

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

Vinicius Branco

**Fotometria Sintética para estudo das
múltiplas populações estelares em
Aglomerados Globulares da Galáxia com o
S-PLUS**

São Paulo

2016

Vinicius Branco

Fotometria Sintética para estudo das múltiplas populações estelares em Aglomerados Globulares da Galáxia com o S-PLUS

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Orientadoras: Prof^a. Dr^a. Paula R. T. Coelho e Prof^a. Dr^a. Ana Chies

São Paulo

2016

Dedico esta monografia a minha família principalmente pela paciência e compreensão nestes anos de muito estudo e trabalho. Que os frutos ainda serão colhidos e este não é o fim da jornada.

Agradecimentos

À minha família;

Às minhas orientadoras, Paula e Ana pela oportunidade e experiência;

Aos colegas, em especial, Maria Luiza (Malu) e Pedro Henrique Bernardinelli pela assistência técnica e insights.

Resumo

O problema das múltiplas populações de estrelas em aglomerados globulares (AG) do halo da Via Láctea é uma questão de muito interesse e pesquisa neste momento. Nos últimos anos acumulam-se evidências tanto de estudos fotométricos quanto espectroscópicos de que os aglomerados não são populações estelares simples como antes se imaginava: observa-se heterogeneidade nas abundâncias químicas das estrelas de um mesmo AG, e diferenças de idade entre as estrelas são por vezes invocadas para explicar características em diagramas cor-magnitude. Conseguir distinguir estas populações em observações astronômicas tem se revelado uma oportunidade para a astrofísica atual e se tem buscado constantemente estudos e refinamentos dos processos que evidenciem estas múltiplas populações.

Este trabalho consiste em elaborar um código em python que nos permita estudar isócronas em magnitudes e cores como serão observadas pelos surveys J-PLUS e S-PLUS. Como as múltiplas populações em AGs podem ser representadas por sobreposição de isócronas, o código apresentado nesse trabalho é uma ferramenta importante para esses surveys. Esta ferramenta nos permitirá posteriormente estudar quais combinações dos filtros J-PLUS e S-PLUS melhor identificam as múltiplas populações em AGs.

Abstract

The question of multiple populations in galactic globular clusters (GCs) is a matter of intense study and research nowadays. In recent years, evidences accumulate, both photometry and spectroscopy studies, showing that GCs are not the simple stellar populations we once believed they were: we observe stars with different abundance patterns in a same cluster, and age differences are sometimes invoked to explain features in color magnitude diagrams. To distinguish these populations in observations is an opportunity in modern astrophysics, and new studies and refinements of current techniques are being searched with the goal of highlighting the existence of these multiple populations.

This work consists in developing a python code which allows one to study isochrones (stellar evolution prescriptions) in magnitudes and colours as they will be observed from the surveys J-PLUS and S-PLUS. As multiple populations in GCs can be represented as a superposition of isochrones with different abundances and ages, the code presented here is an important tool for these surveys. It will allows us to study the combination of filters in J-PLUS and S-PLUS which better highlight the existence of multi-populations.

Lista de Figuras

1.1	Diagrama Cor-Magnitude de M3	18
1.2	Diagrama Cor-Magnitude de NGC 2808	20
1.3	Curvas de transmissão do S-PLUS.	21
1.4	Diagrama Cor-Magnitude sintético por Larsen	22
2.1	Fluxograma do Código	26
2.2	Estrelas Sintéticas da BaSeL	27
2.3	Curvas de transmissão do S-PLUS	28
2.4	Isócrona do BaSTI de 10 Gyrs	28
2.5	Estrelas Sintéticas e Isócrona de 10 Gyrs	29
2.6	Curvas de transmissão do S-PLUS	30
3.1	Estrelas selecionadas em uma isócrona	32
3.2	CMD com Magnitudes de teste	32
3.3	CMD com Magnitude Instrumental	33
3.4	CMD no Sistema AB	33

Lista de Tabelas

Sumário

1. <i>Introdução</i>	17
1.1 As Múltiplas Populações de Estrelas	19
1.2 O S-PLUS	19
2. <i>Metodologia</i>	23
2.1 Fotometria Sintética	23
2.2 Construção dos CMDs	24
2.2.1 Magnitudes Sintéticas	25
2.2.2 Magnitudes no Sistema AB	26
2.3 Código em Python	26
3. <i>Resultados e Análise</i>	31
3.1 Validação do código	31
3.1.1 Seleção de Estrelas	31
3.1.2 Simulação da isócrona de 10 Gyr no plano cor <i>vs.</i> magnitude	31
4. <i>Conclusões e Perspectivas</i>	35
<i>Referências</i>	37

Introdução

Acreditava-se que Aglomerados Globulares (AG) fossem grupos de centenas de milhares de estrelas, gravitacionalmente ligadas, que teriam nascido na mesma época, sob a mesma nuvem molecular, com distribuição de massa de acordo com a função de massa inicial (IMF, do inglês “Initial Mass Function”) deste sistema. O resfriamento das nuvens moleculares da Via Láctea formavam estrelas e as mais massivas ($M > 10M_{Sol}$) enriquecem o meio intraglomerado com metais¹, após encerrarem sua evolução em um evento explosivo conhecido como Supernova Tipo II. Deste modo, AGs eram considerados com uma População Simples de Estrelas (SSP, do inglês “Simple Stellar Population”), onde todas as estrelas são quimicamente homogêneas e de mesma idade, e que poderiam ser representados por uma única isócrona² no Diagrama Cor-Magnitude (CMD, do inglês “Color-Magnitude Diagram”) caracterizava a idade dos aglomerados, conforme Figura 1.1.

Atualmente, os Aglomerados Globulares ainda constituem grupos de centenas de milhares de estrelas gravitacionalmente ligadas, mas com o Hubble Space Telescope (HST), por exemplo, foi possível realizar observações fotométricas de alta precisão em aglomerados globulares, que trouxeram à tona as primeiras evidências diretas da presença das múltiplas populações de estrelas nestes sistemas (Piotto et al., 2007). Kraft (1994) já mostrava discrepâncias químicas entre cenários primordiais e evoluídos de estrelas do Ramo das Gigantes (RGB, do inglês “Red Giant Branch”). Outra evidência é que a Sequência Principal (MS, do inglês “Main Sequence”) do aglomerado NGC 2808 pode ser dividido em três ramos de MS separados (Piotto et al., 2007), explicados com variação nas abundâncias de Hélio. No

¹ Metais em Astronomia são todos os elementos mais pesados do que Hidrogênio e Hélio.

² Isócronas representam o locus de estrelas de uma população estelar onde todas as estrelas tem a mesma idade e composição química. Isócronas são construídas a partir de modelos de evolução estelar, e são usadas para estudar linhas de mesma idade no CMD.

