

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

Morgan Sabino Camargo

**Construindo o *Panchromatic Stellar Atlas*  
(PaStA)**

São Paulo

2021



Morgan Sabino Camargo

# Construindo o *Panchromatic Stellar Atlas* (PaStA)

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

Vertente: Pesquisa Básica

Orientadores: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Paula Rodrigues Coelho Teixeira (IAG/USP), Prof. Dr. Alessandro Ederoclite (IAG/USP)

São Paulo

2021



*Dedico esse trabalho a Branquinha, Saruê, e Jojo (in memoriam), meus gatinhos, as luzes da minha vida.*



# Agradecimentos

À minha companheira Vitória, que sempre esteve presente e me ajudou nos momentos mais difíceis que enfrentei;

À minha família Paulo, Solange, Nelcy, Giovanna, e Giulliana, que sempre me deram apoio e acreditaram no meu trabalho e potencial;

À meus orientadores Paula e Alessandro, com quem tive a maior felicidade de trabalhar com, e cuja orientações na pesquisa e na vida foram de valor imensurável;

Aos amigos que compartilharam essa jornada na graduação em Astronomia, que dividimos dificuldades, perspectivas, felicidades, durante e depois do curso;

Aos meus grupos de pesquisa WOTSAP e PLEIAD, colegas cujo admiro muito o trabalho;

À todos os colegas de instituto e universidade que contribuíram por essa passagem.



*“A estrada em frente vai seguindo  
Deixando a porta onde começa  
Agora longe já vai indo  
Devo seguir, nada me impeça;  
Em seu encalço vão meus pés,  
Até a junção com a grande estrada  
De muitas sendas através.  
Que vem depois? Não sei mais nada.”*

J. R. R. Tolkien



# Resumo

**Contexto:** Facilitar o acesso a dados variados para diferentes tipos de estudo. **Objetivos:** Construir um catálogo astronômico a partir de levantamentos com cobertura do céu acima de 60%, amplo alcance no espectro eletromagnético, e astrometria de alta precisão. **Métodos:** Dados do Gaia (Gaia Collaboration et al., 2021) foram buscados e pareados com AllWISE (Cutri & et al., 2013) e GALEX (Bianchi et al., 2014), com critérios astrométricos (Lindgren et al., 2018) para otimização de erros em paralaxe para objetos escolhidos. **Resultados:** No catálogo resultante aplicaram-se estudos estatísticos da magnitude com seus erros, e os dados foram ilustrados em diagramas cor-magnitude e cor-cor. Mapas de extinção e avermelhamento foram comparados com o presente no catálogo, mas não foram identificados vantagens de usar um ou outro. Uma amostra de objetos foi escolhida que tenham parâmetros atmosféricos bem definidos (Gilmore et al., 2012) e esses objetos foram utilizados no serviço VOSA (Bayo et al., 2008) com fim de gerar modelos sintéticos de SEDs. Os modelos num geral se comportaram bem e os parâmetros sintéticos são próximos da referência. Divergências maiores foram identificadas somente nas bandas FUV, NUV, W3, e W4, um objeto divergiu mais entre a SED sintética e observada, e uma estrela mais quente teve maior diferença no valor esperado de temperatura (10.000K modelado contra 7.500K observado). **Conclusões:** Um catálogo de quase 9 milhões de objetos e 146 colunas com dados. Futuramente será usado em mais estudos de modelos sintéticos, na busca de objetos exóticos em *outliers* e uma publicação na literatura é planejada.



# Abstract

**Context:** The goal of this study is to make easier to access data for varied studies. **Aims:** To build an astronomic catalogue from surveys with sky coverage above 60%, wide range of observed bands on the electromagnetic spectra, and high precision astrometry. **Methods:** Gaia data (Gaia Collaboration et al., 2021) was queried and cross-matched with AllWISE (Cutri & et al., 2013) and GALEX (Bianchi et al., 2014), with astrometric criteria (Lindegren et al., 2018) to optimize errors on parallax for chosen objects. **Results:** The resulting catalogue magnitudes and errors were studied statistically, and the data was plotted in colour-colour and colour-magnitude diagrams. Extinction and reddening maps were compared to the data available in the catalogue, but no advantage on one over the other was identified. A sample of objects was chosen, with well defined atmospheric parameters on the literature (Gilmore et al., 2012), and used on the VOSA service (Bayo et al., 2008) to generate SEDs via synthetic models (Coelho, 2014). The models were generally well behaved and the synthetic parameters were close to the reference. Major divergences were identified on the FUV, NUV, W3, and W4 bands, a T Tau object had expected differences between observed and fitted SED, and the hottest star from the sample had the higher variation on temperature between model and observation (10,000K modeled against 7,500K observed). **Conclusion:** A catalogue was built of almost 9 million objects and 146 data columns. In the future it will be used in further studies of synthetic models, the search for exotic objects in outlier data, and a publication in the scientific literature is already planned.



# Lista de Figuras

2.1	Paralaxe e incerteza para os dados do Gaia, com corte aplicado pelo critério astrométrico do <i>query</i> de dados, onde fixa um limite máximo de 20% do paralaxe sob o erro nos dados buscados . . . . .	25
2.2	Projeção celeste aitoff da posição, em ascensão reta e declinação, dos dados do PaStA num sistema equatorial, para época J2000. Uma ausência de pontos ocorre no plano galáctico devido ao GALEX não observar objetos nessa área . . . . .	26
2.3	Magnitudes medidas de Gaia Collaboration et al. (2021) e suas incertezas. Entre magnitudes 6 e 16, encontram-se as melhores incertezas. Esses dados, sendo do catálogo pivô, caracterizam o catálogo PaStA. . . . .	27
2.4	Magnitudes medidas de Wright et al. (2010) e suas incertezas. W1 e W2 possuem uma faixa maior de incertezas confiáveis, enquanto W3 e W4 tem uma sensibilidade muito menor. Para objetos mais brilhantes que magnitude 6, o erro dos objetos aumenta conforme se aproxima do limite de saturação do instrumento. . . . .	28
2.5	Distribuições de magnitude do PaStA comparadas par-a-par. Os <i>FUV</i> e <i>NUV</i> em relação a outras magnitudes têm maior variância, que pode estar associado à falta de correções aplicadas, como extinção. W3 e W4 têm um certo limite para objetos mais fracos, onde seus dados se tornam mais dispersos. Nessas magnitudes se tem uma sensibilidade e sinal-ruído muito menor que as outras bandas. . . . .	30
2.6	Projeção celeste aitoff em coordenadas equatoriais da extinção mapeada por Schlegel et al. (1998) . . . . .	31

2.7	Valores de extinção $E_{B-V}$ para mapas Schlegel et al. (1998), Planck Collaboration et al. (2014) e Green et al. (2015). A relação 1:1 ilustrada pela reta azul representa o caso que ambos mapas teriam dados iguais. . . . .	31
2.8	Avermelhamento interestelar de Green et al. (2015) em relação a distância do objeto. Era esperada uma relação de proporcionalidade que não pôde ser identificada visualmente. A forma da distribuição dos dados também podem indicar efeito de várias linhas de visadas. . . . .	32
3.1	Diagrama da magnitude Gaia $G$ , em relação a cor $Bp - Rp$ . . . . .	34
3.2	Diagrama Cor-Magnitude relacionando magnitude absoluta $G$ com cor $Bp - Rp$ , destacando as componentes de um Diagrama HR. . . . .	38
3.3	CMDs para magnitudes $UV$ do GALEX . . . . .	39
3.4	CMDs para magnitude $J$ do AllWISE (2MASS) . . . . .	39
3.5	CMDs para magnitude $H$ do AllWISE (2MASS) . . . . .	40
3.6	CMDs para magnitude $K$ do AllWISE (2MASS) . . . . .	40
3.7	CMDs para magnitudes $W1$ e $W2$ do WISE . . . . .	41
3.8	Diagramas cor-cor baseados em $FUV - NUV$ . . . . .	41
3.9	Diagramas cor-cor baseados em $G_{BP} - G_{RP}$ . . . . .	42
3.10	Diagramas cor-cor baseados em $J - H$ . . . . .	43
3.11	Diagramas cor-cor baseados em magnitudes AllWISE . . . . .	43
3.12	Amostra de 9 objetos com parâmetros físicos bem definidos, posições em relação ao diagrama cor-magnitude $G$ por $Bp - Rp$ . . . . .	44
3.13	SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas. Objeto mais quente onde ocorre maior divergência para as bandas mais azuladas. . . . .	45
3.14	SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas. Objeto T Tauri em que não é esperado ajuste do modelo com bom comportamento em relação ao observado. . . . .	45
3.15	SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas. Divergências identificadas nos pontos UV e infravermelhos. Objeto de natureza desconhecida de acordo com <i>VizieR</i> . . . . .	46

3.16 SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas, mostrando em que pontos os modelos se ajustam ou divergem do observado. Binária espectroscópica de acordo com <i>VizieR</i> . . . .	46
3.17 SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas. . . . .	47
3.18 SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas. . . . .	47
3.19 SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas, mostrando em que pontos os modelos se ajustam ou divergem do observado. . . . .	48
3.20 SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas, mostrando em que pontos os modelos se ajustam ou divergem do observado. . . . .	48
3.21 SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas, mostrando em que pontos os modelos se ajustam ou divergem do observado. . . . .	49
3.22 Diferença dos parâmetros atmosféricos observados para o que foi deduzidos pelo modelo sintético. . . . .	49



# Lista de Tabelas

2.1	Bandas escolhidas para o PaStA . . . . .	27
-----	--	----



# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	21
1.1 Levantamentos Astronômicos . . . . .	21
1.2 Catálogos . . . . .	21
2. <i>Base de dados</i> . . . . .	23
2.1 Gaia EDR3, AllWISE, e GALEX . . . . .	23
2.2 Aquisição de Dados . . . . .	24
2.3 Amostra e estatísticas . . . . .	24
2.4 Extinção . . . . .	26
3. <i>Análise</i> . . . . .	33
3.1 Diagramas Hertzsprung–Russell . . . . .	33
3.1.1 Diagramas Cor-Magnitude com diferentes bandas . . . . .	34
3.1.2 Diagramas Cor-Cor . . . . .	35
3.2 Modelos de distribuição de energia espectral (SED) . . . . .	35
3.2.1 VOSA (Virtual Observatory SED Analyser) . . . . .	35
3.3 Estrelas de referência . . . . .	36
3.3.1 Comparação entre os parâmetros atmosféricos de referências e obtidos com VOSA . . . . .	36
4. <i>Conclusões</i> . . . . .	51
<i>Referências</i> . . . . .	53

<i>Apêndice</i>	55
<i>A. Query de ADQL executado por via de STILTS . . . . .</i>	57
<i>B. Estatísticas do catálogo . . . . .</i>	59

## Introdução

### 1.1 Levantamentos Astronômicos

Levantamentos, do inglês *survey*, são mapeamentos de regiões do céu que não têm um alvo específico definido, ou então um conjunto de observações de objetos com características em comum (*surveys* de galáxias, por exemplo). Sem ter alvos específicos, consistem no mapeamento de regiões do céu, se restringindo a uma ou mais bandas do espectro eletromagnético dependendo de quais detectores são usados na missão.

Esses levantamentos permitem realizar pesquisas científicas sem a demanda adicional de tempo de telescópios, em contrapartida a realizar observações de alvos específicos de forma mais pontual, onde é necessário a alocação de tempo em um certo instrumento. E já nos casos que seja preciso o tempo de telescópio, um levantamento realizado anteriormente já garante acesso a dados para auxiliar na escolha de objetos e fundamentam hipóteses que seriam apresentadas aos comitês de alocação.

No estudo de transientes, levantamentos disponibilizam uma base de dados para serem comparadas com as detecções identificadas desses possíveis eventos.

### 1.2 Catálogos

Catálogos astronômicos reúnem dados de objetos celestes. Os catálogos modernos são montados a partir de levantamentos e são descritos em termos de completude e precisão pela magnitude limitante, os objetos mais fracos detectados, e a acurácia da posição dos objetos.

Historicamente eram usados para mapear o céu noturno, os catálogos modernos também buscam reunir objetos com propriedades em comum para estudos dirigidos. Dados coleta-

dos em missões de *surveys* são disponibilizados para acesso em forma de catálogos.

A junção de um ou mais banco de dados de objetos astronômicos é feita pelo processo de *cross-matching*, que é o pareamento de objetos em uma primeira tabela (a pivô) com objetos de outra a partir de um dado critério: alguma coordenada ou identificador, e uma tolerância máxima ao seu redor. Para cada ponto no pivô, aplica-se o critério na busca de um correspondente na segunda, podendo ser encontrado ou não. O resultado são dados de todos objetos pareados e suas informações disponíveis nas duas tabelas.

O Atlas Estelar Pancromático (PaStA) é um catálogo estelar que busca unir levantamentos que tenham observado pelo menos 60% do céu e com ampla cobertura de bandas eletromagnéticas. O catálogo dá acesso para fontes luminosas de até magnitude 21 na banda G do Gaia, dados de astrometria, e fluxos do infravermelho até o ultravioleta. Um catálogo dessa forma facilita o acesso a dados de estrelas a serem usados em uma diversidade de estudos. Neste trabalho, por exemplo, os dados são usados para amostrar objetos com parâmetros atmosféricos bem definidos, aplicar as observações desses em modelos sintéticos e comparar os parâmetros gerados com a referência da literatura.

## Base de dados

### 2.1 *Gaia EDR3, AllWISE, e GALEX*

Com base em *surveys* disponíveis na literatura, 3 foram escolhidos por apresentar as características mais desejadas para a montagem do PaStA.

Gaia (Gaia Collaboration et al., 2021), no lançamento prévio de sua terceira versão (EDR3), apresenta fotometria e astrometria para objetos com profundidade ótica de magnitude 21, com observações de 1,8 bilhões de objetos, 1,5 bilhões desses com informação nas 3 bandas  $G$ ,  $G_{BP}$  e  $G_{RP}$ . Sendo assim um levantamento mais populoso e com um bom limite de magnitude para objetos mais fracos, Gaia é escolhido como a base do catálogo.

As missões *Wide-field Infrared Survey Explorer* (Wright et al., 2010) e sua versão posterior AllWISE (Cutri & et al., 2013) buscam mapear o céu nas faixas do infravermelho médio. Para 747 milhões de objetos seus limites de saturação para as bandas  $W1$  e  $W2$  estão nas magnitudes 8 e 7 respectivamente, com níveis de completeza acima de 95% até as magnitudes 17.1 e 15.7 para essas mesmas bandas, respectivamente, e para  $W3$  e  $W4$  os níveis são de 11.5 e 7.7, essas bandas contaram com observações menos precisas, o que resulta em menor sinal-ruído. Esses dados já são cruzados com os catálogos 2MASS pontual e extenso (Skrutskie et al., 2006), adicionando mais as bandas  $J$ ,  $H$  e  $K$ .

O *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX) obteve imagens no ultravioleta próximo ( $NUV$ ) e ultravioleta distante ( $FUV$ ), mapeando 77% do céu em pelo menos uma banda (Bianchi et al., 2014).

A partir dos dados do Gaia, essa combinação de levantamentos no PaStA adiciona uma cobertura espectral de  $154,5nm$ , das bandas UV do GALEX, até  $22,08\mu m$ , das bandas IV do AllWISE. Assim, para um objeto presente no catálogo, está disponibilizado fotometria

nessa cobertura espectral já com os dados de astrometria do Gaia.

## 2.2 Aquisição de Dados

A partir de um programa em *Python*, executa-se uma aplicação de STILTS (*Starlink Tables Infrastructure Library Tool Set*) para buscar objetos em uma área definida do céu. Esta aplicação envia um *query* em *Astronomical Data Query Language* (ADQL) para o banco de dados do Gaia e posteriormente faz o *cross-match* da tabela encontrada com GALEX e AllWISE (vide Apêndice A). Esta seleção usa critérios astrométricos de qualidade conforme Lindegren et al. (2018) para buscar apenas objetos com pequenos erros associados ao paralaxe (menor que 20% de seu valor).

Efetivamente esses critérios na busca fazem um corte nos dados, ilustrado na Figura 2.1, agindo como um limite superior para otimização dos erros de paralaxe.

