

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Roberto Kammers

**MAPEANDO O DISCO DA VIA LÁCTEA COM  
ESTRELAS GIGANTES VERMELHAS**

Florianópolis

2019



Roberto Kammers

**MAPEANDO O DISCO DA VIA LÁCTEA COM  
ESTRELAS GIGANTES VERMELHAS**

Dissertação submetida ao Programa  
de Pós-Graduação em Física para a  
obtenção do Grau de Mestre.  
Orientador: Prof. Dr. Roberto Kal-  
busch Saito

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kammers, Roberto

Mapeando o disco da Via Láctea com estrelas  
gigantes vermelhas / Roberto Kammers ; orientador,  
Roberto Kalbusch Saito, 2019.

74 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e  
Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Física,  
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Física. 2. Extinção interestelar . 3. Disco  
Galáctico. 4. Estrelas do Red Clump. I. Saito,  
Roberto Kalbusch. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Física. III.  
Título.

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de laboratório, aos meus pais e a todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram nessa caminhada.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Alcindo e Ivonete, que não mediram esforços para me dar uma educação de qualidade e oportunidade de estudar.

Ao meu irmão Ramon, por todos os momentos de alegria que ele me propiciou.

Ao professor Roberto K. Saito, que ao longo destes 2 anos não mediu esforços para me ajudar a crescer academicamente.

A todos os membros do GAS/UFSC, pelos ensinamentos e apoio ao longo desses 2 anos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que de alguma forma me apoiaram, meu muito obrigado.





Exódia, obliterar.  
(YU-GI-OH! Duel Monsters, 1998)



## RESUMO

Este trabalho apresenta a análise de 3 janelas de baixa extinção localizadas no plano galáctico. O objetivo é mapear os braços espirais no lado mais distante da Via Láctea, esta que é uma região relativamente inexplorada na nossa galáxia, utilizando as estrelas do Red Clump como indicadores de distância. Procuramos por janelas de baixa extinção em baixas latitudes galácticas ( $|b| = 1 \text{ deg}$ ), nos comprimentos de onda do infravermelho próximo nos mapas de extinção obtidos pelo levantamento fotométrico VVV. Encontramos duas novas janelas chamadas VVV WIN 1607-5258 e VVV WIN 1475-5877 que complementam a janela VVV WIN 1713-3939, já estudada anteriormente. Analisamos a distribuição de estrelas do RC nessas três janelas, medindo a sua densidade ao longo de cada linha de visada e em seguida as comparando com campos de controle simétricos em latitude e de mesma longitude, afim de evidenciar diferenças nas populações de RCs observadas devido ao avermelhamento e à extinção. A densidade de estrelas ao longo de cada linha de visada nos permite encontrar os picos nas distribuições e medir suas distâncias até as sobredensidades de estrelas do RC. Em seguida, utilizamos os valores de movimento próprio obtidos no catálogo astrométrico VIRAC, para as fontes do VVV, para medir a cinemática das estrelas do RC em diferentes distâncias. Encontramos sobredensidades de estrelas do RC em todas as janelas estudadas, identificando-as como os braços espirais da Via Láctea. Traçamos claramente o final da barra galáctica, o braço de Norma, bem como a região mais distante do braço de Scutum-Centaurus. Usando os movimentos próprios das fontes do VVV, medimos a cinemática para essas estruturas galácticas, confirmando que eles compartilham a mesma rotação do disco galáctico.

**Palavras-chave:** Extinção. Disco Galáctico. Red Clump.



## ABSTRACT

This work presents the analysis of three low extinction windows located in the galactic plane. The aim of this work is to map the spiral arms in the far side of the Milky Way, which is a relatively unexplored region in our galaxy, using Red Clump stars as distance indicators. We search for low extinction windows at low galactic latitudes ( $|b| = 1 \text{ deg}$ ) at the near infrared wavelengths in the extinction maps obtained by the VVV survey. We find two new windows called VVV WIN 1607-5258 and VVV WIN 1475-5877, that complement the window VVV WIN 1713-3939, previously studied. We analyse the distribution of RC stars in these three windows, measuring their density along each line of sight and then comparing them with control fields symmetric in galactic latitude and on the same galactic longitude, in order to show differences in the observed RC populations due to reddening and extinction. The density of stars along each line of sight allows us to find the peaks in the distributions and measure their distances to the overdensities of RC stars. Then, we use the proper motion values obtained in the VIRAC astrometric catalog for the VVV sources to measure the kinematics of the RC stars at different distances. We found overdensities of RC stars in all studied windows, identifying them with the spiral arms of the Milky Way. We clearly trace the end of the Galactic bar, the Norma arm, as well as the most distant region of the Scutum-Centaurus arm. Using the VVV proper motions, we measure the kinematics for these Galactic structures, confirming that they share the same rotation of the Galactic disk.

**Keywords:** Extinction. Galactic disk. Red Clump.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Caminho evolutivo percorrido por uma estrela de  $1 M_{\odot}$ . Inicialmente ela é um estrela da sequência principal, depois de queimar todo o hidrogênio do núcleo ela entra na fase de subgigante. Após esse período a estrela entra no RGB, passando pelo RGB *bump* e chegando à ponta do RGB culminando com o *flash* de Hélio, iniciando o período em que a estrela fica na região do DCM conhecida como Red Clump (linha sólida amarela entre as linhas pontilhadas do ramo horizontal). Após essa fase a estrela continua seu processo evolutivo até se tornar uma anã branca no fim de seu processo evolutivo. Figura disponível em [https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_evolution#/media/File:Evolution-ary\\_track\\_1m.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution#/media/File:Evolution-ary_track_1m.svg). . . . . 26
- Figura 2 Diagrama cor-magnitude construído com dados da missão Hipparcos. No eixo x temos a cor (V-I) e no eixo y a magnitude absoluta. O Red clump está localizado entre as linhas pontilhadas em vermelho. O Sol aparece em destaque no DCM. Com o auxílio do eixo superior e lateral esquerdo, nota-se que as RCs são mais brilhantes e mais frias que o Sol. Figura disponível em [http://www.astronomy.ohio-state.edu/kstaneck/CfA/RedClump/...](http://www.astronomy.ohio-state.edu/kstaneck/CfA/RedClump/) 27
- Figura 3 Evolução da luminosidade para uma estrela RC com metalicidade solar e massa de  $1.3M_{\odot}$ . A linha em cinza representa a luminosidade total da estrela, a linha em azul representa a luminosidade proveniente do invólucro de H, a linha vermelha traz a luminosidade proveniente da queima de He no núcleo da estrela e a linha verde é a luminosidade gravitacional, proveniente da contração ou expansão da estrela. Figura retirada de Girardi (2016). 28
- Figura 4  $K_s$  vs  $Z - K_s$  DCM de mais de 66 milhões de estrelas do Bojo Galáctico. O vetor de avermelhamento está associado a uma extinção de  $E(B - V) = 1$ , com base nas extinções relativas dos filtros VISTA, e assumindo a lei de extinção de Cardelli, Clayton e Mathis (1989). O RC se localiza nas proximidades de  $K_s = 13.2$  mag e  $(Z - K_s) = 1.7$  mag. Figura original disponível em Saito et al. (2012b). . . . . 31
- Figura 5 Ilustração dos componentes de uma galáxia espiral típica. Podemos perceber que a galáxia se divide no bojo, no halo e no disco. No halo se localizam as aglomerados globulares, enquanto o disco ainda pode ser dividido em disco grosso e fino. Ilustração retirada do site: <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/h/halo...> 33

Figura 6 Densidade de estrelas versus distância ao plano Galáctico. A linha sólida representa o ajuste realizado para o disco fino, já a linha tracejada representa o ajuste para o disco grosso. Figura original disponível em Gilmore e Reid (1983). . . . . 35

Figura 7 Representação artística da nossa Galáxia vista por um observador externo. Figura adaptada de Churchwell et al. (2009). 36

Figura 8 A rotação diferencial pode criar um padrão espiral no disco em um curto espaço de tempo. Para intervalos de tempo de bilhões de anos esperar-se-ia que os braços estivessem mais espiralados do que as observações nos indicam. Figura obtida em <http://www.astronomynotes.com/ismnotes/diffspin.gif>. . . . . 37

Figura 9 Diagrama mostrando a posição dos 16 detectores na câmera VISTA e a orientação do eixo utilizado para deslocar a câmera em cada exposição. Para comparação, a figura mostra a lua crescente sobre os detectores da câmera. Figura retirada de Minniti et al. (2010). . . . . 39

Figura 10 Área observada pelo VVV survey, demarcando os *tiles* individualmente observados. Os *tiles* numerados de 1 a 152 estão localizados no disco Galáctico, já os *tiles* de 201 a 396 estão localizados no bojo. Os eixos x e y representam respectivamente a longitude e a latitude galácticas. Os *tiles* estão plotados sobre um mapa de extinção. Figura original disponível em Saito et al. (2012a). . . . . 40

Figura 11 Curvas de transmissão dos filtros Z, Y, J, H e  $K_s$  comparados com uma curva típica de transmissão atmosférica com massa de ar de 1.0 e 1.0 mm de vapor de água. . . . . 41

Figura 12 Mapa de extinção para a região sul do disco Galáctico. O mapa de extinção mostra regiões com  $E(J - K_s) \leq 1.5$  mag. As linhas horizontais em branco demarcam a região analisada entre  $|b| \leq 1$  deg. As janelas de baixa extinção são mostradas em retângulos e círculos de diversas cores, que também representam sua forma real. As janelas brancas mostram campos simétricos às janelas de baixa extinção. Esses campos são usados como controle para comparação com as regiões de baixa extinção. No eixo x e y temos respectivamente a latitude e a longitude galáctica. . . . . 44

Figura 13 DCM de  $K_s$  por  $J - K_s$  da janela VVV WIN 1475-5877. Em azul se destaca a região do DCM utilizada para a obtenção dos valores de módulo de distância. . . . . 46

Figura 14 DCM de  $K_s$  por  $J - K_s$  para um campo localizado em  $(l, b) = (0.0, -7.0)$  deg. Curvas de densidade ajudam a identificar a



presença de um duplo pico na região das gigantes vermelhas. Podemos perceber o primeiro RC em $K_s = 12.80$ mag e $(J - K_s) = 0.85$ mag e o segundo RC em $K_s = 13.15$ mag e $(J - K_s) = 0.85$ . Figura original disponível em Saito et al. (2011). . . . .	48
Figura 15 DCM de $K_s$ por $(J - K_s)$ de uma região centrada em coordenadas galácticas $(l, b) = (347.4, -0.4)$ deg, esta região será estudada posteriormente neste trabalho (ver seção 4.1.1). Este DCM mostra a seleção da região na qual se encontram as estrelas pertencentes a cada um dos RCs. Em azul escuro temos a seleção da região no DCM do primeiro RC, já em verde escuro temos a região pertencente ao segundo RC. . . . .	50
Figura 16 Representação da cinemática de uma estrela em relação ao Sol. Figura original do trabalho de López-Corredoira (2014). . .	52
Figura 17 Recorte da região onde se encontra a janela VVV WIN 1713-3939 no mapa de extinção mostrado na Fig. 12. A área de menor extinção se localiza no círculo amarelo. A escala de cor é a mesma utilizada na Fig. 12 e representa o excesso de cor em $E(J - K_s)$ . A avermelhamento médio na janela é de $E(J - K_s) = 0.96 \pm 0.09$ mag. . . . .	56
Figura 18 DCM da janela VVV WIN 1713-3939 (painel da esquerda) em comparação com o campo de controle (painel da direita, ver seção 3.2). As linhas representam curvas de densidade. Podemos perceber a presença de uma estrutura complexa na região em que se encontram as RCs. . . . .	57
Figura 19 Densidade de distribuição normalizada versus módulo de distância. O histograma em vermelho representa a distribuição em módulo de distância para a janela de baixa extinção, já o histograma em azul representa a distribuição para o campo de controle. Podemos ver um excesso de contagens no histograma da janela de baixa extinção (por volta de $\mu = 15.9$ mag). . . . .	58
Figura 20 Velocidade tangencial das RCs versus distância. Os pontos representam as sobredensidades de RCs, enquanto a linha em preto é a curva de rotação simples da Galáxia para as coordenadas da janela (López-Corredoira, 2014). . . . .	59
Figura 21 Recorte da região onde se encontra a janela VVV WIN 1607-5258 no mapa de extinção mostrado na Fig. 12. A área de menor extinção se localiza no retângulo azul. A escala de cor é a mesma utilizada na Fig. 12 e representa o excesso de cor em $E(J - K_s)$ . O avermelhamento médio na janela é de $E(J - K_s) = 0.98 \pm 0.10$ mag. . . . .	60

Figura 22 DCM da janela VVV WIN 1607-5258 (painel da esquerda) em comparação com o campo de controle (painel da direita). As linhas representam curvas de densidade. Podemos perceber a presença de duas sobredensidades significativas na região em que se encontra o RC. .... 61

Figura 23 Densidade de distribuição normalizada versus módulo de distância. O histograma em preto representa os dados para a janela de baixa extinção, enquanto o histograma em vermelho representa os dados para o campo de controle. As linhas sólidas em vermelho e preto representam o ajuste gaussiano aplicado às distribuições... 62

Figura 24 Velocidade tangencial das RCs versus distância. Os pontos representam as sobredensidades de RCs, enquanto a linha em verde é a curva de rotação simples da Galáxia para as coordenadas da janela (López-Corredoira, 2014). .... 62

Figura 25 Recorte da região onde se encontra a janela VVV WIN 1475-5877 no mapa de extinção mostrado na Fig. 12. A área de menor extinção se localiza no retângulo verde. A escala de cor é a mesma utilizada na Fig. 12 e representa o excesso de cor em  $E(J - K_s)$ . O avermelhamento médio na janela é de  $E(J - K_s) = 0.91 \pm 0.06$  mag. .... 63

Figura 26 DCM da janela VVV WIN 1475-5877 (painel da esquerda) em comparação com o campo de controle (painel da direita). As linhas representam curvas de densidade. Podemos perceber a presença de uma estrutura complexa na região em que se encontram as RCs, não sendo possível neste caso atribuir as sobredensidades estelares a um duplo pico das RCs analisando apenas o DCM. .... 64

Figura 27 Densidade de distribuição versus modulo de distância. Em azul estão os dados para a janela de baixa extinção e em laranja os dados para o campo de controle. Os dois histogramas são muito semelhantes até a proximidade de  $\mu = 15.25$  mag, isso se deve ao fato de que nesta janela estamos observando o segundo pico de estrelas do RC mais próximo a nós. .... 65

Figura 28 Velocidade tangencial das RCs versus distância. Os pontos representam as sobredensidades de RCs, enquanto a linha em azul escuro representa a curva de rotação simples da Galáxia para as coordenadas da janela (López-Corredoira, 2014). .... 66

Figura 29 Mapa esquemático da Via Láctea adaptado de Chur-chwell et al. (2009). Os eixos y e x representam a distância em

relação ao centro Galáctico. A posição de cada sobredensidade de RCs ao longo das linhas de visada para as três janelas de baixa extinção são plotadas no mapa. Adotamos a distância até o centro Galáctico como  $R_0 = 8.0$  kpc. Os pontos coloridos representam os valores de distância encontrados em nossa análise e são mostrados na Tab. 3. O círculo aberto mostra a posição do Sol no mapa, enquanto o X no centro da figura indica a posição do centro Galáctico. O círculo formado pela linha pontilhada possui raio de 8.0 kpc e está centrado no centro Galáctico. O ponto verde mostra o braço de Perseus (ou o final da barra Galáctica), os pontos magenta marcam o braço de Norma enquanto os pontos laranja marcam a posição do braço de Scutum-Centaurus. .... 68



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores de magnitude absoluta das estrelas do RC para algumas bandas de observação. ....	30
Tabela 2	Comprimentos de onda efetivos para o conjunto de filtros VISTA usado nas observações do VVV. Tabela original disponível em (Saito et al., 2012a) .....	41
Tabela 3	Medidas de distância, MP absolutos e velocidade tangencial para as distribuições de RC em cada uma das janelas de baixa extinção. ....	67



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DCM	Diagrama cor-magnitude
He	Hélio
RGB	Red giant branch
RC	Red Clump
MP	Movimento próprio
VL	Via Láctea
IR	Infravermelho
H	Hidrogênio





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	25
2.1	ESTRELAS GIGANTES VERMELHAS .....	25
2.1.1	Estrelas gigantes vermelhas como indicadores de distância .....	29
2.2	EXTINÇÃO INTERESTELAR .....	30
2.3	COMPONENTES DA VIA LÁCTEA .....	32
2.3.1	Halo e Bojo .....	32
2.3.2	Disco .....	34
2.4	TEORIA DOS BRAÇOS ESPIRAIS .....	35
<b>3</b>	<b>OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS</b> .....	39
3.1	VVV SURVEY .....	39
3.1.1	Redução dos dados .....	41
3.1.2	VIRAC .....	42
3.2	JANELAS DE BAIXA EXTINÇÃO NO DISCO GALÁCTICO	43
3.3	ESTIMATIVAS DE DISTÂNCIA .....	46
3.4	OBTENÇÃO DOS VALORES DE MOVIMENTO PRÓPRIO	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	55
4.1	JANELAS DE BAIXA EXTINÇÃO ANALISADAS .....	55
4.1.1	A janela VVV WIN 1713-3939 .....	55
4.1.2	A janela VVV WIN 1607-5258 .....	59
4.1.3	A janela VVV WIN 1475-5877 .....	63
4.2	ESTRUTURAS AO LONGO DO DISCO .....	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b> .....	69
	REFERÊNCIAS .....	71



# 1 INTRODUÇÃO

O estudo das regiões mais distantes em nossa Galáxia é dificultado pela presença de gás e poeira no plano Galáctico. A poeira e o gás causam uma extinção contínua em todos os comprimentos de onda. A maior parte da energia irradiada pelas estrelas pode ser absorvida pela poeira, fazendo com que sua magnitude aparente seja menor do que seria a sua magnitude na ausência dela. Ao absorver a luz proveniente de estrelas e galáxias, a poeira transforma luz em comprimentos de onda na faixa do azul para luz em comprimentos de onda do infravermelho (Binney; Merrifield, 1998).

