



OBSERVATÓRIO NACIONAL  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# Estrelas de Hipervelocidade na Galáxia

SANDRO RICARDO DE SOUZA

Rio de Janeiro, 30 de Março de 2015

OBSERVATÓRIO NACIONAL  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# Estrelas de Hipervelocidade na Galáxia

SANDRO RICARDO DE SOUZA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia do Observatório Nacional como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. Fernando Virgílio Roig

Co-orientador: Dr. Claudio Bastos Pereira

Rio de Janeiro, 30 de Março de 2015

# Dedicatória

*Àquele que foi o primeiro a me falar sobre as estrelas,  
sobre as chuvas,  
sobre os rios,  
sobre as plantas,  
e os animais,  
Sebastião Afonso Domingos;  
meu Avô e primeiro professor.*

# Agradecimentos

"...Nenhum homem é uma ilha." E isto nunca foi tão verdadeiro, como agora, em minha jornada pelo mestrado. Agradecer àqueles que contribuíram para que eu chegasse até aqui é, e sempre será, uma tarefa inglória, pois não sei comensurar o quão importante foi a participação de cada um. Dos meus queridos alunos, que tive que deixar num penoso adeus, aos meus colegas no Observatório Nacional, que tão receptivamente me acolheram, há uma grande quantidade de mentes e corações que participaram deste mestrado comigo, ensinando-me, lapidando-me, tornando meu mundo de aluno "o melhor dos mundos."

Quando decidi retornar ao mundo acadêmico, foi a empolgação juvenil do Mário De Prá que me trouxe ao ON. Falando-me do ambiente maravilhoso e descontraído que eu encontraria aqui, de pronto e imediato, convenceu-me de que eu estaria em boas mãos. Acreditei... e ele estava certo! Apresentou-me aos pesquisadores, aos outros alunos, e àquele que seria meu orientador. Obrigado Mário.

Mas não bastava querer ir para o ON. Eu tinha que me apresentar, tinha que ter uma identidade e uma história acadêmica. E estas coisas haviam se perdido nas idas e vindas de minha vida. Então, imagino que deva ter sido difícil para meu orientador aceitar-me nestas condições, de uma incógnita a ser determinada. Ainda assim ele o fez. E mais que isso, deu-me todas as condições para estudar, o tempo para amadurecer e o espaço para crescer. O tema que você me ofereceu, permitiu-me ter uma visão ampla e geral da Astronomia. Obrigado, Fernando.

Uma vez iniciadas as aulas, iniciaram-se também fecundas amizades que certamente continuarão para além dos limites acadêmicos. Agradeço aos bons momentos de aulas aos meus colegas Evandro, Júlia, Rafael, Eduardo, Walter, Ximena, Cintia, Jessica, Martins, Mário e Diogo. Voltar às aulas com vocês foi uma volta ao passado, quando os problemas mais graves que eu tinha, eram os exercícios a serem resolvidos. O dia-a-dia da minha pesquisa, sempre teve a contribuição de

um "vizinho de mesa" ou de um "parceiro do café". Particularmente, as dicas e sugestões de meus colegas do ON, João Vitor, Bragança, Carlos e Júlio, e ainda Hélio, do Valongo, foram muito valiosas no desenrolar do meu projeto. Como um "aprendiz de pesquisador", um convite, feito pelo Anderson, para trabalhar em um projeto seu, foi muito importante. Grato. Espero um dia ser tão prestativo a vocês quanto vocês foram para mim.

Vir para o ON também significou deixar minha vida de professor, com todas as idiosincrasias que em mim esta vida suscitava. Meus colegas professores e meus alunos, tornavam meu viver mais completo. Agradeço toda a torcida que sempre tiveram por mim. E até hoje, acompanhando-me no ciberespaço, recebo o incentivo e a força tão necessários aos "homens-não-ilhas". Quando fiz a cirurgia no ouvido, já estava de malas prontas para o Rio. Portanto nunca dei aula depois que voltei a ouvir. Mas, estranhamente, isto nunca fez falta na sala de aula. Quando eu não escutava um aluno, aproximava-me, olhava-o nos olhos, e pedia-lhe que repetisse. Quase sempre a empatia mútua acontecia, pois este singelo ato muitas vezes foi mais eloquente que o som. Agradeço a vocês por terem me escutado e me deixado ensinar-lhes um pouco sobre meu mundo de estrelas.

Aos amigos professores do Colégio Aflordízio de Carvalho, agradeço não só a fé que tiveram em mim, como também o apoio sempre presente. Eu não estaria aqui se não fosse aquela cirurgia... e se não fosse vocês, tudo teria sido mais difícil. Particularmente, correndo o risco do erro irreparável de esquecer alguém, agradeço especialmente à Mara, Érica, Rúbia, Ronald, Rogério, Cláudio, Rosinha, Clédina, Rose, e minha querida diretora Míriam. Dar aulas com vocês não era um trabalho, era um privilégio. Gratidão.

Uma vez no ON, tive tudo que sempre quis. Foi a primeira vez que pude apenas estudar, sem ter que me preocupar com o trabalho necessário à vida. Vi minha graduação passar por mim como um cometa no periélio, e mal pude aproveitar o ar acadêmico, sempre dividindo os livros com as ferramentas. No ON, pela primeira vez, pude ouvir as páginas dos livros passando do começo ao fim. Este apoio financeiro, dado pelas agências, não apenas torna a pesquisa possível, como também, mais humana. Em um ano, pude participar de três congressos, além de poder participar de diversos encontros no próprio Observatório. Essa interação não tem preço. Obrigado. Espero retornar à sociedade, um bom trabalho, pela oportunidade que estou tendo. Em particular, encontrei aqui, nas pessoas dos, então professores, Cláudio, Álvaro, Vladimir, Marcelo, Daniela e Flávio, apoio, ori-

entação e uma enorme paciência, com limite tendendo ao infinito, para ensinarem do básico ao trabalhoso. Em especial, agradeço ao trabalho de co-orientação do Cláudio, sempre solícito e empolgado. Agradeço a todos vocês por isso.

Evidentemente eu não posso deixar de agradecer minha mãe e meus irmãos. São meus fãs incondicionais, torcendo por mim desde sempre. Mas não se esqueçam, a escalada acadêmica não me transformou em um ser inacessível. Ainda sou o mesmo Sandro, o mesmo irmão e o mesmo filho. Obrigado por tudo.

Se fazer o mestrado é a realização de um sonho, cada um, que citei acima, compõe este mundo onírico de maneira única e especial. Mas se hoje posso sonhar e viver este sonho, isto se deve à minha companheira e esposa, Cláudia. Você sempre acreditou, ajudou, e pacientemente esperou até que este mestrado começasse. E depois disso, foi o apoio necessário e fundamental para que tudo saísse bem. Obrigado, meu amor! Uma dia, um velho amigo me disse que uma pessoa deve escolher entre a felicidade e o conhecimento. Não posso, entretanto, deixar de refutá-lo. De fato eu não sei como definir felicidade, não posso medir seu tamanho, seu brilho, sua cor e nem sua temperatura. Mas conhecer os segredos do céu e poder dividi-los com você, se não é felicidade, eu passo a defini-lo *ad hoc*: felicidade é conhecer o céu com quem se ama.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
1.1	Definição de HVS . . . . .	14
1.2	Previsão das estrelas de hipervelocidade . . . . .	15
1.3	Descoberta de HVSs . . . . .	17
1.4	Estrelas com grande movimento próprio . . . . .	18
1.5	Objetivos deste trabalho . . . . .	19
1.5.1	Mapeamento de zonas de interesse . . . . .	19
1.5.2	Critérios de seleção de candidatas a HVS . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>21</b>
2.1	Análise de zonas de interesse . . . . .	21
2.1.1	Definição do sistema de coordenadas . . . . .	21
2.1.2	Cálculo de velocidades no referencial galactocêntrico . . . . .	23
2.1.3	Cálculo da velocidade de escape . . . . .	25
2.1.4	Mapa de contorno das zonas de interesse . . . . .	27
2.2	Catálogo de estrelas com grande movimento próprio . . . . .	28
2.2.1	Critérios para seleção de candidatas . . . . .	28
2.2.2	Catálogo de Roeser . . . . .	29
2.2.3	Catálogo de Ivanov . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Resultados e Análises</b>	<b>43</b>
3.1	Mapas de contorno de regiões representativas . . . . .	43
3.2	Resultados da seleção no catálogo de Roeser . . . . .	50
3.3	Resultados da seleção no catálogo de Ivanov . . . . .	51

<i>SUMÁRIO</i>	7
<b>4 Discussão e conclusões</b>	<b>55</b>
4.1 Avaliação das melhores candidatas . . . . .	55
4.2 Fatores limitadores no processo de seleção . . . . .	59
4.3 Abordagens alternativas para a origem das HVSS . . . . .	61
4.4 Conclusão e perspectivas . . . . .	64
<b>A Tabelas</b>	<b>69</b>
<b>B Mapas de contorno</b>	<b>74</b>
<b>C Códigos em Python</b>	<b>78</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Dados da estrela Vega . . . . .	27
3.1	Médias e medianas das distâncias para o catálogo de Roeser .	50
3.2	Médias e medianas das distâncias para o catálogo de Ivanov .	52
3.3	Candidatas do catálogo de Ivanov localizados na região fa- vorável, $l \approx 90^\circ$ . . . . .	54
4.1	Parâmetros da Wolf 1492 . . . . .	58
A.1	Catálogo de HVS de Brown . . . . .	70
A.2	Exemplo do catálogo de Roeser . . . . .	72
A.3	Exemplo do catálogo de Ivanov . . . . .	73

# Lista de Figuras

1.1	Distribuição de velocidades radiais das HVS catalogadas por Brown et al. (2012).	18
1.2	Diagrama ilustrativo da definição do movimento próprio	19
2.1	Sistema de coordenadas galácticas heliocêntricas	22
2.2	Sistema de coordenadas galactocêntrico	23
2.3	Velocidade espacial heliocêntrica	24
2.4	Diagrama para o cálculo da distância galactocêntrica	25
2.5	Mapa de contorno para a estrela Vega	28
2.6	Projeção de Aitoff do catálogo de Roeser	29
2.7	Projeção de Aitoff do catálogo de Roeser, após filtrado.	33
2.8	Curvas de calibração temperatura <i>vs.</i> cor para gigantes e anãs.	36
2.9	$T_{\text{eff}}$ para gigantes do catalogo de Roeser	37
2.10	Projeção de Aitoff do catálogo de Ivanov	38
2.11	Distribuição de velocidades radiais dos objetos do catálogo Ivanov	40
2.12	$T_{\text{eff}}$ para gigantes do catalogo de Ivanov	42
3.1	Pontos representativos na região de interesse	44
3.2	Projeção de Aitoff dos objetos de Brown, Roeser e as direções representativas	45
3.3	Mapa da região de interesse 1	46
3.4	Mapa da região 1 ampliado	46
3.5	Comparação dos mapas de contorno para uma variação em longitude galáctica	48

<i>LISTA DE FIGURAS</i>	10
3.6 Comparação dos mapas de contorno para uma variação de movimento próprio . . . . .	49
3.7 Distribuição de distâncias para objetos do catálogo de Roeser	50
3.8 Mapa para região $l = 90^\circ$ do catálogo de Roeser . . . . .	51
3.9 Distribuição de distâncias para objetos do catálogo de Ivanov .	52
3.10 Mapa para região $l = 90^\circ$ do catálogo de Ivanov . . . . .	52
4.1 Distribuição de HVS, segundo Abadi et al. (2009) e Supernova Puppis A . . . . .	63
B.1 Mapa Região 2 . . . . .	75
B.2 Mapa Região 3 . . . . .	75
B.3 Mapa Região 4 . . . . .	75
B.4 Mapa Região 5 . . . . .	76
B.5 Mapa Região 6 . . . . .	76
B.6 Mapa Região 7 . . . . .	76
B.7 Mapa Região 8 . . . . .	77
B.8 Mapa Região 9 . . . . .	77
B.9 Mapa Região 10 . . . . .	77

# Lista de Algoritmos

C.1	Função em Python usada para o cálculo da velocidade galac- tocêntrica $V_{\text{GRF}}$ . . . . .	79
C.2	Função em Python usada para o cálculo da velocidade de es- cape $V_{\text{esc}}$ . . . . .	80

# Resumo

Estrelas de hipervelocidade, ou HVS (do inglês *Hypervelocity stars*), são estrelas, cuja velocidade galactocêntrica é maior que a velocidade de escape da Galáxia. O estudo das HVSs começou quando [Hills \(1988\)](#), usando simulação numérica, previu a ruptura de um sistema binário ao passar próximo do buraco negro supermassivo no centro da Via Láctea. Uma das componentes do binário seria capturada, enquanto a outra seria ejetada a velocidades de até  $4\,000\text{ km s}^{-1}$ . A descoberta da primeira HVS foi feita por [Brown et al. \(2005\)](#). A maioria dos estudos para este tipo de estrela, seleciona-as pela análise de suas velocidades radiais. Há poucos trabalhos que utilizam como parâmetros de busca os movimentos próprios. O objetivo deste trabalho é encontrar critérios para selecionar candidatas a HVS a partir de catálogos que contenha estrelas com grandes movimentos próprios.

# Abstract

Hypervelocity stars, or HVS, are stars having galactocentric velocities greater than the escape velocity of the Galaxy. The study of HVSs began when [Hills \(1988\)](#), using numerical simulations, predicted the disruption of a binary stellar system passing close to the supermassive black hole at the center of the Milky Way. One of the binary components would be captured, while the other would be ejected at speeds up to  $4\,000\text{ km s}^{-1}$ . The discovery of the first HVS was made by [Brown et al. \(2005\)](#). Most studies for this type of star are done by analyzing their radial velocities. There are very few studies that use proper motions as searching parameters for HVSs. The purpose of this work is to find criteria for selecting HVS candidates from catalogs containing stars that have high proper motions.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Definição de estrelas de hipervelocidade e sua importância no contexto da Astronomia

Estrelas de hipervelocidade (em inglês, *Hypervelocity stars* ou HVS), são estrelas cuja velocidade galactocêntrica é maior que a velocidade de escape da Galáxia. Presume-se que estas estrelas se originem pela dissociação de um sistema binário estelar no decorrer de um encontro próximo com o buraco negro supermassivo no centro da Via Láctea. Nesse processo, uma das componentes é capturada pelo buraco negro, e a outra é ejetada com velocidades de até  $4\,000\text{ km s}^{-1}$  (Hills, 1988).

Há dois outros mecanismos que poderiam gerar HVS: o processo de colisão entre galáxias e a explosão de uma supernova. Estes mecanismos não serão tratados neste trabalho, mas serão comentados na Seção 4.3. Eventualmente, estrelas do tipo *runaways*<sup>1</sup> podem ser confundidas com HVSs. Medidas mais precisas do movimento próprio e da distância são necessárias para verificar se se trata de uma ou de outra. Um exemplo é a estrela

---

<sup>1</sup>Estrela com velocidade muito elevada, se comparada ao meio circundante, cujos mecanismos de origem são semelhantes aos das HVSs: quebra, por força de maré, de um sistema binário por um buraco negro supermassivo; interações dinâmicas num aglomerado estelar; explosões de supernovas em um sistema binário (Irrgang et al., 2010).

HD 34078 (Gratier et al., 2014), que tem um elevado movimento próprio ( $\mu_\delta = 43,73 \text{ mas yr}^{-1}$ )<sup>2</sup> e velocidade radial ( $V_R = 56,70 \text{ km s}^{-1}$ ), mas sua velocidade galactocêntrica é de aproximadamente  $120 \text{ km s}^{-1}$ .

Pesquisas com HVSs são importantes para um melhor entendimento da estrutura e evolução da Galáxia. Por exemplo, podem ajudar a determinar o potencial gravitacional, estabelecendo vínculos entre os diferentes componentes, como a massa do buraco negro central e o halo de matéria escura, como mostrado em Gnedin et al. (2005) e Kenyon et al. (2008). Quer seja por meio de simulações computacionais, quer seja por meio de observação, a determinação da origem e de parâmetros orbitais das HVSs pode ajudar a criar restrições e limites para grandezas como massa, raio e densidade da Via Láctea.

## 1.2 Previsão das estrelas de hipervelocidade

O Sol orbita o centro da Via Láctea com uma velocidade entre  $232 \text{ km s}^{-1}$  e  $252 \text{ km s}^{-1}$ . Esta velocidade é muito inferior à velocidade de escape da Galáxia, sobretudo para o modelo de potencial adotado neste estudo (Allen & Santillan, 1991). Paralelamente, segundo Piffl et al. (2014), a partir dos dados do *RAdial Velocity Experiment*, RAVE, a velocidade de escape galáctica mínima requerida para alcançar três raios do virial<sup>3</sup> é  $533_{-41}^{+54} \text{ km s}^{-1}$ . O artigo seminal para o estudo de HVS foi escrito por Hills (1988). Usando simulação numérica, Hills mostrou que a interação de um sistema estelar binário com um buraco negro massivo pode levar à ruptura do sistema, fazendo com que uma das companheiras seja capturada e a outra ejetada com velocidades que podem alcançar  $4\,000 \text{ km s}^{-1}$ . Esta ruptura não é uma característica exclusiva de objetos estelares e buracos negros; é um fenômeno típico da dinâmica

<sup>2</sup>O movimento próprio é normalmente medido em segundos de arco por ano, ou milissegundo de arco por ano, mas  $\text{yr}^{-1}$  (do inglês *milliarcsecond per year*).

<sup>3</sup>O teorema do virial define que em um sistema de partículas interagindo por meio da gravidade, se a energia cinética média do sistema,  $\bar{K}$ , e a energia potencial média do sistema,  $\bar{U}$ , não variam significativamente no tempo, então  $\bar{K} = -\frac{1}{2}\bar{U}$ . Em dinâmica galáctica, a energia cinética média das estrelas está vinculada à dispersão de velocidades, e o raio do virial é definido como a distância à qual a dispersão de velocidades é máxima.

do problema de três corpos. Hills fez simulações utilizando um sistema binário e uma “estrela intrusa” e mostrou que, no encontro próximo newtoniano<sup>4</sup>, a massa da intrusa substitui a massa de uma das companheiras da binária. A energia de ligação gravitacional média aumenta com a massa da intrusa capturada. O aumento é quintuplicado se a massa da intrusa for 100 vezes maior que a massa das componentes da binária, e isto tende a aumentar para intrusos mais massivos. Cabe destacar que, em geral, o raio de Roche do buraco negro excede o raio de Schwarzschild, e a disrupção da binária ocorre bem antes de qualquer uma das componentes alcançar o horizonte de eventos. A alta velocidade de ejeção da companheira ocorre porque a velocidade do centro de massa da binária,  $V_{\text{break}}$ , no ponto em que a força de maré do buraco negro a puxa em sua direção, é maior que a velocidade orbital interna,  $V_{\text{orb}}$ . A variação da energia cinética que uma companheira experimenta é da ordem de  $\delta K \approx V_{\text{orb}} \cdot V_{\text{break}}$  (Hills, 1988).

Yu & Tremaine (2003) aprofundaram os estudos sobre os mecanismos de ejeção de HVS a partir do centro da Galáxia e determinaram as taxas de ejeção para três mecanismos:

1. **Encontro próximo entre duas estrelas:** este mecanismo expelle HVS a uma taxa desprezível de  $\sim 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ . O buraco negro é importante para a taxa de ejeção, embora não participe do processo de quebra.
2. **Ruptura de uma binária devido a um buraco negro:** este é o mecanismo originalmente proposto por Hills (1988) e consiste na ruptura de um sistema binário de estrelas, devido à força de maré causada pela presença de um buraco negro massivo. Este mecanismo expelle HVSs a uma taxa de  $\sim 10^{-5} \frac{\eta}{0,1} \text{ yr}^{-1}$ , onde  $\eta$  é a fração de binárias com semieixo  $a_b = 0,3 \text{ AU}$ . O número esperado de HVSs do tipo solar é  $\sim 60 \frac{\eta}{0,1} \left( \frac{a_b}{0,1 \text{ AU}} \right)^{\frac{1}{2}}$ . Por exemplo, para  $\eta = 0,1$  e  $a_b = 0,3 \text{ AU}$ , a taxa de ejeção é de  $10^{-5} \text{ yr}^{-1}$  e um número esperado de HVSs de  $\sim 100$ .

