Análise da Roleta da Seca: um método baseado em dados para identificação de impactos antrópicos na evolução de secas hidrológicas

Carlos Eduardo Sousa Lima [1] ; Cleiton da Silva Silveira; Alexandre Cunha Costa[2,3] & Germano Gondim Ribeiro Neto [4]

Palavras-Chave – Antropoceno, Estados de seca, Cadeia de Markov.

INTRODUÇÃO

A crescente influência das atividades antrópicas no ciclo hidrológico das bacias hidrográficas – sejam elas abruptas, como a construção de reservatórios, ou graduais, como as mudanças no Uso e Cobertura do Solo (UCS) – fez do homem um agente ativo no desenvolvimento de secas hidrológicas. Nesse contexto, uma nova definição para esse fenômeno passou a ser amplamente discutida, complementando a definição de extremos naturais desencadeados por um déficit de precipitação: as Secas Antrópicas. Nessa nova definição, as ações humanas são capazes de aliviar ou intensificar esses eventos (secas antropicamente modificadas), ou até mesmo induzi-los de forma independente (secas antropicamente induzidas) (van Loon et al., 2022).

Apesar da grande influência das atividades antrópicas, avaliar de forma quantitativa o impacto dessas atividades no desenvolvimento de secas hidrológicas é um grande desafio. A avaliação dos impactos das mudanças no UCS, por exemplo, comumente se ampara na utilização de modelos hidrológicos semidistribuídos. Apesar das valiosas contribuições para o tema (Jahanshashi et al., 2025; Chen et al., 2024), modelos hidrológicos podem apresentar incertezas estruturais e paramétricas que, quando não devidamente quantificadas, podem levar a interpretações errôneas sobre esses impactos. Além disso, essas aplicações geralmente se baseiam na comparação de um cenário base com cenários hipotéticos construídos pela fixação de alguns componentes e variação de outras, negligenciando os efeitos compensatórios entre elas (Virkki et al., 2024; Estácio et al., 2021).

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta uma inovação metodológica para avaliação dos impactos das atividades antrópicas no desenvolvimento de secas hidrológicas: a Análise da Roleta da Seca (ARS). A ARS é um método direto, puramente baseado em dados, que combina conceitos de Cadeia de Markov com Análise do Ciclo de Seca (ACS) para mapear a dinâmica das secas hidrológicas por meio da análise dos estados de seca e de suas probabilidades de transição. Como destacado por van Loon et al. (2022), métodos baseados em dados são mais adequados para captar a complexidade real dos processos hidrológicos relacionados à evolução da seca, quando comparadas ao uso de modelos hidrológicos. O presente estudo parte da hipótese de que as atividades humanas podem alterar o desenvolvimento das secas hidrológicas e que sinais dessa alteração podem ser capturados por meio das mudanças nos padrões de transição entre os diferentes estados de seca.

1) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, 60.440-970, Brasil: eduardolima@alu.ufc.br (C. E. S. Lima); cleitonsilveira@ufc.br (C. S. Silveira)
2) Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, Ceará, 62.790-000, Brasil: cunhacos@gmail.com (A. C. Costa)
3) Water Resources Management Group, Wageningen University, Droevendaalsesteeg 3, Wageningen, PB 6708, The Netherlands: cunhacos@gmail.com (A. C. Costa)
4) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 58.051-900, Brasil: germano.ribeiro@ct.ufpb.br (G. G. Ribeiro Neto)

MATERIAIS E MÉTODOS

Estudo de caso

A Bacia Hidrográfica do rio Grande (BHG), apresentada na Figura 1, foi utilizada como estudo de caso para aplicação da ARS. Essa bacia hidrográfica está situada na porção Oeste da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF), mais especificamente na região Oeste do estado da Bahia.