Ao observar outras galáxias podemos ver que geralmente as nebulosas de gás se encontram distribuídas em uma estrutura espiral. Como estamos dentro do disco Galáctico, nossa visão do formato da Galáxia não é possível, mas é razoável supor, com base nessas observações, que nossa Galáxia também possui uma estrutura em espiral (FILHO; SARAIVA, 2004).

A localização exata dos braços espirais ainda permanece incerta para grandes distâncias, sendo os modelos atuais para a posição dos braços espirais uma extrapolação das observações já existentes. O principal traçador da posição dos braços espirais são as linhas de hidrogênio neutro, observadas nos comprimentos de onda do rádio (Binney; Merrifield, 1998).

O objetivo deste trabalho é encontrar evidências da posição dos braços espirais localizados no lado mais distante da Galáxia, para isso utilizaremos as estrelas do Red Clump (RC) localizadas em áreas de baixa extinção. O RC é formado por estrelas de baixa massa no estágio de queima de hélio em seu núcleo. Por terem praticamente a mesma massa no núcleo central, a luminosidade das estrelas do RC é praticamente a mesma, sendo que na maior parte de seu período evolutivo as estrelas do RC mantém constante a sua luminosidade. Essa característica permite que as RC possam ser utilizadas como indicadores de distância.

O estudo de janelas de baixa extinção se mostra relevante para a detecção de estruturas ao longo do plano Galáctico. Para a identificação das áreas de menor extinção, utilizaremos o mapa de extinção para a região observada pelo levantamento fotométrico VISTA *Variables in the Via Láctea* (VVV). A partir da posição dos picos das distribuições de estrelas do RC, estimamos as distâncias para as sobredensidades de estrelas. Uma outra forma de validar nossos resultados será a análise de

movimento próprio das estrelas e sua velocidade tangencial comparada a um modelo de disco em rotação simples.

Este trabalho apresenta a análise da distribuição de distâncias e movimento próprio para as estrelas do RC em três diferentes janelas de baixa extinção. A dissertação está organizada da seguinte maneira: o capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica dos temas e termos utilizados no trabalho, o capítulo 3 descreve os métodos de obtenção e análise dos dados, o capítulo 4 mostra o resultado para as três janelas de baixa extinção analisadas, enquanto o capítulo 5 traz as conclusões e perspectivas futuras do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ESTRELAS GIGANTES VERMELHAS

Ao cessar a queima de hidrogênio (H) em seu núcleo a estrela deixa a sequência principal, indo em direção ao ramo das gigantes vermelhas (*red giant branch*, ou RGB). O RGB é uma região no diagrama cor-magnitude (DCM) povoada por estrelas gigantes que ainda não começaram a fundir hélio (He) em seus núcleos. Um exemplo de DCM é apresentado na Fig. 2. A fusão de H em He continua em uma camada em volta do núcleo e a energia produzida infla o envelope enquanto a estrela esfria.

A fusão no invólucro de H produz quantidades de He que migram para o núcleo degenerado da estrela, o que faz com que haja um aumento na massa e temperatura no mesmo. Ao ascender pelo RGB as estrelas ficam mais luminosas, mais frias e maiores. Durante a ascensão pelo RGB, as estrelas chegam a um ponto de sua evolução em que ocorre uma descontinuidade na abundância de H no invólucro em volta do núcleo, diminuindo a produção de energia temporariamente, tornando a subida da estrela pelo RGB mais lenta, causando um excesso de estrelas nesse ponto, conhecido como RGB *bump* (Cassisi et al., 2011).

Ao ascender pelo RGB a estrela chega a um limite para o seu diâmetro e luminosidade, no qual o núcleo atinge a temperatura necessária para iniciar a fusão do He. Todas as estrelas que chegam na ponta do RGB possuem a mesma massa no seu núcleo de He, cerca de  $0.5 M_{\odot}$  e luminosidades e temperaturas semelhantes, variando significativamente com a metalicidade da estrela.

O início da fusão de He no núcleo da estrela é conhecido como *flash de Hélio* e marca o fim de sua ascensão pelo RGB. A estrela fica menos luminosa e mais quente, migrando para o ramo horizontal (Ver Fig. 1). Como a massa do núcleo central é praticamente a mesma para todas as estrelas nessa fase de sua evolução, a luminosidade e temperatura para a maioria das estrelas à metalicidade solar também é semelhante. Nesta fase da sua evolução as estrelas se encontram no lado mais frio do ramo horizontal, formando nesta região o que chamamos de Red Clump.

O Red Clump (RC) é uma característica marcante nos diagramas cor-magnitude (DCM) de grupos de estrelas em nossa Galáxia. A Fig. 2 mostra um DCM nos filtros I e V-I utilizando dados da missão Hippar-

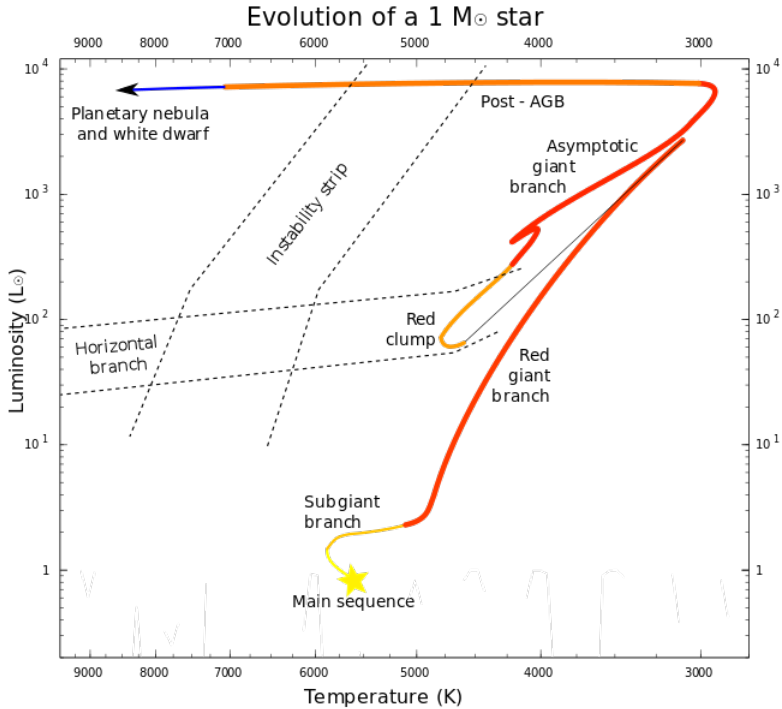


Figura 1 – Caminho evolutivo percorrido por uma estrela de  $1 M_{\odot}$ . Inicialmente ela é um estrela da sequência principal, depois de queimar todo o hidrogênio do núcleo ela entra na fase de subgigante. Após esse período a estrela entra no RGB, passando pelo RGB *bump* e chegando à ponta do RGB culminando com o *flash* de Hélio, iniciando o período em que a estrela fica na região do DCM conhecida como Red Clump (linha sólida amarela entre as linhas pontilhadas do ramo horizontal). Após essa fase a estrela continua seu processo evolutivo até se tornar uma anã branca no fim de seu processo evolutivo. Figura disponível em [https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_evolution#/media/File:Evolution-ary\\_track\\_1m.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution#/media/File:Evolution-ary_track_1m.svg).

cos. O RC se localiza na região entre as linhas pontilhadas vermelhas. A concentração de estrelas nessa região é muito maior do que as demais regiões fora da sequência principal, tornando fácil a identificação do RC em DCMs em diversas bandas de observação.

O RC é formado por estrelas de baixa massa no estágio de queima

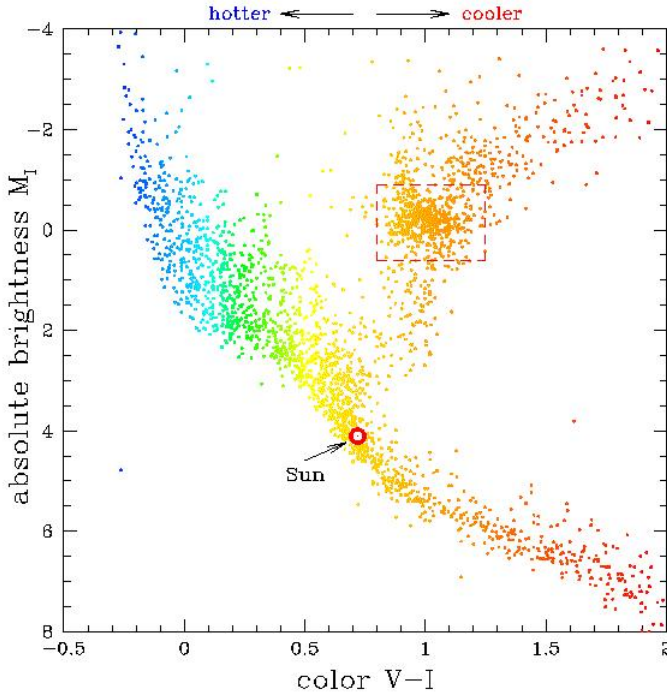


Figura 2 – Diagrama cor-magnitude construído com dados da missão Hipparcos. No eixo x temos a cor (V-I) e no eixo y a magnitude absoluta. O Red clump está localizado entre as linhas pontilhadas em vermelho. O Sol aparece em destaque no DCM. Com o auxílio do eixo superior e lateral esquerdo, nota-se que as RCs são mais brilhantes e mais frias que o Sol. Figura disponível em <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~kstanek/CfA/RedClump/>.

de He em seu núcleo. O núcleo convectivo de queima de He está rodeado por um invólucro de queima de H e por um invólucro convectivo rico em H.

A Fig. 3 mostra a evolução da luminosidade ao longo da evolução da queima de He, para uma estrela do RC de metalicidade solar e uma massa inicial de  $1.3 M_{\odot}$ . Durante todo processo de evolução a luminosidade total da estrela ( $L$ ) aumenta lentamente, sendo que a maior parte da luminosidade é fornecida pelas regiões de queima de H e He. Essa característica de luminosidade praticamente constante ao

longo de grande parte da evolução das RCs será amplamente utilizada posteriormente para determinar distâncias a grupos de RCs ao longo do disco Galáctico.

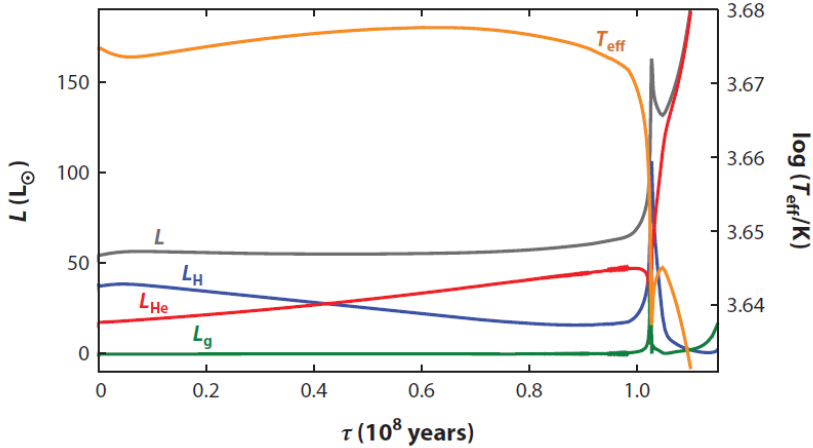


Figura 3 – Evolução da luminosidade para uma estrela RC com metalicidade solar e massa de  $1.3M_{\odot}$ . A linha em cinza representa a luminosidade total da estrela, a linha em azul representa a luminosidade proveniente do invólucro de H, a linha vermelha traz a luminosidade proveniente da queima de He no núcleo da estrela e a linha verde é a luminosidade gravitacional, proveniente da contração ou expansão da estrela. Figura retirada de Girardi (2016).

O satélite astrométrico Hipparcos (*The High Precision Parallax Collecting Satellite*) foi lançado com o objetivo de medir posições e movimento próprio (MP) de mais de 100.000 estrelas na vizinhança solar, bem como determinar as propriedades físicas das estrelas e estudar aspectos de estrutura e cinemática da Via Láctea (VL) (Perryman et al., 1997).

Com os dados de paralaxe e fotometria obtidos através do Hipparcos, criou-se um DCM com as fontes limitadas a incerteza de paralaxe menor que  $\sigma_{\pi}/\pi < 0.1$  e incerteza na magnitude absoluta  $\leq 0.22$  mag. Esse DCM (Fig. 2 foi adaptada deste DCM) mostrou que grande parte das gigantes na vizinhança solar são estrelas do RC. Das 844 estrelas gigantes mostradas no DCM, 508 estrelas são candidatas a RCs. Simulações teóricas realizadas por Girardi et al. (2005) mostram que destas 844, 390 estrelas são RCs, indicando aproximadamente metade



de todas as fontes.

Com esse grande número de estrelas do RC observadas na vizinhança solar, pressupõe-se que elas também devem ser uma parcela significativa das gigantes observadas nas demais regiões da Galáxia. Isso é mostrado em DCMs do bojo obtidos pelos levantamentos fotométricos OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*), MACHO (*Massive Compact Halo Object*) e VVV (*VISTA Variables in the Via Láctea*). Esses levantamentos fotométricos mostram um RC bem expressivo ao longo do vetor de avermelhamento.

O trabalho de Paczyński e Stanek (1998) foi um dos mais importantes para que as estrelas do RC passassem a ser conhecidas como indicadores de distância. Esse trabalho mostrou que a magnitude absoluta média das RCs na banda I é de  $M_{I_0,m} = -0.279 \pm 0.088$  mag e com uma dispersão de aproximadamente  $\sigma_{I_0,m} \sim 0.2$  mag. Notou-se também nesse trabalho que a magnitude absoluta média das RCs praticamente independe da cor  $V - I$ . Com a utilização da magnitude absoluta para as RCs neste trabalho obteve-se a distância ao centro Galáctico de  $R_0 = 8.4 \pm 0.4$  kpc.

DCMs no infravermelho (IR) próximo mostram padrões de duplos RCs em inúmeras linhas de visada (Minniti et al. (2018) e Kammers et al. (2018) submetido). A presença de duplos RCs é interpretada em DCMs como populações de RCs localizadas a diferentes distâncias. Saito et al. (2011) e Gonzalez et al. (2018) com a utilização de RCs do levantamento VVV, mostraram a forma em X do bojo e uma estrutura de braço espiral atrás do centro Galáctico.

### 2.1.1 Estrelas gigantes vermelhas como indicadores de distância

O trabalho de Cannon (1970) foi o primeiro a identificar as estrelas do RC como um recurso real no DCM e que elas poderiam ser utilizadas para fornecer distâncias e avermelhamento para aglomerados que tivessem uma grande fração de RCs. Inicialmente criou-se uma função de luminosidade para todas as estrelas com erros de paralaxe menores que 10 %, depois ajustaram uma função da forma

$$N(\lambda) = a + bM_\lambda + cM_{\lambda^2} + d \exp \frac{[-(M_\lambda^{RC} - M_\lambda)^2]}{2\sigma_\lambda^2} \quad (2.1)$$

onde  $\lambda$  indica a banda de observação, o termo de segunda ordem é substituído por leis de extinção e o último termo representa a distribuição

Tabela 1 – Valores de magnitude absoluta das estrelas do RC para algumas bandas de observação.

$\lambda$	$M_{\lambda}^{RC}$	Referência
I	$-0.22 \pm 0.03$	Groenewegen (2008)
I	$-0.24 \pm 0.01$	Francis & Anderson (2014)
K	$-1.57 \pm 0.03$	Alves et al. (2002)
K	$-1.613 \pm 0.01$	Laney et al. (2012)
J	$-0.984 \pm 0.014$	Laney et al. (2012)
H	$-1.490 \pm 0.015$	Laney et al. (2012)
J	$-0.945 \pm 0.010$	Ruiz-Dern et al. (2018)
$K_s$	$-1.606 \pm 0.009$	Ruiz-Dern et al. (2018)

de RCs como uma gaussiana de média  $M_{\lambda}^{RC}$  e largura  $\sigma_{\lambda}$ .