O programa divide o céu em pequenas áreas para buscar de maneira consecutiva, em vez de realizar uma busca única para o todo o céu. Cada área a ser varrida do céu é feita de forma independente, com exibição dos resultados, o que facilita a detecção de erros durante a execução do programa, uma vez que o processo todo precisa de dias de processamento. O resultado final obtém objetos de todo o céu, com uma ausência de pontos no plano da Via Láctea, visto na Figura 2.2, aonde não há objetos observados pelo GALEX.

## 2.3 Amostra e estatísticas

O catálogo final contém 8.709.742 objetos (sendo que 92.483 constam como fonte duplicadas) e 146 colunas de informações proveniente das 3 *surveys*. Suas estatísticas estão representadas no Apêndice B. Entre essas, 12 são medidas de magnitudes, mostradas na Tabela 2.1.

Como Gaia foi usada de tabela pivô, suas magnitudes e incertezas (Figura 2.3) apresentam uma boa descrição dos objetos na faixa da radiação visível. Aproximadamente entre as faixas de magnitude de 6 até 14 se encontra um limite inferior das incertezas, esse valor aumenta conforme se aproxima dos limites de saturação para objetos mais brilhantes, e da sensibilidade do instrumento para objetos mais fracos.

É necessário destacar os comportamentos das bandas do WISE em relação a seu sinal-ruído (Figura 2.4). As magnitudes  $W1$  e  $W2$  se comportam bem para uma faixa mais

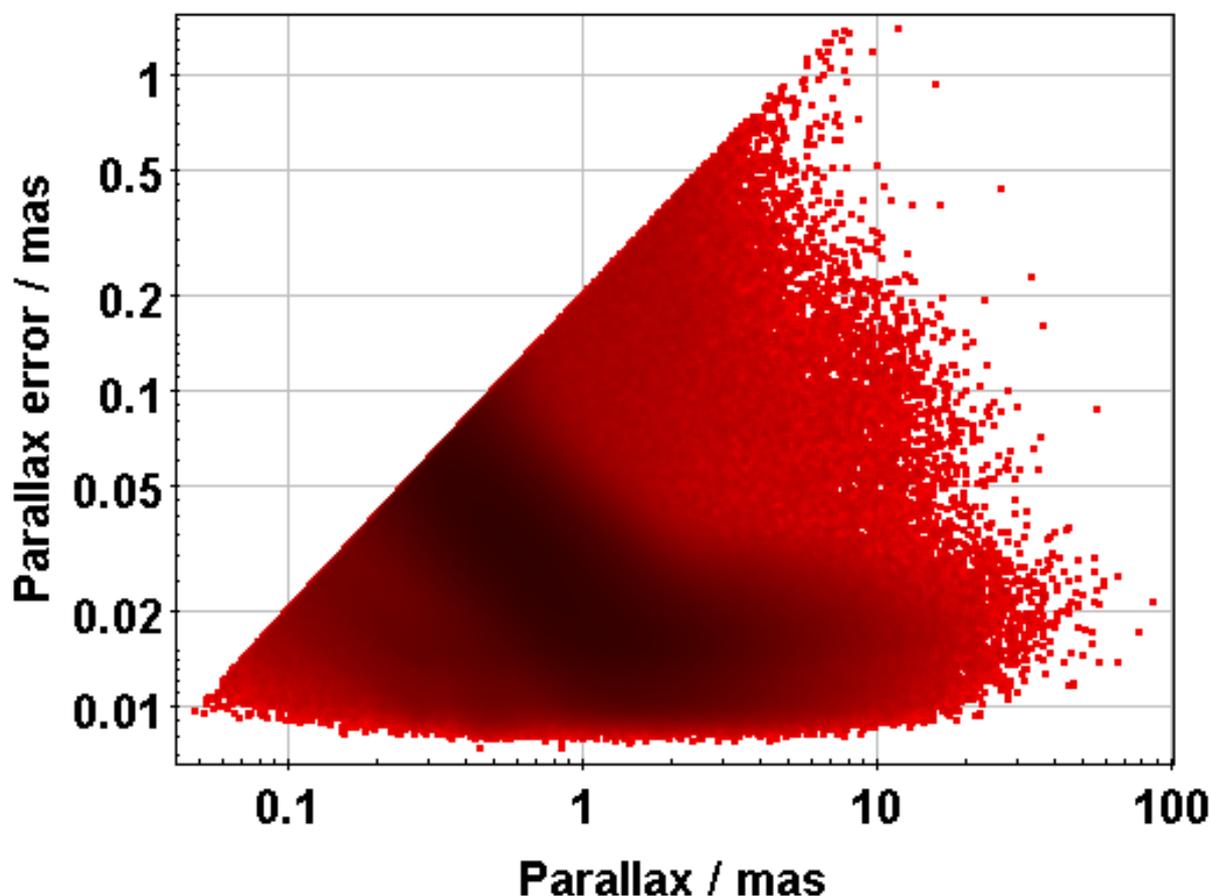


Figura 2.1: Paralaxe e incerteza para os dados do Gaia, com corte aplicado pelo critério astrométrico do *query* de dados, onde fixa um limite máximo de 20% do paralaxe sob o erro nos dados buscados

ampla de magnitudes em comparação com  $W3$  e  $W4$ , onde os limites são muito menores, como citado na Seção 2.1. O sinal-ruído cresce rapidamente já para magnitude 9 no caso do  $W3$  e magnitude 7 no caso do  $W4$ .

A partir de todas as magnitudes disponíveis uma comparação do tipo *pairwise* permite ilustrar os comportamentos entre todos esses dados e suas distribuições individuais, mostrado na Figura 2.5. É visível uma alta dispersão dos dados em ultravioleta do GALEX em relação a outras magnitudes. Também para  $W3$  e  $W4$ , encontra-se um limite para magnitudes mais fracas, aonde ocorre um aumento significativo nas dispersões.

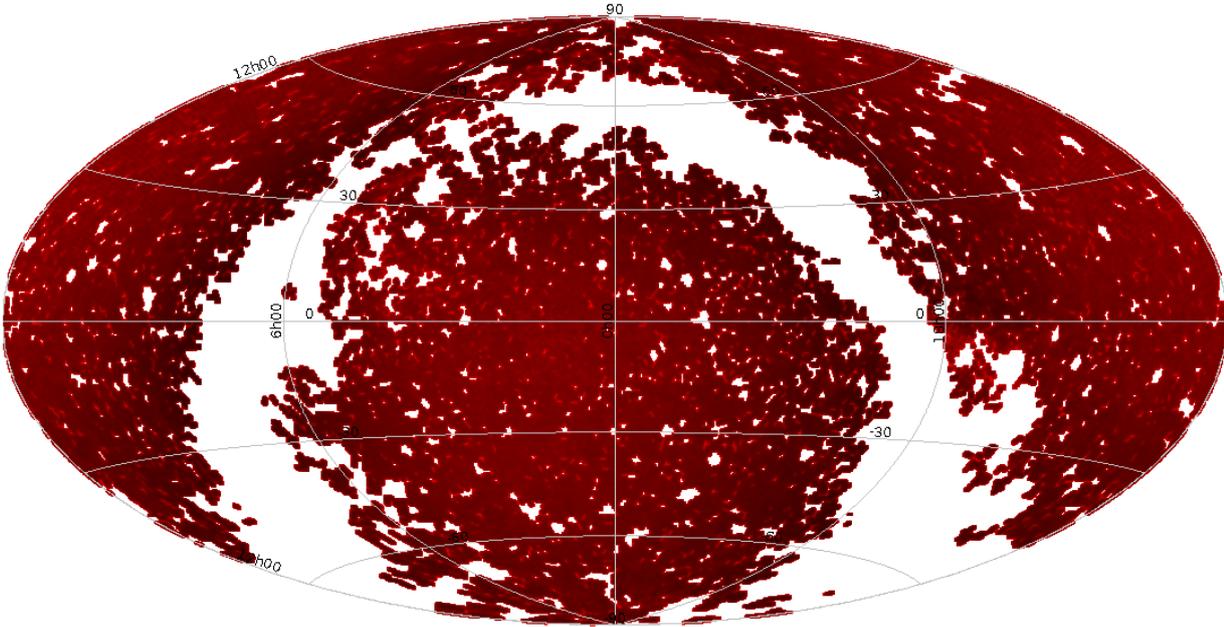


Figura 2.2: Projeção celeste aitoff da posição, em ascensão reta e declinação, dos dados do PaStA num sistema equatorial, para época J2000. Uma ausência de pontos ocorre no plano galáctico devido ao GALEX não observar objetos nessa área

## 2.4 Extinção

Extinção é o processo de espalhamento e absorção da radiação eletromagnética emitida por um objeto astronômico, causada pela presença de partículas de poeira ou gás entre a fonte emissora e o observador. A extinção varia de acordo com o comprimento de onda: de um espectro irradiado, fótons mais energéticos (com comprimento de onda menor) são mais absorvidos que fótons com menor energia, que no ótico é a luz mais vermelha. O avermelhamento pode ser representado por um “excesso de cor” (Equação 2.1), comparando os valores de magnitude observados com valores esperados caso não a luz não sofresse extinção.

$$E_{B-V} = (B - V)_{\text{observado}} - (B - V)_{\text{intrinseco}} \quad (2.1)$$

O pacote *dustmaps* (Green, 2018) para a linguagem Python é uma interface para acesso a mapas bidimensionais e tridimensionais de extinção e avermelhamento interestelar. Mapas bidimensionais disponibilizam a extinção  $E_{B-V}$  para uma dada posição no

Tabela 2.1 - Bandas escolhidas para o PaStA

Banda	$\lambda_{\text{médio}} (\text{\AA})$	Survey
<i>FUV</i>	1545.83	GALEX
<i>NUV</i>	2344.90	GALEX
<i>G<sub>BP</sub></i>	5319.90	Gaia
<i>G</i>	6735.42	Gaia
<i>G<sub>rp</sub></i>	7992.90	Gaia
<i>J</i>	12350.00	AllWISE (2MASS)
<i>H</i>	16620.00	AllWISE (2MASS)
<i>K</i>	21590.00	AllWISE (2MASS)
<i>W1</i>	33526.00	AllWISE
<i>W2</i>	46028.00	AllWISE
<i>W3</i>	115608.00	AllWISE
<i>W4</i>	220883.00	AllWISE

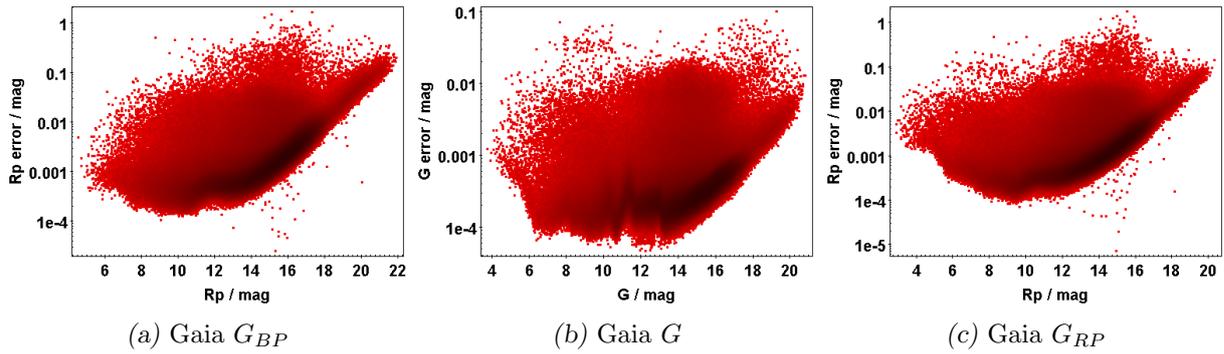


Figura 2.3: Magnitudes medidas de Gaia Collaboration et al. (2021) e suas incertezas. Entre magnitudes 6 e 16, encontram-se as melhores incertezas. Esses dados, sendo do catálogo pivô, caracterizam o catálogo PaStA.

céu, enquanto os tridimensionais, além de considerarem essa posição, também consideram a distância ao objeto. Os mapas disponibilizam a extinção para um dado objeto usando as informações de posição (ascensão reta e declinação em J2000) do PaStA. O *survey* GALEX já contém os dados de um mapa de extinção (Schlegel et al., 1998) em seu banco de dados, ilustrado na Figura 2.6. Estes valores foram comparados com outros mapas: Planck Collaboration et al. (2014), que ajusta modelos de emissão de corpo-negro de poeira aos dados infravermelhos de *surveys* IRAS e Planck; e Green et al. (2015) que mapeia em três dimensões o avermelhamento da Galáxia ao norte da declinação de  $-30^\circ$ .

Comparando os mapas de extinção, uma suposição inicial é que seus comportamentos

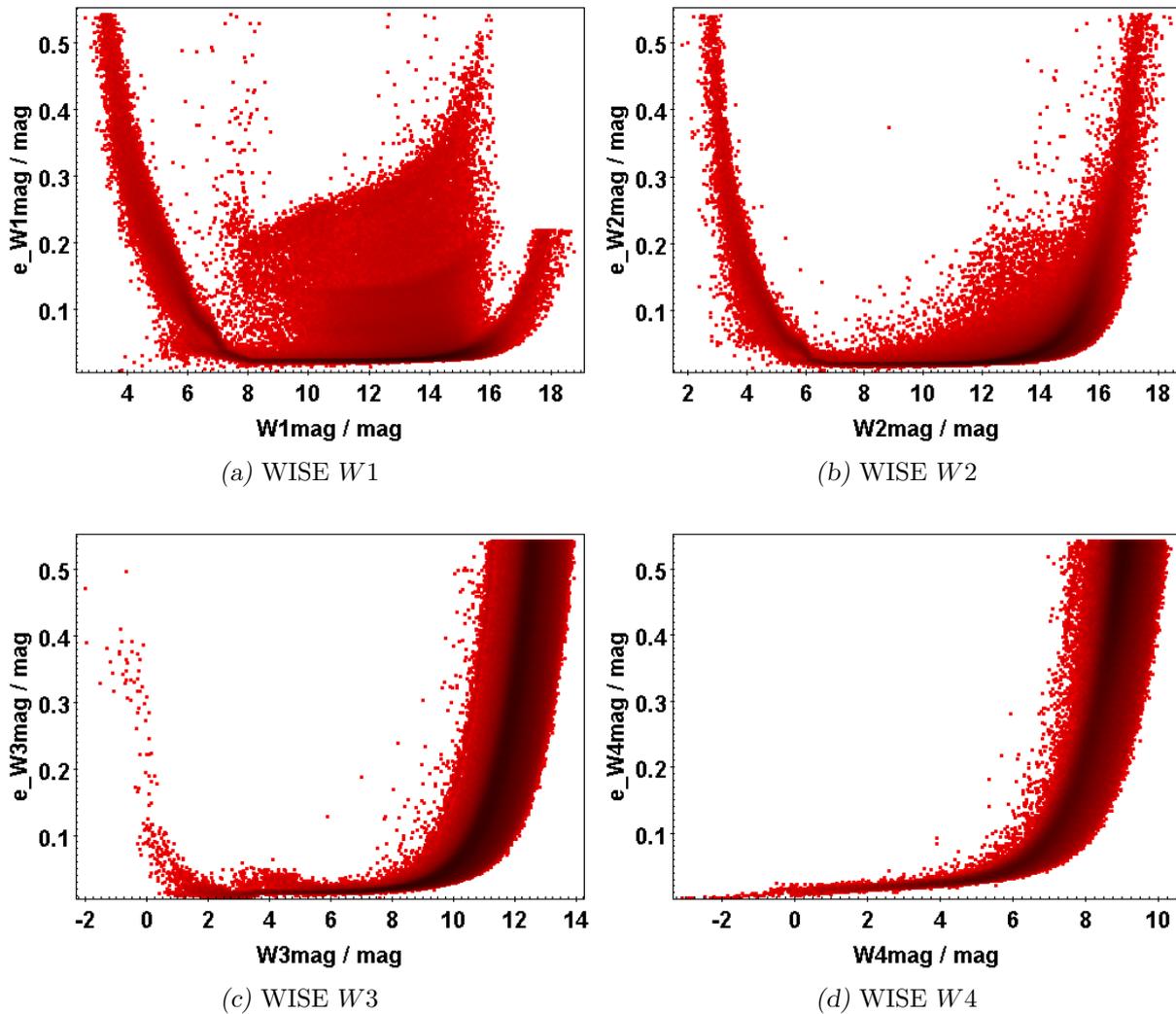


Figura 2.4: Magnitudes medidas de Wright et al. (2010) e suas incertezas. W1 e W2 possuem uma faixa maior de incertezas confiáveis, enquanto W3 e W4 tem uma sensibilidade muito menor. Para objetos mais brilhantes que magnitude 6, o erro dos objetos aumenta conforme se aproxima do limite de saturação do instrumento.

sejam similares na ausência de erros, então é esperado uma relação 1:1 entre seus dados (Figura 2.7). O ocorrido foi uma dispersão alta em torno de uma aparente tendência linear. Já com relação entre os mapas bidimensionais e Green et al. (2015), o comportamento linear um-a-um aparece na forma de um limite superior em relação ao que pode ser feito usando mapas tridimensionais.