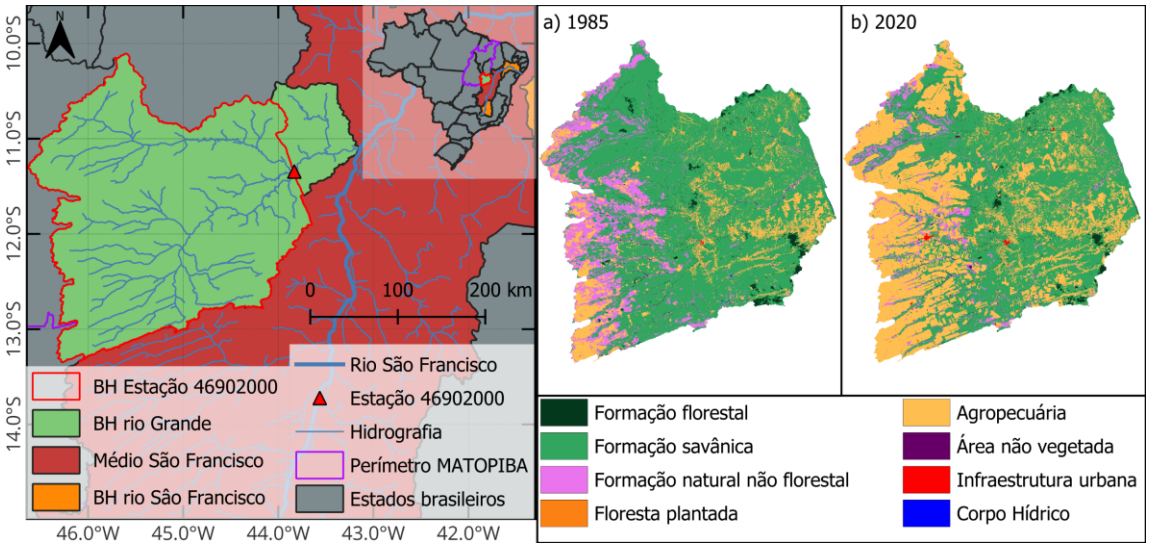


Figura 1. Bacia Hidrográfica do rio Grande e a estação fluviométrica 46902000, destacando sua localização em relação ao Brasil e ao Médio São Francisco e o UCS para os anos de 1985 e 2020.

A BHG está inserida na região do MATOPIBA, uma fronteira agrícola caracterizada por uma agricultura intensiva, mecanizada e de larga escala marcada por grandes colheitas de soja, algodão e milho. A região do MATOPIBA passou por uma intensa expansão agrícola a partir da década de 1980, consolidando-se como uma das principais fronteiras agrícolas brasileiras já em 2005. Um dos grandes marcos dessa expansão foi o crescimento expressivo da agricultura irrigada na região Oeste da Bahia, onde a BHG está situada, aumentando sua área irrigada por pivôs centrais de 31 km², em 1985, para 1471 km² em 2017. Esses sistemas de irrigação são responsáveis por uma superexploração de águas subterrâneas e superficiais na região do Aquífero Urucuia, onde a BHG está situada, trazendo impactos diretos à disponibilidade hídrica da região (ANA, 2019; Lucas et al., 2021).

Análise da Roleta de Seca

A aplicação da Análise da Roleta de Seca (ARS) pode ser sintetizada em três etapas: i) Caracterização dos eventos de seca; ii) Definição dos estados de seca e iii) Análise da Transição entre os estados de seca. Para caracterização hidrológica e meteorológica dos eventos de seca, foram utilizados os índices *Standardized Runoff Index* (SRI) e o *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), respectivamente. Ambos os índices foram definidos para uma escala temporal de 12 meses, a qual é mais adequada para analisar secas em ambientes com sazonalidade bem definida. A escolha do SRI se deve à utilização das vazões observadas da estação fluviométrica 46902000 (Figura 1) para caracterização do regime hidrológico de vazão da BHG; a escolha do SPEI, por sua vez, se ampara no fato de a Evapotranspiração Potencial (ETP) ser uma importante componente no balanço hídrico climático da BHG (ETP média anual 1.400mm e precipitação média anual ≈ 1.170 mm). Os dados do SPEI foram obtidos da *Global SPEI database* (https://spei.csic.es/database.html).

Uma vez caracterizados os eventos de seca com a utilização dos índices SRI e SPEI, suas séries temporais mensais foram divididas em dois subperíodos com base na evolução histórica da expansão agropecuária da região Oeste da Bahia, onde se situa a BHG: i) período pré-alteração (1935-1984) e ii) período pós-alteração (1985-2020). A partir dessas séries mensais, foram definidos os estados de

seca com base na ACS (Ribeiro Neto et al., 2022) para ambos subperíodos. Nessa metodologia, os índices de secas hidrológica e meteorológica são representados, respectivamente, pelos eixos x e y de um plano cartesiano, formando a Roda de Seca e permitindo que os estados de seca sejam definidos por meio da combinação de ambos índices. Adotando o valor de −1 como limiar de seca, os estados de seca foram definidos como: i) 1° quadrante – Estação Sem Seca (SS), quando (SPEI > −1 e SRI > −1); ii) 2° quadrante –Seca Meteorológica (SM), quando (SPEI ≤ −1 e SRI > −1); iii) 3° quadrante – Seca HidroMeteorológica (SHM), quando (SPEI ≤ −1 e SRI ≤ −1) e iv) 4° quadrante –Seca Hidrológica (SH), quando (SPEI > −1 e SRI ≤ −1).