A tabela 1, adaptada de Girardi (2016) mostra os valores de magnitude absoluta das RCs para algumas bandas de observação.

Recentemente Ruiz-Dern et al. (2018) com a utilização do Gaia Data Release 1 calibraram as magnitudes absolutas das RCs na vizinhança solar. Este trabalho forneceu as magnitudes absolutas para 17 bandas de observação. Após selecionar as fontes candidatas a estrelas do RC com paralaxe e fotometria confiáveis, um total de 2482 candidatas a RCs foram utilizadas para a realização da calibração da magnitude absoluta na banda  $K_s$  e 2098 fontes para a banda J. Os valores obtidos se encontram na Tabela 1.

## 2.2 EXTINÇÃO INTERESTELAR

O espaço entre as estrelas não é absolutamente vazio, sendo poluído por um gás rarefeito e excessivamente sujo. Se esse gás fosse comprimido até a densidade do ar da atmosfera terrestre, a densidade desse gás seria tão grande que os objetos desapareceriam na neblina a uma distância de menos de um metro.

Esse gás é tão sujo porque as estrelas expõem partículas de seu interior e ao se afastarem da superfície brilhante da estrela essas partículas condensam. Algumas dessas partículas se reunirão mais tarde para formar cometas, asteroides e planetas, mas a grande maioria fica no espaço interestelar obscurecendo a visão (Binney; Merrifield, 1998).

Trumpler (1930) ao estudar uma amostra de aglomerados abertos

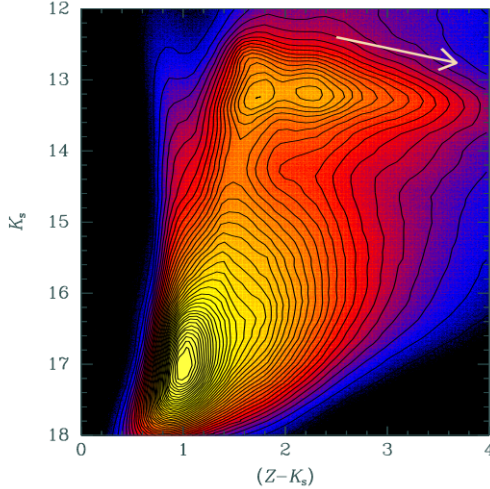


Figura 4 –  $K_s$  vs  $Z - K_s$  DCM de mais de 66 milhões de estrelas do Bojo Galáctico. O vetor de avermelhamento está associado a uma extinção de  $E(B - V) = 1$ , com base nas extinções relativas dos filtros VISTA, e assumindo a lei de extinção de Cardelli, Clayton e Mathis (1989). O RC se localiza nas proximidades de  $K_s = 13.2$  mag e  $(Z - K_s) = 1.7$  mag. Figura original disponível em Saito et al. (2012b).

notou que a poeira nos impede de ver claramente a Galáxia. O fato de se perceber que a poeira não apenas obscurece a luz de estrelas distantes, mas também a torna mais avermelhada foi um dos grandes marcos da astronomia.

O gás e a poeira presentes no plano da Galáxia causam uma extinção contínua em todos os comprimentos de onda. A extinção é maior quanto maior for a quantidade de gás e poeira que a luz precisa atravessar. Portanto, estrelas localizadas a grandes distâncias têm sua luz mais absorvida até chegar aos nossos detectores, fazendo com que sua magnitude aparente seja menor do que seria sem a presença de gás e poeira em nossa linha de visada.

Ao absorver a luz proveniente de estrelas e galáxias, a poeira transforma luz de comprimentos de onda na faixa do azul para luz em comprimentos de onda no infravermelho. A maior parte da energia irradiada pelas estrelas emerge em comprimentos de onda que podem ser absorvidos pelos grãos de poeira e, além disso, estrelas jovens e luminosas geralmente vivem suas vidas em regiões ricas em poeira.

Por isso, uma fração significativa da energia irradiada pelas estrelas da Galáxia é absorvida pelos grãos de poeira (Binney; Merrifield, 1998).

Partículas de poeira com diâmetro entre 0.1 e 1.0  $\mu\text{m}$  são pequenas o suficiente para espalharem a luz de menor comprimento de onda (faixa do azul) de forma mais eficiente que a luz de maior comprimento de onda (faixa do vermelho). Fótons de luz azul são 10 vezes mais espalhados que os fótons de luz vermelha. Esse espalhamento ocorre em direções aleatórias, fazendo com que menos fótons azuis cheguem a nossos detectores, tornando as estrelas mais vermelhas do que realmente são (FILHO; SARAIVA, 2004).

A combinação da extinção interestelar e do avermelhamento é marcado em DCMs como o vetor de avermelhamento, que indica a direção da extinção. Enquanto a extinção deixa as estrelas menos brilhantes, o avermelhamento as torna mais vermelhas. A Fig. 4 mostra um exemplo do vetor de avermelhamento. Podemos perceber que as RCs estão alongadas ao longo deste vetor (seta em branco) indicando que estas estrelas se encontram em uma região de grande avermelhamento, a inclinação do vetor de avermelhamento está diretamente ligada à lei de extinção utilizada.

## 2.3 COMPONENTES DA VIA LÁCTEA

Até o início do século XX pouco se sabia sobre a estrutura e os componentes da Via Láctea, sua forma e o lugar que ocupávamos em nossa Galáxia ainda era um mistério. Entre os anos de 1914 e 1919, Harlow ao estudar a distribuição de aglomerados globulares deu forma geral a nossa Galáxia, incluindo a posição que nosso próprio sistema ocupa. Alguns anos depois, Jan Oort (1928) determinou a rotação diferencial das estrelas na vizinhança solar, dando ainda mais contornos da estrutura e cinemática da região em que vivemos.

Nossa Galáxia pode ser dividida em três componentes principais: o halo, o bojo e o disco. A Fig. 5 traz uma representação artística dos componentes da nossa Galáxia. A seguir discutiremos algumas características do halo, do bojo e do disco.

### 2.3.1 Halo e Bojo

O halo estelar é o terceiro componente mais luminoso da Galáxia, sendo composto por aglomerados globulares e estrelas de campo. Zinn

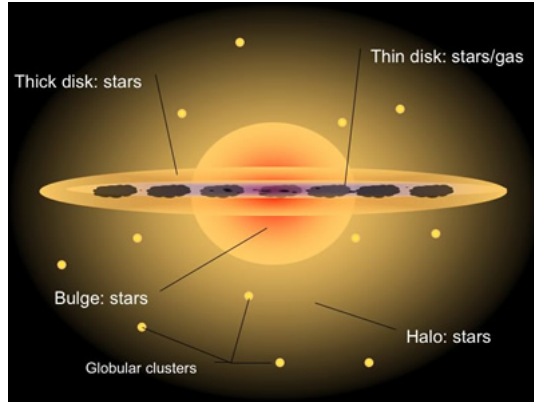


Figura 5 – Ilustração dos componentes de uma galáxia espiral típica. Podemos perceber que a galáxia se divide no bojo, no halo e no disco. No halo se localizam as aglomerados globulares, enquanto o disco ainda pode ser dividido em disco grosso e fino. Ilustração retirada do site: <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/h/halo>

(1985) ao estudar a distribuição espacial, cinemática e metalicidade de 121 aglomerados globulares encontrou evidências de diferentes subpopulações no sistema de aglomerados. Inicialmente acreditava-se que todos os aglomerados globulares faziam parte do halo, contudo após esse estudo percebeu-se a existência de duas populações de aglomerados globulares. Os aglomerados mais velhos, pobres em metais, com metalicidade  $[Fe/H] < -0.8$  fazem parte do halo esférico. Esses aglomerados possuem distribuição esférica em relação ao centro Galáctico, uma velocidade rotacional pequena ( $50 \pm 23 \text{ km s}^{-1}$ ) e dispersão de velocidade alta ( $\sigma = 114 \text{ km s}^{-1}$ ). Já os aglomerados mais jovens, um pouco mais ricos em metais, possuem metalicidade de  $[Fe/H] \geq -0.8$ , velocidade rotacional alta ( $152 \pm 29 \text{ km s}^{-1}$ ) e menor dispersão de velocidade ( $\sigma = 71 \text{ km s}^{-1}$ ). Sendo que a distribuição espacial é altamente achatada, estando estes aglomerados localizados no disco grosso (espesso). Já as estrelas de campo do halo possuem alta velocidade quando comparadas às estrelas do disco e um intervalo de metalicidade bem estabelecido ( $-2.2 < [Fe/H] < -0.8$ ) (Prantzos, 2008).

Para Gonzalez e Gadotti (2016) a definição básica de um bojo galáctico é a de uma sobredensidade que incha do plano do disco. Esta ideia baseia-se nas observações de outras galáxias que possuem disco, o que nos permite compará-las com a nossa Galáxia de uma forma

puramente morfológica. A distribuição de metalicidade no bojo é larga, com intervalo entre  $-1.25 < [Fe/H] < 0.5$ , com média de  $[Fe/H] = -0.25$ . Este valor é semelhante ao valor da metalicidade das estrelas gigantes K da vizinhança solar, sendo consideravelmente maior que os valores médios de metalicidade para qualquer aglomerado globular do halo ou do disco (Binney; Merrifield, 1998).

Segundo Junqueira e Lépine (2013) a distribuição de densidades tanto do bojo quanto do halo é concentrada em torno do centro, caindo rapidamente para regiões mais distantes. Os limites de distância destes dois componentes não são claros, mas análises espectroscópicas revelam um gradiente de metalicidade entre os dois, o que sugere a distinção entre o halo, que se estende além de 20 kpc, e o bojo, que possui um raio de aproximadamente 1.5 kpc.

### 2.3.2 Disco

O disco Galáctico é caracterizado por uma estrutura altamente achatada, que possui uma escala de comprimento exponencial de 2.5 a 3.0 kpc e escala de altura de aproximadamente 0.3 kpc (por exemplo, (López-Corredoira et al., 2002) e (Kent; Dame; Fazio, 1991)). O disco é basicamente constituído por gás, poeira e estrelas. O disco gira mais rápido que o halo, contudo possui dispersão de velocidades menor. O disco é considerado cinematicamente frio, pois a dispersão de velocidade estelar na vizinhança solar é de aproximadamente  $25 \text{ km s}^{-1}$ , enquanto a velocidade circular em torno do centro Galáctico é de aproximadamente  $220 \text{ km s}^{-1}$  (Rix; Bovy, 2013).

Embora seja difícil estimar com certeza os parâmetros do disco da Galáxia, estimativas indicam que o disco possui massa de  $5 \times 10^{10} M_{\odot}$ . Não há no momento boas estimativas para a metalicidade do disco em uma média global, contudo a metalicidade solar parece ser a mais provável (Rix; Bovy, 2013).

Na região do disco predominam as estrelas de população I, que geralmente são mais jovens. Para Spinrad (2005) a população estelar do disco pode ser dividida em três grupos. O primeiro é caracterizado por estrelas jovens localizadas nos braços espirais, o segundo é composto por estrelas espalhadas para fora dos braços espirais, essas estrelas são mais antigas que as estrelas do primeiro grupo, por fim, o terceiro grupo é formado por estrelas antigas e dispersas, que se afastaram do plano Galáctico devido à interação com grandes nuvens moleculares, esse grupo de estrelas se localiza no disco grosso.

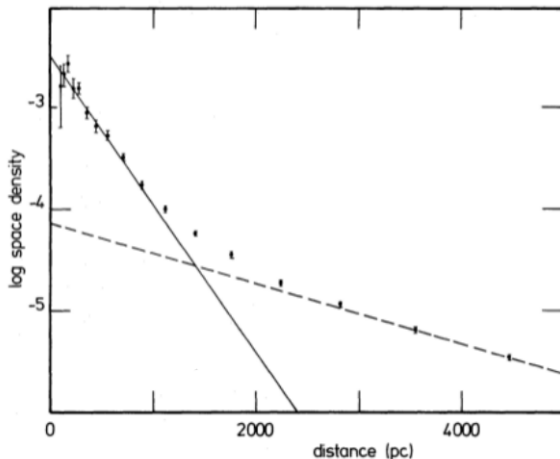


Figura 6 – Densidade de estrelas versus distância ao plano Galáctico. A linha sólida representa o ajuste realizado para o disco fino, já a linha tracejada representa o ajuste para o disco grosso. Figura original disponível em Gilmore e Reid (1983).

A dualidade do disco da Via Láctea foi proposta por Gilmore e Reid (1983). Ao estudar a densidade de estrelas em direção ao polo sul Galáctico, encontraram uma lei de densidade derivada da função de luminosidade de estrelas mais fracas que  $M_V = 4$  mag, que segue uma exponencial com escala de altura de aproximadamente 300 pc abaixo de 1000 pc do plano do disco e uma segunda exponencial com escala de altura de 1450 pc para distâncias acima de 1000 pc. A Fig. 6 mostra a contagens de estrelas pela distância ao plano Galáctico, sendo a primeira estrutura chamada de disco fino (linha sólida) e a segunda de disco grosso (linha tracejada).

## 2.4 TEORIA DOS BRAÇOS ESPIRAIS

Ao observarmos as demais galáxias, vemos que geralmente as nebulosas de gás se encontram distribuídas em uma estrutura espiral. Parece então razoável supor que nossa Galáxia também tem uma estrutura espiral, mas fica muito difícil para vê-la, pois estamos dentro do próprio disco Galáctico e cercados de poeira interestelar, que bloqueia a luz (FILHO; SARAIVA, 2004).

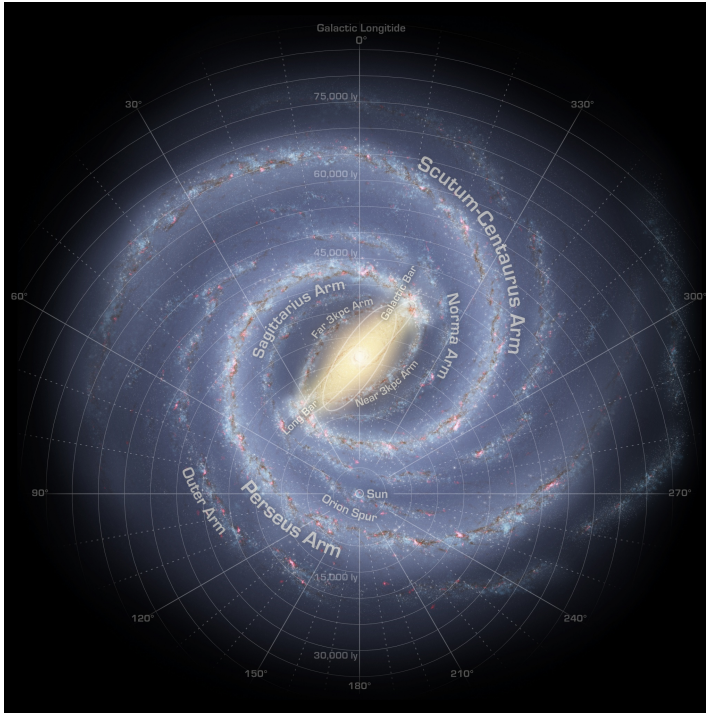


Figura 7 – Representação artística da nossa Galáxia vista por um observador externo. Figura adaptada de Churchwell et al. (2009).

Ao se observar estrelas brilhantes (O e B), regiões de HII e estrelas variáveis do tipo cefeidas, podemos ter algumas evidência da posição dos braços espirais. Contudo, por causa da poeira, o principal traçador da posição dos braços espirais são as linhas de 21 cm do hidrogênio neutro, observadas nos comprimentos de onda do rádio. Esta linha é observada em todas as direções da nossa Galáxia (Binney; Merrifield, 1998).

Churchwell et al. (2009) com a utilização de dados do rádio telescópio de 1,2 m de diâmetro do Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics e os dados no infravermelho obtidos pelo Spitzer, construíram a representação artística “face-on” mais aceita e utilizada atualmente para nossa Galáxia. Esta representação artística é mostrada na Fig. 7.

Para um observador externo nossa Galáxia parece ser uma galáxia



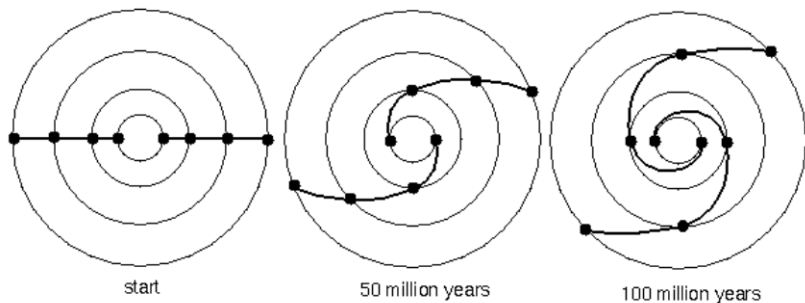


Figura 8 – A rotação diferencial pode criar um padrão espiral no disco em um curto espaço de tempo. Para intervalos de tempo de bilhões de anos esperar-se-ia que os braços estivessem mais espiralados do que as observações nos indicam. Figura obtida em <http://www.astronomynotes.com/ismnotes/diffspin.gif>

espiral barrada com os braços de Scutum-Centauro e Perseu sendo considerados braços principais, enquanto os braços de Sagitário e o Externo são considerados braços secundários. Contudo o número de braços principais ainda segue um mistério, sendo que alguns trabalhos consideram que a VL possui 4 braços espirais principais (por exemplo Vallée (2008) e Reid et al. (2009)) enquanto Reid et al. (2016) consideram a presença de 5 braços principais. Essa é uma questão amplamente discutida nos trabalhos de mapeamento de estruturas ao longo do disco.

