

TEMPO DE VIDA DE MANCHAS ESTELARES

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa - Pró-reitoria de Pesquisa e
Pós-Graduação

Mariane Fernandez Medeiros ¹
Apoio: *PIBIC CNPq*

Adriana Benetti Marques Valio ²

Escola de Engenharia (EE) ¹

Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM) ²

<10409613@mackenzista.com.br>
<avalio@craam.mackenzie.br>

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estimar o tempo de vida de manchas estelares a partir de dados obtidos por meio do método de trânsitos planetários que permite mapear a superfície estelar com base nas variações de brilho causadas pela passagem de exoplanetas. Foram estudadas manchas de 9 estrelas, utilizando dois códigos distintos em linguagem Python, desenvolvidos para tratar diferentes volumes de dados. Para o agrupamento das manchas, foi implementado um algoritmo de clustering (K-Means), buscando identificar conjuntos de pontos relacionados a uma mesma mancha estelar por meio da proximidade espacial e temporal. Em seguida, foi realizado o cálculo da média de tempo de vida para os maiores clusters detectados. As estimativas foram comparadas entre as estrelas, e os resultados indicam variabilidade significativa, variando de 5 a 40 dias. Além disso, buscou-se verificar se a relação entre área e tempo de vida obedece à Lei de Gnevyshev–Waldmeier, utilizada para manchas solares. Os principais resultados são discutidos qualitativamente.

Palavras-chave: Atividade estelar; mancha estelar; trânsito planetário.

ABSTRACT

This study aims to estimate the lifetime of starspots based on data obtained through the planetary transit method, which enables mapping of the stellar surface using brightness variations caused by exoplanetary transits. Starspots from 9 stars were analyzed using two distinct Python codes, designed to accommodate datasets of varying sizes. A clustering algorithm (K-Means) was applied to group data points associated with the same starspot based on spatial and temporal proximity. Subsequently, the average lifetime of the largest detected clusters was calculated for each star. The estimates revealed significant variability among the stars, varying between 5 and 40 days. Furthermore, the study examined whether the relation between spot area and lifetime follows the Gnevyshev–Waldmeier law, known from solar studies. The main results are presented and qualitatively discussed.

Keywords: Stellar activity; Starspots; Exoplanet transit.

1. INTRODUÇÃO

As manchas solares são conhecidas desde o início do século XVII, quando Galileu Galilei, observou pela primeira vez regiões escuras transitórias na superfície do Sol. Essas regiões, denominadas manchas solares, são formadas por intensas concentrações de campo magnético, que inibem a transferência de calor da camada interna para a superfície, tornando-as visualmente mais frias e escuras que o restante da fotosfera. Desde então, esses fenômenos têm sido objeto de estudo contínuo, por fornecerem importantes pistas sobre a dinâmica interna do Sol e seu ciclo magnético.

Com o avanço da astrofísica estelar, descobriu-se que este fenômeno não é exclusivo do Sol. Outras estrelas também apresentam regiões de atividade magnética semelhantes, denominadas manchas estelares. Embora não possam ser observadas diretamente como no caso do Sol, métodos indiretos permitem sua detecção e análise. Um deles é o método de trânsito, proposto por Silva (2003), que se baseia na análise da curva de luz de uma estrela durante o trânsito de um exoplaneta. Quando o planeta transita sobre uma mancha estelar, ocorrem pequenas variações na curva de luz, que podem ser modeladas para extrair informações sobre o tamanho, posição e intensidade da mancha.

O estudo de manchas estelares é relevante por sua ligação com o campo magnético estelar e o funcionamento do dínamo estelar, que é o mecanismo físico responsável pela geração e manutenção de campos magnéticos em corpos celestes (PUCRS). O comportamento das manchas, especialmente seu tempo de vida, está diretamente relacionado à estrutura e à rotação das estrelas, podendo variar de acordo com a massa, idade, temperatura, período de rotação e outras propriedades estelares. Além disso, estudar essas características em outras estrelas pode ajudar a compreender melhor o passado e o futuro do nosso próprio Sol, fornecendo uma base comparativa para estudos sobre clima espacial e atividade magnética.

Um dos modelos que relaciona características físicas das manchas com sua evolução temporal é a lei de Gnevyshev–Waldmeier, que estabelece uma correlação entre a área máxima de uma mancha solar e seu tempo de vida. Verificar essa relação em manchas estelares constitui um dos desafios atuais da astrofísica estelar.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estimar o tempo de vida médio das manchas estelares de 11 estrelas com planetas em trânsito, cujos dados foram previamente mapeados por meio do método de trânsitos. Para isso, foram utilizados dois algoritmos desenvolvidos em Python, adaptados ao volume de dados disponível para cada estrela. A análise foi baseada em técnicas de agrupamento e clustering, aplicadas a registros de longitude e tempo das manchas. A partir dos resultados obtidos, buscou-se caracterizar os tempos de vida médios das manchas em cada estrela e investigar possíveis correlações com propriedades físicas

estelares e planetárias, como período de rotação, massa, temperatura efetiva e características orbitais dos exoplanetas.

