PROPAGAÇÃO DA SECA NO RESERVATÓRIO PEDRAS BRANCAS (CE) DURANTE A SÉRIE HISTÓRICA DE 1991–2025: UMA ANÁLISE DA RESPOSTA HIDROLÓGICA À SECA METEOROLÓGICA

Antonia Amanda Alves da Silva 1 [1]; Ariane de Brito Silva [2]; Alexandre C. Costa 2 [3] Ályson Brayner Sousa Estácio [4] & Luiz Martins de Araújo Júnior [5]

Palavras-Chave – Análise do Ciclo de Secas, Índices de seca, Semiárido brasileiro.

INTRODUÇÃO

A seca é um dos principais eventos extremos do semiárido brasileiro, afetando a disponibilidade hídrica e o abastecimento das populações (Meira Neto et al., 2024). No Ceará, a irregularidade das chuvas favorece déficits recorrentes de precipitação, típicos da seca meteorológica. Associadas à elevada evaporação, essas condições reduzem a oferta hídrica e aumentam a dependência de reservatórios superficiais (Ribeiro et al., 2024). Em estiagens prolongadas, a queda dos volumes armazenados compromete os usos da água e amplia os desafios da gestão hídrica (Moura et al., 2022).

Segundo Yuan (2017), a seca meteorológica ocorre quando o déficit de precipitação atinge determinado limiar; se persistente, reduz a umidade do solo e as vazões, favorecendo a seca hidrológica. Este estudo avaliou essa propagação no reservatório Pedras Brancas (CE), entre 1991 e 2025, por meio da *Drought Cycle Analysis* (DCA) e de índices de propagação, com foco na ocorrência, duração, severidade e persistência da resposta hidrológica.

METODOLOGIA

Área De Estudo

O reservatório Pedras Brancas localiza-se entre os municípios de Quixadá e Banabuiú, no Ceará, e está inserido na Região Hidrográfica do Banabuiú. O açude barra o rio Sitiá, afluente do rio Banabuiú, possui bacia hidrográfica de 1.775,98 km² e capacidade atual de 456,00 hm³ (COGERH, 2008). Destaca-se como o segundo maior reservatório da sub-bacia, sendo, juntamente com o açude Banabuiú, responsável por cerca de 74% da capacidade de acumulação superficial da região hidrográfica (CEARÁ, 2022).

Análise do Ciclo de Secas

A Análise do Ciclo de Secas, ou Drought Cycle Analysis (DCA), foi utilizada para avaliar a evolução dos eventos de seca a partir da relação entre um índice meteorológico e um índice hidrológico. Conforme Ribeiro Neto *et al.* (2022), o método combina o Precipitation Index (PI), associado ao déficit de precipitação, e o Water Storage Index (WSI), relacionado ao déficit de armazenamento hídrico. Neste estudo, adotou-se o Standardized Precipitation Index para uma escala de 12 meses (SPI-12), calculado conforme a metodologia proposta por McKee, Doesken e Kleist (1993), como indicador de seca meteorológica e o Volume Deviation (VD) do reservatório Pedras Brancas, obtido pela razão entre o volume armazenado e a capacidade máxima do reservatório, como indicador de seca hidrológica, ambos em escala mensal.

1) Afiliação: Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Redenção, Ceará, Brasil, Campos das Auroras, CEP: 62790-970, amandaalves@aluno.unilab.edu.br; arianebrito@aluno.unilab.edu.br;
2) Afiliação: Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Redenção, Ceará, Brasil, Campos das Auroras, CEP: 62790-970, cunhacos@unilab.edu.br; luiz_m_jr@unilab.edu.br.
3) Afiliação: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUCEME, Avenida Rui Barbosa, nº 1246, no bairro Aldeota, em Fortaleza – Ceará, Brasil, CEP: 60115-221, alysonbrayner@gmail.com.

Os pares de valores de SPI-12 e VD foram representados em um sistema de coordenadas dividido em quatro quadrantes, permitindo classificar cada mês em uma das seguintes condições: período úmido, seca meteorológica, seca hidrometeorológica ou seca hidrológica. Dessa forma, a DCA possibilita identificar não apenas a ocorrência da seca, mas também sua propagação entre os estágios meteorológico e hidrológico, bem como a persistência dos impactos sobre o armazenamento do reservatório. A Figura 1 apresenta a representação gráfica da Análise do Ciclo de Seca.