---

<sup>4</sup>A especificação “newtoniano” refere-se ao fato de que os efeitos relativísticos, para este caso, podem ser desprezados.

3. **Interação entre uma estrela e um buraco negro binário:** interação de três corpos, entre um par binário de buracos negros (BBN) e uma estrela individual. Restringindo os parâmetros espaciais (semieixo maior, massa) do BBN, por exemplo,  $a_{\text{bbh}} = 0,5 \times 10^{-3}$  e a razão das massas 0,01, a taxa de ejeção é de  $10^{-4} \text{ yr}^{-1}$ , e o número esperado de HVSs é de 1 000.

HVSs ejetadas do centro da Galáxia têm, adicionalmente, uma assinatura cinemática distinta, pois seu vetor velocidade espacial quase sempre deve estar partindo da direção do centro da Galáxia.

### 1.3 Descoberta de HVSs

A primeira HVS foi descoberta por [Brown et al. \(2005\)](#) e é denominada SDSS J090745.0+024507. Na ocasião da sua descoberta, havia dúvidas se se tratava de uma estrela azul gigante do ramo horizontal a uma distância de 39 kpc, ou uma B9 da sequência principal a 71 kpc. A velocidade em relação ao centro da galáxia, doravante CG, é de  $709 \pm 12 \text{ km s}^{-1}$ . O vetor velocidade radial desta estrela aponta a  $174^\circ$  do centro da Galáxia. A estrela tem metalicidade  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0$ , consistente com uma origem próxima ao CG. O tempo de viagem  $\lesssim 80 \text{ Myr}$ , também é consistente com o tempo de vida estelar. Se esta estrela está realmente vindo do CG, deve ter um movimento próprio de  $\lesssim 0,3 \text{ mas yr}^{-1}$ . Mais tarde, [Fuentes et al. \(2006\)](#) confirmaram que, de fato, trata-se de uma B9 variável, da sequência principal, com uma  $T_{\text{eff}} = 10\,500 \text{ K}$ , e idade de  $3,5 \times 10^8 \text{ yr}$ .

Posteriormente, [Brown et al. \(2012\)](#) compilaram 38 objetos incluindo, além de HVSs conhecidas, prováveis HVSs (Tabela [A.1](#)).

A maioria das HVSs foram descobertas a partir do estudo de suas altas velocidades radiais, como se pode observar num histograma da distribuição de velocidades das estrelas catalogadas por Brown (Figura [1.1](#)).

Outras HVSs podem ser descobertas, confirmadas ou descartadas por meio de estudos de catálogos estelares específicos, ou de objetos individuais (como em [Pereira et al., 2013](#)), ou de simulações numéricas para diferen-

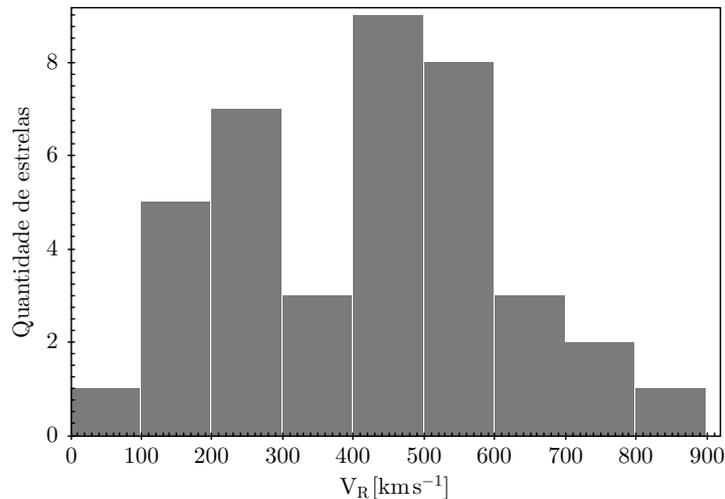


Figura 1.1: Distribuição de velocidades radiais das HVS catalogadas por [Brown et al. \(2012\)](#).

tes populações estelares, mecanismos geradores ou regiões da Galáxia (por exemplo, [Zhang et al., 2010](#)).

## 1.4 Estrelas com grande movimento próprio

A busca por HVS a partir de objetos com grande movimento próprio, justifica-se pela própria definição de movimento próprio. Esta grandeza é um deslocamento angular do astro na esfera celeste com o tempo, sendo um movimento intrínseco do objeto que não depende do movimento do Sol. A velocidade tangencial (tangente à esfera celeste e perpendicular à linha de visada) é diretamente proporcional ao movimento próprio e à distância heliocêntrica, conforme se pode ver no diagrama da Figura 1.2. Normalmente, espera-se que objetos tenham grande movimento próprio, estejam relativamente próximo ao Sol (a rigor, ao observador). Por outro lado, se o corpo está a uma grande distância, espera-se que tenha um movimento próprio pequeno. Encontrar um objeto com grande movimento próprio e grande distância, implica que ele tem uma grande velocidade tangencial e, conseqüentemente, uma grande velocidade espacial. Portanto, altos movimentos próprios podem ser indicadores de HVSs quando acompanhados de grandes

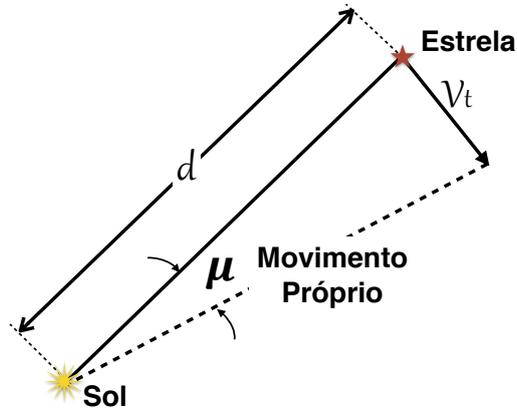


Figura 1.2: Diagrama ilustrativo do movimento próprio  $\mu$  e sua relação geométrica com a velocidade tangencial  $V_t$ .

distâncias.

## 1.5 Objetivos deste trabalho

A maioria dos trabalhos existentes na literatura propõem estrelas candidatas a HVS com base nos altos valores das velocidades radiais. Entretanto, existem poucos trabalhos que propõem candidatas a HVS com base no estudo de altos movimentos próprios, particularmente porque esta abordagem esbarra nas dificuldades intrínsecas à determinação da distância com precisão. O objetivo geral deste trabalho é propor critérios que possibilitem selecionar candidatas a estrelas de hipervelocidade a partir da análise de catálogos que contenham movimentos próprios, como os de [Roeser et al. \(2010\)](#) e [Ivanov \(2008\)](#). Em particular, consideraremos as seguintes abordagens.

### 1.5.1 Mapeamento de zonas de interesse

Um primeiro objetivo consiste em mapear zonas ou intervalos de interesse, em termos de distância heliocêntrica e velocidade radial, para caracterizar as HVSs. Isto é feito através de mapas de contorno, ou curvas de nível, da velocidade estelar  $V_{\text{GRF}}$  no referencial de repouso da Galáxia, GRF (do inglês *Galactic Rest Frame*) ou, em outras palavras, da velocidade galac-

tocêntrica. Esta velocidade pode ser escrita como uma função de diferentes parâmetros:

$$V_{\text{GRF}} = f(l, b, \mu_\alpha, \mu_\delta, d_h, V_R), \quad (1.1)$$

onde  $l$ ,  $b$  são a longitude e latitude galácticas (heliocêntricas);  $\mu_\alpha$  e  $\mu_\delta$  são os movimentos próprios na ascensão reta e declinação, respectivamente;  $d_h$  é a distância heliocêntrica e  $V_R$  é a velocidade radial heliocêntrica. Nestes mapas de contorno, o eixo horizontal é  $d_h$  e o eixo vertical é  $V_R$ , enquanto que  $l$ ,  $b$ ,  $\mu_\alpha$  e  $\mu_\delta$  são parâmetros fixos, conhecidos a partir dos catálogos investigados. Com estes mapas procuramos estabelecer o quão sensível seria a  $V_{\text{GRF}}$  às variações em  $d_h$  e  $V_R$ , que, na maioria dos casos, são grandezas desconhecidas ou, no caso específico da distância, mal determinadas.

### 1.5.2 Critérios de seleção de candidatas a HVS

Um segundo objetivo é encontrar critérios mais específicos para selecionar estrelas candidatas a HVS a partir de catálogos de movimento próprio. Os catálogos de Roeser e Ivanov fornecem, além das coordenadas e, obviamente, dos movimentos próprios, algumas magnitudes aparentes no visível e/ou no infravermelho próximo. Nossa proposta é utilizar estas magnitudes, juntamente com calibrações existentes na literatura, para estimar parâmetros estelares, como a temperatura efetiva ou a magnitude absoluta, e, por meio da expressão para o módulo da distância, obter uma estimativa da distância. De posse desta informação, é possível estabelecer um *ranking* dos objetos mais distantes associados a altos movimentos próprios que possibilite fazer uma seleção de candidatas a HVS. Particularmente interessantes serão aquelas candidatas com magnitude  $V < 13$ , pois estas podem ser facilmente observadas posteriormente para refinar suas distâncias e velocidades radiais através de análises fotométricas e/ou espectroscópicas.

# Capítulo 2

## Metodologia

### 2.1 Análise de zonas de interesse

#### 2.1.1 Definição do sistema de coordenadas

Para o cálculo da  $V_{\text{GRF}}$  é necessário definir um sistema de coordenadas adequado, levando em consideração o movimento do padrão local de repouso, LSR (do inglês *Local Standard of Rest*), e o movimento peculiar do Sol. O LSR é um referencial cuja origem descreve um movimento circular em torno do CG e cuja velocidade é definida como a média das velocidades (galactocêntricas) das estrelas da vizinhança solar, entre  $220 \text{ km s}^{-1}$  e  $240 \text{ km s}^{-1}$ . O Sol possui um movimento peculiar em relação ao LSR, de forma que o seu movimento em torno do CG resulta da sobreposição do movimento peculiar e do movimento do LSR.

O sistema de coordenadas galácticas é um sistema heliocêntrico cujo plano de referência, o plano galáctico, coincide aproximadamente com o disco da Via Láctea. O polo norte galáctico encontra-se em  $\alpha = 12^{\text{h}}51,4^{\text{m}}$  e  $\delta = 27^{\circ}7'$  e a origem do sistema é dada pela direção do CG, localizado na constelação de Sagitário em  $\alpha = 17^{\text{h}}45,6^{\text{m}}$  e  $\delta = -28^{\circ}56'$  (em J2000). Neste sistema são definidas a longitude galáctica,  $l$ , e a latitude galáctica,  $b$ . A longitude galáctica é medida sobre o plano galáctico a partir da direção do CG, no intervalo  $0^{\circ} < l < 360^{\circ}$  positivo na direção da rotação da Galáxia<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Portanto, o Sol se movimenta com um vetor velocidade que aponta aproximadamente

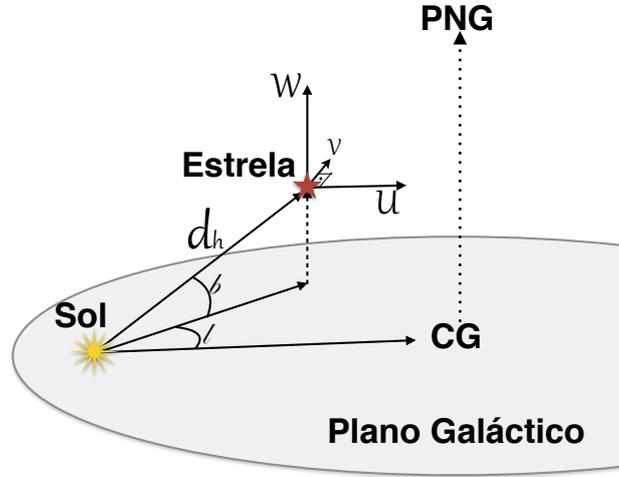


Figura 2.1: Sistema de coordenadas galácticas heliocêntricas, em que se definem as coordenadas  $l$ ,  $b$  e as velocidades  $U$ ,  $V$ ,  $W$ .

A latitude galáctica é medida a partir do plano de referência, no intervalo  $-90^\circ < b < 90^\circ$ , positiva na direção do polo norte galáctico (Figura 2.1). A posição heliocêntrica de um objeto neste sistema fica definida pela tríade  $(d_h, l, b)$ , com a distância heliocêntrica  $d_h$  usualmente medida em parsec, (pc).

As componentes ortogonais da velocidade espacial de uma estrela no sistema de coordenadas galácticas são denominadas  $(U, V, W)$  e medidas em  $\text{km s}^{-1}$ .  $U$  é medido positivo na direção do CG ( $l = 0^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ),  $V$  é positivo na direção da rotação da Galáxia ( $l = 90^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ), e  $W$  é positivo na direção do polo norte galáctico ( $b = 90^\circ$ ). Neste contexto, o movimento peculiar do Sol em relação ao LSR é dado por Schönrich et al. (2010):

$$U_{\odot} = 11,1_{-0,75}^{+0,69} \text{ km s}^{-1} \quad (2.1)$$

$$V_{\odot} = 12,24_{-0,47}^{+0,47} \text{ km s}^{-1}$$

$$W_{\odot} = 7,25_{-0,36}^{+0,37} \text{ km s}^{-1} \quad (2.2)$$

Outros autores fornecem valores diferentes destes.

na direção  $l = 56^\circ$ , o Apex Solar, sendo que a principal componente deste vetor aponta na direção  $l = 90^\circ$ .

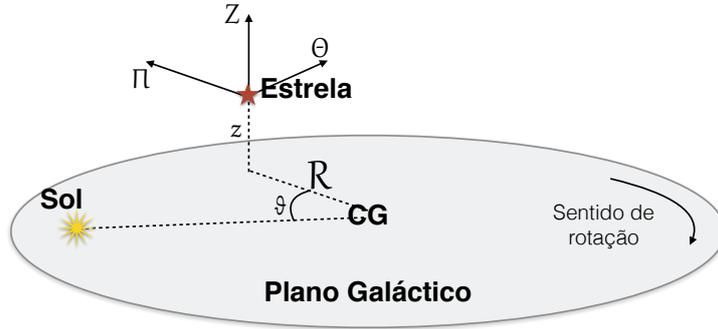


Figura 2.2: Sistema de coordenadas galactocêntricas

O sistema de coordenadas galactocêntricas é um sistema centrado na Galáxia, diferentemente do sistema de coordenadas galácticas que é heliocêntrico. Ambos sistemas compartilham o mesmo plano de referência (ver Figura 2.2), mas no sistema galactocêntrico a posição do objeto é função das coordenadas cilíndricas  $(R, \theta, z)$ , onde  $R$  é a distância ao CG projetada sobre o plano de referência, em pc,  $\theta$  é um ângulo medido sobre o plano galáctico a partir da posição do Sol, positivo no sentido da rotação da Galáxia, e  $z$  é a altura acima ou abaixo do plano galáctico, em pc. A velocidade espacial é determinada pela tríade  $(\Pi, \Theta, Z)$ , medidas em  $\text{km s}^{-1}$ , onde  $\Pi = \dot{R}$  é positiva na direção oposta ao CG,  $\Theta = R\dot{\theta}$  é positiva na direção de rotação da galáxia, e  $Z = \dot{z}$  é perpendicular ao plano, positiva para cima e negativa para baixo. O sistema de coordenadas galactocêntricas é o sistema natural para o estudo das HVSs. Entretanto, as informações das estrelas, em geral, encontram-se em coordenadas equatoriais (heliocêntricas), tornando-se necessário aplicar uma transformação de coordenadas adequada.

### 2.1.2 Cálculo de velocidades no referencial galactocêntrico

Para calcular a velocidade no referencial galactocêntrico é necessário encontrar a velocidade espacial heliocêntrica  $V_e = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$  que depende das velocidades tangencial  $V_t$  e radial  $V_R$  (Figura 2.3) que são as grandezas fornecidas pelas observações. Então

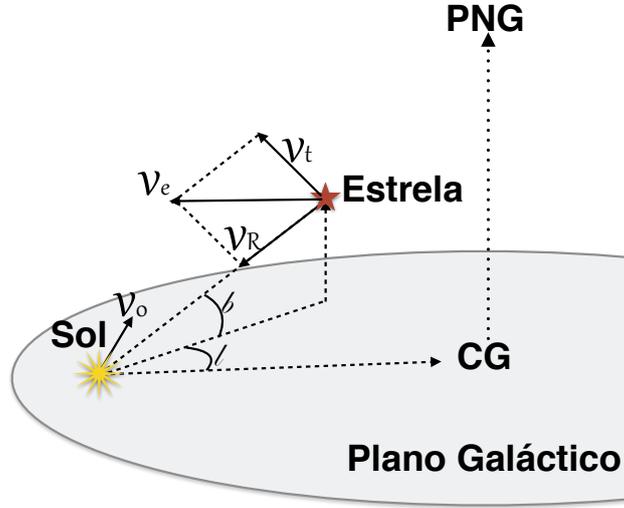


Figura 2.3: Velocidade espacial heliocêntrica  $V_e$ , obtida a partir das velocidades tangencial  $V_t$  e radial  $V_R$ .

$$V_e = \sqrt{V_R^2 + V_t^2}. \quad (2.3)$$

A velocidade tangencial  $V_t$  é definida como

$$V_t = 4,74 \mu d_h, \quad (2.4)$$

onde  $d_h$  é a distância heliocêntrica medida em pc,  $\mu = \sqrt{\mu_\alpha^2 + \mu_\delta^2}$  é o movimento próprio total medido em  $\text{arcsec yr}^{-1}$ , e o fator 4,74 é necessário para que a velocidade esteja em unidades de  $\text{km s}^{-1}$ . Conhecida  $V_e$ , calcula-se  $V_{\text{GRF}}$  a partir da fórmula (Brown et al., 2012):

$$V_{\text{GRF}} = V_e + 11,1 \cos l \cos b + 262,24 \sin l \cos b + 7,25 \sin b, \quad (2.5)$$

onde já estão incluídos o movimento peculiar do Sol e a velocidade do LSR. Observa-se que nesta fórmula foram usados os valores das Equações 2.1 e considerado o valor da velocidade do LSR,  $V_{\text{LSR}} = 250 \text{ km s}^{-1}$  (Brown et al., 2012). O valor de  $V_{\text{LSR}}$ , apesar de superestimado, foi usado para comparação com os valores de  $V_{\text{GRF}}$  em Brown et al. (2012).

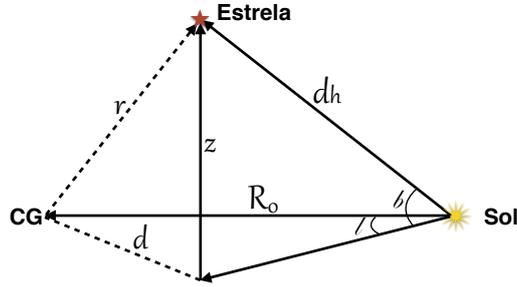


Figura 2.4: Diagrama para o cálculo da distância galactocêntrica a partir da distância heliocêntrica e das coordenadas  $l$  e  $b$

### 2.1.3 Cálculo da velocidade de escape

Para determinar se a estrela é uma HVS é necessário, adicionalmente, determinar o módulo da velocidade de escape da Galáxia no local. A velocidade de escape,  $V_{\text{esc}}$ , como uma função de  $(l, b, d_h)$ , pode ser obtida se conhecermos o potencial da Galáxia. Neste trabalho, vamos considerar que o potencial é constituído por três componentes sobrepostas: bojo, disco e halo de matéria escura, conforme definidos por [Allen & Santillan \(1991\)](#). Para obter a distância galactocêntrica  $r$  da estrela, aplica-se uma transformação de coordenadas levando-se em consideração a distância heliocêntrica e a posição do Sol em relação ao CG,  $R_0 = 8,5$  kpc ([Pereira et al., 2013](#)),  $z_0 = 17$  pc ([Joshi, 2007](#)), conforme a Figura 2.4.

