

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física

Investigando Múltiplas Populações do
Aglomerado Globular NGC 7089 com S-PLUS
e SOAR

Nicole Louise Klock Miranda

Porto Alegre

2024

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física

**Investigando Múltiplas Populações do Aglomerado
Globular NGC 7089 com S-PLUS e SOAR**

Nicole Louise Klock Miranda

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Física.

Orientadora: Ana Leonor Chies Santiago Santos

Coorientador: Charles José Bonatto

Porto Alegre

2024

Agradecimentos

Meus agradecimentos começam pelas pessoas que confiaram na minha escolha quando decidi que faria um curso tão inusitado quanto astrofísica: minha família. Obrigada, Claudete, pelas caronas até a parada de ônibus e por ter repetido tantas vezes desde a minha infância como a matemática é incrível. Obrigada, Luis, pelos almoços na UFRGS e pelas dicas acadêmicas e profissionais. Obrigada, Lauren, pelo apoio em todas as vezes que não consegui ajudar nas tarefas de casa por ter que estudar, e por ser uma inspiração para mim em muitos sentidos.

Agradeço aos meus orientadores, Ana e Charles, pelo acompanhamento ao longo desses quatro anos de iniciação científica e por terem me confiado a tarefa de ser *principal investigator* em uma observação astronômica. Sem dúvida foi a atividade mais emocionante da faculdade e a que tenho mais orgulho de ter feito.

Um obrigada especial a todos os amigos que estiveram comigo durante o curso, compartilhando alegrias e desilusões. Tainá, que foi um apoio constante desde o primeiro dia no curso (inclusive me explicando 5 vezes o mesmo problema de gravitação). Leonardo, que sempre animava o ambiente com seu bom humor e carisma tornando as listas de exercícios mais tenebrosas em um momento divertido. Marco, que é uma das minhas maiores inspirações de dedicação e tem um lugar especial no meu coração por ter sido a primeira pessoa que conheci no curso. Natalie, que me ouviu e apoiou durante as diversas crises existenciais que tive sobre a vida acadêmica e o futuro. Os famosos Pedros (Lopes e Floriano), meus companheiros de almoço oficiais e colegas de IC, obrigada pela parceria.

Gostaria de deixar um agradecimento especial aos colaboradores desse projeto, que ajudaram em diversos momentos: Juan Pablo Caso, Eduardo Hartmann, Javier Alonso, Vinicius Moris Placco, Guilherme Limberg, Vinicius Branco Silva, Paula Coelho, Felipe Navarete, Rafael Miloni Santucci, Ricardo Salinas e Marcos Antônio Fonseca Faria. Suas dicas e apoio foram fundamentais.

Por último, mas não menos importante, meu agradecimento e eterna dívida à sociedade brasileira. Graças a ela, pude fazer uma graduação em uma faculdade de alto nível de graça. Obrigada FAPERGS, CAPES e CNPQ pelo fomento à pesquisa científica no país. Obrigada a todos os servidores e terceirizados da UFRGS, pelo serviço de qualidade e papel fundamental desempenhado na engrenagem que move a pesquisa científica no país. Não poderia, é claro, deixar de agradecer a todos os motoristas do TM3, o ônibus que se tornou uma entidade na minha vida e me leva a todos os lugares que eu preciso estar.

Resumo

Aglomerados globulares (GCs) são conjuntos de estrelas de formato aproximadamente esférico e idades de mais de 10 bilhões de anos. Até cerca de 20 anos atrás, pensava-se que eles constituíam uma população estelar simples. Entretanto, essa concepção vem sendo desafiada. Estudos espectroscópicos e fotométricos têm mostrado que a maioria dos GCs são formados por múltiplas populações estelares (MPs). As MPs são diferenciadas por suas abundâncias químicas em elementos leves (como C, N, O, Na, entre outros). Acredita-se que essas variações decorrem do enriquecimento do meio intra-aglomerado a partir dos ventos de estrelas de uma primeira população (1P). Atualmente, está em debate os mecanismos que possibilitariam esse enriquecimento, seja através de estrelas massivas, estrelas massivas em rotação, ou estrelas do ramo assintótico das gigantes (AGB). Entretanto, uma característica que esses cenários compartilham é a concentração de estrelas abundantes em elementos leves, identificadas como uma segunda população (2P), no centro do GC. Esse fato não é observado em todos os globulares, possivelmente pela evolução dinâmica do GC, que tenderia a misturar as estrelas. NGC 7089 é um aglomerado globular galáctico de metalicidade intermediária. Suas populações estelares vem sendo estudadas em mais profundidade, no mínimo, desde a década de 80 (Armandroff e Zinn, 1988). Não existe um consenso na literatura acerca da distribuição radial das MPs nesse GC. Enquanto alguns estudos encontraram uma 2P concentrada centralmente (Lardo et al., 2011; Hartmann et al., 2022), outros chegaram a resultados opostos (Vanderbeke et al., 2015; Hoogendam e Smolinski, 2021). Hartmann et al. (2022) utilizou dados fotométricos do S-PLUS, uma colaboração entre universidades latino-americanas que visa observar o céu do hemisfério sul através de 12 filtros, para estudar as MPs desse aglomerado. Eles constataram a presença de uma 2P mais concentrada centralmente. Em vista disso, realizamos um *follow-up* espectroscópico de algumas estrelas desse aglomerado estudadas por Hartmann et al. (2022). Observamos 12 estrelas do ramo das gigantes vermelhas (RGB) utilizando o espectroscópio Goodman, do *Southern Astrophysical Research Telescope* (SOAR). A partir desses dados, analisamos a eficácia da fotometria realizada por Hartmann et al. (2022), buscando separar as diferentes populações estelares a partir de diferentes índices espectrais e exploramos a possibilidade de diferenciar as populações estelares de aglomerados através da razão de seus fluxos. Observamos que os filtros do S-PLUS se mostram eficientes na separação de MPs, principalmente quando a análise se faz aliada dos filtros estreitos F0378 e F0395.

Palavras-chave: Aglomerados Globulares, Via Láctea, RGB, Espectroscopia, NGC 7089

Abstract

Globular clusters (GCs) are groups of stars with a roughly spherical shape and ages of more than 10 billion years. Until about 20 years ago, they were thought to be a simple stellar population. However, this idea has been challenged. Spectroscopic and photometric studies have shown that most GCs are made up of multiple stellar populations (MPs). MPs are differentiated by their chemical abundances in light elements (such as C, N, O, Na, among others). It is believed that these variations result from the enrichment of the intracluster medium from the winds of stars from a first population (1P). The mechanisms that would make this enrichment possible are currently being discussed, whether through massive rotating stars or stars from the asymptotic giant branch (AGB). However, one characteristic that these scenarios share is the concentration of stars abundant in light elements, identified as a second population (2P), in the center of the GC. This fact is not observed in all globular clusters, possibly due to the dynamic evolution of the cluster, which would tend to mix the stars. However, simulations indicate that it would still be possible to identify traces of radial variation in clusters, which would contribute to the study of different MP formation scenarios. The stellar populations of the galactic globular cluster NGC 7089 have been studied in depth since the 1980s (Armandroff e Zinn, 1988). There is no consensus in the literature about the radial distribution of MPs in this GC. While some studies have found a centrally concentrated 2P (Lardo et al., 2011; Hartmann et al., 2022), others have reached opposite results (Vanderbeke et al., 2015; Hoogendam e Smolinski, 2021). Hartmann et al. (2022) used photometric data from S-PLUS, a collaboration between Latin American universities that aims to observe the southern hemisphere sky through 12 filters, to study the MPs in this globular cluster. They found the presence of a more centrally concentrated 2P. Hence, we carried out a spectroscopic *follow-up* of some of the stars in this cluster studied by Hartmann et al. (2022). We observed 12 stars from the red giant branch (RGB) using the Goodman spectroscope of the Southern Astrophysical Research Telescope (SOAR). Based on this data, we analyzed the effectiveness of the photometry performed by Hartmann et al. (2022), seeking to separate the different MPs from different spectral indices and explored the possibility of differentiating the stellar populations of globular clusters through the ratio of their fluxes. We observed that the S-PLUS filters are efficient in separating PMs, especially when the analysis is combined with the narrow filters F0378 and F0395.

Keywords: Globular Clusters, Milky Way, RGB, Spectroscopy, NGC 7089

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Aglomerados Globulares e Múltiplas Populações	1
1.2	O Aglomerado Globular NGC 7089	8
2	Dados Utilizados e Observação	12
3	Metodologia e Análise	15
3.1	Calibração e Redução	17
3.2	Determinação dos Índices Espectrais	23
3.3	Razão entre os Espectros	25
4	Resultados e Discussão	28
5	Conclusão	34
	Lista de Figuras	35
	Lista de Tabelas	36
	Lista de Abreviações	37
	Referências	38
A	Apêndice - Proposta de Observação	45

1 Introdução

1.1 Aglomerados Globulares e Múltiplas Populações

A maioria das estrelas são formadas em grupos a partir do colapso gravitacional de uma nuvem de gás e poeira. Esses grupos de estrelas são muito diversos, podendo apresentar idades que vão de alguns milhões de anos a dezenas de bilhões de anos e massas que variam entre $10^2 - 10^6 M_{\odot}$ (Krumholz et al., 2019). Eles podem ser classificados como aglomerados abertos (OCs) ou aglomerados globulares (GCs). Aglomerados abertos são sistemas de estrelas que possuem de dezenas a centenas de membros, possuindo idades de milhões a alguns bilhões de anos (Hao et al., 2024). Eles estão associados principalmente ao disco da galáxia, onde existe maior formação estelar.

Aglomerados globulares (GCs) são sistemas densos de estrelas ligadas gravitacionalmente. Eles são caracterizados por seu formato aproximadamente esférico e idades maiores que 10 bilhões de anos (Chies-Santos et al., 2011; Gratton et al., 2019). Eles são essenciais para o estudo tanto de estrelas quanto de galáxias, pois, isoladamente, servem como um laboratório de evolução e dinâmica estelar. Enquanto que, em conjunto, podem nos revelar informações sobre a formação de sua galáxia (Ashman e Zepf, 2008). Afinal, há indicativos de que a formação de GCs ocorreu antes do surgimento da maior parte das estrelas de suas galáxias hospedeiras (Renzini, 2017).

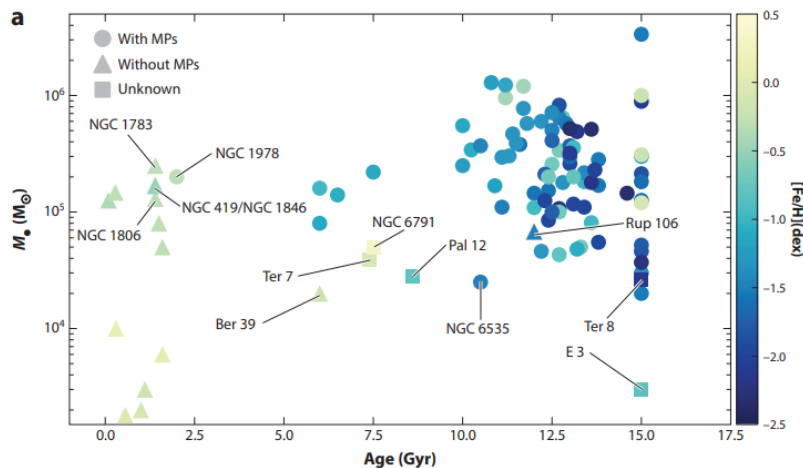


Figura 1 – Diagrama de idade, massa e metalicidades dos aglomerados globulares da Via Láctea. Os círculos, triângulos e quadrados indicam, respectivamente, aglomerados globulares que possuem múltiplas populações estelares, não possuem e indefinidos. Crédito: Bastian e Lardo (2018)

Devido a sua proximidade, é possível estudar os aglomerados da Via Láctea em mais detalhes, observando as características de suas estrelas membros. Antigamente, acreditava-se que as estrelas dos GCs constituíam uma população estelar simples (Lardo et al., 2011;

Gratton et al., 2019). Ou seja, estrelas que compartilham idades e composições químicas similares, por terem se originado da mesma nuvem molecular (Bastian e Lardo, 2018).

Entretanto, hoje sabe-se que, na verdade, a maioria dos aglomerados são compostos por múltiplas populações (MPs) estelares. Isso é demonstrado na figura 1, em que os círculos representam os GCs da Via Láctea em que foram identificadas MPs, enquanto os triângulos e quadrados indicam, respectivamente, aglomerados globulares em que não foram identificadas múltiplas populações estelares e casos indefinidos. As múltiplas populações estelares são caracterizadas por estrelas que possuem idades e composições químicas distintas (principalmente em elementos leves como C, N, O, Na, Mg, Al, entre outros) (Salinas e Strader, 2015). Essas estrelas são divididas em uma população considerada quimicamente “normal”, chamada de primeira população (1P), e outra quimicamente “anômala”, chamada de segunda população (2P). É importante ressaltar que já foram observados aglomerados com mais de duas populações, como 47 Tucanae (4 populações), Ômega Centauri (7 populações), NGC 2808 (5 populações) e NGC 7089 (7 populações) (Milone et al., 2023; Mészáros et al., 2021; Milone et al., 2015b,a).

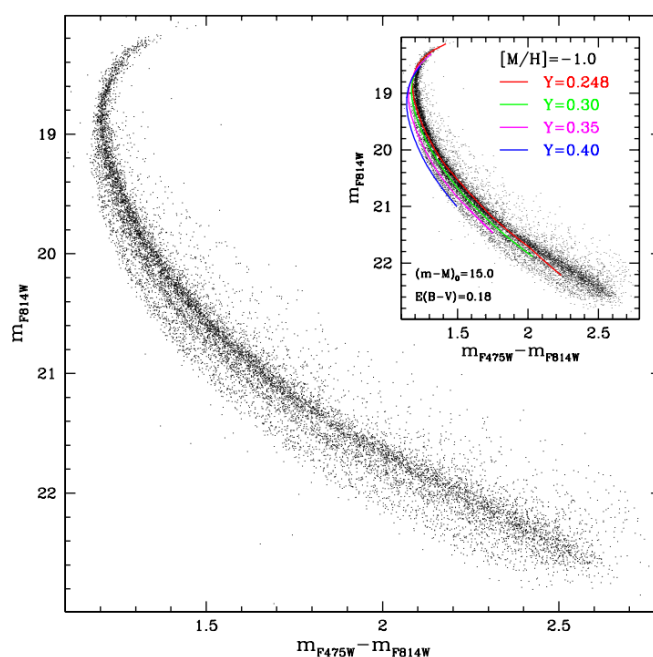


Figura 2 – Diagrama cor-magnitude (CMD) do aglomerado globular NGC 2808, onde é possível ver o fenômeno de múltiplas populações nas estrelas da sequência principal. As linhas presentes no gráfico interno mostram as isócronas respectivas de cada população. Crédito: Piotto et al. (2007)

Essas variações químicas são encontradas em diversas estrelas e em diferentes etapas evolucionárias, inclusive em estrelas da sequência principal (SP) (Carretta et al., 2010; Gratton et al., 2019), como pode ser visto na figura 2, retirada do trabalho de Piotto et al. (2007), em que cada uma das linhas mostradas no gráfico interno indicam isócronas de estrelas com diferentes abundâncias de hélio no aglomerado globular NGC 2808. Isso indica

que uma parte dos elementos químicos que compõem as estrelas da segunda população já estavam presentes no gás que as formou (Gratton et al., 2019). Afinal, durante o estágio da sequência principal, as estrelas não possuem temperaturas altas o suficiente e não passaram pelos processos de dragagem necessários para apresentar as composições observadas (Cohen et al., 2004).

Existem diversas teorias para explicar os processos que levam à formação de MPs. Em geral, pensa-se que as estrelas da primeira população poluíram o meio do aglomerado com diversos elementos químicos. Esse gás, então, tenderia a cair em direção ao centro do globular, formando a segunda população (Lardo et al., 2011). Consequentemente, deveria ser possível identificar uma segregação radial entre as diferentes populações do GC. Espera-se que a 2P seja majoritariamente encontrada nas partes mais centrais, enquanto a 1P estaria distribuída nas regiões externas (Simioni et al., 2016). É importante ressaltar que essa correlação não é exata, pois aglomerados globulares são estruturas que evoluem com o tempo, tanto pela dinâmica interna (segregação em massa, ejeção e evaporação de estrelas, etc.) quanto por efeitos externos (forças de maré de subestruturas Galácticas, encontros com nuvens moleculares gigantes, etc.). Entretanto, simulações (D’Ercole et al., 2008) mostram que ainda seria possível detectar variações radiais em alguns aglomerados.

O desafio atual das teorias de formação de MPs é explicar quais estrelas seriam responsáveis por poluir o meio intra-aglomerado. As teorias mais conhecidas utilizam estrelas do ramo assintótico das gigantes (AGB), estrelas massivas (VMS) e estrelas massivas em rotação (FRMS) para explicar o fenômeno.

Devido à alta densidade no centro de globulares, é provável que colisões entre estrelas aconteçam com alguma frequência. O resultado dessas colisões, durante a juventude do GC, formaria estrelas extremamente massivas (VMS), que expulsariam uma fração de massa muito maior do que estrelas AGBs. Por mais que esse cenário tenha melhor concordância com as abundâncias observadas em GCs, a existência de estrelas com massas tão grandes ($> 10^3 M_{\odot}$) ainda não foi observada em aglomerados (Bastian e Lardo, 2018).

Além disso, estrelas massivas conseguiriam atingir a temperatura necessária para a formação de alguns dos elementos leves observados já durante a sequência principal (Meynet e Maeder, 2006). Se estiverem em rotação (FRMS), esses elementos criados no núcleo teriam mais facilidade de chegar à superfície e serem expelidos para o meio. Entretanto, essas estrelas não conseguiriam ativar as cadeias de reações responsáveis por produzir os padrões de Mg e Al observados antes do fim da SP (Bastian e Lardo, 2018).

Algumas teorias adotam estrelas do AGB como poluidoras. Nessa fase evolutiva, a estrela passa por processos de dragagem, que levam os componentes formados no centro da estrela para seus envelopes superiores. Dessa forma, seria mais fácil para o material chegar à superfície e ser perdido por meio dos ventos estelares (Karakas e Lattanzio, 2014). Por ter baixa velocidade, o material ejetado pelos ventos não seria expulso do aglomerado e cairia em direção ao centro, formando a 2P.

Nesse cenário, as estrelas não perdem massa o suficiente para explicar as abundâncias das estrelas da 2P. Além disso, o modelo AGB resulta em uma correlação entre Na e O, o que não é observado (Gratton et al., 2019). Para contornar esse problema, é teorizado que o material ejetado pelas estrelas se diluiria em gás não processado que seria posteriormente acretao pelo GC. Para investigar essa proposição, Bastian e Strader (2014) e Hollyhead et al. (2015) observaram aglomerados massivos jovens (YMCs) da galáxia M83 e das Nuvens de Magalhães. Por serem considerados os precursores dos aglomerados globulares (Kruijssen, 2015) e geralmente estudados como análogos, YMCs são frequentemente utilizados para testar teorias de formação e evolução de GCs. Entretanto, em ambos os estudos, não foi encontrado gás intra-aglomerado, contradizendo os modelos AGB e FRMS, que estima que gás deveria permanecer no aglomerado por 7 – 20 Myrs.