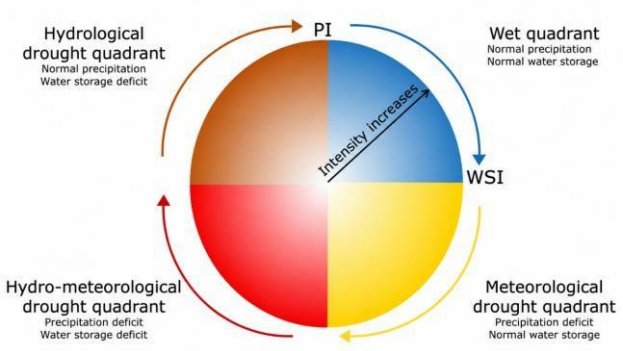


Figura 1. Representação gráfica da Análise do Ciclo de Seca em que WSI é um índice de seca hidrológica e PI é um índice de seca meteorológica. Fonte: Ribeiro Neto et al., (2022).

Análise da propagação da seca

Para avaliar a propagação da seca entre os eventos meteorológicos e hidrológicos no reservatório Pedras Brancas, foi utilizada a metodologia baseada nos índices de propagação da seca. Inicialmente, foram identificados os eventos de seca meteorológica e hidrológica a partir das séries temporais dos índices SPI-12 e VD, sendo determinados, para cada evento, o período de início e término, a duração (D_m), correspondente ao número de meses consecutivos sob condição de seca, e a severidade (S_m), obtida pela soma acumulada dos valores absolutos do índice durante cada evento. Em seguida, foi calculada a Severidade total (S_t) das secas meteorológicas e hidrológicas pela soma das severidades de todos os eventos identificados, enquanto a duração total (D_t) correspondeu à soma das durações individuais desses eventos ao longo da série histórica. A intensidade da seca meteorológica (I_m) foi obtida pela razão entre a magnitude total e a duração total dos eventos meteorológicos ($I_m = S_{t,m}/D_{t,m}$).

Posteriormente, foram determinados o *Severity Ratio* (SR), calculado pela razão entre a magnitude total da seca hidrológica e a magnitude total da seca meteorológica ($SR = S_{t,h}/S_{t,m}$), e o *Duration Ratio* (DR), obtido pela razão entre a duração total da seca hidrológica e a duração total da seca meteorológica ($DR = D_{t,h}/D_{t,m}$). Esses indicadores permitiram quantificar a intensidade da propagação da seca e avaliar o grau de amplificação dos déficits meteorológicos sobre a resposta hidrológica do reservatório Pedras Brancas.

RESULTADOS

Na Figura 2, são apresentados o SPI-12 e o VD do açude Pedras Brancas. O limite de 30% foi adotado como referência de criticidade do armazenamento hídrico, considerando a classificação da COGERH, que enquadra reservatórios com volumes entre 10,1% e 30% em situação crítica (CEARÁ, 2016). A análise da série histórica evidencia que o ciclo das secas não ocorre de forma gradual, mas é caracterizado pela alternância predominante entre seca hidrometeorológica e seca hidrológica. Esse comportamento resulta das sucessivas ocorrências de secas meteorológicas, que promovem a propagação e a persistência dos déficits hídricos, culminando em secas hidrológicas de longa duração.

Durante o último período de seca hidrometeorológica expressiva na bacia, entre os anos de 2012 e 2017, caracterizado por anomalias negativas do SPI-12 e redução significativa do armazenamento hídrico, o déficit persistente de precipitação intensificou a seca meteorológica e

comprometeu a recarga do reservatório. Observou-se, ainda, que a partir de 2014, o VD permanece abaixo do limite de referência por vários anos, mesmo após oscilações positivas do SPI-12, indicando que a recuperação hidrológica do reservatório foi lenta e incompleta. Esse comportamento reforça a persistência dos efeitos da seca sobre o açude Pedras Brancas e evidencia que a seca hidrológica apresentou maior duração que a seca meteorológica.