Assim, temos

$$\begin{aligned} z &= d_h \sin b + z_0 \\ d &= \sqrt{d_h^2 \cos^2 b - 2R_0 d_h \cos b \cos l} \\ r &= \sqrt{d^2 + z^2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

e as componentes do potencial galáctico são:

- Para o bojo, um potencial esférico de Plummer,

$$\Phi_1 = -\frac{M_1}{\sqrt{r^2 + b_1^2}}; \quad (2.7)$$

- Para o disco, um potencial de Kuzmin,

$$\Phi_2 = -\frac{M_2}{\sqrt{d^2 + \left(a_2 + \sqrt{z^2 + b_2^2}\right)^2}}; \quad (2.8)$$

- Para o halo de matéria escura, um potencial misto dado pela soma de

$$\Phi_3 = -\frac{M_3}{r} \frac{1}{h} \left(\frac{r}{a_3}\right)^{2,02} \quad (2.9)$$

e

$$\Phi_4 = \begin{cases} -\frac{M_3}{a_3} \left[ \frac{1}{h} - \frac{1}{h_{100}} - \frac{\log(h/h_{100})}{1,02} \right], & \text{se } r \leq 100 \text{ kpc} \\ 0, & \text{se } r > 100 \text{ kpc} \end{cases}, \quad (2.10)$$

onde

$$\begin{aligned} h &= 1 + \left(\frac{r}{a_3}\right)^{1,02} \\ h_{100} &= 1 + \left(\frac{100}{a_3}\right)^{1,02}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Nestas expressões,  $a_i, b_i$  são diferentes escalas de comprimento em kpc e  $M_i$  são as massas das respectivas componentes, em unidades tais que  $G = 1$  e  $\Phi_i$  fica em unidades de  $\text{km}^2 \text{s}^{-2}$ :

$$\begin{aligned} M_1 &= 6,06 \times 10^4 & a_2 &= 5,3178 \\ M_2 &= 3,69 \times 10^5 & a_3 &= 12,08 \\ M_3 &= 4,615 \times 10^5 & b_1 &= 0,3873 \\ & & b_2 &= 0,25 \end{aligned} \quad ,$$

de forma que a velocidade de escape é

$$V_{\text{esc}} = \sqrt{-2 \sum_{i=1}^4 \Phi_i} \text{ [km s}^{-1}\text{]}. \quad (2.12)$$

Grandeza	Vega
$l$ [°]	67,448
$b$ [°]	19,237
$\mu_\alpha$ [mas yr <sup>-1</sup> ]	200,94
$\mu_\delta$ [mas yr <sup>-1</sup> ]	286,23
$d_h$ [pc]	$7,68 \pm 0,02$
$V_R$ [km s <sup>-1</sup> ]	$-20,6 \pm 0,2$

Tabela 2.1: Tabela de dados para o exemplo de aplicação do mapa de contorno para a estrela Vega.

#### 2.1.4 Mapa de contorno das zonas de interesse

Pelo que foi exposto nas duas últimas seções, é necessário conhecer  $l$ ,  $b$ ,  $\mu_\alpha, \mu_\delta$ ,  $d_h$  e  $V_R$  para determinarmos  $V_{\text{esc}}$  e  $V_{\text{GRF}}$ . Para visualizar a relação entre as variáveis, é possível definir um mapa de contornos em que o eixo horizontal é  $d_h$ , o eixo vertical é  $V_R$  e as demais variáveis são parâmetros fixos conhecidos. As funções  $V_{\text{esc}}(l, b, d_h)$  e  $V_{\text{GRF}}(l, b, \mu_\alpha, \mu_\delta, d_h, V_R)$  são as curvas de nível deste mapa. Variando-se os parâmetros  $l$ ,  $b$ , e  $\mu_\alpha, \mu_\delta$  para diferentes intervalos de interesse, tem-se um panorama geral das relações envolvidas.

Com exemplo de aplicação deste mapa de contorno, na Figura 2.5 apresentamos uma análise para a região da estrela Vega, com os parâmetros listados na Tabela 2.1. Notamos que Vega não é uma HVS, pois sua velocidade galactocêntrica é de  $\approx 258 \text{ km s}^{-1}$ , mas a velocidade de escape nesse ponto é de  $\approx 463 \text{ km s}^{-1}$ . Ainda que houvesse um erro de 20 pc na posição da estrela, ela não seria classificada como uma HVS. Cabe destacar que em todos estes mapas, a velocidade de escape é pouco sensível às variações na distância heliocêntrica, o que é uma característica esperada do potencial da Galáxia.

Com estes mapas é possível avaliar certas regiões, a partir de um referencial heliocêntrico, que aumentem a chance de se encontrar HVS. Esta análise serve como mais um dos critérios para se selecionar candidatas.

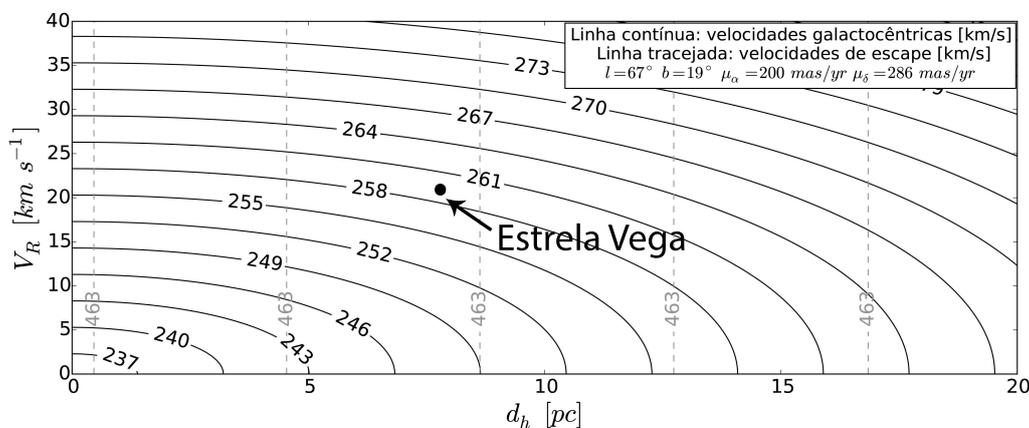


Figura 2.5: Exemplo de aplicação do mapa de contorno para a estrela Vega usando os parâmetros da Tabela 2.1. As curvas contínuas representam os níveis de  $V_{\text{GRF}}$  e as curvas tracejadas representam os níveis de  $V_{\text{esc}}$ . Os valores de  $V_{\text{GRF}}$  estão superestimados em  $5 \text{ km s}^{-1}$ .

## 2.2 Catálogo de estrelas com grande movimento próprio

### 2.2.1 Critérios para seleção de candidatas

Como mencionado anteriormente, a procura de HVSs tem sido feita principalmente a partir de suas velocidades radiais. Para uma análise destas estrelas a partir de seus movimentos próprios são necessários catálogos específicos que tragam estas informações, bem como, se possível, outros parâmetros como distância e velocidade radial.

Analisamos dois catálogos de estrelas com movimento próprio neste trabalho: Roeser (Roeser et al., 2010) e Ivanov (Ivanov, 2008). Ambos os catálogos trazem registrados os movimentos próprios  $\mu_\alpha$  e  $\mu_\delta$  e as coordenadas equatoriais. Entretanto, não trazem as distâncias, que são essenciais para a determinação da  $V_{\text{GRF}}$ , mas como vários dos objetos nos dois catálogos têm registradas algumas magnitudes nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K$  (Roeser) e  $B$ ,  $V$  e  $R$  (Ivanov), pode-se usar estas magnitudes para obter uma estimativa das distâncias heliocêntricas, a partir de calibrações existentes na literatura e da expressão para o módulo da distância,

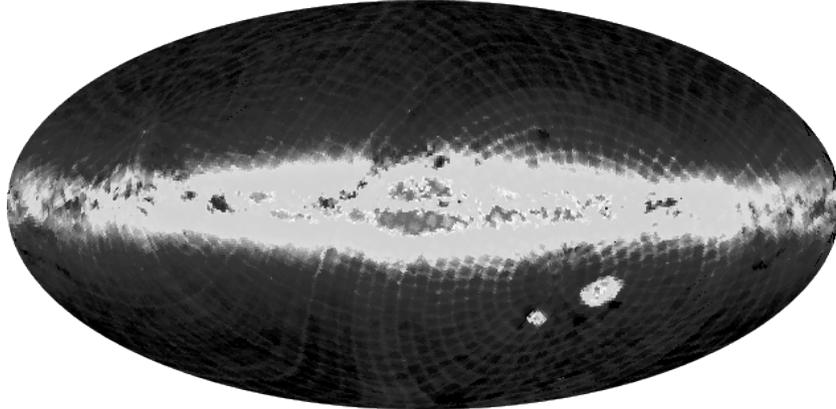


Figura 2.6: Projeção de Aitoff da distribuição dos objetos originais do catálogo do Roeser. Os tons de cinza representam densidade de estrelas, crescente do escuro ao claro. O eixo horizontal é a longitude galáctica.

$$m_V - M_V = 5 \log d_h - 5 + A_V; \quad (2.13)$$

onde  $M_V$  é a magnitude absoluta na banda  $V$ ,  $A_V$  é a extinção interestelar total na banda  $V$ .

Cada catálogo foi tratado separadamente, uma vez que possuem informações sobre magnitudes diferentes. Além disso, o catálogo de Ivanov registra a velocidade radial para um pequeno número de objetos.

### 2.2.2 Catálogo de Roeser

O catálogo de [Roeser et al. \(2010\)](#) (Figura 2.6) foi construído a partir de outros dois catálogos: o USNO-B1.0, publicado pelo *United States Naval Observatory*, e o *Two Micron All Sky Survey*, 2MASS. Entretanto, o 2MASS não contém movimentos próprios e, por sua vez, o USNO-B1.0 só contém movimentos próprios relativos, ou seja, não referenciados ao Sistema de Referência Celeste Internacional, ICRS (do inglês *International Celestial Reference System*). [Roeser et al. \(2010\)](#) fizeram uma nova determinação das posições médias e dos movimentos próprios no ICRS pela combinação da astrometria do 2MASS e do USNO-B1.0, e o catálogo resultante foi chamado

de PPMXL<sup>2</sup>. Este catálogo possui 910 468 710 entradas, incluindo estrelas, galáxias e também entradas falsas (*fakes*, na terminologia do Roeser). Neste catálogo há um grande número de estrelas com grande movimento próprio, por exemplo, no hemisfério norte galáctico, cerca de 24,5 milhões de objetos têm movimento próprio acima de  $130 \text{ mas yr}^{-1}$ . De acordo com o próprio Roeser, para um grande número destes objetos o valor de  $\mu$  deve ser falso, o que é evidenciado pela distribuição de movimentos próprios praticamente plana acima de  $130 \text{ mas yr}^{-1}$ . Cada entrada do catálogo traz informação sobre  $\alpha$ ,  $\delta$ ,  $\mu_\alpha$ ,  $\mu_\delta$ , e magnitudes  $J$ ,  $H$  e/ou  $K$  do 2MASS, todos estes parâmetros com suas respectivas incertezas. É importante ressaltar que a magnitude na banda  $K$  corresponde, de fato, ao filtro  $K_s$ <sup>3</sup>, mas como a diferença é mínima, para os propósitos deste trabalho, será mantida a notação  $K$ . Outro ponto a se levar em consideração é que o valor de  $\mu_\alpha$  fornecido no catálogo já vem corrigido da declinação, ou seja,  $\mu_\alpha \equiv \mu_\alpha \cos \delta$ . Além disso, cada entrada traz também as magnitudes  $B$ ,  $R$ ,  $I$  (ou  $V$ ) extraídas do USNO-B1.0, mas, de acordo com os autores, estas magnitudes não são confiáveis e devem ser utilizadas com precaução.

Para estimar a distância a partir do catálogo de Roeser é necessário encontrar uma relação entre  $M_V$ ,  $A_V$  e as magnitudes nas bandas  $J$ ,  $H$  e  $K$ . Em Alonso et al. (1999) e Cardelli et al. (1989) encontram-se as calibrações necessárias para estas conversões. O processo de seleção e tratamento de dados do catálogo de Roeser seguiu as etapas abaixo:

### Filtragem inicial:

O catálogo de Roeser está disponível em diversos formatos no endereço eletrônico <http://vizier.u-strasbg.fr>. É possível baixar o arquivo completo ou

---

<sup>2</sup>Este catálogo expande o *Positions and Proper Motions eXtended Catalog*, PPMX, publicado por Roeser e colaboradores em 2008, que por sua vez é uma extensão do Catálogo PPM, também compilado por Roeser e colaboradores em 1991. O PPMXL é considerado completo para estrelas com magnitude até  $V = 20$ . Por questão de coerência, o PPMXL será chamado aqui de “catálogo de Roeser”, de forma equivalente ao “catálogo de Ivanov”, que não tem nenhum nome específico.

<sup>3</sup>O filtro  $K_s$  (do inglês *K-short*), diferencia-se do filtro  $K$  do sistema de Johnson em que suprime os comprimentos de onda além de  $2,3 \mu\text{m}$  visando reduzir a contribuição do ruído de fundo térmico.

por partes. Como o arquivo completo é muito grande, 39 GB compactado, fizemos uma pré-seleção de estrelas à medida em que cada parte do catálogo foi sendo baixada. A pré-seleção consiste em escolher os objetos que tenham listadas todas as magnitudes visuais e movimento próprio  $|\mu_\alpha|$  ou  $|\mu_\delta|$  acima de  $100 \text{ mas yr}^{-1}$ , porém abaixo de  $130 \text{ mas yr}^{-1}$  para evitar a ocorrência de entradas falsas. O algoritmo, implementado em Python, seguiu os seguintes passos:

1. Ter acesso ao sítio FTP do catálogo
2. Registrar a quantidade e os nomes de todos os arquivos
3. Baixar o arquivo na sequência da lista
4. Abrir o arquivo de dados compactado localmente
5. Aplicar o critério de seleção
6. Armazenar as estrelas selecionadas num outro arquivo
7. Deletar o arquivo baixado
8. Retornar ao passo 1

O programa tem um mecanismo de controle para registrar o andamento do procedimento para o caso de falhas no *download*. Após essa filtragem inicial, o catálogo ficou com aproximadamente 600 mil objetos. Posteriormente, este procedimento inicial foi repetido, porém usando-se o TOPCAT<sup>4</sup>, um programa de licença livre para observatórios virtuais, VO (do inglês *Virtual Observatory*). Os resultados obtidos foram os mesmos, porém num tempo substancialmente menor. O primeiro procedimento levou 15 dias para ser completado, enquanto que usando o TOPCAT foi necessário apenas 3 horas. A vantagem do TOPCAT é que o procedimento de seleção é aplicado diretamente no servidor de FTP e só são baixados os dados já filtrados. O catálogo de Roeser disponibiliza um endereço específico para o uso de programas de VO: <http://vo.uni-hd.de/ppmxl>.

---

<sup>4</sup>Disponível em <http://www.star.bristol.ac.uk/~mbt/topcat/>

**Seleção de estrelas brilhantes:**

Uma particularidade do catálogo de Roeser é que para algumas entradas traz dois valores para cada uma das magnitudes de Johnson  $B$  e  $R$ , que o autor trata como magnitudes de primeira época e de segunda época. Quando ambos valores estão disponíveis, foi levada em consideração apenas os da segunda época. Além disso, nesta etapa do filtro, exigiu-se que  $B < 13$ , de forma a manter somente estrelas brilhantes que são de interesse para eventuais futuros trabalhos de observação espectrofotométrica. Após este filtro, a quantidade de objetos caiu para 52 911.

**Seleção de estrelas com todas magnitudes definidas:**

Na filtragem inicial, optamos por manter objetos que tivessem todas as magnitudes visuais, resultando num número elevado de objetos. Em função disto, e já tendo em vista o uso das magnitudes no infravermelho como ferramenta para estimar a distância, nesta etapa foram conservadas apenas aquelas entradas em que todas as magnitudes estavam presentes. A quantidade de estrelas caiu para 9 497.

**Cálculo dos índices de cor e coordenadas galácticas:**

Os índices de cor ( $J - H$ ) e ( $H - K$ ) foram criados a partir das colunas  $J$ ,  $H$  e  $K$  e as coordenadas  $l$  e  $b$  foram calculadas a partir de  $\alpha$  e  $\delta$ .

**Remoção da contribuição do bojo e do disco:**

Para usar os índices de cor como parâmetros para estimativa de distância, deve-se corrigir o avermelhamento nas respectivas bandas. As estimativas do avermelhamento na região do disco galáctico e do bojo é problemática, sendo preferível então remover da amostra as estrelas que estão nestas regiões. Usando-se o critério adotado por [Brown et al. \(2012\)](#), as coordenadas foram filtradas mantendo-se as estrelas com  $-\frac{1}{5}l + 50^\circ < b < \frac{1}{5}l - 50^\circ$ , resultando em 3 681 objetos. A Figura 2.7 exhibe o resultado após a remoção dos objetos do bojo e do disco.

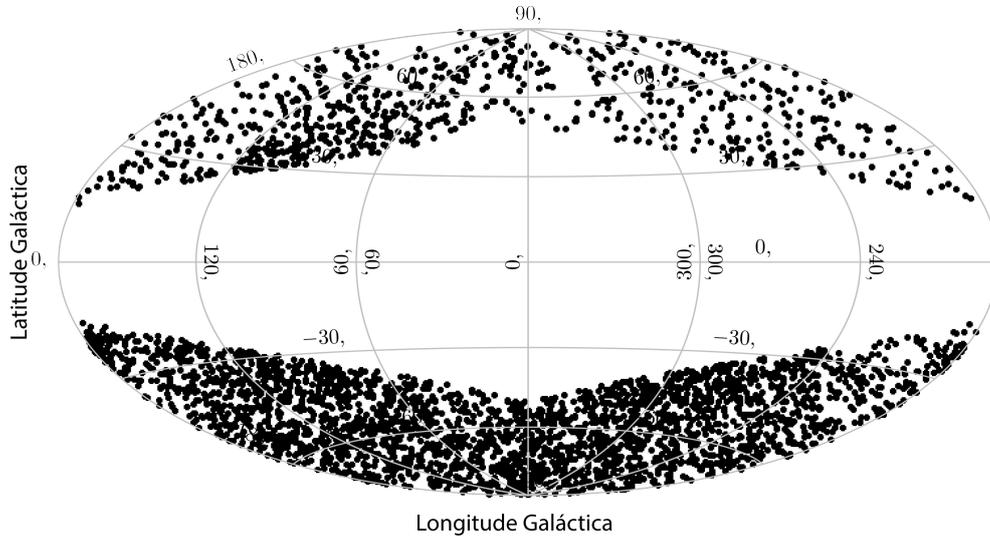


Figura 2.7: Projeção de Aitoff dos objetos do catálogo Roeser, depois de retirados os objetos do bojo e do disco.

### Cálculo da extinção e avermelhamento:

Os índices de cor intrínsecos são os índices de cor corrigidos do processo de avermelhamento ou excesso de cor. O excesso de cor é a diferença entre a cor observada de uma estrela e a cor intrínseca, por exemplo:

$$E(B - V) = (B - V) - (B - V)_0. \quad (2.14)$$

Para determinarmos o excesso de cor, usamos o *Infrared Science Archive*, IRSA<sup>5</sup>, que é um serviço da NASA/IPAC que fornece o avermelhamento causado pela poeira galáctica ao longo de uma dada linha de visada. Entrando com as coordenadas de um ponto no céu pode-se achar o avermelhamento e a extinção naquele ponto. Neste serviço é possível entrar tanto com as coordenadas de um único objeto como também com uma lista de coordenadas. Assim, a partir dos dados das estrelas selecionadas, geramos uma lista com as coordenadas  $(\alpha, \delta)$ , que foram enviadas ao IRSA. Os dados retornados

<sup>5</sup>Disponível em <http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

foram armazenados numa lista em que se encontram registrados, além das coordenadas originais, o valor da extinção interestelar  $A_V$  e do avermelhamento  $E(B - V)$ , além de outros dados. A extinção fornecida pelo IRSA é a extinção galáctica total ao longo da linha de visada que afeta objetos extragalácticos, mas que, para objetos da Galáxia, essa extinção deve ser menor, pois a coluna de matéria ao longo da linha de visada é menor. De qualquer forma, ao usar uma extinção maior da real estamos subestimando as distâncias dos objetos e, conseqüente, suas velocidades galactocêntricas. Além disso, deve ser destacado que nossa seleção se concentra em estrelas do halo, onde a extinção não é tão relevante.