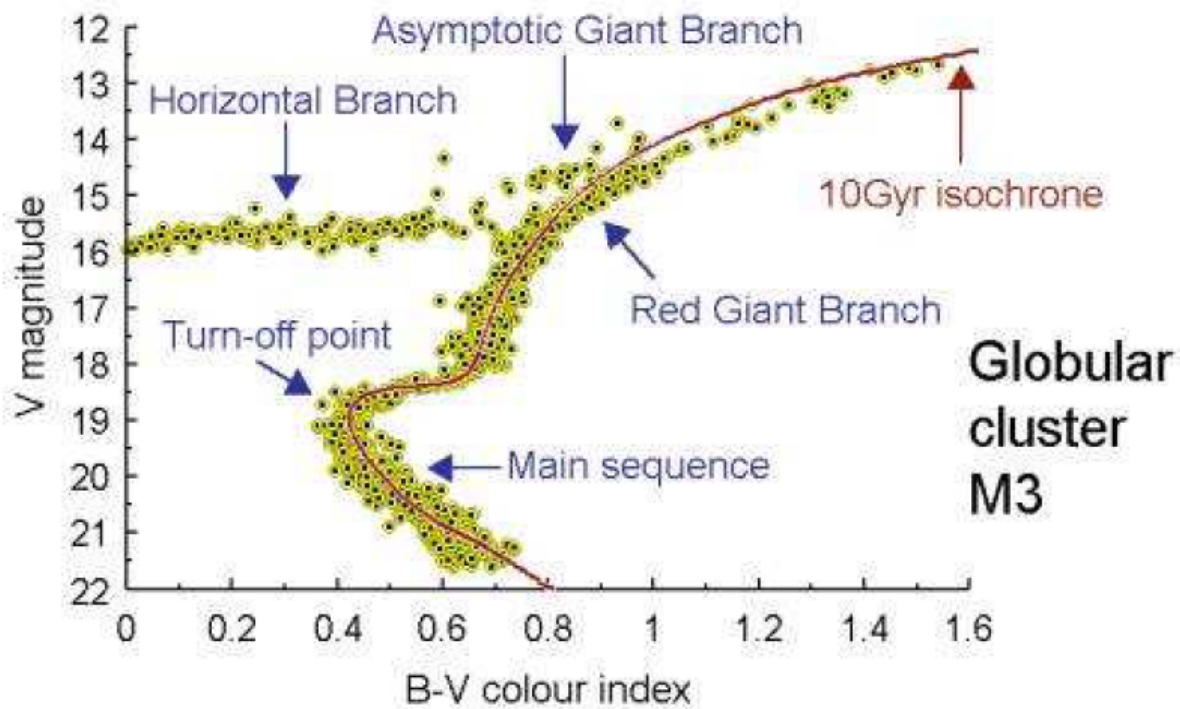


Figura 1.1: Ajuste de uma única isócrona para aglomerado globular M3. Créditos: <http://www.astro.ljmu.ac.uk>

entanto, na fase de Sequência Principal não há processo de mistura que possa justificar essa diferença, indicando que estas estrelas já nasceram em um ambiente quimicamente poluído por uma geração anterior.

A partir de evidências espectroscópicas foi possível verificar que parte das estrelas em AGs apresenta quantidades diferentes de elementos leves como C, N, O, F, Na, Mg, Al, S em comparação às estrelas de campo, isto é, isoladas, do halo da Galáxia. Estas discrepâncias nas abundâncias poderiam ser explicadas relaxando a hipótese de que todas as estrelas se formaram exatamente no mesmo tempo, levando a presença de mais de uma população de estrelas no aglomerado, sendo uma primeira geração composta por elementos primordiais à formação do sistema, onde estrelas mais massivas teriam poluído o sistema intraglomerado e a geração posterior nascido neste meio com uma composição combinada do material original dela com o do ejetado da primeira geração (Carretta et al., 2013).

1.1 As Múltiplas Populações de Estrelas

O conceito de múltiplas populações de estrelas, isto é, múltiplas gerações estelares em aglomerados globulares, é uma das hipóteses atuais para se explicar os múltiplos ramos encontrados nos CMDs e as variações das abundâncias químicas dos elementos leves dos aglomerados. Alguns dos mecanismos que podem ser responsáveis pela produção da inhomogeneidade química nos aglomerados incluem: a original inhomogeneidade do material químico no qual o AG se formou; evolução individual da estrela devido sua interação com outra estrela companheira (binárias) ou por sua rotação interna que causa alterações químicas na sua superfície; fusão entre aglomerados globulares; ou material interestelar não relacionado ao aglomerado que tenha se acumulado fora dele e eventualmente sido englobado devido ao poço de potencial do AG, dando margem a diferentes episódios de formação estelar ([Gratton et al., 2012](#)).

Para se identificar múltiplas populações em CMDs é necessário que sejam realizadas observações fotométricas de alta precisão e em filtros mais azuis ([Sbordone et al., 2011](#)) ou espectroscópicas de alta resolução (?). Exemplos são os trabalhos de [Piotto et al. \(2007\)](#) e [Milone et al. \(2012\)](#), em que duas Sequências Principais (MS, do inglês “Main Sequence”) são identificadas em NGC 6397. A Figura 1.2 mostra como que a variação na abundância de He influencia nas isócronas e quais as abundâncias deste elemento caracterizam os vários ramos de Sequência Principal aparentes em NGC 2808.

1.2 O S-PLUS

O Levantamento Sul Fotométrico do Universo Local (S-PLUS, do inglês “Southern Photometric Local Universe Survey”), projeto inspirado no J-PLUS (Javalambre Photometric Local Universe Survey) para o hemisfério norte da Terra, do consórcio internacional JPAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey), conta com um telescópio com de 87 centímetros de diâmetro, 8 filtros de banda estreitos e 5 filtros de banda largos (semelhantes ao do SLOAN, ugriz) na região do visível, de 3.500 à 11.000Å, conforme Figura 1.3. O estudo com aglomerados globulares é mais um dentre muitas das pesquisas que este telescópio será capaz de auxiliar, desde átomos ao Universo, obtendo um mapa quase completo do Universo Observável.

Com este levantamento será possível, será possível realizar novas investigações em foto-

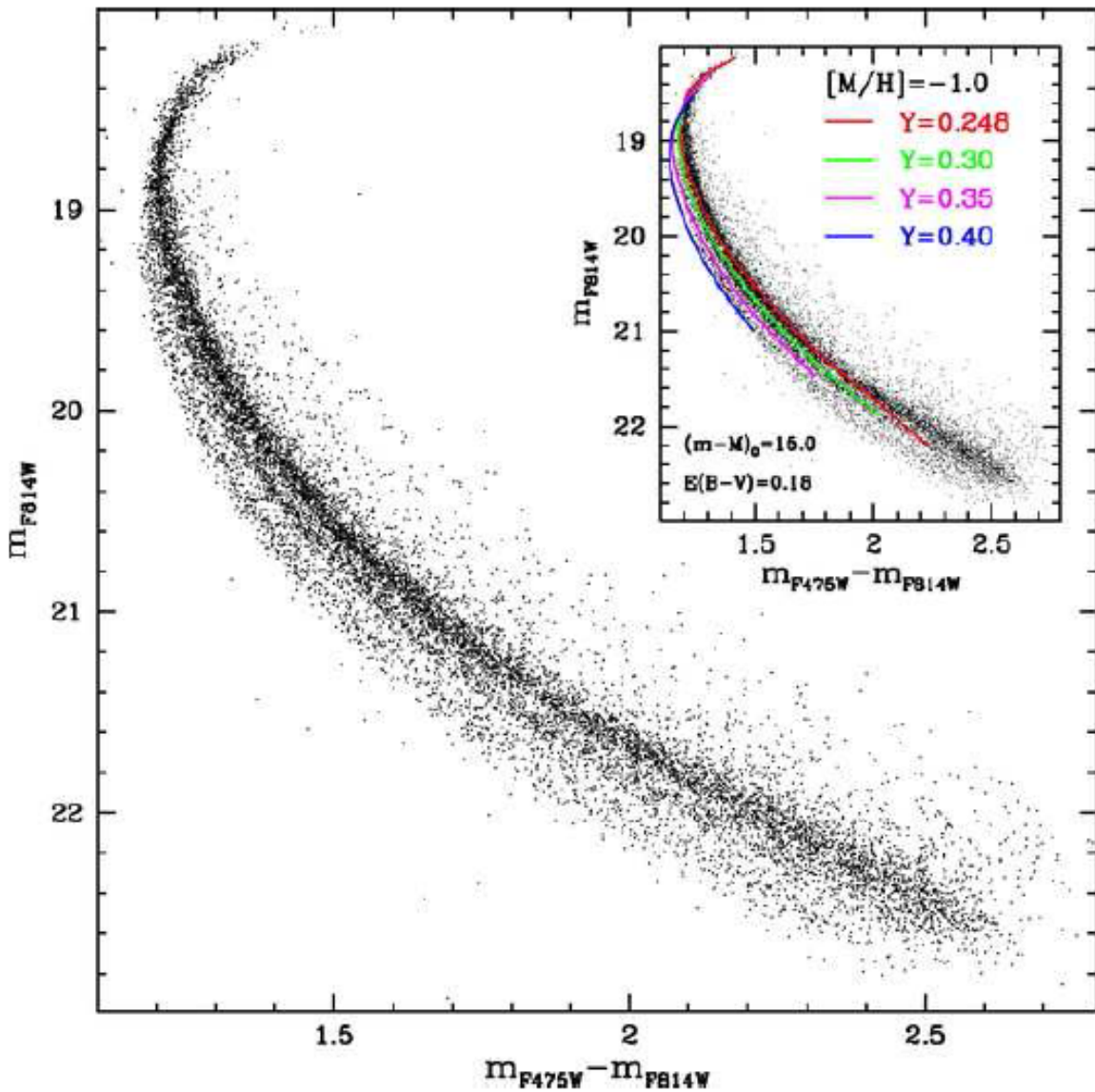


Figura 1.2: Ajuste de quatro isócronas com variação na abundância de Hélio na composição química para o aglomerado globular NGC 2808 (Piotto et al., 2007).

