

A densidade estelar da vizinhança solar medida com 2000 paralaxes do *Gaia*

Sicrano da Silva

sicrano.silva@edu.udesc.br

Recebido em 8 de agosto de 2026

Resumo. Contar estrelas por unidade de volume é a medida mais direta que se pode fazer da população estelar da Galáxia, e só é possível na vizinhança do Sol, onde as paralaxes são grandes o bastante para dar distâncias individuais confiáveis. Neste trabalho usei as 2000 estrelas mais próximas com paralaxe medida pelo *Gaia* para determinar a densidade estelar local. Converte paralaxe em distância por $d = 1/p$ e magnitude aparente em magnitude absoluta pelo módulo de distância. Antes de contar, verifiquei até onde a amostra é completa: a razão $N(< d)/d^3$ mantém-se constante em 0,31 desde 8 pc até o limite da lista, o que estabelece completude dentro de $R = 18,4$ pc. Contando as 2000 estrelas nesse volume obtive $n = 0,0766 \pm 0,0017 \text{ pc}^{-3}$, onde a incerteza é apenas de Poisson. O valor corresponde a 77% do censo de referência da vizinhança solar. A diferença é quase quatorze vezes maior que a incerteza estatística e portanto não é flutuação: ela mede o que o catálogo não vê — companheiras não resolvidas, anãs marrons e as estrelas brilhantes que saturam o detector.

Palavras-chave: astronomia observacional — paralaxe — vizinhança solar — função de luminosidade — *Gaia*

1. INTRODUÇÃO

Quase tudo o que se afirma sobre a população estelar da Galáxia depende de saber quantas estrelas existem por unidade de volume e de que tipo elas são. Essa contagem é simples de enunciar e difícil de fazer: exige distâncias individuais, e distâncias medidas por geometria pura só existem onde a paralaxe é grande o suficiente para ser medida com precisão. A vizinhança solar é, por isso, o único laboratório onde a população estelar pode ser inventariada quase objeto a objeto [1].

A missão *Gaia* mudou a escala desse problema ao medir paralaxes com incerteza de dezenas de microssegundos de arco para mais de um bilhão de estrelas [3]. Para os objetos mais próximos, o erro relativo da paralaxe cai abaixo de 1%, e a distância deixa de ser a etapa limitante da análise — passa a sê-lo a completude do catálogo, isto é, a pergunta sobre quais objetos ele deixou de ver.

Este artigo responde a uma pergunta específica: *qual é a densidade estelar da vizinhança solar medida a partir de uma amostra do Gaia, e o quanto esse número difere do censo conhecido?* A Seção 2 reúne as relações usadas; a Seção 3 apresenta os dados, o teste de completude que precede a contagem e o resultado; a Seção 4 discute o que domina a incerteza.

2. REVISÃO TEÓRICA

A paralaxe trigonométrica p de uma estrela é o semiângulo sob o qual ela veria o raio da órbita terrestre. Com o parsec definido de modo que $p = 1''$ corresponda a 1 pc, a relação

de trabalho é

$$d [\text{pc}] = \frac{1000}{p [\text{mas}]} \quad (1)$$

A Equação (1) é exata para os valores verdadeiros, mas não para os medidos: a distribuição de $1/p_{\text{obs}}$ é assimétrica e a inversão introduz viés quando o erro relativo é grande [4]. Para $\sigma_p/p \lesssim 0,1$ o efeito é desprezível, condição que a amostra usada aqui satisfaz com folga.

Conhecida a distância, a magnitude aparente m converte-se em magnitude absoluta M — a magnitude que o objeto teria a 10 pc — pelo módulo de distância:

$$m - M = 5 \log_{10} \left(\frac{d}{\text{pc}} \right) - 5. \quad (2)$$

A Equação (2) supõe emissão isotrópica e meio transparente. A segunda hipótese é aceitável aqui: dentro de algumas dezenas de parsecs a extinção interestelar é de centésimos de magnitude, e não foi corrigida.

