VARIABILIDADE PLUVIOMÉTRICA EM DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS DE PERNAMBUCO AVALIADA POR CADEIAS DE MARKOV

Sofia Maia Gameiro de Moura [1] ; Antonio Samuel Alves da Silva [2]

RESUMO – A modelagem estocástica da precipitação fornece informações importantes para a gestão hídrica e territorial. Este trabalho avaliou o regime pluviométrico de diferentes zonas climáticas de Pernambuco por meio de cadeias de Markov de primeira ordem, além de relacionar propriedades estatísticas com demandas de cultivos locais. Foram utilizadas séries diárias de precipitação (1961–2019) do *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) para munícipios localizados no Sertão (Petrolina), na transição entre Zona da Mata e Agreste (Chã Grande) e Zona da Mata (Recife, Ipojuca), estimando-se tempos médios de permanência, primeira passagem e retorno. As matrizes de transição indicaram que a probabilidade de persistência do estado seco é superior a 0,77 em todas as localidades. As métricas de longo prazo quantificaram a restrição hídrica no Sertão, onde Petrolina exibiu tempo médio de permanência seco de 16,47 dias e primeira passagem para umidade superior a 24 dias. Em contrapartida, o setor leste revelou regularidade, com tempos médios de retorno do estado chuvoso de 3,55 dias em Ipojuca e 3,84 dias no Recife. A modelagem via cadeias de Markov evidenciou a variabilidade climática regional, servindo como subsídio quantitativo para o planejamento hídrico e zoneamento territorial diante das heterogeneidades do estado.

ABSTRACT – Stochastic modeling of precipitation provides important information for water resources and territorial management. This study evaluated the rainfall regime of different climatic zones in Pernambuco using first-order Markov chains, as well as relating statistical properties to the demands of local crops. Daily precipitation series (1961–2019) from the Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) were used for municipalities located in the Sertão (Petrolina), in the transition between the Zona da Mata and Agreste (Chã Grande), and in the Zona da Mata (Recife, Ipojuca), estimating mean sojourn, first-passage, and return times. The transition matrices indicated that the probability of dry state persistence is greater than 0.77 in all locations. Long-term metrics quantified the water restriction in the Sertão, where Petrolina exhibited a mean dry residence time of 16.47 days and a first-passage time to moisture exceeding 24 days. In contrast, the eastern sector revealed regularity, with mean return times for the rainy state of 3.55 days in Ipojuca and 3.84 days in Recife. Modeling via Markov chains evidenced the regional climate variability, serving as a quantitative subsidy for water planning and territorial zoning given the heterogeneities of the state.

Palavras-Chave – Cadeias de Markov; Planejamento agrícola; Precipitação.

[1]) Discente no Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife - PE, sofia.moura@ufrpe.br
[2]) Docente no Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife – PE, antonio.sasilva@ufrpe.br

1. INTRODUÇÃO

Nos sistemas hidrológicos, a precipitação pluvial constitui o elemento de entrada mais significativo, desempenhando uma função crucial tanto na avaliação de riscos ambientais quanto na administração dos recursos hídricos, conforme aponta Northrop (2024). Nesse contexto, compreender sua variabilidade espaço-temporal é essencial, especialmente em regiões onde as condições climáticas exercem forte influência sobre a disponibilidade hídrica e as atividades socioeconômicas, como ocorre no Nordeste brasileiro (NEB).

Lacerda *et al.* (2010) destacam a notável suscetibilidade do NEB à instabilidade climática e aos perigos de degradação ambiental. Conforme os autores, a região caracteriza-se por um padrão pluviométrico altamente irregular em termos espaciais e temporais, influenciado por fenômenos climáticos de grande escala, como o *El Niño* e as flutuações de temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico. Tal complexidade climática resulta em episódios frequentes de estiagens prolongadas e chuvas torrenciais.