A relação entre as extinções em uma banda  $\lambda$  e a banda  $V$  são dadas por  $\frac{A_\lambda}{A_V} = n_\lambda$ . Segundo [Cardelli et al. \(1989\)](#), para as bandas  $J$ ,  $H$  e  $K$  tem-se

$$\begin{aligned}\frac{A_J}{A_V} &= n_J = 0,282, \\ \frac{A_H}{A_V} &= n_H = 0,175, \\ \frac{A_K}{A_V} &= n_K = 0,112\end{aligned}\tag{2.15}$$

e

$$\begin{aligned}E(J - H) &= (n_J - n_H)A_V, \\ E(H - K) &= (n_H - n_K)A_V.\end{aligned}\tag{2.16}$$

De posse dos valores de  $n_i$  e de  $A_V$ , encontramos  $E(J - H)$ ,  $E(H - K)$  e, conseqüentemente, os índices intrínsecos:

$$\begin{aligned}(J - H)_0 &= (J - H) - E(J - H), \\ (H - K)_0 &= (H - K) - E(H - K).\end{aligned}\tag{2.17}$$

**Cálculo da temperatura efetiva para as gigantes:**

Com os índices de cor intrínsecos, pode-se estimar a temperatura efetiva,  $T_{\text{eff}}$ , usando as curvas de calibração de [Alonso et al. \(1999\)](#). Entretanto, esta calibração foi feita apenas para estrelas gigantes e, a priori, não se sabe se as estrelas selecionadas do catálogo de Roeser são gigantes ou não. Comparando a curva de calibração no índice de cor  $(B - V)_0$  obtida por [Alonso et al. \(1999\)](#) para gigantes com a curva de calibração no mesmo índice desenvolvida por [Ramirez & Melendez \(2005\)](#) para anãs, verificamos que para um dado valor de  $(B - V)_0$  a  $T_{\text{eff}}$  estimada é muito semelhante em um caso e no outro. Admitindo que este comportamento seja válido também para os índices de cor no infravermelho, podemos argumentar que a aplicação da calibração de [Alonso et al. \(1999\)](#) ao caso de estrelas anãs não deveria produzir erros significativos na  $T_{\text{eff}}$  que possam comprometer as estimativas de distância. De fato, como se verá mais tarde, o ganho na precisão de  $T_{\text{eff}}$  é muito inferior ao erro que se comete na distância por não conhecermos  $M_V$ . Além disso, de acordo com [Bessell & Brett \(1988\)](#), seria possível distinguir entre gigantes e anãs utilizando um diagrama  $(J - H)$  vs.  $(H - K)$ , mas essa distinção só é clara nos tipos espectrais tardios.

A calibração de [Alonso et al. \(1999\)](#) fornece a temperatura efetiva pela fórmula

$$T_{\text{eff}} = \frac{5\,040}{\theta_{\text{eff}}} \quad (2.18)$$

onde o fator 5 040 está relacionado ao tipo espectral GIII, e  $\theta_{\text{eff}}$  é obtido a partir do polinômio interpolante

$$\theta_{\text{eff}} = a_0 + a_1X + a_2X^2 - a_3X[\text{Fe}/\text{H}] + a_4[\text{Fe}/\text{H}] + a_5[\text{Fe}/\text{H}]^2, \quad (2.19)$$

onde  $X$  representa o índice de cor. Para o caso do índice  $(J - K)_0$ , os coeficientes tem os seguintes valores:  $a_0 = 0,5977$ ,  $a_1 = 1,015$ , e  $a_2 = -1,02 \times 10^{-1}$ . Para o caso do índice  $(V - K)_0$ , que será utilizado mais tarde, os coeficientes tem os seguintes valores:  $a_0 = 0,5558$ ,  $a_1 = 0,2105$ , e  $a_2 = 1,981 \times 10^{-3}$ . Os coeficientes relacionados à metalicidade não foram considerados pois, além

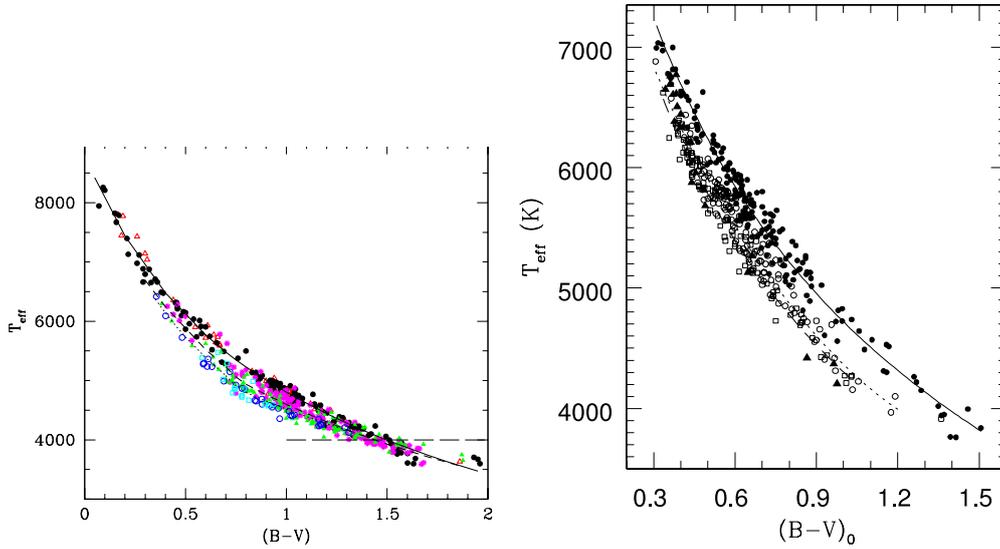


Figura 2.8: Curvas de calibração para a temperatura efetiva usando o índice intrínseco  $(B - V)_0$ . Os diferentes símbolos significam metalicidades diferentes. À esquerda: calibração de [Alonso et al. \(1999\)](#) para gigantes. À direita: calibração de [Ramirez & Melendez \(2005\)](#) para anãs

de não se ter registro desta grandeza no catálogo, a contribuição deles é desprezível.

Uma vez obtida a  $T_{\text{eff}}$  a partir do índice  $(J - K)_0$ , fizemos um corte, mantendo apenas os objetos com temperaturas entre 3 000 K e 8 000 K, que são os limites da calibração. A quantidade de objetos diminuiu, então, para 3 553, e o índice  $(J - K)_0$  ficou restrito entre 0 e 1,2 (Figura 2.9).

### Cálculo da magnitude absoluta na banda $K$ :

Partindo da Equação 2.13,

$$V - M_V = 5 \log d_h - 5 + A_V, \quad (2.20)$$

obtemos uma expressão equivalente para magnitudes na banda  $K$ ,

$$K - M_K = 5 \log d_h - 5 + A_K. \quad (2.21)$$

Subtraindo as equações e utilizando 2.15,  $A_K = n_K A_V$ , obtemos:

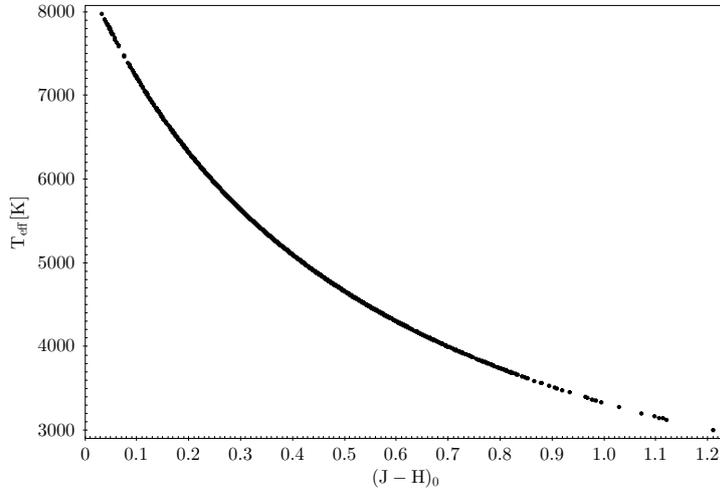


Figura 2.9: Temperatura efetiva obtida a partir da calibração de [Alonso et al. \(1999\)](#) para gigantes do catálogo de Roeser

$$M_K = M_V - (V - K) + (1 - n_K)A_V. \quad (2.22)$$

O índice  $(V - K)$  pode ser estimado a partir da  $T_{\text{eff}}$  invertendo a Equação 2.19:

$$(V - K) = 15,9695 (1,981 \theta_{\text{eff}} + 9,9765)^{\frac{1}{2}} - 53,1297. \quad (2.23)$$

A extinção  $A_V$  é conhecida a partir dos dados do IRSA, e obtemos assim uma estimativa para  $M_K$ .

### Estimativa da distância:

Finalmente, a distância pode ser estimada a partir da Equação 2.21

$$d_h = 10^{(K - M_K - A_K + 5)/5} \quad (2.24)$$

### 2.2.3 Catálogo de Ivanov

O catálogo de [Ivanov \(2008\)](#) (Figura 2.10) contém 618 250 estrelas com movimentos próprios acima de  $40 \text{ mas yr}^{-1}$ . Foi compilado a partir de

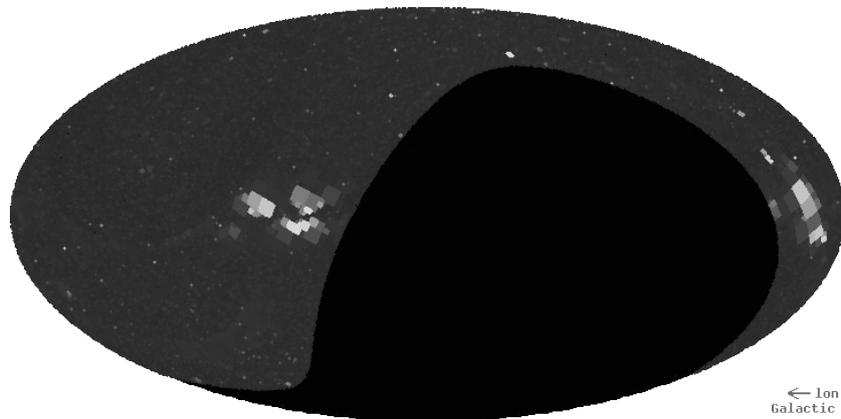


Figura 2.10: Projeção de Aitoff com os objetos originais do catálogo do Ivanov. O eixo horizontal é a longitude galáctica. Os tons de cinza representam densidade de estrelas, crescente do escuro para o claro. Diferentemente do catálogo de Roeser, este não cobre todo o céu, estando concentrado no hemisfério norte.

diversas fontes, entre elas FONAK 1.1, Hipparcos, Tycho-2, UCAC2, além de mais de 700 outras fontes. O catálogo fornece coordenadas equatoriais, movimentos próprios e magnitudes  $B$ ,  $V$  e/ou  $R$ . Isto quer dizer que não é necessário fazer a conversão para magnitudes  $J$ ,  $H$  e  $K$ , nem é necessário utilizar as curvas de calibração de [Alonso et al. \(1999\)](#) para gigantes, exceto nos casos em que a magnitude  $V$  não estiver disponível.

Este catálogo traz diversas peculiaridades que merecem atenção:

- A magnitude  $B$  e o índice  $(B - V)$  aparecem na mesma coluna, e o mesmo acontece para a magnitude  $R$  e o índice  $(V - R)$ ; sendo assim, é necessário fazer uma separação, criando as colunas  $(B - V)$  e  $(V - R)$ .
- Também chama a atenção o fato de haver um “problema” com o título do artigo original do Ivanov e a referência que aparece no repositório do VizieR<sup>6</sup>, ou mesmo no ADS (*Astrophysics Data System*)<sup>7</sup>. Quando se busca o catálogo, o artigo de referência é “Catalogue of stars with high-proper motions - version 2”; porém este título não aparece nos

<sup>6</sup>Disponível em <http://vizier.u-strasbg.fr>

<sup>7</sup>Disponível em <http://www.adsabs.harvard.edu>

repositórios normalmente utilizados e a referência correta deveria ser “Catalog of stars with the big proper motion”.

- Ainda dentro deste contexto, há uma versão 3 deste catálogo, cujo referência encontra-se no ADS, porém os dados não estão disponíveis no enlace indicado no artigo: <ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/astro/h-pms3.dat>.

Portanto, como só se tem o acesso aos dados da versão 2 e a referência correta parece ser aquela cujo título é “Catalog of stars with the big proper motion”, optamos por manter esta notação neste trabalho. O processamento dos dados do catálogo de Ivanov seguiu a sequência abaixo.

### **Filtragem inicial:**

Aplicando o critério de que as colunas que registram as magnitudes  $B$  (ou  $B - V$ ),  $V$  e  $R$  (ou  $V - R$ ) não estejam vazias, o número de objetos caiu para 191 815, e exigindo-se ainda que  $|\mu_\alpha|$  ou  $|\mu_\delta|$  sejam acima de 100 mas yr<sup>-1</sup> a quantidade caiu para 23 679. Diferentemente do catálogo de Roeser, não há nenhuma restrição a objetos com altos movimentos próprios, então o corte em  $\mu$  foi apenas no limite inferior. Isto possibilitou a análise de objetos com movimentos próprios muito grandes.

### **Remoção dos objetos do bojo e do disco:**

Pelas mesmas razões já expostas no caso do catálogo do Roeser, os objetos entre as latitudes  $-\frac{1}{5}l + 50^\circ < b < \frac{1}{5}l - 50^\circ$  foram removidos, restando 14 495 estrelas.

### **Extinção e avermelhamento:**

Assim como no catálogo Roeser, geramos uma lista das coordenadas dos objetos que foi enviada para o serviço do IRSA para determinar os índices de extinção e avermelhamento nesses apontamentos. A diferença é que agora não é necessário converter os dados retornados pelo IRSA para outras bandas, sendo trabalhados diretamente nas bandas visuais.

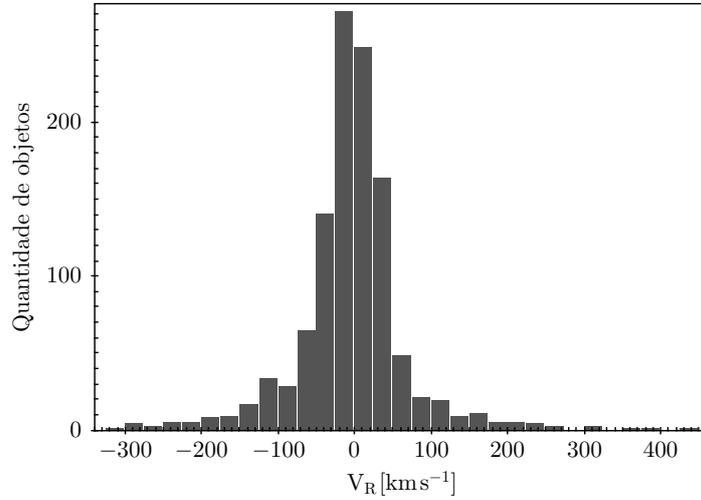


Figura 2.11: Distribuição de velocidades radiais dos objetos do catálogo Ivanov, após a filtragem inicial

### Estimativa da distância:

A partir da equação do módulo da distância, obtemos a distância heliocêntrica como:

$$d_h = 10^{(V - M_V - A_V + 5)/5} \quad (2.25)$$

### Velocidades radiais

Dos 14 495 objetos restantes do catálogo de Ivanov, 1 131 têm velocidades radiais conhecidas. Isto nos permitiu criar uma tabela à parte, com  $V_{\text{GRF}}$  calculado a partir das distâncias estimadas. A distribuição das velocidades radiais pode ser vista na Figura 2.11. A análise destes objetos é interessante, sobretudo, para aqueles com altas velocidades radiais por possuírem também altos movimentos próprios.

### Índices de cor intrínsecos e temperatura efetiva:

Na filtragem inicial, requeremos que todas as magnitudes estivessem presentes. Entretanto, se a magnitude  $V$  não estiver disponível, ainda é possível usar as curvas de calibração de [Alonso et al. \(1999\)](#) para ter uma

estimativa da distância, admitindo que as estrelas sejam gigantes. Para isto, calculam-se os índices de cor intrínsecos:

$$(B - V)_0 = (B - V) - E(B - V), \quad (2.26)$$

e

$$(V - R)_0 = (V - R) - E(V - R), \quad (2.27)$$

onde os valores de  $E(B - V)$  já são fornecidos pelo IRSA, e os valores de  $E(V - R)$  podem ser obtidos a partir da calibração de [Cardelli et al. \(1989\)](#):

$$E(V - R) = (1 - n_R)A_V, \quad (2.28)$$

com

$$\frac{A_R}{A_V} = n_R = 0,748. \quad (2.29)$$

Com os índices de cores intrínsecos, estimamos a temperatura efetiva,  $T_{\text{eff}}$ , a partir das Equações 2.18 e 2.19, onde os valores dos coeficientes para o índice  $(B - V)_0$  são:  $a_0 = 0,5716$ ,  $a_1 = 0,5404$  e  $a_2 = -6,126 \times 10^{-2}$ . Mais uma vez, os termos da metalicidade foram ignorados. Seleccionando apenas os objetos com temperaturas entre 3 000K e 8 000 K, que são os limites da calibração (Figura 2.12), e invertendo a calibração, podemos obter uma estimativa de  $M_B$  e, assim, uma estimativa de  $d_h$ .

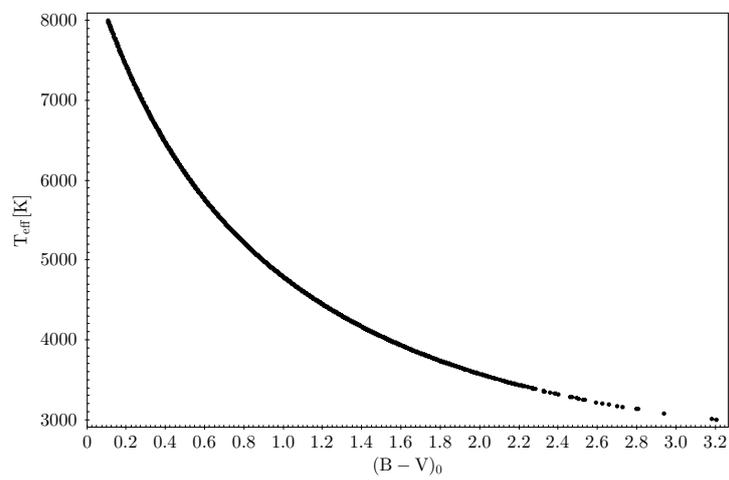


Figura 2.12: Temperatura efetiva obtida a partir da curva de calibração de [Alonso et al. \(1999\)](#) para gigantes do catálogo de Ivanov.

# Capítulo 3

## Resultados e Análises

### 3.1 Mapas de contorno de regiões representativas

Aplicando os mapas de contorno a regiões representativas da Galáxia, podemos identificar as relações entre as variáveis envolvidas na determinação do valor da velocidade galactocêntrica. As direções representativas exibidas nas Figuras 3.1 abrangem regiões de interesse, buscando os casos mais gerais possíveis. Na Figura 3.2, estas dez direções representativas são apresentadas numa projeção de Aitoff (pontos verdes), juntamente com os dados selecionados do catálogo de Roeser (em vermelho) e as 39 HVSs compiladas por Brown (pontos azuis).