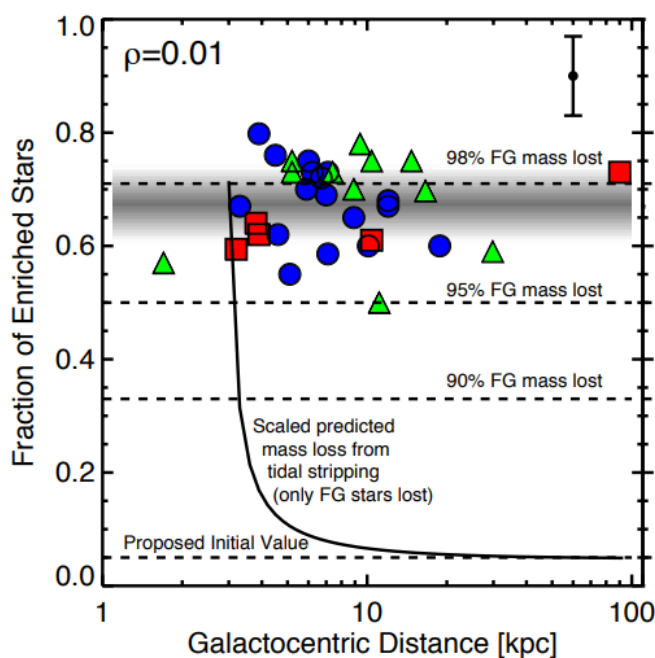


Figura 3 – Fração de estrelas enriquecidas em função da distância ao centro da galáxia. Os diferentes símbolos indicam as massas dos GCs estudados: círculos, triângulos e quadrados representam, respectivamente, GCs com massas $< 3 \times 10^5 M_{\odot}$, $3 - 10 \times 10^5 M_{\odot}$ e $> 10^6 M_{\odot}$. As quatro linhas horizontais mostram as frações de estrelas da 2P previstas pelos modelos AGB e FRMS. Não foi encontrada uma relação entre a fração de estrelas da 2P e distância galactocêntrica, o que é mostrado pelo coeficiente de correlação de Spearman, no canto superior esquerdo. Crédito: Bastian e Lardo (2015)

Outra característica inusitada dos GCs é a fração de estrelas da segunda população em relação à primeira. Em alguns casos, as estrelas da 2P podem compor mais de 50% das estrelas do aglomerado (Bastian, 2015). Dessa forma, não há estrelas da 1P em quantidade o suficiente para poluir o meio intra-aglomerado de tal forma a produzir tantas estrelas quimicamente "anômalas". Esse paradigma é conhecido como o problema de balanço de massa, ou *mass budget problem*, em inglês (Bastian e Lardo, 2018). O caminho que os

modelos AGB e FRMS seguem para explicar essa contradição é estipular que a massa inicial dos GCs era de 10 a 100 vezes maior. Ao longo do tempo, as estrelas mais externas (preferencialmente da 1P) teriam sido perdidas devido à forças de maré. Para testar essa hipótese, Bastian e Lardo (2015) analisaram GCs em diferentes distâncias do centro da galáxia. Se as estrelas da 1P foram perdidas pelas forças de maré, é esperado que GCs mais externos possuíssem frações maiores de estrelas da 1P, o que não foi observado (figura 3).

Em resumo, todas as teorias propostas têm diversas limitações, como podemos ver na figura 4, retirada de Bastian e Lardo (2018), que compara os principais modelos propostos para explicar as múltiplas populações em GCs e observações. Analisando a figura, fica claro que há uma discordância entre os modelos propostos e as características observadas em aglomerados globulares. Isso se deve ao fato de aglomerados serem sistemas complexos, formados por milhares de estrelas. Dessa forma, é possível que não exista somente um tipo de estrela responsável pela poluição do ambiente e o surgimento da 2P. Provavelmente, diversos tipos de estrelas atuam, em conjunto, para que o fenômeno ocorra, cada uma contribuindo de uma forma diferente.

	(Near) ubiquity (Section 2)	Abundances (Section 5.1)	Li correlations (Section 5.1.2)	Variety/Stochasticity (Section 5.1.3)	Mg-Al (Section 5.1.5)	Discreteness (Section 5.2)	Mass budget (Section 5.2)	f_{enriched} correlation with GC mass (Section 5.4)	He-spread correlation with GC mass (Section 5.5)	YMCs (Section 5.6)	Age trend (Section 5.6.1)
AGB	X	X*	X*	X	✓*	X*	X*	X	X*	X	X
FRMS	X	X*	X	X	X	X	X*	X	X	X	X
VMS	X	X*	X	?	X*	X	✓*	✓*	✓*	✓	X
EDA	X	X*	X	X	X	X	X*	X	X	✓*	X
Reverse order	X	X*	X	?	?	X	✓*	X	X	X	X
eSF period	X	X*	X	X	X	X	X*	X	X	✓	X

Figura 4 – Resumo comparativo entre as principais teorias de múltiplas populações e observações. O “X” indica que as previsões da teoria contradizem as observações, o símbolo de verificado indica que a teoria modela as observações adequadamente e o ponto de interrogação indica pontos em que as teorias ainda não foram capazes de fornecer previsões. Crédito: Bastian e Lardo (2018)

Além disso, é possível que as MPs sejam um resultado da formação estelar no universo primordial, tendo em vista a idade da maioria dos aglomerados globulares. Entretanto, nenhum dos modelos de múltiplas populações atuais levam isso em consideração (Bastian, 2015). Se as condições do universo primordial não fossem relevantes, deveríamos ver as mesmas características de GCs em YMCs. Bastian et al. (2013) investigou mais de 100 aglomerados massivos jovens com idades entre 10 e 1000 Myrs das Nuvens de Magalhães

e não encontrou traços de formação estelar (2P). Dessa forma, de acordo com Bastian (2015), existem duas possibilidades de melhora para as teorias: utilizar uma abordagem que não requer diferentes momentos de formação estelar (Oliveira et al., 2020); ou levar em consideração a formação de GCs no Universo primordial.

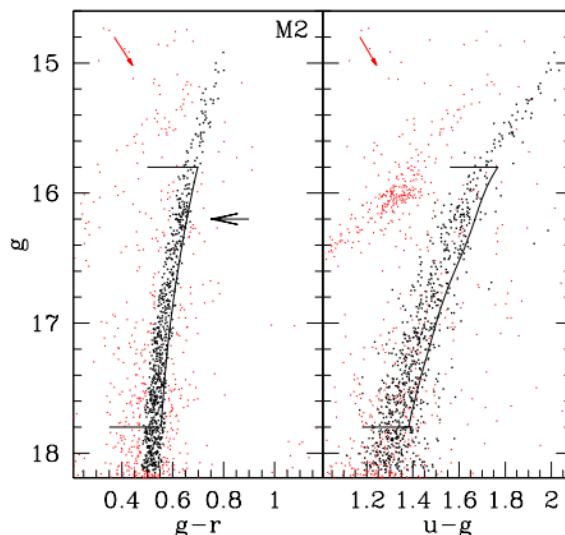


Figura 5 – Diagramas cor magnitude comparando as diferentes combinações de filtros do SDSS utilizados por Lardo et al. (2011) para separar as MPs de NGC 7089. A seta vermelha no canto superior esquerdo representa o vetor de avermelhamento $E(B - V)$ e a seta preta representa a localização do *RGB bump*. As estrelas do RGB selecionadas para o estudo estão marcadas de preto enquanto as estrelas marcadas de vermelho não foram utilizadas. Crédito: Lardo et al. (2011)

As múltiplas populações em GCs podem ser detectadas tanto fotometricamente quanto espectroscopicamente. A fotometria é uma técnica astronômica que consiste na medida da luz de um objeto (Oliveira e Saraiva, 2014). Por fotometria, é possível identificar a presença de MPs em estrelas do ramo das gigantes vermelhas (RGB) ao analisar variações em determinados índices de cor que passam pelo ultravioleta (painel da direita da figura 5) (Lardo et al., 2011). Espectroscopicamente, MPs podem ser diferenciadas fazendo-se a razão entre os espectros das populações (Bastian e Lardo, 2018) ou pela comparação entre as abundâncias de elementos químicos.

A espectroscopia é uma técnica de estudo da luz que tem por base um princípio muito simples, descoberto por Newton: ao passar por um prisma, a luz branca tende a se decompor em diferentes cores. Em outras palavras, ela permite analisar a intensidade de radiação emitida em cada comprimento de onda do espectro eletromagnético.

No contexto da astronomia, a espectroscopia é feita utilizando redes de difração, ao invés de prismas. Uma rede de difração é um conjunto de fendas paralelas, feitas, por exemplo, a partir de sulcos criados em lâminas de vidro. O funcionamento básico de um espectrógrafo consiste em uma fenda, por onde a luz passa para ser colimada por

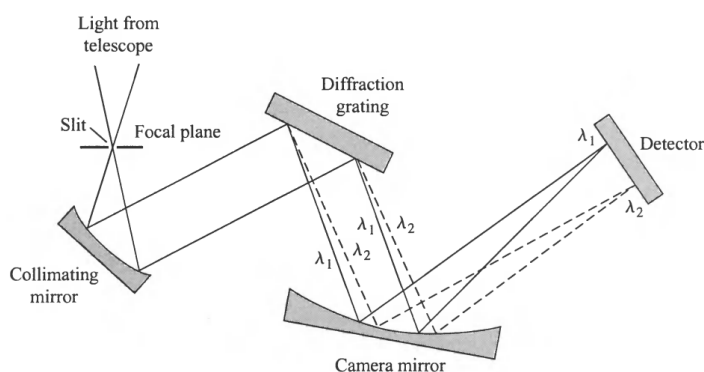


Figura 6 – Ilustração simplificada do funcionamento de um espectrógrafo. Créditos: Carroll e Ostlie (2017)

um espelho. Em seguida, ela é dispersada pela rede de difração e enviada na direção do dispositivo de carga acoplada (CCD) como mostra a figura 6 (Carroll e Ostlie, 2017).

O espectro de uma estrela é marcado por linhas escuras, ou de absorção. Esse fato, explorado por Kirchhoff em 1860, indica que as estrelas podem ser descritas por um núcleo de gás quente e alta pressão envolto por uma camada de gás frio e de baixa pressão (Oliveira e Saraiva, 2014).

O gás quente no núcleo da estrela, que pode ser aproximado por um corpo negro, emite um espectro contínuo, ou seja, sem linhas escuras. Quando essa radiação alcança as camadas superiores, mais frias, acontece a excitação dos átomos da atmosfera. A radiação absorvida pelos átomos, quando reemitida, pode ir em qualquer direção, o que faz com que seja registrada em menores quantidades pelos detectores dos telescópios, gerando, assim, as linhas escuras (Schwarzschild, 2015).

Cada tipo de átomo vai produzir um padrão específico de linhas escuras, que depende de sua configuração eletrônica. Dessa forma, observando a localização de linhas de absorção do espectro de uma estrela, conseguimos estimar os elementos que compõem sua atmosfera. Além disso, o espectro pode fornecer outras informações sobre sua rotação e velocidade radial.

O hidrogênio, elemento mais abundante nas estrelas, pode apresentar diferentes padrões de linhas no espectro. A disposição das linhas tem correlação com os parâmetros internos da estrela. Por exemplo, linhas de absorção do hidrogênio neutro começam a ser proeminentes no espectro de estrelas com temperatura acima de aproximadamente 7000K. Em uma estrela de temperatura maior, as linhas de Lyman e Balmer (cujos comprimentos de onda característicos podem ser vistos na figura 7) vão se tornando mais relevantes, pois os átomos da atmosfera recebem energia suficiente para transições para níveis mais altos. A partir de determinada temperatura ($\sim 20.000\text{K}$), as linhas de hidrogênio vão se tornando menos evidentes, pois a maioria dos átomos está ionizado (Gray, 2008). A figura 8 mostra como a intensidade das linhas espectrais de diversos elementos dependem da temperatura da estrela.

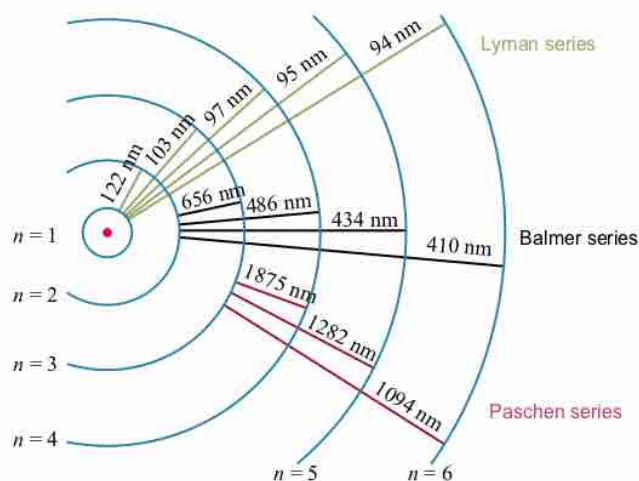


Figura 7 – Esquema das diferentes transições eletrônicas do átomo de hidrogênio e seus comprimentos de onda característicos. Crédito: <https://kolibri.teacherinabox.org.au/modules/en-boundless/www.boundless.com/physics/index.html>

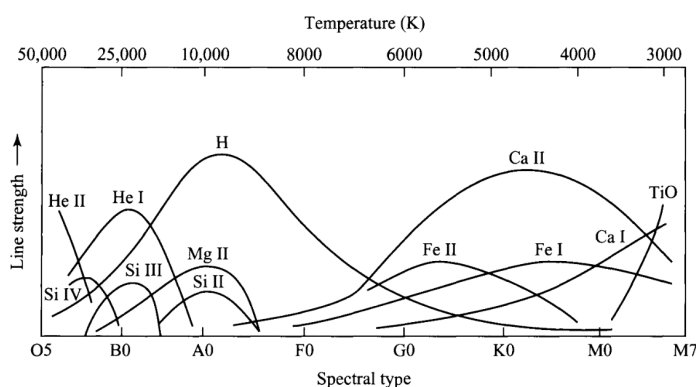


Figura 8 – Intensidade da linha espectral em função da temperatura. Crédito: Gray (2008)

1.2 O Aglomerado Globular NGC 7089

NGC 7089 é um aglomerado globular pertencente ao halo da Via Láctea. Ele possui metalicidade intermediária de aproximadamente $[Fe/H] = -1,46 \pm 0,02$ (Limberg et al., 2022), está localizado a 11,5 kpc do Sol e possui uma massa de $6,24 \times 10^5 M_{\odot}$ ¹. Algumas pesquisas sugerem que ele poderia ser o núcleo de uma galáxia anã que se fundiu com a Via Láctea (Lardo et al., 2016; Piatti, 2022).

Lardo et al. (2011) estudou as MPs de diversos GCs, entre eles, NGC 7089. O estudo focou na análise fotométrica de estrelas do RGB, utilizando imagens do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Eles demonstram que a combinação dos filtros u-g é mais eficiente para a separação das múltiplas populações. Além disso, ao analisar a distribuição radial, encontraram a 2P mais concentrada no centro do GC.

¹ <https://people.smp.uq.edu.au/HolgerBaumgardt/globular/fits/ngc7089.html>

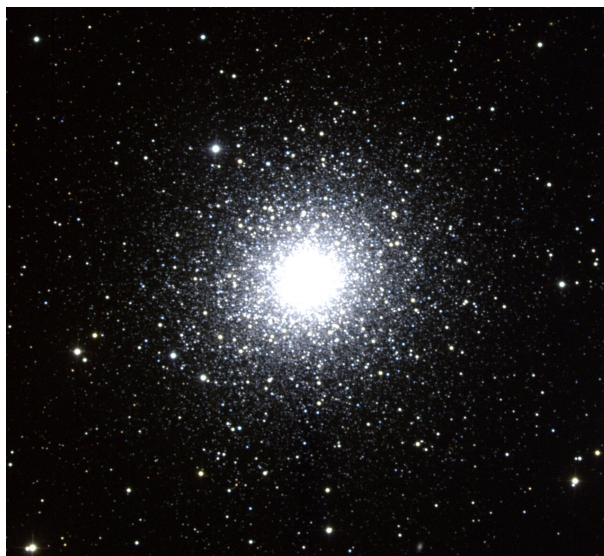


Figura 9 – Foto de NGC 7089 retirada com o Kitt Peak National Observatory (KPNO). Crédito: Doug Williams, REU Program/NOIRLab/NSF/AURA

Vanderbeke et al. (2015) propõe uma abordagem diferente, ao focar em estrelas do Ramo Horizontal (HB) para o estudo de distribuição radial. Eles também usam imagens do SDSS e assumem que altas temperaturas nas estrelas do HB estão relacionadas a maiores concentrações de elementos leves (Carretta et al., 2010). Ao contrário de Lardo, eles não encontram sinais de uma variação radial na distribuição das MPs em NGC 7089.

É importante salientar as diferenças entre os dois tipos de estrelas analisadas em ambos os estudos. Durante a maior parte de sua vida, as estrelas convertem o hidrogênio em seu núcleo em hélio. Essa fase é chamada de sequência principal (ilustrada na figura 10), e ela acaba quando não há mais hidrogênio suficiente no núcleo para manter a estrela em equilíbrio hidrostático. Com isso, se inicia a queima de hélio, a estrutura da estrela se altera e suas camadas externas se expandem, fazendo com que ela evolua para o ramo das gigantes vermelhas (RGB). Conforme o hélio vai sendo convertido em carbono, a estrela vai evoluindo para o ramo horizontal (HB) (Oliveira e Saraiva, 2014).

Existem algumas diferenças entre os dois estudos que poderiam explicar os resultados divergentes. Smolinski et al. (2020) chama atenção para o fato de que a forma com que Lardo tratou as incertezas fotométricas pode ter causado um viés, visto que as estrelas com maiores incertezas estavam localizadas mais centralmente. Baseado nisso, Hoogendam e Smolinski (2021) fazem uma reanálise de alguns GCs estudados por Lardo et al. (2011), entre eles, NGC 7089. Paralelamente, eles aplicaram a mesma análise para o catálogo de GCs de Stetson et al. (2019) para fazer uma comparação. Entretanto, os catálogos mostraram resultados conflitantes. Mesmo excluindo estrelas com maiores incertezas fotométricas, utilizadas por Lardo, os autores ainda encontraram uma população de estrelas “vermelhas” (consideradas abundantes em sódio) concentradas centralmente. Esse resultado foi corroborado pelo teste estatístico realizado (Kolmogorov-Smirnov). Todavia, a distribuição radial cumulativa das estrelas de Stetson et al. (2019) não apresentavam

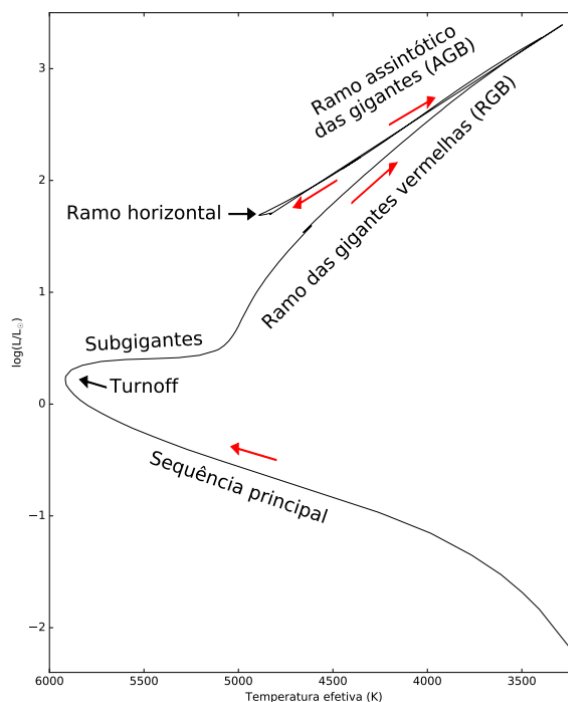


Figura 10 – Diagrama da evolução de uma estrela. As setas indicam a ordem das fases de evolução. Crédito: Alencastro (2016)

sinais de segregação radial.