Ao longo do século XX, várias teorias foram propostas para explicar a presença de braços espirais em galáxias. Inicialmente acreditava-se que os braços espirais eram constituídos de matéria e seriam formados pela rotação diferencial, onde as estrelas mais próximas ao centro Galáctico teriam velocidade de rotação maiores que as estrelas mais distantes. Contudo, observações indicam que a VL deve ter aproximadamente 12 bilhões de anos, sendo que neste intervalo de tempo o Sol já teria completado cerca de 50 voltas em torno do centro da Galáxia. Após essas rotações esperar-se-ia que os braços estivessem mais espiralados do que as observações indicam (FILHO; SARAIVA, 2004).

A Fig. 8 mostra um exemplo de como seriam os braços espirais levando-se em consideração a rotação diferencial. Para pequenos intervalos de tempo a rotação diferencial cria um padrão de braços espirais, contudo para intervalos de tempo maiores (como a idade estimada da VL) deveríamos ter braços espirais mais enrolados, tornando esta teoria insuficiente para explicar a origem dos braços espirais em galáxias.

Durantes os anos de 1960, Chia-Chiao Lin e Frank Hsia-San Shu desenvolveram a teoria mais aceita atualmente para as estruturas espirais em galáxias. A teoria de ondas de densidade quase-estacionárias prevê que os braços espirais são formados por pequenas variações de densidade no disco que se propagam com velocidade angular constante. Com isso na parte mais próxima ao centro da galáxia as estrelas e o meio interestelar possuem velocidade maior que a onda, sendo que estes passam pela onda de densidade. Já na parte mais externa do disco a onda de densidade possui velocidade maior que as estrelas e o meio interestelar, sendo que nesse ponto a onda de densidade passa por ambos.

Segundo Filho e Saraiva (2004) quando o gás passa pela onda, ele é comprimido fortemente até que a gravitação interna cause o colapso e a formação de estrelas, sendo que o mesmo acontece quando a onda de densidade passa pelo gás. Com essa teoria se explica porque estrelas jovens, nuvens moleculares e regiões HII são encontradas nos braços espirais.

Apesar de ser amplamente aceita, essa teoria não explica o surgimento das ondas de densidade e nem tão pouco o que as mantém, pois as ondas de densidade dissipam energia e para serem quase-estacionárias é preciso haver uma fonte de energia. As principais teorias para o surgimento das ondas de densidade dizem respeito a efeitos gravitacionais das galáxias satélites da VL, a assimetrias no disco geradas no processo de formação da Galáxia ou ainda a processos internos, como a presença de uma estrutura com formato de barra, que é observada em grande parte das galáxias espirais.

### 3 OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

#### 3.1 VVV SURVEY

O VISTA *Variables in the Via Láctea (VVV) survey* é um levantamento fotométrico do ESO (*European Southern Observatory*) que observa nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. As observações estão centradas no bojo e no disco sul da VL, onde existe alta atividade de formação estelar (Minniti et al., 2010).

Recentemente o VVV completou o mapeamento da área de 562 graus quadrados, fornecendo o mais profundo e amplo conjunto de dados de resolução espacial no infravermelho próximo para o estudo da VL (Alonso-García et al., 2018).

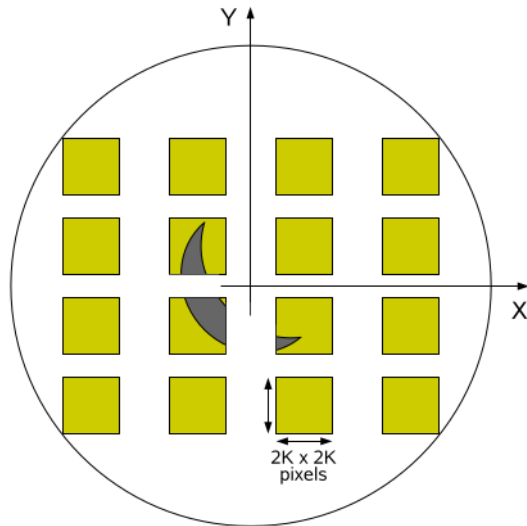


Figura 9 – Diagrama mostrando a posição dos 16 detectores na câmera VISTA e a orientação do eixo utilizado para deslocar a câmera em cada exposição. Para comparação, a figura mostra a lua crescente sobre os detectores da câmera. Figura retirada de Minniti et al. (2010).

O VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) é um telescópio de 4 metros, localizado no Observatório do Cerro Para-

nal, Chile. O VISTA possui uma óptica de Ritchey-Chrétien, com um espelho primário projetado em conjunto com a instrumentação de foco Cassegrain, possibilitando a combinação de um campo amplo com boa qualidade de imagem.

O VISTA está equipado com a VIRCAM (*VISTA InfraRed CA-Mera*), que é uma câmera de 67 milhões de pixels, distribuídos em um conjunto de 16 detectores com  $2048 \times 2048$  pixels. Os pixels possuem tamanho de  $0.34''$ , sendo os 16 detectores organizados de acordo com a Fig. 9. Cada exposição produz uma imagem do céu que cobre uma área de  $0.599$  graus quadrados, a essas imagens dá-se o nome de *pawprint* (Minniti et al., 2010).

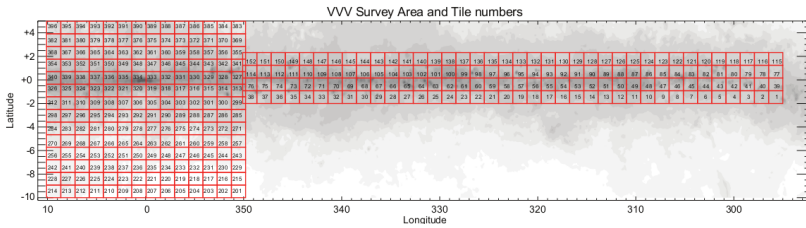


Figura 10 – Área observada pelo VVV survey, demarcando os *tiles* individualmente observados. Os *tiles* numerados de 1 a 152 estão localizados no disco Galáctico, já os *tiles* de 201 a 396 estão localizados no bojo. Os eixos x e y representam respectivamente a longitude e a latitude galácticas. Os *tiles* estão plotados sobre um mapa de extinção. Figura original disponível em Saito et al. (2012a).

Podemos observar na Fig. 9 que existem lacunas entre os detectores. Para preencher as lacunas entre os detectores o número mínimo de observações é seis. A imagem resultante após as observações de seis *pawprints* possui área que cobre  $1.64$  graus quadrados, o que corresponde a um *tile*. A Fig 10 mostra a área observada pelo VVV separada em *tiles* individuais.

A VIRCAM está equipada com cinco filtros de banda larga, cobrindo comprimentos de onda de  $0.84$  a  $2.5 \mu\text{m}$ . A Tabela 2 mostra os comprimentos de onda efetivos para o conjunto dos filtros utilizados nas observações do VVV. A Fig. 11 mostra as curvas de transmissão para os filtros utilizados no VVV em comparação a uma curva de transmissão atmosférica típica.

As observações do VVV se dividem em duas áreas, o bojo e o disco sul. As observações contém  $348$  *tiles*, sendo que destes  $196$  estão localizados no bojo e  $152$  no disco (Ver Fig. 10). O VVV cobre uma

Tabela 2 – Comprimentos de onda efetivos para o conjunto de filtros VISTA usado nas observações do VVV. Tabela original disponível em (Saito et al., 2012a)

Filtro	$\lambda_{eff}$ $\mu\text{m}$
Z	0.878
Y	1.021
J	1.254
H	1.646
$K_s$	2.149

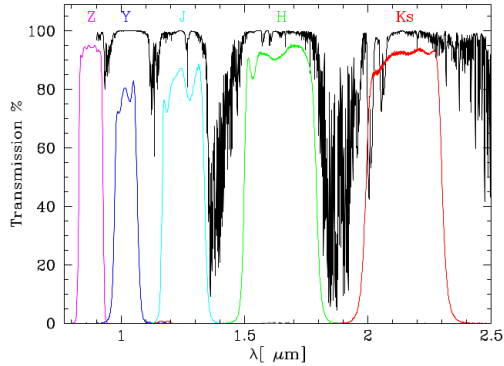


Figura 11 – Curvas de transmissão dos filtros Z, Y, J, H e  $K_s$  comparados com uma curva típica de transmissão atmosférica com massa de ar de 1.0 e 1.0 mm de vapor de água.

área total de 562 graus quadrados entre as coordenadas  $-10 \leq l \leq 10.4$  deg e  $-10.3 \leq b \leq 5.1$  deg no bojo e  $294.7 \leq l \leq 350$  deg e  $-2.25 \leq b \leq 2.25$  deg no disco (Saito et al., 2012a).

### 3.1.1 Redução dos dados

O catálogo fotométrico do VVV com base em fotometria de abertura foi produzido pelo CASU (*Cambridge Astronomical Survey Unit*). No entanto a fotometria de abertura não é a mais adequada para o estudo de regiões onde a densidade de estrelas é muito grande, como por exemplo, a região do centro Galáctico e algumas regiões do disco.

Segundo Alonso-García et al. (2018) a fotometria da função de ponto de dispersão (PSF) pode fornecer uma imagem muito mais completa nas regiões mais populosas observadas pelo VVV. As regiões menos populosas do VVV podem também se beneficiar do uso da fotometria PSF, aumentando o número de fontes detectadas que melhoram a análise e interpretação dos dados.

Portanto, utilizamos os catálogos de fotometria PSF para a realização de nosso estudo sobre estrutura Galáctica.

A fotometria PSF, como também a fotometria de abertura, utilizam as combinações de *pawprints* fornecidas pelo CASU, pois elas são menos ruidosas que uma única imagem de um *pawprint*.

Ao final do processo de redução das imagens foram fornecidas a fotometria PSF para 846 milhões de fontes nos catálogos do VVV, disponíveis no VSA (*VISTA Science Archive*). São 570 milhões de fontes para a área do bojo e 276 milhões de fontes na área do disco. Para uma descrição completa do processo de obtenção da fotometria PSF ver Alonso-García et al. (2018).

### 3.1.2 VIRAC

O VVV *Infrared Astrometric Catalogue* (VIRAC) é o catálogo astrométrico das fontes do VVV, contendo o movimento próprio (MP) relativo de mais de 300 milhões de fontes localizadas na área de observação do VVV. O VIRAC possui mais de 119 milhões de medidas de MP de alta qualidade, sendo que destes, 47 milhões possuem incertezas estatísticas menores que  $1 \text{ mas yr}^{-1}$ .

Os dados do VVV nas bandas Z, Y, J e H foram observados em duas épocas, uma no início e outra no final do *survey*. Já os dados na banda  $K_s$  possuem de 50 a 100 épocas compreendidas entre os anos de 2010 a 2015.

Com a utilização dos catálogos de MP do VIRAC, Smith et al. (2018) ao analisarem a dispersão dos MP dos membros do aglomerado NGC 6231, demonstraram que as incertezas caracterizam bem os verdadeiros erros estatísticos, também apresentaram 18 novos candidatos a anãs L e um valioso estudo sobre suas abundâncias químicas.

Os dados astrométricos do VIRAC são úteis para objetos localizados a grandes distâncias na Galáxia, como é demonstrado na curva de rotação Galáctica para  $l = 300 \text{ deg}$  (Ver Fig. 21 em Smith et al. (2018)). Contudo uma segunda versão do VIRAC está em desenvolvimento, no qual serão apresentados os MP absolutos para as fontes VVV, tendo

como base a correção de MP relativos para absolutos fornecidos pelo segundo *Data Release* da missão astrométrica Gaia.

O VIRAC continuará tendo importância científica após a publicação dos dados do Gaia, pois a alta extinção no plano Galáctico acaba limitando as observações do Gaia para grandes distâncias (Smith et al., 2018). Por ser um levantamento fotométrico no óptico o Gaia é altamente afetado pela extinção, sendo as fontes do Gaia limitadas para grandes distâncias.

### 3.2 JANELAS DE BAIXA EXTINÇÃO NO DISCO GALÁCTICO

Um dos maiores obstáculos para o estudo de estruturas e populações estelares localizadas a grandes distâncias em nossa Galáxia é a extinção interestelar ao longo do plano Galáctico (Seção 2.2). Uma das maneiras de minimizar esse problema é realizar estudos em regiões de baixa extinção, como por exemplo a janela de Baade (Baade; Gaposchkin, 1963). A janela de Baade está localizada no bojo Galáctico nas coordenadas  $(l, b) = (+1, -4)$  deg. A janela de Baade foi amplamente estudada em diversos trabalhos de populações estelares no bojo, entre eles podemos citar os trabalhos de Paczynski et al. (1994) e McWilliam e Rich (1994).

Paczynski et al. (1994) ao analisar o DCM de aproximadamente  $3 \times 10^5$  estrelas na direção da janela de Baade, obtidas através do levantamento fotométrico OGLE, encontraram o primeiro indício observacional direto de uma grande concentração de estrelas antigas no disco Galáctico. Essas observações também mostraram que o número de estrelas observadas entre uma distância de 0 a 2.5 kpc é superior ao número esperado por um fator 2 e que após 2.5 kpc o número de estrelas cai por um fator de 10. O resultado se mostra intrigante, devido ao fato de que nesta distância se encontra o braço espiral de Sagitário, sendo que a concentração de estrelas em um braço espiral deveria ser de estrelas jovens. Já McWilliam e Rich (1994) analisaram o espectro de 12 estrelas gigantes do subtipo K na janela de Baade, sendo esta a primeira análise detalhada deste tipo de estrelas na janela de Baade.

A análise de janelas de baixa extinção se mostra importante para o estudo de estruturas ao longo do disco Galáctico, para tanto, realizaremos uma busca pelas regiões de menor extinção no disco, dentro de uma área observada pelo VVV. Na busca por janelas de baixa extinção ao longo do disco Galáctico utilizamos o mapa de extinção  $E(J - K_s)$  presente em Minniti et al. (2018). Este mapa foi construído com base

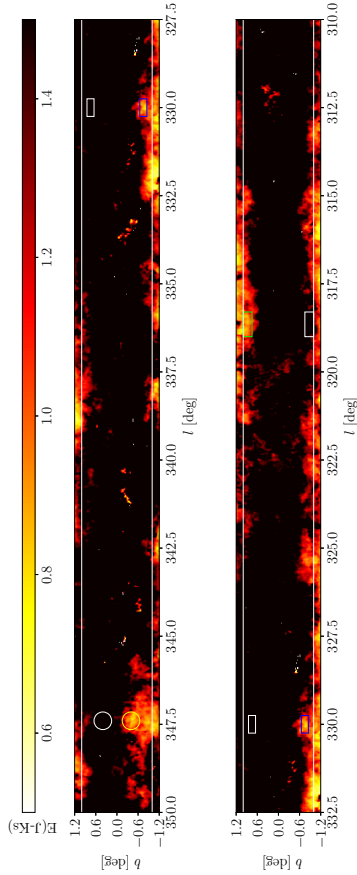


Figura 12 – Mapa de extinção para a região sul do disco Galáctico. O mapa de extinção mostra regiões com  $E(J - K_s) \leq 1.5$  mag. As linhas horizontais em branco demarcam a região analisada entre  $|b| \leq 1$  deg. As janelas de baixa extinção são mostradas em retângulos e círculos de diversas cores, que também representam sua forma real. As janelas brancas mostram campos simétricos às janelas de baixa extinção. Esses campos são usados como controle para comparação com as regiões de baixa extinção. No eixo x e y temos respectivamente a latitude e a longitude galáctica.

em medições da cor média ( $J - K_s$ ) das RC obtidas pelo levantamento



VVV. A área do disco foi dividida em subcampos e para determinar o avermelhamento para cada um desses campos realizou-se uma comparação entre a cor do RC medido e a cor do RC medido na janela de Baade, para as quais se adotou  $E(B - V) = 0.55$ . Esse processo permite a construção de um mapa sensível a variações em pequena escala, minimizando os problemas decorrentes da extinção diferencial (Gonzalez et al., 2012).

A partir desse mapa de extinção para a região do disco realizamos um corte em  $|b| \leq 1$  deg, pois a distâncias da ordem de 15 kpc poderíamos estar observando estrelas que já não fazem mais parte do disco, devido à projeção vertical em nossa linha de visada. A escala de altura do disco grosso é da ordem de 1.45 kpc (Gilmore; Reid, 1983), e para uma distância de 15 kpc com  $|b| = 1$  deg a projeção vertical máxima é de aproximadamente 260 pc estando as estrelas observadas ainda dentro do disco.