Dentro dessa dinâmica complexa, o estado de Pernambuco apresenta uma variação de precipitação muito clara conforme se avança para o interior, com uma queda expressiva ocorrendo do litoral para o Sertão. De acordo com dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), enquanto a Região Metropolitana do Recife registra médias anuais que passam dos 2.400 mm, muitas cidades do Agreste e do Sertão enfrentam médias abaixo de 800 mm por ano. Nóbrega e Mariano (2024) explicam que essa variação extrema é reforçada por fatores do relevo, em especial pelo efeito orográfico do Planalto da Borborema, que dificulta a penetração da umidade em direção ao interior do estado, contribuindo para condições mais secas na Depressão Sertaneja.

Para analisar essa severa variabilidade no estado, é preciso usar ferramentas estatísticas que sejam eficientes, rápidas de processar e fáceis de replicar. Nesse contexto, a modelagem por cadeias de Markov surge como uma alternativa para investigar e simular a precipitação diária, abordagem utilizada por Gabriel e Neumann (1962), cujo trabalho discursava sobre a simulação markoviana de ocorrências de precipitação diária em Tel Aviv. Como estrutura estocástica, o modelo é baseado na premissa de que um processo meteorológico evolui sequencialmente através de estados de umidade definidos, onde as probabilidades de mudança ou permanência são regidas por uma matriz estocástica, tornando possível simular numericamente a dinâmica e o regime de chuvas de uma região. Essa abordagem metodológica encontra amparo na literatura científica e tem sido utilizada para caracterizar padrões pluviométricos, a exemplo dos estudos desenvolvidos por Sonnandara e Jayewardene (2015), Raheem *et al.* (2017) e Hajani e Sarma (2023).

Diante do exposto, o presente trabalho tem o objetivo de utilizar a modelagem estocástica via Cadeias de Markov para caracterizar os regimes de precipitação em quatro municípios que representam as transições climáticas e a diversidade da dinâmica agrícola pernambucana: Recife (capital e referência costeira, influenciada por sistemas oceânicos e atmosféricos de grande escala), Ipojuca (representando o cenário produtor de cana-de-açúcar na Zona da Mata), Chã Grande (área de transição climática entre a Zona da Mata e o Agreste) e Petrolina (polo de viticultura no Sertão). Para análise, foi utilizada estimativas diárias de precipitação (1961 a 2019) concebidas por Xavier *et al.* (2022). Com isso, busca-se identificar os padrões climáticos em cada região e auxiliar no planejamento de água e da agricultura em um estado com um clima tão diverso.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaboração da pesquisa, dados diários de precipitação para os municípios de Recife, Ipojuca, Chã Grande e Petrolina, cobrindo o período de 1961 a 2019, foram filtrados do *Brazilian Daily Weather Gridded Data* – BRDWGD, base de dados estimada por Xavier *et al.* (2022). Para a extração das séries temporais, houve o emprego do pacote *brclimr* implementado por Saldanha *et al.* (2023) no ambiente computacional R, disponibilizado pelo R Core Team (2023). A série temporal de cada localidade foi classificada em três estados finitos e discretos $S = \{\text{seco, úmido, chuvoso}\}$. Os limites de chuva diária para definir cada estado seguiram os critérios de Raheem *et al.* (2017): um dia é considerado seco se sua precipitação p for $p \leq 2.5\text{mm}$; úmido se $2.5\text{mm} < p \leq 5\text{mm}$ e chuvoso se $p > 5\text{mm}$.

A análise de como os estados de chuva ocorrem e mudam teve como base a teoria dos processos estocásticos, com o uso específico do modelo clássico de cadeia de Markov de primeira ordem. Conforme as formulações de Grinstead e Snell (1997), assume-se nesse modelo que o comportamento futuro do sistema depende apenas do seu estado presente, ou seja, as condições meteorológicas de hoje dependem apenas do que ocorreu ontem, sem considerar o histórico anterior. Matematicamente, para uma sequência de variáveis aleatórias $\{X_t, t = 0, 1, 2, \dots\}$, a probabilidade de transição é expressa por:

$$P(X_{t+1}|X_t, X_{t-1}, \dots, X_0) = P(X_{t+1}|X_t) \quad (1)$$

Embora o regime de chuvas possa sofrer influências de memórias atmosféricas mais longas, a adoção de uma estrutura de primeira ordem foi selecionada por sua aplicação bem consolidada na literatura meteorológica, a exemplo dos trabalhos de Gabriel e Neumann, (1962), Silva *et al.* (2023)

e Jale *et al.* (2019). Portanto, entende-se não haver prejuízo da sua utilização na presente análise ou na realização de testes de ordens superiores em investigações futuras.