Um exemplo do mapa de contorno para a região 1, dada pelo conjunto de condições:

$$\begin{aligned}l &= 0^\circ \\b &= 60^\circ \\ \mu_\alpha &= 130 \text{ mas yr}^{-1} \\ \mu_\delta &= 0 \text{ mas yr}^{-1}\end{aligned}\tag{3.1}$$

é apresentado na Figura 3.3. Os mapas para as restantes 9 regiões encontram-se no Apêndice B. Cabe destacar que para montar estes mapas usamos a

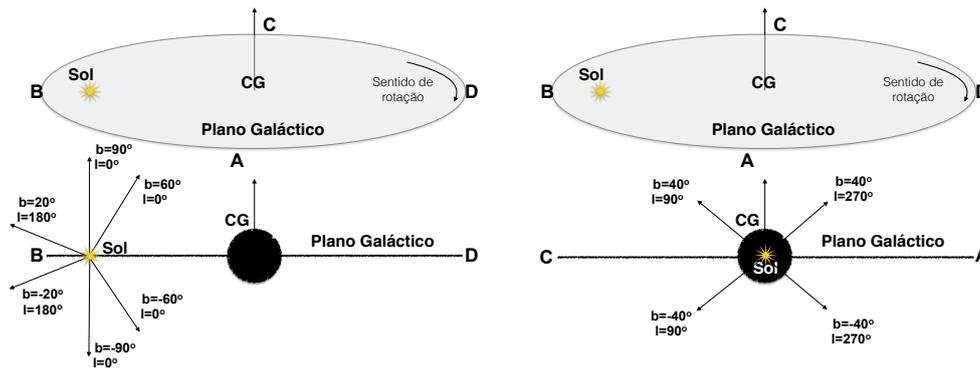


Figura 3.1: Dez direções representativas de regiões de interesse. Os diagramas representam o plano galáctico no qual são marcadas a posição do Sol e a posição do CG. Estas regiões foram escolhidas por se distribuírem numa ampla área na projeção do plano galáctico, buscando regiões extremas, porém permanecendo dentro da região dos objetos de nossa amostra (ver Figura 3.2). Na figura da esquerda, cujo corte na seção transversal BD é apresentado na parte inferior, em  $l = 0^\circ$  e  $b = \pm 60^\circ$ , buscamos uma região mais próxima o possível do bojo, porém sem entrarmos na região cujos objetos foram extraídos. Em  $l = 0^\circ$  e  $b = \pm 90^\circ$ , tomamos os pontos mais extremos na altura do plano galáctico. Ainda na figura da esquerda, em  $l = 180^\circ$ , e  $b = \pm 20^\circ$ , escolhemos os pontos mais próximos do disco e, ao mesmo tempo, mais afastada do CG, sem entrarmos na região excluída. Na figura da direita, cujo corte na seção transversal, CA, é apresentado na parte inferior, em  $l = 90^\circ$ , e  $b = \pm 40^\circ$ , e  $l = 270^\circ$ , e  $b = \pm 40^\circ$ , buscamos a região mais próxima do disco e fora da área excluída e, aproximadamente, no mesmo sentido e no sentido contrário de movimento do Sol, respectivamente.

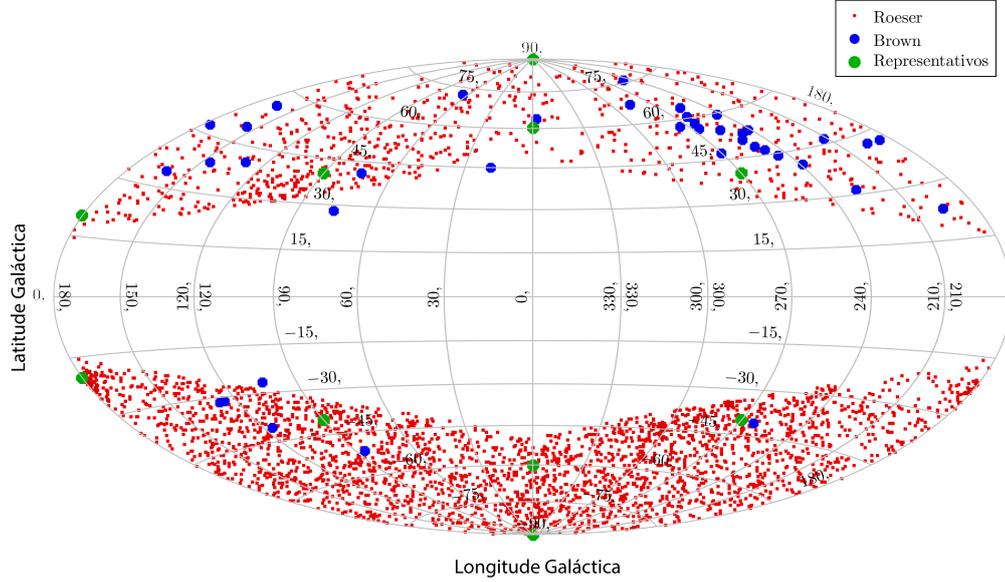


Figura 3.2: Projeção de Aitoff das estrelas HVS de Brown, as estrelas selecionadas do catálogo de Roeser e as 10 direções representativas nas Figuras 3.1. O eixo horizontal indica a longitude galáctica

combinação  $\mu_\alpha = 130 \text{ mas yr}^{-1}$ ,  $\mu_\delta = 0$ , e que a combinação  $\mu_\alpha = 0$ ,  $\mu_\delta = 130 \text{ mas yr}^{-1}$  produz exatamente o mesmo resultado, pois o que entra no cômputo é o movimento próprio total  $\mu = \sqrt{\mu_\alpha^2 + \mu_\delta^2}$

Observa-se no mapa, que a dependência de  $V_{\text{GRF}}$  aumenta à medida que aumenta a distância heliocêntrica, de tal modo que a grandes distâncias, as curvas de nível são quase perpendiculares a  $d_h$ . O mesmo vale para os outros mapas do Apêndice B. Por outro lado, usando as mesmas condições 3.1, porém restrito ao intervalo  $0 < d_h \leq 1\,000 \text{ pc}$  (Figura 3.4), podemos perceber que  $V_{\text{GRF}}$  aumenta com  $V_R$ , ao passo que diminui com  $d_h$ , a tal ponto que  $V_{\text{GRF}}$  quase se iguala a  $V_R$  para distâncias inferiores a 200 pc.

Também observamos que os valores das velocidades  $V_{\text{GRF}}$  e  $V_{\text{esc}}$  são quase os mesmos quando se muda o sinal da coordenada  $b$ . A simetria em relação ao plano galáctico apenas não é total porque o Sol se encontra a 17 pc (Joshi, 2007) acima do plano. Comparando os mapas para dois valores de  $b$  diferentes,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , com as outras componentes fixas, percebemos uma ligeira mudança na  $V_{\text{esc}}$ , que aumenta quando  $b$  diminui. Por exemplo,

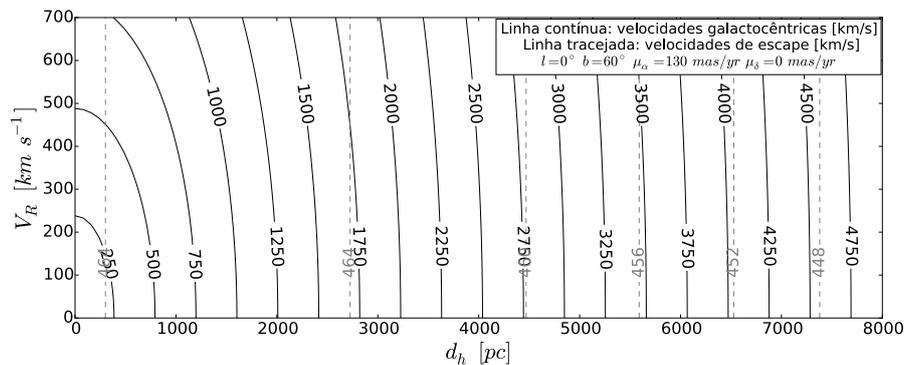


Figura 3.3: Mapa da região de interesse 1. Em linha contínua são mostradas as curvas de nível de  $V_{\text{GRF}}$  e em linha tracejada as curvas de  $V_{\text{esc}}$ .

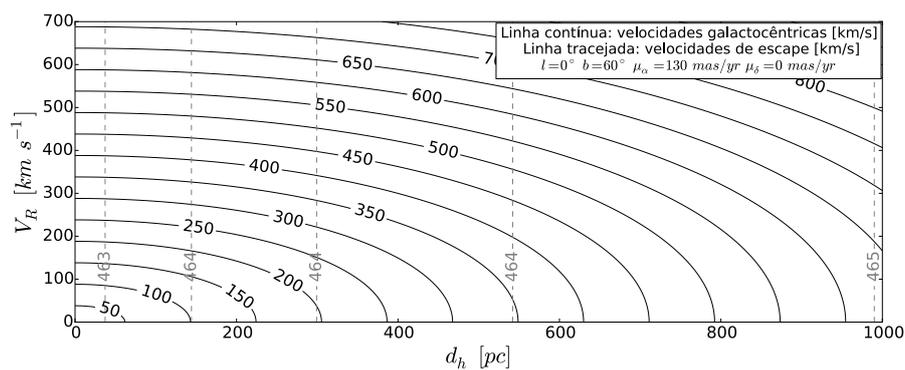


Figura 3.4: Ampliação do mapa da região 1, restringindo  $d_h$  até 1 000 pc.

para  $d_h = 4\,000$  pc, os valores de  $V_{\text{esc}}$  nessas duas latitudes galácticas são  $461,4 \text{ km s}^{-1}$  e  $443,6 \text{ km s}^{-1}$ , respectivamente. Esta diferença é esperada pois na direção do polo galáctico o potencial do disco é menos relevante.

As mudanças começam a ocorrer de maneira mais significativa nos valores de  $V_{\text{GRF}}$  quando se altera a componente  $l$ . Na Figura 3.5, restringimos  $d_h$  até  $2\,000$  pc e comparamos quatro valores de  $l$  para  $b = 60^\circ$ . Em particular, por exemplo, fixando  $d_h = 500$  pc e  $V_R = 300 \text{ km s}^{-1}$  temos:

$$\begin{aligned} V_{\text{GRF}}(l = 0^\circ) &= 441,9 \text{ km s}^{-1} \\ V_{\text{GRF}}(l = 90^\circ) &= 556,4 \text{ km s}^{-1} \\ V_{\text{GRF}}(l = 180^\circ) &= 430,8 \text{ km s}^{-1} \\ V_{\text{GRF}}(l = 270^\circ) &= 316,2 \text{ km s}^{-1}. \end{aligned}$$

Por outro lado, mantendo a longitude fixa em  $l = 90^\circ$  e tomando o limite da latitude em que se removeu os objetos do bojo, tem-se as maiores velocidades, tanto para  $b = 40^\circ$  quanto para  $b = -40^\circ$ :

$$\begin{aligned} V_{\text{GRF}}(b = 40^\circ) &= 618,8 \text{ km s}^{-1} \\ V_{\text{GRF}}(b = -40^\circ) &= 609,5 \text{ km s}^{-1} \end{aligned}$$

Observamos então que a região no entorno da longitude  $l = 90^\circ$  é um lugar interessante para se buscar HVSs. Dentre os objetos dos catálogos, deve-se olhar com cuidado aqueles que atendam a estas condições.

Por fim, comparando os mapas de contorno para diferentes valores de  $\mu$  e mantemos  $l$ ,  $b$  fixos, percebemos a extrema dependência de  $V_{\text{GRF}}$  com  $\mu$  (Figura 3.6). Objetos com valores de  $\mu = 400 \text{ mas yr}^{-1}$  não estão presentes na seleção do catálogo de Roeser, mas estão na seleção do catálogo de Ivanov. Como esperado, objetos com altos movimentos próprios e, adicionalmente, grandes distâncias heliocêntricas, podem ser bons candidatos a HVS.

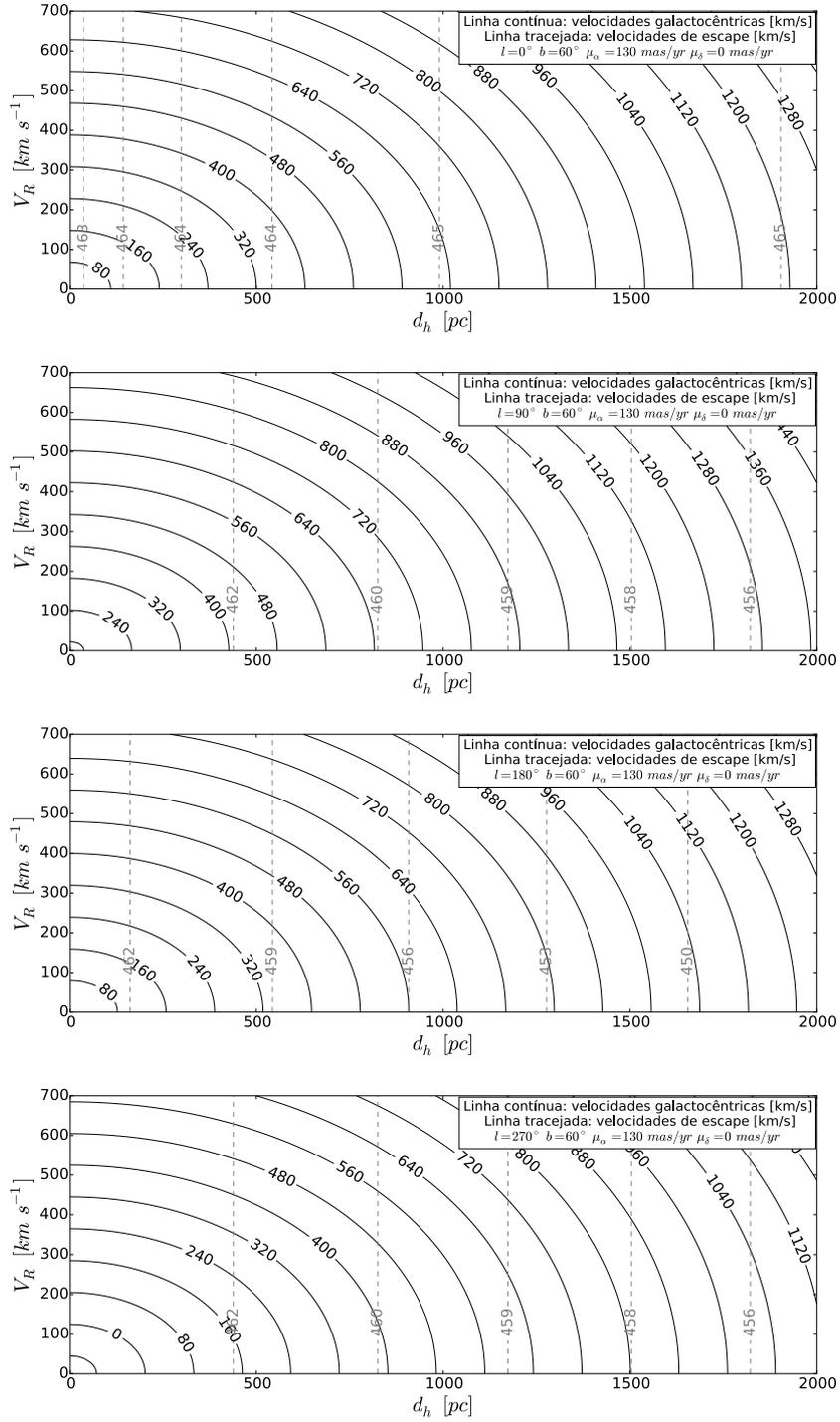


Figura 3.5: Comparação dos mapas de contorno para diferentes valores da longitude galáctica:  $l = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ , com  $b = 60^\circ$ ,  $\mu_\alpha = 130 \text{ mas yr}^{-1}$ ,  $\mu_\delta = 0$ . Para  $l = 90^\circ$ ,  $V_{\text{GRF}}$  estão superestimados em  $11 \text{ km s}^{-1}$ . Para  $l = 270^\circ$ ,  $V_{\text{GRF}}$  estão subestimados em  $11 \text{ km s}^{-1}$ .

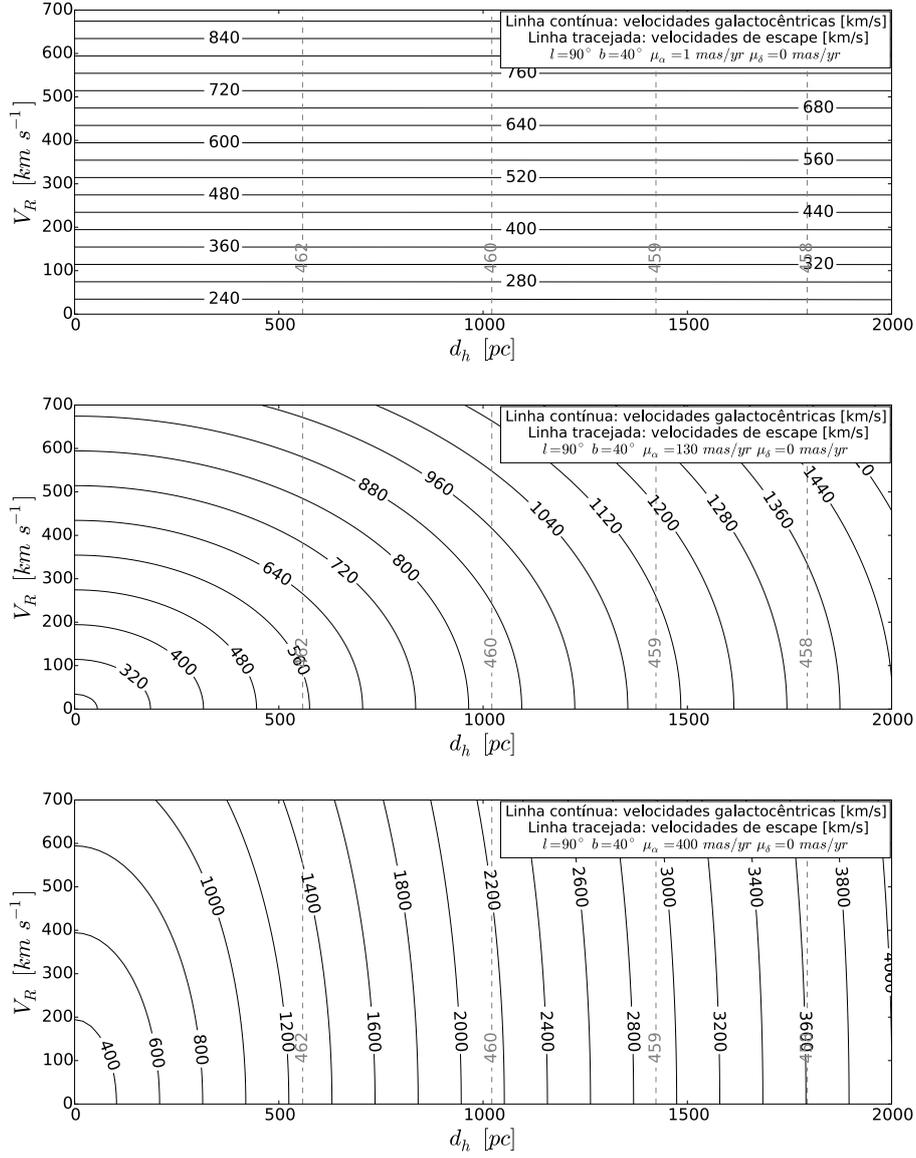


Figura 3.6: Comparação dos mapas de contorno para uma variação de  $\mu$ , tendo  $l$  e  $b$  fixos. Aqui,  $\mu_\alpha = 1, 130, 400 \text{ mas yr}^{-1}$

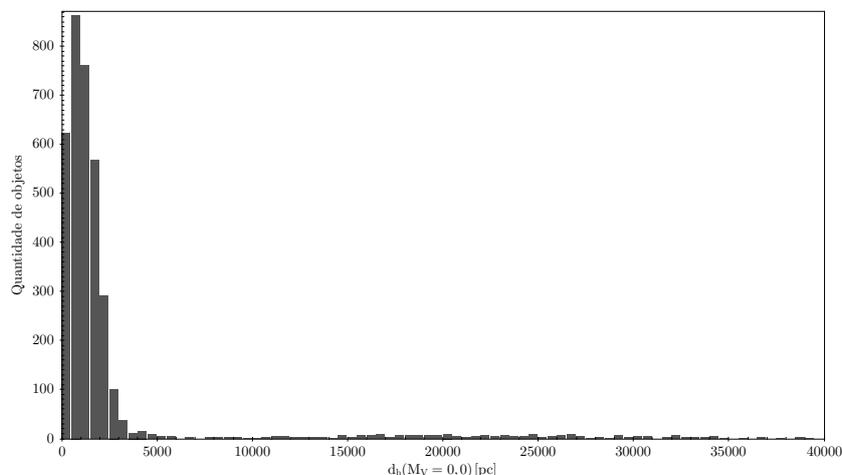


Figura 3.7: Distribuição das distâncias, em pc, para o objetos do catálogo de Roeser, supondo que todos os objetos sejam gigantes (ou seja, considerando  $M_V = 0$ ).

	$d_h(M_V = 0)$	$d_h(M_V = 4,5)$	$d_h(M_V = -2,5)$
Média	3 056	385	9 664
Mediana	1 189	150	3 761

Tabela 3.1: Resultados, para o catálogo de Roeser, da distribuição das distâncias estimadas  $d_h$ , medidas em pc, para diferentes magnitudes absolutas visuais  $M_V$ .