metria do Universo. Por exemplo, Soren Larsen, membro externo da colaboração J-PLUS, realizou testes preliminares indicando que seria possível separar duas gerações de estrelas combinando-se os filtros do S-PLUS, construindo um CMD conforme Figura 1.4, no qual são comparadas estrelas do topo de base do RGB de um dado aglomerado globular com estrelas sintéticas.

O objetivo deste trabalho consiste em estudar quais as combinações de filtros melhor exibem as múltiplas populações de estrelas dos AGs do halo da Galáxia. Para tal, em uma primeira etapa trabalhamos na criação de um código independente para leitura de uma base

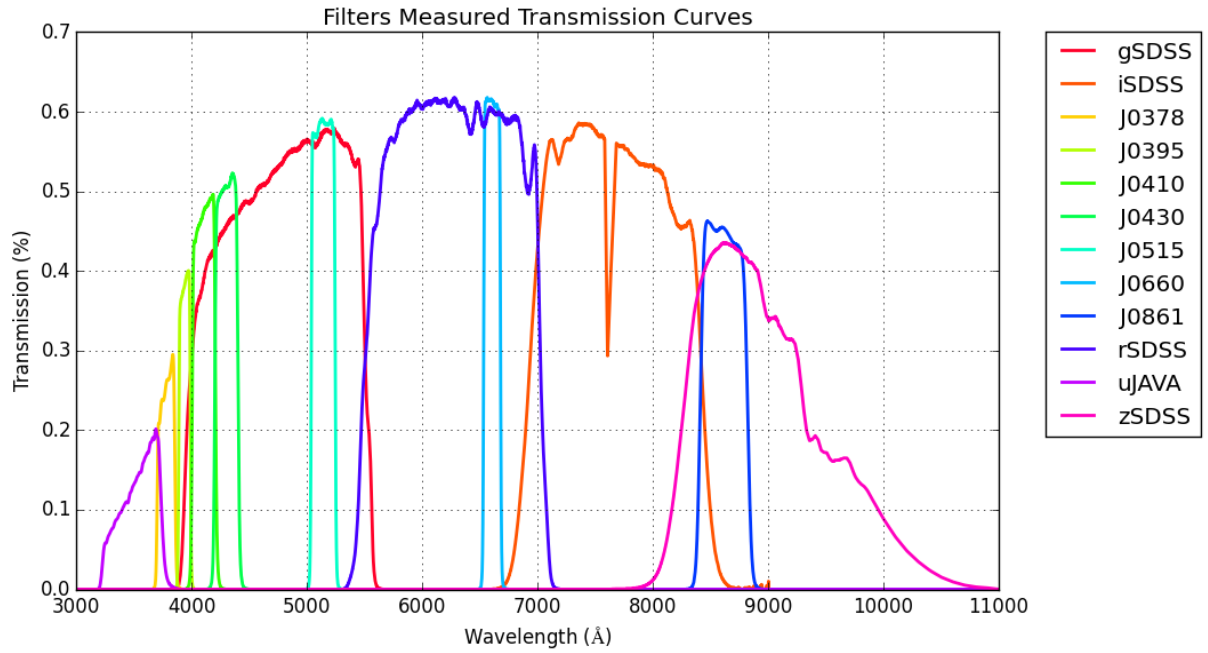


Figura 1.3: Curvas de transmissão dos 12 Filtros de banda estreitos e largos do S-PLUS.

de estrelas sintéticas e de isócronas de interesse do plano teórico a fim de realizar fotometria sintética e simular isócronas no plano observacional. Podemos inicialmente testar o código comparando com CMDs conforme teste feito por Larsen. Em seguida, podemos , explorar e avaliar outras possíveis combinações e comparar os resultados para aplicar ao caso real de M15, AG já observado pelo J-PLUS, uma vez que à data deste trabalho o S-PLUS está em fase de calibração.

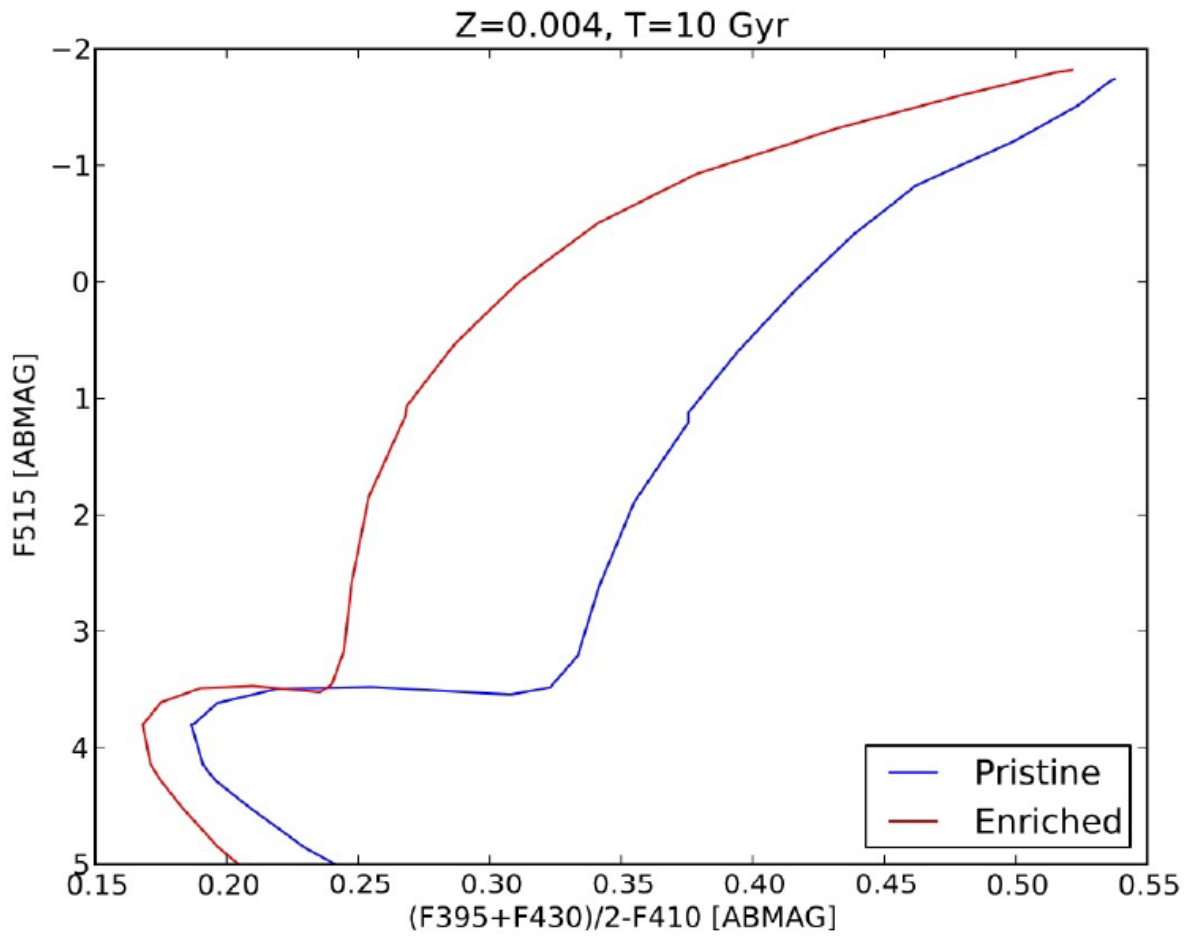


Figura 1.4: CMD utilizando filtros do S-PLUS para exibição de múltiplas populações estelares. Em azul, população estelar primordial e, em vermelho, população estelar quimicamente enriquecida. Crédito: Soren Larsen (comunicação privada).