Sendo o espaço de estados composto por três categorias, as probabilidades condicionais de transição p_{ij} são organizadas em uma matriz quadrada e estocástica P, em que $\sum_j p_{ij} = 1$, também sob o embasamento teórico de Grinstead e Snell (1997):

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A partir da matriz de transição, propriedades estatísticas de longo prazo foram calculadas para caracterizar o comportamento pluviométrico das regiões, conforme as proposições de Hillier e Lieberman (2013). Entre essas métricas, calculou-se inicialmente o tempo esperado de permanência, que indica o número médio de dias consecutivos que o processo permanece estagnado em um mesmo estado antes de mudar para outra condição operacional. Paralelamente foi analisado o tempo médio de primeira passagem, definido como o número esperado de dias necessários para que o sistema saia de um estado inicial e alcance um estado destino diferente pela primeira vez. Também determinou-se o tempo médio de retorno, propriedade que estabelece o intervalo médio de dias necessários para que o sistema meteorológico retorne ao seu estado original após tê-lo abandonado. A estimação dessas métricas foi realizada através do pacote *markovchain*, desenvolvido por Spedicato (2017).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As matrizes de transição obtidas para os municípios analisados são apresentadas na Figura 1 sob a forma de um mapa de calor. Na escala de cores adotada, as tonalidades mais quentes, como o vermelho e o marrom, indicam uma elevada probabilidade de transição (valores próximos a 1), enquanto tons de azul representam baixas probabilidades de transição, com valores próximos a 0.

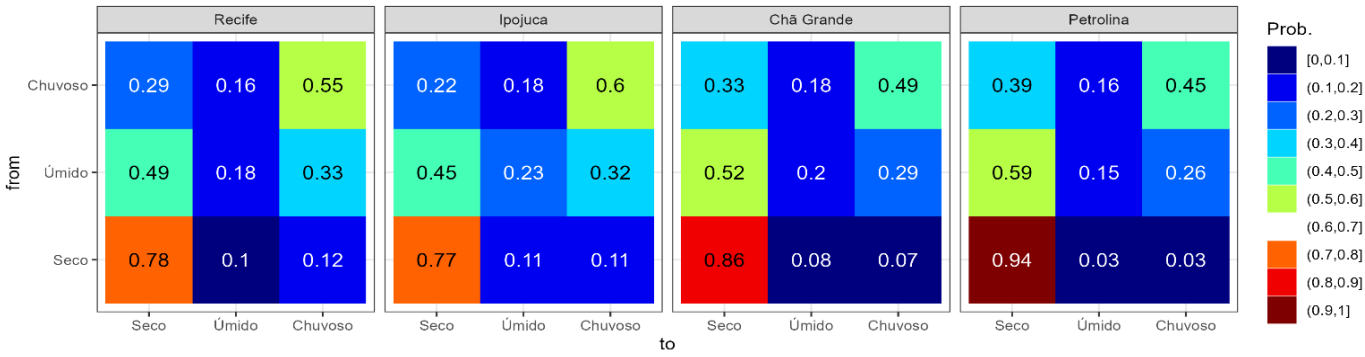


Figura 1- Mapas de calor para as transições de estados meteorológicos em Recife (Região Metropolitana), Ipojuca (Zona da Mata), Chã Grande (transição entre Zona da Mata e Agreste) e Petrolina (Sertão).

Observa-se que a probabilidade de transição de um dia seco para outro dia seco é superior a 0,77 em todos os municípios estudados, com especial destaque para o aumento dessa medida no sentido leste-oeste, variando até 0,94 em regiões de semiárido, o que evidencia a forte oscilação climática ao longo do território do estado de Pernambuco, assim como a persistência de períodos de estiagem que lhe são característicos. Ao analisar o comportamento do estado chuvoso, é notório o efeito da dinâmica espacial costeira evidenciada nos municípios de Ipojuca e Recife, situados na faixa litorânea, que apresentam probabilidades de dias chuvosos (seguidos por dias chuvosos) superiores, de 0,60 e 0,55, respectivamente, quando comparados a Chã Grande (0,49) e Petrolina (0,45).