Assumindo que as transições entre esses estados seguiam a propriedade de Markov, os padrões de transição entre os estados de seca puderam ser representados pela matriz de transição de uma cadeia de Markov. Essa suposição foi validada para ambos subperíodos por meio do teste chi-quadrado de Anderson-Goodman, evidenciando que, para um nível de significância de 5%, ambas as sequências de estados de seca apresentavam uma dependência temporal de primeira ordem estatisticamente significativa (p-valor ≪ 0,05). Além disso, com base no Critério de Informação Bayesiano (BIC), constatou-se que a cadeia de Markov de primeira ordem foi o modelo mais parcimonioso em ambos os períodos. Diante disso, as probabilidades de transição entre os estados de seca, em ambos os períodos, puderam ser obtidas por meio da Equação 1:

$$p_{ij} = P(X_n = j \,|X_{n-1} = i) \approx \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}} \qquad (1)$$

em que: n_{ij} representa o número de transições ocorridas para o estado j dada a ocorrência do estado i e $\sum_j n_{ij}$ representa o número total de ocorrências do estado i, independente da transição ocorrida. Utilizou-se uma abordagem bootstrap multinomial para identificar as mudanças estatisticamente significativas nos padrões de transição dos estados de seca entre os subperíodos supracitados. As diferenças obtidas foram consideradas estatisticamente significativas quando o seu intervalo de confiança de 95% não incluía zero.

RESULTADOS

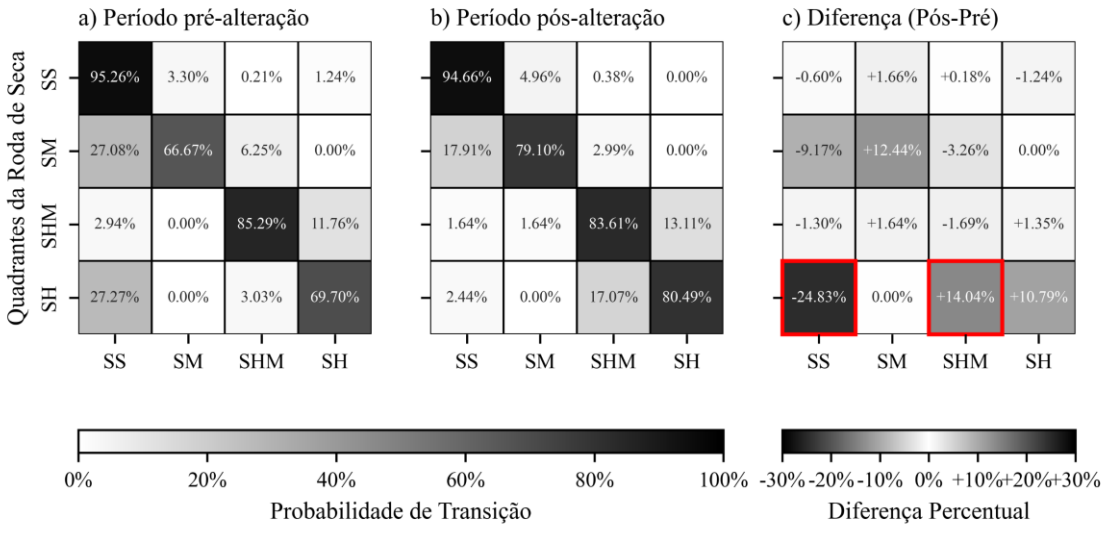


Figura 2 – Padrões de Transição entre os estados de seca no período a) pré- e b) pós-alteração antrópica. No painel c) os quadrados vermelhos indicam as diferenças nas probabilidades de transição estatisticamente significantes a um nível de significância de 5%. As siglas representam: SS – Sem Seca, SM – Seca Meteorológica, SHM – Seca Hidrometeorológica, SH – Seca Hidrológica