Este estudo contribui para o entendimento da atividade magnética em estrelas, destacando a importância do uso de ferramentas computacionais na análise de dados astrofísicos, bem como na modelagem de fenômenos complexos que não podem ser observados diretamente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A Lei de Gnevyshev-Waldmeir (Nagovitsyn et al. 2019 e Basri et al., 2022) é uma fórmula que relaciona a área e o tempo de vida dos grupos de manchas solares, sendo a regra geral para todos os tempos de vida

$$A_{\max} = (12,1 \pm 0,70) LT,$$

onde $A_{\max}$ é a área máxima do grupo de manchas solares durante a vida útil e LT é a vida útil do grupo de manchas solares. Analisando a fórmula é possível perceber que a área das manchas é proporcional ao seu tempo de vida.

Em Silva (2003) foi apresentado pela primeira vez um modelo do método de trânsito para a identificação de manchas estelares, através deste método foi possível mapear manchas de diversas estrelas. Estimando o período de rotação da estrela, é possível construir um mapa das longitudes das manchas para cada trânsito, isto é, em função do tempo.

Até o presente, um total de 14 estrelas tiveram suas manchas analisadas durante o trânsito de um ou mais exoplanetas orbitando a estrela hospedeira. A lista das estrelas estudadas é apresentada na Tabela 1, assim como as referências dos artigos onde o estudo está descrito. Na tabela estão presentes apenas as estrelas estudadas neste artigo. A partir destes mapas, é possível identificar um conjunto de manchas com a mesma longitude e estimar seu tempo de vida.

Tabela 1: Estrelas com manchas caracterizadas pelo método de mapeamento por trânsitos.

Estrela	Período orbital do planeta (dias)	Raio da estrela (R_{sol})	Número de manchas	Referência
---------	-----------------------------------	--------------------------------------	-------------------	------------

CoRoT-2	1.7429964	0.91 ± 0.02	392	Silva-Válíio & Lanza (2011)
CoRoT-4	9.20205	1.17 ± 0.03	10	Valio et al. (2024)
CoRoT-5	4.0379148	1.19 ± 0.04	32	Valio et al. (2024)
CoRoT-6	8.886593	1.03 ± 0.03	31	Valio et al. (2024)
CoRoT-8	6.212445	0.80 ± 0.01	21	Valio et al. (2024)
CoRoT-18	1.90009057	1.0 ± 0.1	21	Valio et al. (2024)
Kepler-17	1.4857108	1.05 ± 0.03	1069	Valio et al. (2017)
Kepler-45	2.455239	0.6 ± 0.1	34	Zaleski et al. (2020)
Kepler-71	3.90512	0.87 ± 0.04	76	Zaleski et al. (2019)
Kepler-1651 A	9.87863917	0.50 ± 0.03	28	Valio et al. (2024)
KOI-883	12.98495573	0.58	78	Zaleski et al. (2022)

3. METODOLOGIA

Os dados utilizados nas análises foram retirados das referências presentes na Tabela 1 e convertidos em tabela Excel. Apesar das tabelas informarem dados de tempo, número da mancha, longitude em relação à estrela em cada registro, intensidade da luz e raio da estrela, foram necessários apenas os três primeiros na análise computacional.

Todas as estrelas, exceto a Kepler-17, tiveram os valores de tempo alterados na análise, pois nas tabelas os dias não foram multiplicados pelo período orbital de cada planeta, que é necessário para um resultado correto. O período orbital de cada planeta está na Tabela 1, citada acima no Referencial Teórico.

A análise dos dados foi realizada em linguagem Python, na plataforma Visual Studio Code (VS Code), utilizando dois códigos distintos desenvolvidos por mim (https://github.com/marianefernandez/c-digos_an-lise_clustering_estrelas.git), conforme a quantidade e variabilidade dos registros disponíveis de manchas para cada estrela. Para as estrelas com grande número de manchas, no caso Kepler-17, CoRoT-2, Kepler-71 e KOI-883, foi desenvolvido um código mais complexo, estruturado em três etapas principais: pré-processamento, agrupamento inicial e clustering. Já para as outras estrelas, CoRoT-5, CoRoT-6, CoRoT-18, Kepler-45 e Kepler-1651, foi aplicada uma abordagem mais direta, com eliminação de etapas intermediárias. As estrelas Corot-4 e Corot-8 foram excluídas da pesquisa pois não possuíam manchas suficientes para que a análise por aproximação fosse efetiva.

No primeiro código, para grandes conjuntos de dados, inicialmente os valores de tempo, longitude e número da mancha foram extraídos de planilhas em formato Excel. Esses dados passaram por um tratamento para conversão numérica e remoção de valores inválidos. Em seguida, os valores numéricos foram transformados em uma matriz, e foi aplicado um algoritmo de agrupamento baseado na proximidade angular (longitude), utilizando uma função personalizada com um limiar (threshold) para identificar grupos preliminares de manchas. Os três maiores grupos foram selecionados para análise posterior.

A etapa seguinte consistiu na aplicação do algoritmo de clustering K-Means, com entrada composta pelos pares (longitude, tempo). Foram testadas 1000 diferentes sementes aleatórias (random_state), e a melhor foi selecionada com base na menor média de tempo de vida dos clusters válidos (isto é, com no mínimo três pontos). A quantidade de sementes aleatórias a serem testadas foi escolhida com base apenas na capacidade de processamento da máquina utilizada.