No mapa tridimensional é esperado que a extinção para um objeto seja proporcional à sua distância, devido à maior quantidade de interações no meio interestelar que a luz encontra no trajeto até o observador. Extinções de Green et al. (2015) foram comparadas com distâncias do Gaia (derivados da paralaxe), mostrado na Figura 2.8. A relação entre

---

os dados tem alto grau de dispersão e sem maiores tendências identificadas, o que pode estar ocorrendo devido a um efeito de várias linhas de visadas possíveis.

O estudo desses comportamentos auxiliou na decisão de usar os dados de Schlegel et al. (1998), uma vez que não foram identificadas maiores divergências ou vantagens entre os outros mapas, e este por padrão já está disponível no catálogo devido ao *cross-match* com GALEX.

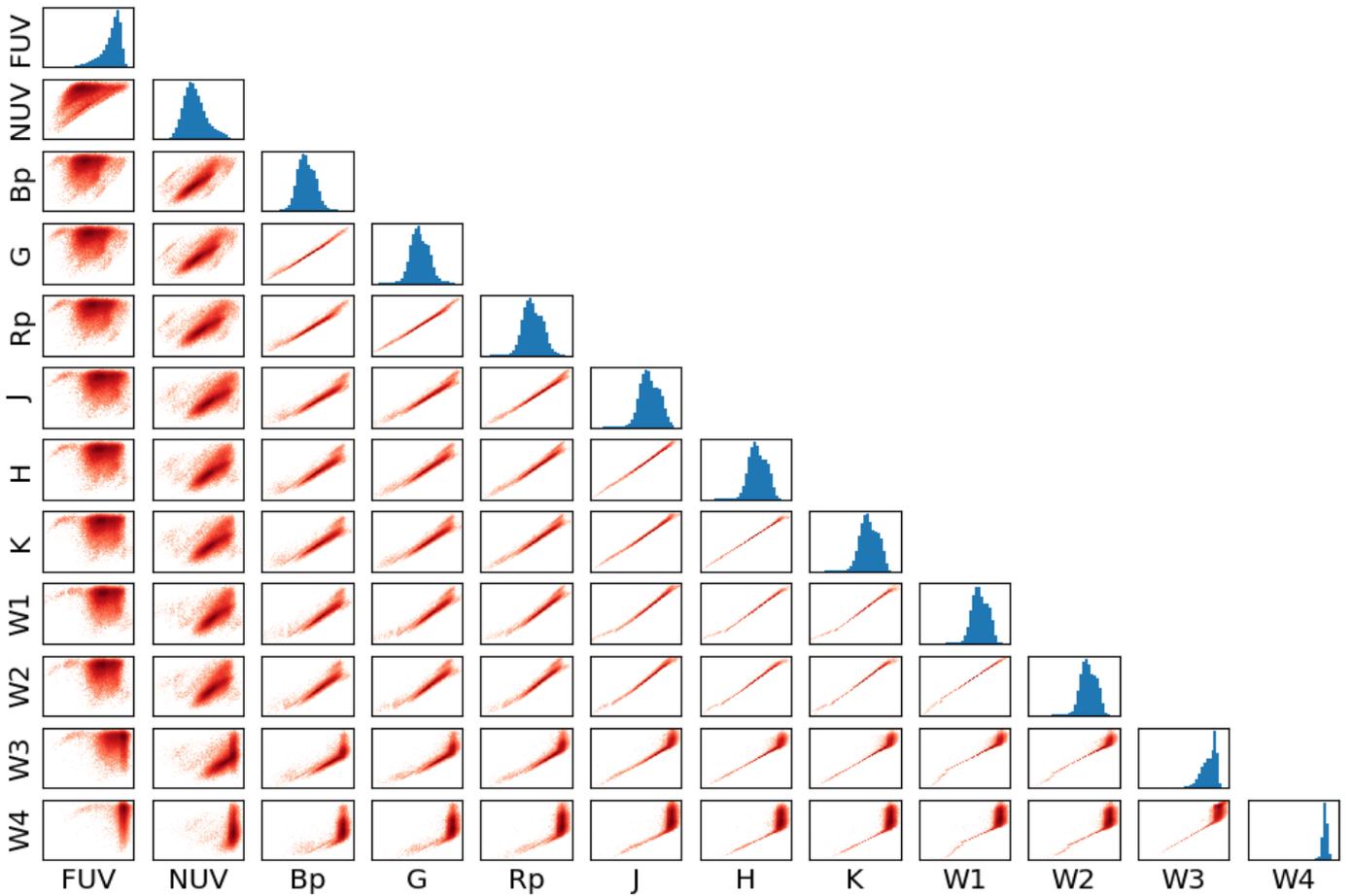


Figura 2.5: Distribuições de magnitude do PaStA comparadas par-a-par. Os *FUV* e *NUV* em relação a outras magnitudes têm maior variância, que pode estar associado à falta de correções aplicadas, como extinção. *W3* e *W4* têm um certo limite para objetos mais fracos, onde seus dados se tornam mais dispersos. Nessas magnitudes se tem uma sensibilidade e sinal-ruído muito menor que as outras bandas.

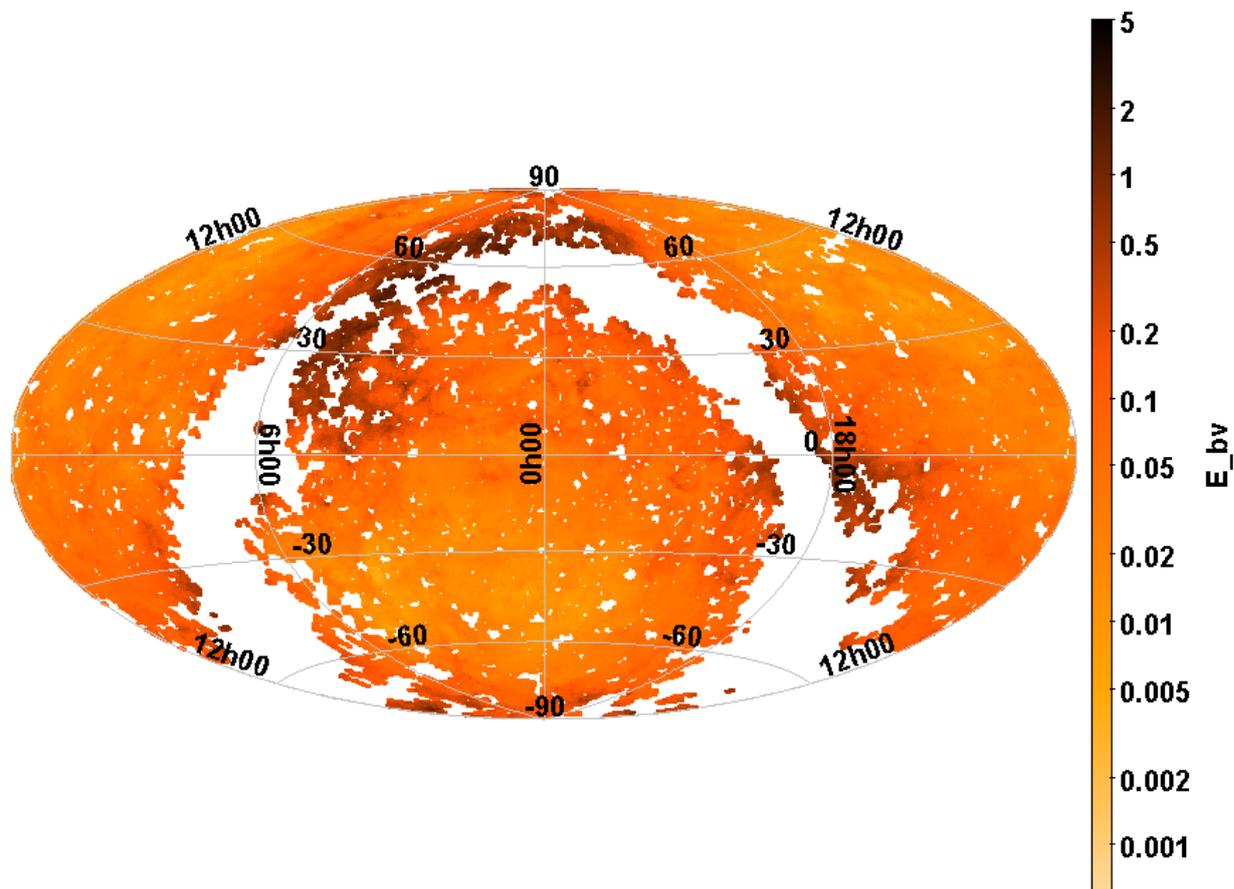


Figura 2.6: Projeção celeste aitoff em coordenadas equatoriais da extinção mapeada por Schlegel et al. (1998)

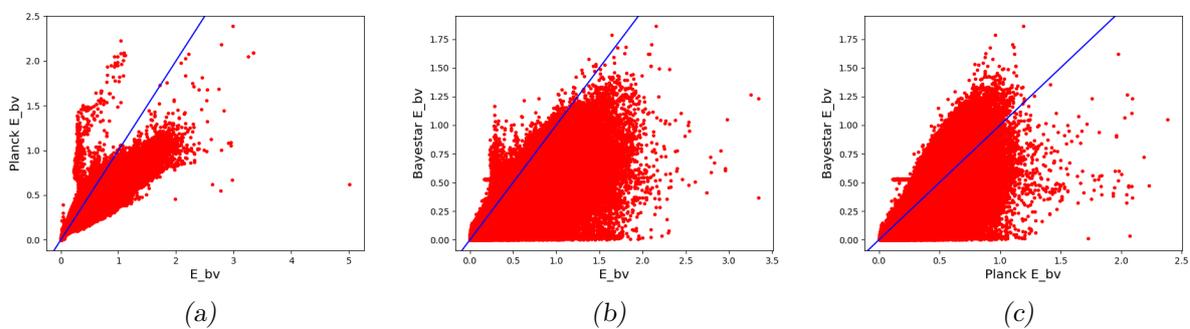
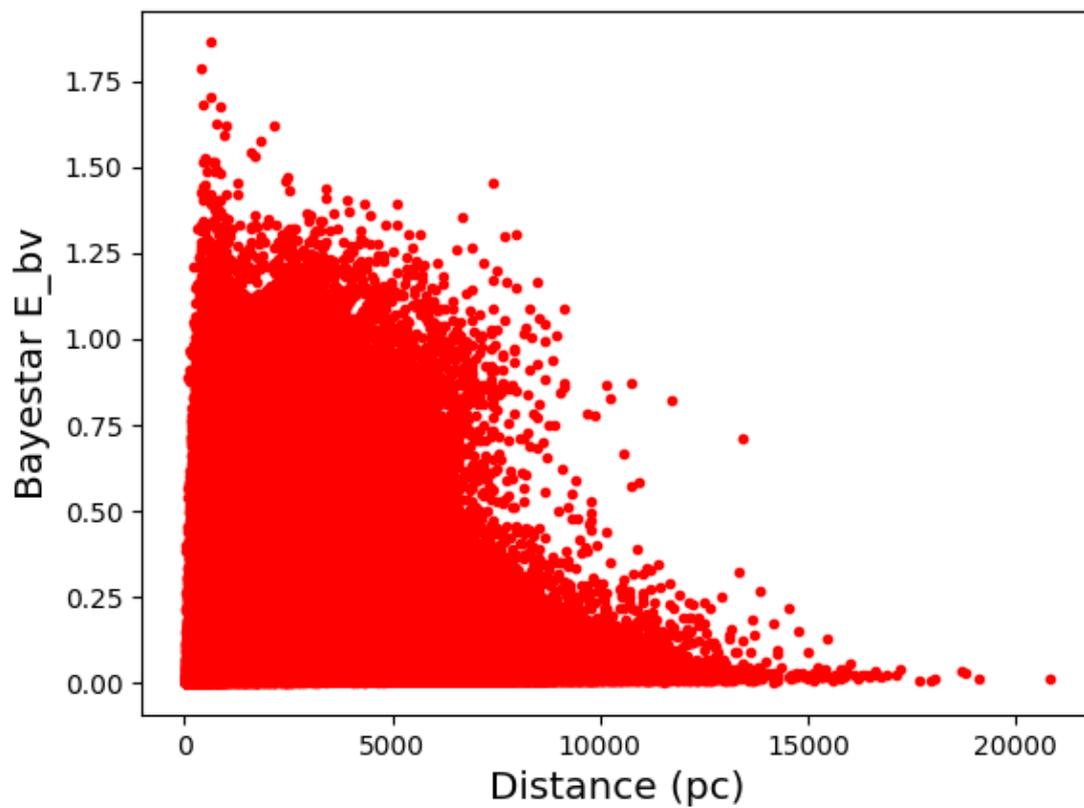


Figura 2.7: Valores de extinção  $E_{B-V}$  para mapas Schlegel et al. (1998), Planck Collaboration et al. (2014) e Green et al. (2015). A relação 1:1 ilustrada pela reta azul representa o caso que ambos mapas teriam dados iguais.



*Figura 2.8:* Avermelhamento interestelar de Green et al. (2015) em relação a distância do objeto. Era esperada uma relação de proporcionalidade que não pôde ser identificada visualmente. A forma da distribuição dos dados também podem indicar efeito de várias linhas de visadas.

## Análise

### 3.1 Diagramas Hertzsprung–Russell

Diagramas Hertzsprung-Russel associam a magnitude das estrelas com temperatura. Também aparecem na forma com dados observacionais com seus eixos representando uma magnitude absoluta contra um índice de cor, ou comparando dois índices de cor. Um diagrama cor-magnitude montando com os dados do Gaia presentes no PaStA está representado na Figura 3.1.