A partir do tempo médio de permanência, foi realizada a análise da estabilidade temporal dos regimes climáticos nos municípios estudados, sendo possível evidenciar a duração média observada (em dias) em que o sistema meteorológico local permanece retido em um mesmo estado antes de transitar para outra condição. Estes resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tempo Médio de Permanência (em dias)

	Estados da Cadeia de Markov		
Município	Seco	Úmido	Chuvoso
Recife	4,54	1,22	2,22
Ipojuca	4,40	1,30	2,49
Chã Grande	6,98	1,25	1,95
Petrolina	16,47	1,17	1,83

Os resultados apontam para uma disparidade marcante no comportamento do estado seco entre o Sertão e as demais zonas climáticas de Pernambuco pois, enquanto as cidades litorâneas de Recife e Ipojuca apresentam tempos de permanência secos de 4,54 e 4,40 dias, respectivamente, o município de Petrolina exibe uma estabilidade estendida, com média de 16,47 dias consecutivos no estado seco. Essa persistência do tempo seco é fundamental para a consolidação da viticultura local, por exemplo, uma vez que a cultura da videira é altamente sensível ao excesso de umidade, segundo Tonietto e Mandelli (2021).

Por outro lado, a análise fornece um padrão de baixa variação na persistência dos estados úmido e chuvoso entre todos os municípios estudados. O tempo médio de permanência do estado úmido varia de 1,17 a 1,30 dias, enquanto para o estado chuvoso há uma pequena diferença entre 1,83 e 2,49 dias, evidenciando uma rápida alternância desses estados de umidade no território pernambucano. Tal contraste dinâmico entre a alta variabilidade no estado seco e a homogeneidade nas condições de chuva reflete a abrangência climática encontrada no estado de Pernambuco, caracterizado pela transição entre as tipologias climáticas de Köppen de semiárido quente (BSh),

tropical com verão seco (As) e tropical de monção (Am), de acordo com o mapeamento de Alvares *et al.* (2014).

Na sequência, a dinâmica temporal de transição interestadual foi avaliada a partir do tempo médio de primeira passagem (MFPT), o qual quantifica o intervalo médio (em dias) necessário para que o sistema meteorológico migre de um estado inicial para um estado de destino diferente pela primeira vez (Tabela 2).

Tabela 2 – Tempo Médio de Primeira Passagem (em dias)

	Recife			**Ipojuca**			**Chã Grande**			**Petrolina**		
De / Para	Seco	Úmido	Chuvoso	Seco	Úmido	Chuvoso	Seco	Úmido	Chuvoso	Seco	Úmido	Chuvoso
Seco	NA	9,10	6,84	NA	7,82	7,10	NA	11,38	11,51	NA	28,69	24,80
Úmido	2,47	NA	5,31	2,88	NA	5,42	2,23	NA	8,65	1,89	NA	18,39
Chuvoso	3,10	8,05	NA	3,78	6,81	NA	2,75	9,25	NA	2,37	22,33	NA

Cabe ressaltar que os valores identificados como "NA" (Não Aplicável) nas diagonais principais da Tabela 2 decorrem da própria definição matemática do MFPT pois, como este indicador mensura estritamente o tempo de viagem entre estados distintos, o cálculo da primeira passagem de um estado para si mesmo perde o sentido conceitual nesta matriz, uma vez que a permanência e a recorrência imediata em um mesmo estado já são contempladas pelo tempo médio de permanência.