Na abordagem para conjuntos menores, a etapa de agrupamento inicial foi omitida, pois a pouca quantidade de registros e/ou proximidade entre os valores de longitude não era suficiente para que este passo fosse relevante. Portanto, os dados foram extraídos das planilhas Excel, passaram pelo tratamento para conversão numérica e exclusão de valores inválidos, e então, utilizados diretamente como entrada no algoritmo K-Means.

Nos dois códigos a configuração do número de clusters variou de acordo com cada estrela, e após o clustering, foram selecionados apenas os grupos com pelo menos três registros para o cálculo do tempo de vida, definido como a diferença entre os maiores e menores valores de tempo dentro de cada cluster.

Após a aplicação dos métodos de análise, foram gerados três gráficos para cada estrela: (I) distribuição geral dos registros de manchas, (II) resultado do agrupamento com K-Means, e (III) histograma com os tempos de vida dos clusters válidos. Foram calculadas também a média e os desvios padrão superior e inferior dos tempos de vida das manchas para cada estrela, com o objetivo de comparar a atividade estelar entre os diferentes sistemas.

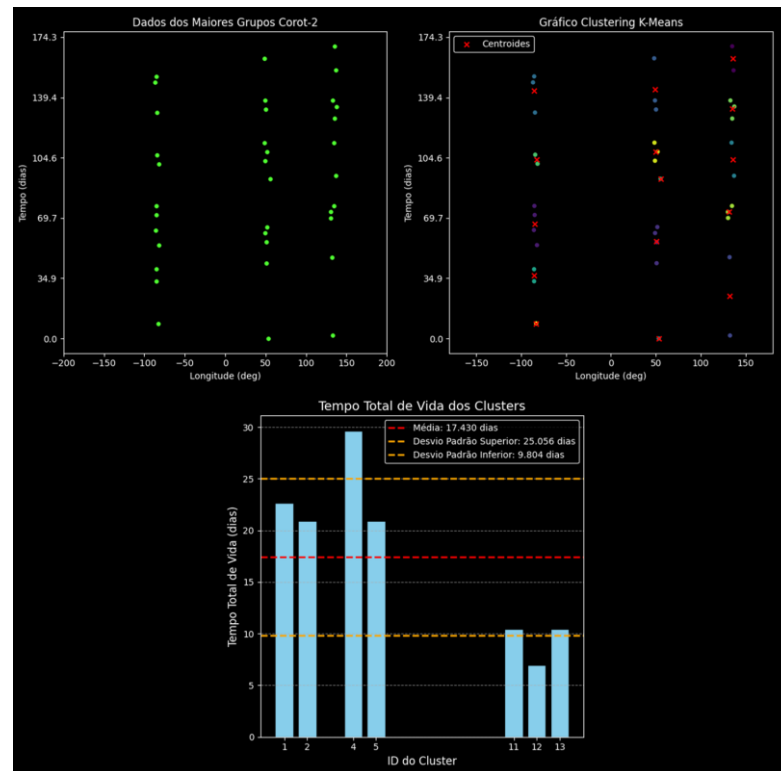
4. RESULTADO E DISCUSSÃO

A análise foi realizada individualmente para cada uma das 9 estrelas, considerando a metodologia descrita anteriormente. Para cada estrela, foi gerada uma figura contendo os gráficos (I), (II) e (III), citados acima. O tempo de vida médio foi calculado para clusters com no mínimo três registros, e o desvio padrão superior e inferior foram determinados para avaliar a dispersão dos dados.

4.1 CoRot-2

O agrupamento inicial, com $\text{threshold} = 3$, resultou em três grandes grupos de manchas, posteriormente refinados pelo K-Means com $\text{seed} = 193$ e 15 clusters. A Figura 1 apresenta a distribuição dos dados, mostra o resultado do clustering e o histograma de tempos de vida, que indica valores médios de aproximadamente 17 dias, compatíveis com estudos anteriores.

Figura 1 - Gráficos CoRot-2

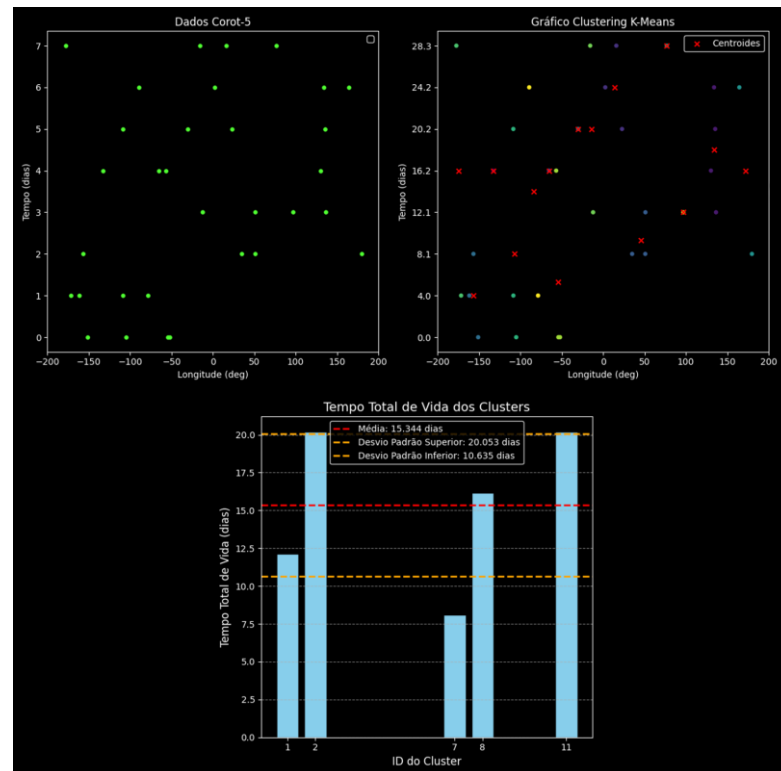


Fonte: própria (2025)