Metodologia

A investigação das populações de estrelas em aglomerados globulares galácticos é muito baseada em Diagramas Cor-Magnitude (CMD). Neste trabalho, desenvolvemos um código que utiliza fotometria sintética para transportar isócronas – que definem o locus de uma população estelar no plano teórico temperatura efetiva *vs.* luminosidade – para o plano observacional definido por cor *vs.* magnitude. Com esse código, podemos investigar como isócronas de diversos parâmetros (idades e abundâncias químicas) serão representadas pelos filtros do S-PLUS. Essa ferramenta nos permitirá estudar as multi-populações em AGs como sobreposição de isócronas que as representam.

2.1 Fotometria Sintética

O processo de Fotometria Sintética consiste basicamente em se representar informações observacionais, como a magnitude dos objetos astronômicos (os modelos sintéticos), a partir de seus parâmetros físicos do seu espectro e do sistema de resposta instrumental do telescópio que o observou. Desta forma, obtemos uma magnitude sintética por simplesmente integrar, ao longo do comprimento de onda ou frequência, a multiplicação de cada ponto da função de fluxo com a função de transmissão. Com isto, podemos transformar modelos teóricos estelares do plano teórico (que utiliza parâmetros físicos como Luminosidade e Temperatura) para o plano observacional do Diagrama Cor-Magnitude.

Matematicamente, multiplica-se cada ponto das funções de fluxo da estrela $F_{estrela}$ pela função de transmissão dos filtros T_{filtro} e integra-se em comprimento de onda ou frequência. Este resultado é o Fluxo Integrado F_i daquele objeto. Deste modo, obtem-se uma magnitude m_i do objeto calculando-se:

$$m_i = -2.5 \log_{10}(F_i), \quad (2.1)$$

onde F_i é, basicamente,

$$F_i = \int_0^\infty f_{estrela}(\lambda) \cdot T_{filtro}(\lambda) d\lambda. \quad (2.2)$$

Com isto, basta definir a cor como $m_i - m_j$ (ou "índice de cor") como função de uma magnitude de interesse m_k .

Neste trabalho, utilizamos a biblioteca de estrelas sintéticas BaSeL¹ (Westera et al., 2002) para calcular magnitudes sintéticas nos 12 filtros de bandas larga e estreita do S-PLUS.

2.2 Construção dos CMDs

Diagramas Cor-Magnitude relacionam cores observadas (diferença de magnitudes) com a magnitude, aparente ou absoluta, dos objetos em questão. Para o nosso propósito de transportar isócronas para o plano observacional, um código em python foi escrito para calcular as magnitudes sintéticas de todas as estrelas que representam as isócronas.

Para as isócronas, adotamos modelos de evolução estelar de BaSTI² (Pietrinferni et al., 2006), com metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]^3 = -2.0$. Adotamos nessa monografia parâmetros do aglomerado M15, estudado por Larsen et al. (2015) e observado pelo J-PLUS. Isto é: (i) As estrelas selecionadas da BaSeL possuem metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$; (ii) a isócrona para teste do script tem idade $T = 10$ Gyrs, com metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.14$, utilizando modelos de evolução estelar enriquecidos com elementos α , a partir de modelos canônicos de opacidade Low-T por Ferguson et al. (2005), e parâmetro de perda de massa Reimers $\eta = 0.2$.

Para realizar a seleção de estrelas o código compara cada ponto da isócrona com as estrelas da BaSeL, selecionando a estrela que mais se aproxima deste ponto em relação aos seus parâmetros atmosféricos de temperatura efetiva e gravidade superficial.

¹ BaSeL 3.1 (University of Basel)

² A Bag of Stellar Tracks and Isochrones (BaSTI)

³ Adotamos a notação espectrocópica para definição de "Metalicidade", dada por

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{Estrela}} - \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{Sol}}.$$

Em todos os casos fez-se necessária a multiplicação do fluxo de cada estrela selecionada pela área do ponto na isócrona da qual ela foi selecionada pois a base de dados da BaSeL fornece o fluxo de Eddington na superfície da estrela, processo explicado em detalhe na Seção 4.3. Mais detalhes do código são apresentados na seção 2.4.

Para validarmos os resultados produzidos pelo código, temos por objetivo reproduzir a simulação apresentada por Larsen (comunicação privada) para multiplas populações de estrelas em aglomerados (Figura 1.4). Nesta simulação, $cor = (J395 + J430)/2 - J410$ e $magnitude = J515$. Também foi produzido um modelo mais comum de CMD com $cor = g - r$ e $magnitude = r$, utilizando o sistema fotométrico do SDSS, onde g e r são magnitudes aparentes dos objetos observados nos filtros de banda larga com picos no "verde" e "vermelho", respectivamente.

2.2.1 Magnitudes Sintéticas

De forma simplificada, conforme as Equações (2.1) e (2.2), define-se uma magnitude sintética, que não está ainda calibrada a um sistema fotométrico, como sendo:

$$m = -2.5 \log_{10} \left(\int_0^\infty f(\lambda) \cdot T(\lambda) d\lambda \right). \quad (2.3)$$

onde $f(\lambda)$ é o fluxo absoluto observado em $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ e $T(\lambda)$ é a curva de transmissão de um filtro.

Cada estrela da isócrona, precisamos multiplicar o fluxo da estrela BaSeL pela área da estrela, já que a BaSeL é dada em fluxo de Eddington na superfície da estrela. Ou seja:

$$m_{estrela} = -2.5 \log_{10} (F \cdot 4\pi R_{isoc}^2), \quad (2.4)$$

onde F é o fluxo integrado e convoluído de cada estrela com todos os filtros do S-PLUS (a integral na equação 2.3). Neste trabalho usamos duas formas de calcular o fluxo F : 1) eles foram calculados pela Professora Paula Coelho usando a *task sbands* do IRAF, e 2) foi desenvolvido uma rotina de convolução no código em python apresentado nessa monografia. O objetivo é verificar se a convolução está correta.

2.2.2 Magnitudes no Sistema AB

Para efeito de comparação aos casos reais, escolhemos o sistema de magnitudes AB pois é o mesmo que é utilizado pela colaboração JPAS. As magnitudes AB são definidas conforme [Bessell M. & Murphy \(2012\)](#)

$$m_{inst} = -2.5 \log_{10} \left(\frac{\int_0^\infty \lambda f(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty c \lambda^{-1} R(\lambda) d\lambda} \right) - 48.60. \quad (2.5)$$

onde a constante $c = 29979245800$ cm/s é a velocidade da luz no vácuo, $f(\lambda)$ é o fluxo absoluto observado em $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ e $R(\lambda)$ é a curva de transmissão de um filtro.

2.3 Código em Python

A seguir, na Figura 2.1, apresentamos um fluxograma do funcionamento do código criado para este trabalho. Como mencionado, ele carrega as bases de dados das estrelas teóricas da BaSeL, isócronas do BaSTI e filtros do S-PLUS.