O teste estatístico Kolmogorov-Smirnov (KS) é utilizado para separar dois grupos de uma amostra, indicando se esses grupos pertencem à mesma população ou não. O problema é que esse teste é sensível principalmente para diferenças globais ou centrais entre as distribuições. Em outras palavras, ele não contabiliza de forma eficiente diferenças entre as amostras nos extremos (início e fim) de suas distribuições. Esse fato foi apontado por Hartmann et al. (2022), que decidiu aplicar o teste de Anderson-Darling (AD) para sua amostra de estrelas do RGB de NGC 7089 (entre outros GCs estudados). Por ser mais sensível ao início e fim da distribuição de dados, esse teste é mais indicado para o estudo de MPs em GCs. Utilizando os dados fotométricos da colaboração S-PLUS, Hartmann et al. (2022) encontrou sinais de segregação radial nas MPs de NGC 7089.

O S-PLUS (*Southern Photometric Local Universe Survey*) é uma colaboração entre observatórios e universidades latino-americanas que visa observar cerca de 9300 graus quadrados do céu do hemisfério sul (figura 11) através de 12 filtros (5 largos e 7 estreitos, que podem ser vistos ao fundo da figura 12). O telescópio utilizado tem 0.8m de abertura e está localizado no *Cerro Tololo Interamerican Observatory* (CTIO), Chile (Mendes de Oliveira et al., 2019).

A maioria dos estudos citados anteriormente utilizaram dados fotométricos do SDSS para o estudo das MPs de NGC 7089, exceto Hartmann et al. (2022), que utilizou a fotometria do S-PLUS para o seu estudo. Em vista disso, escolhemos algumas estrelas do RGB de Hartmann et al. (2022) para realizar um *follow-up* espectroscópico. Com isso,

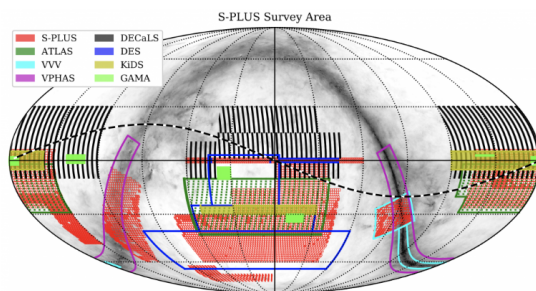


Figura 11 – Campos observados pela colaboração S-PLUS (em vermelho), em comparação com outras colaborações. Crédito: Mendes de Oliveira et al. (2019)

nosso objetivo é analisar a eficiência dos filtros do S-PLUS utilizados pelo autor para separar as MPs de NGC 7089. Para tal, iremos estimar os índices espectrais das estrelas e realizar a razão entre seus espectros (Bastian e Lardo, 2018).

O método da razão entre os fluxos de estrelas da primeira e segunda população pode ser utilizado para separá-las pois seus espectros se diferenciam especialmente nas regiões onde as linhas de elementos leves estão localizadas. Observando a figura 12, vemos que isso acontece especialmente nos comprimentos de onda do azul, onde estão localizados alguns dos filtros do S-PLUS como u, g, F0378, F0395, F0410 e F0430. Dessa forma, espera-se que diferentes combinações entre esses filtros possam ser utilizadas para separar as MPs. Além disso, através da determinação dos índices espectrais, podemos explorar se as abundâncias químicas das estrelas correspondem com a população a que foram atribuídas no estudo de Hartmann et al. (2022).

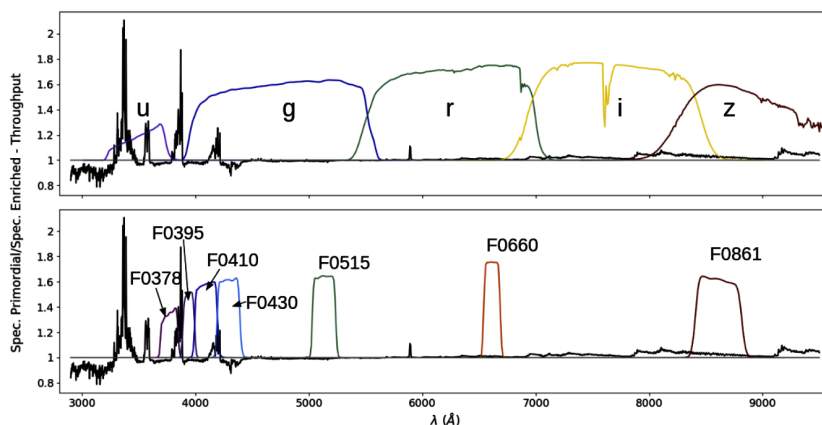


Figura 12 – Razão entre os espectros sintéticos de estrelas com composição química correspondente à primeira e segunda população. Ao fundo, estão distribuídos os filtros do S-PLUS utilizados por Hartmann et al. (2022). Crédito: Branco et al. (2024)

2 Dados Utilizados e Observação

A seleção das estrelas para o estudo foi feita a partir dos seguintes passos: escolhemos as estrelas do RGB de Hartmann et al. (2022) como ponto de partida. Utilizando dados de movimento próprio fornecidos pelo GAIA (Gaia Collaboration et al., 2021), excluimos as estrelas que não faziam parte do aglomerado. A escolha das estrelas para o *follow-up* espectroscópico (apêndice A) foi feita por meio de inspeção visual, dando preferência às estrelas de menor magnitude (ou seja, mais brilhantes).

Além disso, priorizamos a seleção de estrelas isoladas, localizadas em raios diferentes do centro do aglomerado. Essa etapa foi mais desafiadora, dada a densidade populacional do ambiente estelar. Para garantir uma representação equitativa, optamos por escolher números equivalentes de estrelas da primeira e segunda população. Além disso, algumas estrelas, consideradas indefinidas pelo estudo de Hartmann, também foram incluídas na seleção, proporcionando uma abordagem mais abrangente para a análise das características estelares no aglomerado. Ao todo, 20 estrelas foram escolhidas.

A preparação da proposta de observação ocorreu no fim de 2021. Solicitamos duas noites de observação para Julho ou Agosto de 2022. A escolha por duas noites tinha em vista o número de alvos, o tempo gasto para realizar o pré-imageamento, centralizar a estrela na fenda e movimentar o telescópio. Além disso, um tempo maior de observação seria necessário, pois o aglomerado só atingia alturas maiores do que 20 graus no céu após às dez horas da noite, como mostra a figura 13, produzida com o programa STARALT¹.

Infelizmente, não conseguimos observar todas as estrelas que havíamos inicialmente selecionado, devido à limitação no tempo de observação concedido pelo telescópio (figura 14). Como resultado, só conseguimos observar 60% da amostra, composta por 4 estrelas da população 1, 3 estrelas da população 2 e 5 estrelas de população indefinida. Embora a amostra total de 12 estrelas seja modesta, estudos espectroscópicos sobre aglomerados globulares frequentemente lidam com amostras semelhantes: Smith e Mateo (1990) (20 estrelas), Baeza et al. (2022) (12 estrelas), Monty et al. (2023) (14 estrelas), Montecinos et al. (2021) (20 estrelas), Lardo et al. (2023) (5 estrelas). Assim, é ainda viável extrair conclusões dos dados, mesmo que sejam parciais. Os principais parâmetros das estrelas observadas: declinação, ascensão reta, distância ao centro do aglomerado (raio), magnitude na banda G e população estão resumidos na tabela 1.

O espectrógrafo Goodman (Clemens et al., 2004) é um instrumento que está instalado no SOAR (*Southern Astrophysical Research Telescope*), localizado em Cerro Pachón, no Chile. Ele é um telescópio de 4 metros que cobre um intervalo de comprimento de onda do azul (cerca de 320 nm) até o infravermelho próximo (900 nm).

¹ Desenvolvido por Peter Sorensen, Marco Azzaro e Javier Méndez. Link: <http://catserver.ing.iac.es/staralt/>

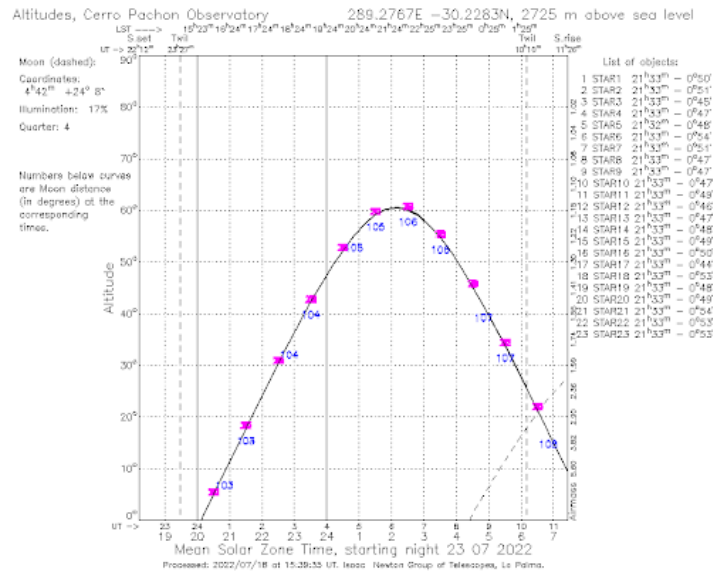


Figura 13 – Trajetória do aglomerado no céu obtida com o programa STARALT. As linhas tracejadas verticais indicam o pôr do Sol e o amanhecer.

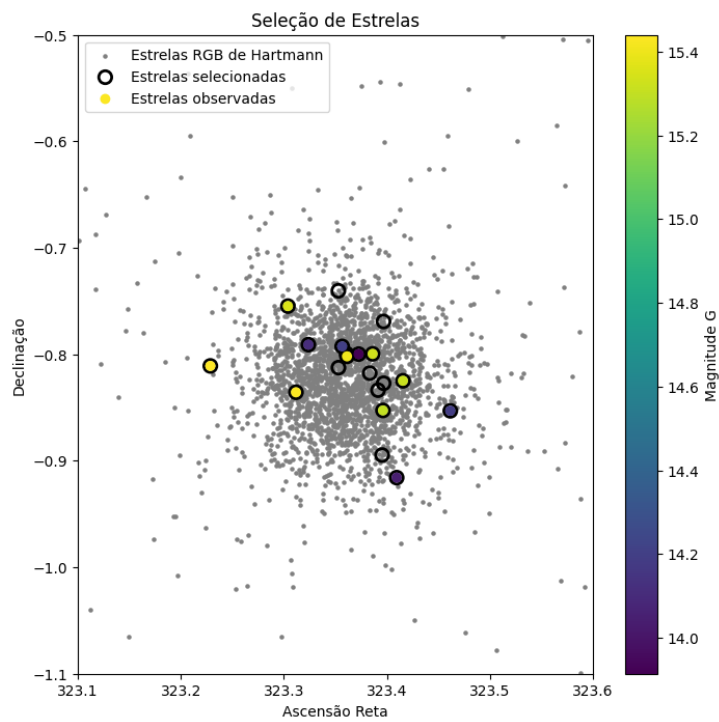


Figura 14 – Seleção de estrelas para o *follow-up* espectroscópico. Ao todo, 20 estrelas haviam sido selecionadas (círculos pretos), mas apenas 12 foram observadas (círculos coloridos). Podemos ver suas magnitudes na banda g na barra de cores lateral.

A observação ocorreu no dia 31 de julho de 2022. A fenda escolhida para a observação foi a de 0,45 arcsec e a rede de difração utilizada foi de 600l/mm Blue. Essa rede possui uma dispersão de 0,65 Å/pixel e cobre uma região de 350-616nm. A resolução do instrumento nessas configurações é de aproximadamente 2800 em 550nm. O CCD do telescópio tem uma escala de 0,15 arcsec/pixel (NOIRLab, 2023). Cada uma das 12 estrelas foi observada duas vezes por 15 minutos, com exceção da última, que foi observada três vezes.

	RA [°]	DEC [°]	Raio ["]	G [mag]	População
1	323.311739	-0.835642	77.04	15.43	2
2	323.39616	-0.852691	91.72	15.29	2
3	323.303892	-0.754716	112.46	15.35	1
4	323.386148	-0.799572	120.25	15.32	1
5	323.228601	-0.810897	160.75	15.44	1
6	323.409478	-0.915809	181.76	14.04	-
7	323.461534	-0.853049	188.37	14.18	-
8	323.356584	-0.792591	190.78	14.19	-
9	323.372538	-0.799797	324.81	13.91	-
10	323.323794	-0.790926	371.98	14.10	-
11	323.36126	-0.801891	373.53	15.40	1
12	323.415561	-0.824845	484.33	15.31	2

Tabela 1 – Dados referentes às doze estrelas observadas. Os dados de magnitude são do catálogo Gaia. Os dados de população foram retirados dos resultados obtidos por Hartmann et al. (2022), algumas estrelas não foram associadas a nenhuma população específica. O raio, ou distância das estrelas até o centro do aglomerado, está em unidades de segundos de arco.

3 Metodologia e Análise

A abundância química das estrelas pode ser estimada por meio de índices espectrais em espectros de baixa resolução (Gratton et al., 2019). Esses índices são medidos a partir de um intervalo de comprimento de onda centrado na linha atômica de interesse. É comparado o fluxo de luz da linha com um pseudo contínuo definido localmente (Pancino et al., 2010). Essa comparação pode ser feita de diferentes maneiras.

A primeira forma de calcular os índices espectrais que usaremos é o método explorado por Salinas e Strader (2015), que também estudaram as MPs de GCs com dados do Goodman. Seguindo a definição de Harbeck et al. (2003), os três índices espectrais utilizados pelos autores são definidos conforme as equações abaixo:

$$S(3839) = -2,5 \log \left(\frac{F_{3861-3884}}{F_{3894-3910}} \right) \quad (3.1)$$

$$S(4142) = -2,5 \log \left(\frac{F_{4120-4216}}{0,4 F_{4055-4080} + 0,6 F_{4240-4280}} \right) \quad (3.2)$$

$$CH(4300) = -2,5 \log \left(\frac{F_{4285-4315}}{0,5 F_{4240-4280} + 0,5 F_{4390-4460}} \right) \quad (3.3)$$

Onde F representa o somatório do fluxo, ou de contagens, no intervalo de comprimento onda respectivo.

Outra forma de calcular índices espectrais é explorada por Bertone et al. (2020), cujo trabalho procura novos índices espectrais para o estudo de múltiplas populações em GCs. Os autores utilizam a mesma definição de índices de Lick (Trager et al., 1998):

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{F_I(\lambda)}{F_C(\lambda)} \right) d\lambda \quad (3.4)$$

Onde F_I é o somatório do fluxo, ou contagens, da banda de interesse, localizada entre λ_1 e λ_2 , e F_C é o somatório do fluxo, ou contagens, do pseudocontínuo interpolado (a interpolação linear é feita conectando os pontos centrais das bandas adjacentes). No caso de estrelas do RGB, os índices recomendados pelos autores estão detalhados na tabela 2.

Índice	Banda principal [Å]	Contínuo "azul"[Å]	Contínuo "vermelho"[Å]
Fe(3573)	3555,8-3590,6	3484,0-3542,0	3615,0-3659,9
CN(3863)	3842,2-3884,1	3751,4-3812,0	3886,4-3926,8
Ca(3897)	3812,2-3982,0	3768,9-3782,3	3986,1-4029,3
Fe(4180)	4142,5-4216,7	4025,6-4108,6	4217,3-4336,4
CH(4281)	4247,2-4314,7	4150,9-4216,3	4382,8-4580,7
CH(4296)	4217,1-4374,2	4211,4-4216,4	4407,1-4461,6

Tabela 2 – Índices espectrais relevantes para o estudo de estrelas do RGB (Bertone et al., 2020).

A região espectral de cada índice utilizado por Salinas e Strader (2015) e Bertone et al. (2020) está ilustrada na figura 15. Essa figura nos permite fazer uma estimativa inicial de quais índices estão localizados em regiões mais relevantes para a separação das MPs. Por exemplo, os índices Fe(3575), S(3839), CN(3863), Ca(3897) e S(4142) parecem promissores. Afinal, se encontram nos “picos” do gráfico, ou seja, nos comprimentos de onda onde os espectros mais se diferenciam. Todavia, não foi possível utilizar o índice Fe(3575) neste trabalho, pois os espectros obtidos não apresentavam sinal em comprimentos de onda menores que 3500 Å.

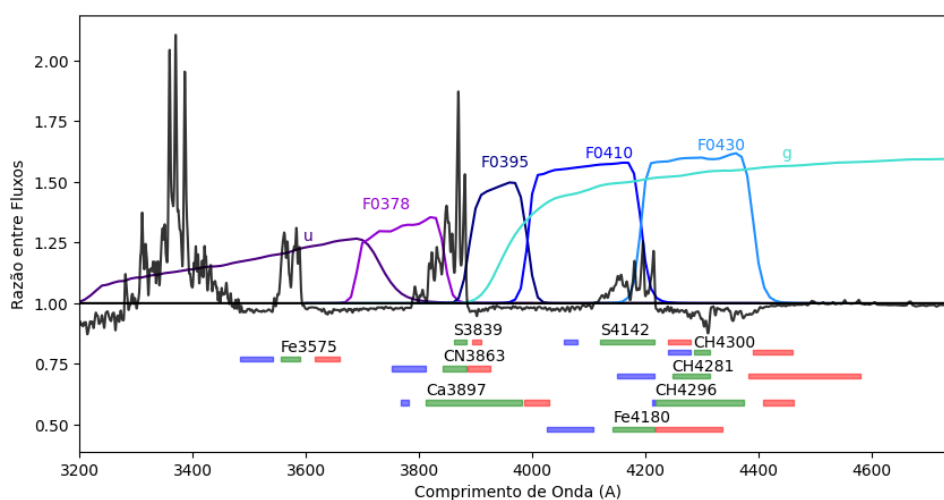


Figura 15 – Gráfico da razão entre os espectros sintéticos de estrelas da primeira e segunda população (Branco et al., 2024). No fundo, estão ilustrados (fora de escala) as curvas de transmissão dos filtros do S-PLUS. Abaixo estão representadas as regiões espectrais relevantes para cada índice utilizado por Salinas e Strader (2015) e Bertone et al. (2020).

3.1 Calibração e Redução

A calibração inicial dos dados foi feita através da *pipeline*¹ do Goodman, que realiza diversas etapas: inicialmente, ocorre a correção por *bias*, utilizando imagens com tempo de exposição nulo. Essas imagens são necessárias para eliminar ruídos eletrônicos, como a corrente de escuro, nos pixels que não receberam luz. Em seguida, é executada a correção por *flat*, uma vez que a eficiência dos pixels do CCD pode variar. Essa correção é feita a partir de imagens capturadas com uma tela de luz uniforme ou do céu, pouco após o pôr do sol.

As etapas seguintes, calibração em comprimento de onda e subtração do céu, foram feitas por meio de códigos produzidos em Python. O início da calibração em comprimento de onda requer o uso das lâmpadas de calibração.