4.2 CoRot-5

Com menor volume de dados, a análise foi feita diretamente via K-Means (seed = 3; 15 clusters). A Figura 2 mostra os dados brutos, o agrupamento e o histograma, revelando tempos de vida médios de aproximadamente 15 dias e baixa dispersão.

Figura 2 - Gráficos CoRot-5

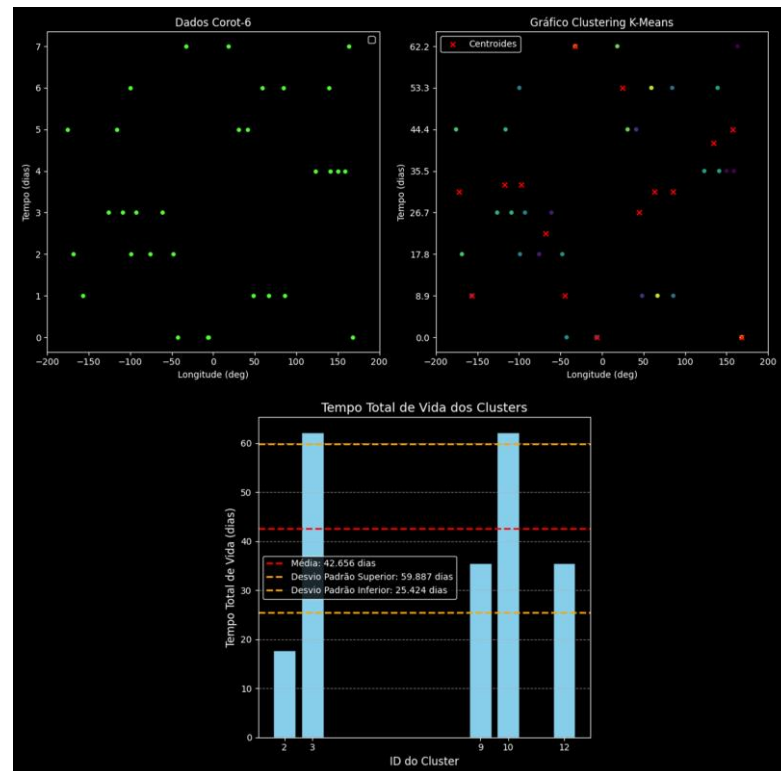


Fonte: própria (2025)

4.3 CoRot-6

Utilizando a seed = 111 e 15 clusters, a Figura 3 mostra tempos de vida médios de aproximadamente 42 dias. Essa longa duração pode estar associada à rotação mais lenta da estrela.

Figura 3 - Gráficos CoRot-6

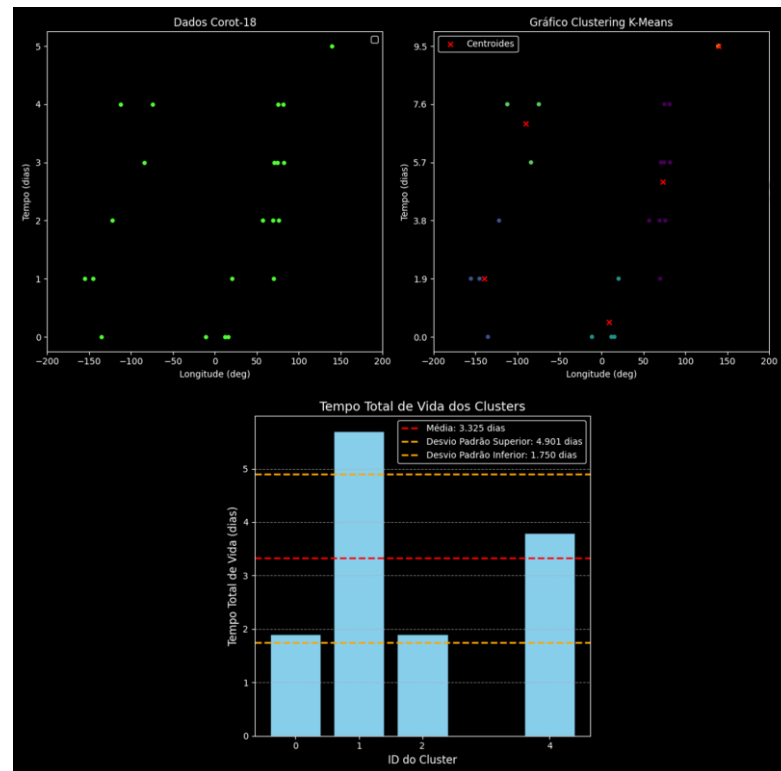


Fonte: própria (2025)

4.4 CoRot-18

Com seed = 1 e 5 clusters, os resultados na Figura 4 indicam tempos de vida relativamente curtos, de aproximadamente 3 dias. A pequena quantidade de clusters sugere regiões ativas mais localizadas e menos persistentes.