Em uma montagem inicial usando a magnitude aparente observada, é difícil de observar as sequências esperadas. Usando os dados do Gaia, a distância é deduzida computando o inverso da paralaxe para determinado objeto. Isso é usado para obter a magnitude absoluta pela Equação 3.1, onde  $M$  é a magnitude absoluta,  $m$  a magnitude aparente e  $p$  a paralaxe em segundos de arco. Pelo critério de seleção astrométrica, o catálogo possui dados com erros associados ao paralaxe somente menores que 20% do seu valor, o que permite fazer a dedução da distância dessa maneira. Para os casos de erro acima de 20%, é preciso aplicar técnicas Bayesianas para que a distância seja deduzida a partir da paralaxe, o que foge o escopo desse trabalho.

$$M = m + 5 - 5 \cdot \log_{10} \left( \frac{1000}{p} \right) \quad (3.1)$$

Esses diagramas são usados como meio de identificar estruturas chamadas de sequências, aonde estrelas de um mesmo estágio evolutivo se acumulam, e também estimar características físicas como temperatura e abundâncias. No diagrama montado a partir dos dados do Gaia, regiões das sequências foram selecionadas e marcadas, como ilustrado na Figura 3.2, assim podendo verificar a posição destes objetos em outros índices de cor e

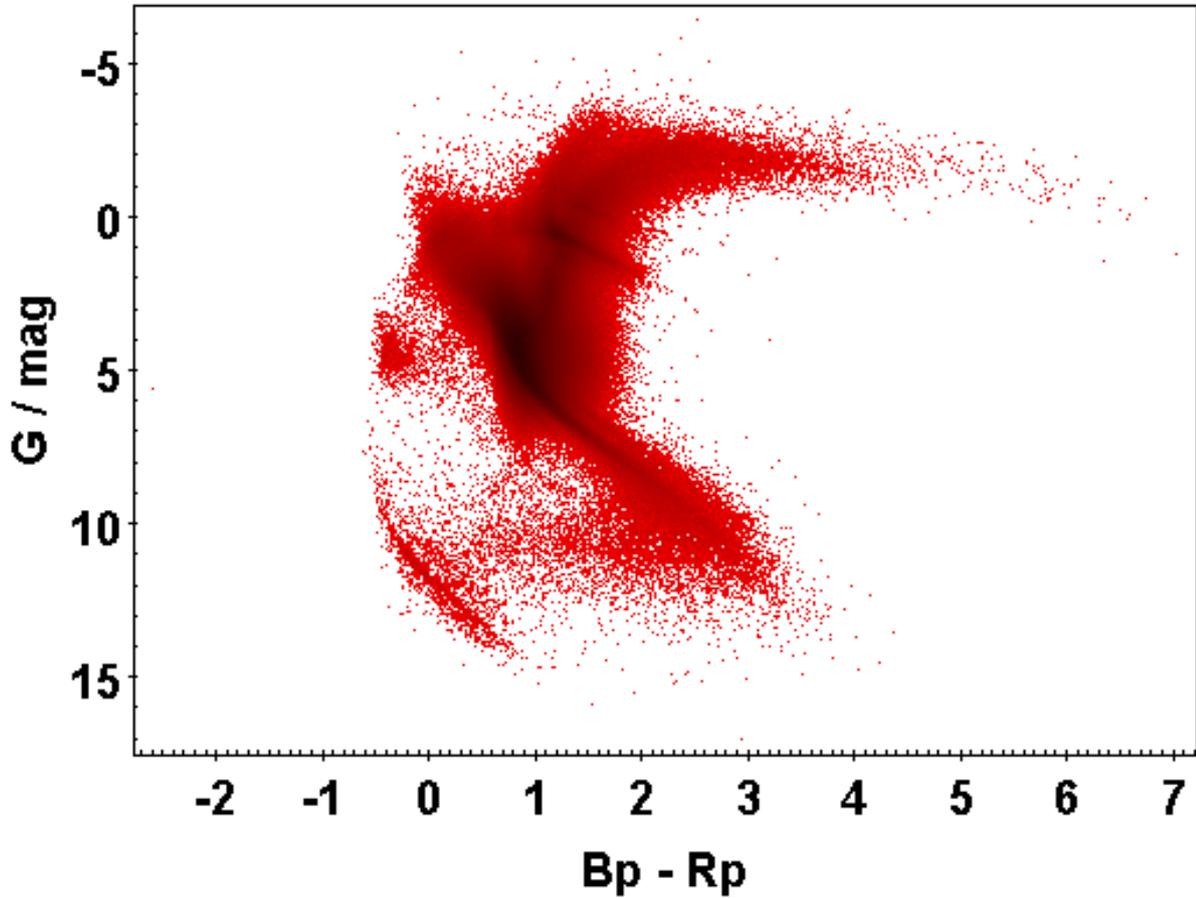


Figura 3.1: Diagrama da magnitude Gaia  $G$ , em relação a cor  $B_p - R_p$

magnitudes. Destacaram-se as regiões: sequência principal, ramo horizontal, ramo das gigantes, sub-anãs, e anãs brancas.

### 3.1.1 Diagramas Cor-Magnitude com diferentes bandas

Usando a ampla seleção de bandas do PaStA, é feita uma análise exploratória de como se comportam as sequências do Diagrama HR em outras bandas. Num geral, é notável uma ordenação das estruturas em relação a luminosidade: anãs brancas, sequência principal com subgigantes no seu meio, ramo horizontal, gigantes, nesta ordem. Apenas para os diagramas ultra-violeta ocorre uma mistura das categorias em meio a uma sequência principal bem dispersa, visto em 3.3.

Os diagramas para magnitudes mais vermelhas se comportam de maneiras parecidas (Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7). Aqui é possível ver a ordem de acordo com a magnitude das sequências citadas. No caso dos diagramas baseado nas magnitudes de AllWISE (Figura

3.7), as gigantes se separam em dois grupos: um como aparecem em outros diagramas na ordenação detectada, e um grupo mais disperso fora dessa linha principal. Uma hipótese inicial sugere a presença de objetos binários, mas essa hipótese ainda precisa ser testada.

### 3.1.2 Diagramas Cor-Cor

Tal como os Diagramas Cor-Magnitude, os Diagramas Cor-Cor são meios exploratórios de dados astronômicos, comparando magnitudes aparentes em comprimentos de ondas diferentes. Os diagramas, aqui representados nas Figuras 3.8, 3.9, 3.10, e 3.11, mostram o comportamento dos objetos do catálogo em relação às cores. Como no caso dos CMDs, existe uma ordenação das estruturas.

Em relação as cores ultravioleta, nas Figuras 3.8, os dados se estruturam mas ainda há uma grande dispersão em relação a cor  $FUV - NUV$ .

Em relação as cores do Gaia, na Figura 3.9, a dispersão reduz. Ainda ocorre mistura dos dados das seqüências, mas se torna mais fácil visualizar anãs brancas comparando com cores mais vermelhas.

Usando as cores do AllWISE como base, os dados se tornam mais dispersos e as seqüências mais difíceis de separar, visto nas Figuras 3.10 e 3.11.

## 3.2 Modelos de distribuição de energia espectral (SED)

A distribuição de energia espectral (SED, do inglês *Spectral Energy Distribution*) é a relação da energia com a frequência ou comprimento de onda, usadas para caracterizar objetos astronômicos.

### 3.2.1 VOSA (*Virtual Observatory SED Analyser*)

O *Virtual Observatory SED Analyser* (VOSA) (Bayo et al., 2008) é um serviço do Observatório Virtual que realiza tarefas automatizadas a partir de tabelas de fotometria cedidas pelo usuário. O VOSA faz estudos estatísticos, compara modelos sintéticos e parâmetros, estimativa de luminosidades, massa, e idade.

A partir da biblioteca de modelos de Coelho (2014), ajustamos SEDs aos dados de comprimento de onda disponíveis no PaStA. Estes modelos foram escolhidos por serem do grupo de trabalho dos autores, facilitando a interpretação das divergências encontradas.

Os ajustes resultam em parâmetros atmosféricos sintéticos que podem ser comparados com referências de observações de alta precisão, como forma de avaliar a performance dos modelos em diferentes quesitos.

### 3.3 Estrelas de referência

Projetos de espectroscopia de alta resolução, com qualidade boa de dados, disponibilizam estrelas com parâmetros atmosféricos bem definidos. Estes objetos são boas referências a serem comparados com modelos.

Gaia-FGK (Jofré et al., 2018) reúne objetos com parâmetros atmosféricos que puderam ser determinados com acurácia. Entretanto, ao parear estes objetos com o catálogo PaStA, adotando faixas de erro em torno de 1 segundo de arco, assim identificando objetos individuais, não houve resultados, uma vez que os objetos são mais brilhantes que a faixa de magnitude presente no catálogo.

O levantamento Gaia-ESO (Gilmore et al., 2012) busca espectros de alta resolução para objetos na Via Láctea de até magnitude 19, disponibilizando amostras de todas possíveis idades e metalicidades. Pareando com o catálogo num raio definido de 0.5 segundo de arco, 1.687 objetos foram encontrados. Destes, foram escolhidos objetos com informações em todas as bandas do PaStA, o que reduz o número para 27, e destes, objetos com informações de temperatura efetiva ( $T_{eff}$ ) e gravidade ( $\log g$ ), resultando numa amostra de 9 estrelas (Figura 3.12).

#### 3.3.1 Comparação entre os parâmetros atmosféricos de referências e obtidos com VOSA

Usando as 9 estrelas amostradas e seus dados disponíveis no PaStA, modelos das SEDs foram ajustados no VOSA (Figuras ??). Num geral os modelos se comportaram bem exceto para as bandas W3 e W4 do AllWISE, e os pontos ultra-violeta NUV e FUV do GALEX. Realizar os ajustes sem estes pontos não resulta em um ajuste consideravelmente melhor. Para as duas bandas do AllWISE já era um comportamento esperado devido a taxa sinal-ruído baixa. Esses pontos também são muito mais sensíveis ao avermelhamento e variações podem vir a indicar a presença de uma componente mais fria no objeto, como um disco de poeira, uma região de gás frio ou uma estrela secundária menos quente, como anãs-marrons. Alterações no ultra-violeta, por outro lado, podem indicar a presença de

uma componente quente, atividade cromosférica mais energética, um objeto binário ou disco aquecido cuja emissão nessa região do espectro se torna mais considerável. Os 9 objetos foram identificados com a ferramenta VizieR: Uma estrela numa região de formação estelar Chameleon I, na Figura 3.13. O objeto na Figura 3.14 é do tipo T Tauri, para qual é esperada a variância entre o observado e o modelo, uma vez que este se comporta melhor com estrelas da sequência principal na vizinhança solar. Um “objeto de natureza desconhecida”, da Figura 3.15. Uma binária espectroscópica, na Figura 3.16. Uma estrela com alto movimento próprio, na Figura 3.17. E os outros objetos apenas foram identificados como estrelas, sem maiores detalhes adicionais.

Os resultados obtidos com o VOSA gerou parâmetros atmosféricos que foram comparados com a referência de Gilmore et al. (2012). É notável que os valores de temperatura efetiva se comportam bem (Figura 3.22a) com o ajuste de SED, exceto para o objeto mais quente (Figura 3.13), onde se observou maior diferença entre o sintético e a referência. Na comparação das SED modelada e observada para essa estrela, o ajuste mostra um fluxo muito maior na região ultra-violeta do que foi observado, o que é esperado dessa faixa de temperatura.

A diferença de gravidade  $\log(g)$  também não possui variações muito significativas (Figura 3.22b), apenas um objeto (Figura 3.18), que divergiu a SED sintética do observado.

A metalicidade se comportou bem (Figura 3.22c), exceto para a T Tauri (Figura 3.14). Os dados parecem mostrar uma tendência, mas é impossível testar essa hipótese com a quantidade baixa de pontos.

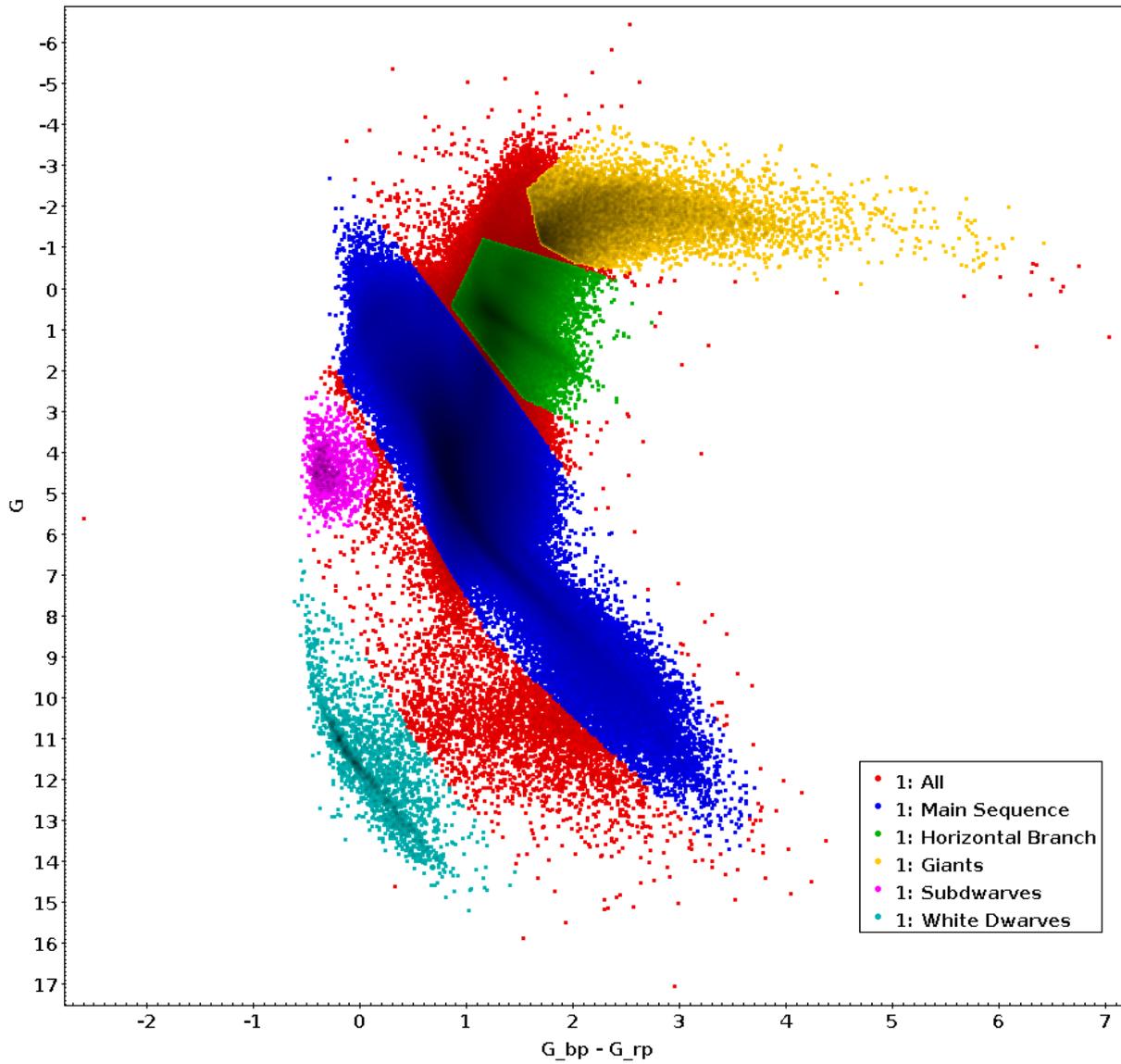
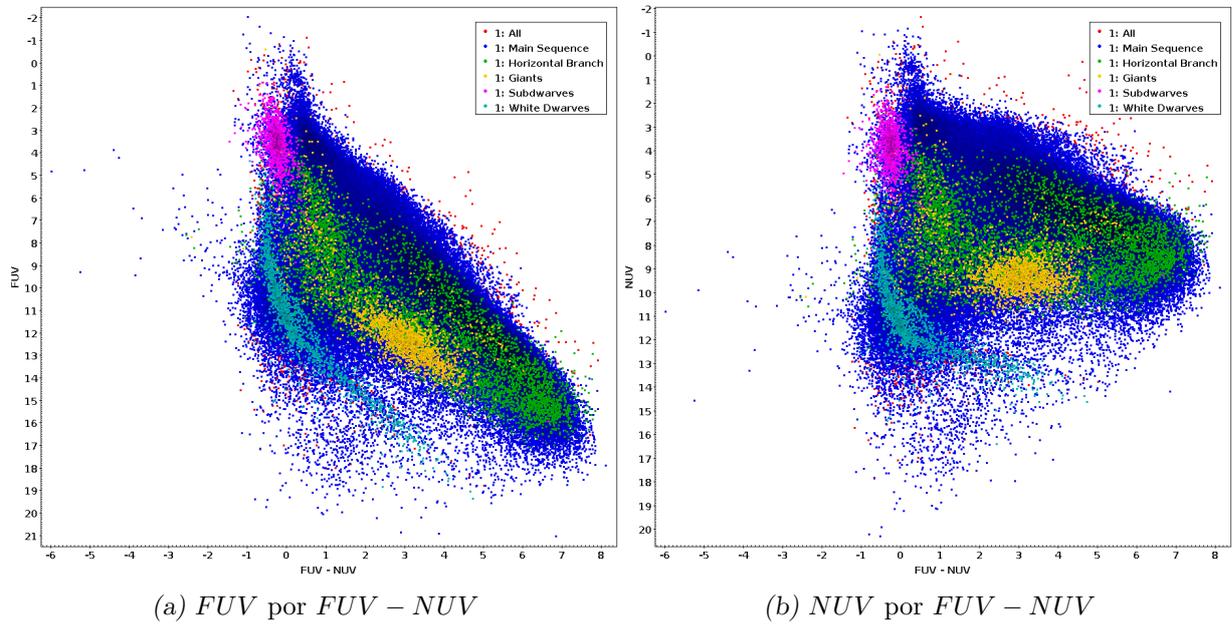
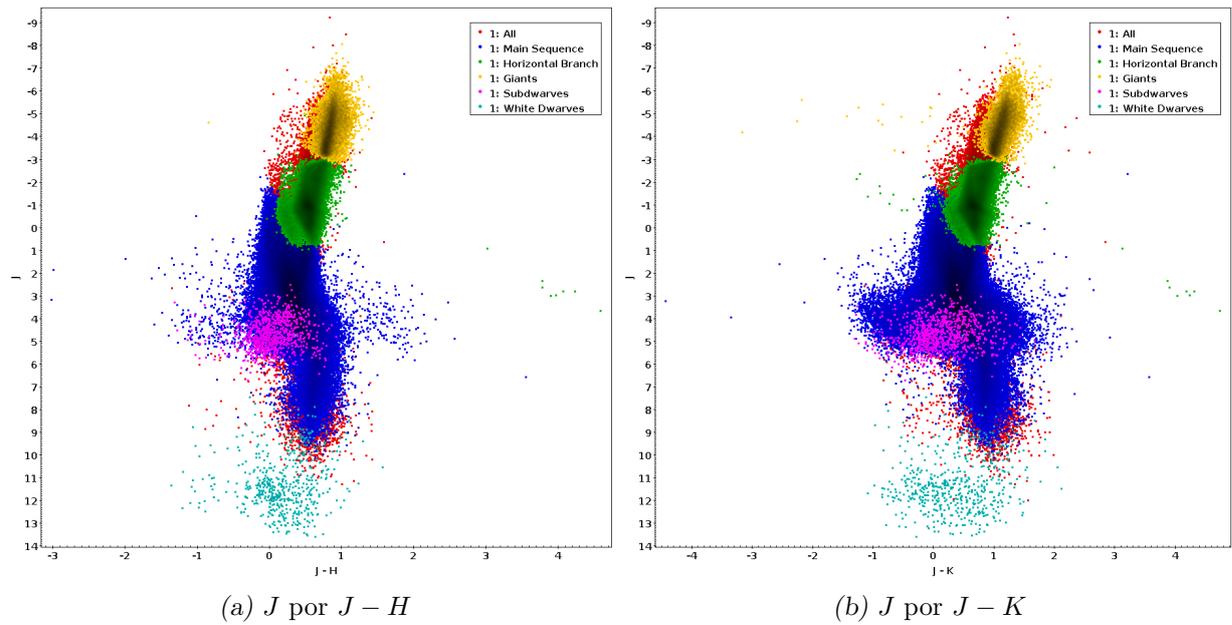


Figura 3.2: Diagrama Cor-Magnitude relacionando magnitude absoluta  $G$  com cor  $Bp - Rp$ , destacando as componentes de um Diagrama HR.