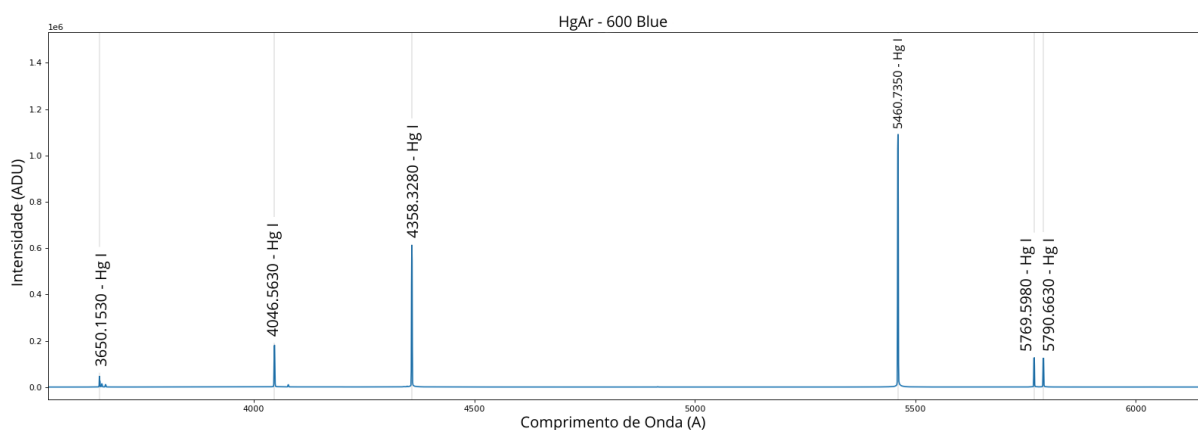


Figura 16 – Espectro da lâmpada de HgAr observada com a mesma rede de difração utilizada nas observações. Fonte: SOAR

Para cada estrela observada, extraímos também um espectro de uma lâmpada de calibração de mercúrio-argônio (HgAr). Como essa lâmpada possui linhas de emissão conhecidas (figura 16), é possível, a partir delas, obter uma relação pixel-comprimento de onda para converter os dados de espectro das estrelas.

O processo de conversão do comprimento de onda dos espectros está ilustrado na figura 17, que utiliza a primeira lâmpada observada como exemplo. O código desenvolvido analisa o espectro de HgAr e procura por picos de sinal utilizando a função `find_peaks` do Scipy. É feito, então, uma comparação entre o pixel em que os picos estão localizados e seus comprimentos de onda respectivos. A partir disso, é ajustada uma função que faz a conversão dos valores de pixel para comprimento de onda (em Angstroms) utilizando a função `polyfit` do Numpy. Aplicando ela a todas as medidas do espectro da lâmpada, temos o espectro de HgAr calibrado.

Sempre que analisamos a luz de estrelas a partir de telescópios terrestres é necessário realizar a subtração do céu. O motivo para isso é que a atmosfera terrestre não é

¹ <https://noirlab.edu/science/programs/ctio/instruments/goodman-high-throughput-spectrograph/data-reduction-pipeline>

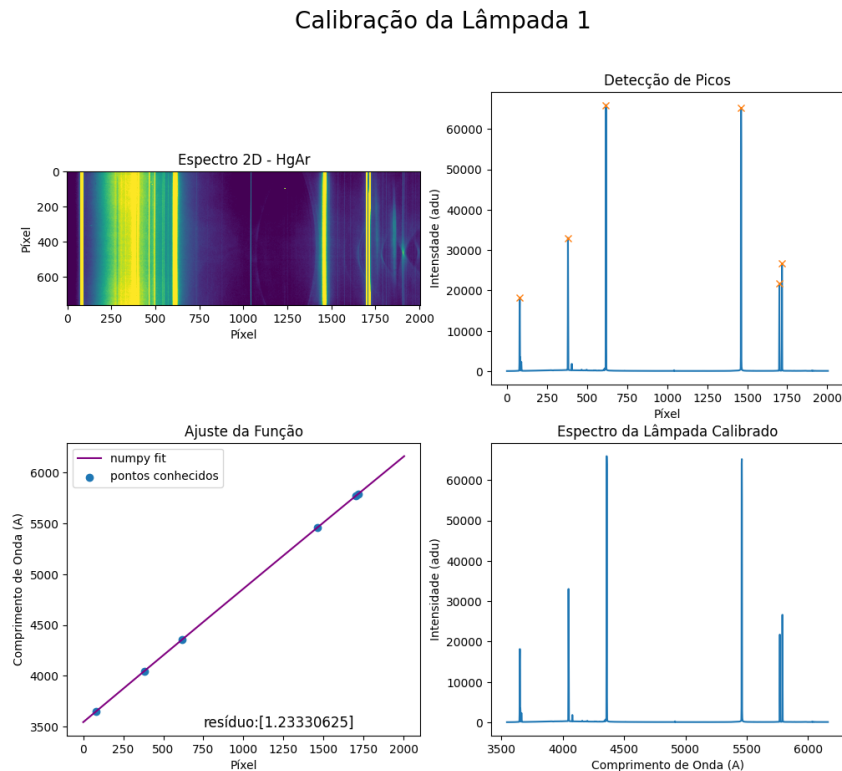


Figura 17 – Demonstração dos passos adotados na calibração em comprimento de onda das lâmpadas de HgAr. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: dados originais do espectro da lâmpada de HgAr, identificação dos picos característicos do espectro (identificados com o símbolo "x"), ajuste polinomial para obtenção da função de conversão pixel-comprimento de onda e o espectro final convertido.

perfeitamente transparente, contaminando, assim, o espectro adquirido com linhas de emissão. Para retirar essa contaminação, selecionamos, em cada estrela, uma região do CCD em que apenas o céu foi registrado, como é possível ver na figura 18. Extraímos o espectro dessa região e subtraímos do espectro da estrela.

Em seguida, iniciamos a calibração em comprimento de onda das estrelas observadas. Como um GC é um ambiente densamente povoado, essa etapa se mostrou particularmente desafiadora, pois a luz de mais de uma estrela foi capturada na fenda. É possível ver esse fenômeno na figura 18, em que cada linha brilhante horizontal representa o espectro de uma estrela diferente que foi registrado junto com a estrela central.

Para contornar esse problema, desenvolvemos um código em Python para extrair o espectro da estrela central. Para sua criação, utilizamos o tutorial do Astropy ² para redução de dados espectroscópicos. O código funciona de acordo com as seguintes etapas:

1. Utiliza a função `find_peaks` do Scipy para distinguir a localização das estrelas e do céu na imagem;
2. Ajusta um polinômio aos picos para identificar o traço da estrela. Esse método é importante caso a estrela seja menos brilhante em algumas partes do espectro;

² <https://learn.astropy.org/tutorials/1-SpectroscopicTraceTutorial.html>

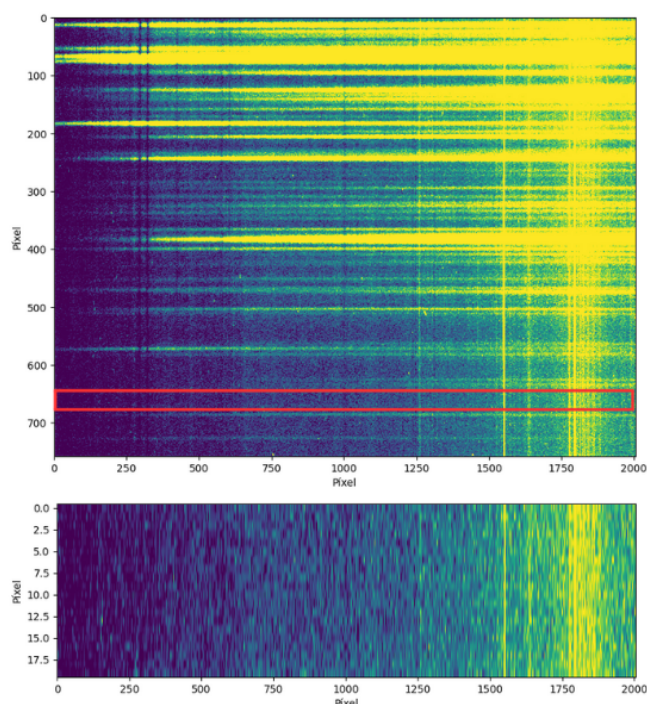


Figura 18 – Demonstração de como foi feita a subtração do céu para a segunda estrela observada. Selecionamos uma área da figura (retângulo vermelho) em que não foi registrado espectro de nenhuma estrela. Extraímos a região e subtraímos seu espectro do sinal da estrela.

3. Ajusta uma gaussiana ao espectro, centralizada na curva polinomial. Esse passo é importante para definir a área de extração do espectro na imagem. Estamos assumindo, dessa forma, que o sinal registrado no centro do espectro é máximo, e sua intensidade vai caindo de forma gaussiana;
4. A partir da gaussiana, é feito um corte na imagem a uma distância de 3 sigmas;
5. Extraímos o sinal do espectro com uma média ponderada. Isso é feito porque assumimos que o sinal no centro do traço possui uma razão maior de sinal-ruído (S/N), ao contrário dos pixels das caudas da gaussiana (Massey e Hanson, 2013). Ao fazer uma média comum, estaríamos dizendo que todos esses pixels possuem o mesmo “peso”, o que não é tão vantajoso, já que o sinal no centro da gaussiana possui menos interferência do céu ou de estrelas próximas.
6. Aplicamos a mesma função de conversão para comprimento de onda utilizada nas lâmpadas de HgAr no espectro extraído.

É importante ressaltar que, mesmo após a extração, é possível que ainda exista alguma contaminação de estrelas próximas. Exemplos podem ser vistos nos casos das estrelas 2 (figura 18) e 8 (figura 19), onde parte do espectro de estrelas vizinhas se sobrepôs ao espectro da estrela alvo em algumas regiões.

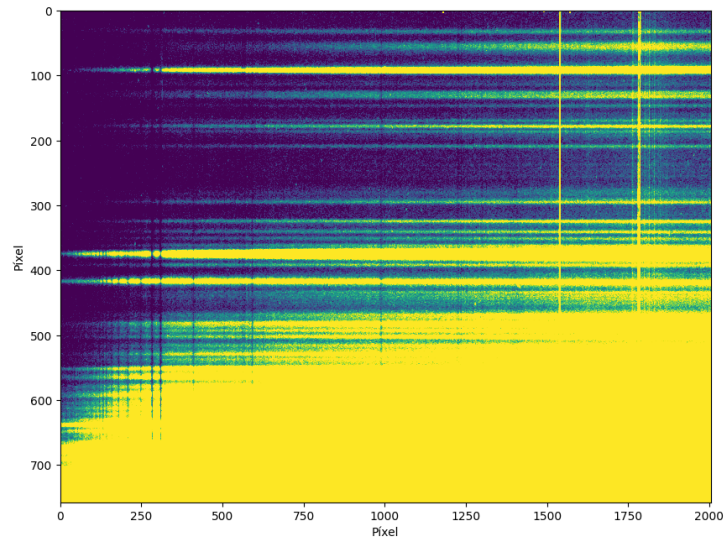


Figura 19 – Espectro da estrela 8. É possível ver que houve bastante contaminação por estrelas próximas.

Para obter uma calibração espectral precisa, é necessário realizar a correção heliocêntrica dos espectros. Esse passo é importante para eliminar o efeito do movimento relativo entre o observador e o alvo, causados, por exemplo, pela rotação e translação da Terra, que acaba deslocando as linhas do espectro para a direita ou para a esquerda. Entretanto, como o espectro de todas as estrelas foram obtidos na mesma noite e a velocidade radial de NGC 7089 é aproximadamente zero (figura 20), consideramos que seu efeito é praticamente desprezível no deslocamento das linhas espectrais.

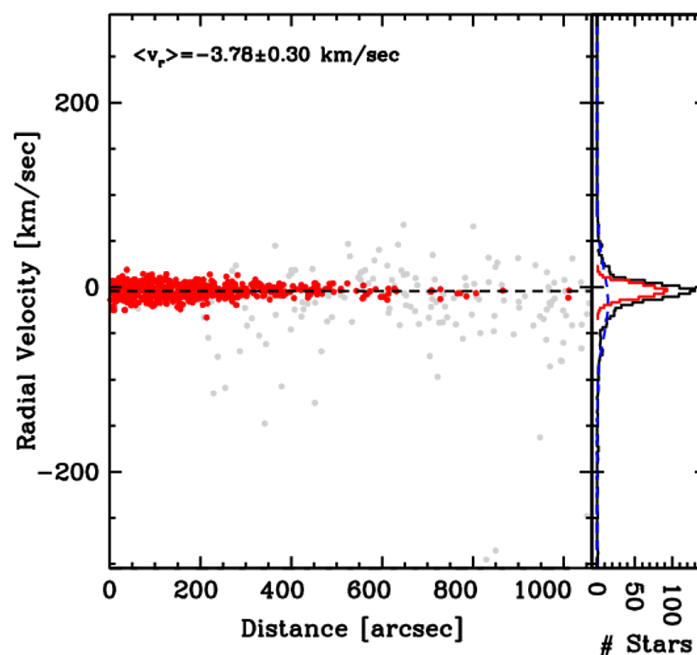


Figura 20 – Velocidade radial das estrelas de NGC 7089. Créditos: Baumgardt e Hilker (2018)

Em seguida, obtivemos o espectro final de cada estrela. Para isso, somamos os espectros

obtidos nas duas observações de cada estrela. Na figura 21, mostramos o resultado da calibração para todas as estrelas observadas.

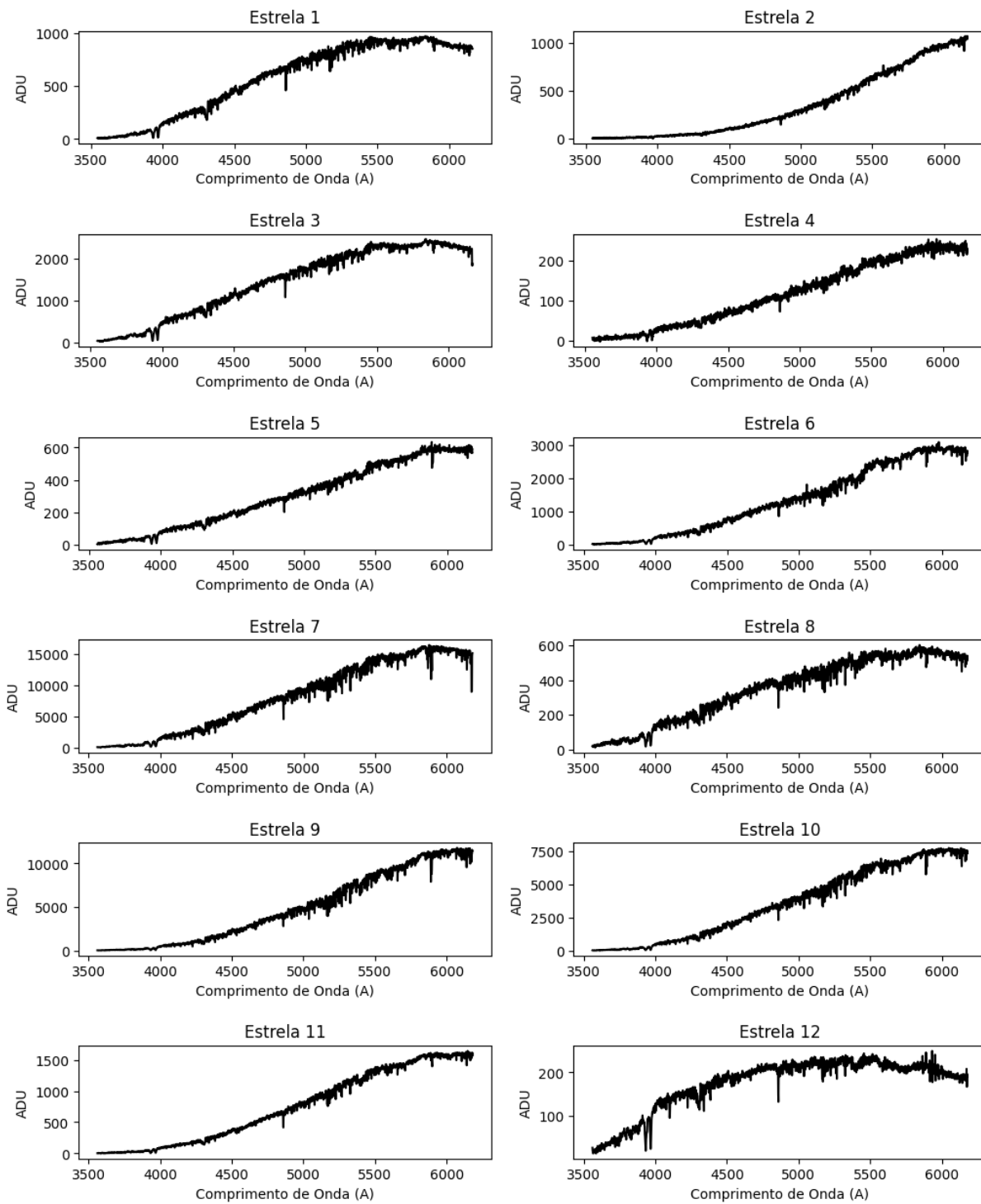


Figura 21 – Espectro final de todas as estrelas observadas.

3.2 Determinação dos Índices Espectrais

Com a calibração concluída, iniciamos a determinação dos índices espectrais. Para isso, desenvolvi um código em Python que realiza o cálculo das equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. Em resumo, o código extrai a região do espectro relevante para o cálculo dos índices e executa o somatório das contagens por meio do método de integração por trapézios.

O método de integração numérica por trapézios aproxima a área de uma curva como somatórios sucessivos de áreas de trapézios de base de tamanho h . Matematicamente, o funcionamento do método pode ser escrito de acordo com a equação 3.5. No caso dos índices de Bertone et al. (2020), o código realiza primeiro a interpolação linear dos pontos médios das bandas adjacentes para a definição da linha do contínuo.

$$\int_a^b f(x)dx \sim \frac{h}{2} \left[f(x_a) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} f(x_k) + f(x_b) \right] \quad (3.5)$$

Em seguida, calculamos as incertezas dos resultados obtidos para os índices espectrais. Visto que os índices foram estimados com dois métodos diferentes, utilizamos abordagens diferentes para a obtenção das incertezas:

Para os três índices espectrais utilizados por Salinas e Strader (2015), calculamos as incertezas utilizando o método de propagação de erros por meio de derivadas parciais: seja $u = u(x, y)$ uma função de x e y em que σ_x e σ_y são as incertezas atreladas a x e y , respectivamente, podemos calcular a incerteza de u , dada por σ_u , através da equação 3.6. Os valores finais calculados para os índices de Salinas e Strader (2015) estão registrados na tabela 3.

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cdot \sigma_x \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \cdot \sigma_y \right)^2 \quad (3.6)$$

Percebemos que a maior fonte de erro do método usado por Bertone et al. (2020) consistia na definição do ponto central das bandas de contínuo adjacentes, visto que o ponto médio depende do número de medições que o telescópio consegue fazer dentro de um intervalo de comprimento de onda. Dessa forma, realizamos ao todo cinco estimativas para cada índice espectral utilizado por Bertone et al. (2020), deslocando o ponto central para a direita e para a esquerda em alguns comprimentos de onda. A influência que a escolha do ponto central tem na definição da função do contínuo a ser usada na equação 3.4 pode ser vista na figura 22. É possível ver que a escolha do ponto central afeta diretamente a “altura” da linha do contínuo interpolado. Como os índices espectrais são calculados a partir da comparação da profundidade das linhas das bandas de interesse com o contínuo, essa variação de altura no contínuo precisa ser considerada. O valor final para cada índice de Bertone et al. (2020) (tabela 4) consiste na média das cinco estimativas feitas e a incerteza é dada pelo desvio padrão das cinco medidas.