## 3.2 Resultados da seleção no catálogo de Roeser

Após todo o processo de seleção do catálogo do Roeser, restaram 3 553 objetos. A distribuição de distâncias estimadas, considerando  $M_V = 0$  (estrelas gigantes) é apresentada na Figura 3.7. Como se pode notar, há uma assimetria na distribuição; por esta razão, tomamos a mediana da distância para uma análise no mapa de contorno. Na Tabela 3.1, podemos ver o resumo dos valores.

Conforme se pode apreciar na Figura 3.8, mesmo considerando a menor distância,  $d_h \approx 150$  pc, nesta configuração ainda há uma chance de encontrarmos HVSs. Selecionando objetos com  $80^\circ < l < 100^\circ$  e  $150 \text{ pc} <$

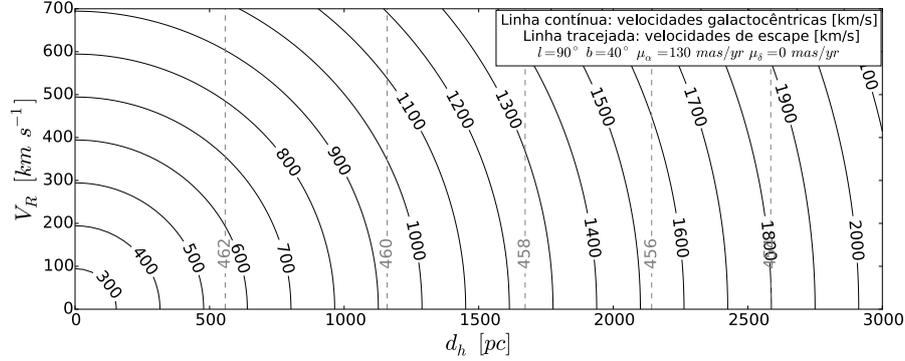


Figura 3.8: Mapa para a região mais favorável ( $l = 90^\circ$ ,  $b = 40^\circ$ ) que produz os maiores valores de  $V_{\text{GRF}}$ . O eixo de abscissas varre os valores típicos da mediana da distribuição de distâncias estimadas do catálogo de Roeser.

$d_h < 3\,800$  pc, isto é, nos extremos de magnitude absoluta das anãs e das gigantes, respectivamente, temos um conjunto de candidatas com boas chances de pertencerem à classe de HVSs. Do catálogo de Roeser, foram filtrados 237 objetos que atendem a este quesito.

### 3.3 Resultados da seleção no catálogo de Ivanov

Após a seleção inicial dos objetos do catálogo de Ivanov, restaram 14 495. A distribuição de distâncias estimadas, considerando  $M_V = 0$ , é apresentada na Figura 3.9. Assim como no catálogo do Roeser, há uma assimetria na distribuição de distâncias; então usamos a mediana (Tabela 3.2) das distâncias para avaliarmos o mapa de contorno nas coordenadas  $l = 90^\circ$  e  $b = 40^\circ$ .

Conforme se observa na Figura 3.10, mesmo na menor distância  $d_h \approx 200$  pc, ainda há uma chance de se encontrar HVSs. Selecionando, deste montante final, os objetos que atendam aos critérios  $80^\circ < l < 100^\circ$  e  $200 < d_h < 5\,500$  pc, que são os limites para  $M_V = -2,5$  e  $M_V = 0$ , respectivamente, obtemos 1 053 candidatos. Destes, é selecionamos 72 objetos que têm velocidades radiais determinadas. A título de exemplo, na Tabela 3.3

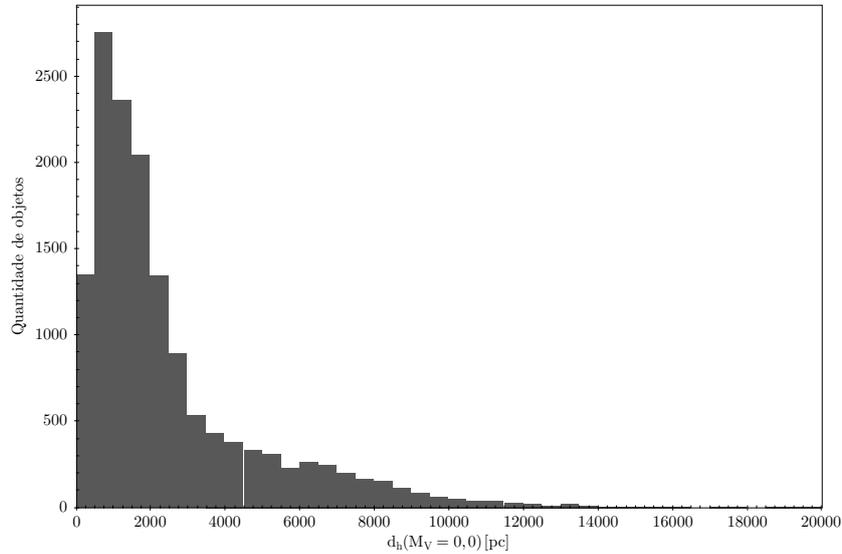


Figure 3.9: Distribuição das distâncias estimadas de objetos do catálogo de Ivanov, adotando  $M_V = 0$  (gigantes)

	$d_h(M_V = 0)$	$d_h(M_V = 4,5)$	$d_h(M_V = -2,5)$
Média	2 522	318	7 976
Mediana	1 682	212	5 319

Tabela 3.2: Resultados, para o catálogo de Ivanov, da distribuição das distâncias estimadas  $d_h$ , medidas em pc, para diferentes magnitudes absolutas visuais  $M_V$

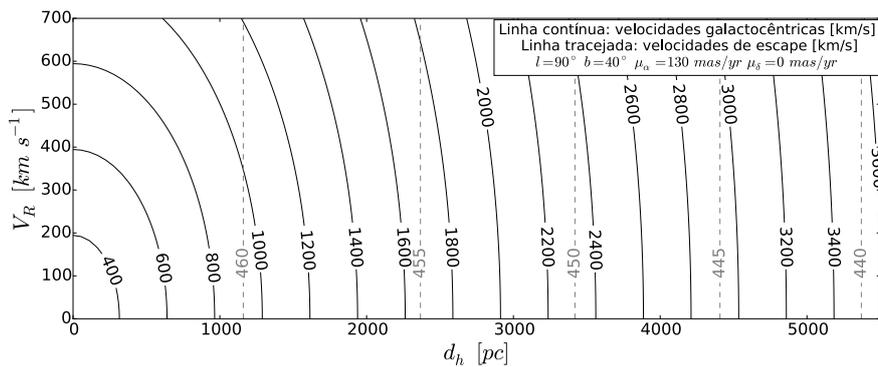


Figura 3.10: Mapa para a região mais favorável ( $l = 90^\circ$ ,  $b = 40^\circ$ ) que produz os maiores valores de  $V_{GRF}$ . O eixo de abscissas varre os valores típicos da mediana da distribuição de distâncias estimadas para o catálogo de Ivanov.

são apresentadas 5 destas estrelas. Deve-se destacar que é necessário utilizar algum serviço auxiliar, como o SIMBAD, *Astronomical Database*<sup>1</sup>, e também o VizieR<sup>2</sup>, para identificar o objeto de interesse.

---

<sup>1</sup>Disponível em <http://simbad.u-strasbg.fr>

<sup>2</sup>Disponível em <http://vizier.u-strasbg.fr>

$\alpha$ (J2000)	$\delta$ (J2000)	$\mu_\alpha$	$\mu_\delta$	$d_h$	$V_{\text{GRF}}$	$V_{\text{esc}}$	$d_h$	$V_{\text{GRF}}$	$V_{\text{esc}}$	Identificação
[ $^\circ$ ]	[ $^\circ$ ]	[mas yr $^{-1}$ ]	[mas yr $^{-1}$ ]	[pc]	$M_V = 0$ [km s $^{-1}$ ]	$M_V = 0$ [km s $^{-1}$ ]	$M_V = 4,5$ [pc]	$M_V = 4,5$ [km s $^{-1}$ ]	$M_V = 4,5$ [km s $^{-1}$ ]	
199.0468708333	35.8858666667	267.6	-172.9	448	732	462	56	150	463	HD 115349
208.5411000000	44.7253222222	-140.7	80.3	671	619	461	84	168	463	BD+45 2137
239.0836250000	63.8166000000	-119.8	186.2	791	1024	460	100	299	463	HD 143433
356.9682958333	4.1754916667	351.1	-30.6	327	690	462	41	215	463	HD 223238
357.5239333333	2.8771722222	460.2	187.9	444	1184	462	56	272	463	HD 223498

Table 3.3: Cinco candidatas do catálogo de Ivanov com  $V_R$  conhecida, selecionadas por estarem próximas à coordenada  $l = 90^\circ$ . São apresentados apenas os valores estimados adotando  $M_V = 0$  e  $M_V = 4,5$ , correspondentes a gigantes e anãs, respectivamente.

# Capítulo 4

## Discussão e conclusões

### 4.1 Avaliação das melhores candidatas

Para se determinar exatamente se um dado objeto é ou não uma HVS, é necessário um estudo minucioso da distância, velocidade radial e movimentos próprios, que extrapola o objetivo deste trabalho. Em todo caso, conforme as estimativa de [Yu & Tremaine \(2003\)](#), a quantidade de HVSs esperada é relativamente baixa ( $\sim 1\,000$ ) e não se deve esperar encontrar muitas, ao menos das originadas pelo mecanismo previsto por [Hills \(1988\)](#) e [Yu & Tremaine \(2003\)](#).

#### Os mapas de contorno

Estes mapas revelaram-se um importante instrumento para avaliação do papel das diferentes variáveis envolvidas na determinação da velocidade galactocêntrica dos objetos. A partir da análise das regiões representativas nos mapas, presentes no Apêndice B, verificamos a importância da região no entorno da longitude  $l = 90^\circ$ . Isto revela-se particularmente importante para os objetos do catálogo de Roeser, que não traz registradas as velocidades radiais. Também pode ser um parâmetro interessante para um cone de busca de programas de VO que, em geral, aceitam uma coordenada como entrada e realizam uma busca para determinado raio angular, como é o caso do TOPCAT ou o banco de dados do SIMBAD. Por exemplo, uma busca na

região próxima aos pontos  $l = 90^\circ$  e  $b = \pm 40^\circ$ , concomitante com outros critérios, como distâncias acima de 500 pc ou  $|\mu| > 100 \text{ mas yr}^{-1}$ , pode fornecer uma lista de boas candidatas a HVS.

### O catálogo de Roeser

Após o processo de seleção das magnitudes, dos movimentos próprios e do ajuste com as curvas de calibração, este catálogo forneceu 3 553 objetos, dos mais de 900 milhões iniciais. Com a exigência de que os objetos possuam  $100 \text{ mas yr}^{-1} < |\mu_\alpha| < 130 \text{ mas yr}^{-1}$  e/ou  $100 \text{ mas yr}^{-1} < |\mu_\delta| < 130 \text{ mas yr}^{-1}$ , existe uma alta probabilidade de encontrarmos HVSs. Entretanto, ter um grande movimento próprio não é, a princípio, uma garantia de que a estrela venha a ser uma HVS; afinal, objetos próximos do Sol podem ter um grande movimento próprio desde que estejam a uma curta distância<sup>1</sup>. Como vimos nos mapas de contorno, para grandes distâncias, a distância e o movimento próprio tem um peso maior do que a velocidade radial na determinação de  $V_{\text{GRF}}$ . Sendo assim, a combinação de grandes movimentos próprios com grandes distâncias pode oferecer boas chances de se achar HVSs, com maior significância do que analisando apenas objetos com grandes velocidades radiais (Pereira et al., 2013). A seleção de objetos que tenham longitude  $l \approx 90^\circ$  e a mediana das distâncias estimadas entre 150 pc e 3 800 pc, resultou em 237 candidatas também com grande potencial para serem HVS.

Para uma análise dos objetos restantes do catálogo de Roeser, por não haver registros das velocidades radiais, deve-se priorizar os objetos mais distantes e/ou com grandes movimentos próprios para que não haja muita dependência com a  $V_R$ . O mapa de contorno da Figura 3.8 mostra que para não depender da velocidade radial, a distância mínima para que os objetos deste catálogo sejam HVS deve ser próxima de 500 pc. Este, então, deve ser o balizador mais importante para a avaliação dos objetos neste catálogo. Como a mediana para as distâncias estimadas, considerando-se que os objetos sejam anãs ( $M_V = 4,5$ ), é igual a 150 pc, espera-se que um grande número de

<sup>1</sup>O exemplo típico é a estrela de Barnard, cujo movimento próprio é  $\mu_\alpha = -798,58 \text{ mas yr}^{-1}$  e  $\mu_\delta = 10\,328,12 \text{ mas yr}^{-1}$ , entretanto a distância heliocêntrica é  $d_h \approx 1,8 \text{ pc}$  e sua  $V_{\text{GRF}} = 283,5 \text{ km s}^{-1}$ .

objetos no catálogo de Roeser não atinjam o valor da velocidade de escape.

### O catálogo de Ivanov

Originalmente com mais de 600 mil objetos, após os processos de seleção semelhantes aos aplicados ao catálogo de Roeser, este catálogo forneceu 14 495 candidatos, um número maior que o do Roeser, por não haver o limite superior de  $|\mu| < 130 \text{ mas yr}^{-1}$ . Por ter registrado algumas velocidades radiais, este catálogo traz a possibilidade de uma análise mais imediata de algumas candidatas, como por exemplo, a Wolf 1044, a qual, usando-se a estimativa inferior para sua distância, ou seja, considerando-a uma anã, apresenta  $V_{\text{GRF}} = 1\,328 \text{ km s}^{-1}$ , ou ainda a Wolf 1492, com  $V_{\text{GRF}} = 508 \text{ km s}^{-1}$  considerando a estimativa mais baixa para sua distância conforme reportado no SIMBAD.

Como todos os objetos do catálogo de Ivanov são de grande movimento próprio, originalmente todos com  $|\mu|$  superior a  $40 \text{ mas yr}^{-1}$ , aqueles com velocidade radial registradas são potencialmente interessantes, sendo necessária a realização de um estudo minucioso da distância.

Por fim, visando aumentar as chances de encontrarmos melhores candidatas, ao selecionar os objetos que atendam ao critério de estarem próximos a  $l = 90^\circ$  e com distância estimada entre os valores das medianas para os dois casos extremos,  $d_h = 200 \text{ pc}$  e  $d_h = 5\,500 \text{ pc}$ , obtivemos 72 candidatas.

### Um estudo de caso: a estrela Wolf 1492

Como um exemplo do alcance da metodologia aplicada neste trabalho, a estrela Wolf 1492 foi selecionada para uma avaliação mais pormenorizada de sua distância. Esta estrela aparece em primeiro lugar no *ranking* de candidatas do catálogo de Ivanov que possuem velocidade radial conhecida, com os parâmetros apresentados na Tabela 4.1.

Esta estrela tem sido bem estudada por outros autores e existem na literatura parâmetros que possibilitam uma melhor determinação da sua distância. Em [Roederer et al. \(2014\)](#) encontram-se valores para  $T_{\text{eff}} = 6\,030 \text{ K}$ , gravidade superficial  $\log g = 3,6$  e metalicidade  $[\text{Fe}/\text{H}] = -3,39$ . Cabe desta-

$\alpha$ (J2000)	$\delta$ (J2000)	$l$	$b$	$B$	$V$	$R$	$B - V$	$V - R$
[°]	[°]	[°]	[°]					
205.01048	-0.03851	328.17863	60.42864		11.456	11.186	0.385	0.270

$ \mu $	$T_{\text{eff}}$	$d_h(M_V = 0)$	$d_h(M_V = 4.5)$	$V_R$
[mas yr <sup>-1</sup> ]	[K]	[pc]	[pc]	[km s <sup>-1</sup> ]
239.4765	6643.8	1890.60	238.01	438.60

Tabela 4.1: Parâmetros da estrela Wolf 1492 obtidos a partir do catálogo de Ivanov.

car o valor de temperatura efetiva, muito semelhante ao determinado neste estudo. Com estes parâmetros adicionais determinamos a correção bolométrica no visível a partir da fórmula (Alonso et al., 1999),

$$BC = -9,930 \times 10^{-2} X^{-1} + 2,887 \times 10^{-2} + 2,275X - 4,425X^2 + 0,3505X[\text{Fe}/\text{H}] - 5,558 \times 10^{-2}[\text{Fe}/\text{H}] - 5,375 \times 10^{-3}[\text{Fe}/\text{H}]^2, \quad (4.1)$$

onde  $X = \log T_{\text{eff}} - 3.52$ , e ainda levando em consideração a extinção interestelar  $A_v = 0,073$ , podemos estimar a distância espectroscópica da estrela pela fórmula de Pereira et al. (2013),

$$\log d_h[\text{kpc}] = \frac{1}{2} \left( \frac{M_\star}{M_\odot} + 0,4(V - A_V + BC) + 4 \log(T_{\text{eff}}) - \log g - 16,5 \right), \quad (4.2)$$

admitindo que  $M_\star = 1 M_\odot$ . O resultado é  $d_h = 559$  pc, que está dentro do intervalo de distâncias estimadas neste estudo, considerando  $M_V = 0$  e  $M_V = 4,5$ . Com este valor de distância espectroscópica, obtivemos uma estimativa de velocidade galactocêntrica  $V_{\text{GRF}} = 731$  km s<sup>-1</sup> numa região onde  $V_{\text{esc}} = 463$  km s<sup>-1</sup>. Portanto, podemos considerar que esta estrela é uma HVS.

Alternativamente, também poderiam ser utilizadas isócronas para uma estimativa de  $M_V$  e, conseqüentemente, a distância, ao invés da fórmula da distância espectroscópica.

## 4.2 Fatores limitadores no processo de seleção

### Mapas de contorno para cada objeto

Os mapas de contorno, embora sejam uma ferramenta interessante para avaliar a relação entre as variáveis envolvidas no cálculo de  $V_{\text{GRF}}$  e sua comparação com  $V_{\text{esc}}$ , não oferecem um mecanismo de comparação para vários objetos simultaneamente. Isto porque, os mapas só fazem sentido para um conjunto  $l$ ,  $b$ ,  $\mu_\alpha$  e  $\mu_\delta$  específicos. Isto impede a comparação de candidatas com outros objetos dos catálogos ou mesmo com HVSs conhecidas. Na verdade, os mapas podem ser vistos apenas como as medidas de  $V_{\text{GRF}}$  para objetos individuais.

### Análise dos erros

Em todo o estudo realizado neste trabalho, não foi levado em consideração a propagação de erros a partir dos erros das grandezas nos catálogos. Tanto o catálogo de Roeser quanto do de Ivanov trazem registrados os erros nas magnitudes e no movimento próprio. Entretanto, as considerações iniciais sobre as magnitudes, a própria escolha de altos movimentos próprios e, principalmente, o uso *a priori* de  $M_V = 0$ , geram uma incerteza na distância que supera, em muito, a contribuição de quaisquer outros erros. Portanto, o único erro relevante que aparece de maneira implícita neste trabalho é relativo às distâncias estimadas ao adotarmos magnitudes absolutas visuais fixas em 0,0, 4,5 e  $-2,5$ , que fornecem os limites inferior e superior de  $d_h$  nos mapas de contorno para um dado par  $(l,b)$ .

### Distâncias ausentes nos catálogos

Devido à ausência de distâncias em ambos os catálogos, desde o início do estudo este foi o problema mais crítico. O método de estimativa de dis-

tância a partir da equação do módulo da distância e as magnitudes relativas, intrinsecamente traz embutidas diversas incertezas. O fato de usar a correção da extinção e avermelhamento de forma “genérica”, sem um estudo pormenorizado de cada região, e adotar uma magnitude visual absoluta “também genérica”, implica numa estimativa de distância pobre. O alcance do uso destas estimativas está no fato de podermos utilizá-las numa grande massa de dados para obtermos uma perspectiva geral das grandezas que envolvam essas distâncias, como é o caso da velocidade galactocêntrica. Qualquer estudo de algum objeto em particular, deve levar em conta uma nova determinação da distância e do estudo dos erros das grandezas iniciais envolvidas, como  $\mu$  e as magnitudes.

### **Ausência de objetos do disco e do bojo**

Remover os objetos do disco e do bojo permite a redução do número de objetos a serem selecionados. Ainda que fosse feito um estudo de um único objeto ou de um pequeno número deles, localizados na direção do bojo ou do disco, as indeterminações nos valores de extinção e avermelhamento acarretariam erros nos valores das grandezas que dependem dessas variáveis. Sendo assim, seriam necessários estudos pormenorizados caso a caso. Como os catálogos trazem milhares de entradas, para um estudo em massa, é mais prático a remoção dos objetos do disco e do bojo. Entretanto, isto não deixa de ser uma perda pois elimina potenciais candidatos.