Nossa busca por janelas de baixa extinção se dá entre as longitudes de  $350 \leq l \leq 310$  deg. Para facilitar a visualização das áreas de menor extinção aplicamos uma máscara nas regiões com  $E(J - K_s) \geq 1.50$  mag. O mapa de extinção resultante é mostrado na Fig. 12. Ao analisar a área entre as linhas horizontais brancas (que restringem nossa latitude entre  $-1 \leq b \leq 1$  deg) observamos a presença de algumas regiões de baixa extinção com tamanho significativo para a realização de análises mais aprofundadas.

Dentre essas regiões mais propícias à realização de estudos, escolhemos as 3 regiões de maior área e menor extinção. Essas regiões escolhidas estão destacadas na Fig. 12, bem como os seus respectivos campos de controle, simétricos em longitude.

O campo de controle é uma região simétrica em latitude e de mesma longitude que a janela de baixa extinção. O campo de controle é selecionado para a realização de comparações entre os DCM e as distribuições em módulo de distância para cada janela de baixa extinção analisada. Na ausência de *warping* (o empenamento do disco galáctico) e *flaring* (uma escala/dispersão vertical maior do disco a grandes distâncias) não deveríamos perceber grandes diferenças entre ambos os campos analisados, já que eles se encontram um pouco acima ou abaixo do plano galáctico, possuindo a mesma latitude. Então, diferenças nos dois campos devem ser interpretadas como resultado de diferentes níveis de extinção ao longo de cada linha de visada.

### 3.3 ESTIMATIVAS DE DISTÂNCIA

Como as estrelas do RC possuem magnitude absoluta bem definidas estas podem ser utilizadas como indicadores de distância, conhecendo a extinção e a magnitude aparente podemos determinar a que distância essas estrelas se encontram de nós. Segundo Minniti et al. (2011) para a fotometria  $K_s$  o módulo de distância para uma RC no disco pode ser dada por

$$\mu = K_s - \frac{A_{K_s}}{A_J - A_{K_s}} [(J - K_s) - (J - K_s)_0] - M_{K_s}, \quad (3.1)$$

onde adotamos os valores de  $\frac{A_{K_s}}{A_J - A_{K_s}} = 0.484 \pm 0.040$ ,  $(J - K_s)_0 = 0.60 \pm 0.01$  mag e  $M_{K_s} = -1.58 \pm 0.03$  mag (Minniti et al., 2018).  $K_s$  e  $(J - K_s)$  representam a magnitude aparente na banda  $K_s$  e a cor nas bandas  $(J - K_s)$  de nossos dados.

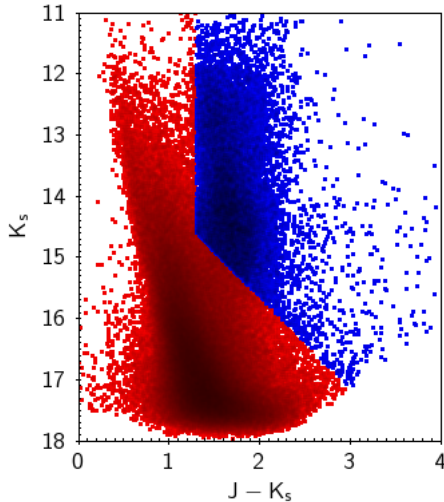


Figura 13 – DCM de  $K_s$  por  $J - K_s$  da janela VVV WIN 1475-5877. Em azul se destaca a região do DCM utilizada para a obtenção dos valores de módulo de distância.

Como discutido na seção 2.1, há uma dependência dos valores listados acima com a metalicidade, contudo esses valores devem ser desprezíveis nesse estudo, porque estamos observando populações este-

lar do disco da VL que devem possuir metalicidades semelhante às da vizinhança solar, onde o Hipparcos calibrou as distâncias para as RCs.

Com a utilização desses valores a equação para o módulo de distância passa a ser dada por

$$\mu = K_s - 0.484(J - K_s) + 1.870 \quad (3.2)$$

com a subseqüente transformação em distância dada pela equação

$$\mu = 5 - 5 \log d(pc). \quad (3.3)$$

Para os cálculos do valor do módulo de distância e posterior transformação em distância, realizamos um corte no DCM para a seleção da região do RC (ver Fig. 13). Saito et al. (2012b) com a utilização de modelos de síntese de populações estelares, caracterizaram os dados de uma região do bojo Galáctico, sendo que os modelos ajustam bem as fontes observadas pelo VVV. Nesse exercício fizemos um corte em cor e magnitude e selecionamos as fontes que pertencem ao RC. Após a seleção das fontes, aplicamos os procedimentos mencionados acima e obtivemos os valores de módulo de distância, utilizados para identificar a posição das sobredensidades de RCs.

### 3.4 OBTENÇÃO DOS VALORES DE MOVIMENTO PRÓPRIO

Nossa suposição inicial é que a presença de sobredensidades no RC dos DCMs indicam a presença de estruturas em uma mesma linha de visada, a diferentes distâncias ao longo do disco Galáctico (Saito et al., 2011; Minniti et al., 2011, 2018), embora alguns trabalhos considerem que esse duplo pico não é composto por estrelas do RC, mas sim por estrelas RGB *bump* (Nataf et al., 2011).

Por exemplo, padrões de duplo pico são observados em diferentes linhas de visada. A Fig. 14 mostra um DCM de  $K_s$  por  $J - K_s$  contendo apenas a região das gigantes para um campo localizado em  $(l, b) = (0.0, -7.0)$  deg. Podemos observar através das linhas de densidade que existem duas sobredensidades de estrelas próximas a  $K_s = 12.80$  mag e  $(J - K_s) = 0.85$  mag para o primeiro RC e  $K_s = 13.15$  mag e  $(J - K_s) = 0.85$  mag para o segundo RC. Estudos indicam que essas sobredensidades estelares são constituídas por estrelas do RC localizadas a diferentes distâncias (Saito et al., 2011).

Para comprovar nossa hipótese realizaremos a análise do MP das diferentes distribuições de RCs, as estrelas mais distantes devem

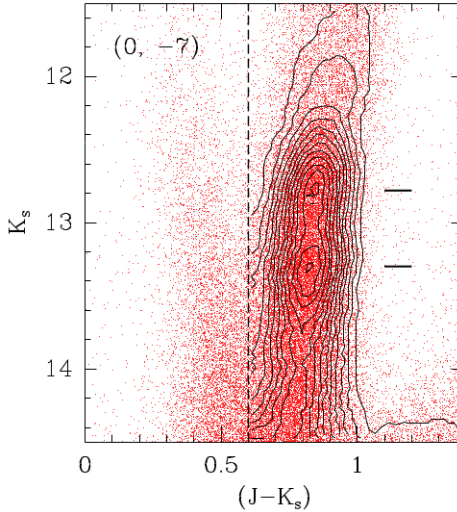


Figura 14 – DCM de  $K_s$  por  $J - K_s$  para um campo localizado em  $(l, b) = (0.0, -7.0)$  deg. Curvas de densidade ajudam a identificar a presença de um duplo pico na região das gigantes vermelhas. Podemos perceber o primeiro RC em  $K_s = 12.80$  mag e  $(J - K_s) = 0.85$  mag e o segundo RC em  $K_s = 13.15$  mag e  $(J - K_s) = 0.85$ . Figura original disponível em Saito et al. (2011).

ter MP menores dos que as estrelas mais próximas, o mesmo vale para as distribuições de RCs, quanto mais distante estão as RCs, menor deve ser seu MP comparado ao de uma distribuição mais próxima. Depois da conversão de MP para velocidade em longitude (tangencial) comparamos as mesmas com um modelo de disco em rotação simples. Então através da análise do MP das RCs poderemos comprovar se o duplo pico é formado por duas distribuições de RCs a distâncias diferentes ou se o duplo pico é formado apenas por diferentes populações estelares a mesma distância.

Os valores de MP obtidos do catálogo astrométrico VIRAC estão no sistema equatorial de coordenadas  $(\mu_{\alpha^*}$  e  $\mu_{\delta}$ ), sendo que os dados de MP em ascensão reta já estão multiplicados pelo cosseno da declinação  $(\mu_{\alpha^*} = \mu_{\alpha} \cos \delta)$ . Contudo estamos especialmente interessados no movimento próprio ao longo da direção da longitude Galáctica  $(\mu_{l^*} = \mu_l \cos b)$  e necessitamos efetuar uma transformação nos MP de  $\mu_{\alpha^*}$  e  $\mu_{\delta}$  para  $\mu_{l^*}$  e  $\mu_b$ . Poleski (2013) descreve um método para realizar a trans-

formação do MP do sistema equatorial de coordenadas para o sistema Galáctico de coordenadas. Inicialmente devemos calcular os valores de duas constantes,  $C_1$  e  $C_2$ , através das seguintes relações:

$$C_1 = \sin \delta_G \cos \delta - \cos \delta_G \sin \delta \cos(\alpha - \alpha_G) \quad (3.4)$$

$$C_2 = \cos \delta_G \sin(\alpha - \alpha_G). \quad (3.5)$$

Onde  $\alpha_G$  e  $\delta_G$  são as coordenadas equatoriais do Pólo Norte Galáctico e possuem os seguintes valores:  $\alpha_G = 192.85948$  deg e  $\delta_G = 27.12825$  deg.

Com os valores de  $C_1$  e  $C_2$  podemos obter o valor de  $\cos b$  através da relação

$$\cos b = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad (3.6)$$

Os valores de MP em coordenadas Galácticas são obtidos através das relações:

$$\mu_{l^*} = \frac{1}{\cos b} (C_1 \mu_{\alpha^*} + C_2 \mu_{\delta}) \quad (3.7)$$

$$\mu_b = \frac{1}{\cos b} (-C_2 \mu_{\alpha^*} + C_1 \mu_{\delta}) \quad (3.8)$$

Após a conversão dos valores de MP, precisamos selecionar as estrelas nos catálogos fotométricos correspondentes à região do DCM onde se encontra o duplo pico. Em alguns casos a separação dos RCs é visível sendo fácil realizar um corte em magnitude e em cor.

A separação das estrelas pertencentes a cada um dos RCs consiste na realização de uma seleção de fontes entre uma determinada faixa de magnitude, por exemplo, as estrelas entre as magnitudes  $14.5 \leq K_s \leq 15.0$  mag e uma determinada faixa de cor, como por exemplo, as estrelas entre  $1.10 \leq (J - K_s) \leq 1.50$  mag. A Fig. 15 mostra um exemplo do corte em magnitude e em cor utilizado para a obtenção das estrelas em cada um dos RCs.

Com o arquivo de fontes de cada RC realizamos um *match* entre nosso arquivo contendo as fontes de cada RC e o catálogo contendo os valores de  $\mu_{l^*}$  e  $\mu_b$  derivados dos catálogos do VIRAC.

Os valores de MP precisam passar por uma correção de movimento relativo para movimento absoluto. Nessa correção os valores de MP relativo médios são corrigidos tendo como referência valores obtidos por um modelo, ou pela transferência para algum sistema fundamental

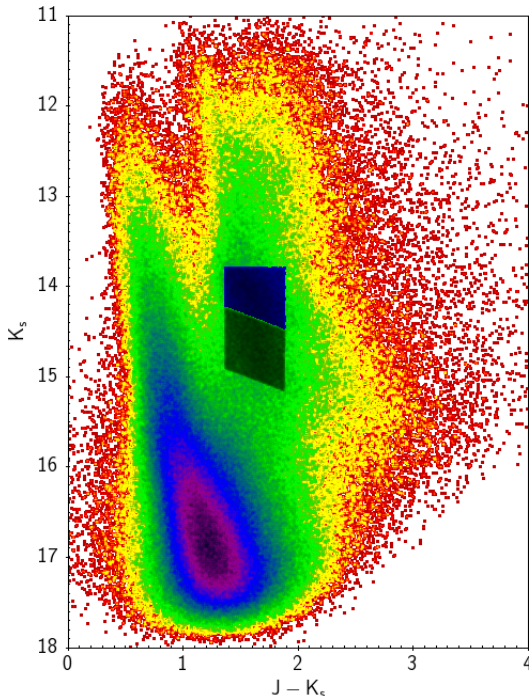


Figura 15 – DCM de  $K_s$  por  $(J - K_s)$  de uma região centrada em coordenadas galácticas  $(l, b) = (347.4, -0.4)$  deg, esta região será estudada posteriormente neste trabalho (ver seção 4.1.1). Este DCM mostra a seleção da região na qual se encontram as estrelas pertencentes a cada um dos RCs. Em azul escuro temos a seleção da região no DCM do primeiro RC, já em verde escuro temos a região pertencente ao segundo RC.

previamente estabelecido (Wu; Wang, 2000).

Desde 1991 a União Astronômica Internacional (IAU) adota como padrão o Sistema de Referência Celeste Internacional (ICRS do inglês). O ICRS foi proposto com base em observações de alta precisão de fontes de rádio extragalácticas por Interferometria de Longa Linha de Base (VLBI), tendo precisões típicas nas coordenadas da ordem de  $\pm 300$  microssegundos de arco. O ICRS é acessível diretamente pela observação de objetos extragalácticos e de forma indireta através dos sistemas principais de referência ligados a Galáxia, ao Sistema Solar e à Terra (Arias et al., 1995). Binney e Merrifield (1998) argumentam que esses objetos

extragalácticos estão tão distantes que seus MP são certamente pequenos. Essas fontes são muito fracas e suas posições absolutas não podem ser determinadas com a utilização de um círculo meridiano, contudo, a maioria desses objetos são fontes de rádio, e com a utilização de interferômetros pode-se medir com precisão os ângulos entre as fontes, formando assim uma rede de objetos extragalácticos com posições relativas exatas.

Devido à falta mapas precisos de extinção 3D (incluindo a coordenada de distância) no plano Galáctico não se pode obter valores de correção de MP relativo para absoluto para todo o VVV sem introduzir incertezas nos valores de correção. Os mapas de extinção 3D ao longo do plano Galáctico são necessários para se ter confiança nas distâncias medidas e no movimento das estrelas usadas como referência astrométrica (Smith et al., 2018).

O método de obtenção dos valores de correção de MP relativo para absoluto em nosso caso é dificultado pelo fato de ainda não possuímos um programa capaz de calcular esses valores. Contudo um outro método capaz de determinar esses valores de forma indireta é realizar a comparação entre dois catálogos astrométricos, um deles com os valores de MP relativo (VIRAC) e um outro catálogo com os valores absolutos de MP (como por exemplo o GAIA). No ano de 2018 tornaram-se públicos os dados do Segundo Data Release da missão astrométrica GAIA (Gaia Collaboration et al., 2018), fornecendo com grande precisão a paralaxe de um número sem precedentes de fontes. Os valores de MP disponibilizados nos catálogos astrométricos do Gaia já são corrigidos para o referencial absoluto e isto nos permite identificar se o método de determinação dos valores de MP relativo para absoluto são consistentes com os valores esperados.

Smith et al. (2018) em seu trabalho encontram um valor de correção de movimento relativo para absoluto em  $\mu_l$  de  $6.0 \text{ mas yr}^{-1}$ , para um grupo de fontes VIRAC confiáveis localizadas entre  $299.5 > l > 300.5 \text{ deg}$  e  $0.5 < b < 1.0 \text{ deg}$ , com os intervalos de magnitude nas Bandas  $J$  e  $K_s$  de  $10 < J < 20 \text{ mag}$  e  $10 < K_s < 20 \text{ mag}$ . Este valor de correção foi obtido através dos valores de MP medianos de uma população estelar sintética do modelo de Besançon (Robin et al., 2003).

Para validar o método utilizado realizamos a comparação entre os dois catálogos astrométricos. Os dados referentes ao Gaia foram obtidos por meio da biblioteca do Vizier (Ochsenbein; Bauer; Marcout, 2000), enquanto os catálogos do VIRAC estão disponíveis para download em <https://vvv.herts.ac.uk/>. Inicialmente utilizamos o método descrito acima para realizar a transformação dos movimentos próprios

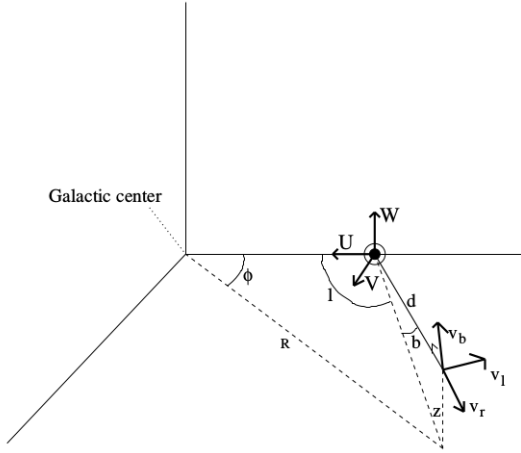


Figura 16 – Representação da cinemática de uma estrela em relação ao Sol. Figura original do trabalho de López-Corredoira (2014).

do sistema equatorial para o sistema Galáctico de coordenadas, em seguida, selecionamos as fontes que satisfazem as exigências utilizadas por Smith et al. (2018) (descritas no parágrafo anterior). Com as fontes selecionadas, efetuamos um *match* entre os dois catálogos e realizamos a subtração dos valores medianos de  $\mu_l$ . Obtivemos nesse procedimento um valor de correção em  $\mu_l$  de  $6.2 \text{ mas yr}^{-1}$ . O valor obtido possui uma diferença de apenas 3.2% em relação ao valor proposto por Smith et al. (2018), mostrando que o método utilizado é confiável. Vale ressaltar que a correção de movimento relativo para absoluto independe da cor das fontes, sendo que utilizamos estrelas da sequência principal e estrelas gigantes para a obtenção deste valor.