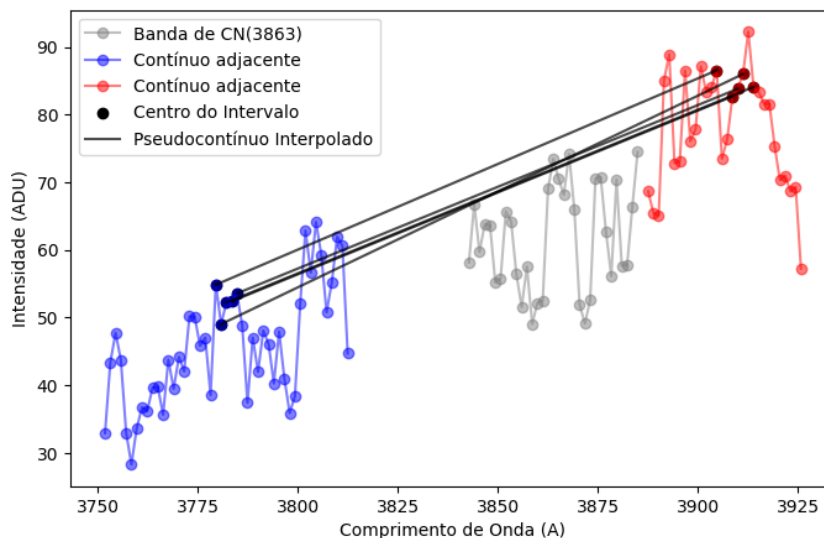


Figura 22 – Demonstração da influência da localização do ponto central das bandas do contínuo no resultado da interpolação linear para o índice CN(3863). A região central da banda de CN está marcada em cinza, enquanto os contínuos adjacentes estão marcados em azul e vermelho. É possível ver que, dependendo do ponto central escolhido no contínuo, o resultado da interpolação varia, influenciando diretamente o valor final do índice espectral.

Estrela	População	S(3839) [mag]	S(4142) [mag]	CH(4300) [mag]
1	2	-0.09±0.04	-1.05±0.01	1.04±0.01
2	2	-0.20±0.10	-1.01±0.03	1.17±0.04
3	1	0.14±0.02	-1.00±0.01	0.90±0.01
4	1	0.18±0.01	-1.02±0.03	0.97±0.04
5	1	0.20±0.05	-1.02±0.02	0.96±0.02
6	-	-0.03±0.03	-0.98±0.01	0.99±0.01
7	-	0.19±0.01	-0.94±0.01	0.97±0.01
8	-	0.05±0.04	-0.97±0.02	0.92±0.01
9	-	0.02±0.02	-0.90±0.01	1.02±0.01
10	-	0.08±0.02	-0.93±0.01	1.00±0.01
11	1	0.14±0.05	-0.98±0.02	1.05±0.02
12	2	-0.14±0.04	-1.08±0.02	0.84±0.02

Tabela 3 – Resultado do cálculo dos três índices espectrais usados por Salinas e Strader (2015) para todas as estrelas observadas.

Estrela	População	CN(3863) [mag]	Ca(3897) [mag]	Fe(4180) [mag]	CH(4281) [mag]	CH(4296) [mag]
1	2	7±1	61±2	2±1	11±1	20±1
2	2	4±2	65±3	5±1	14±1	27±1
3	1	12±1	59±2	5±1	5±1	7±1
4	1	9±1	52±3	4±1	5±1	13±1
5	1	14±1	50±1	3±1	7±1	12±1
6	-	8±1	70±1	5±1	11±1	13±1
7	-	14±1	79±2	10±1	6±1	10±1
8	-	12±1	67±3	8±1	3±1	10±1
9	-	11±1	75±2	11±1	9±1	11±2
10	-	12±1	80±2	7±1	8±1	13±2
11	1	14±1	70±2	4±1	9±1	14±2
12	2	5±1	45±1	3±1	5±1	10±2

Tabela 4 – Resultado do cálculos dos índices espectrais utilizados por Bertone et al. (2020) para todas as estrelas observadas.

3.3 Razão entre os Espectros

A razão entre os fluxos consiste em simplesmente dividir o sinal dos espectros das estrelas. Idealmente, esses espectros deveriam estar calibrados em fluxo para termos a razão entre os fluxos propriamente dita. Entretanto, não tivemos tempo de observar estrelas padrões em fluxo durante a observação. Dessa forma, a razão dos fluxos foi realizada com os espectros em unidades de contagens. É possível ver os resultados da razão entre os espectros nas figuras 23, 24, 25 e 26 em que foi feita a razão do sinal de cada estrela da população 1 contra cada estrela da população 2.

Devido à alta contaminação do espectro da estrela 12 por estrelas vizinhas, não foi possível obter uma razão entre espectros adequada para essa estrela. Isso pode ser visto no terceiro painel das figuras 23, 24, 25 e 26. Por esse motivo, a razão entre espectros da estrela 12 não foi levada em consideração para a nossa análise.

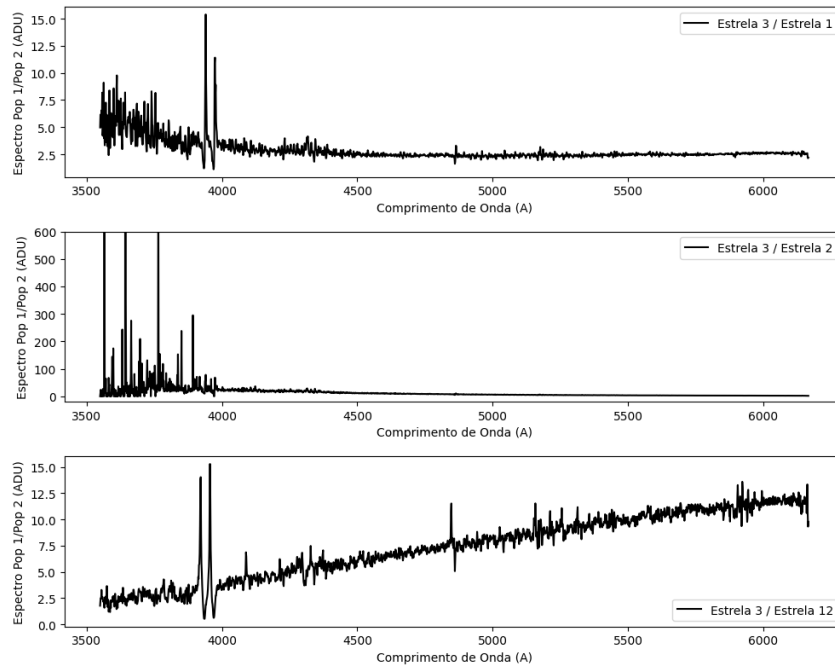


Figura 23 – Razão do sinal da estrela 3 (população 1) contra todas as estrelas classificadas como população 2 (estrelas 1, 2 e 12).

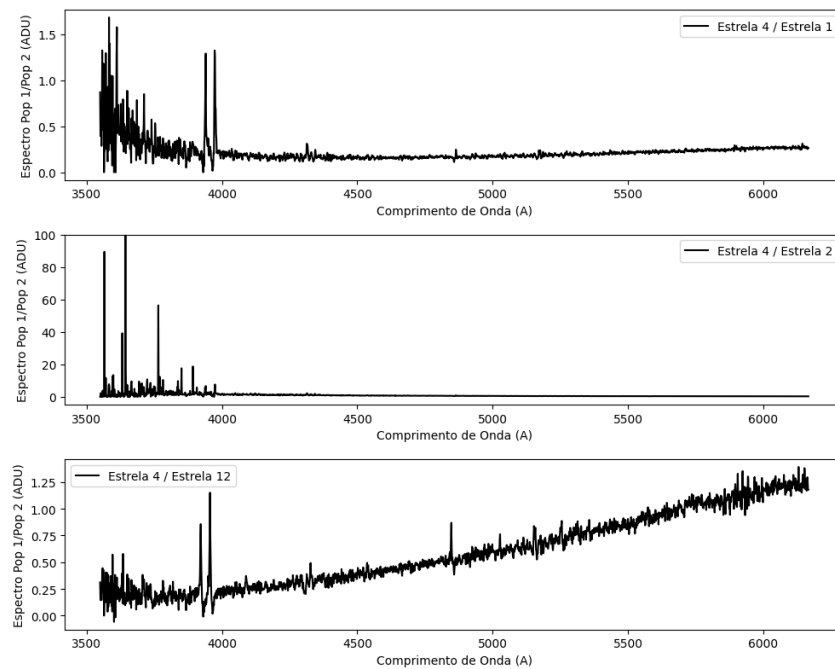


Figura 24 – Razão do sinal da estrela 4 (população 1) contra todas as estrelas classificadas como população 2 (estrelas 1, 2 e 12).

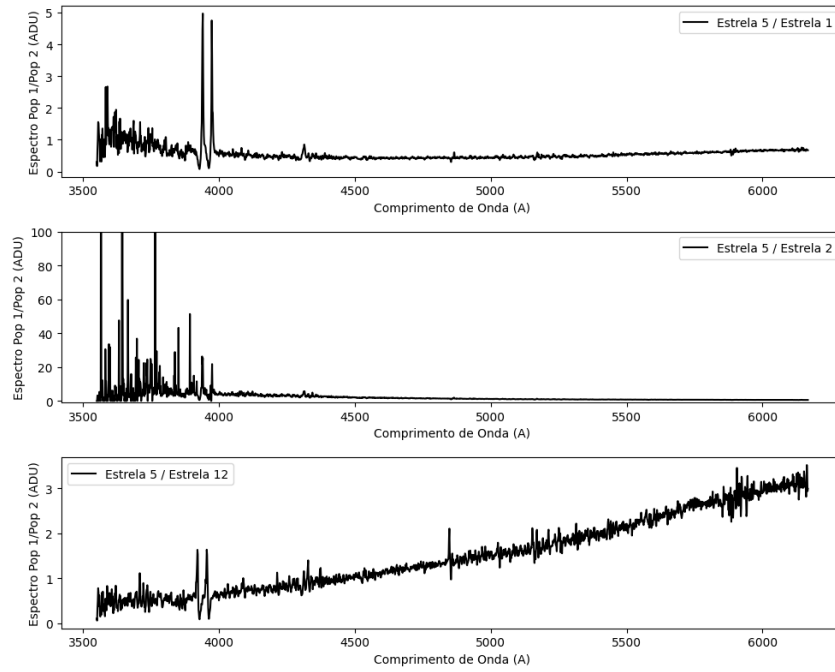


Figura 25 – Razão do sinal da estrela 5 (população 1) contra todas as estrelas classificadas como população 2 (estrelas 1, 2 e 12).

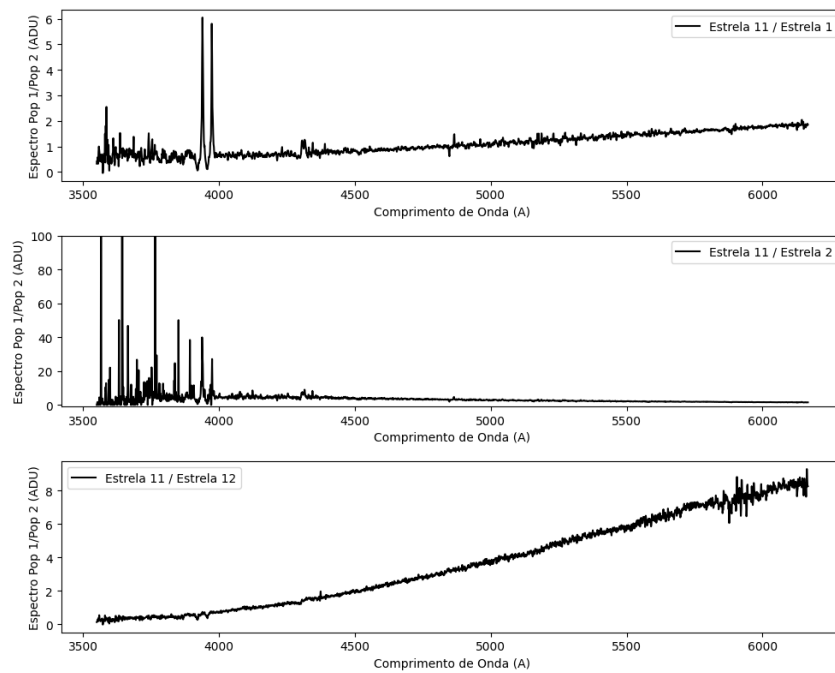


Figura 26 – Razão do sinal da estrela 11 (população 1) contra todas as estrelas classificadas como população 2 (estrelas 1, 2 e 12).

4 Resultados e Discussão

O aglomerado NGC 7089 apresenta uma divergência na literatura acerca da distribuição radial de suas múltiplas populações. No capítulo 1, descrevemos alguns estudos fotométricos utilizando dados do SDSS e S-PLUS que buscavam separar as MPs através da diferença entre filtros. Buscando avaliar a eficiência dos filtros do S-PLUS utilizados por Hartmann et al. (2022), realizamos um *follow-up* espectroscópico de 12 estrelas de sua amostra. Para isso, determinamos os índices espectrais e a razão entre os espectros das estrelas.

Espectros sintéticos possuem alta resolução, de forma que é possível identificar com precisão as linhas de diversos elementos químicos, inclusive no caso de linhas fracas, que não seriam percebidas facilmente em espectros reais, em que é mais difícil diferenciar o contínuo das linhas de absorção. Um exemplo disso pode ser visto na figura 15, na região do índice S(4142). Enquanto a razão entre espectros sintéticos indica a presença de variações na abundância de elementos químicos em torno da região de $\sim 4120 \text{ \AA}$, a razão entre espectros de estrelas reais não apresenta tal característica nessa região em nenhum dos casos (figuras 23, 24, 25 e 26). É importante salientar que isso não significa que essas variações não existem. Possivelmente, em um espectro de maior resolução, o fenômeno seria perceptível.

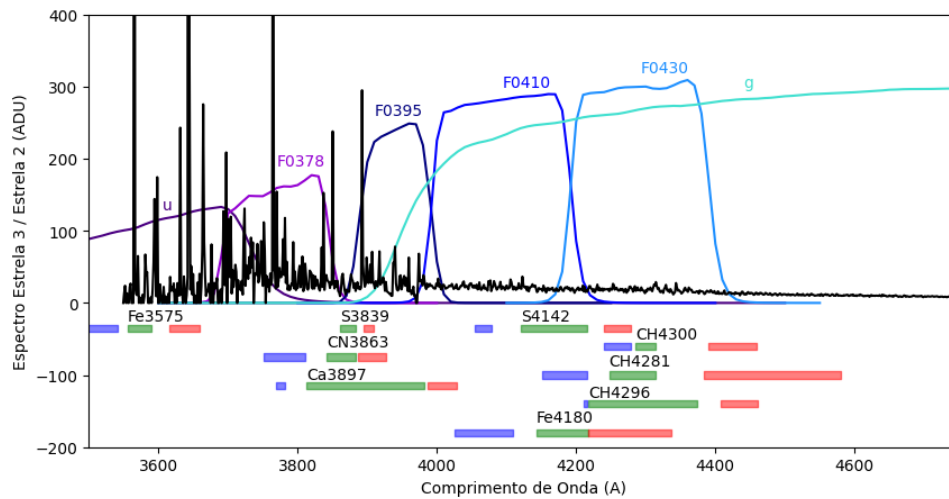


Figura 27 – Gráfico da razão entre os espectros das estrelas 3 (população 1) e 2 (população 2). No fundo, estão ilustrados os filtros do S-PLUS (fora de escala) e abaixo estão representadas as regiões espectrais relevantes para cada índice usado por Salinas e Strader (2015) e Bertone et al. (2020).

Entretanto, a dificuldade de detectar bandas mais fracas tem consequência direta nos valores dos índices espectrais calculados para cada uma das populações estelares. Afinal, os índices são calculados através de uma comparação entre a banda espectral e a contribuição do contínuo. Na figura 27, é apresentado um gráfico nos mesmos padrões da figura 15

usando como exemplo a razão das estrelas 3 e 2. Considerando novamente a região do índice $S(4142)$, vemos que a variação entre essas estrelas de diferentes populações é pouco detectável, refletindo nos valores similares calculados: (-1.01 ± 0.03) mag para a estrela 2 e (-1.00 ± 0.01) mag para a estrela 3 (tabela 3).

Isso está em concordância com Hartmann et al. (2022), que analisou as seguintes diferenças entre filtros do S-PLUS: u-F0378, u-F0395, F0378-F0395, F0378-F0430, F0378-F0515 e F0410-F0430. Observando a figura 27, vemos que os filtros F0410, F0430 e F0515 (não aparece na figura por ser um filtro mais “vermelho” que os anteriores, mas sua localização pode ser vista na figura 15) não parecem promissores na separação das estrelas, o que pode ser percebido também pela baixa diferença nos valores dos índices espectrais localizados nessa região de comprimento de onda. Dessa forma, a baixa capacidade de separação desses filtros é corroborada pela espectroscopia que realizamos.

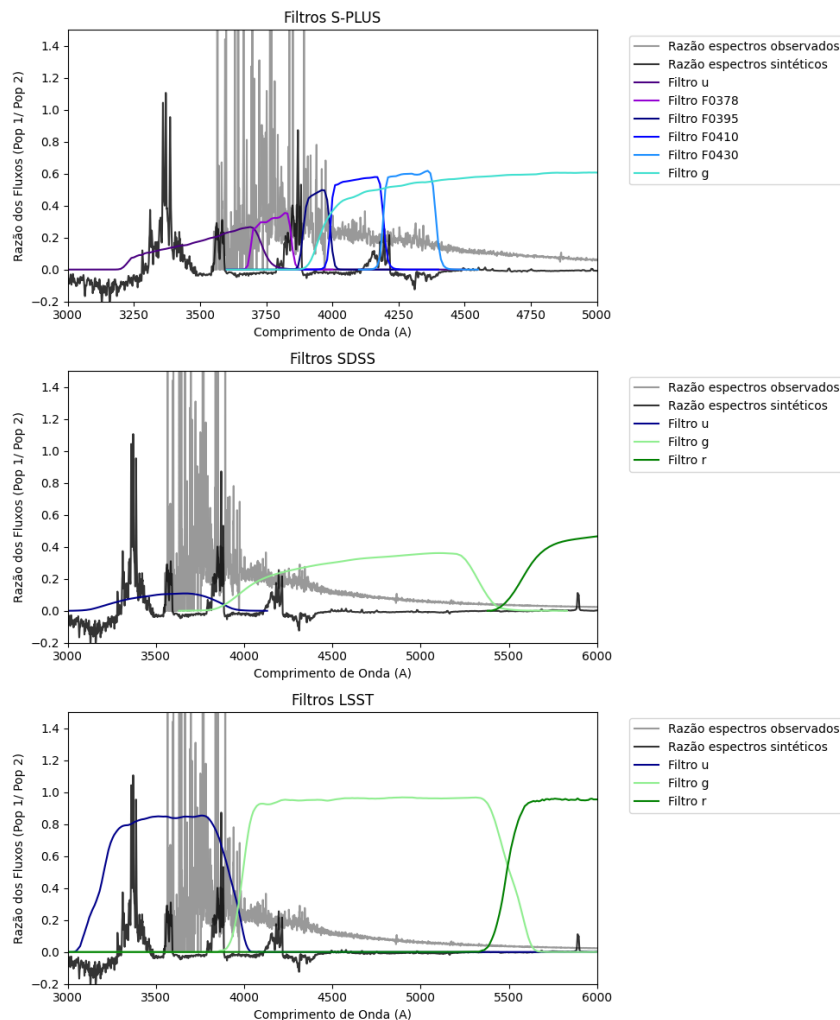


Figura 28 – Comparação entre os filtros fotométricos das colaborações S-PLUS, SDSS e LSST. Em preto, vemos a razão entre espectros sintéticos de estrelas de diferentes populações (Branco et al., 2024) e em cinza, vemos a razão entre espectros das estrelas observadas 3 e 2.