### **Entradas falsas**

Considerando diferentes arranjos dos parâmetros sempre é possível obter objetos interessantes para análise. Por exemplo, dos objetos do catálogo de Ivanov que possuem velocidade radial, fazendo-se um *ranking* das velocidades radiais, o primeiro da lista é Wolf 1492 que, como se viu na seção anterior é uma candidata. Mas deve-se ter cautela pois verifica-se que há também muitas entradas “falsas”, objetos com um grande erro no movimento próprio e de objetos não estelares.

### Vetor de $V_{\text{GRF}}$ e órbita não determinados

Todos os cálculos envolvidos, desde o início, visaram determinar o valor do módulo da velocidade galactocêntrica. Encontrar um objeto com grande valor de  $V_{\text{GRF}}$  é, sem dúvida, um pré-requisito para que a estrela seja uma HVS. Mas é fundamental encontrar o vetor velocidade para saber a direção do movimento do objeto. Sem essa informação, a órbita também não pode ser reconstituída, e isto impede saber se a estrela veio do CG, qual é o tempo de viagem e se ela é um objeto que efetivamente sairá ou não dos limites da Galáxia. Se um pequeno conjunto de candidatas revelar-se promissor, então o cálculo do vetor velocidade e a integração da órbita devem ser feitos.

## 4.3 Abordagens alternativas para a origem das HVSs

A indeterminação do vetor velocidade galactocêntrica e da órbita dos candidatos, conforme explicado na seção anterior, impede a confirmação do mecanismo que produziu as HVS, uma vez que, por exemplo, os objetos produzidos pelo mecanismo de Hills têm uma característica específica da sua órbita: devem passar próximos ao CG. Visando explicar a existência de HVSs que não cumprem com este requisito, duas outras alternativas para a origem destas estrelas foram propostas: 1) cenário de colisão entre galáxias ([Abadi et al., 2009](#)) e 2) cenário de explosão de supernovas ([Becker et al., 2012](#)). Cabe destacar que as diversas origens propostas para HVSs não são mutuamente excludentes. Na verdade, confirmando-se a existência de diferentes mecanismos de produção de HVSs, enriquece-se a compreensão da cinemática e dinâmica da Via Láctea. Por questão de completeza, discutimos brevemente a seguir estes mecanismos alternativos.

### Cenário de colisão entre galáxias

Abadi et al. (2009), examinando as últimas compilações sobre HVSs, encontraram peculiaridades não previstas pelo cenário de buracos negros. Uma grande fração de um grupo de HVSs em torno da constelação de Leão, compartilham do mesmo tempo de viagem (100-200 Myr). Além disso, suas velocidades não são realmente extremas se, de fato, a Via Láctea estiver inserida dentro de um halo de matéria escura com velocidade virial de  $\sim 220 \text{ km s}^{-1}$  (Abadi et al., 2009). Neste caso, a velocidade de escape, a uma distância de 50 kpc, deveria ser  $600 \text{ km s}^{-1}$ , e muito poucas HVSs estariam realmente desvinculadas da Galáxia (*unbound*).

Como alternativa, Abadi et al. (2009), usando simulações numéricas, propõem que uma ruptura de uma galáxia anã possa contribuir com estrelas do halo com velocidades acima da velocidade de escape nominal do sistema. Numa projeção esférica em coordenadas galácticas, reproduzida aqui a partir do artigo dos autores (Figura 4.1), observamos uma assimetria na distribuição das HVSs com velocidades radiais acima de  $V_R > 300 \text{ km s}^{-1}$ , havendo uma concentração numa região de  $26^\circ$  de diâmetro na constelação de Leão. Mais da metade de todas as HVS com  $V_R > 350 \text{ km s}^{-1}$  estão nesta região que, por outro lado, contém apenas 20% de todas as estrelas analisadas.

### Cenário de explosão de supernovas

Becker et al. (2012), usando dados do satélite Chandra, re-examinaram o objeto RX J0822-4300 na remanescente de supernova de Puppis A. Correlacionando um conjunto de posições num intervalo de 10,5 anos, de dezembro de 1999 a agosto de 2010, o movimento próprio foi determinado em  $\mu = 71 \pm 12 \text{ mas yr}^{-1}$ . Para uma distância de 2 kpc, a velocidade tangencial foi determinada em  $672 \pm 115 \text{ km s}^{-1}$  (Figura 4.1). Os autores propõem que esta alta velocidade estaria vinculada à velocidade de recuo causada pela explosão da supernova.

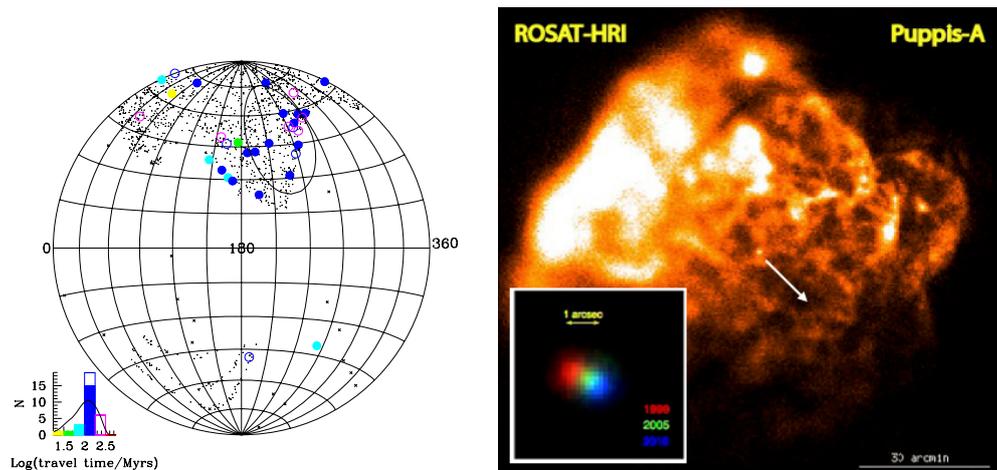


Figura 4.1: À esquerda: projeção esférica em coordenadas galácticas para todas as estrelas HVS estudadas por Brown e colaboradores. As estrelas coloridas são as HVSs e o código de cores refere-se ao “tempo de viagem”. As figuras preenchidas referem-se a objetos com distâncias estimadas. As figuras abertas são objetos novos. O círculo preto maior delinea uma região de  $26^\circ$  de diâmetro na constelação de Leão. Esta região mostra uma maior densidade de HVSs com alta velocidade radial (Abadi et al., 2009). À direita: imagem em raios X da supernova Puppis A, como visto pelo ROSAT HRI. O ponto central é a remanescente compacta. A seta indica a direção do movimento próprio. Em detalhe, imagem tomada em diferentes datas, de 1999 a 2010 (Becker et al., 2012).

## 4.4 Conclusão e perspectivas

Os mapas de contorno revelam-se uma interessante ferramenta para analisar a cinemática e a dinâmica da Galáxia. Aplicá-los concomitante com outros dados como metalicidade, tempo de viagem, populações estelares, aglomerados estelares, etc., pode fornecer boas perspectivas.

O uso de catálogos de estrelas com grande movimento próprio para a busca de HVSs deve ser seguido de um estudo pormenorizado, se não de todas, ao menos das melhores candidatas, procurando determinar com precisão suas distâncias e seus movimentos próprios que, em geral, introduzem as maiores fontes de erros.

O catálogo de Roeser, talvez devido ao fato de ter sido compilado a partir de dois outros catálogos, passando o movimento próprio dos objetos do USNO-B1.0 para o ICRS por meio do 2MASS, apresenta muitos erros na determinação desta variável. A enorme massa de dados deste catálogo também impede uma análise em detalhe de seu todo. Buscar ou aprimorar os mecanismos de determinação de distância a partir das grandezas disponíveis é fundamental. Porém, ainda assim, o catálogo revela-se útil por apresentar uma distribuição de objetos em todo o céu.

O catálogo de Ivanov, por trazer registro de algumas velocidades radiais e magnitudes na banda visual, oferece ferramentas para uma análise mais direta das candidatas. Portanto, na prática, este catálogo é mais interessante que o do Roeser. Adicionalmente, confirmando-se a promessa da versão 3, haverá 4 milhões de objetos ao invés dos aproximadamente 600 mil da versão 2.

É necessário fazer uma pesquisa cruzada entre os dois catálogos para identificar objetos que estejam em ambos pois isto pode ser utilizado para verificar a confiabilidade dos movimentos próprios.

Talvez a melhor perspectiva para o estudo de HVSs provenha das futuras observações do satélite GAIA, o observatório espacial da Agência Espacial Europeia. Embora a descoberta de HVSs não seja o principal objetivo desta missão, a esperada acurácia nas determinações do movimento próprio e da distância de mais de 1 bilhão de objetos traz enormes possibilidades

de se refinar os dados existentes das atuais HVSs e confirmar a situação de diversas candidatas, inclusive distinguindo entre HVSs e *runaways*.

Como complementação a este trabalho, restaria realizar uma análise dinâmica das melhores candidatas selecionadas, testando a sua evolução orbital através de simulações numéricas em diferentes potenciais galácticos.

Conforme dito ao longo deste estudo, a compreensão dos mecanismos geradores e evolução de HVSs deve fornecer importantes contribuições ao entendimento da evolução e dinâmica da nossa Galáxia, justificando, assim, sua busca e seu estudo.

# Referências Bibliográficas

- Abadi, M. G., Navarro, J. F., & Steinmetz, M. 2009, *The Astrophysical Journal*, 691, L63 ([document](#)), [4.3](#), [4.3](#), [4.1](#)
- Allen, C. & Santillan, A. 1991, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica*, 22, 255 [1.2](#), [2.1.3](#)
- Alonso, A., Arribas, S., & Martínez-Roger, C. 1999, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 140, 261 [2.2.2](#), [2.2.2](#), [2.2.2](#), [2.8](#), [2.9](#), [2.2.3](#), [2.2.3](#), [2.12](#), [4.1](#)
- Becker, W., Prinz, T., Winkler, P. F., & Petre, R. 2012, 141 [4.3](#), [4.3](#), [4.1](#)
- Bessell, M. S. & Brett, J. M. 1988, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 100, 1134 [2.2.2](#)
- Brown, W. R., Geller, M. J., & Kenyon, S. J. 2012, *The Astrophysical Journal*, 751, 55 ([document](#)), [1.3](#), [1.1](#), [2.1.2](#), [2.1.2](#), [2.2.2](#), [A.1](#)
- Brown, W. R., Geller, M. J., Kenyon, S. J., & Kurtz, M. J. 2005, *The Astrophysical Journal*, 622, L33 ([document](#)), [1.3](#)
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, *The Astrophysical Journal*, 345, 245 [2.2.2](#), [2.2.2](#), [2.2.3](#)
- Fuentes, C. I., Stanek, K. Z., Gaudi, B. S., McLeod, B. A., Bogdanov, S., Hartman, J. D., Hickox, R. C., & Holman, M. J. 2006, *The Astrophysical Journal*, 636, L37 [1.3](#)
- Gnedin, O. Y., Gould, A., Miralda-Escude, J., & Zentner, A. R. 2005, *The Astrophysical Journal*, 634, 344 [1.1](#)

- Gratier, P., Pety, J., Boissé, P., Cabrit, S., Lesaffre, P., Gerin, M., & Pineau des Forêts, G. 2014, 570, A71 [1.1](#)
- Hills, J. G. 1988, *Nature*, 331, 687 ([document](#)), [1.1](#), [1.2](#), [2](#), [4.1](#)
- Irrgang, A., Przybilla, N., Heber, U., Nieva, M. F., & Schuh, S. 2010, in PoS(NIC XI)151 (Heidelberg, Germany.: Proceedings of science) [1](#)
- Ivanov, G. a. 2008, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 24, 334 [1.5](#), [2.2.1](#), [2.2.3](#)
- Joshi, Y. 2007, *Monthly Notices of the R.A.S.*, 378, 768 [2.1.3](#), [3.1](#)
- Kenyon, S. J., Bromley, B. C., Geller, M. J., & Brown, W. R. 2008, *The Astrophysical Journal*, 680, 312 [1.1](#)
- Pereira, C. B., Jilinski, E. G., Drake, N. A., Ortega, V. G., & Roig, F. 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 559, A12 [1.3](#), [2.1.3](#), [4.1](#), [4.1](#)
- Piffl, T., Scannapieco, C., Binney, J., Steinmetz, M., Scholz, R.-D., Williams, M. E. K., de Jong, R. S., Kordopatis, G., Matijevič, G., Bienaymé, O., Bland-Hawthorn, J., Boeche, C., Freeman, K., Gibson, B., Gilmore, G., Grebel, E. K., Helmi, A., Munari, U., Navarro, J. F., Parker, Q., Reid, W. A., Seabroke, G., Watson, F., Wyse, R. F. G., & Zwitter, T. 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 562, A91 [1.2](#)
- Ramirez, I. & Melendez, J. 2005, *The Astrophysical Journal*, 626, 465 [2.2.2](#), [2.8](#)
- Roederer, I. U., Preston, G. W., Thompson, I. B., Shtetman, S. a., Sneden, C., Burley, G. S., & Kelson, D. D. 2014, *The Astronomical Journal*, 147, 136 [4.1](#)
- Roeser, S., Demleitner, M., & Schilbach, E. 2010, *The Astronomical Journal*, 139, 2440 [1.5](#), [2.2.1](#), [2.2.2](#)
- Schönrich, R., Binney, J., & Dehnen, W. 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403, 1829 [2.1.1](#)

Yu, Q. & Tremaine, S. 2003, *The Astrophysical Journal*, 599, 1129 [1.2](#), [4.1](#)

Zhang, F., Lu, Y., & Yu, Q. 2010, *The Astrophysical Journal*, 722, 1744 [1.3](#)

# Apêndice A

## Tabelas

Tabela A.1: Catálogo de HVS compilado por [Brown et al. \(2012\)](#). Os diferentes tipos se referem a: HVSs, *hypervelocity stars*; pHVSs, *possible hypervelocity stars*; pBHVSs, *possible bound hypervelocity stars*.

$\alpha$ (J2000) [°]	$\delta$ (J2000) [°]	Tipo	HVS	$V_R$ [km s <sup>-1</sup> ]	$V_{GRF}$ [km s <sup>-1</sup> ]	$d_h$ [kpc]	$l$ [°]	$b$ [°]	Identificação
136.93748	2.75192	HVSs	1	840	673	76	227.33	31.33	SDSS J090744.99+024506.88
143.33687	44.28494	HVSs	2	708	718	26	175.99	47.05	US708
69.55322	-54.55329	HVSs	3	723	520	62	263.04	-40.91	HE0437-5439
138.25418	30.85553	HVSs	4	611	559	69	194.76	42.56	SDSS J091301.01+305119.83
139.49774	67.37741	HVSs	5	553	664	36	146.23	38.70	SDSS J091759.47+672238.35
166.48937	9.57762	HVSs	6	626	511	61	243.12	59.56	SDSS J110557.45+093439.47
173.30052	1.14024	HVSs	7	529	396	37	263.83	57.95	SDSS J113312.12+010824.87
145.55846	20.05612	HVSs	8	489	393	46	211.70	46.33	SDSS J094214.03+200322.07
155.40454	-0.87632	HVSs	9	628	461	47	244.63	44.38	SDSS J102137.08-005234.77
180.90772	18.04732	HVSs	10	478	423	66	249.93	75.72	SDSS J120337.85+180250.35
162.53998	3.26407	HVSs	12	552	408	82	247.11	52.46	SDSS J105009.59+031550.67
163.20128	-0.02609	HVSs	13	575	421	101	251.65	50.64	SDSS J105248.30-000133.94
161.00729	6.19417	HVSs	14	532	396	96	241.78	53.20	SDSS J104401.75+061139.02
250.48495	47.39615	HVSs	17	246	442	50	73.52	41.16	SDSS J164156.39+472346.12
352.27061	33.00318	HVSs	18	251	473	75	103.64	-26.77	SDSS J232904.94+330011.47
173.82400	8.03375	HVSs	19	597	490	89	256.05	63.74	SDSS J113517.75+080201.49
174.15473	3.51857	HVSs	20	504	381	69	262.56	60.39	SDSS J113637.13+033106.84
158.57605	48.19295	HVSs	21	355	392	100	165.26	56.11	SDSS J103418.25+481134.57

$\alpha$ (J2000) [ $^{\circ}$ ]	$\delta$ (J2000) [ $^{\circ}$ ]	Tipo	HVS	$V_R$ [km s $^{-1}$ ]	$V_{GRF}$ [km s $^{-1}$ ]	$d_h$ [kpc]	$l$ [ $^{\circ}$ ]	$b$ [ $^{\circ}$ ]	Identificação
149.77698	0.14817	pHVSs	11	477	307	64	238.77	40.63	SDSS J095906.47+000853.41
153.49910	56.51999	pHVSs		222	292	77	155.50	49.46	SDSS J101359.79+563111.65
167.90185	0.98234	pHVSs		496	353	54	256.27	54.55	SDSS J111136.44+005856.44
173.42122	-1.35396	pHVSs	15	463	322	78	266.51	55.92	SDSS J113341.09-012114.25
186.34750	5.37609	pHVSs	16	434	345	74	285.86	67.38	SDSS J122523.40+052233.84
7.04305	21.96935	pBHVSs		150	321	27	115.82	-40.58	SDSS J002810.33+215809.66
14.98359	31.57758	pBHVSs		136	311	40	125.05	-31.26	SDSS J005956.06+313439.29
17.45129	31.29101	pBHVSs		108	276	30	127.53	-31.42	SDSS J010948.30+311727.66
117.45932	24.64477	pBHVSs		361	288	61	196.07	23.21	SDSS J074950.24+243841.16
124.61684	57.15622	pBHVSs		229	297	34	160.45	34.20	SDSS J081828.07+570922.07
136.79199	36.99931	pBHVSs		306	282	45	186.30	42.16	SDSS J090710.07+365957.54
158.48858	-1.25204	pBHVSs		504	339	44	247.97	46.42	SDSS J103357.26-011507.35
160.82623	-1.58403	pBHVSs		448	285	68	250.71	47.87	SDSS J104318.29-013502.51
170.73237	-9.79303	pBHVSs		482	309	30	269.75	47.30	SDSS J112255.77-094734.92
170.99780	75.30215	pBHVSs		140	291	58	130.08	40.59	SDSS J112359.47+751807.73
178.19129	-2.18783	pBHVSs		424	290	44	274.88	57.45	SDSS J115245.91-021116.21
211.13491	35.38289	pBHVSs		228	309	31	65.34	72.37	SDSS J140432.38+352258.41
214.34725	10.21270	pBHVSs		284	289	40	357.16	63.62	SDSS J141723.34+101245.74
237.02886	9.57332	pBHVSs		206	278	58	18.68	44.85	SDSS J154806.92+093423.93
270.21195	48.40684	pBHVSs		62	292	29	75.71	28.06	SDSS J180050.86+482424.63
350.62282	4.61429	pBHVSs		133	290	25	85.47	-51.67	SDSS J232229.47+043651.45

Tabela A.2: Amostra de 20 objetos do catálogo de Roeser, após tratamento.