O modelo de rotação Galáctica utilizado é baseado em um disco em rotação simples. As curvas de rotação são obtidas utilizando o modelo presente em López-Corredoira (2014). Adotamos a velocidade do Sol em relação ao Grupo Local de Repouso (LRS), como sendo  $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (14.0, 12.0, 6.0) \text{ km s}^{-1}$ , consideramos a velocidade do LRS em relação ao centro Galáctico como sendo  $V_c(R_{\odot}, z = 0) = 220 \text{ km s}^{-1}$  (Binney; Merrifield, 1998). A velocidade do Sol ao longo da direção de V em relação ao centro Galáctico é dada pela relação

$$V_{g,\odot} = V_c(R_{\odot}, z = 0) + V_{\odot} \quad (3.9)$$

Assumindo órbitas circulares médias com a velocidade de rotação



de  $220 \text{ km s}^{-1}$  no raio galactocêntrico, independentemente do ângulo azimutal  $\phi$  da estrela, as velocidades coplanares da estrela (ou distribuição de estrelas) em relação ao Sol será dada pelas relações:

$$U_* = -U_{\odot} + V_c(R, z) \sin(\phi) \quad (3.10)$$

$$V_* = -V_{g,\odot} + V_c(R, z) \cos(\phi) \quad (3.11)$$

Por fim podemos calcular as velocidades ao longo da longitude e latitude Galáctica ( $v_l$  e  $v_b$ ) como também a velocidade radial ( $v_r$ ), com a utilização das velocidades do sistema de referencia U,V e W.

$$v_r = U_* \cos l \cos b + V_* \sin l \cos b + W_* \sin b \quad (3.12)$$

$$v_l = -U_* \sin l + V_* \cos l \quad (3.13)$$

$$v_b = U_* \cos l \sin b - V_* \sin l \sin b + W_* \cos b \quad (3.14)$$

Para a obtenção dos valores de MP para as RCs, realizamos um corte em magnitude e cor em torno da região no DCM onde está localizado o duplo pico, separando os picos em arquivos distintos. Os valores de MP relativos em  $\mu_l$  são obtidos dos catálogos adaptados do VIRAC. Tomando o valor mediano do MP da distribuição de estrelas RCs, aplicando o fator de ajuste para movimento absoluto temos o valor de MP absoluto da distribuição. Com as estimativas dos valores de distância e MP para cada distribuição de RCs, calculamos a velocidade tangencial usando uma função do *galpy*. O *galpy* é um pacote de dinâmica galáctica disponível para a linguagem computacional Python, que utiliza os valores de distância, MP e coordenadas para determinar a velocidade tangencial, podendo também ser usado para obter outros valores de velocidade, como por exemplo, velocidade radial e a velocidade ao longo da latitude Galáctica. Uma descrição detalhada do design, da implementação e uso do *galpy* podem ser encontradas em Bovy (2015).

Realizaremos a comparação entre os valores de velocidade tangencial  $v_l$  calculados para as distribuições de RCs com a curva de rotação Galáctica obtida pela equação 3.13, para as distâncias entre 0 e 15 kpc. Os métodos e processos discutidos nesta seção foram utilizados para cada uma das janelas de baixa extinção analisadas.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 JANELAS DE BAIXA EXTINÇÃO ANALISADAS

#### 4.1.1 A janela VVV WIN 1713-3939

A janela VVV WIN 1713-3939 conhecida também como Janela de Dante (Minniti et al., 2018; Gonzalez et al., 2018), é uma região aproximadamente circular, de diâmetro de  $30'$ , centrada em coordenadas galácticas  $(l, b) = (347.4, -0.4)$  deg. O avermelhamento médio na janela é de  $E(J - K_s) = 0.96 \pm 0.09$  mag, que com a utilização de  $A_{K_s}/E(J - K_s) = 0.484$  mag, corresponde à extinção de  $A_{K_s} = 0.46 \pm 0.04$  mag (Minniti et al., 2018).

Esta janela foi analisada em Minniti et al. (2018), contudo realizamos uma análise independente neste trabalho, obtendo novos valores de distância, bem como efetuamos a análise de MP para as distribuições de estrelas do RC (não contemplada em Minniti et al. (2018)), sendo esta uma maneira para validar os valores de distância obtidos.

A Fig. 17 mostra a janela em detalhe. A projeção vertical abaixo do plano Galáctico ao longo da linha de visada para a latitude  $b = -0.4$  deg, para uma distância  $D = 8$  kpc é de  $z = -56$  pc. Já para a distância  $D = 14$  kpc a projeção vertical é de  $z = -98$  pc, o que torna VVV WIN 1713-3939 uma boa região para traçar características do disco/barra Galáctica.

O DCM da janela VVV WIN 1713-3939 é mostrado no painel esquerdo da Fig. 18. Podemos perceber uma estrutura complexa na região onde se encontram as RCs. A interpretação mais aceita para essa estrutura presente no DCM está relacionada a populações de RCs localizadas a diferentes distâncias em uma mesma linha de visada. Contudo, acredita-se que estamos analisando uma janela de baixa extinção e para comprovar tal hipótese, realizamos uma comparação entre a região em que se acredita estar localizada a janela com um campo de controle localizado em  $(l, b) = (347.4, 0.4)$  deg (mesma longitude e simétrico em latitude).

O DCM do campo de controle (ver painel da direita na Fig. 18) apresenta características distintas em relação ao DCM da janela VVV WIN 1713-3939. Primeiramente pode-se perceber que o DCM do campo de controle é mais avermelhado, sendo possível ver que as estrelas do RCs estão “espichadas” ao longo de uma reta, que por sua vez carac-

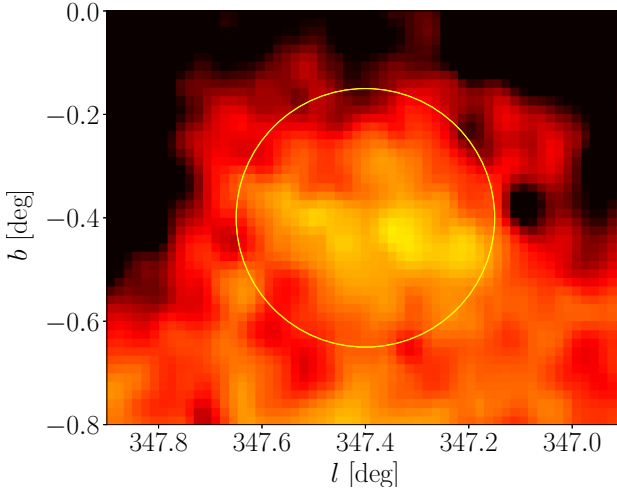


Figura 17 – Recorte da região onde se encontra a janela VVV WIN 1713-3939 no mapa de extinção mostrado na Fig. 12. A área de menor extinção se localiza no círculo amarelo. A escala de cor é a mesma utilizada na Fig. 12 e representa o excesso de cor em  $E(J - K_s)$ . A avermelhamento médio na janela é de  $E(J - K_s) = 0.96 \pm 0.09$  mag.

teriza o vetor de avermelhamento.

O RC no DCM da janela VVV WIN 1713-3939 é visto em magnitudes mais fracas quando comparado ao DCM mostrado no campo de controle, o que nos faz acreditar que estamos vendo estruturas localizadas a maiores distâncias. Apenas uma comparação entre os DCMs dos campos analisados não é significativa para demonstrar a existência da janela de baixa extinção. Portanto, selecionamos as gigantes presentes tanto na janela de baixa extinção quanto no campo de controle. A Fig. 19 mostra a função de luminosidade convertida em módulo de distância para a região das gigantes presentes nos dois campos.

Para um grupo de estrelas localizado a uma mesma distância no plano Galáctico, na ausência de *warping* e *flaring* (uma escala/dispersão vertical maior do disco a grandes distâncias) significativos, não existem razões para haver grandes diferenças populacionais um pouco acima ou abaixo do disco. Deveríamos estar vendo as mesmas características em ambos os campos. Contudo apenas o primeiro pico nas proximidades de  $\mu = 15.25 \pm 0.25$  é observado em ambos os campos, sendo o segundo pico em  $\mu = 15.84 \pm 0.25$  observado apenas ao longo

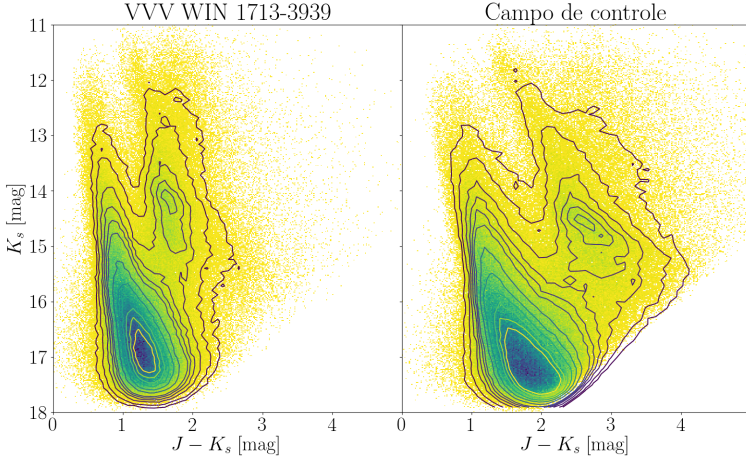


Figura 18 – DCM da janela VVV WIN 1713-3939 (painel da esquerda) em comparação com o campo de controle (painel da direita, ver seção 3.2). As linhas representam curvas de densidade. Podemos perceber a presença de uma estrutura complexa na região em que se encontram as RCs.

da linha de visada da janela de baixa extinção.

Os valores de módulo de distância correspondem a distâncias de  $11.2 \pm 1.3$  kpc para o pico mais próximo e  $14.7 \pm 1.7$  kpc para o pico mais distante. Os valores médios de módulo de distância foram obtidos através do ajuste de gaussianas simples às distribuições. Esses valores de distância foram calculados de forma independente, sendo que os valores de distância estão em conformidade com os valores inicialmente propostos por Minniti et al. (2018).

Após a obtenção dos valores de distâncias para as RCs, realizamos a seleção das fontes correspondentes a cada RC e obtivemos os seus MP relativos através do catálogo astrométrico VIRAC. Com a conversão dos MP de coordenadas equatoriais para galácticas, obtivemos os valores de  $\mu_l$  relativos como sendo respectivamente,  $-1.89 \pm 2.0$  e  $-1.51 \pm 2.1$  mas  $y^{-1}$ , para o primeiro e segundo RCs. Essa análise de MP não foi abordada no trabalho de Minniti et al. (2018), sendo esta análise uma maneira diferente para validar os valores de distância obtidos.

Obtivemos um valor de correção de movimento relativo para absoluto de  $-4.82 \pm 4.39$ , ficando com  $\mu_l$  absoluto de  $-6.71 \pm 4.82$  e  $-6.33$

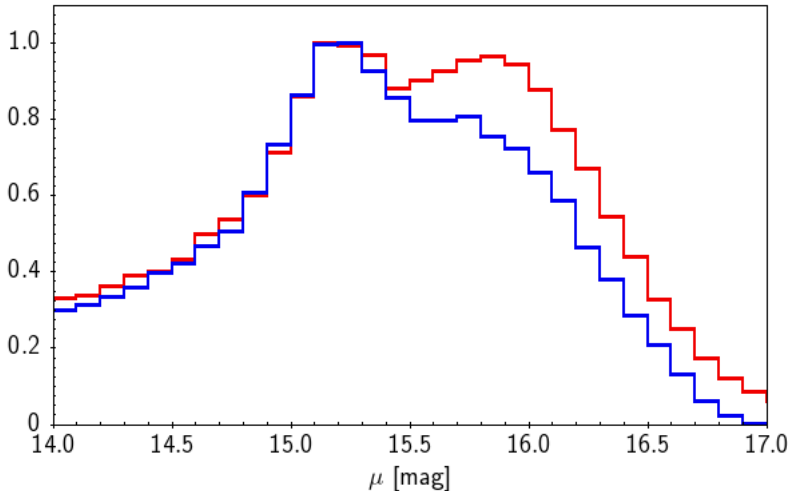


Figura 19 – Densidade de distribuição normalizada versus módulo de distância. O histograma em vermelho representa a distribuição em módulo de distância para a janela de baixa extinção, já o histograma em azul representa a distribuição para o campo de controle. Podemos ver um excesso de contagens no histograma da janela de baixa extinção (por volta de  $\mu = 15.9$  mag).

$\pm 4.86$  mas  $y^{-1}$  respectivamente. Com a utilização das distâncias calculadas e valores de  $\mu_l$  absolutos, encontramos velocidades tangenciais em longitude de  $-365.3 \pm 256.5$  e  $-441.1 \pm 342.5$  km  $s^{-1}$  referentes ao primeiro e segundo RC respectivamente.

Os valores de velocidade encontrados então em conformidade com um modelo de disco em rotação simples (ver Fig. 20). Nossos valores de incerteza são excessivamente grandes devido principalmente ao fato das incertezas nos valores de correção de movimento relativo para absoluto, contudo, ainda há a propagação das incertezas referentes as medidas de distâncias e MP relativos, que também contribuem de forma significativa para o aumento nas incertezas dos valores de velocidade tangencial.

Uma das dúvidas que podem surgir, se refere ao porquê não utilizamos diretamente os dados de MP absolutos fornecidos pelo Gaia. Sabe-se, contudo, que os dados do Gaia são muito incertos em áreas de alta extinção, especialmente para fontes fracas e distantes. Por exemplo, para  $A_K > 0.8$  mag, valor próximo aos medidos nas janelas, temos

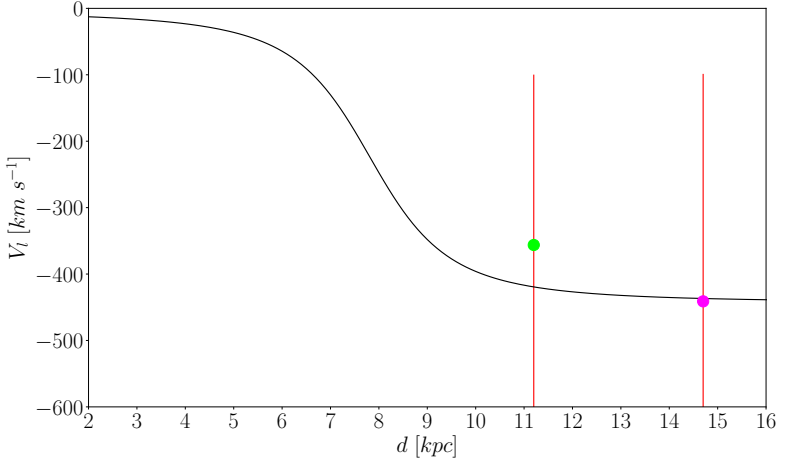


Figura 20 – Velocidade tangencial das RCs versus distância. Os pontos representam as sobredensidades de RCs, enquanto a linha em preto é a curva de rotação simples da Galáxia para as coordenadas da janela (López-Corredoira, 2014).

um  $A_V > 7$  mag no óptico. Ao comparar os dados do Gaia DR2 com o VIRAC para as duas populações de RC na janela VVV WIN 1713-3939, descobrimos que para o pico mais brilhante, somente aproximadamente 9% das fontes estão no GAIA DR2 (com MP e medições de paralaxe acima do nível 1-sigma de confiança), enquanto para o pico mais fraco, o número cai para 3% das fontes.

#### 4.1.2 A janela VVV WIN 1607-5258

A janela VVV WIN 1607-5258 é uma região de formato aproximadamente retangular de  $30' \times 12'$ , centrada em coordenadas galácticas  $(l, b) = (330.0, -0.75)$  deg. O avermelhamento médio na janela é de  $E(J - K_s) = 0.98 \pm 0.10$  mag, o que corresponde a uma extinção de  $A_{K_s} = 0.47$  mag.

A Fig. 21 mostra a janela de forma detalhada. Para a latitude de  $b = -0.75$  deg a projeção vertical ao longo da linha de visada é menor que  $z < 200$  pc, mesmo para regiões localizadas no lado mais distante

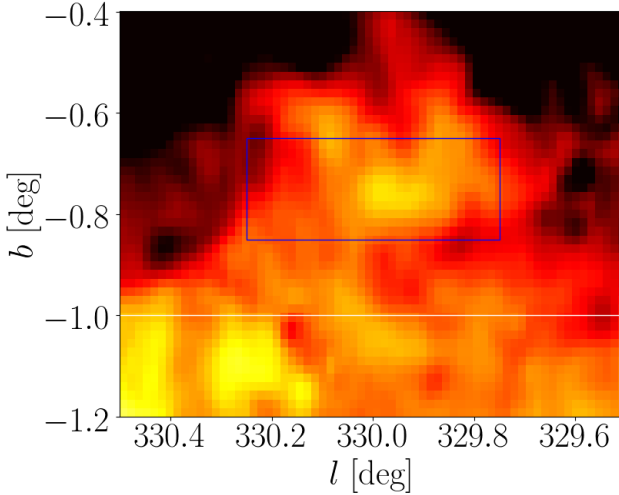


Figura 21 – Recorte da região onde se encontra a janela VVV WIN 1607-5258 no mapa de extinção mostrado na Fig. 12. A área de menor extinção se localiza no retângulo azul. A escala de cor é a mesma utilizada na Fig. 12 e representa o excesso de cor em  $E(J - K_s)$ . O avermelhamento médio na janela é de  $E(J - K_s) = 0.98 \pm 0.10$  mag.

do disco Galáctico ( $d < 15$  kpc).