A Figura 2 apresenta os padrões de transição entre os estados de seca nos períodos pré- e pós-alteração antrópica, bem como as diferenças obtidas nas probabilidades de transição entre ambos os períodos, indicando aquelas que apresentaram significância estatística com base em um intervalo de confiança de 95%. Os resultados obtidos evidenciaram mudanças estatisticamente significantes nas

probabilidades de transição do estado SH para o estado SHM (+14,04) e para o estado SS (−24,03%), indicando uma recuperação hidrológica mais lenta e difícil no período pós-alteração antrópica em relação ao pré-alteração. A redução na probabilidade de transição para o estado SS é um indicativo direto de uma menor probabilidade de recuperação após a ocorrência de SH; o aumento na probabilidade de SHM, por sua vez, indica que as SH duram o suficiente para abranger duas SM.

Mudanças antrópicas no UCS e alterações nos padrões de utilização dos recursos hídricos são capazes de alterar mecanismos-chave responsáveis pela recuperação hidrológica de uma bacia hidrográfica. A expansão agrícola evidenciada na BHG favorece o fluxo de calor latente e radiação líquida próxima à superfície, intensificando a demanda hídrica atmosférica da bacia e reduzindo os volumes disponíveis para essa recuperação. Simultaneamente, o bombeamento intensivo das águas subterrâneas rebaixa o lençol freático, atenuando o escoamento de base e potencialmente transformando os cursos d'água em "rios perdedores", invertendo o sentido desse fluxo. Diante do aumento dessas perdas (para a atmosfera e por infiltração), a bacia passa a exigir volumes de chuva muito superiores aos históricos para restabelecer suas vazões normais.

CONCLUSÕES

- A ARS se mostrou um método simples e eficiente para avaliar o impacto das atividades antrópicas no início, desenvolvimento e recuperação de secas hidrológicas. Sua aplicação identificou mudanças estatisticamente significativas ($\alpha = 5\%$) nos padrões de transição dos estados de seca na BHG entre os períodos pré- e pós-alteração antrópica, revelando uma recuperação hidrológica muito mais lenta nesse segundo período.
- A gestão proativa de secas hidrológicas em bacias antropizadas exige abordagens integradas que considerem as alterações no UCS, a conexão águas superficiais-subterrâneas e a quantificação clara dos impactos humanos na bacia.

REFERÊNCIAS

ANA. (2019). *"Levantamento da agricultura irrigada por piv˜os centrais no Brasil"*. Relatório Técnico. Agência Nacional de Águas (ANA)/Embrapa Milho e Sorgo.

Chen, J., Fan, Y., …, Cao, C. (2024). *"Comprehensive propagation characteristics between paired meteorological and hydrological drought events: Insights from various underlying surfaces"*. Atmospheric Research, 299(107193), 107193.

Estácio, A. B. S., Costa, A. C., Souza Filho, F. A., & Rocha, R. V. (2021). *"Uncertainty analysis in parameter regionalization for streamflow prediction in ungauged semi-arid catchments"*. Hydrol. Scien. Journal, 1–19.

Jahanshahi, A., Booij, M. J., Patil, S. D., & Gupta, H. (2025). *"Impact of land use land cover change on catchment hydrological response in 576 Iranian catchments"*. Journ, of Arid Env., 231(105463), 105463.

Lucas, M. C., Kublik, N., …, Oliveira, P. T. S. (2020). *"Significant baseflow reduction in the Sao Francisco River Basin"*. Water, 13(1), 2.

Ribeiro Neto, G. G., Melsen, L. A., van Oel, P. R. (2022). *"Drought Cycle Analysis to evaluate the influence of a dense network of small reservoirs on drought evolution"*. Water Resources Research, 58(1).

Van Loon, A. F., Rangecroft, S., …, Van Lanen, H. A. J. (2022). *"Streamflow droughts aggravated by human activities despite management. Environmental research letters"*, 17(4), 044059.

Virkki, V., Sahu, R.K., …, Kummu, M. (2024). *"Archetypal flow regime change classes and their associations with anthropogenic drivers of global streamflow alterations"*. Environ. Res. Commun. 6 (11), 111007.

AGRADECIMENTOS

Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [processos 446157/2024–4 e 306380/2023–4] e o NWO – Dutch Research Council [processo W 07.30323.007).