Identificação (PPMXL)	$\alpha$ (J2000) [ $^{\circ}$ ]	$\delta$ (J2000) [ $^{\circ}$ ]	$l$ [ $^{\circ}$ ]	$b$ [ $^{\circ}$ ]	$J$	$H$	$K$	$ \mu $ [mas yr $^{-1}$ ]	$T_{\text{eff}}$ [K]	$d_h(M_V = 0)$ [pc]
282505.117579160962	270.573039	77.719600	109.176953	29.067112	9.406	9.021	8.916	112.654614	5243.530470	1372.034096
283314189614251771	273.290667	79.427319	111.064192	28.384691	7.318	7.109	7.027	123.848910	6424.703649	380.529776
283370509062947380	270.038352	80.004105	111.784627	28.904046	4.812	4.515	4.455	133.116375	5839.585439	133.709920
286781437441320767	275.108817	84.206024	116.441430	27.760228	9.055	8.669	8.603	240.126735	5304.190245	1098.893098
384302796640558470	44.893021	35.326255	150.408987	-20.603050	6.877	6.512	6.415	171.288906	5528.038137	339.755249
480756156512862624	87.041335	86.503496	126.679269	26.125632	9.819	9.451	9.349	106.972646	5453.232517	1407.738142
481824482050851106	84.478758	83.642280	129.588641	24.967491	10.202	9.807	9.737	126.752012	5213.865863	1989.669814
485228860497212646	87.513501	80.092267	133.406671	24.120582	8.645	8.332	8.293	122.355766	5733.818574	812.121054
486096625248622290	88.554383	77.803657	135.833639	23.530426	9.415	9.069	9.004	142.077834	5583.720135	1143.476148
588256746679724287	257.246196	45.699612	71.338536	36.516293	9.092	8.817	8.764	131.255646	5845.645223	1062.957668
589133364009505375	258.127297	47.395126	73.474882	35.992670	8.236	7.983	7.927	102.854435	6010.781727	679.705461
589732933981501423	255.651682	47.081881	73.022300	37.663532	5.411	5.098	5.003	863.497836	5613.000021	202.360258
591289869432287676	259.163083	50.606482	77.452322	35.407323	6.849	6.545	6.507	115.342338	5663.984273	398.517998
598470126100001963	261.394528	55.610076	83.542995	34.071933	10.051	9.701	9.619	113.991470	5405.108420	1819.667684
600832154144483706	264.934598	61.152709	90.1114399	32.110741	10.930	10.559	10.476	106.363724	5318.679106	2729.469437
602884144511436899	260.265827	63.075860	92.589089	34.151822	14.861	13.987	13.610	136.950278	3601.399826	30117.973868
603279499097455032	259.245301	62.578141	92.060615	34.676068	6.720	6.451	6.374	197.046013	5882.457616	350.141316
603835293058760195	259.739592	54.526723	82.249746	35.039954	10.215	9.816	9.651	115.392606	5143.233235	2054.792522
603934521563087001	258.242639	54.124497	81.791132	35.925615	7.493	7.233	7.155	108.427963	5941.524571	492.988895
604321007258233670	255.578793	53.166577	80.704228	37.554084	9.423	9.154	9.105	160.880317	5948.745119	1156.281171

Tabela A.3: Amostra de 20 objetos do catálogo de Ivanov, após tratamento.

$\alpha$ (J2000)	$\delta$ (J2000)	$l$	$b$	$B$	$V$	$R$	$B - V$	$V - R$	$ \mu $	$T_{\text{eff}}$	$d_h (M_V = 0)$	Identificação
[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]						[mas yr $^{-1}$ ]	[K]	[pc]	
0.018692	3.946458	99.219338	-56.541935	12.310	11.45	1.336	0.860	0.860	226.661708	4288.379363	2801.173441	LP 524-8
0.022008	20.036114	106.819466	-41.223410	9.640	9.13	0.740	0.510	0.510	289.182036	5492.116909	794.401398	BD+19 5185
0.152596	17.968908	106.238029	-43.249078	10.570	9.83	1.030	0.740	0.740	367.617546	4782.559793	1258.403739	LHS 6000
0.163533	18.488861	106.441942	-42.750863	11.130	10.38	1.370	0.750	0.750	387.275303	4246.344436	1619.347294	G 129-54
0.187654	6.495439	101.050728	-54.208712	12.470	11.98	0.900	0.490	0.490	103.585810	5090.951914	2928.464745	V* RR Fsc
0.200383	16.988197	105.931758	-44.205578	8.794	8.17	0.940	0.624	0.624	331.259566	4970.802634	552.408052	HD 224808
0.202867	29.852175	110.019056	-31.746882	10.510	10.34	0.865	0.170	0.170	118.887384	5184.265708	1179.777203	TYC 1735-321-1
0.211175	4.163006	99.684663	-56.407999	11.710	10.95	0.990	0.760	0.760	170.369598	4864.482784	2118.848962	TYC 4-874-1
0.216596	14.567450	104.996485	-46.535556	15.000	13.080	1.920	0.280	0.280	346.401862	3677.636707	3893.319097	G 30-37
0.221275	28.243889	109.596671	-33.315335	10.650	10.26	0.565	0.390	0.390	148.209851	6057.439083	1247.785688	BD+27 4662
0.239237	27.439217	109.388960	-34.101398	9.380	8.90	0.635	0.480	0.480	125.175477	5794.034368	706.219980	TYC 1732-631-1
0.250787	0.019722	96.817059	-60.269432	15.600	14.030	1.570	1.230	1.230	193.667137	4000.086342	6161.975965	NLTT 58762
0.252425	27.886331	109.528733	-33.669445	9.610	8.98	0.852	0.630	0.630	225.667033	5213.120153	782.131901	BD+27 4663
0.257608	30.742897	110.310432	-30.890342	11.230	10.83	0.470	0.400	0.400	135.374813	6345.189219	1671.937351	TYC 2259-1322-1
0.276037	20.509272	107.287309	-40.828324	16.600	15.440	1.160	1.340	1.340	288.855760	4619.518823	11233.627012	LP 404-17
0.296946	14.002964	104.871519	-47.098934	15.600	14.515	1.085	1.005	1.005	168.903878	4732.205170	7443.205335	LP 464-32
0.304942	13.975053	104.870787	-47.127899	10.480	9.60	1.370	0.880	0.880	144.421951	4279.679381	1161.020799	LP 464-32
0.355833	31.287547	110.548066	-30.378558	14.400	12.900	1.500	0.890	0.890	258.373006	4099.964630	3580.799465	G 130-35
0.362312	16.651417	106.012714	-44.571774	16.300	15.720	0.580	2.320	2.320	233.200772	5942.613530	13261.724451	NLTT 58787
0.365346	6.704889	101.453392	-54.069488	11.920	11.33	0.335	0.590	0.590	132.200038	6962.569124	2271.956438	TYC 7-424-1

## Apêndice B

### Mapas de contorno

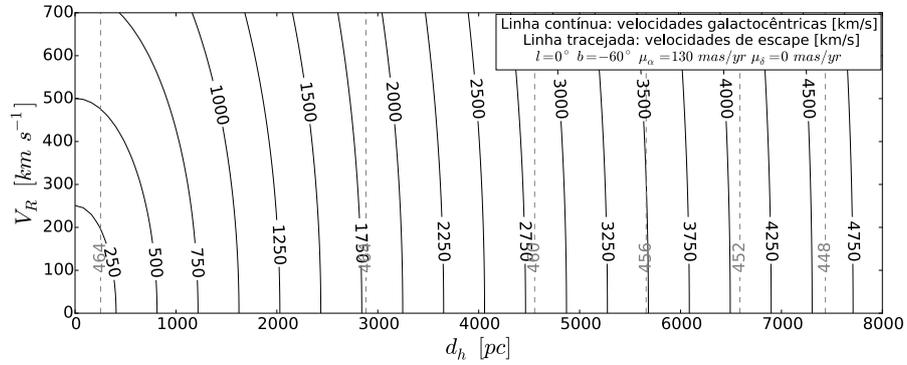


Figura B.1: Mapa representativo da região 2. Em linha contínua são mostradas as curvas de nível de  $V_{\text{GRF}}$  e em linha tracejada as curvas de  $V_{\text{esc}}$ .

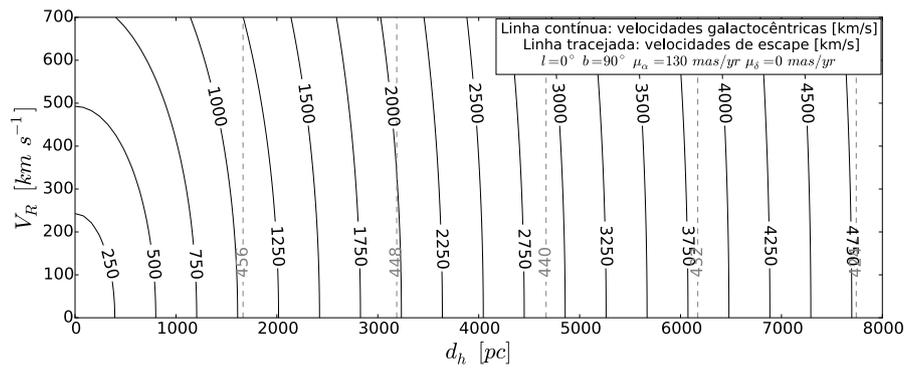


Figura B.2: Mapa de região 3

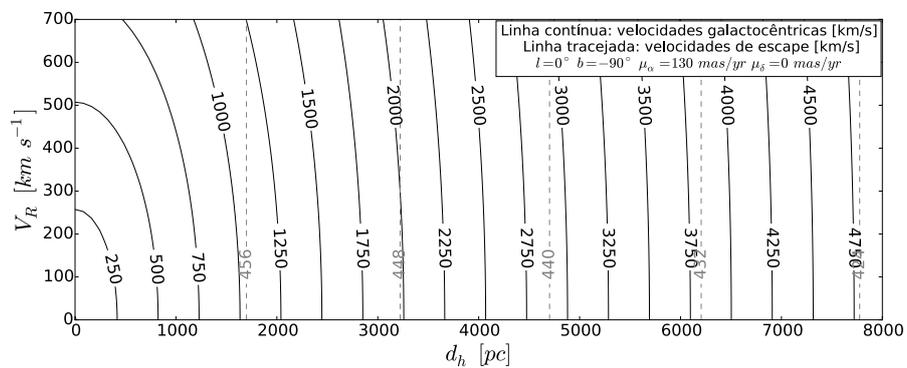


Figura B.3: Mapa da região 4

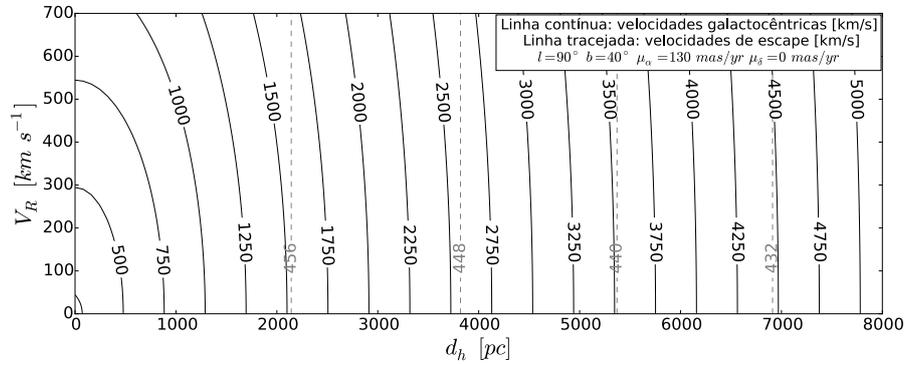


Figura B.4: Mapa da região 5. Os valores de  $V_{\text{GRF}}$  estão superestimados em  $17 \text{ km s}^{-1}$ .

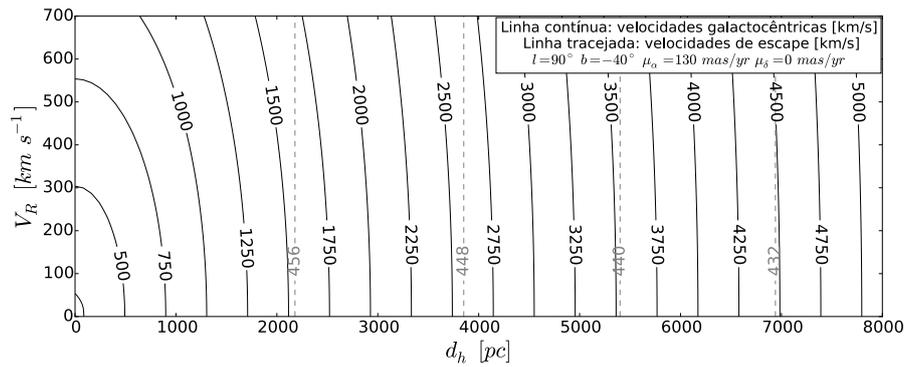


Figura B.5: Mapa da região 6. Os valores de  $V_{\text{GRF}}$  estão superestimados em  $5 \text{ km s}^{-1}$ .

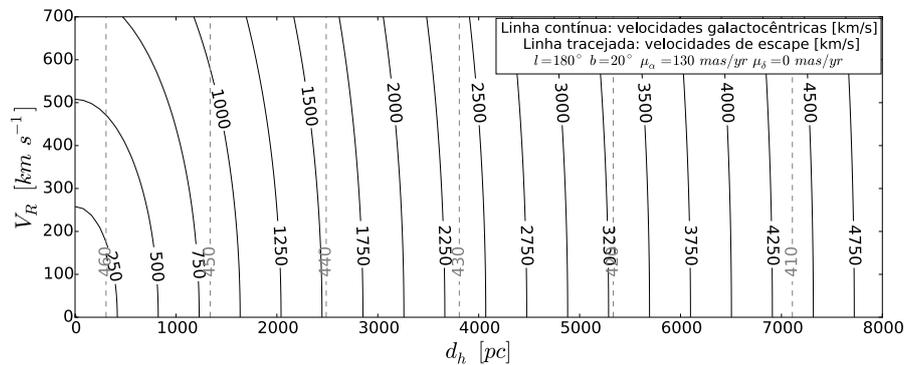


Figura B.6: Mapa da região 7

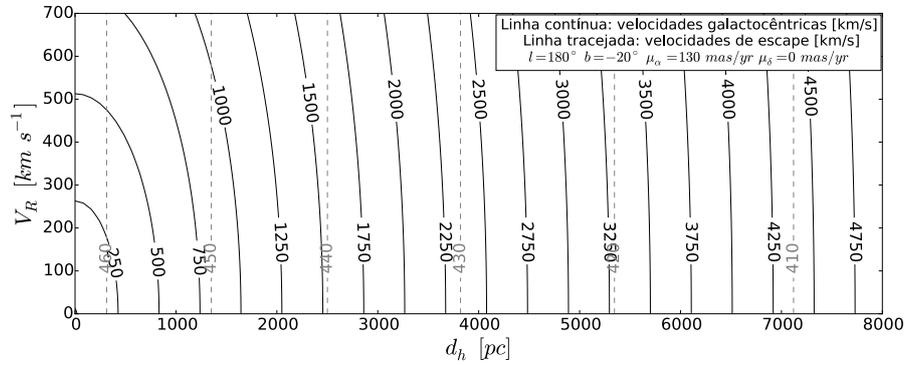


Figura B.7: Mapa da região 8

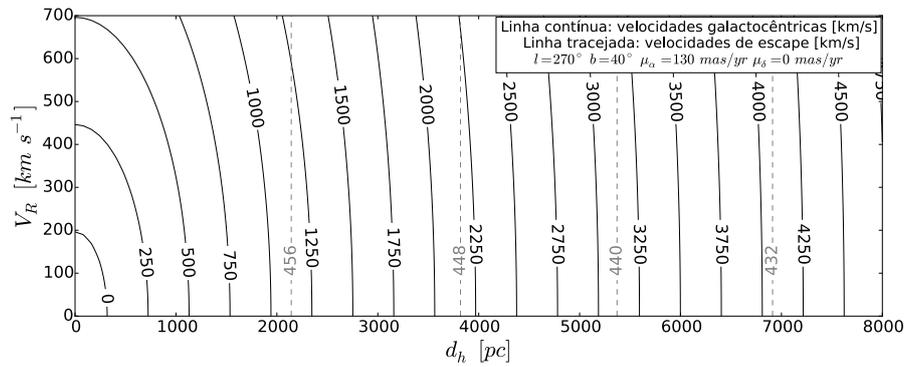


Figura B.8: Mapa da região 9. Os valores de  $V_{\text{GRF}}$  estão subestimados em  $17 \text{ km s}^{-1}$ .

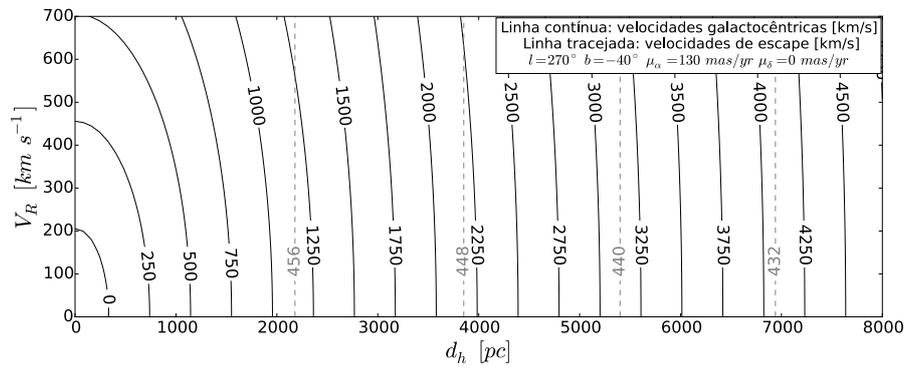


Figura B.9: Mapa da região 10. Os valores de  $V_{\text{GRF}}$  estão subestimados em  $17 \text{ km s}^{-1}$ .

# Apêndice C

## Códigos em Python

---

**Algoritmo C.1** Função em Python usada para o cálculo da velocidade galactocêntrica  $V_{\text{GRF}}$

---

```

from numpy import deg2rad, sqrt, sin, cos
def VelGal(l, b, pmra, pmde, d, Vr ):
    """
    Função que calcula a velocidade no referencial do centro da Galáxia
    ENTRADA
    l      — Longitude galáctica, [deg]
    b      — Latitude galáctica, [deg]
    pmra   — Movimento próprio, da Ascensão Reta, [arcsec/yr]
    pmde   — Movimento próprio, da Declinação, [arcsec/yr]
    d      — Distância heliocêntrica, [pc]
    Vr     — Velocidade Radial, [km/s]

    SAÍDA
    Vgsr   — Velocidade no referencial galactocêntrico, [km/s]
    """

    #Conversão dos ângulos para radianos
    l = deg2rad(l)
    b = deg2rad(b)

    #Movimento próprio
    pm = sqrt(pmra**2 + pmde**2)

    #Velocidade tangencial
    Vt = 4.74 * pm * d

    #Velocidade heliocêntrica
    Vh = sqrt(Vr**2 + Vt**2)

    #Conforme Brown(2012)
    Vgsr = Vh + 11.1*cos(l)*cos(b) + 262.24*sin(l)*cos(b) + 7.25*sin(b)

    return (Vgsr)

```

---

---

**Algoritmo C.2** Função em Python usada para o cálculo da velocidade de escape  $V_{\text{esc}}$

---

```

#Função para o cálculo da velocidade de escape da Galáxia
#Depende da distância heliocêntrica, dh e de l e b
from __future__ import print_function, division
from numpy import sin, cos, log10, sqrt, deg2rad, shape, zeros
import numpy as np

def VelEsc(l, b, dh):

    #Constantes
    M1 = 6.06e4
    b1 = 0.3873 #kpc
    M2 = 3.69e5
    a2 = 5.3178 #kpc
    b2 = 0.25 #kpc
    M3 = 4.615e5
    a3 = 12.0 #kpc

    zh = 17 #altura do Sol em relação ao plano, [pc]
    rh = 8330 #distância do Sol ao centro da Galáxia, [pc]

    #Convertendo unidades l e b para radianos e distâncias para kpc
    l = deg2rad(l) #rad
    b = deg2rad(b) #rad
    rh = rh/1000 #kpc
    zh = zh/1000 #kpc
    dh = dh/1000 #kpc

    z = dh*sin(b) + zh #Altura z do objeto em [kpc]
    d = sqrt(rh**2 + (dh**2)*(cos(b)**2) - 2*rh*dh*cos(b)*cos(l)) #[kpc]
    r = sqrt(d**2 + z**2) #Distância galactocêntrica [kpc]

    #Parâmetros
    h = 1 + (r/a3)**1.02
    h100 = 1 + (100/a3)**1.02

    #Potenciais galácticos
    phi1 = -M1/sqrt(r**2 + b1**2)
    phi2 = -M2/sqrt(d**2 + (a2 + sqrt(z**2 + b2**2))**2)
    phi3 = -(M3/h)*(1/r)*(r/a3)**2.02

    if r < 100:
        phi4 = -(M3/(1.02*a3))*(1.02/h - 1.02/h100 + log10(h100) - log10(h))
    else:
        phi4 = 0

    #Potencial total
    phi0 = phi1 + phi2 + phi3 + phi4

    #Velocidade de escape
    Ve = sqrt(-2*phi0)

    return Ve

```

---