A análise dos dados de primeira passagem revela que o município de Petrolina apresenta a maior inércia para a entrada de umidade, necessitando de uma média de 28,69 dias para que um período seco transite para o estado úmido, e 24,80 dias para atingir o estado chuvoso. Em contrapartida, Chã Grande exibe tempos de primeira passagem sensivelmente menores, levando em média 11,38 dias para migrar do estado seco para o úmido e 11,51 dias para o chuvoso, sendo esses intervalos intermediários coerentes com sua localização geográfica no estado, visto que o município se encontra em uma zona de transição, recebendo influências da umidade da Zona da Mata, mas ao mesmo tempo apresentando as características de semiaridez do Agreste. Já na região costeira do estado, nota-se que Recife e Ipojuca apresentam tempos de primeira passagem semelhantes para os estados estudados, com médias de dias ligeiramente diferentes para as transições seco-úmido (9,10 dias para Recife e 7,82 dias para Ipojuca) e chuvoso-úmido, com 8,05 dias para Recife e 6,81 dias para Ipojuca.

A última propriedade estatística de longo prazo calculada a partir da matriz de transição foi o tempo médio de retorno, cujos resultados para os três estados climáticos estudados estão consolidados na Tabela 3. Este indicador expressa o número médio de dias necessários para que um

determinado estado pluviométrico volte a ocorrer na região após o sistema tê-lo abandonado, servindo como um indicador essencial para a avaliação de resiliência e regularidade climática local.

Tabela 3 – Tempo Médio de Retorno (em dias)

	Estados da Cadeia de Markov		
Município	Seco	Úmido	Chuvoso
Recife	1,62	8,11	3,84
Ipojuca	1,76	6,70	3,55
Chã Grande	1,35	9,53	6,37
Petrolina	1,13	23,86	13,56

Os resultados (Tabela 3) revelam padrões geográficos distintos de recorrência meteorológica ao longo do território estadual no sentido Leste-Oeste. Na faixa litorânea e Zona da Mata, as regiões exibem cenários de regularidade, com os tempos médios de retorno para o estado chuvoso em Recife e Ipojuca sendo de apenas 3,84 e 3,55 dias, respectivamente. Pela ótica agrícola, esse rápido retorno das condições de chuva em Ipojuca fornece suporte ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, cultura caracterizada por uma elevada exigência hídrica ao longo de suas fases de plantio, conforme descrito por Rossetto e Santiago (2022), e que posiciona o município como o maior produtor do estado segundo dados do IBGE (2024). Avançando em direção ao Agreste, o município de Chã Grande apresenta um cenário intermediário de transição, com tempo médio de retorno de 6,37 dias para o estado chuvoso e 9,53 dias para o úmido. Por fim, no semiárido pernambucano, representado por Petrolina, observa-se o comportamento esperado de acentuada restrição hídrica, onde o estado seco retorna quase imediatamente (1,13 dias), ao passo que o retorno de um dia chuvoso requer uma média estendida de 13,56 dias.

4. CONCLUSÕES

A modelagem por Cadeias de Markov de primeira ordem demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a compreensão do regime pluviométrico de Pernambuco. A análise das matrizes de transição revelou que a probabilidade de persistência do estado seco é o traço meteorológico mais estável e compartilhado entre todas as regiões estudadas. Além disso, notou-se um gradiente decrescente de precipitação no sentido leste-oeste, onde as probabilidades de persistência de dias úmidos decaem da costa para o interior.

As métricas de longo prazo quantificaram numericamente os contrastes espaciais do estado, com Petrolina apresentando uma passividade acentuada para a entrada de umidade através de elevados tempos de permanência secos e períodos estendidos de primeira passagem para os estados úmido e chuvoso. Em contrapartida, o setor leste revelou certa regularidade hídrica, marcada pelos

curtos tempos de retorno do estado chuvoso observados em Recife e Ipojuca. Conclui-se que o comportamento dessas matrizes e indicadores estatísticos fornece um possível diagnóstico quantitativo para o planejamento hídrico territorial, servindo como subsídio para a compreensão das janelas de plantio e da distribuição espacial das atividades agrícolas ao longo do estado.

Assim, ressalta-se que investigações futuras podem refinar essas análises através da avaliação de estruturas de ordens superiores. Tal evolução metodológica permitirá capturar dependências temporais mais longas e a memória atmosférica do regime de chuvas no Nordeste, fornecendo contribuições mais precisas para a gestão de recursos hídricos e o desenvolvimento regional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão de bolsa de Pós-Graduação (Processo nº IBPG-2383-5.01/25) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa por meio da bolsa de produtividade em pesquisa (nº 306590/2024-7).

