vértices em pares ordenados. A Tabela A.1 se refere à sub-amostra do ramo das gigantes, e a Tabela A.2 se refere à sub-amostra da sequência principal.

Tabela A.1 - Lista de vértices dos polígonos desenhados para os cortes de seleção do ramo das gigantes vermelhas nos diagramas CM e Kiel para ambas amostras APOGEE e GALAH. BP-RP e G são as magnitudes do Gaia, e as unidades de Teff e log G estão em K e dex, respectivamente.

corte CM (BP-RP, G)	corte Kiel (Teff, log G)
(0.92, 3.90)	(3449, 0.01)
(1.11, 4.30)	(3431, 0.84)
(1.85, 5.20)	(3758, 1.52)
(3.08, 5.75)	(3839, 1.63)
(4.12, 5.39)	(4311, 2.57)
(3.66, -3.04)	(4511, 2.91)
(1.39, -4.37)	(4792, 3.64)
(0.97, -3.59)	(5037, 4.18)
(0.81, 0.00)	(5436, 4.21)
(0.88, 2.90)	(5653, 4.18)
	(5726, 3.89)
	(5681, 3.48)
	(5490, 2.88)
	(5472, 2.36)
	(5508, 2.13)
	(5381, 1.96)
	(5109, 1.66)
	(4674, 0.76)
	(3885, 0.01)

Tabela A.2 - Lista de vértices dos polígonos desenhados para os cortes de seleção da sequência principal nos diagramas CM e Kiel para APOGEE e GALAH separadamente. Apenas o segundo e terceiro pontos têm diferenças no polígono de Kiel. BP-RP e G são as magnitudes do Gaia, e as unidades de Teff e log G estão em K e dex, respectivamente.

corte CM (BP-RP, G)	corte Kiel APOGEE (Teff, log G)	corte Kiel GALAH (Teff, log G)
(0.62, -0.15)	(3537, 4.45)	(3537, 4.45)
(0.73, 1.08)	(5700, 4.36)	(5500, 4.23)
(0.88, 3.28)	(6300, 4.20)	(6280, 4.10)
(0.89, 3.85)	(6360, 4.00)	(6360, 4.00)
(1.05, 4.88)	(5762, 3.35)	(5762, 3.35)
(1.64, 6.36)	(5989, 3.20)	(5989, 3.20)
(3.11, 9.67)	(6443, 3.30)	(6443, 3.30)
(2.22, 10.75)	(6972, 3.30)	(6972, 3.30)
(1.48, 10.21)	(8131, 3.50)	(8131, 3.50)
(0.67, 6.96)	(8131, 4.68)	(8131, 4.68)
(0.12, 3.55)	(6972, 4.68)	(6972, 4.68)
(-0.07, -0.57)	(6421, 4.83)	(6421, 4.83)
(0.46, -1.18)	(5924, 4.68)	(5924, 4.68)
	(3494, 4.85)	(3494, 4.85)