Figura 3.3: CMDs para magnitudes  $UV$  do GALEXFigura 3.4: CMDs para magnitude  $J$  do AllWISE (2MASS)

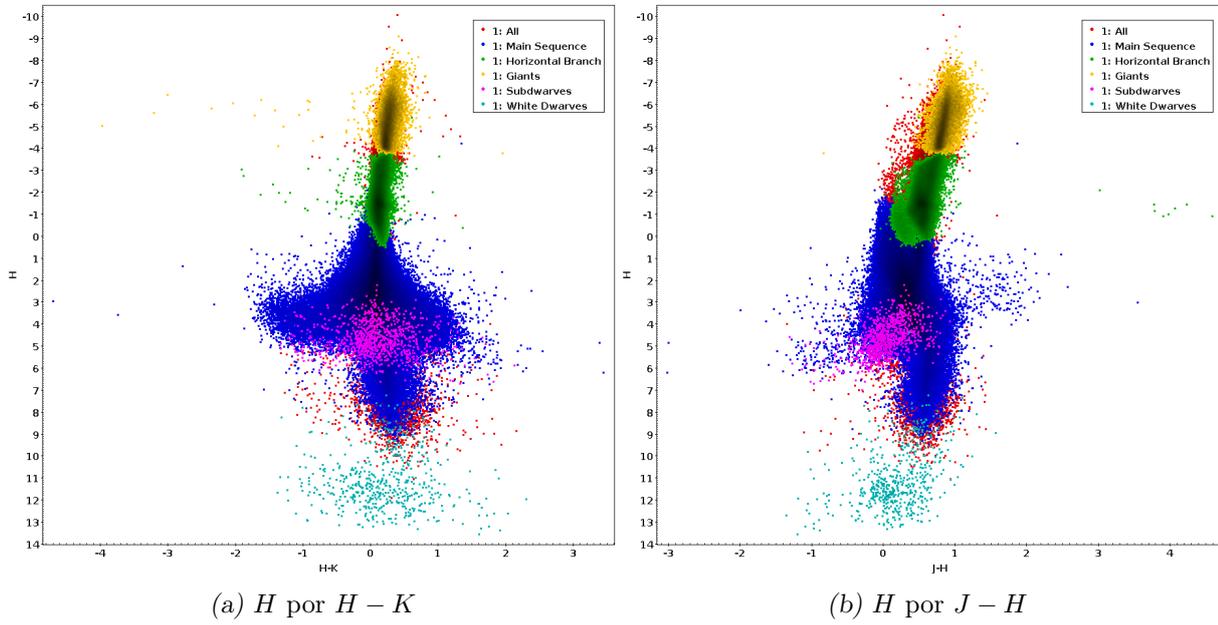


Figura 3.5: CMDs para magnitude  $H$  do AllWISE (2MASS)

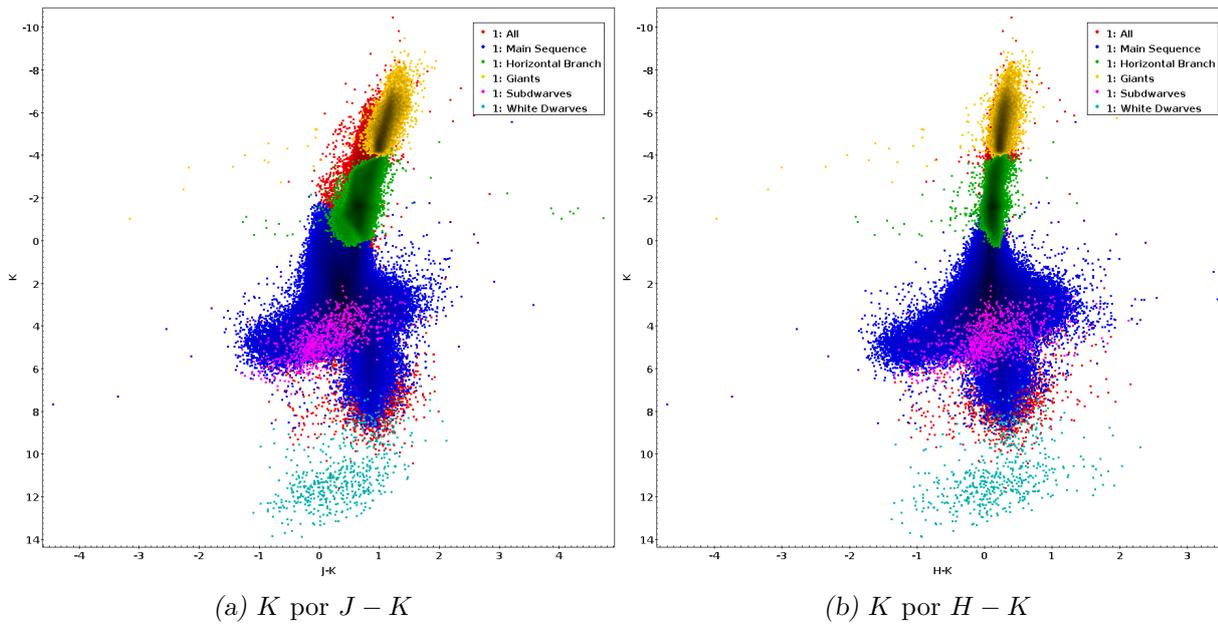
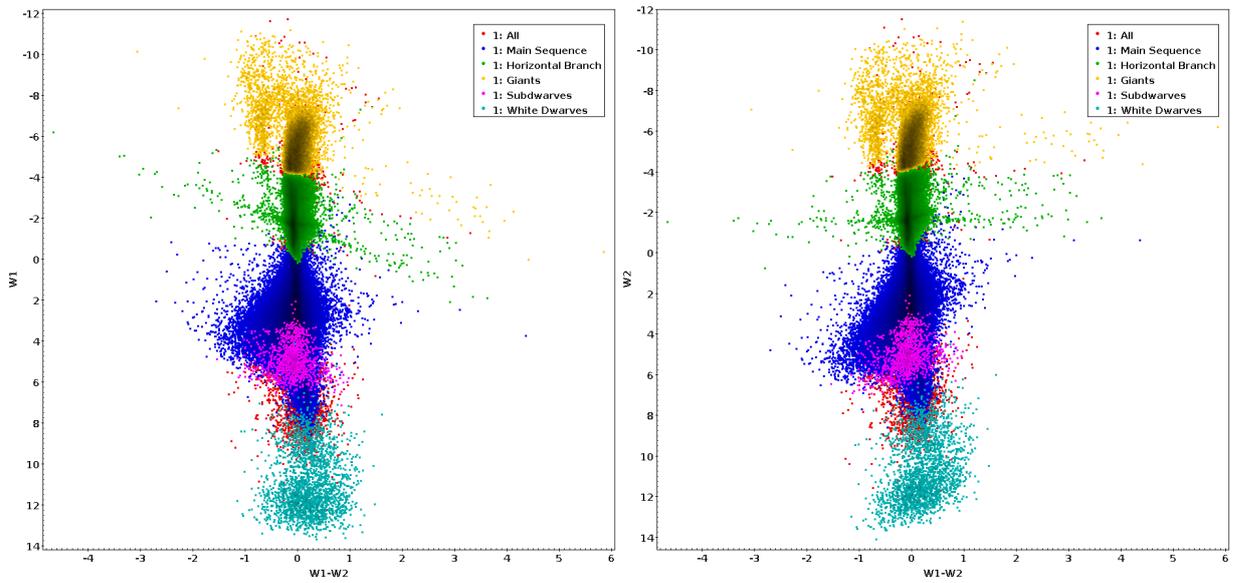


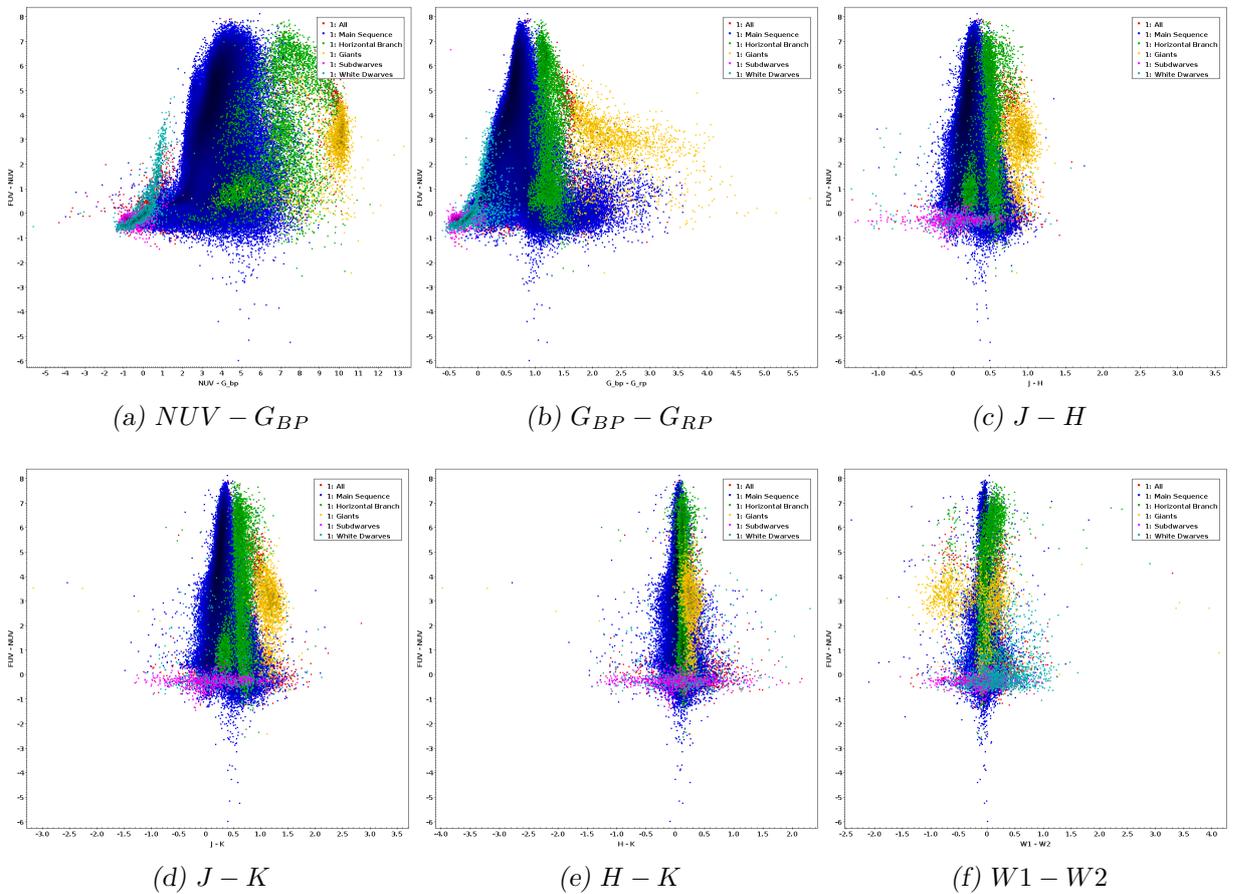
Figura 3.6: CMDs para magnitude  $K$  do AllWISE (2MASS)