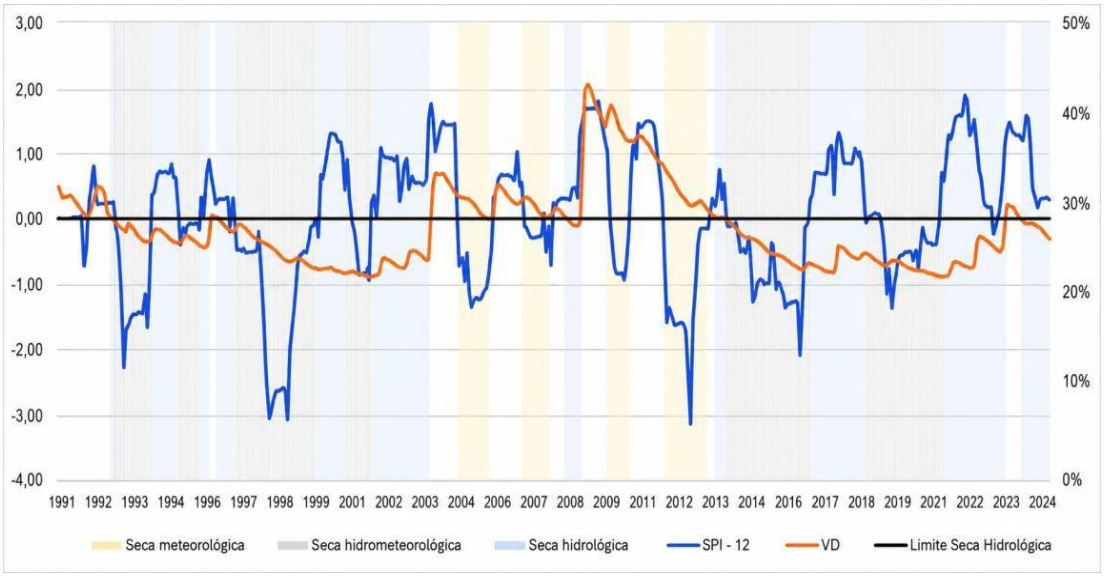


Figura 2. Evolução temporal do SPI-12 e do VD no reservatório Pedras Brancas, com destaque para os períodos seca meteorológica, seca hidrológica e seca hidrometeorológica. Fonte: autoria própria.

A análise da série histórica identificou 10 eventos de seca meteorológica e 4 eventos de seca hidrológica entre 1991-2025, considerando eventos com duração menor ou igual a 3 meses apenas como flutuações do sistema. Os resultados indicaram que nem todos os déficits pluviométricos resultaram em resposta hidrológica no reservatório. A seca hidrológica de 1992–2004 foi sustentada por sucessivos eventos meteorológicos entre 1993 e 2001, enquanto o período de 2005–2011 apresentou recuperação das condições de armazenamento, com apenas um evento hidrológico de curta duração entre 2008 e 2009. Já a seca hidrológica de 2014–2024 foi mantida por secas meteorológicas recorrentes, evidenciando o efeito acumulativo desses eventos sobre o armazenamento do reservatório. Embora tenha ocorrido uma recuperação temporária em 2024, um novo evento de seca hidrológica foi registrado no mesmo ano, persistindo até o fim da série.

Os índices de propagação, baseados no limite de armazenamento hídrico de 30%, evidenciaram diferenças entre as respostas meteorológica e hidrológica (Tabela 1).

Tabela 1 – Índices de propagação da seca entre os eventos meteorológicos e hidrológicos (1991–2025)

Índice	Valor
Severidade meteorológica total ($S_{t,m}$)	161,39
Duração meteorológica total ($D_{t,m}$)	180 meses
Intensidade meteorológica (I_m)	0,90
Severidade Hidrológica total ($S_{t,h}$)	142,03
Duração hidrológica total ($D_{t,h}$)	278 meses
Severity Ratio (SR)	0,88
Duration Ratio (DR)	1,54

Fonte: Autoria própria.

A severidade total da seca meteorológica ($S_{t,m}$ = 161,39) foi superior à da seca hidrológica ($S_{t,h}$ = 142,03), resultando em um *Severity Ratio* (SR) de 0,88, indicando que a severidade acumulada da seca hidrológica correspondeu a 88% da meteorológica. Em contrapartida, a duração acumulada da seca hidrológica (278 meses) superou a da seca meteorológica (180 meses), produzindo um *Duration Ratio*

(DR) de 1,54. Esse resultado demonstra que, apesar de menos severa em termos acumulados, a seca hidrológica apresentou maior persistência temporal, refletindo o efeito de memória do reservatório e a lenta recuperação dos volumes armazenados. Esse comportamento é consistente com o processo de propagação da seca descrito por Zhou *et al.,* (2024).