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. (2013). *"Köppen's climate classification map for Brazil"*. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, pp. 711–728.

APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. (2026). *Precipitação Média por Município*. Recife: APAC. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/clima/precipitacao-media-por-municipio. Acesso em: maio 2026.

GABRIEL, K. R.; NEUMANN, J. (1962). *"A Markov chain model for rainfall occurrence at Tel Aviv"*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 88, n. 375, pp. 90-95.

GRINSTEAD, C. M.; SNELL, J. L. (1997). *Introduction to Probability*. 2. ed. Providence: American Mathematical Society, 513 p.

HAJANI, E.; SARMA, G. (2023). *"Generation of rainfall data series by using the Markov Chain model in three selected sites in the Kurdistan Region, Iraq"*. AI in Civil Engineering 2(1), pp. art. 5.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. (2013). *Introdução à Pesquisa Operacional*. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 1014 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2024). *Tabela 5457: Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da*

produção das lavouras temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/. Acesso em: maio 2026.

JALE, J. D. S.; SILVA, A. S.; LUCENA, L. R. R.; SILVA, M. T. (2019). *"Application of Markov chain on daily rainfall data in Paraíba-Brazil from 1995-2015"*. Acta Scientiarum. Technology, v. 41, n. 1, p. 37186.

LACERDA, F. F.; NOBRE, P.; SANTOS, A. S.; CARNEIRO, R. G. (2010). *"Extremos e variabilidade climática no Nordeste brasileiro e em Pernambuco", in Mudanças climáticas e impactos ambientais*. Org. por Galvíncio, J. D., Recife: Ed. Universitária da UFPE, cap. 1, pp. 1-23.

NÓBREGA, R. S.; MARIANO, G. (2024). *"Climas de Pernambuco", in Geopatrimônio de Pernambuco*. Org. por Arruda, Í. R. P. et al., Recife: Ed. dos Autores, v. 1, cap. 6, pp. 108–139.

NORTHROP, P. J. (2024). *"Stochastic Models of Rainfall"*. Annual Review of Statistics and Its Application, v. 11, pp. 51-74.

RAHEEM, M. A.; YAHYA, W. B.; OBISESAN, K. O. (2017). *"A Markov Chain Approach On Pattern of Rainfall"*. Journal of Environmental Statistics, v. 7, p. 1–13.

R CORE TEAM. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing*. Disponível em: https://www.R-project.org/.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. (2022). *Cana-de-açúcar: Plantio*. Brasília, DF: Embrapa Tabuleiros Costeiros. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/producao/manejo/plantio. Acesso em: maio 2026.

SALDANHA, R. F.; AKBARINIA, R.; PORTO, F. (2023). *brclimr: Fetch Brazilian Weather and Climate Data*. R package version 0.2.0.

SILVA, S. J. d.; DORLIVETE, E.; SANTOS, S. J.; SILVA, M. T.; LUCENA, L. R. R. (2023). *"Cadeia de Markov: uma análise dos níveis de precipitação na Região Metropolitana do Recife-PE"*. Research, Society and Development, v. 12, n. 8, p. e0512842766.

SONNADARA, D. U. J.; JAYEWARDENE, D. R. (2015). *"A markov chain probability model to describe wet and dry patterns of weather at Colombo"*. Theoretical and Applied Climatology, Springer Science and Business Media LLC, v. 119, n. 1–2, p. 333–340.

SPEDICATO, G. A. (2017). *"Discrete-time Markov chains with R"*. The R Journal, v. 9, n. 2, pp. 84-104.

TONIETTO, J.; MANDELLI, F. (2021). *Clima*. Brasília, DF: Embrapa (Agência Embrapa de Informação Tecnológica - Ageitec). Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/uva-para-processamento/. Acesso em: maio 2026.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. (2022). *"New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)"*. International Journal of Climatology, v. 44, n. 1, pp. 123-135.