Figura 4 - Gráficos CoRot-18

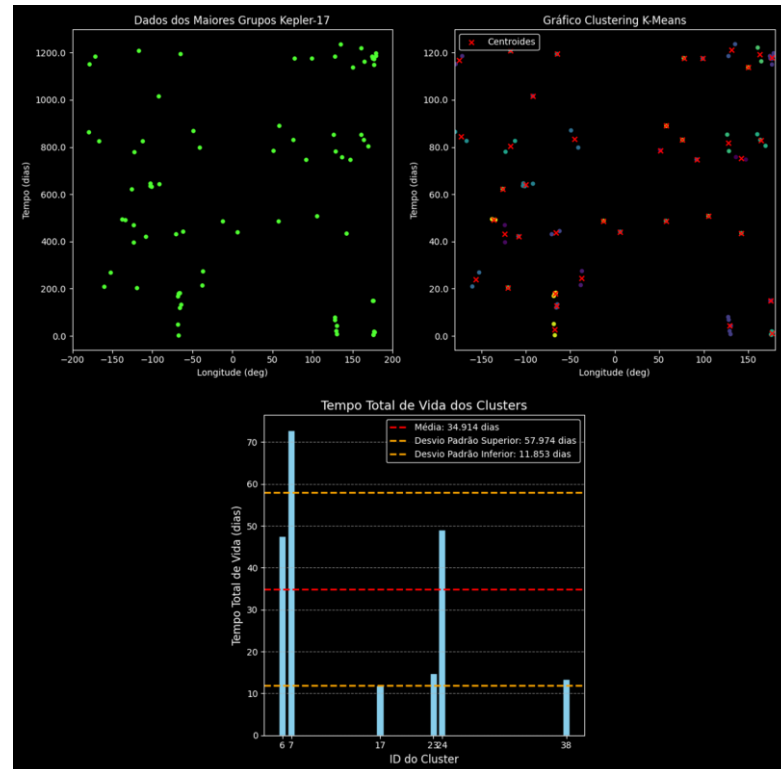


Fonte: própria (2025)

4.5 Kepler-17

Com threshold = 1,3, seed = 55 e 40 clusters, esta foi a estrela com maior número de manchas mapeadas. A Figura 5 mostra que os tempos de vida médios foram cerca de 35 dias.

Figura 5 - Gráficos Kepler-17

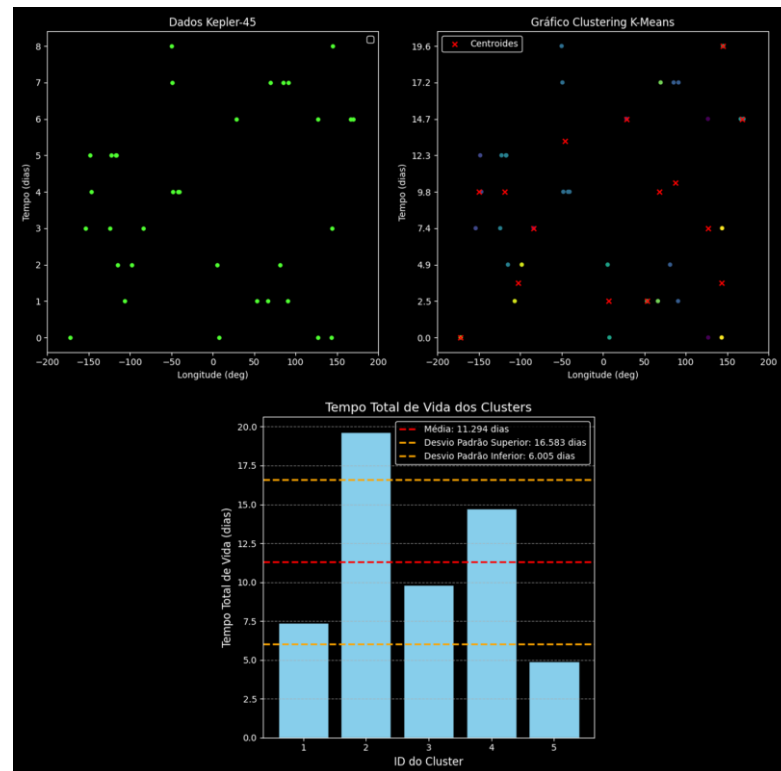


Fonte: própria (2025)

4.6 Kepler-45

Com seed = 43 e 15 clusters, a Figura 6 revela tempos de vida de aproximadamente 11 dias, sugerindo estruturas magnéticas relativamente estáveis para uma estrela de menor massa.