A densidade numérica de estrelas em um volume esférico de raio R que contenha N objetos é

$$n = \frac{N}{\frac{4}{3}\pi R^3}, \quad \frac{\sigma_n}{n} = \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

em que a incerteza vem da estatística de Poisson, válida para objetos independentes. A Equação (3) só faz sentido se a amostra for *completa* dentro de R , isto é, se nenhum objeto daquele volume tiver ficado de fora. Essa hipótese é a mais forte de todo o trabalho, e é verificada explicitamente na Seção 3.

O teste de completeza usa o fato de que, se a densidade for uniforme na escala considerada, o número de objetos dentro de um raio d cresce como o volume:

$$N(< d) = \frac{4}{3}\pi n d^3 \implies \frac{N(< d)}{d^3} = \text{constante}. \quad (4)$$

Um patamar no gráfico de $N(< d)/d^3$ indica completeza; uma queda indica que o catálogo está perdendo objetos a partir daquela distância.

Por fim, o movimento próprio μ dá a velocidade tangencial,

$$v_t [\text{km s}^{-1}] = 4,74 \mu [''\text{ano}^{-1}] d [\text{pc}], \quad (5)$$

e, combinada com a velocidade radial medida por efeito Doppler, a velocidade espacial $v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}$.

3. DADOS E DISCUSSÃO

3.1. Origem e limites da amostra

Usei o arquivo `01_gaia_estrelas_25pc.csv` disponibilizado na página da disciplina [2], extraído do *Gaia* DR3 [3]. São 2000 estrelas com paralaxe, erro de paralaxe, movimento próprio nas duas componentes, velocidade radial quando disponível, magnitude G e cor $G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}$.

Três características da amostra condicionam tudo o que vem depois. A primeira é o alcance: a menor paralaxe do arquivo é 54,33 mas, ou seja, a lista foi truncada nas 2000 estrelas mais próximas e não passa de 18,4 pc — é esse, e não um valor arbitrário, o raio que pode ser usado na Equação (3). A segunda é o limite de brilho: a estrela mais brilhante do arquivo tem $G = 2,68$, porque o detector do *Gaia* satura antes disso; faltam Sirius A, α Centauri A e B, Procyon A, Altair, Vega e Fomalhaut, além das três gigantes que existem dentro do volume — Pollux, Arcturus e Capella. A terceira é a cobertura espectroscópica: 561 das 2000 linhas (28%) não têm velocidade radial medida, e essas estrelas foram excluídas da análise cinemática em vez de entrarem com $v_r = 0$.

Nenhuma estrela foi descartada por qualidade astrométrica: 1958 das 2000 têm $\sigma_p/p < 1\%$ e o pior caso da amostra é 4,8%, bem dentro da faixa em que a inversão da paralaxe é legítima [4].

3.2. Completeza

Apliquei a Equação (4) contando as estrelas dentro de raios crescentes. O resultado está na Figura 1 e na Tabela 1. Abaixo de 8 pc a razão oscila bastante, o que é esperado: são poucas estrelas e a flutuação de Poisson é grande — dentro de 6 pc há apenas 89 objetos, e $1/\sqrt{89} = 11\%$. A partir de 8 pc a curva estabiliza em 0,31 e assim permanece até o fim da lista, variando menos de 5% em todo o intervalo.

O patamar autoriza usar $R = 18,4 \text{ pc}$ com $N = 2000$. Ele também diz algo fisicamente relevante: em uma escala de vinte parsecs a densidade estelar é uniforme, o que é esperado, já que a altura de escala do disco fino é de algumas centenas de parsecs.