Analogamente, os filtros que melhor separaram as populações no trabalho de Hartmann

et al. (2022) (F0378-F0395 e u-F0378) também são validados pela espectroscopia, pois vemos que a razão entre os espectros é maior nas regiões dessas bandas (figura 27). Em contrapartida, os filtros u-g do SDSS utilizados por Lardo et al. (2011), Vanderbeke et al. (2015) e Hoogendam e Smolinski (2021) também possuem potencial de separar as populações, o que pode ser visto no segundo painel da figura 28. Todavia, por serem bandas largas, não há tantas possibilidades de combinações de filtros como no caso dos filtros do S-PLUS. Além disso, o filtro g do SDSS abrange apenas a região do último (e mais fraco) pico de diferença entre os espectros, o que pode prejudicar a separação das populações, pois vemos que em espectros reais (curva cinza na figura 28) a diferença nessa região é menor do que o previsto pelo modelo.

Abordando possibilidades futuras, as observações da colaboração *Vera C. Rubin Observatory's Legacy Survey of Space and Time* (LSST) são aguardadas com expectativa pela comunidade astronômica. O telescópio a ser utilizado está sendo construído em Cerro Pachón, Chile, e utilizará 6 filtros de banda larga: u, g, r, i, z e y, proporcionando imagens profundas e de alta qualidade em uma larga região do céu (Usher et al., 2023). Estudos posteriores comparando a eficiência na separação de MPs da combinação u-g do LSST e SDSS podem trazer esclarecimentos sobre a distribuição radial das populações estelares de NGC 7089. Paralelamente, do ponto de vista teórico, seria interessante analisar a razão entre espectros teóricos e reais de estrelas do ramo horizontal, utilizadas por Vanderbeke et al. (2015). Isso poderia revelar algumas causas de seu estudo ter mostrado resultados opostos aos que utilizaram estrelas RGB.

Ainda sobre a divergência identificada na distribuição radial das populações estelares, é relevante explorar se o valor dos índices espectroscópicos calculados têm alguma dependência com a distância ao centro do aglomerado. Na figura 29 mostramos os valores resultantes para cada índice em relação ao raio até o centro do aglomerado. Como temos uma amostra de estrelas baixa, não é possível estimar uma correlação entre o valor dos índices e o raio de forma estatisticamente significativa. Todavia, é possível obter alguns resultados preliminares.

Analisando a distribuição de pontos na figura 29, os índices que melhor separaram as estrelas de população 1 e 2 foram o S(3839) e CN(3863), o que era esperado, dado que ambos estão localizados em uma região de maior diferença entre os espectros (tanto no caso dos espectros sintéticos quanto dos espectros observados). Além disso, vemos que nenhum dos índices pareceu conseguir separar totalmente as estrelas da população indefinida das outras duas populações. Inclusive, a distribuição das estrelas indefinidas nos gráficos tende a acompanhar a das estrelas da primeira população. Em seu estudo, Hartmann et al. (2022) constatou que NGC 7089 se destacava dos outros GCs estudados por apresentar 73% de suas estrelas como membros da primeira população, o que pode indicar que as estrelas indefinidas são membros da 1P. Entretanto, para confirmar isso de forma mais robusta, seria necessário um número maior de estrelas na nossa amostra.

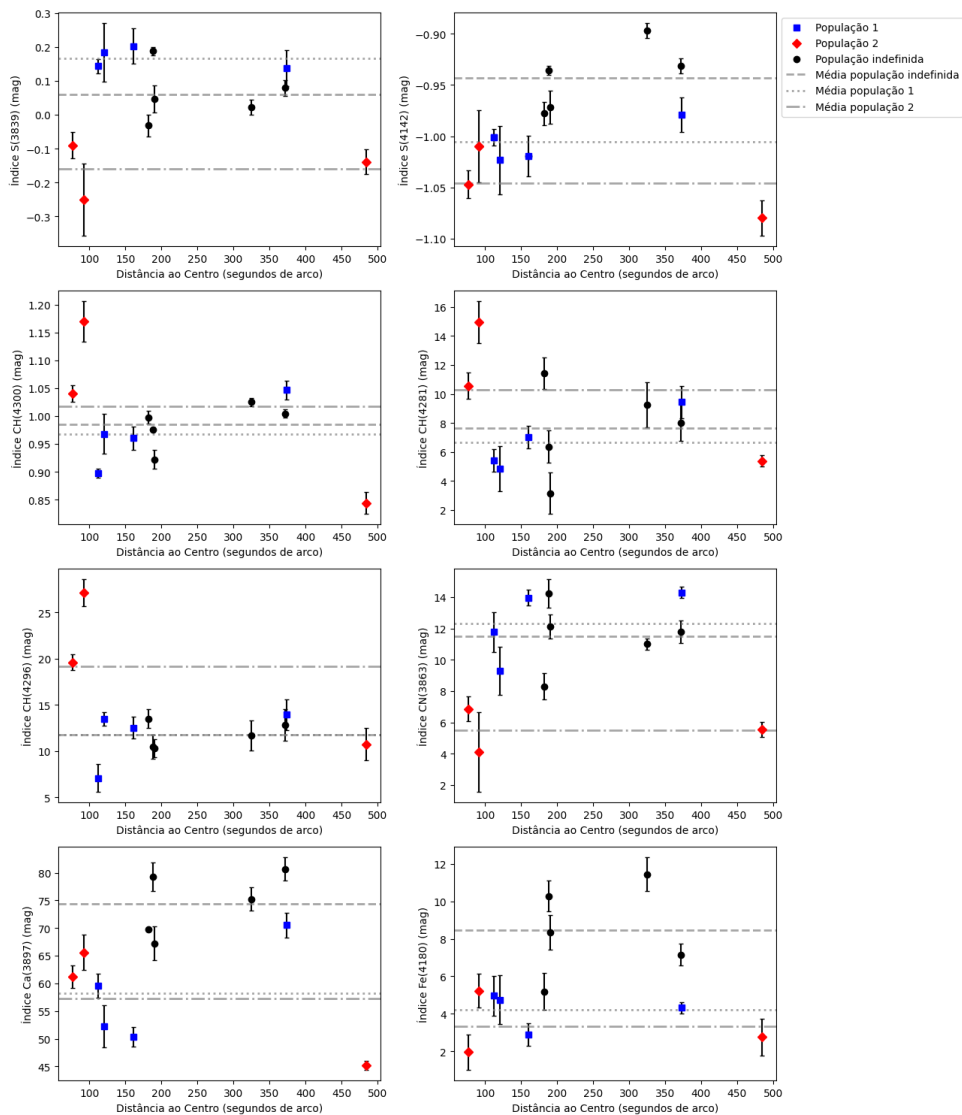


Figura 29 – Índices calculados para todas as estrelas da amostra em relação à distância ao centro do aglomerado. As estrelas da população 1, 2 e indefinida são representadas por quadrados azuis, losangos vermelhos e círculos pretos, respectivamente. Além disso, as médias dos valores dos índices de cada população estão representadas por linhas pontilhadas, traço-ponto e tracejadas para as populações 1, 2 e indefinida, respectivamente.

Comparando os valores calculados para os índices sensíveis a CN (S(3839), S(4142) e CN(3863)) e a CH (CH(4300), CH(4281) e CH(4296)), registrados nas tabelas 3 e 4 vemos que as estrelas classificadas como segunda população por Hartmann et al. (2022) parecem ser levemente abundantes em CN e carentes em CH, quando comparadas as estrelas da população 1. Isso também é visível em todos os gráficos da distribuição dos valores calculados para os índices sensíveis a CN (figura 29), visto que em todos os casos as estrelas da primeira população e população indefinida apresentam valores maiores de magnitude para os índices (ou seja, menos brilhantes), indicando menor abundância.

É possível ver na figura 29 que uma das estrelas da segunda população, localizada em uma raio de quase 500 segundos de arco, apresenta um comportamento diferente das

demais. Essa é a estrela 12, mencionada no fim do capítulo 3. Ela deve ser analisada com cuidado, pois seu espectro apresentava forte contaminação de estrelas vizinhas. Os efeitos dessa contaminação podem ser vistos na figura 21, em que o espectro da estrela 12 apresenta linhas de emissão a partir de $\sim 5600\text{\AA}$, que não conseguiram ser adequadamente retiradas pela nossa calibração. Além disso, por ser a estrela da amostra localizada mais distante do centro do GC, existe a possibilidade dela não pertencer ao aglomerado, por mais que seu movimento próprio seja correspondente.

Em geral, estrelas pobres em CN são classificadas como primeira população, enquanto estrelas ricas em CN são associadas à segunda população (Lim et al., 2016). O motivo para isso é que o índice S(3839) mapeia principalmente a abundância de nitrogênio [N/Fe] (Marino et al., 2011; Smith et al., 1996). Dessa forma, é esperado que estrelas classificadas como segunda população apresentem a anticorrelação identificada, indicando a eficiência do trabalho de Hartmann et al. (2022) em separar as MPs de NGC 7089.

Entretanto, é importante ressaltar que os índices espectrais que calculamos não são sensíveis apenas à abundância de Nitrogênio e Carbono, mas também mapeiam, de forma menos significativa, a abundância de outros elementos, como Fe, H e Ni (Bertone et al., 2020). Além disso, os índices calculados são influenciados pela gravidade superficial e temperatura da estrela (Salinas e Strader, 2015), visto que a formação de moléculas de CN é mais eficiente em estrelas com menor temperatura e gravidade superficial (Kayser et al., 2008).

Outro fator a ser considerado é que, devido ao nosso baixo número amostral, não temos como definir um valor limite que separe estrelas abundantes ou carentes em CN e CH formalmente. Por isso, nos restringimos a apenas comparar os valores resultantes entre si. Se uma amostra maior de estrelas estivesse disponível, seria possível utilizar um procedimento similar ao de Kayser et al. (2008), que separou as estrelas RGB ricas e carentes em CN dos GCs estudados ao ajustar duas gaussianas ao histograma dos valores dos índices de CN calculados. A partir disso, os autores utilizaram o ponto mínimo entre as gaussianas, como pode ser visto na figura 30, para separar as múltiplas populações, de forma que estrelas com $\delta CN > 0.46$ foram consideradas abundantes em CN e estrelas com $\delta CN < 0.46$ foram consideradas carentes em CN.

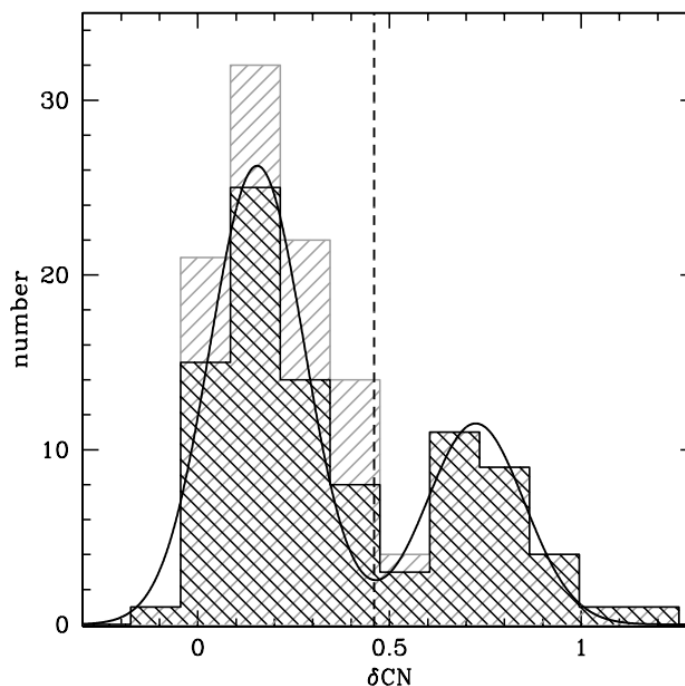


Figura 30 – Histograma do índice de CN corrigido para temperatura e gravidade superficial retirado do trabalho de Kayser et al. (2008). Os autores identificaram uma distribuição bimodal de CN e o ajuste de duas gaussianas permitiu estabelecer um valor limite, de forma que estrelas com $\delta CN > 0.46$ foram consideradas ricas em CN e estrelas com $\delta CN < 0.46$ foram consideradas pobres em CN.

Observamos que análises espectroscópicas são essenciais para fortalecer (ou questionar) resultados fotométricos. Devido às limitações do método, nem sempre é possível adquirir uma amostra grande de estrelas por espectroscopia, por mais que isso seja essencial no estudo de objetos como aglomerados globulares. Além disso, vê-se a importância de modelos teóricos (figura 12) para guiar a análise de estrelas reais.

Paralelamente, nota-se a utilidade dos filtros estreitos do S-PLUS em comparação com outros levantamentos de dados ou *surveys* no estudo de múltiplas populações em aglomerados globulares. Em especial, os filtros F0378 e F0395 se mostraram eficientes na separação de estrelas de diferentes populações, o que é corroborado pela razão dos espectros.

Alguns índices espectrais já foram propostos para o estudo de estrelas RGB (Harbeck et al., 2003; Bertone et al., 2020). Todavia, como as diferenças entre os espectros das estrelas de diferentes populações se dá principalmente na região de 3250Å-4500Å, seria interessante buscar índices definidos em comprimentos de onda mais “azuis”, como Fe(3575) (que não pode ser utilizado neste trabalho pois o sinal dos nossos espectros começava em $\sim 3500\text{Å}$). Portanto, a definição de novos índices, juntamente com espectroscopia de média e alta resolução, se mostram ingredientes favoráveis para compreendermos melhor o fenômenos de múltiplas populações em aglomerados globulares.

5 Conclusão

Realizamos um *follow-up* espectroscópico de 12 estrelas RGB selecionadas da amostra de Hartmann et al. (2022) para avaliar a eficiência dos filtros do S-PLUS na separação das múltiplas populações de NGC 7089. Para isso, fizemos a razão entre os espectros das estrelas da primeira e segunda população e comparamos com os resultados teóricos encontrados por Branco et al. (2024). Além disso, determinamos os índices espectrais das estrelas baseado nos trabalhos de Salinas e Strader (2015) e Bertone et al. (2020).

Observamos que a razão entre os espectros pode ser usada para diferenciar MPs em estrelas reais e explicar por que alguns filtros fotométricos não são tão eficientes na separação das populações. Indicamos que - por cobrirem regiões espectrais correspondentes a linhas de absorção de elementos leves - os filtros estreitos do S-PLUS F0378 e F0395 são eficientes na separação das MPs enquanto os filtros F0410, F0430 e F0515 não apresentam a mesma característica. Os filtros u e g, presentes em diferentes colaborações, também podem ser utilizados no estudo de múltiplas populações, com algumas ressalvas para o filtro g.

Não obtivemos uma amostra grande o suficiente para encontrar uma correlação entre os índices calculados e a distância ao centro do aglomerado. Entretanto, ao analisar individualmente os valores dos índices, as estrelas classificadas como população 2 por Hartmann et al. (2022) apresentaram uma leve anticorrelação entre CN e CH, sendo abundantes em CN e carentes em CH. Dado que estrelas da segunda população comumente apresentam essa característica, podemos avaliar que a separação e catalogação das múltiplas população por Hartmann et al. (2022) utilizando os filtros do S-PLUS se mostrou eficiente.

Lista de Figuras

Figura 1 – Diagrama idade, massa e metalicidade dos aglomerados globulares da Via Láctea.	1
Figura 2 – CMD de NGC 2808	2
Figura 3 – Fração de estrelas enriquecidas por distância galactocêntrica	4
Figura 4 – Resumo comparativo entre teorias de MPs	5
Figura 5 – CMD de NGC 7089	6
Figura 6 – Funcionamento de um espectrógrafo	7
Figura 7 – Transições atômicas do átomo de hidrogênio	8
Figura 8 – Força da linha espectral em função da temperatura	8
Figura 9 – Foto NGC 7089	9
Figura 10 – Diagrama de evolução estelar	10
Figura 11 – Campos da colaboração S-PLUS	11
Figura 12 – Razão entre espectros teóricos de estrelas	11
Figura 13 – Trajetória de NGC 7089 no céu na noite da observação	13
Figura 14 – Estrelas selecionadas para observação	13
Figura 15 – Gráfico da razão entre espectros sintéticos	16
Figura 16 – Espectro da lâmpada de HgAr	17
Figura 17 – Calibração em comprimento de onda das lâmpadas de HgAr	18
Figura 18 – Subtração do céu	19
Figura 19 – Espectro da estrela 8	20
Figura 20 – Velocidade radial das estrelas de NGC 7089	20
Figura 21 – Resultado da calibração para todas as estrelas	22
Figura 22 – Interpolação do contínuo	24
Figura 23 – Razão do espectro da estrela 3 contra o restante da amostra	26
Figura 24 – Razão do espectro da estrela 4 contra o restante da amostra	26
Figura 25 – Razão do espectro da estrela 5 contra o restante da amostra	27
Figura 26 – Razão do espectro da estrela 11 contra o restante da amostra	27
Figura 27 – Gráfico da razão entre espectros reais	28
Figura 28 – Comparação entre filtros do S-PLUS, SDSS e LSST	29
Figura 29 – Relação entre índices calculados e o raio	31
Figura 30 – Histograma de Kayser et al. (2008)	33

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados das estrelas observadas	14
Tabela 2 – Índices espectrais relevantes para o estudo de estrelas do RGB (Bertone et al., 2020).	15
Tabela 3 – Resultado dos índices de Salinas e Strader (2015)	24
Tabela 4 – Resultado dos índices de Bertone et al. (2020)	25

Lista de Abreviações

Abreviação	Descrição
1P	Primeira população
2P	Segunda população
AD	Teste Anderson-Darling
AGB	Ramo assintótico das gigantes, em inglês <i>assintotic giant branch</i>
C	Carbono
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada, em inglês <i>charge-coupled device</i>
CMD	Diagrama cor-magnitude
GCs	Aglomerados Globulares
HB	Ramo horizontal, em inglês <i>horizontal branch</i>
He	Hélio
KS	Teste Kolmogorov-Smirnov
LSST	Large Synoptic Survey Telescope
MPs	Múltiplas Populações
N	Nitrogênio
Na	Sódio
NGC	<i>New General Catalogue</i>
O	Oxigênio
OC	Aglomerado aberto, em inglês <i>open cluster</i>
RGB	Ramo das Gigantes Vermelhas, em inglês <i>red giant branch</i>
S-PLUS	<i>Southern Photometric Local Universe Survey</i>
S/N	Razão sinal-ruído
SDSS	<i>Sloan Digital Sky Survey</i>
SOAR	<i>Southern Astrophysical Research Telescope</i>
SP	Sequência principal
VMS	Estrela muito massiva, em inglês <i>very massive star</i>
YMC	Aglomerado jovem massivo, em inglês <i>young massive cluster</i>

Referências

- Alencastro, A. (2016). Análise de Abundâncias Químicas com Espectroscopia de Alta Resolução do Aglomerado Globular NGC 6366.
- Armandroff, T. E. e Zinn, R. (1988). Integrated-Light Spectroscopy of Globular Clusters at the Infrared CA II Lines. , 96:92.
- Ashman, K. M. e Zepf, S. E. (2008). *Globular Cluster Systems*.
- Baeza, I., Fernández-Trincado, J. G., Villanova, S., Geisler, D., Minniti, D., Garro, E. R., Barbay, B., Beers, T. C., e Lane, R. R. (2022). APOGEE-2S Mg-Al anti-correlation of the metal-poor globular cluster NGC 2298. , 662:A47.
- Bastian, N. (2015). A critical assessment of models for the origin of multiple populations in globular clusters. *arXiv e-prints*, página arXiv:1510.01330.
- Bastian, N., Cabrera-Ziri, I., Davies, B., e Larsen, S. S. (2013). Constraining globular cluster formation through studies of young massive clusters - I. A lack of ongoing star formation within young clusters. , 436(3):2852–2863.
- Bastian, N. e Lardo, C. (2015). Globular cluster mass-loss in the context of multiple populations. , 453(1):357–364.
- Bastian, N. e Lardo, C. (2018). Multiple stellar populations in globular clusters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1):83–136.
- Bastian, N. e Strader, J. (2014). Constraining globular cluster formation through studies of young massive clusters - III. A lack of gas and dust in massive stellar clusters in the LMC and SMC. , 443(4):3594–3600.
- Baumgardt, H. e Hilker, M. (2018). A catalogue of masses, structural parameters, and velocity dispersion profiles of 112 Milky Way globular clusters. , 478(2):1520–1557.
- Bertone, E., Chávez, M., e Mendoza, J. C. (2020). Synthetic spectroscopic indices for identifying multiple stellar populations in globular clusters. , 493(2):2195–2206.
- Branco, V., Coelho, P. R. T., Lançon, A., Martins, L. P., e Prugniel, P. (2024). Synthetic stellar spectra to study multiple populations in globular clusters: an extended grid and the effects on the integrated light. *arXiv e-prints*, página arXiv:2404.15468.
- Carretta, E., Bragaglia, A., Gratton, R. G., Recio-Blanco, A., Lucatello, S., D’Orazi, V., e Cassisi, S. (2010). Properties of stellar generations in globular clusters and relations with global parameters. , 516:A55.