Figura 6 - Gráficos Kepler-45

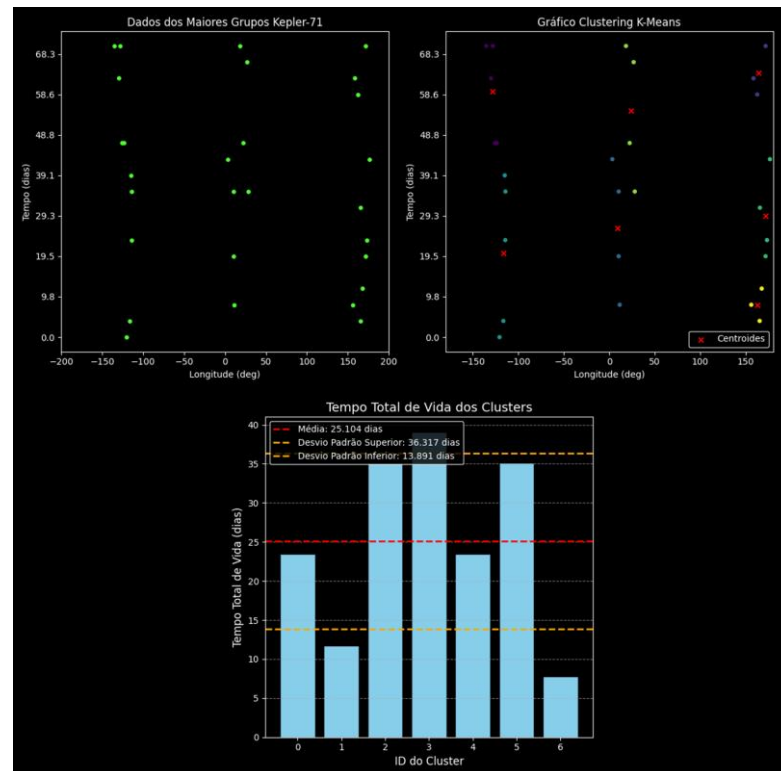


Fonte: própria (2025)

4.7 Kepler-71

Com threshold = 10, seed = 43 e 7 clusters, a Figura 7 indica tempos de vida de cerca de 25 dias, com a predominância de poucas regiões ativas durante o período de observação.

Figura 7 - Gráficos Kepler-71

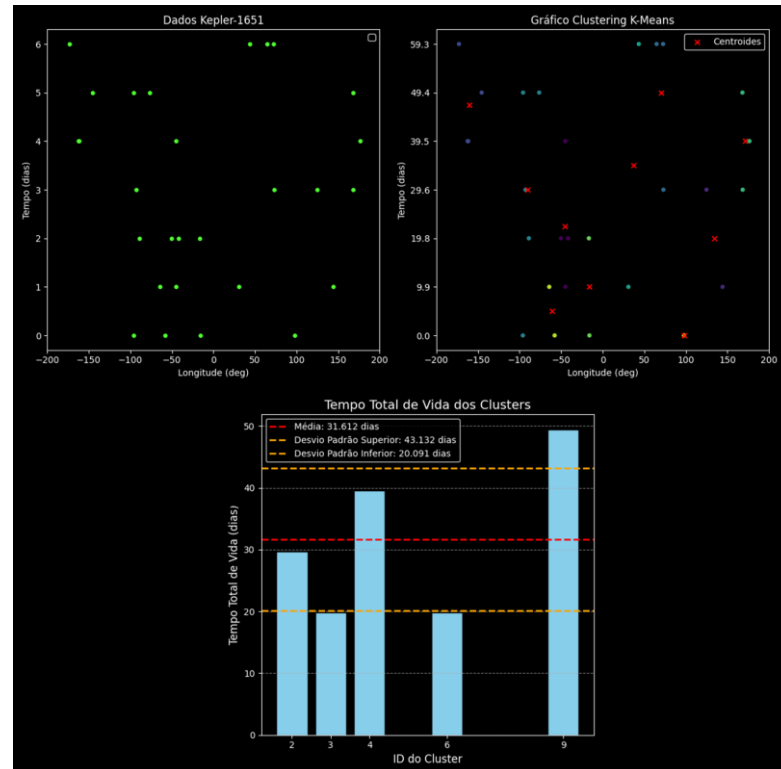


Fonte: própria (2025)

4.8 Kepler-1651 A

Com $\text{seed} = 1$ e número de clusters = 10, a análise da Kepler-1651 é mostrada na Figura 8. Os resultados indicam tempos de vida de aproximadamente 32 dias e uma distribuição relativamente uniforme entre os clusters.