(a)  $W1$  por  $W1 - W2$

(b)  $W2$  por  $W1 - W2$

Figura 3.7: CMDs para magnitudes  $W1$  e  $W2$  do WISE



(a)  $NUV - G_{BP}$

(b)  $G_{BP} - G_{RP}$

(c)  $J - H$

(d)  $J - K$

(e)  $H - K$

(f)  $W1 - W2$

Figura 3.8: Diagramas cor-cor baseados em  $FUV - NUV$

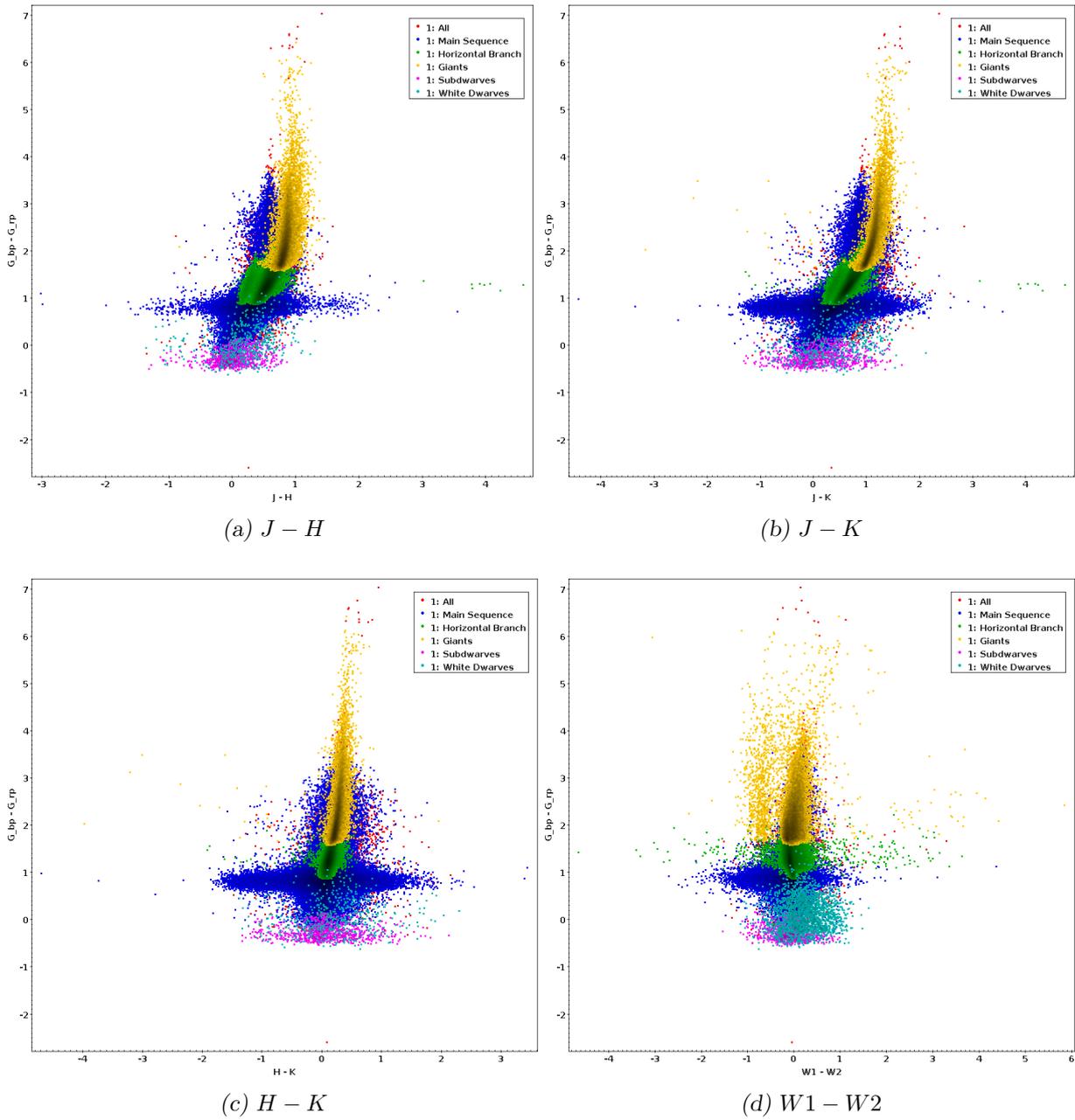


Figura 3.9: Diagramas cor-cor baseados em  $G_{BP} - G_{RP}$

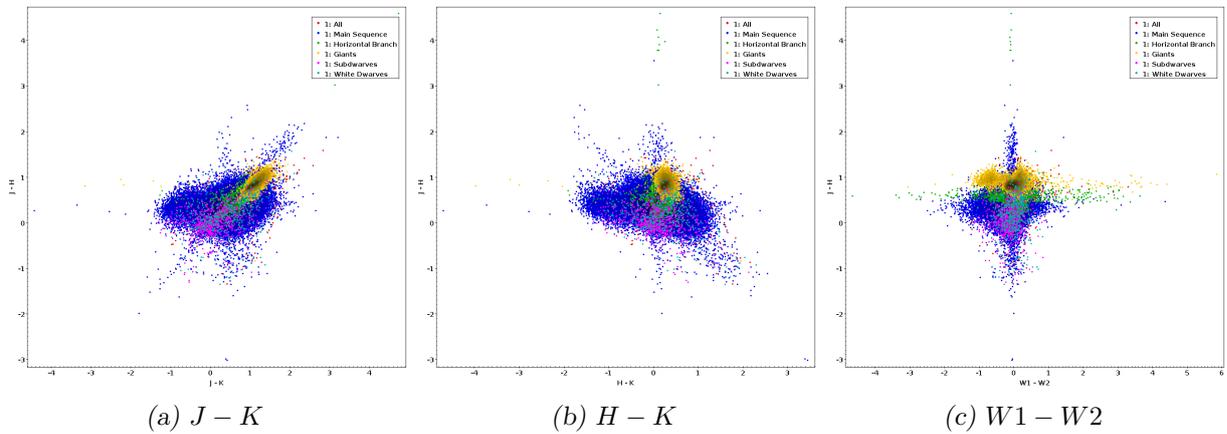
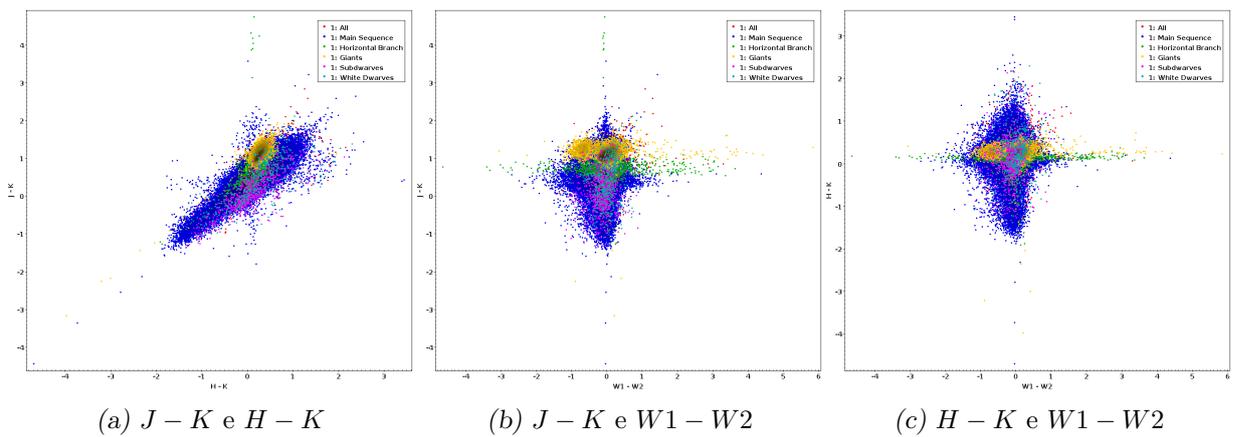
Figura 3.10: Diagramas cor-cor baseados em  $J - H$ 

Figura 3.11: Diagramas cor-cor baseados em magnitudes AllWISE

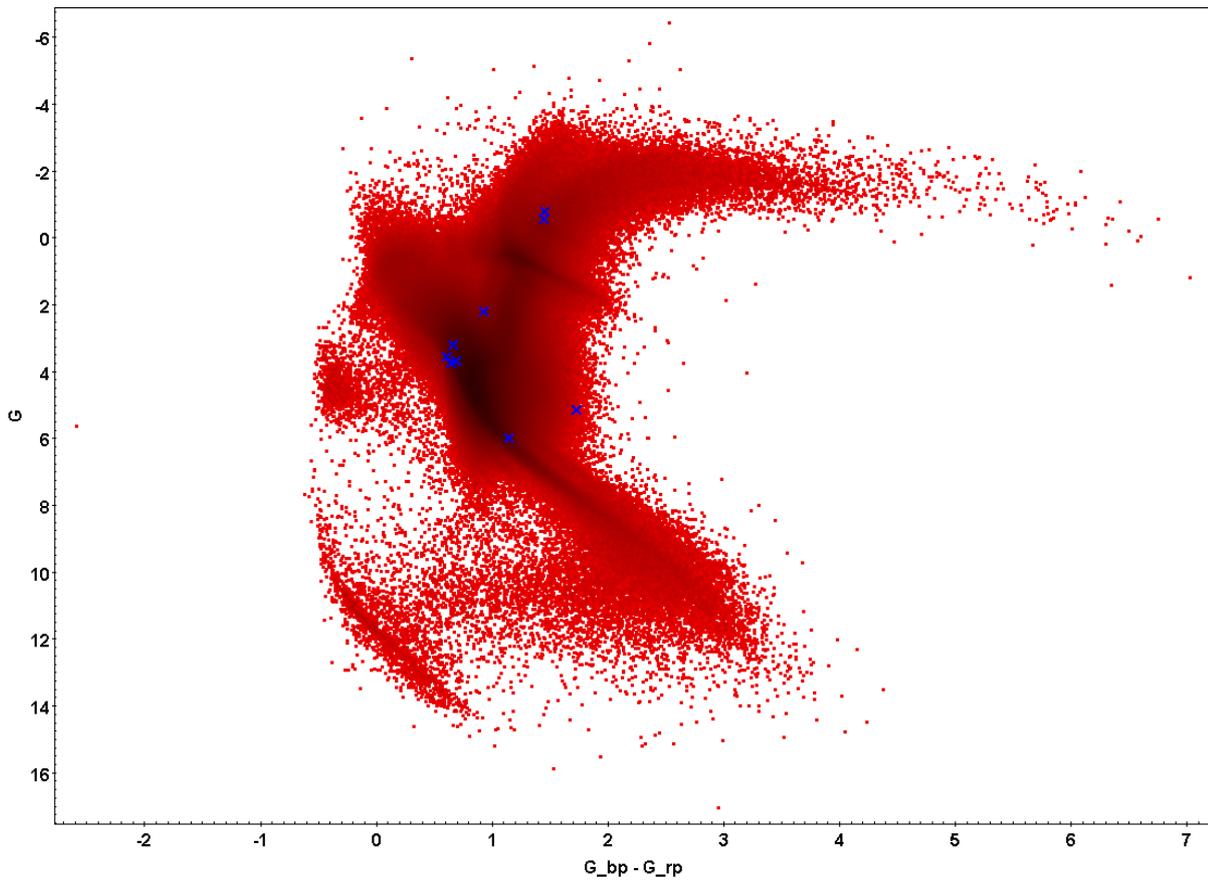


Figura 3.12: Amostra de 9 objetos com parâmetros físicos bem definidos, posições em relação ao diagrama cor-magnitude  $G$  por  $B_p - R_p$

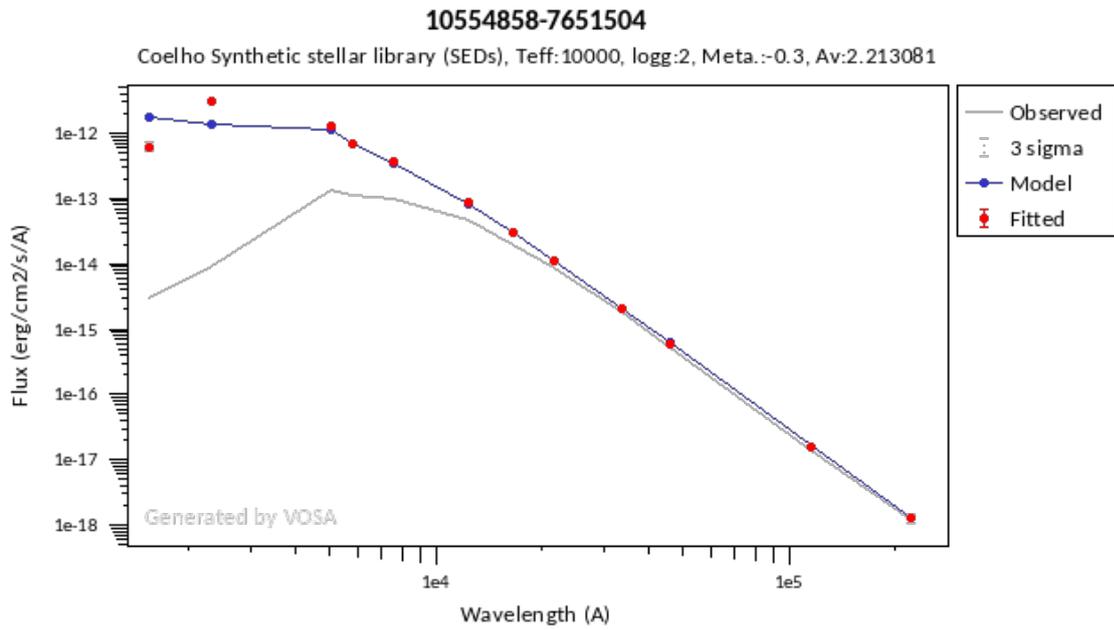


Figura 3.13: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas. Objeto mais quente onde ocorre maior divergência para as bandas mais azuladas.

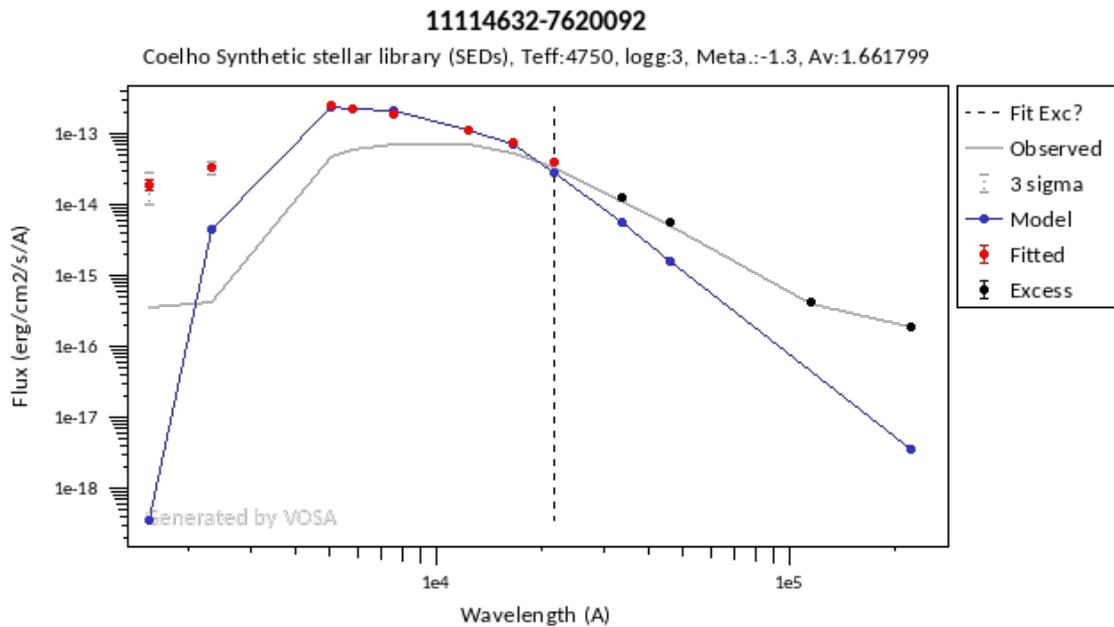


Figura 3.14: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas. Objeto T Tauri em que não é esperado ajuste do modelo com bom comportamento em relação ao observado.

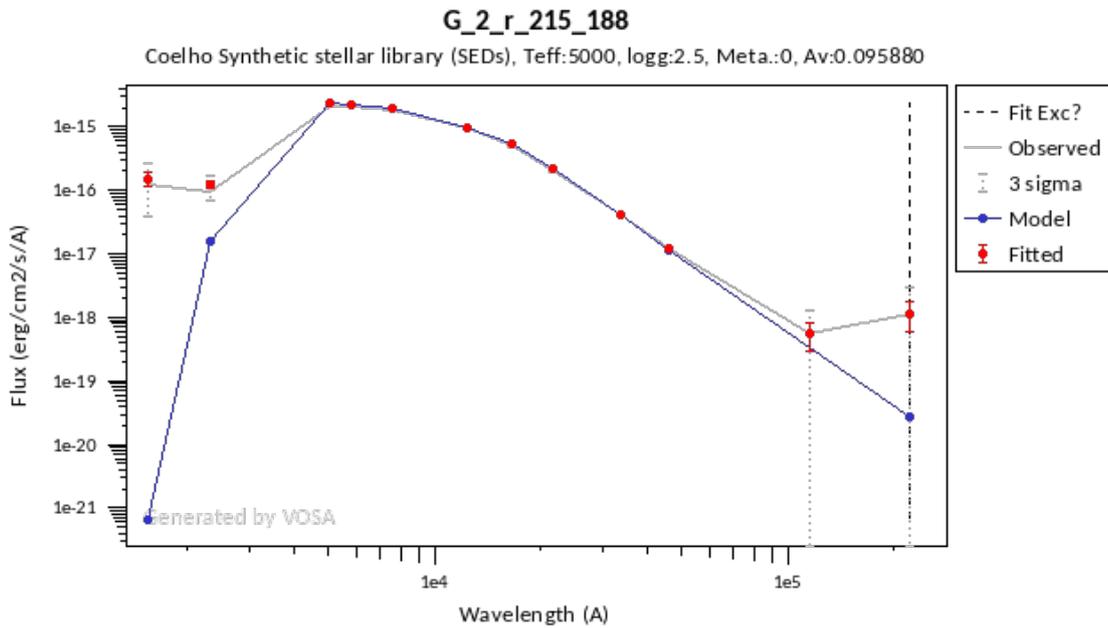


Figura 3.15: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas. Divergências identificadas nos pontos UV e infravermelhos. Objeto de natureza desconhecida de acordo com *VizieR*

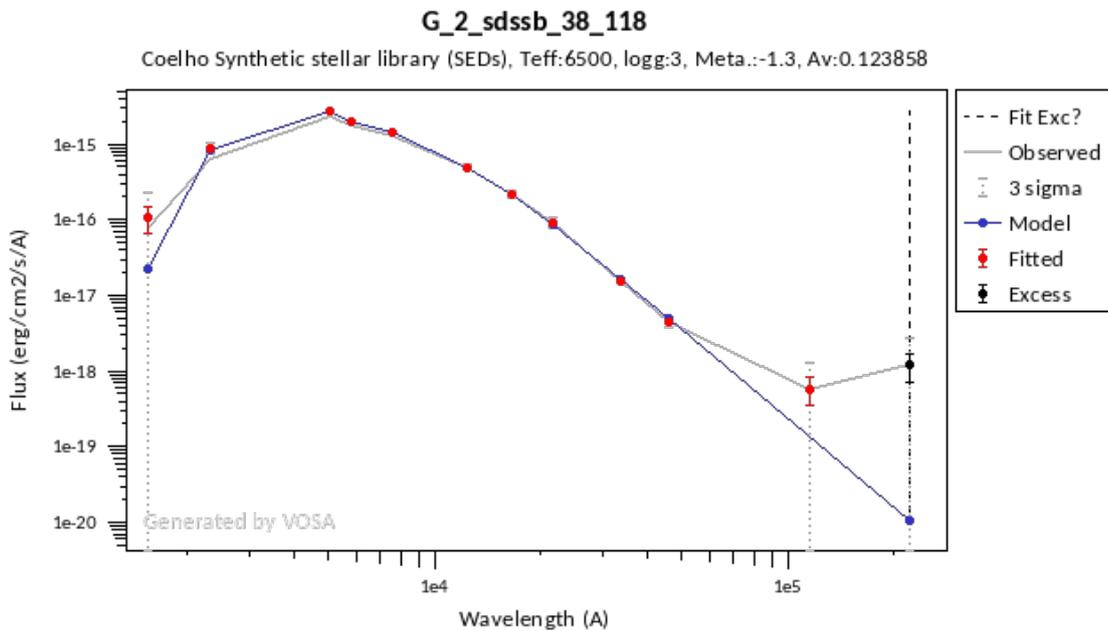


Figura 3.16: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas, mostrando em que pontos os modelos se ajustam ou divergem do observado. Binária espectroscópica de acordo com *VizieR*.