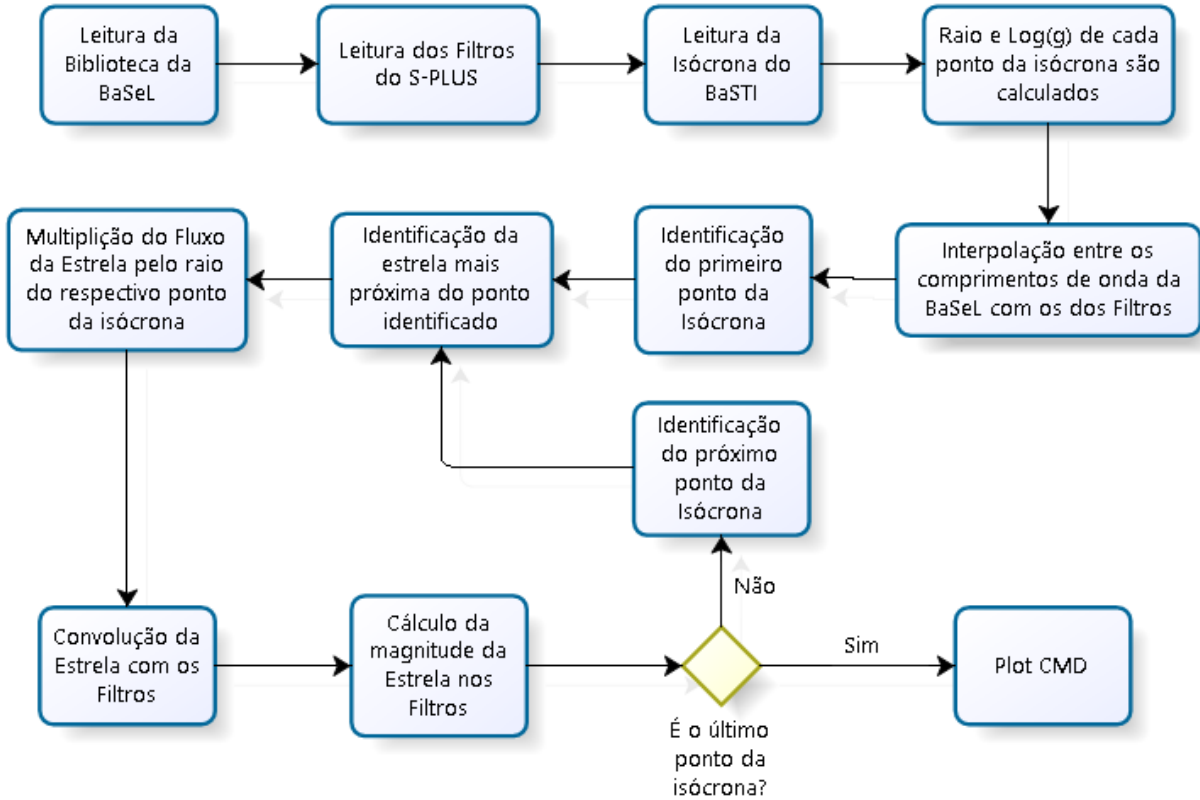


Figura 2.1: Este fluxograma contém os principais passos executados pelo script criado para este trabalho. Compreende desde a leitura das bases de dados à produção de um Diagrama Cor-Magnitude (CMD).

Primeiramente o script abre o arquivo "*wlbc99_20.cor*" que se refere à biblioteca de estrelas sintéticas da BaSeL com metalicidade de $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$. Neste momento, os parâmetros de comprimento de onda e do fluxo, bem como temperatura e gravidade superficial de cada estrela são lidos. A Figura 2.2 apresenta os parâmetros atmosféricos de todas as 450 estrelas dessa biblioteca.

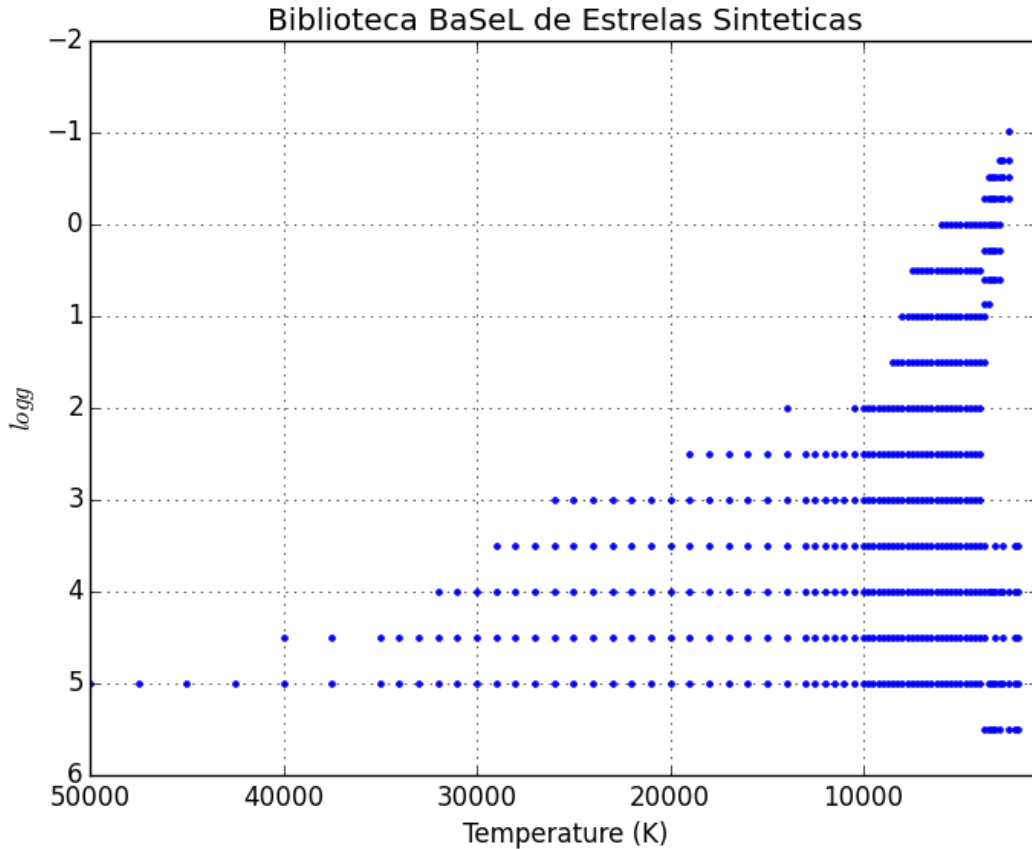


Figura 2.2: Diagrama com todas as 450 estrelas da Biblioteca de Estrelas sintéticas da BaSeL.

Em seguida são abertos e lidos os parâmetros de comprimento de onda e transmissão dos 12 filtros do J-PLUS, que são os mesmos utilizados no S-PLUS. A saber: J0378, J0395, J0410, J0430, J0515, J0660, J0861, gSDSS, iSDSS, rSDSS, uJAVA, zSDSS, conforme figura 2.3. Em seguida, o código, que é capaz de ler toda a base do BaSTI (para os parâmetros citados na Seção 2.1), carrega a isócrona de idade 10 Grys (Figura 2.4).