- Carroll, B. W. e Ostlie, D. A. (2017). *An introduction to modern astrophysics, Second Edition*.
- Chies-Santos, A. L., Larsen, S. S., Kuntschner, H., Anders, P., Wehner, E. M., Strader, J., Brodie, J. P., e Santos, J. F. C. (2011). Ages of Globular Cluster Systems and the Relation to Galaxy Morphology. 277:321–324.
- Clemens, J. C., Crain, J. A., e Anderson, R. (2004). The Goodman spectrograph. 5492:331–340.
- Cohen, J. G., Briley, M. M., e Stetson, P. B. (2004). C and N Abundances in Stars At the Base of the Red Giant Branch in M15. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 205 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, página 23.06.
- D’Ercole, A., Vesperini, E., D’Antona, F., McMillan, S. L. W., e Recchi, S. (2008). Formation and dynamical evolution of multiple stellar generations in globular clusters. , 391(2):825–843.
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., Biermann, M., Creevey, O. L., Evans, D. W., Eyer, L., Hutton, A., Jansen, F., Jordi, C., Klioner, S. A., Lammers, U., Lindegren, L., Luri, X., Mignard, F., Panem, C., Pourbaix, D., Randich, S., Sartoretti, P., Soubiran, C., Walton, N. A., Arenou, F., Bailer-Jones, C. A. L., Bastian, U., Cropper, M., Drimmel, R., Katz, D., Lattanzi, M. G., van Leeuwen, F., Bakker, J., Cacciari, C., Castañeda, J., De Angeli, F., Ducourant, C., Fabricius, C., Fouesneau, M., Frémat, Y., Guerra, R., Guerrier, A., Guiraud, J., Jean-Antoine Piccolo, A., Masana, E., Messineo, R., Mowlavi, N., Nicolas, C., Nienartowicz, K., Pailer, F., Panuzzo, P., Riclet, F., Roux, W., Seabroke, G. M., Sordo, R., Tanga, P., Thévenin, F., Gracia-Abril, G., Portell, J., Teyssier, D., Altmann, M., Andrae, R., Bellas-Velidis, I., Benson, K., Berthier, J., Blomme, R., Brugaletta, E., Burgess, P. W., Busso, G., Carry, B., Cellino, A., Cheek, N., Clementini, G., Damerdj, Y., Davidson, M., Delchambre, L., Dell’Oro, A., Fernández-Hernández, J., Galluccio, L., García-Lario, P., Garcia-Reinaldos, M., González-Núñez, J., Gosset, E., Haignon, R., Halbwachs, J. L., Hambly, N. C., Harrison, D. L., Hatzidimitriou, D., Heiter, U., Hernández, J., Hestroffer, D., Hodgkin, S. T., Holl, B., Janßen, K., Jevardat de Fombelle, G., Jordan, S., Krone-Martins, A., Lanzafame, A. C., Löffler, W., Lorca, A., Manteiga, M., Marchal, O., Marrese, P. M., Moitinho, A., Mora, A., Muinonen, K., Osborne, P., Pancino, E., Pauwels, T., Petit, J. M., Recio-Blanco, A., Richards, P. J., Riello, M., Rimoldini, L., Robin, A. C., Roegiers, T., Rybizki, J., Sarro, L. M., Siopis, C., Smith, M., Sozzetti, A., Ulla, A., Utrilla, E., van Leeuwen, M., van Reeven, W., Abbas, U., Abreu Aramburu, A., Accart, S., Aerts, C., Aguado, J. J., Ajaj, M., Altavilla, G., Álvarez, M. A., Álvarez Cid-Fuentes, J., Alves, J., Anderson, R. I., Anglada Varela, E., Antoja,

T., Audard, M., Baines, D., Baker, S. G., Balaguer-Núñez, L., Balbinot, E., Balog, Z., Barache, C., Barbato, D., Barros, M., Barstow, M. A., Bartolomé, S., Bassilana, J. L., Bauchet, N., Baudesson-Stella, A., Becciani, U., Bellazzini, M., Bernet, M., Bertone, S., Bianchi, L., Blanco-Cuaresma, S., Boch, T., Bombrun, A., Bossini, D., Bouquillon, S., Bragaglia, A., Bramante, L., Breedt, E., Bressan, A., Brouillet, N., Bucciarelli, B., Burlacu, A., Busonero, D., Butkevich, A. G., Buzzi, R., Caffau, E., Cancelliere, R., Cánovas, H., Cantat-Gaudin, T., Carballo, R., Carlucci, T., Carnerero, M. I., Carrasco, J. M., Casamiquela, L., Castellani, M., Castro-Ginard, A., Castro Sampol, P., Chaoul, L., Charlot, P., Chemin, L., Chiavassa, A., Cioni, M. R. L., Comoretto, G., Cooper, W. J., Cornez, T., Cowell, S., Crifo, F., Crosta, M., Crowley, C., Dafonte, C., Dapergolas, A., David, M., David, P., de Laverny, P., De Luise, F., De March, R., De Ridder, J., de Souza, R., de Teodoro, P., de Torres, A., del Peloso, E. F., del Pozo, E., Delbo, M., Delgado, A., Delgado, H. E., Delisle, J. B., Di Matteo, P., Diakite, S., Diener, C., Distefano, E., Dolding, C., Eappachen, D., Edvardsson, B., Enke, H., Esquej, P., Fabre, C., Fabrizio, M., Faigler, S., Fedorets, G., Fernique, P., Fienga, A., Figueras, F., Fouron, C., Fragkoudi, F., Fraile, E., Franke, F., Gai, M., Garabato, D., Garcia-Gutierrez, A., García-Torres, M., Garofalo, A., Gavras, P., Gerlach, E., Geyer, R., Giacobbe, P., Gilmore, G., Girona, S., Giuffrida, G., Gomel, R., Gomez, A., Gonzalez-Santamaria, I., González-Vidal, J. J., Granvik, M., Gutiérrez-Sánchez, R., Guy, L. P., Hauser, M., Haywood, M., Helmi, A., Hidalgo, S. L., Hilger, T., Hładczuk, N., Hobbs, D., Holland, G., Huckle, H. E., Jasniewicz, G., Jonker, P. G., Juaristi Campillo, J., Julbe, F., Karbevská, L., Kervella, P., Khanna, S., Kochoska, A., Kontizas, M., Kordopatis, G., Korn, A. J., Kostrzewa-Rutkowska, Z., Kruszyńska, K., Lambert, S., Lanza, A. F., Lasne, Y., Le Campion, J. F., Le Fustec, Y., Lebreton, Y., Lebzelter, T., Leccia, S., Leclerc, N., Lecoœur-Taïbi, I., Liao, S., Licata, E., Lindstrøm, E. P., Lister, T. A., Livanou, E., Lobel, A., Madrero Pardo, P., Managau, S., Mann, R. G., Marchant, J. M., Marconi, M., Marcos Santos, M. M. S., Marinoni, S., Marocco, F., Marshall, D. J., Martin Polo, L., Martín-Fleitas, J. M., Masip, A., Massari, D., Mastrobuono-Battisti, A., Mazeh, T., McMillan, P. J., Messina, S., Michalik, D., Millar, N. R., Mints, A., Molina, D., Molinaro, R., Molnár, L., Montegriffo, P., Mor, R., Morbidelli, R., Morel, T., Morris, D., Mulone, A. F., Munoz, D., Muraveva, T., Murphy, C. P., Musella, I., Noval, L., Ordénovic, C., Orrù, G., Osinde, J., Pagani, C., Pagano, I., Palaversa, L., Palicio, P. A., Panahi, A., Pawlak, M., Peñalosa Esteller, X., Penttilä, A., Piersimoni, A. M., Pineau, F. X., Plachy, E., Plum, G., Poggio, E., Poretti, E., Poujoulet, E., Prša, A., Pulone, L., Racero, E., Ragaini, S., Rainer, M., Raiteri, C. M., Rambaux, N., Ramos, P., Ramos-Lerate, M., Re Fiorentin, P., Regibo, S., Reylé, C., Ripepi, V., Riva, A., Rixon, G., Robichon, N., Robin, C., Roelens, M., Rohrbasser, L., Romero-Gómez, M., Rowell, N., Royer, F., Rybicki, K. A., Sadowski, G., Sagristà Sellés, A., Sahlmann, J., Salgado, J., Salguero, E., Samaras, N., Sanchez Gimenez, V., Sanna, N., Santoveña, R., Sarasso,

- M., Schultheis, M., Sciacca, E., Segol, M., Segovia, J. C., Ségransan, D., Semeux, D., Shahaf, S., Siddiqui, H. I., Siebert, A., Siltala, L., Slezak, E., Smart, R. L., Solano, E., Solitro, F., Souami, D., Souchay, J., Spagna, A., Spoto, F., Steele, I. A., Steidelmüller, H., Stephenson, C. A., Süveges, M., Szabados, L., Szegedi-Elek, E., Taris, F., Tauran, G., Taylor, M. B., Teixeira, R., Thuillot, W., Tonello, N., Torra, F., Torra, J., Turon, C., Unger, N., Vaillant, M., van Dillen, E., Vanel, O., Vecchiato, A., Viala, Y., Vicente, D., Voutsinas, S., Weiler, M., Wevers, T., Wyrzykowski, Ł., Yoldas, A., Yvard, P., Zhao, H., Zorec, J., Zucker, S., Zurbach, C., e Zwitter, T. (2021). Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties. , 649:A1.
- Gratton, R., Bragaglia, A., Carretta, E., D’Orazi, V., Lucatello, S., e Sollima, A. (2019). What is a globular cluster? An observational perspective. , 27(1):8.
- Gray, D. F. (2008). *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*.
- Hao, C. J., Xu, Y., Hou, L. G., Bian, S. B., Lin, Z. H., Li, Y. J., Dong, Y. W., e Liu, D. J. (2024). Probing the Nature of Rotation in the Pleiades, Alpha Persei, and Hyades Clusters. , 963(2):153.
- Harbeck, D., Smith, G. H., e Grebel, E. K. (2003). CN Abundance Variations on the Main Sequence of 47 Tucanae. , 125(1):197–207.
- Hartmann, E., Bonatto, C., Chies-Santos, A., Alonso-García, J., Bastian, N., Overzier, R., Schoenell, W., Coelho, P., Branco, V., Kanaan, A., de Oliveira, C. M., e Ribeiro, T. (2022). S-PLUS: exploring wide field properties of multiple populations in galactic globular clusters at different metallicities. , 515(3):4191–4200.
- Hollyhead, K., Bastian, N., Adamo, A., Silva-Villa, E., Dale, J., Ryon, J. E., e Gazak, Z. (2015). Studying the YMC population of M83: how long clusters remain embedded, their interaction with the ISM and implications for GC formation theories. , 449(1):1106–1117.
- Hoogendam, W. B. e Smolinski, J. P. (2021). A careful reassessment of globular cluster multiple population radial distributions with sloan digital sky survey and johnson–cousins broadband photometry. *The Astronomical Journal*, 161(5):249.
- Karakas, A. I. e Lattanzio, J. C. (2014). The Dawes Review 2: Nucleosynthesis and Stellar Yields of Low- and Intermediate-Mass Single Stars. , 31:e030.
- Kayser, A., Hilker, M., Grebel, E. K., e Willemsen, P. G. (2008). Comparing CN and CH line strengths in a homogeneous spectroscopic sample of 8 Galactic globular clusters. , 486(2):437–452.
- Kruijssen, J. M. D. (2015). Globular clusters as the relics of regular star formation in ‘normal’ high-redshift galaxies. , 454(2):1658–1686.

- Krumholz, M. R., McKee, C. F., e Bland-Hawthorn, J. (2019). Star Clusters Across Cosmic Time. , 57:227–303.
- Lardo, C., Bellazzini, M., Pancino, E., Carretta, E., Bragaglia, A., e Dalessandro, E. (2011). Mining SDSS in search of multiple populations in globular clusters. , 525:A114.
- Lardo, C., Mucciarelli, A., e Bastian, N. (2016). The iron dispersion of the globular cluster M2, revised. , 457(1):51–63.
- Lardo, C., Salaris, M., Cassisi, S., Bastian, N., Mucciarelli, A., Cabrera-Ziri, I., e Dalessandro, E. (2023). High-precision abundances of first-population stars in NGC 2808: confirmation of a metallicity spread. , 669:A19.
- Lim, D., Lee, Y.-W., Pasquato, M., Han, S.-I., e Roh, D.-G. (2016). Reversed Trend of Radial Distribution of Subpopulations in the Globular Clusters NGC 362 and NGC 6723. , 832(2):99.
- Limberg, G., Souza, S. O., Pérez-Villegas, A., Rossi, S., Perottoni, H. D., e Santucci, R. M. (2022). Reconstructing the Disrupted Dwarf Galaxy Gaia-Sausage/Enceladus Using Its Stars and Globular Clusters. , 935(2):109.
- Marino, A. F., Sneden, C., Kraft, R. P., Wallerstein, G., Norris, J. E., Da Costa, G., Milone, A. P., Ivans, I. I., Gonzalez, G., Fulbright, J. P., Hilker, M., Piotto, G., Zoccali, M., e Stetson, P. B. (2011). The two metallicity groups of the globular cluster M 22: a chemical perspective. , 532:A8.
- Massey, P. e Hanson, M. M. (2013). Astronomical Spectroscopy. In Oswalt, T. D. e Bond, H. E., editores, *Planets, Stars and Stellar Systems. Volume 2: Astronomical Techniques, Software and Data*, página 35.
- Mendes de Oliveira, C., Ribeiro, T., e Schoenell, W. et al. (2019). The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): improved SEDs, morphologies, and redshifts with 12 optical filters. , 489(1):241–267.
- Mészáros, S., Masseron, T., Fernández-Trincado, J. G., García-Hernández, D. A., Szigeti, L., Cunha, K., Shetrone, M., Smith, V. V., Beaton, R. L., Beers, T. C., Brownstein, J. R., Geisler, D., Hayes, C. R., Jönsson, H., Lane, R. R., Majewski, S. R., Minniti, D., Munoz, R. R., Nitschelm, C., Roman-Lopes, A., e Zamora, O. (2021). Homogeneous analysis of globular clusters from the APOGEE survey with the BACCHUS code - III. ω Cen. , 505(2):1645–1660.
- Meynet, G. e Maeder, A. (2006). Single Massive Stars at the Critical Rotational Velocity: Possible Links with Be and B[e] Stars. In Kraus, M. e Miroschnichenko, A. S., editores, *Stars with the B[e] Phenomenon*, volume 355 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, página 27.

- Milone, A. P., Marino, A. F., Dotter, A., Ziliotto, T., Dondoglio, E., Cordoni, G., Jang, S., Lagioia, E. P., Legnardi, M. V., Mohandas, A., Tailo, M., Yong, D., Baimukhametova, S., e Carlos, M. (2023). Multiple stellar populations in globular clusters with JWST: an NIRCам view of 47 Tucanae. , 522(2):2429–2447.
- Milone, A. P., Marino, A. F., Piotto, G., Bedin, L. R., Anderson, J., Renzini, A., King, I. R., Bellini, A., Brown, T. M., Cassisi, S., D’Antona, F., Jerjen, H., Nardiello, D., Salaris, M., Marel, R. P. v. d., Vesperini, E., Yong, D., Aparicio, A., Sarajedini, A., e Zoccali, M. (2015a). The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of galactic globular clusters - II. The seven stellar populations of NGC 7089 (M2)*. , 447(1):927–938.
- Milone, A. P., Marino, A. F., Piotto, G., Renzini, A., Bedin, L. R., Anderson, J., Cassisi, S., D’Antona, F., Bellini, A., Jerjen, H., Pietrinferni, A., e Ventura, P. (2015b). The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters. III. A Quintuple Stellar Population in NGC 2808. , 808(1):51.
- Montecinos, C., Villanova, S., Muñoz, C., e Cortés, C. C. (2021). Chemical analysis of the bulge globular cluster NGC 6553. , 503(3):4336–4348.
- Monty, S., Yong, D., Marino, A. F., Karakas, A. I., McKenzie, M., Grundahl, F., e Mura-Guzmán, A. (2023). Peeking beneath the precision floor - I. Metallicity spreads and multiple elemental dispersions in the globular clusters NGC 288 and NGC 362. , 518(1):965–986.
- NOIRLab (2023). Goodman high throughput spectrograph. <https://noirlab.edu/science/programs/ctio/instruments/goodman-high-throughput-spectrograph>.
- Oliveira, K. e Saraiva, M. (2014). *Astronomia e Astrofísica*.
- Oliveira, R. A. P., Souza, S. O., Kerber, L. O., Barbuy, B., Ortolani, S., Piotto, G., Nardiello, D., Pérez-Villegas, A., Maia, F. F. S., Bica, E., Cassisi, S., D’Antona, F., Lagioia, E. P., Libralato, M., Milone, A. P., Anderson, J., Aparicio, A., Bedin, L. R., Brown, T. M., King, I. R., Marino, A. F., Pietrinferni, A., Renzini, A., Sarajedini, A., van der Marel, R., e Vesperini, E. (2020). The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters. XX. Ages of Single and Multiple Stellar Populations in Seven Bulge Globular Clusters. , 891(1):37.
- Pancino, E., Rejkuba, M., Zoccali, M., e Carrera, R. (2010). Low-resolution spectroscopy of main sequence stars belonging to 12 Galactic globular clusters. I. CH and CN band strength variations. , 524:A44.
- Piatti, A. E. (2022). On the physical size of the Milky Way globular cluster NGC 7089 (M2). , 514(4):4982–4988.