Conforme o Plano de Gestão Proativa de Secas do Hidrossistema Pedras Brancas (COGERH, 2025), o reservatório já atendia, em condições normais, às demandas do sistema Quixadá/Juatama e aos usos múltiplos, totalizando 415 L/s. Adicionalmente, passou a suprir emergencialmente a sede de Quixeramobim, entre fevereiro de 2016 e abril de 2018 e entre julho de 2019 e março de 2020, por meio da Adutora de Montagem Rápida (AMR), após o colapso dos açudes Fogareiro e Quixeramobim.

Assim, as áreas sombreadas em azul indicam os períodos de operação da AMR, representando uma demanda adicional sobre o açude Pedras Brancas (Figura 3). A comparação entre o volume observado e o cenário estimado sem AMR evidencia diferenças pouco expressivas entre as séries, indicando que sua operação não retardou significativamente a recuperação hidrológica do reservatório. Esse resultado confronta a percepção associada aos conflitos gerados pelo uso da adutora, pois sugere que, embora a operação da AMR tenha intensificado tensões socioinstitucionais entre Quixadá, Banabuiú e Quixeramobim, seu impacto hidrológico sobre a recuperação do reservatório foi limitado. Dessa forma, o reservatório demonstra relevância estratégica para a região e resiliência frente a períodos de seca prolongada.

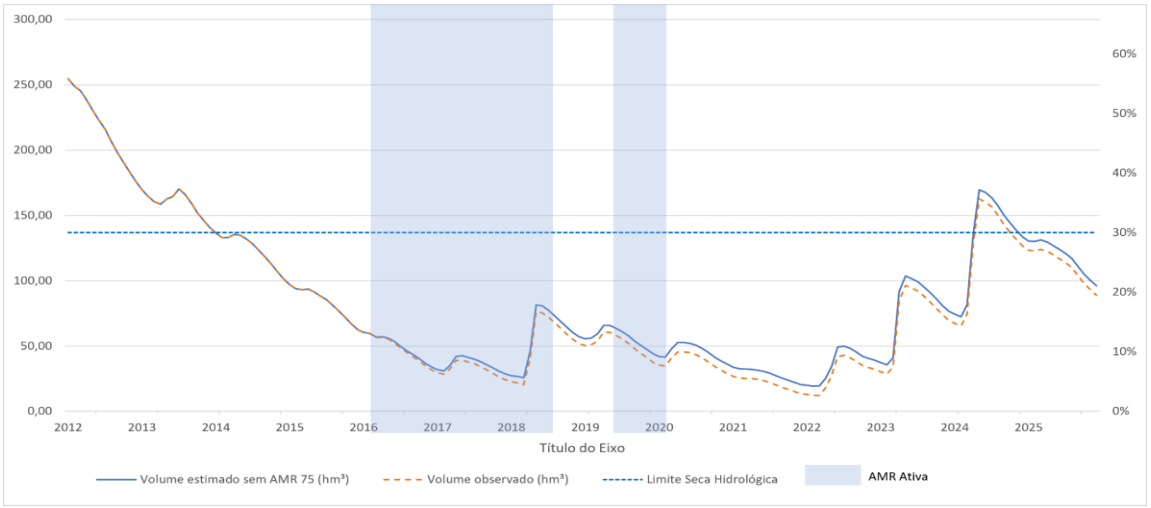


Figura 3. Volume armazenado observado e estimado no açude Pedras Brancas durante os períodos de operação da Adutora de Montagem Rápida (AMR). Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

A persistência dos déficits de precipitação favoreceu a propagação da seca meteorológica para a seca hidrológica no reservatório Pedras Brancas. Enquanto a seca meteorológica apresentou alternância com períodos úmidos, a seca hidrológica mostrou-se contínua e mais persistente, evidenciando a lenta recuperação do armazenamento hídrico. Embora a seca hidrológica tenha apresentado menor severidade acumulada em relação à meteorológica, seus efeitos no reservatório permaneceram por mais tempo.

A operação da AMR representou demanda adicional ao açude, mas não retardou significativamente a recuperação hidrológica, indicando impacto limitado sobre a dinâmica de armazenamento. Como limitação destaca-se a necessidade de análises complementares com dados operacionais mais detalhados de vazão, evaporação e retiradas do reservatório.