Tabela 1. Teste de completeza e densidade resultante. A razão $N(< d)/d^3$ é constante a partir de 8 pc, o que indica densidade uniforme e catálogo completo. A incerteza de n é de Poisson.

d (pc)	$N(< d)$	N/d^3 (pc $^{-3}$)	n (pc $^{-3}$)
6,0	89	0,412	$0,098 \pm 0,010$
8,0	157	0,307	$0,073 \pm 0,006$
10,0	311	0,311	$0,074 \pm 0,004$
12,0	557	0,322	$0,077 \pm 0,003$
14,0	852	0,311	$0,074 \pm 0,003$
16,0	1287	0,314	$0,075 \pm 0,002$
18,4	2000	0,321	$0,077 \pm 0,002$

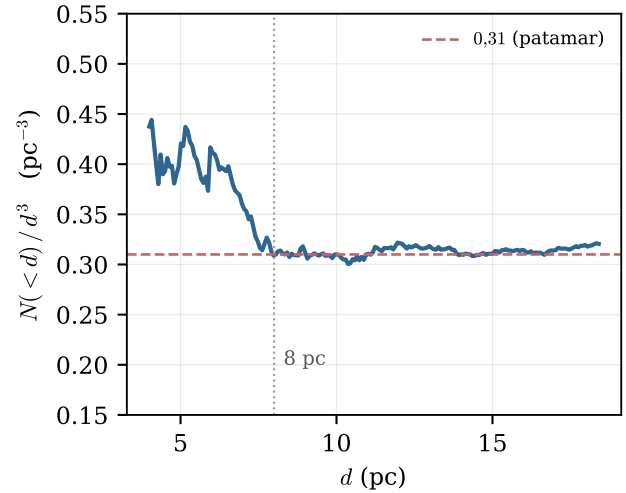


Figura 1. Teste de completeza. Se a densidade for uniforme, $N(< d)/d^3$ é constante. O patamar em 0,31 começa em 8 pc e vai até o limite da amostra; a subida à esquerda é flutuação de Poisson, não excesso real de estrelas.

3.3. O diagrama cor–magnitude

Com a Equação (2) calculei M_G para todas as estrelas e construí o diagrama da Figura 2. Duas populações aparecem separadas sem ambiguidade. A faixa diagonal é a sequência principal, que concentra a quase totalidade da amostra. O grupo destacado no canto inferior esquerdo — fraco e azul ao mesmo tempo, portanto quente e pequeno — são anãs brancas.

Adotei como critério de separação $M_G > 10$ e $G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}} < 1,5$, escolhido por inspeção do próprio diagrama: a linha horizontal separa as duas nuvens em luminosidade e a vertical evita que as anãs vermelhas mais frias, que também são fracas, sejam contadas como anãs brancas. Com esse critério há 116 anãs brancas e 1884 estrelas de sequência principal, ou $5,8\% \pm 0,5\%$ do total. O critério importa: relaxando o corte de cor para 2,0 a contagem sobe para 123, uma variação de 6% — maior que a incerteza de Poisson e portanto uma incerteza sistemática do método, não do dado.

O topo do diagrama merece atenção: a estrela mais luminosa da amostra tem $M_G = 2,1$, e não há nenhuma gigante. Parte disso é real — gigantes são raras por unidade de volume, porque a fase de gigante dura pouco. Mas parte é artefato: como registrado no início desta seção, Pollux, Arcturus e Capella estão dentro de 18,4 pc e foram removidas

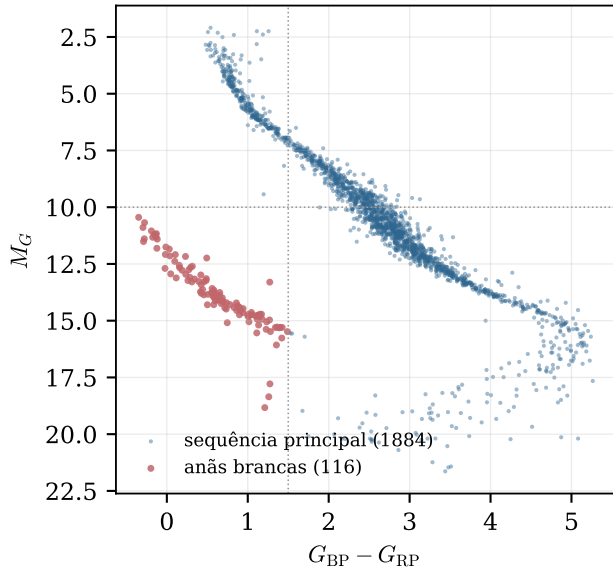


Figura 2. Diagrama cor-magnitude das 2000 estrelas. As linhas pontilhadas marcam o critério adotado para separar as duas populações. Note que a sequência principal se estende até $M_G \approx 20$: a amostra é dominada por anãs vermelhas, e o topo do diagrama está vazio.

pelo limite de saturação. O diagrama, portanto, não pode ser usado para estimar a fração de gigantes.