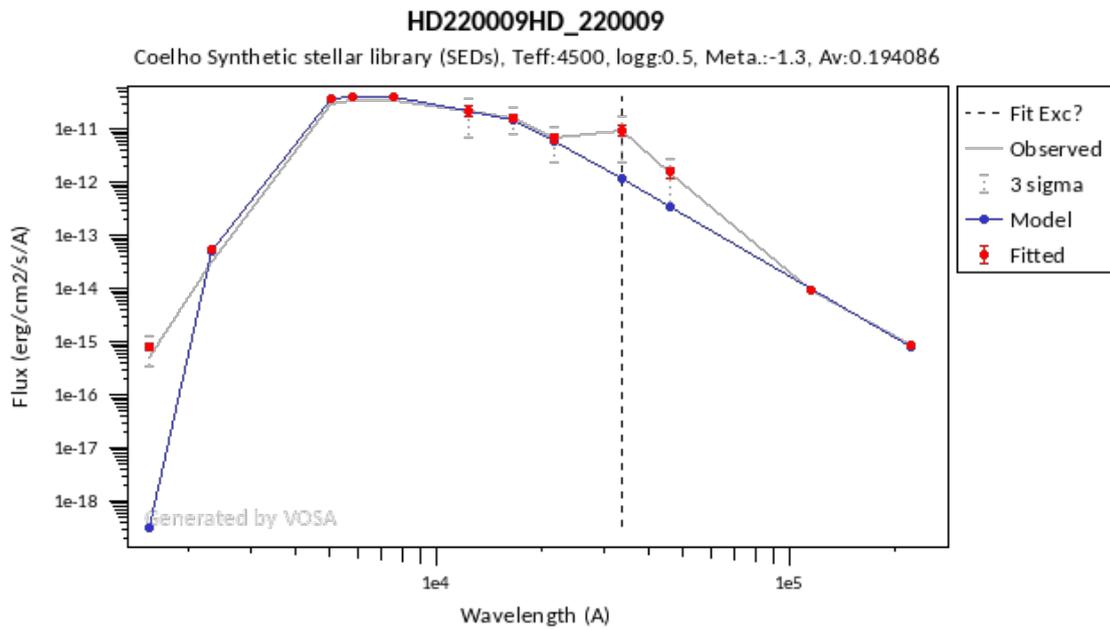


Figura 3.17: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas.

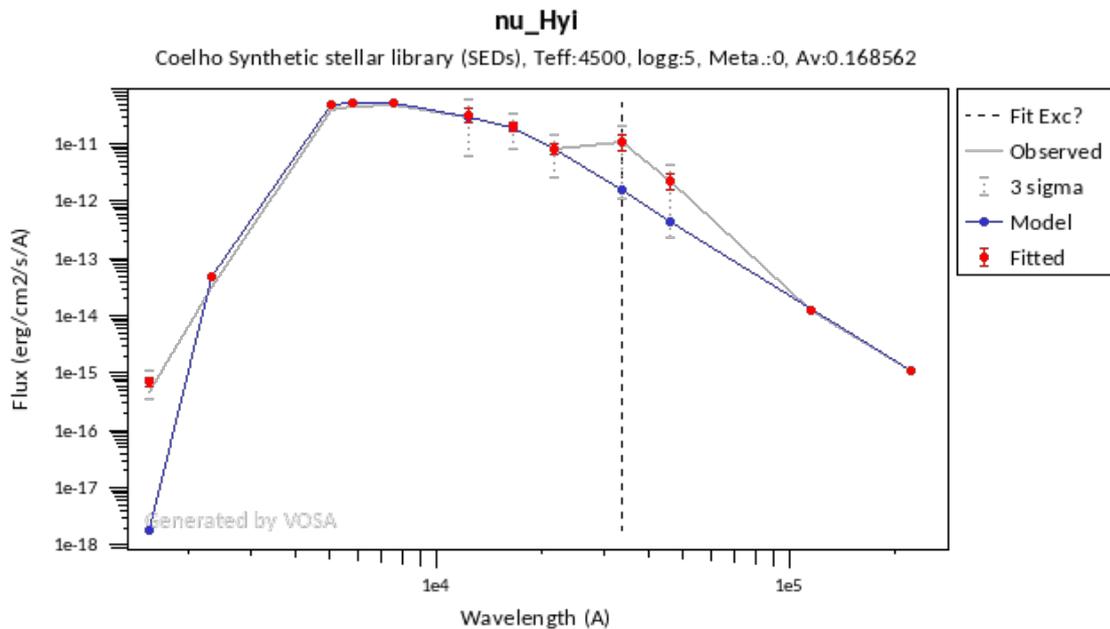


Figura 3.18: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas.

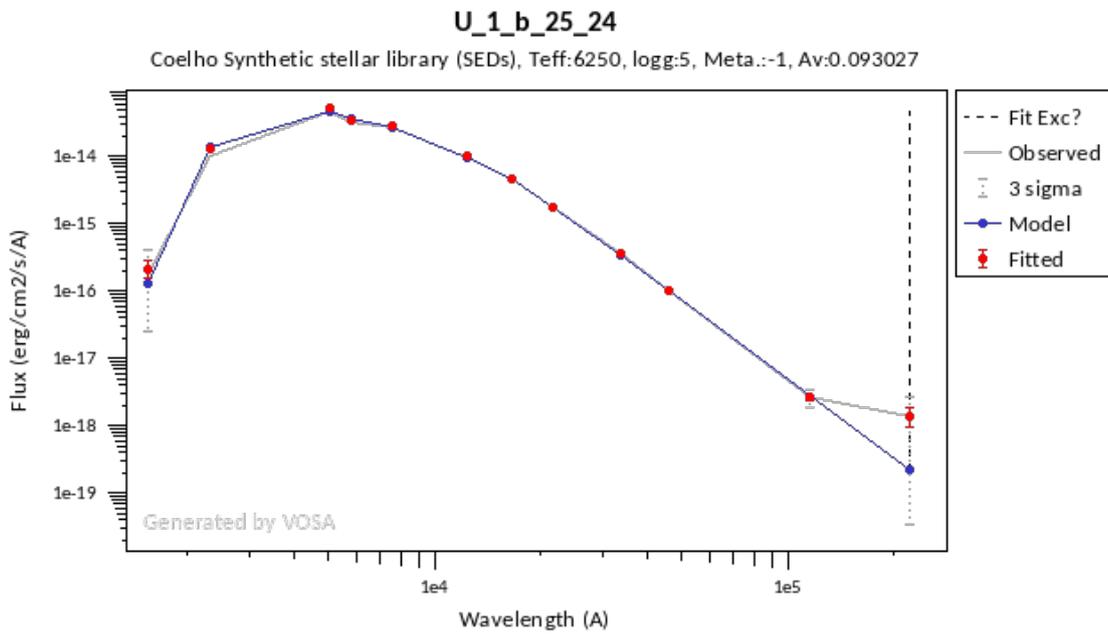


Figura 3.19: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas, mostrando em que pontos os modelos se ajustam ou divergem do observado.

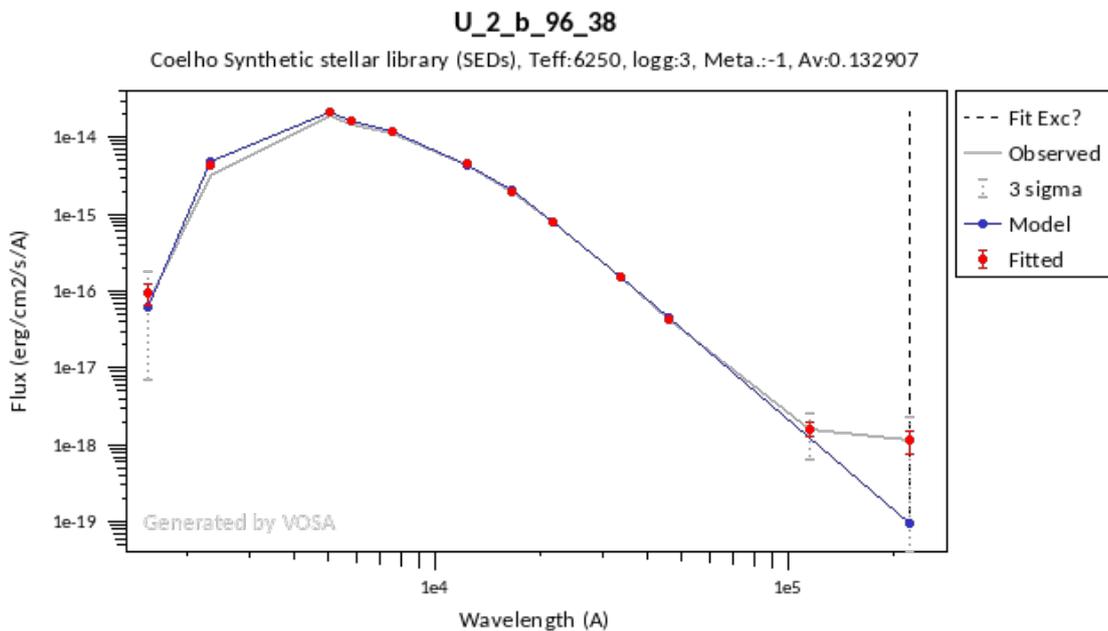


Figura 3.20: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas, mostrando em que pontos os modelos se ajustam ou divergem do observado.

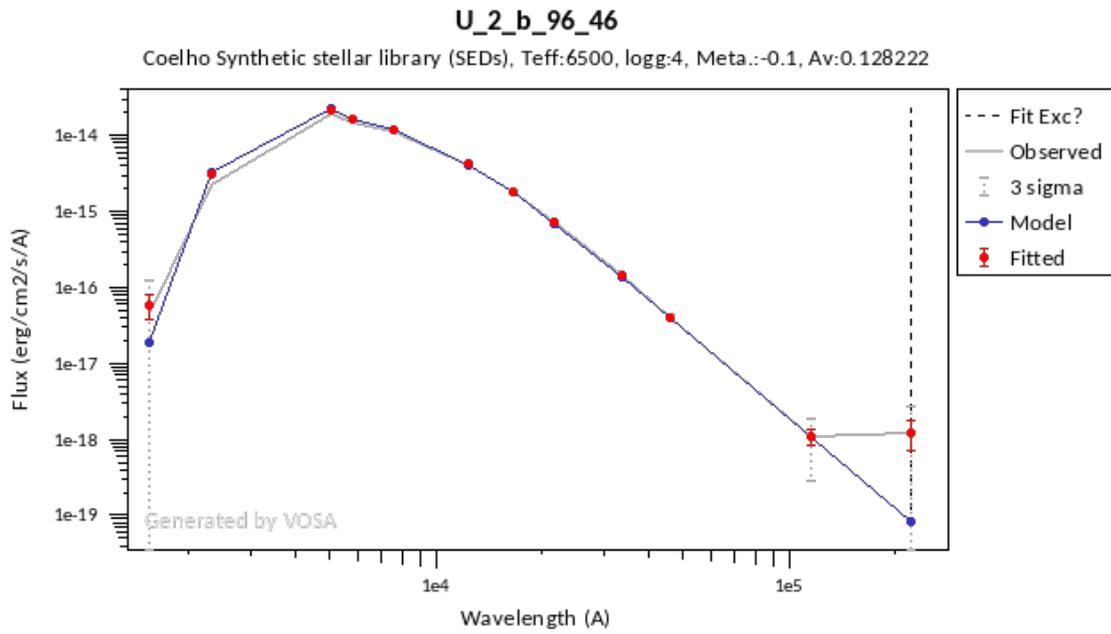


Figura 3.21: SEDs ajustadas e espectro contínuo observado aproximado a partir das magnitudes medidas, mostrando em que pontos os modelos se ajustam ou divergem do observado.

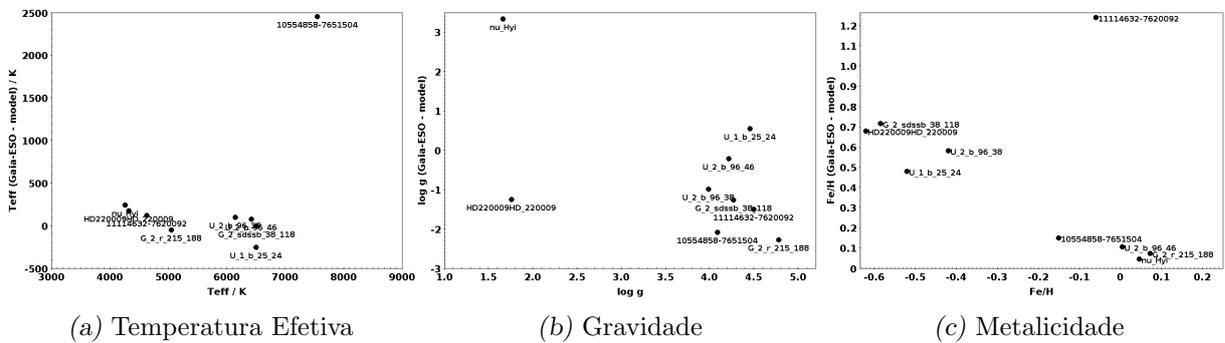


Figura 3.22: Diferença dos parâmetros atmosféricos observados para o que foi deduzidos pelo modelo sintético.



## Conclusões

O trabalho desenvolvido do PaStA resultou principalmente na tabela contendo quase 9 milhões de objetos, presente na forma de um arquivo de 5.5GB que pode ser readquirido seguindo os métodos descritos nesse trabalho. Escolhendo Gaia como o catálogo base, com magnitude 21 no filtro G de limite, os dados foram pareados com AllWISE e GALEX, cobrindo o espectro eletromagnético do ultravioleta ao infravermelho, nas bandas FUV, NUV, Bp, G, Rp, J, H, Ks, W1, W2, W3, e W4. O catálogo também apresenta dados de paralaxe de alta precisão pelos critérios de seleção aplicados a busca.

Os dados do PaStA foram estudados estatisticamente e amostrados, montando diagramas cor-cor e cor-magnitude para ilustrar e ressaltar algumas características iniciais dos objetos. Dados de extinção disponíveis no catálogo foram comparados com a literatura, mas não foi possível identificar vantagens sob um ou outro.

Neste trabalho, foram aplicados conceitos de astrofísica observacional e permitiu o aprendizado e contato com detalhes técnicos de missões de *surveys*. Também foi feito uso de técnicas estatísticas, *software* e programação para tratamento de dados astronômicos. Esses conceitos são cada vez mais importantes na astronomia contemporânea visto um aumento em missões e estudos que coletam cada vez mais volumes maiores de dados e qualidade crescente dos instrumentos. Dado maior tempo para esse trabalho, seria possível explorar melhor hipóteses levantadas durante o desenvolvimento, repetir o processo para outras combinações de *surveys*, e até realizar observações com telescópios para comparações com o catálogo.