De posse de todas as estrelas da BaSeL, dos filtros do S-PLUS e uma isócrona do BaSTI, com o auxílio da Equação (2.6) (Martins e Coelho, 2007), compara-se cada ponto da isócrona para identificar a estrela mais próxima. Desta forma, se faz a seleção das

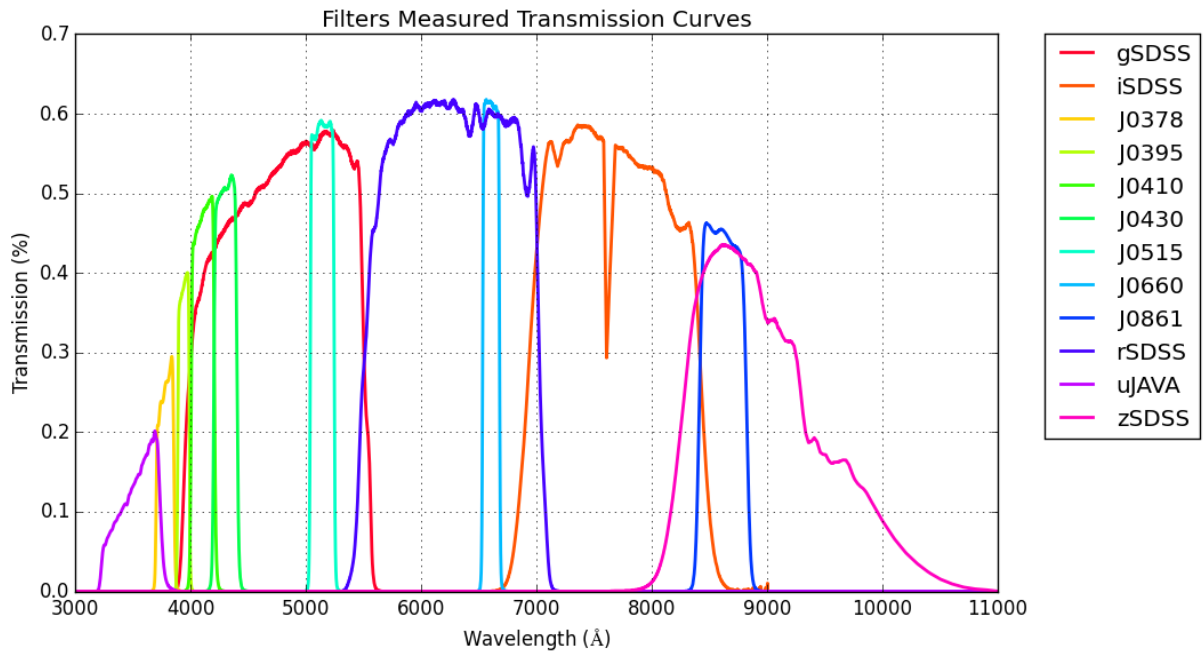


Figura 2.3: Curvas de transmissão dos 12 filtros do S-PLUS.

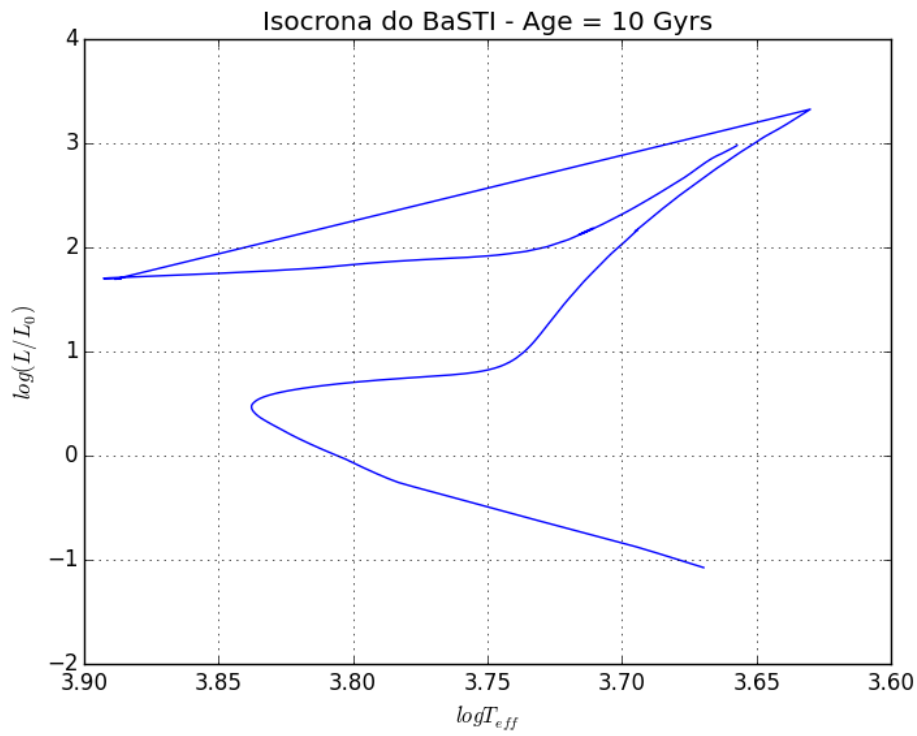


Figura 2.4: Isócrona de 10 Gyrs do BaSTI carregada pelo código. ($Z = 0.0003$; $Y = 0.245$)

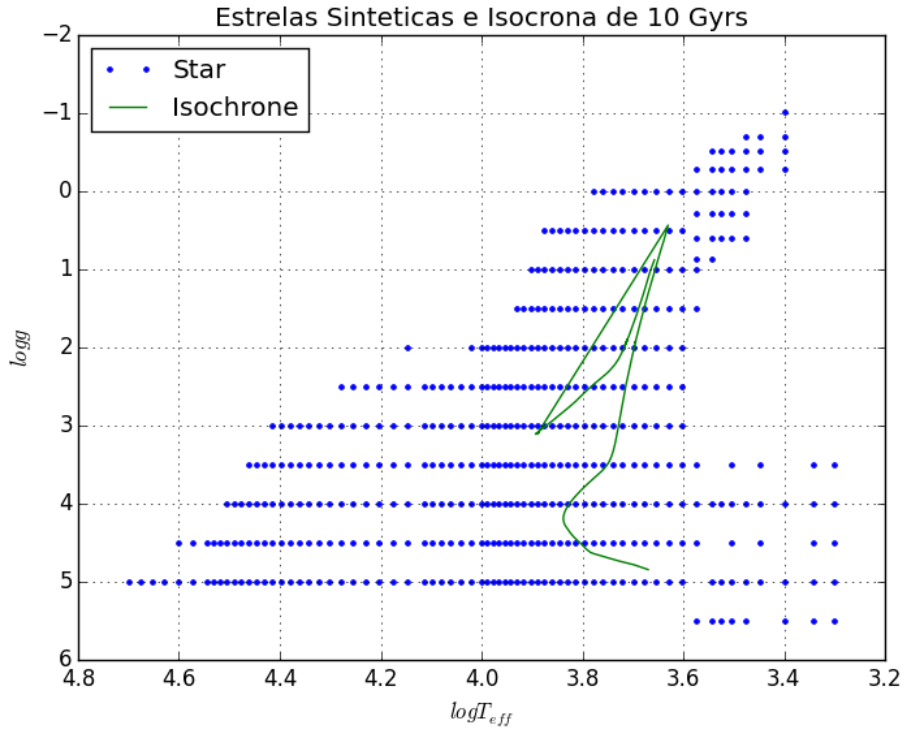


Figura 2.5: As duas bases de dados comparadas, BaSeL e BaSTI. A seleção de estrelas se dá pela identificação da estrela mais próxima à isócrona.

estrelas sintéticas que melhor descreveriam uma população estelar. A Figura 2.5 mostra as duas bases no mesmo gráfico.

$$d = \sqrt{\left(\frac{T_{eff} - T_{obs}}{T_{obs}}\right)^2 + \left(\frac{\log g - \log g_{obs}}{\log g_{obs}}\right)^2} \quad (2.6)$$

Em uma função de loop, o código compara cada ponto da isócrona com todas as estrelas da BaSeL. A menor distância é identificada. Neste momento, o fluxo da estrela mais próxima é multiplicado pela área da estrela que representa o ponto da isócrona correspondente. A Figura 2.6 compara os fluxos de algumas estrelas com os filtros do SPLUS. Em outra função de loop aninhado é feita a multiplicação entre as funções de fluxo e transmissão para cada valor de comprimento de onda, processo conhecido como Convolução. O cálculo da integração da convolução ao longo do comprimento de onda para obtenção da magnitude da estrela selecionada em cada filtro é feito com auxílio das Equações (2.4), (2.3) e (2.5) (função `numpy.trapz()` do Python). Para que seja possível comparar as funções, o código realiza a interpolação da base de dados da BaSeL com os valores de comprimento de onda dos filtros, obtendo os valores correspondentes de fluxo (função `numpy.interp()` do

Python).