O DCM da janela VVV WIN 1607-5258 (ver painel da esquerda na Fig. 21) também apresenta um padrão de duplo pico. As linhas de contorno que representam níveis de densidade deixam bem claro duas sobredensidades de RCs ao longo dessa linha de visada. Efetuaremos a mesma interpretação que foi realizada na janela anterior para as demais janelas. Analisando o DCM do campo de controle (simétrico em latitude e de mesma longitude) podemos perceber que a estrutura de duplo pico não está presente, sendo que as linhas de contorno tem os mesmos níveis de densidade em ambos os campos.

Selecionamos as gigantes em ambos os campos e através da função de luminosidade convertida em módulo de distância criamos o histograma da distribuição de distância normalizado para as duas regiões. Essa distribuição é mostrada na Fig. 23. A distribuição de distância novamente mostra um duplo pico na janela de baixa extinção, enquanto no campo de controle somente o primeiro pico e mais próximo está presente.

Após um ajuste gaussiano simples às distribuições, obtivemos os



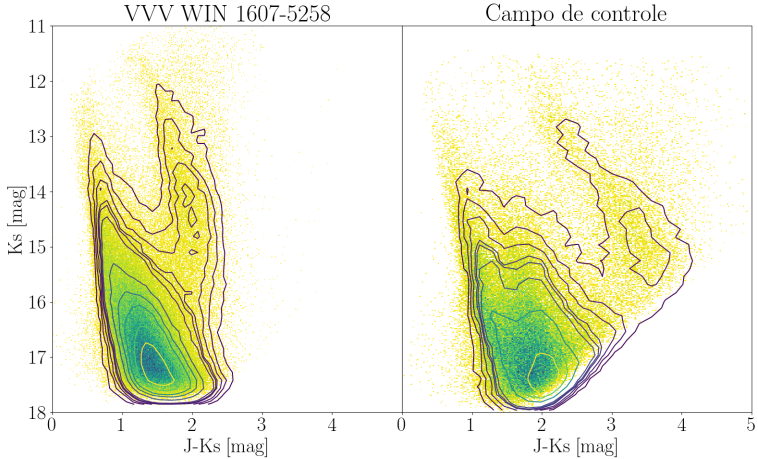


Figura 22 – DCM da janela VVV WIN 1607-5258 (painel da esquerda) em comparação com o campo de controle (painel da direita). As linhas representam curvas de densidade. Podemos perceber a presença de duas sobredensidades significativas na região em que se encontra o RC.

valores médios de módulo de distância para o primeiro e o segundo picos, obtendo os valores respectivos de  $\mu = 14.77 \pm 0.87$  e  $\mu = 15.75 \pm 0.42$  mag. Esses valores correspondem a distâncias de  $9.0 \pm 3.6$  e  $14.0 \pm 2.7$  kpc. Esse segundo pico deve ser visto com cautela, já que dependendo da largura do histograma o pico aparece diluído e não é visto com clareza. Na Fig. 23, uma largura de 0.15 mag é utilizada.

Selecionamos as fontes das duas distribuições de RCs, obtendo os valores de MP relativos em  $\mu_l$  de  $-1.19 \pm 1.6$  mas  $y^{-1}$  para o primeiro RC e  $-0.79 \pm 1.9$  mas  $y^{-1}$  para o segundo RC. Obtivemos um valor de correção de movimento relativo para absoluto de  $-5.48 \pm 2.88$ , ficando com  $\mu_l$  absoluto de  $-6.67 \pm 3.29$  e  $-6.27 \pm 3.45$  mas  $y^{-1}$ , para cada RC respectivamente. Com a utilização das distâncias calculadas e valores de  $\mu_l$  absolutos encontramos velocidades tangenciais em longitude de  $-284.6 \pm 180.7$  e  $-416.1 \pm 242.6$  km  $s^{-1}$ , referentes ao primeiro e segundo RC respectivamente.

Os valores de velocidade encontrados então em conformidade com um modelo de disco em rotação simples (ver Fig. 24) nossos valores de incerteza são excessivamente grandes devido ao fato da incerteza no valor de correção de movimento relativo para absoluto.

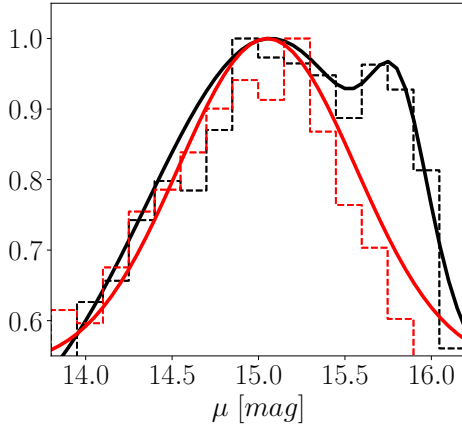


Figura 23 – Densidade de distribuição normalizada versus módulo de distância. O histograma em preto representa os dados para a janela de baixa extinção, enquanto o histograma em vermelho representa os dados para o campo de controle. As linhas sólidas em vermelho e preto representam o ajuste gaussiano aplicado às distribuições.

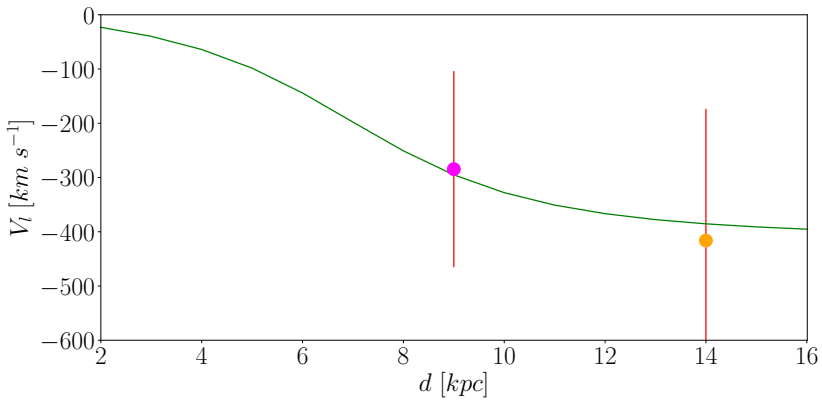


Figura 24 – Velocidade tangencial das RCs versus distância. Os pontos representam as sobredensidades de RCs, enquanto a linha em verde é a curva de rotação simples da Galáxia para as coordenadas da janela (López-Corredoira, 2014).

### 4.1.3 A janela VVV WIN 1475-5877

A janela VVV WIN 1475-5877 é uma região retangular de  $42' \times 15'$ , centrada em coordenadas galácticas  $(l, b) = (318.65, 0.87)$  deg (ver Fig. 25). O avermelhamento médio na janela é de  $E(J - K_s) = 0.91 \pm 0.06$ , o que corresponde a uma extinção de  $A_{K_s} = 0.44$  mag.

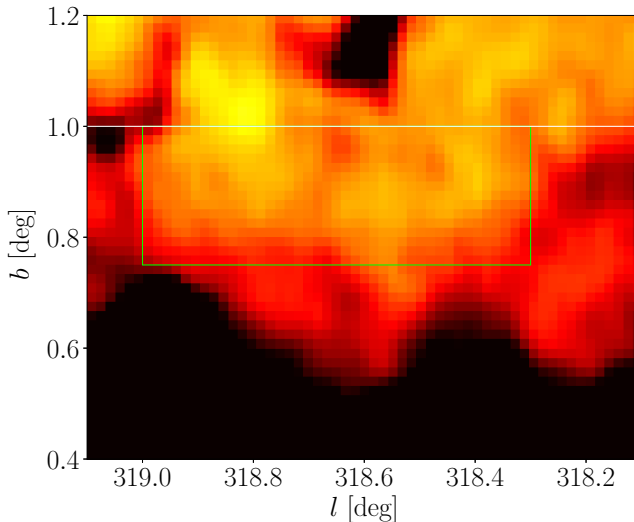


Figura 25 – Recorte da região onde se encontra a janela VVV WIN 1475-5877 no mapa de extinção mostrado na Fig. 12. A área de menor extinção se localiza no retângulo verde. A escala de cor é a mesma utilizada na Fig. 12 e representa o excesso de cor em  $E(J - K_s)$ . O avermelhamento médio na janela é de  $E(J - K_s) = 0.91 \pm 0.06$  mag.

A Fig. 25 mostra a janela de forma detalhada. Para a latitude de  $b = 0.87$  deg a projeção vertical ao longo da linha de visada é menor que  $z < 180$  pc, mesmo para regiões localizadas no lado mais distante do disco Galáctico ( $d < 11$  kpc) nessa linha de visada.

O DCM da janela VVV WIN 1475-5877 (ver painel da esquerda na Fig. 26) apresenta um padrão em que não podemos caracterizar um duplo pico apenas observando as sobredensidades estelares destacadas pelas linhas de densidade. Já o DCM do campo de controle (ver painel da direita na Fig. 26) não apresenta o mesmo comportamento quando comparamos a densidade estelar no RC com a da janela de baixa ex-

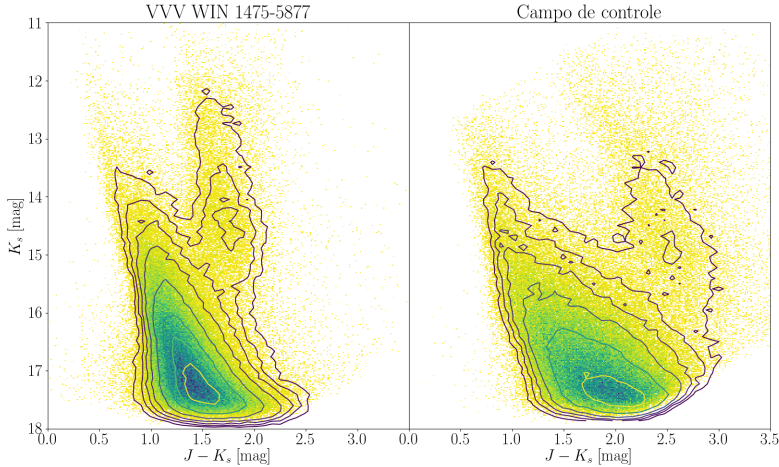


Figura 26 – DCM da janela VVV WIN 1475-5877 (painel da esquerda) em comparação com o campo de controle (painel da direita). As linhas representam curvas de densidade. Podemos perceber a presença de uma estrutura complexa na região em que se encontram as RCs, não sendo possível neste caso atribuir as sobredensidades estelares a um duplo pico das RCs analisando apenas o DCM.

tição. Em ambos os DCM as linhas de contorno marcam os mesmos níveis de densidade.

A partir da função de luminosidade obtida para a seleção das estrelas gigantes no DCM da janela de baixa extinção, construiu-se o histograma da distribuição de distância para as duas regiões. A Fig. 27 mostra a densidade de distribuição versus módulo de distância para a janela VVV WIN 1475-5877. Com a realização de um ajuste de gaussianas simples às distribuições, obtivemos os valores de módulo de distância de  $\mu = 14.20 \pm 0.94$  para o primeiro RC e  $\mu = 15.35 \pm 0.40$  para o segundo RC. Esses valores correspondem as respectivas distâncias de  $6.8 \pm 2.9$  e  $11.8 \pm 2.2$  kpc.

Como nos casos anteriores, selecionamos as fontes das duas distribuições de RCs. Ao efetuarmos um comparativo com o catálogo astrométrico do VIRAC, obtivemos os valores de MP relativos de  $\mu_l$  de  $-0.31 \pm 1.4$  mas  $y^{-1}$  para o primeiro RC e  $0.01 \pm 1.5$  mas  $y^{-1}$  para o segundo RC. O valor de correção de movimento relativo para absoluto foi obtido por intermédio dos dados disponibilizados pela missão GAIA, o valor de correção obtido foi de  $-6.28 \pm 2.46$  mas  $y^{-1}$ . Ao aplicarmos

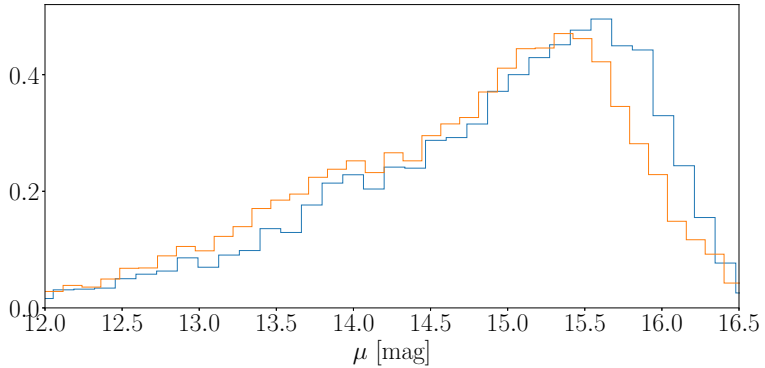


Figura 27 – Densidade de distribuição versus modulo de distância. Em azul estão os dados para a janela de baixa extinção e em laranja os dados para o campo de controle. Os dois histogramas são muito semelhantes até a proximidade de  $\mu = 15.25$  mag, isso se deve ao fato de que nesta janela estamos observando o segundo pico de estrelas do RC mais próximo a nós.

o fator de conversão ficamos com os valores de  $\mu_l$  absolutos de  $-6.56 \pm 2.83$  e  $-6.27 \pm 3.20$  mas  $y^{-1}$  para cada RC respectivamente. Com a utilização das distâncias calculadas e valores de  $\mu_l$  absolutos encontramos velocidades tangenciais em longitude de  $-211.5 \pm 128.3$  e  $-350.7 \pm 190.5$   $\text{km s}^{-1}$ , referentes ao primeiro e segundo RC respectivamente.

Os valores de velocidade encontrados estão em conformidade com um modelo de disco em rotação simples (ver Fig. 28). Nossos valores de incerteza são excessivamente grandes devido ao fato da incerteza no valor de correção de movimento relativo para absoluto, bem como as propagações das incertezas nos valores de distância e MP medidos para cada RC.

## 4.2 ESTRUTURAS AO LONGO DO DISCO

A posição dos braços espirais ainda permanece indefinida para o lado mais distante da Galáxia. Estudos realizados por Churchwell et al. (2009) indicam a posição esperada dos braços espirais, tendo como base ondas de rádio e observações no infravermelho. Contudo não se obteve nenhuma evidência das posições dos braços espirais medidos através de populações estelares para as regiões analisadas neste trabalho.

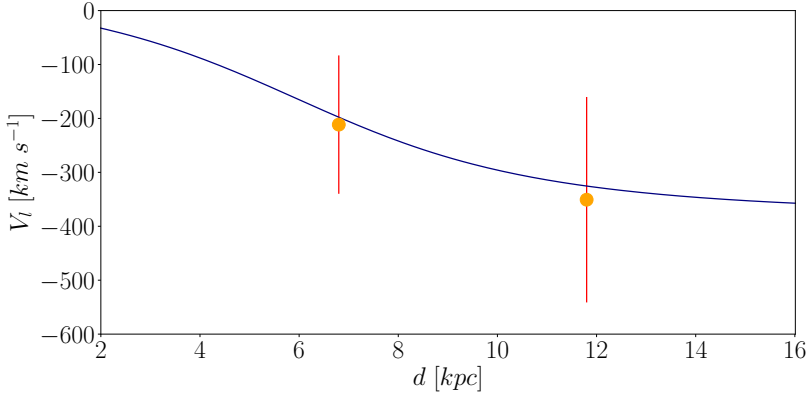


Figura 28 – Velocidade tangencial das RCs versus distância. Os pontos representam as sobredensidades de RCs, enquanto a linha em azul escuro representa a curva de rotação simples da Galáxia para as coordenadas da janela (López-Corredoira, 2014).

A Tab. 3 traz uma síntese dos valores de distância, MP absolutos e velocidade tangencial obtidos para cada uma das janelas de baixa extinção analisadas. Em todas as janelas, os valores de distância estão em conformidade com o esperado para as possíveis posições dos braços espirais. Já os valores de MP absolutos também se comportam de maneira esperada, sendo que as estrelas localizadas no primeiro RC, por estarem mais próximas da nossa posição, possuem MP maiores quando comparados às estrelas do segundo RC. Por fim, as velocidades tangenciais ao longo da longitude galáctica estão em conformidade com o modelo de um disco em rotação simples.

A Fig. 29 mostra a posição dos picos do RC ao longo das três janelas sobrepostas com um mapa esquemático da VL adaptado de Churchwell et al. (2009). Nota-se que os picos do RC em cada linha de visada atravessam diferentes braços, em boa concordância um com o outro, e consistentes com a imagem de fundo que é amplamente utilizada como uma visão atual da nossa Galáxia.