Futuramente, planeja-se usar o PaStA para estudos mais amplos e diversos. Inicialmente, já foram feitas comparações das informações do catálogo com modelos sintéticos, como forma de destacar possíveis indicadores de performance. Trabalhos futuros explo-

ratórios também são planejados: busca por *outliers* que possivelmente sejam identificados como objetos astronômicos exóticos, estudo de comportamentos anômalos presentes nos diagramas coletados, entre outros que possam vir a surgir. O trabalho será organizado e formatado para ser publicado na literatura científica e ter maior alcance.

## Referências Bibliográficas

- Bayo A., Rodrigo C., Barrado Y Navascués D., Solano E., Gutiérrez R., Morales-Calderón M., Allard F., 2008, *A&A*, 492, 277
- Bianchi L., Conti A., Shiao B., 2014, *VizieR Online Data Catalog*, p. II/335
- Coelho P. R. T., 2014, *MNRAS*, 440, 1027
- Cutri R. M., et al. 2013, *VizieR Online Data Catalog*, p. II/328
- Gaia Collaboration et al., 2021, *A&A*, 649, A1
- Gilmore G., Randich S., et al., 2012, *The Messenger*, 147, 25
- Green G., 2018, *The Journal of Open Source Software*, 3, 695
- Green G. M., et al., 2015, *ApJ*, 810, 25
- Jofré P., Heiter U., Tucci Maia M., Soubiran C., Worley C. C., Hawkins K., Blanco-Cuaresma S., Rodrigo C., 2018, *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2, 152
- Lindgren L., et al., 2018, *A&A*, 616, A2
- Planck Collaboration et al., 2014, *A&A*, 571, A11
- Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M., 1998, *ApJ*, 500, 525
- Skrutskie M. F., et al., 2006, *AJ*, 131, 1163
- Wright E. L., et al., 2010, *AJ*, 140, 1868



# Apêndice



## Apêndice A

---

### *Query* de ADQL executado por via de STILTS

Inicialmente, um *query* foi executado pela interface do STILTS, dentro de um *script* em Python, como forma de buscar os dados do Gaia, em uma dada região. A ascensão reta e declinação são definidas continuamente pelo *script* de forma que todo o céu seja varrido:

```
SELECT *
FROM gaiaedr3.gaia_source
WHERE parallax_over_error > 5
      AND ruwe < 1.4
      AND ra
          BETWEEN ' _+_str(minRA) _+_ '
          AND ' _+_str(maxRA)+_ '
      AND dec
          BETWEEN ' _+_str(minDec) _+_ '
          AND ' _+_str(maxDec) _+_ ' "
OUTt=tmp.fits
```

Após adquirir os dados para uma dada região, usa-se os comandos do STILTS para realizar o *cross-match* da tabela obtida do Gaia com AllWISE e GALEX, nesta ordem.

```
stilts cdsskymatch in=galex.fits ifmt=fits  \\  
ra=ra_in dec=dec_in cdstable=II/328/allwise \\  
radius=1.0 find=best out=allwise.fits
```

```
stilts cdsskymatch in=tmp.fits ifmt=fits  ra=ra dec=dec  \\  
cdstable=II/312/ais radius=1.0 find=best out=galex.fits
```

## Apêndice B

---

### Estatísticas do catálogo

A tabela a seguir ilustra as medidas estatísticas para as colunas do PaStA.

Name	Mean	SD	Variance	Quartile1	Median	Quartile3
ra_in	194.8189	104.1248	10,841.9746	107.5999	200.3812	292.1864
ra_error	0.0233	0.0150	0.0002	0.0137	0.0197	0.0295
dec_in	1.6469	39.6055	1,568.5922	-28.7225	2.6578	32.2809
dec_error	0.0214	0.0136	0.0002	0.0126	0.0181	0.0269
parallax	0.9739	0.9469	0.8966	0.4680	0.7057	1.1450
parallax_error	0.0294	0.0171	0.0003	0.0176	0.0252	0.0374
parallax_over_error	50.3126	67.3934	4,541.8765	12.8455	27.5346	61.8576
pm	10.5228	9.7920	95.8823	4.4172	7.8618	13.2756
pmra_in	-0.9589	10.0571	101.1461	-5.1698	-0.8997	3.0865
pmra_error	0.0299	0.0192	0.0004	0.0176	0.0253	0.0378
pmdec	-3.9352	9.4371	89.0592	-7.5879	-3.0027	0.7364
pmdec_error	0.0272	0.0174	0.0003	0.0160	0.0230	0.0341
ra_dec_corr	-0.0016	0.2141	0.0458	-0.1355	-0.0042	0.1334
ra_parallax_corr	0.0093	0.1906	0.0363	-0.1225	0.0076	0.1395
ra_pmra_corr	-0.1064	0.1915	0.0367	-0.2342	-0.1080	0.0163
ra_pmdec_corr	-0.0026	0.1789	0.0320	-0.1191	-0.0024	0.1120
dec_parallax_corr	-0.0810	0.1765	0.0312	-0.1981	-0.0725	0.0425
dec_pmra_corr	-0.0028	0.1638	0.0268	-0.1083	-0.0032	0.1016
dec_pmdec_corr	-0.1379	0.2927	0.0856	-0.3325	-0.1634	0.0496
parallax_pmra_corr	-0.0189	0.2168	0.0470	-0.1760	-0.0227	0.1400
parallax_pmdec_corr	-0.0345	0.1875	0.0351	-0.1688	-0.0390	0.0950

Name	Mean	SD	Variance	Quartile1	Median	Quartile3
pmra_pmdec_corr	0.0051	0.2242	0.0503	-0.1465	0.0067	0.1612
astrometric_n_obs_al	368.62	139.23	19,386.06	268	351	440
astrometric_n_obs_ac	47.35	128.48	16,507.09	0	0	0
astrometric_n_good_obs_al	366.74	138.40	19,155.66	266	350	438
astrometric_n_bad_obs_al	1.89	2.50	6.23	0	1	3
astrometric_gof_al	0.6178	2.0828	4.3381	-0.6000	0.3060	1.3609
astrometric_chi2_al	450.9354	311.2346	96,866.9922	293.2334	388.7669	521.0107
astrometric_excess_noise	0.0356	0.0562	0.0032	0.0000	0.0000	0.0652
astrometric_excess_noise_sig	2.1510	7.0805	50.1340	0.0000	0.0000	1.2171
astrometric_params_solved	32.29	9.00	80.96	31	31	31
nu_eff_used_in_astrometry	1.5367	0.0402	0.0016	1.5183	1.5416	1.5601
pseudocolour	1.5164	0.0720	0.0052	1.4966	1.5325	1.5555
pseudocolour_error	0.0085	0.0107	0.0001	0.0038	0.0058	0.0094
ra_pseudocolour_corr	-0.0560	0.1036	0.0107	-0.1215	-0.0556	0.0110
dec_pseudocolour_corr	0.0087	0.1077	0.0116	-0.0611	0.0089	0.0780
parallax_pseudocolour_corr	-0.0081	0.1049	0.0110	-0.0680	-0.0041	0.0562
pmra_pseudocolour_corr	-0.0208	0.1036	0.0107	-0.0887	-0.0218	0.0461
pmdec_pseudocolour_corr	-0.0088	0.1187	0.0141	-0.0887	-0.0097	0.0708
astrometric_matched_transits	42.3572	15.9685	254.9925	31.0000	40.0000	51.0000
visibility_periods_used	20.3513	5.0007	25.0072	16.0000	19.0000	25.0000
astrometric_sigma5d_max	0.0462	0.0311	0.0010	0.0271	0.0391	0.0581

Name	Mean	SD	Variance	Quartile1	Median	Quartile3
matched_transits	47.10	17.62	310.56	34	46	57
new_matched_transits	17.83	10.12	102.41	10	16	22
matched_transits_removed	0.06	0.46	0.21	0	0	0
ipd_gof_harmonic_amplitude	0.0297	0.0276	0.0008	0.0135	0.0221	0.0362
ipd_gof_harmonic_phase	88.8762	57.7932	3,340.0540	33.6774	86.8745	144.3156
ipd_frac_multi_peak	0.37	3.05	9.32	0	0	0
ipd_frac_odd_win	0.16	3.20	10.26	0	0	0
ruwe	1.0238	0.0809	0.0065	0.9762	1.0107	1.0522
scan_direction_strength_k1	0.2299	0.1180	0.0139	0.1399	0.2204	0.3075
scan_direction_strength_k2	0.2786	0.1564	0.0245	0.1593	0.2517	0.3835
scan_direction_strength_k3	0.2062	0.1316	0.0173	0.0982	0.1796	0.2966
scan_direction_strength_k4	0.4298	0.2546	0.0648	0.2115	0.3824	0.6481
scan_direction_mean_k1	-60.7091	79.5023	6,320.6191	-112.9242	-78.4139	-32.1305
scan_direction_mean_k2	0.2924	43.4080	1,884.2565	-27.2382	0.1099	27.9276
scan_direction_mean_k3	-6.4999	34.0682	1,160.6429	-35.4375	-11.4193	22.0497
scan_direction_mean_k4	1.2044	28.3063	801.2488	-26.3855	5.2004	27.4160
phot_g_n_obs	390.23	146.69	21,517.38	282	375	468
phot_g_mean_flux	139,010.0674	1,650,755.3750	2,724,993,171,456.0000	9,417.5261	20,963.2314	56,758.1318
phot_g_mean_flux_error	59.5686	3,238.7031	10,489,198.0000	3.3677	5.4178	11.4172
phot_g_mean_flux_over_error	3,866.6845	1,688.4275	2,850,787.5000	2,572.6179	3,675.5554	4,930.7646
phot_g_mean_mag	14.6466	1.5193	2.3082	13.8033	14.8842	15.7536

Name	Mean	SD	Variance	Quartile1	Median	Quartile3
phot_bp_n_obs	43.33	16.56	274.21	31	42	52
phot_bp_mean_flux	62,057.3127	574,536.1875	330,091,823,104.0000	4,915.9574	10,865.1069	29,244.3416
phot_bp_mean_flux_error	72.5298	2,172.0017	4,717,591.5000	12.2681	16.6901	26.8111
phot_bp_mean_flux_over_error	847.4075	633.1357	400,860.7813	364.6686	658.4578	1,184.2123
phot_bp_mean_mag	15.0155	1.5013	2.2538	14.1736	15.2488	16.1100
phot_rp_n_obs	42.42	16.24	263.66	31	41	51
phot_rp_mean_flux	112,197.6854	1,681,243.8750	2,826,580,787,200.0000	6,469.5075	14,509.3854	39,340.6996
phot_rp_mean_flux_error	172.7228	12,208.9863	149,059,344.0000	11.6380	15.9649	26.1278
phot_rp_mean_flux_over_error	1,206.6895	951.3619	905,089.5000	504.5858	916.7617	1,643.2854
phot_rp_mean_mag	14.1045	1.5345	2.3548	13.2617	14.3438	15.2210
phot_bp_n_contaminated_transits	0.05	0.73	0.53	0	0	0
phot_bp_n_blended_transits	3.56	10.14	102.79	0	1	2
phot_rp_n_contaminated_transits	0.04	0.74	0.55	0	0	0
phot_rp_n_blended_transits	3.03	9.60	92.07	0	0	1
phot_proc_mode	0.00	0.08	0.01	0	0	0
phot_bp_rp_excess_factor	1.2121	0.1024	0.0105	1.1987	1.2057	1.2166
bp_rp	0.9111	0.1957	0.0383	0.8023	0.8817	0.9873
bp_g	0.3719	0.1066	0.0114	0.3165	0.3553	0.4076
g_rp	0.5392	0.0987	0.0097	0.4850	0.5262	0.5804
dr2_radial_velocity	-1.6797	40.9279	1,675.0925	-23.1178	-1.6911	19.9396
dr2_radial_velocity_error	1.7246	2.2632	5.1220	0.5372	1.0223	1.9042

Name	Mean	SD	Variance	Quartile1	Median	Quartile3
dr2_rv_nb-transits	1.14	3.64	13.22	0	0	0
dr2_rv_template_teff	5,450.50	617.85	381,739.94	5,000	5,500	6,000
dr2_rv_template_logg	3.73	0.70	0.49	3.0	3.5	4.5
dr2_rv_template_fe_h	-0.11	0.36	0.13	0.0	0.0	0.0
l	170.0583	106.4948	11,341.1426	72.9829	163.4699	263.6489
b	-0.2445	35.2633	1,243.5015	-28.3161	9.6082	26.7159
ec1_lon	192.5939	103.8579	10,786.4707	103.3128	198.4100	289.1401
ec1_lat	3.0283	39.2121	1,537.5863	-27.7844	4.2026	32.6797
ra_cds	194.8190	104.1248	10,841.9717	107.5966	200.3814	292.1829
dec_cds	1.6469	39.6055	1,568.5933	-28.7263	2.6582	32.2945
fuv_mag	20.3866	1.6812	2.8264	19.6580	20.8590	21.5700
nuv_mag	20.1128	1.5302	2.3416	19.2640	20.3590	21.2300
fuv_magerr	0.2549	0.1386	0.0192	0.1370	0.2600	0.3680
nuv_magerr	0.1737	0.1215	0.0148	0.0740	0.1440	0.2540
E_bv	0.1034	0.1253	0.0157	0.0377	0.0667	0.1176
fuv_flux	246.2386	1,947.4752	3,792,659.7500	8.5724	16.5180	49.9410
fuv_fluxerr	7.2002	16.7886	281.8558	2.7551	4.1041	6.8139
nuv_flux	146.1373	818.5579	670,037.0625	11.6783	26.0447	71.5444
nuv_fluxerr	4.8972	5.0200	25.2007	2.5113	3.5817	5.3775
fuv_artifact	16.91	63.53	4,036.02	0	0	0
nuv_artifact	7.68	38.38	1,473.20	0	0	1

Name	Mean	SD	Variance	Quartile1	Median	Quartile3
angDist_in	0.5656	0.2437	0.0594	0.3755	0.5703	0.7654
RAJ2000	194.8189	104.1248	10,841.9746	107.6020	200.3760	292.1502
DEJ2000	1.6469	39.6055	1,568.5922	-28.7238	2.6581	32.2977
eeMaj	0.0549	0.0198	0.0004	0.0420	0.0489	0.0619
eeMin	0.0520	0.0177	0.0003	0.0395	0.0471	0.0596
eePA	107.7499	40.5969	1,648.1089	82.7000	111.3000	136.9000
W1mag	13.0048	1.6207	2.6266	12.1560	13.2670	14.1680
W2mag	13.0476	1.6253	2.6415	12.1900	13.2960	14.2080
W3mag	12.0038	1.0165	1.0333	11.8510	12.2570	12.5610
W4mag	8.9079	0.4453	0.1983	8.7100	8.9400	9.1400
Jmag	13.4722	1.5728	2.4738	12.6240	13.7250	14.6150
Hmag	13.1239	1.5964	2.5486	12.2830	13.3860	14.2760
Kmag	13.0514	1.6061	2.5794	12.2120	13.3170	14.2090
e_W1mag	0.0276	0.0151	0.0002	0.0230	0.0250	0.0280
e_W2mag	0.0371	0.0223	0.0005	0.0230	0.0290	0.0430
e_W3mag	0.2457	0.1550	0.0240	0.1070	0.2330	0.3760
e_W4mag	0.3399	0.1594	0.0254	0.2110	0.3860	0.4780
e_Jmag	0.0322	0.0231	0.0005	0.0240	0.0270	0.0350
e_Hmag	0.0408	0.0430	0.0019	0.0250	0.0320	0.0470
e_Kmag	0.0531	0.0762	0.0058	0.0250	0.0370	0.0660
pmRA_cds	5.57	151.35	22,905.40	-49	5	54

---

Name	Mean	SD	Variance	Quartile1	Median	Quartile3
e_pmRA	97.13	365.66	133,709.80	47	70	116
pmDE	2.98	168.05	28,242.41	-54	5	55
e_pmDE	101.30	396.68	157,351.84	47	72	122
d2M	0.1897	0.1506	0.0227	0.0920	0.1520	0.2400
angDist_cds	0.1324	0.1310	0.0172	0.0570	0.0948	0.1555