3.4. A densidade estelar local

Com $N = 2000$ e $R = 18,407$ pc, o volume é $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = 2,61 \times 10^4$ pc³, e a Equação (3) dá

$$n = 0,0766 \pm 0,0017 \text{ pc}^{-3}, \quad (6)$$

em que a incerteza é apenas estatística ($1/\sqrt{2000} = 2,2\%$).

O censo da vizinhança solar dentro de 10 pc, que inclui anãs marrons e companheiras de sistemas múltiplos, reúne cerca de $0,10 \text{ pc}^{-3}$ [5, 2]. O valor medido aqui corresponde a 77% desse número. A diferença, $0,023 \text{ pc}^{-3}$, equivale a 13,8 vezes a incerteza estatística: não é flutuação, é efeito sistemático, e vale mais discuti-lo do que lamentá-lo.

Três causas explicam o déficit, em ordem de importância estimada. *Companheiras não resolvidas.* Cerca de um terço dos sistemas da vizinhança solar é múltiplo, e pares separados por menos de um segundo de arco não entram no catálogo como duas fontes. *Anãs marrons.* O censo de referência as inclui; elas não são estrelas, e o *Gaia* só detecta as mais próximas e mais quentes — por definição de amostra, esta análise mede densidade de estrelas, não de objetos subestelares. *Saturação no extremo brilhante.* As dez a quinze estrelas mais brilhantes do volume estão ausentes; em número são menos de 1%, de modo que essa causa afeta pouco a densidade, embora arruine qualquer estimativa sobre gigantes.

A primeira e a segunda causas, somadas, são da ordem dos 23% que faltam, o que torna o resultado consistente com o censo de referência *depois* de reconhecido o que cada amostra conta. A conclusão metodológica é que a incerteza

dominante deste tipo de medida nunca é a contagem: é a definição do que está sendo contado.

3.5. Cinemática: o que os dados dizem e o que não dizem

Apliquei a Equação (5) a toda a amostra e obtive a velocidade espacial para as 1439 estrelas com velocidade radial medida (Figura 3). O maior movimento próprio é o da estrela de Barnard, $\mu = 10,39''$ por ano a 1,83 pc, o que dá $v_t = 90 \text{ km s}^{-1}$. A distribuição de v tem mediana de 42 km s^{-1} e uma cauda: 97 estrelas ultrapassam 100 km s^{-1} , valores típicos de disco espesso e halo.

Duas estrelas, porém, não sobreviveram à verificação. Ambas aparecem no topo da lista de velocidades, com $v_r = -414$ e -374 km s^{-1} , mas com velocidades tangenciais de apenas 40 e 4 km s^{-1} — e ambas caem na região das anãs brancas do diagrama cor-magnitude. Para que essas medidas fossem reais, o vetor velocidade das duas teria de estar alinhado com a linha de visada dentro de poucos graus, duas vezes, em pouco mais de cem objetos. Além disso, a velocidade radial espectroscópica de anãs brancas é notoriamente difícil, porque suas linhas são largas e deslocadas pelo redshift gravitacional. Descartei as duas medidas e registro aqui a decisão, que não altera nenhum resultado deste artigo — a densidade não depende da cinemática — mas alteraria bastante qualquer conclusão sobre a fração de estrelas de halo na amostra.

4. CONCLUSÃO

A densidade estelar da vizinhança solar medida a partir das 2000 estrelas mais próximas com paralaxe do *Gaia* é $n = 0,0766 \pm 0,0017 \text{ pc}^{-3}$ (Equação 6), dentro de um volume de raio 18,4 pc cuja completeza foi verificada, e não suposta, pelo comportamento de $N(< d)/d^3$.