- Piotto, G., Bedin, L. R., Anderson, J., King, I. R., Cassisi, S., Milone, A. P., Villanova, S., Pietrinferni, A., e Renzini, A. (2007). A Triple Main Sequence in the Globular Cluster NGC 2808. , 661(1):L53–L56.
- Renzini, A. (2017). Finding forming globular clusters at high redshifts. , 469(1):L63–L67.
- Salinas, R. e Strader, J. (2015). No Evidence for Multiple Stellar Populations in the Low-mass Galactic Globular Cluster E 3. , 809(2):169.
- Schwarzschild, M. (2015). *Structure and Evolution of Stars*.
- Simioni, M., Milone, A. P., Bedin, L. R., Aparicio, A., Piotto, G., Vesperini, E., e Hong, J. (2016). The Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic globular clusters - X. The radial distribution of stellar populations in NGC 2808. , 463(1):449–458.
- Smith, G. H. e Mateo, M. (1990). CN and CH Variations among Giants in the Globular Cluster M2. , 353:533.
- Smith, G. H., Shetrone, M. D., Bell, R. A., Churchill, C. W., e Briley, M. M. (1996). CNO Abundances of Bright Giants in the Globular Clusters M3 and M13. , 112:1511.
- Smolinski, J. P., Hoogendam, W. B., Van Kooten, A. J., Benac, P., e Bruce, Z. J. (2020). Re-examining the Radial Distributions of M13 Multiple Populations. , 160(5):208.
- Stetson, P. B., Pancino, E., Zocchi, A., Sanna, N., e Monelli, M. (2019). Homogeneous photometry - VII. Globular clusters in the Gaia era. , 485(3):3042–3063.
- Trager, S. C., Worthey, G., Faber, S. M., Burstein, D., e González, J. J. (1998). Old Stellar Populations. VI. Absorption-Line Spectra of Galaxy Nuclei and Globular Clusters. , 116(1):1–28.
- Usher, C., Dage, K. C., Girardi, L., Barmby, P., Bonatto, C. J., Chies-Santos, A. L., Clarkson, W. I., Gómez Camus, M., Hartmann, E. A., Ferguson, A. M. N., Pieres, A., Prisinzano, L., Rhode, K. L., Rich, R. M., Ripepi, V., Santiago, B., Stassun, K. G., Street, R. A., Szabó, R., Venuti, L., Zaggia, S., Canossa, M., Floriano, P., Lopes, P., Miranda, N. L., Oliveira, R. A. P., Reina-Campos, M., Roman-Lopes, A., e Sobeck, J. (2023). Rubin Observatory LSST Stars Milky Way and Local Volume Star Clusters Roadmap. , 135(1049):074201.
- Vanderbeke, J., De Propris, R., De Rijcke, S., Baes, M., West, M., Alonso-García, J., e Kunder, A. (2015). G2C2 - IV. A novel approach to study the radial distributions of multiple populations in Galactic globular clusters. , 451(1):275–281.

A Apêndice - Proposta de Observação

Previous missions of this proposal with the SOAR Telescope:

Previous missions of other proposals with the SOAR Telescope:

Ana L. Chies-Santos is co-I of the TSPEC4 proposal for integrated spectra of globular clusters of the CenA galaxy, SO2021A-016. Data reduced and analysis underway.

Ana L. Chies-Santos and Charles Bonatto are co-Is of the open cluster survey SO2016B-104, which has been completely reduced – analysis on the way.

2020B - (SO2020B-008) - 2 nights - Limberg et al. 2021 and Shank et al. 2021 (submitted)

2019B - (SO2019B-010) - 5 nights - Limberg et al. 2021 and Shank et al. 2021 (submitted)

2018B - (SO2018B-010) - 4 nights - Limberg et al. 2021 and Shank et al. 2021 (submitted)

2018A - (SO2018A-021) - 4 nights - Placco et al. 2019

2017A - (SO2017A-016) - 4 nights - Placco et al. 2018

2016A - (SO2016A-019) - 5 nights - Placco et al. 2016

2015B - (SO2015B-020) - 5 nights - Placco et al. 2014c

2013B - (SO2013B-001) - 4 nights - Placco et al. 2014a

2013A - (SO2013A-018) - 5 nights - Placco et al. 2014a

2012B - (SO2012B-001) - 3 nights - Placco et al. 2015

2012A - (SO2012A-003) - 3 nights - Placco et al. 2015

2011B - (SO2011B-002) - 3 nights - Placco et al. 2014a

2011A - (SO2011A-010) - 2 nights - Placco et al. 2011

Previous results in the field by the Principal Investigator:

Publications:

Globular cluster systems of relic galaxies, 2021, MNRAS, 503, 2406, Alamo-Martínez, K. A.; Chies-Santos, A. L.; Beasley, M. A.; Flores-Freitas, R.; Furlanetto, C.; Trevisan, M.; Schnorr-Müller, A.; Leaman, R.; Bonatto, C. J.

SPLUS J210428.01-004934.2: An Ultra Metal-poor Star Identified from Narrowband Photometry 2021 ApJ, 912L, 32 Placco, Vinicius M. ; Roederer, Ian U. ; Lee, Young Sun ; Almeida-Fernandes, Felipe ; Herpich, Fábio R. ; Perottoni, Hélio D. ; Schoenell, William ; Ribeiro, Tiago ; Kanaan, Antonio

Variable stars in the VVV globular clusters. II. NGC 6441, NGC 6569, NGC 6626 (M 28), NGC 6656 (M 22), 2MASS-GC 02, and Terzan 10 2021, A&A, 651, 47 Alonso-García, Javier search by orcid ; Smith, Leigh C. ; Catelan, Márcio ; Minniti, Dante ; Navarrete, Camila ; Borissova, Jura et al.;

J-PLUS: A wide-field multi-band study of the M 15 globular cluster. Evidence of multiple stellar populations in the RGB, 2019. A&A, 622, 179, Bonatto, Charles ; Chies-Santos, Ana L.; Coelho, Paula R. T. et al.

Optical/NIR stellar absorption and emission-line indices from luminous infrared galaxies, 2019, MNRAS, 486, 3228, Riffel, R.; Rodríguez-Ardila, A.; Brotherton, M. S.; Peletier, R.; Vazdekis, A.; Riffel, R. A.; Martins, L. P.; Bonatto, C.; Zanon Dametto, N.; Dahmer-Hahn, L. G.; Runnoe, J.; Pastoriza, M. G.; Chies-Santos, A. L.; Trevisan, M.

Lifting the dust veil from the globular cluster Palomar 2, 2020, MNRAS, 493, 2688, Bonatto, Charles & Chies-Santos, Ana L.

Targeting Bright Metal-poor Stars in the Disk and Halo Systems of the Galaxy, 2021, ApJ, 913, 11, Limberg, Guilherme; Santucci, Rafael M.; Rossi, Silvia; Shank, Derek; Placco, Vinicius M.; Beers, Timothy C.; Schlaufman, Kevin C.; Casey, Andrew R.; Perottoni, Hélio D.; Lee, Young Sun.

Dynamically Tagged Groups of Very Metal-poor Halo Stars from the HK and Hamburg/ESO Surveys, 2021, ApJ, 907, 10, Limberg, Guilherme; Rossi, Silvia; Beers, Timothy C.; Perottoni, Hélio. D.; Pérez-Villegas, Angeles; Santucci, Rafael. M.; Abuchaim, Yuri; Placco, Vinicius M.; Lee, Young Sun; Christlieb, Norbert; Norris, John E.; Bessell, Michael S.; Ryan, Sean G.; Wilhelm, Ronald; Rhee, Jaehyon; Frebel, Anna.

How well can we determine ages and chemical abundances from spectral fitting of integrated light spectra? 2020, MNRAS, 499, 2327, Gonçalves, Geraldo ; Coelho, Paula ; Schiavon, Ricardo ; Usher, Christopher

Scientific Case

Globular cluster (GC) formation is a long standing issue of Astrophysics. Several models have been proposed to explain the characteristics and formation of GCs, but since they are complex systems whose characteristics differ from cluster to cluster, it has become clear that this is not a trivial matter. One of the most surprising features of these systems is the presence of multiple stellar populations (MPs). Generally, the MPs show variations in the abundance of light elements such as Li, C, N, O, Na, F, Mg, and Al (Krumholz et al. 2019) - the surprising fact is that these abundances are not completely explained by their natural chemical evolution (Bastian and Lardo, 2018). With that in mind, current models attempt to explain the abnormal abundances with different types of polluter stars. The most noteworthy idea is the “AGB”, in which Asymptotic Giant Branch stars start to pollute the cluster after ≈ 30 Myrs (Bastian and Lardo, 2018). Since the gas ejected has low velocity (Loup et al. 1993), it eventually sinks to the center and forms a new population of stars chemically altered. If the cluster has a long relaxation time, the radial distribution of the MPs can still be detectable (Hoogendam and Smolinsky, 2021). Two other interesting ideas are the “VMS” and the “FRMS”. The first claims that Very Massive Stars would be the ones responsible for the chemical variety. These stars would be formed after a contraction of the GC due to gas accretion, which would cause several stars to collide (Bastian and Lardo, 2018). The “FRMS” scenario consists of Fast Rotating Massive Stars as the creator of the ejected gas. A good feature of both models is that this type of star begins to pollute the cluster earlier (around 10-20 Myr), which allows its ejected gas to mix with the remaining formation gas (Bastian and Lardo, 2018). In both cases, these massive stars would be mostly concentrated in the central region, and so would be their ejected gas (Carretta et al. 2010). This would imprint a radial variance in the chemical components of the GC members. **There are several more scenarios, but it is important to emphasize that none of them reproduces all the observed features in GCs. Nevertheless, a repeating possible consequence of some of them is a radial distribution of the MPs (Bastian and Lardo, 2018). With that in mind, radial variation studies are needed to contribute to the refining of the existing models.** Hartmann, Bonatto, Chies-Santos et al. 2021 *in prep* study several galactic GCs with S-PLUS photometry and find at least 2 populations of stars in the red giant branch (RGB) (see Fig. 1). One of the studied clusters is NGC 7089, a metal-poor cluster ($[Fe/H] = -1.65$), located 11.5 Kpc away, in the Galactic halo. There is a lot of controversy in studies related to the radial distribution of the different populations in this cluster. For instance, while Lardo et al. (2011) (hereafter L11) find the 2nd population (2P) to be more centrally concentrated, Vanderbeke et al. (2015) (hereafter V15) did not observe significant radial segregation. Hoogendam and Smolinski (2021) re-analyzed their data after indicating that the methodology of L11 could have introduced a bias. Surprisingly, the new analysis of L11 data continued to indicate a radial variance in the populations, while V15 data did not. In the photometric work of Hartmann et al. 2021 we also find variations in the radial distribution of the 2 subpopulations (see Fig. 1). Hence new spectroscopic studies of statistically-significant samples of stars are of utmost importance to shed light on the issue of MPs, especially with respect to radial variations.

Scientific Impact

To shed light on the issue of MPs in galactic GCs and confirm the findings of MPs in the RGB with the novel narrow-band filters of S-PLUS, we request 2 nights of SOAR to observe 20 stars showing evidence of belonging to 1P and 2P in the GC NGC 7089. These proof of concept observations may confirm the findings in Hartmann et al. (2021) and be used in the future to select additional targets from S-PLUS. While the S-PLUS filter system is appropriate to separate stars from the 2 different populations, the main spectral differences between the two different populations of stars is expected to be enhanced in the blue (see Fig. 2 left panel, Branco, Coelho et al. *in prep* 2021). Several of the stars selected in Hartmann et al. 2021 with S-PLUS also have near-infrared APOGEE spectra. However, the key spectral features that differentiate the 1P to the 2P are towards the blue. Therefore, further optical spectra, towards bluer wavelengths are necessary. This proposal aims to use SOAR/GOODMAN spectra of a sample of 1P and 2P stars in the RGB of the GC NGC 7089 to refine the study of the chemical differences between both stellar populations.

References

- Bastian, N.; Lardo, C. (2018). Multiple Stellar Populations in Globular Clusters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1), 83–136.
- Carretta, E.; Bragaglia, A.; Gratton, R. G.; Recio-Blanco, A.; Lucatello, S.; D’Orazi, V.; Cassisi, S. (2010). Properties of stellar generations in globular clusters and relations with global parameters. *Astronomy and Astrophysics*, 516, A55.
- Coelho, P. R. T. (2014). A new library of theoretical stellar spectra with scaled-solar and alpha-enhanced mixtures. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440, 1027-1043.
- Hoogendam, W. B.; Smolinski, J. P. (2021). A Careful Reassessment of Globular Cluster Multiple Population Radial Distributions with Sloan Digital Sky Survey and Johnson-Cousins Broadband Photometry. *The Astronomical Journal*, 161
- Krumholz, M. R.; McKee, C. F.; Bland-Hawthorn, J. (2019). Star Clusters Across Cosmic Time. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57(1), 227–303.
- Lardo, C.; Bellazzini, M.; Pancino, E.; Carretta, E.; Bragaglia, A. ; Dalessandro, E. (2011). Mining SDSS in search of multiple populations in globular clusters. *Astronomy and Astrophysics*, 525.
- Loup, C.; Forveille, T.; Omont, A.; Paul, J. F. (1993). CO and HCN observations of circumstellar envelopes. A catalogue - mass loss rates and distributions. *Astronomy and Astrophysics*, 99, 291-377.
- Minelli, A.; Mucciarelli, A.; Massari, D.; Bellazzini, M.; Romano, D.; Ferraro, F. R. (2021). A New Set of Chisels for Galactic Archeology: Sc, V, and Zn as Taggers of Accreted Globular Clusters. *The Astrophysical Journal Letters*, 918(2), L32.
- Roh, D.; Lee, Y.; Joo, S.; Han, S.; Sohn, Y.; Lee, J. (2011). Two Distinct Red Giant Branches in the Globular Cluster NGC 288. *The Astrophysical Journal*, 733(2), L45.
- Sivarani, T. (2013). Stellar Relics from the Early Galaxy. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 34(1).

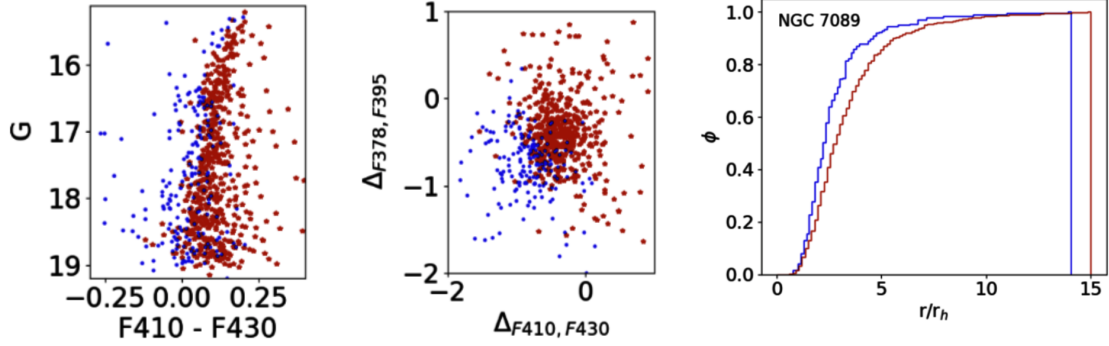


Figure 1: The S-PLUS + GAIA analysis of NGC 7089 from Hartmann et al. 2021 *in prep*. *Left panel:* The F410-F430 vs. G colour magnitude diagram showing the 2 populations of stars in the RGB denoted by blue and red markers. *Middel panel:* The pseudo colour-colour diagram that best separates the two populations. *Right panel:* The cumulative radial distribution showing that the population denoted by red markers in the left and middle panels is more centrally located than the population illustrated by blue markers.

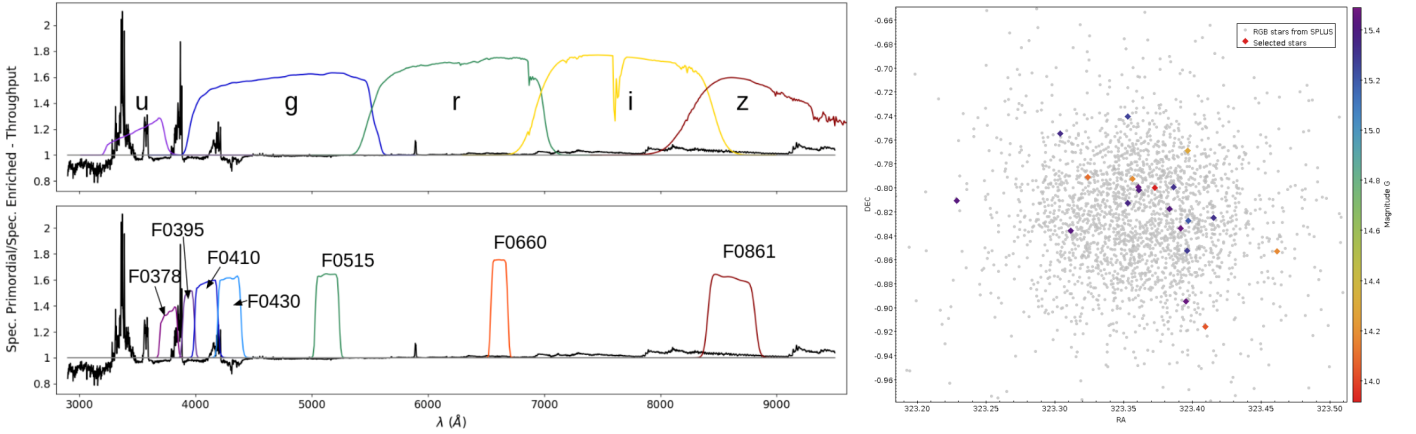


Figure 2: *Left panels:* The flux ratio for synthetic first generation over second generation of stars from Branco, Coelho et al. 2021 *in prep* (for a cluster of similar metallicity to NGC 7089) and the S-PLUS filter system (*top left:* broad-band filters, *bottom left:* narrow-band filters). Note that the ratio between the two population spectra shows a strong signal from 3000 to 5000 Å other than the rest of the wavelength range. These panels showcase that while S-PLUS helps us separating between the multiple populations in this cluster, the differences are even larger at bluer wavelengths that are not probed by the S-PLUS filters but would be probed with SOAR/GOODMAN through the B930 grating. *Right panel:* Distribution on the sky of the selected stars. The stars with highest membership probability are selected as targets. The right bar indicates the magnitude of the stars.

Technical Justification

Following the photometric work of Hartmann et al. (2021, *in prep.*) where we used the S-PLUS filters to separate two populations of stars in the RGB of four GCs, we seek to obtain low resolution, high signal-to-noise spectra for 20 stars with $G < 15.5$ magnitudes in NGC 7089 using SOAR/Goodman. We intend to use the Blue Camera, using single slits and the B930 grating, between M2 and M3. This grating is an adequate compromise to achieve a reasonable spectral resolution and still get the absorption lines we are interested in around the blue between 3800 - 6400 Å (see left panels of Fig. 2).

From our previous experience with GOODMAN, multi-object observations are not so efficient. Therefore, we choose to observe the stars using single slits over multi-object observations. We require $S/N \sim 50$ and for that we plan to use 2x2 binning with B930 grating. This will increase the S/N without compromising the resolution so much. From our team's previous runs using 1" in field stars, a star with $V=10$ ($S/N \sim 30$), full moon, air-mass ~ 1.2 , seeing ~ 1.2 would require 10 minutes of integration time. Because the target stars are in a dense region, we require a narrower slit, 0.6" in order to avoid contamination from neighboring stars. Therefore, we expect an integration time maximum of 1800s per star (to reach $S/N \sim 50$ for the fainter stars), resulting in 10 hours total.

For each star, we will need 6 minutes of pre-imaging and a total of 10-15 min to change every time we change the target, totaling 7 hours. Thus, we will require 17h of total time, considering the position of the cluster (RA = 23:33:27) the ideal observation period is the end of July.

The spectroscopic data of the brightest stars in NGC 7089 will allow us to (i) undergo a more quantitative analysis of some light-element abundances in the different stellar populations, (ii) validate the method applied to differentiate the populations of our photometric work, (iii) compare actual data with the stellar models produced by Branco et al. *in prep.*, among others. Our goal is to cover a wide range in GC metallicity by observing other clusters in future proposals, NGC 7089 being the first one as a proof of concept to develop our method and analysis.

Special Instruments Requirements

There are no special instrument requirements