Figura 8 - Gráficos Kepler-1651

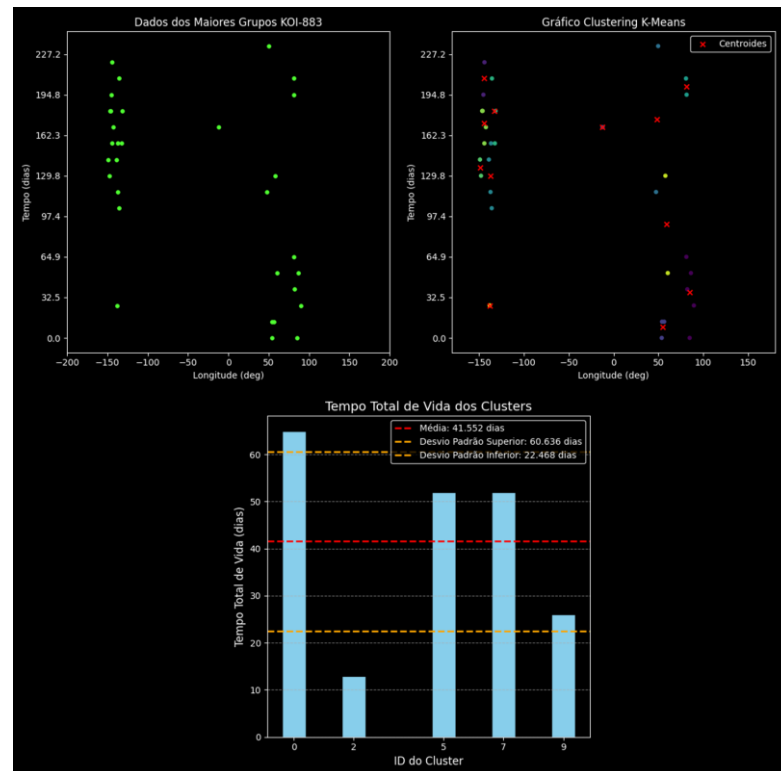


Fonte: própria (2025)

4.9 KOI-883

Com $\text{threshold} = 7$, $\text{seed} = 245$ e número de clusters = 12, a Figura 9 apresenta um dos maiores tempos médios de vida, sugerindo manchas mais estáveis.

Figura 9 - Gráficos KOI-883

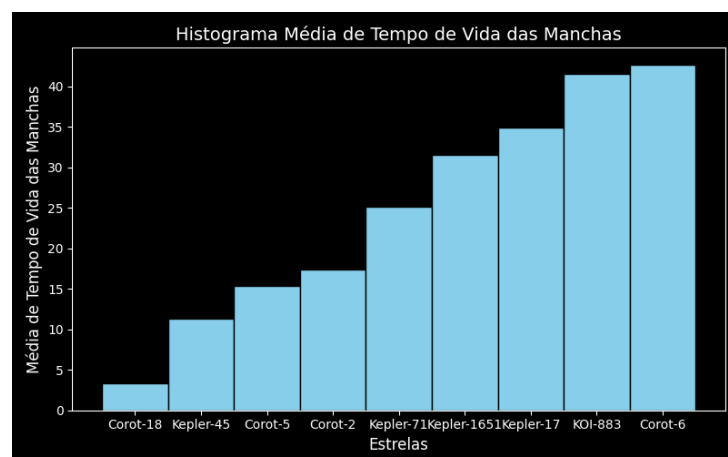


Fonte: própria (2025)

4.9 Visão geral

Também foi feito um histograma (Figura 10) para ilustrar os tempos de vida médios dos clusters em cada estrela.

Figura 10 – Histograma comparativo dos tempos de vida médios

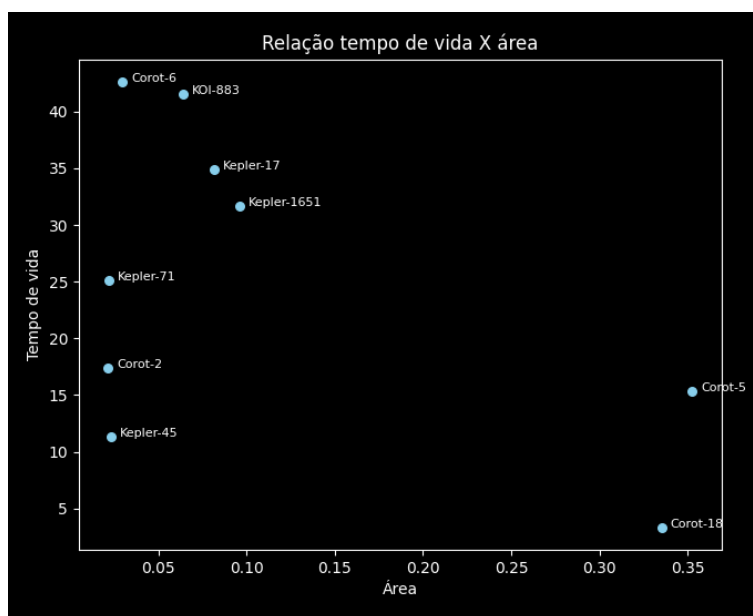


Fonte: própria (2025)

4.10 Discussão

Na Figura 11, apresentamos a relação entre a área média das manchas estelares (em relação à estrela) e o tempo de vida médio para as nove estrelas analisadas. A Lei de Gnevyshev–Waldmeier prevê uma correlação linear entre essas grandezas, expressa como $A_{\text{max}} = (12,1 \pm 0,70)LT$ (Nagovitsyn et al., 2019; Basri et al., 2022). No entanto, os resultados obtidos neste trabalho não seguiram a tendência esperada: os pontos se apresentam bastante dispersos, sem evidência clara de proporcionalidade direta entre a área e o tempo de vida.

Figura 11 - Relação da área e tempo de vida



Fonte: própria (2025)

Observa-se que estrelas como CoRoT-6 e KOI-883 apresentaram tempos de vida médios elevados, mas associados a áreas pequenas. Por outro lado, CoRoT-5 e CoRoT-18 mostraram áreas médias relativamente grandes, mas com tempos de vida significativamente menores do que o previsto pela lei solar. Esse comportamento sugere que, ao contrário do observado no Sol, a evolução de manchas em estrelas ativas pode ser fortemente modulada por fatores adicionais além da área, tais como a taxa de rotação e a intensidade do campo magnético.