Para a janela VVV WIN 1713-3939, o pico mais próximo marca a extremidade da barra e/ou o braço de Perseus ( $d = 11,2$  kpc). O primeiro pico na janela VVV WIN 1607-5258 e o segundo pico na janela VVV WIN 1713-3939 marcam a posição do braço de Norma ( $d = 9,0$  e  $14,7$  kpc), enquanto os dois RC na janela VVV WIN 1475-5877 e o pico mais distante na janela VVV WIN 1607-5258 marcam a posição

Tabela 3 – Medidas de distância, MP absolutos e velocidade tangencial para as distribuições de RC em cada uma das janelas de baixa extinção.

Janela	Distância ao RC (kpc)	MP absoluto ( $\text{mas y}^{-1}$ )	Velocidade tangencial na coordenada $l$ ( $\text{km s}^{-1}$ )
VVV WIN	$11.2 \pm 1.3$	$-6.71 \pm 4.82$	$-356.3 \pm 256.5$
1713-3939	$14.7 \pm 1.7$	$-6.33 \pm 4.86$	$-441.1 \pm 342.5$
VVV WIN	$9.0 \pm 3.6$	$-6.67 \pm 3.29$	$-284.6 \pm 180.7$
1607-5258	$14.0 \pm 2.7$	$-6.27 \pm 3.45$	$-416.1 \pm 242.6$
VVV WIN	$6.8 \pm 2.9$	$-6.56 \pm 2.83$	$-211.5 \pm 128.3$
1475-5877	$11.8 \pm 2.2$	$-6.27 \pm 3.20$	$-350.7 \pm 190.5$

do braço de Scutum-Centaurus ( $d = 6,8, 11,8$  e  $14,0$  kpc). Entretanto, embora a posição deste segundo pico da janela VVV WIN 1607-5258 esteja em conformidade com os outros picos marcando a posição de Scutum-Centaurus, este deve ser visto com cautela, conforme citado na Seção 4.1.2.

Recentemente Rezaei Kh. et al. (2018) mapearam a distribuição de poeira no disco Galáctico usando estrelas do RC e estrelas gigantes do levantamento APOGEE, para distâncias em relação ao Sol menores que 7 kpc. Este é o primeiro mapa de poeira onde estruturas de braço foram detectadas. Contudo este mapa é limitado a regiões do disco interno ( $d < 7$  kpc). Esse trabalho traçou a localização do braço de Perseu e encontrou evidências da posição dos braços de Orion Spur/ braço local, partes do braço de Sagitário e especialmente do braço de Scutum-Centaurus. O trabalho de Poggio et al. (2018) mostra evidências de três sobredensidades de estrelas da sequência principal, a posição dessas sobredensidades correspondem aos braços de Sagitário, Orion Spur/braço Local e o de Perseus. Ambos trabalhos estudam o primeiro e quarto quadrantes (no sentido anti-horário em relação ao Sol em nossa Fig. 29), enquanto nossas observações estão no primeiro e segundo quadrantes, no lado mais distante do disco Galáctico.

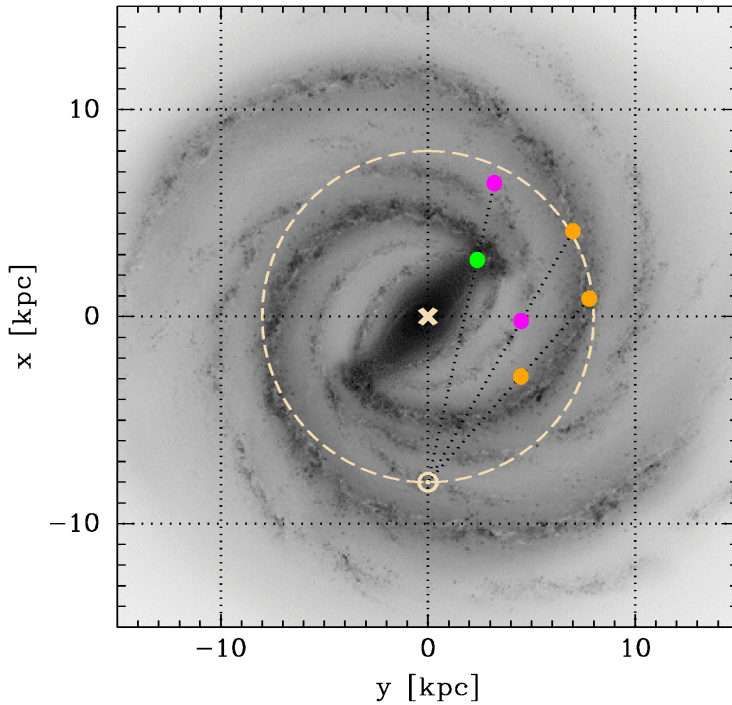


Figura 29 – Mapa esquemático da Via Láctea adaptado de Churchwell et al. (2009). Os eixos  $y$  e  $x$  representam a distância em relação ao centro Galáctico. A posição de cada sobredensidade de RCs ao longo das linhas de visada para as três janelas de baixa extinção são plotadas no mapa. Adotamos a distância até o centro Galáctico como  $R_0 = 8.0$  kpc. Os pontos coloridos representam os valores de distância encontrados em nossa análise e são mostrados na Tab. 3. O círculo aberto mostra a posição do Sol no mapa, enquanto o X no centro da figura indica a posição do centro Galáctico. O círculo formado pela linha pontilhada possui raio de 8.0 kpc e está centrado no centro Galáctico. O ponto verde mostra o braço de Perseus (ou o final da barra Galáctica), os pontos magenta marcam o braço de Norma enquanto os pontos laranja marcam a posição do braço de Scutum-Centaurus.



## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho realizamos uma busca por janelas de baixa extinção ao longo do hemisfério sul da VL, com a finalidade de identificar a presença de estruturas ao longo do disco a latitude de  $|b| \leq 1$  deg e longitudes entre  $350 \leq l \leq 310$  deg.

Ao analisarmos o mapa de baixa extinção identificamos 3 regiões promissoras. Ao selecionar a região das gigantes nos DCM, através da função de luminosidade construímos histogramas de distribuições de distância para cada janela de baixa extinção. Os histogramas mostram a presença de um duplo pico nas distribuições.

A análise de MP das estrelas do RC para cada janela de baixa extinção juntamente com os valores de distância encontrados, mostram que suas velocidades tangenciais ao longo da longitude galáctica estão em concordância com o modelo de disco em rotação. Os valores de correção de MP relativo para absoluto se mostram coerentes. Contudo, devido ao modo um tanto rudimentar utilizado para encontrá-los, as incertezas ficaram relativamente grandes.

Os valores se mostram coerentes com as posições esperadas dos braços espirais, sendo as distâncias validadas tanto pelo ajuste gaussiano na distribuição das RC como também pela velocidade tangencial. As sobredensidades de estrelas do RC na janela VVV WIN 1713-3939 marcam a extremidade da barra e/ou o braço de Perseus e o braço de Norma. Já na janela VVV WIN 1607-5258 as sobredensidades de estrelas do RC marcam a posição do braço de Norma e do braço de Scutum-Centaurus, enquanto para a janela VVV WIN 1475-5877 ambas as sobredensidades marcam posições no braço de Scutum-Centaurus.

Tanto os valores de distância quanto os valores de velocidade tangencial se mostram coerentes com o esperado, sendo um forte indício de que estamos marcando as posições dos braços espirais.

Para futuras análises utilizaremos os valores de MP absolutos que serão disponibilizados em uma nova versão do VIRAC, que será calibrada com os dados do GAIA DR2. Com esses novos valores as incertezas na obtenção dos valores absolutos do movimento próprio e respectivas velocidades devem diminuir consideravelmente.

Em 2016 iniciaram-se as observações do novo projeto complementar ao VVV, intitulado de VVV *eXtended* (VVVX). Esse novo levantamento fotométrico adicionará uma área de 1138 graus quadrados aos dados iniciais observados pelo VVV, incluindo regiões do disco entre  $10 < l < 20$ . Essa região deve conter a ponta da barra oposta a

identificada na janela VVV WIN 1713-3939 e a extremidade do braço de Scutum-Centaurus. Para a continuação desse estudo realizaremos a procura por janelas de baixa extinção nas novas regiões observadas, bem como uma flexibilização no valor da latitude utilizada neste trabalho.

Ainda existem áreas a serem analisadas nos mapas de extinção do VVV, como por exemplo as regiões do disco com menores longitudes e a região do bojo, que se mostram promissoras na identificação de estruturas, sendo as principais contribuições o formato da barra galáctica, como também a identificação de estruturas localizadas além do centro Galáctico.

Para as regiões mais próximas, onde os dados do VVV estão saturados, realizaremos a análise dos dados obtidos pelos levantamentos fotométricos 2MASS e UKIDSS-GPS, tanto para a região observada pelo VVV, quanto para regiões localizadas em outros quadrantes. Podendo assim obter um mapeamento completo de uma área maior.

Por fim, faz-se necessário, a modelagem de sínteses de populações estelares, utilizando tanto o modelo de Besançon (Robin et al., 2003) quanto o modelo Trilegal (Girardi et al., 2005), comparando os resultados obtidos com os dados observados.

## REFERÊNCIAS

- Alonso-García, J. et al. Milky Way demographics with the VVV survey. IV. PSF photometry from almost one billion stars in the Galactic bulge and adjacent southern disk. **A&A**, v. 619, p. A4, 2018.
- Arias, E. F. et al. The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS. **A&A**, v. 303, p. 604–608, 1995.
- Baade, W.; Gaposchkin, C. H. P. **Evolution of stars and galaxies**. Cambridge: Harvard University Press, 1963. 277 p.
- Binney, J.; Merrifield, M. **Galactic Astronomy**. [S.l.: s.n.], 1998.
- Bovy, J. galpy: A python Library for Galactic Dynamics. **ApJS**, v. 216, p. 29, 2015.
- Cannon, R. D. Red giants in old open clusters. **MNRAS**, v. 150, p. 111–135, 1970.
- Cardelli, J. A.; Clayton, G. C.; Mathis, J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. **ApJ**, v. 345, p. 245–256, 1989.
- Cassisi, S. et al. The magnitude difference between the main sequence turn off and the red giant branch bump in Galactic globular clusters. **A&A**, v. 527, p. A59, 2011.
- Churchwell, E. et al. The Spitzer/GLIMPSE Surveys: A New View of the Milky Way. **PASP**, v. 121, p. 213, 2009.
- FILHO, K. d. S. O.; SARAIVA, M. d. F. O. **Astronomia e astrofísica. São Paulo: Editora Livraria da Física**, v. 780, 2004.
- Gaia Collaboration et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. **A&A**, v. 616, p. A1, 2018.
- Gilmore, G.; Reid, N. New light on faint stars. III - Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc. **MNRAS**, v. 202, p. 1025–1047, 1983.
- Girardi, L. Red Clump Stars. **ARA&A**, v. 54, p. 95–133, 2016.

Girardi, L. et al. Star counts in the Galaxy. Simulating from very deep to very shallow photometric surveys with the TRILEGAL code. **A&A**, v. 436, p. 895–915, 2005.

Gonzalez, O. A.; Gadotti, D. The Milky Way Bulge: Observed Properties and a Comparison to External Galaxies. In: Laurikainen, E.; Peletier, R.; Gadotti, D. (Ed.). [S.l.: s.n.], 2016. (Astrophysics and Space Science Library, v. 418), p. 199.

Gonzalez, O. A. et al. The structure behind the Galactic bar traced by red clump stars in the VVV survey. **MNRAS**, v. 481, p. L130–L135, 2018.

Gonzalez, O. A. et al. Reddening and metallicity maps of the Milky Way bulge from VVV and 2MASS. II. The complete high resolution extinction map and implications for Galactic bulge studies. **A&A**, v. 543, p. A13, 2012.

Junqueira, T. C.; Lépine, J. R. D. **Estrutura Espiral da Galáxia baseada no estudo de órbitas estelares**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Curso de Pós-Graduação em Astronomia, São Paulo, 2013.

Kent, S. M.; Dame, T. M.; Fazio, G. Galactic structure from the Spacelab infrared telescope. II - Luminosity models of the Milky Way. **ApJ**, v. 378, p. 131–138, 1991.

López-Corredoira, M. Milky Way rotation curve from proper motions of red clump giants. **A&A**, v. 563, p. A128, mar. 2014.

López-Corredoira, M. et al. Old stellar Galactic disc in near-plane regions according to 2MASS: Scales, cut-off, flare and warp. **A&A**, v. 394, p. 883–899, 2002.

McWilliam, A.; Rich, R. M. The first detailed abundance analysis of Galactic bulge K giants in Baade’s window. **ApJS**, v. 91, p. 749–791, 1994.

Minniti, D. et al. VISTA Variables in the Via Lactea (VVV): The public ESO near-IR variability survey of the Milky Way. **New A**, v. 15, p. 433–443, 2010.

Minniti, D. et al. The Edge of the Milky Way Stellar Disk Revealed Using Clump Giant Stars as Distance Indicators. **ApJ**, v. 733, p. L43, 2011.

- Minniti, D. et al. A new near-IR window of low extinction in the Galactic plane. **A&A**, v. 616, p. A26, 2018.
- Nataf, D. M. et al. OGLE-III Detection of the Anomalous Galactic Bulge Red Giant Branch Bump: Evidence of Enhanced Helium Enrichment. **ApJ**, v. 730, p. 118, 2011.
- Ochsenbein, F.; Bauer, P.; Marcout, J. The VizieR database of astronomical catalogues. **A&AS**, v. 143, p. 23–32, 2000.
- Oort, J. H. Dynamics of the galactic system in the vicinity of the Sun. **Bull. Astron. Inst. Netherlands**, v. 4, p. 269, 1928.
- Paczynski, B.; Stanek, K. Z. Galactocentric Distance with the Optical Gravitational Lensing Experiment and HIPPARCOS Red Clump Stars. **ApJ**, v. 494, p. L219–L222, 1998.
- Paczynski, B. et al. The distribution of galactic disk stars in Baade’s Window. **ApJ**, v. 107, p. 2060–2066, 1994.
- Perryman, M. A. C. et al. The HIPPARCOS Catalogue. **A&A**, v. 323, p. L49–L52, 1997.
- Poggio, E. et al. The Galactic warp revealed by Gaia DR2 kinematics. **MNRAS**, v. 481, p. L21–L25, 2018.
- Poleski, R. Transformation of the equatorial proper motion to the Galactic system. **ArXiv e-prints**, 2013.
- Prantzos, N. The metallicity distribution of the halo and the satellites of the Milky Way in the hierarchical merging paradigm. **A&A**, v. 489, p. 525–532, 2008.
- Reid, M. J. et al. A Parallax-based Distance Estimator for Spiral Arm Sources. **ApJ**, v. 823, p. 77, 2016.
- Reid, M. J. et al. Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. VI. Galactic Structure, Fundamental Parameters, and Noncircular Motions. **ApJ**, v. 700, p. 137–148, 2009.
- Rezaei Kh., S. et al. Detection of the Milky Way spiral arms in dust from 3D mapping. **A&A**, v. 618, p. A168, 2018.
- Rix, H.-W.; Bovy, J. The Milky Way’s stellar disk. Mapping and modeling the Galactic disk. **A&A Rev.**, v. 21, p. 61, 2013.

Robin, A. C. et al. A synthetic view on structure and evolution of the Milky Way. **A&A**, v. 409, p. 523–540, 2003.

Ruiz-Dern, L. et al. Empirical photometric calibration of the Gaia red clump: Colours, effective temperature, and absolute magnitude. **A&A**, v. 609, p. A116, 2018.

Saito, R. K. et al. VVV DR1: The first data release of the Milky Way bulge and southern plane from the near-infrared ESO public survey VISTA variables in the Vía Láctea. **A&A**, v. 537, p. A107, jan. 2012.

Saito, R. K. et al. Milky Way demographics with the VVV survey. I. The 84-million star colour-magnitude diagram of the Galactic bulge. **A&A**, v. 544, p. A147, 2012.

Saito, R. K. et al. Mapping the X-shaped Milky Way Bulge. **AJ**, v. 142, p. 76, 2011.

Smith, L. C. et al. VIRAC: the VVV Infrared Astrometric Catalogue. **MNRAS**, v. 474, p. 1826–1849, 2018.

Spinrad, H. **Galaxy Formation and Evolution**. [S.l.: s.n.], 2005.

Trumpler, R. J. Absorption of Light in the Galactic System. **PASP**, v. 42, p. 214, 1930.

Vallée, J. P. New Velocimetry and Revised Cartography of the Spiral Arms in the Milky Way - A Consistent Symbiosis. **AJ**, v. 135, p. 1301–1310, 2008.

Wu, Z.-y.; Wang, J.-j. Measurement of the absolute proper motion of M3 and its space motion. **CAA**, v. 24, p. 473–480, 2000.

Zinn, R. The globular cluster system of the galaxy. IV - The halo and disk subsystems. **ApJ**, v. 293, p. 424–444, 1985.