Por fim, os Diagramas Cor-Magnitude Teste, Instrumental e no Sistema AB de magnitudes são plotados com a combinação de cor feita por Larsen e utilizando os filtros do SDSS.

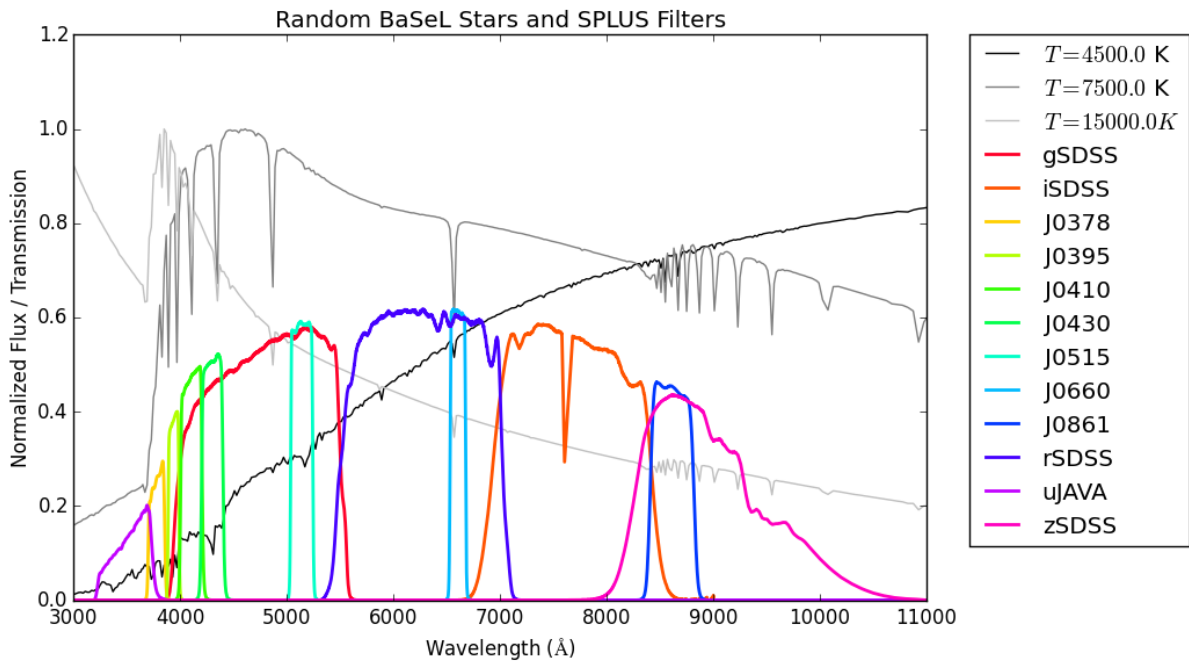


Figura 2.6: Curvas de transmissão dos 12 filtros do S-PLUS.

Resultados e Análise

Apresentamos nas seções seguintes os resultados obtidos a partir da execução do código que deve ser capaz de selecionar as estrelas da BaSeL correspondentes à isócrona do BaSTI, interpolar, convoluir e integrar utilizando as estrelas selecionadas e os filtros do SPLUS e, por fim, graficar Diagramas Cor-Magnitude.

3.1 Validação do código

Nessa sessão apresentamos os resultados usados para validar se o código descrito na seção 2.4 apresenta resultados esperados.

3.1.1 Seleção de Estrelas

A Figura 3.1 apresenta as estrelas selecionadas graficadas no Plano Teórico da isócrona de 10 Gyrs. Observa-se que a seleção de estrelas ocorre de forma adequada para a grande maioria das estrelas comparadas. Verificou-se que duas estrelas que se posicionam longe da isócrona foram consideradas.

3.1.2 Simulação da isócrona de 10 Gyr no plano cor vs. magnitude

As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam os CMDs resultantes dos processos citados na Seção 2.3, do Capítulo 2. Verifica-se que o eixo horizontal da Figura 3.2 está invertido, mas não foi encontrada a razão de ser até o momento. Observa-se, porém, que os demais plots sugerem a construção de CMD adequada uma vez que o formato se assemelha ao de uma população estelar do Plano Observacional normalmente obtida.

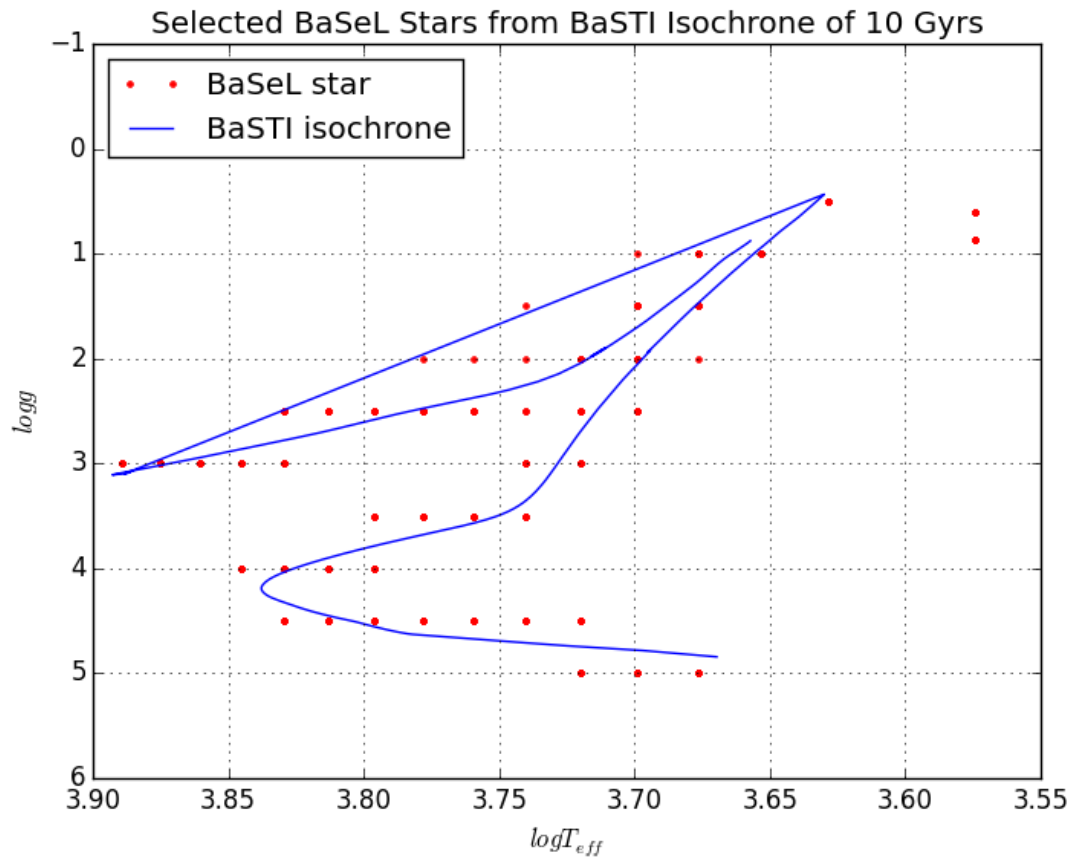


Figura 3.1: Estrelas selecionadas da biblioteca de estrelas sintéticas da BaSeL usando a isócrona de 10 Gyrs do BaSTI como referência.