A comparação com os resultados de Netto (2022) para CoRoT-2 e Kepler-17 mostra consistência parcial, com resultados extremamente similares para CoRoT-2, mas muito discrepantes para a Kepler-17. Enquanto os tempos médios obtidos neste estudo estão na mesma ordem de grandeza, a dispersão é maior, possivelmente devido ao uso do algoritmo

de clustering, que identificou estruturas menores e de curta duração que não foram separadas na análise anterior. Esse resultado reforça que a metodologia empregada é mais sensível, mas também evidencia que o comportamento das manchas não pode ser descrito apenas por uma relação linear simples entre área e tempo de vida.

Assim, os achados sugerem que a Lei de Gnevyshev–Waldmeier não se aplica de forma direta às manchas estelares investigadas. Embora a lei represente um guia valioso para o caso solar, sua extrapolação para outras estrelas parece depender de parâmetros adicionais. Estudos futuros, com estimativas mais precisas da área das manchas e amostras maiores de estrelas, serão fundamentais para avaliar até que ponto a lei pode ser generalizada além do Sol.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou estimar o tempo de vida de manchas estelares a partir de dados de trânsitos planetários, aplicando técnicas de agrupamento (K-Means) para identificar grupos de manchas em nove estrelas. A análise permitiu calcular tempos médios de vida dos clusters e investigar a relação entre esses valores e a área média das manchas.

Os resultados mostraram uma ampla variabilidade entre as estrelas, com tempos de vida que em parte se alinham a estudos anteriores, mas que não seguiram a relação linear prevista pela Lei de Gnevyshev–Waldmeier para o caso solar. Em particular, verificou-se que algumas estrelas apresentam manchas com tempos de vida elevados mesmo para manchas pequenas, enquanto outras exibem o comportamento oposto, indicando que fatores adicionais, como rotação estelar e intensidade do campo magnético, desempenham papel relevante.

Dessa forma, conclui-se que a extrapolação da Lei de Gnevyshev–Waldmeier para o regime estelar não é direta, embora tendências qualitativas possam ser reconhecidas. Os resultados reforçam a importância do uso de métodos computacionais na análise de manchas estelares e apontam para a necessidade de estudos complementares com amostras mais amplas, a fim de avançar na compreensão da evolução magnética em diferentes tipos de estrelas.

6. REFERÊNCIAS

NAGOVITSYN, Y.A., IAVANOV, V.G. & OSIPOVA, A.A. Features of the Gnevyshev-Waldmeier Rule for Various Lifetimes and Areas of Sunspot Groups. *Astronomy Letters*, vol 45, p. 695-699, 2019.

NETTO, Dirceu Y. S.. Evolução Temporal de Mancha Estelares. Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Física. Mackenzie, 2013. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/pt/bolsas/138028/evolucao-temporal-de-manchas-estelares/>>. Acesso em: 10/04/2024.

PUCRS. Museu de Ciências e Tecnologia. Dia Internacional do Planeta Terra. Museu de Ciências e Tecnologia. Disponível em: <<https://www.pucrs.br/mct/dia-internacional-do-planeta-terra/#:~:text=O%20efeito%20d%C3%ADnamo%20%C3%A9%20uma,que%20gera%20uma%20corrente%20el%C3%A9trica>>. Acesso em: 08/04/2024.

SILVA, Adriana V. R.. Method for Spot Detection on Solar-like Stars. The Astrophysical Journal, vol 585, no. 2, 2003.

SILVA-VALIO, Adriana and LANZA, Antonino. F.. Time evolution and rotation of starspots on CoRoT-2 from the modelling of transit photometry. The Astrophysical Journal, vol 529, 2011.

VALIO, Adriana, ESTRELA, Raissa, NETTO, Yuri, BRAVO, J. P. and DE MEDEIROS, J. R.. Activity and Rotation of Kepler-17. The Astrophysical Journal, vol 835, no. 2, p. 294, 2017.

VALIO, Adriana and ARAÚJO, Alexandre. Stellar Obliquity from Spot Transit Mapping of Kepler-210. The Astrophysical Journal, vol 940, no. 2, 2022.

VALIO, A., ARAÚJO, A., Differential rotation of CoRoT stars and a Kepler binary star from starspot transit mapping. The Astrophysical Journal, 2024 (submetido)

ZALESKI, S.M., VALIO, A., CARTER, B.D., MARSDEN, S.C.. Activity and differential rotation of the early M dwarf Kepler-45 from transit mapping. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol 492, p. 5141-5151, 2020.

ZALESKI, S.M., VALIO, A., CARTER, B.D., MARSDEN, S.C.. Dynamo activity of the K dwarf KOI-883 from transit photometry mapping. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol 510, p. 5348-5361, 2022.

ZALESKI, S.M., VALIO, A., CARTER, B.D., MARSDEN, S.C.. Differential rotation of Kepler-71 via transit photometry mapping of faculae and starspots. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol 484, p. 618-630, 2019.