A incerteza citada é estatística e vale 2,2%, mas ela não é a limitação real da medida. O erro que domina é sistemático e vem da definição da amostra: o catálogo não resolve companheiras próximas, não inclui anãs marrons e perde as estrelas mais brilhantes. Esses três efeitos, e não a contagem, respondem pelos 23% que separam o resultado do censo de referência. É por isso que o número medido não deve ser lido como uma discordância: as duas contagens contam coisas diferentes, e a comparação só é informativa depois de dito o quê.

Melhorar a medida não passa por mais estrelas nem por paralaxes melhores — as distâncias já têm precisão de 1%. Passa por resolver as binárias próximas, o que exige imageamento de alta resolução angular ou astrometria de longo período, e por combinar o catálogo óptico com levantamentos no infravermelho, onde as anãs mais frias aparecem. Uma segunda melhoria seria repetir a análise separando as populações por cor, o que daria a função de luminosidade local em vez de um único número.

REFERÊNCIAS

- [1] CARROLL, B. W.; OSTLIE, D. A. *An Introduction to Modern Astrophysics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [2] LIMA, R. C. R. de. *Astrofísica Moderna: capítulos de estudo*. UDESC, 2026. Capítulo 1 e Laboratório de dados 1.

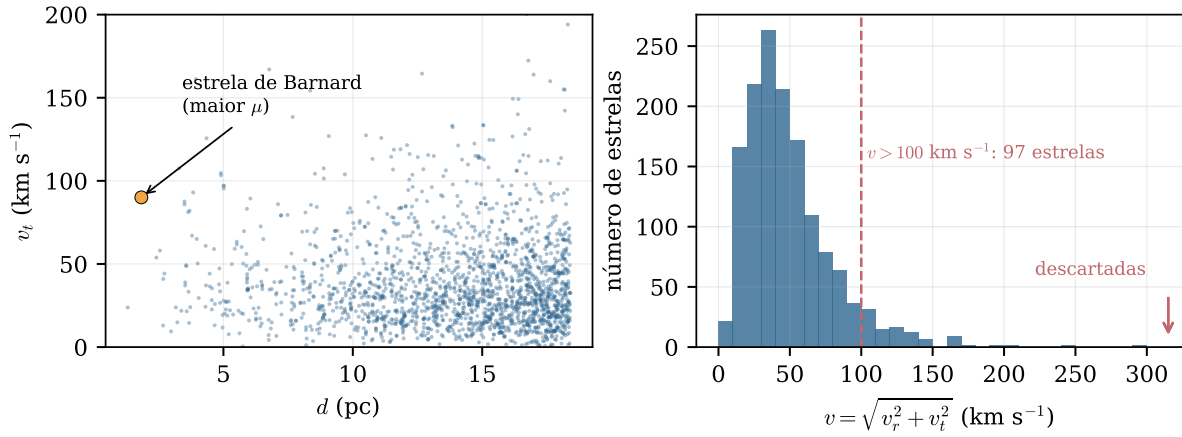


Figura 3. Cinemática da amostra. **Esquerda:** velocidade tangencial contra distância; a ausência de pontos com v_t alto a pequena distância é efeito de seleção, porque um mesmo movimento próprio corresponde a v_t menor quando a estrela está perto. **Direita:** distribuição da velocidade espacial das 1439 estrelas com velocidade radial medida. As duas medidas descartadas estão indicadas.

Disponível em: <https://rafaelcrdelima.github.io/Astronomia/>.

- [3] GAIA COLLABORATION; VALLENARI, A. *et al.* Gaia Data Release 3: summary of the content and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, v. 674, A1, 2023.
- [4] LURI, X. *et al.* Gaia Data Release 2: using Gaia parallaxes. *Astronomy & Astrophysics*, v. 616, A9, 2018.
- [5] HENRY, T. J. *et al.* The Solar Neighborhood XLIV: RECONS discoveries within 10 parsecs. *The Astronomical Journal*, v. 155, n. 6, p. 265, 2018.