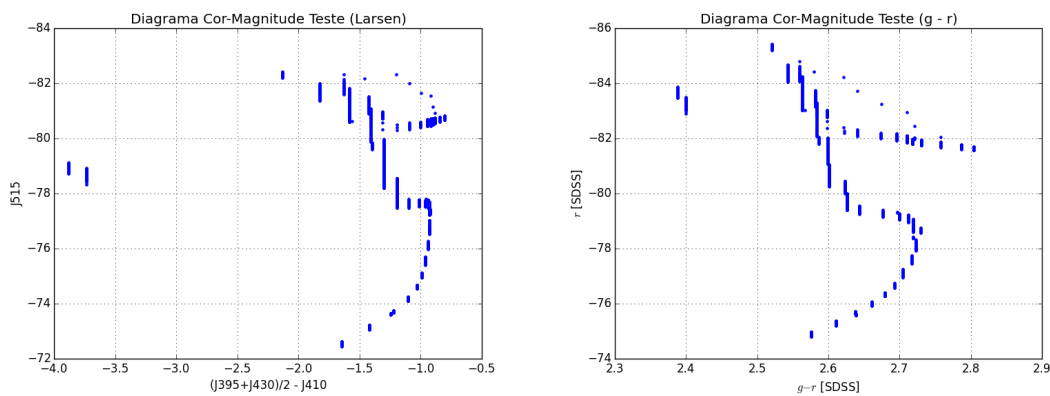


Figura 3.2: Diagrama Cor-Magnitude construído a partir da Equação (2.4) pelo código, utilizando os fluxos das estrelas selecionadas convoluídos com os filtros do S-PLUS pela Professora Paula Coelho.

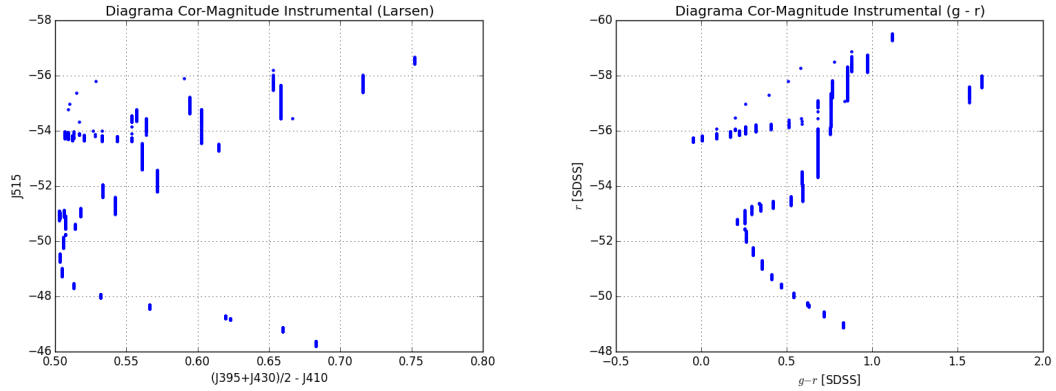


Figura 3.3: Diagrama Cor-Magnitude construído pelo código utilizando a Equação (2.3) para magnitudes instrumentais.

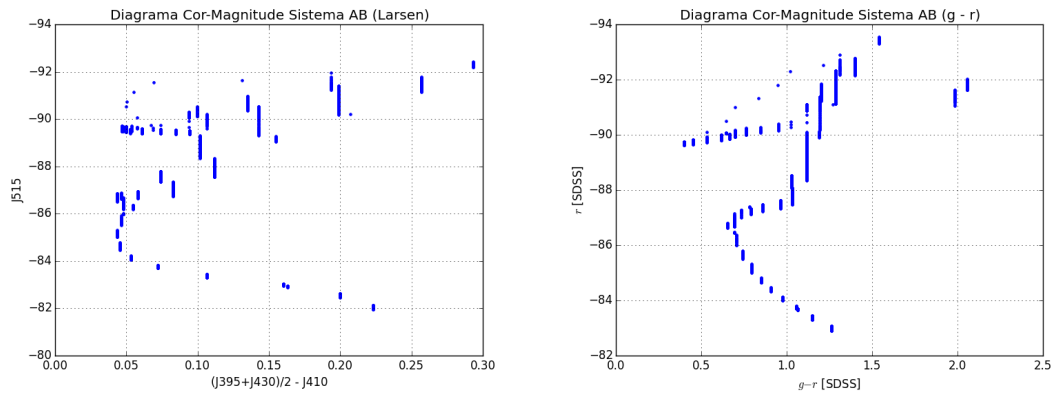


Figura 3.4: Diagrama Cor-Magnitude construído pelo código utilizando a Equação (2.5) para o sistema de magnitudes AB.

Conclusões e Perspectivas

Vimos que a investigação das múltiplas populações requer um cuidado bastante minucioso na questão da construção de diagramas cor-magnitude. Mais ainda, que a fotometria sintética é um processo muito importante e eficaz para se converter os diagramas do plano teórico para o plano observacional.

O código criado atende a estes fins e é capaz de gerar Diagramas Cor-Magnitude dada uma população estelar e filtros de transmissão. No entanto, no tocante ao estudo das múltiplas populações, não foi possível desenvolver os diagramas devido à complicações técnicas no código.

Deste cenário, indicamos para trabalhos futuros a reprodução do CMD feito por Larsen (comunicação privada) de forma a verificar se o código diferencia duas populações de estrelas, as primordiais das enriquecidas. Em sequência, valendo-se de variações químicas como variação nas abundâncias de CNaNO e enriquecimento em Hélio para que seja feita a aplicação à casos reais como o Aglomerado Globular M15, motivação inicial deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Bessell M. & Murphy S., Spectrophotometric Libraries, Revised Photonic Passbands, and Zero Points for UBVRI, Hipparcos, and Tycho Photometry, *PASP*, 2012, vol. 124, p. 140
- Carretta E., Bragaglia A., Gratton R. G., Lucatello S., D'Orazi V., Bellazzini M., Catanzaro G., Leone F., Momany Y., Sollima A., NGC 362: another globular cluster with a split red giant branch, *A&A*, 2013, vol. 557, p. A138
- Ferguson J. W., Alexander D. R., Allard F., Barman T., Bodnarik J. G., Hauschildt P. H., Heffner-Wong A., Tamanai A., Low-Temperature Opacities, *ApJ*, 2005, vol. 623, p. 585
- Gratton R. G., Carretta E., Bragaglia A., Multiple populations in globular clusters. Lessons learned from the Milky Way globular clusters, *A&A Rev.*, 2012, vol. 20, p. 50
- Kraft R. P., Abundance differences among globular-cluster giants: Primordial versus evolutionary scenarios, *PASP*, 1994, vol. 106, p. 553
- Larsen S. S., Baumgardt H., Bastian N., Brodie J. P., Grundahl F., Strader J., Radial Distributions Of Sub-Populations In The Globular Cluster M15: A More Centrally Concentrated Primordial Population, *The Astrophysical Journal*, 2015, vol. 804, p. 71
- Martins L. P., Coelho P., Testing the accuracy of synthetic stellar libraries, *MNRAS*, 2007, vol. 381, p. 1329
- Milone A. P., Marino A. F., Piotto G., Bedin L. R., Anderson J., Aparicio A., Cassisi S., Rich R. M., A Double Main Sequence in the Globular Cluster NGC 6397, *The Astrophysical Journal*, 2012, vol. 745, p. 27

- Pietrinferni A., Cassisi S., Salaris M., Castelli F., A Large Stellar Evolution Database for Population Synthesis Studies. II. Stellar Models and Isochrones for an α -enhanced Metal Distribution, *ApJ*, 2006, vol. 642, p. 797
- Piotto G., Bedin L. R., Anderson J., King I. R., Cassisi S., Milone A. P., Villanova S., Pietrinferni A., Renzini A., A Triple Main Sequence in the Globular Cluster NGC 2808, *The Astrophysical Journal Letters*, 2007, vol. 661, p. L53
- Sbordone L., Salaris M., Weiss A., Cassisi S., Photometric signatures of multiple stellar populations in Galactic globular clusters, *A&A*, 2011, vol. 534, p. A9
- Westera P., Lejeune T., Buser R., Cuisinier F., Bruzual G., A standard stellar library for evolutionary synthesis. III. Metallicity calibration, *A&A*, 2002, vol. 381, p. 524