REFERÊNCIAS

CEARÁ (2016). Manual de operação da Sala de Situação do Ceará. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará – COGERH, Fortaleza/CE.

CEARÁ (2022). Diagnóstico da Região Hidrográfica do Banabuiú. Planos de Recursos Hídricos das Regiões Hidrográficas do Ceará, Fortaleza/CE.

COGERH (2025). Plano de Gestão Proativa de Secas: Hidrossistema Pedras Brancas. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará, Fortaleza/CE, 120 p.

COGERH (2008). Plano de Operação e Manutenção (POM) do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará. Volume I.13: Relatório final de levantamento de dados da bacia do Banabuiú – Barragens do DNOCS. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará, Fortaleza/CE.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales" in Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim/USA, 1993, pp. 179-183.

MEIRA NETO, Antônio Alves et al. Evolution of drought mitigation and water security through 100 years of reservoir expansion in semi-arid Brazil. Water Resources Research, v. 60, n. 9, e2023WR036411, 2024. DOI: 10.1029/2023WR036411.

MITROI, V.; ENCAMILLA HENRIQUEZ, D. M.; RABELO, L. S.; TRITSCH, I.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; KUPER, M.; MARTINS, E. S. P. R. (2025). "Grounded perspectives on water infrastructures and drought imaginaries in the semi-arid Northeast of Brazil". Journal of Hydrology, v.662, p.133894.

MOURA, Marina de P.; RIBEIRO NETO, Alfredo; COSTA, Fábio A. Application of satellite imagery to update depth-area-volume relationships in reservoirs in the semiarid region of Northeast Brazil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 26, n. 1, p. 44–50, 2022. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v26n1p44-50.

RIBEIRO NETO, Germano G.; MELSEN, Lieke A.; COSTA, Alexandre C.; WALKER, David W.; CAVALCANTE, L.; KCHOUK, S.; et al. Clash of drought narratives: a study on the role of small reservoirs in the emergence of drought impacts. Earth's Future, v. 12, e2023EF004311, 2024. DOI: 10.1029/2023EF004311.

RIBEIRO NETO, G. G.; MELSEN, L. A.; MARTINS, E. S. P. R.; et al. (2022). "Drought Cycle Analysis to evaluate the influence of a dense network of small reservoirs on drought evolution". Water Resources Research, v.58, n.1, 21 p.

ROTTLER, E.; SCHÜTTIG, M.; BRONSTERT, A.; SOUSA ESTÁCIO, A. B.; VIEIRA ROCHA, R.; CARVALHO JÚNIOR, V. N. de; BARBOSA GUIMARÃES, C. C.; MARTINS, E. S. P. R.; LORENZ, C.; VORMOOR, K. (2024). "Regional-scale seasonal forecast of surface water availability in a semi-arid environment: The case of Ceará State in Northeast of Brazil". Journal of Hydrology: Regional Studies, v.56, p.102058.

SEIGERMAN, C. K.; LEITE, N. S.; MARTINS, E. S. P. R.; NELSON, D. R. (2024). "At the extremes: Assessing interrelations among the impacts of and responses to extreme hydroclimatic events in Ceará, Northeast Brazil". Journal of Hydrology, v.632, p.130850.

VAN LOON, A. F.; STAHL, K.; DI BALDASSARRE, G.; CLARK, J.; RANGECROFT, S.; WANDERS, N.; GLEESON, T.; VAN DIJK, A. I. J. M.; TALLAKSEN, L. M.; HANNAFORD, J.; UIJLENHOET, R.; TEULING, A. J.; HANNAH, D. M.; SHEFFIELD, J.; SVOBODA, M.; VERBEIREN, B.; WAGENER, T.; VAN LANEN, H. A. J. (2016). "Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches". Hydrology and Earth System Sciences, v.20, n.9, p.3631-3650.

YUAN, X.; ZHANG, M.; WANG, L.; ZHOU, T. (2017). "Understanding and seasonal forecasting of hydrological drought in the Anthropocene". Hydrology and Earth System Sciences, v.21, n.11, p.5477-5492.

ZHOU, Z.; WANG, P.; LI, L.; FU, Q.; DING, Y.; CHEN, P.; XUE, P.; WANG, T.; SHI, H. (2024). "Recent developmenton drought propagation: A comprehensive review". Journal of Hydrology, v.645, p.132196. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132196.