XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

ANÁLISE TEMPORAL PARA VERIFICAÇÃO DE ESTACIONARIEDADE NA SÉRIE HISTÓRICA DE VAZÕES NATURAIS AFLUENTES AO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO/BA

José Eduardo Santos Araújo [1] ; Larissa Vasconcelos Santos [2] & Daianne Santos dos Anjos [3].

RESUMO – Á água é um elemento vital para a sobrevivência de todas as espécies. No Brasil 50% da sua utilização é destinada para irrigação. Reservatórios como o de Sobradinho são essenciais para a regularização da vazão, principalmente diante da redução de precipitações e aumento de temperaturas que afetam os níveis de armazenamento. Desse modo, o objetivo desta pesquisa foi verificar a ocorrência de estacionariedade e detectar tendências ao longo do tempo na série histórica estudada atrelando essas ocorrências a impactos ambientais ou climáticos. A metodologia empregou o teste não paramétrico de Mann-Kendall em dados fluviométricos de janeiro de 1931 a dezembro de 2024, obtidos da CCEE. A série completa de vazões totais e médias anuais apresentou uma tendência decrescente estatisticamente significativa.

ABSTRACT – Water is a vital element for the survival of all species. In Brazil, 50% of its use is for irrigation. Reservoirs such as Sobradinho are essential for regulating flow, especially in view of the reduction in precipitation and increase in temperatures that affect storage levels. Thus, the objective of this research was to verify the occurrence of stationarity and detect trends over time in the historical series studied, linking these occurrences to environmental or climatic impacts. The methodology used the nonparametric Mann-Kendall test on fluviometric data from January 1931 to December 2024, obtained from CCEE. The complete series of total flows and annual averages showed a statistically significant decreasing trend.

Palavras-Chave – Estacionaridade. Vazões. Reservatórios.

[1]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Déda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 99630-8496, eduaraujocivil@hotmail.com
[2]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Déda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 99860-2771, larissavasconcelos.ufs@gmail.com
[3]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Déda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 99640-6586, daianne1696@gmail.com

INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial e indispensável para a manutenção da vida, bem como para o desenvolvimento de atividades econômicas, sociais e ambientais. Esse recurso supre as necessidades de todas as espécies, desempenhando papel fundamental no abastecimento público, na produção de alimentos, na geração de energia e em diversas outras atividades indispensáveis ao desenvolvimento da sociedade (Scanlon *et al*., 2023).

A demanda pelo uso dos recursos hídricos vem crescendo de modo significativo no Brasil, em decorrência do crescimento populacional, do desenvolvimento industrial e da expansão agrícola. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a irrigação continua sendo o principal setor consumidor de água no país, respondendo por aproximadamente metade da demanda hídrica nacional, seguida pelo abastecimento humano, indústria, dessedentação animal, geração termelétrica, mineração e abastecimento rural. Esses dados evidenciam a importância estratégica da água para o desenvolvimento econômico, a segurança alimentar e a qualidade de vida da população (ANA, 2024).

Na bacia hidrográfica do rio São Francisco, a irrigação representa um dos principais usos de água, sendo responsável pela maior parcela das vazões de retirada e de consumo. Em razão dessa demanda hídrica, foram construídos reservatórios ao longo dos principais rios para o armazenamento de água e regularização da vazão. Dentre eles, destaca-se o reservatório de Sobradinho, responsável por regularizar vazões plurianuais (CBHSF, 2022; ONS, 2024).

Nas últimas décadas, a bacia do rio São Francisco enfrenta dificuldades com a redução da disponibilidade hídrica, em decorrência da diminuição da precipitação, bem como do aumento da temperatura, que consequentemente aumenta as taxas de evaporação. Esses fatores contribuem para a redução dos níveis de armazenamento de água nos reservatórios (Marengo et al., 2022; ANA, 2024).

É importante ressaltar que nem sempre as séries de variáveis hidrológicas são estacionárias, pois algumas delas podem sofrer interferências, sejam elas relacionadas a eventos climáticos, atmosféricos ou antrópicos. Esses efeitos fazem com que as séries sigam uma tendência cíclica ou não, o que, por sua vez, pode ocasionar interferências no planejamento e na gestão dos recursos hídricos. Desse modo, o objetivo deste trabalho é verificar a ocorrência de estacionariedade e detectar tendências ao longo do tempo na série histórica estudada, atrelando essas ocorrências a impactos ambientais ou climáticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O reservatório de Sobradinho localiza-se no município de mesmo nome, no estado da Bahia. É considerado o maior reservatório de regularização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, possuindo aproximadamente 320 quilômetros de extensão e 4.214 quilômetros quadrados (CHESF, 2020). O reservatório de Sobradinho está ativo desde 1979 e destaca-se por ser a quarta maior potência instalada do São Francisco, com aproximadamente 1.050.300 kW, além de possuir a maior capacidade de armazenamento de água da bacia cerca de 34 bilhões de metros cúbicos quando a cota atinge 392,50 metros.

Método Utilizado para Análise Estatística

Para confirmação da presença de tendência, foi aplicado o teste estatístico de Mann-Kendall, reconhecido por sua natureza não paramétrica, o que o torna especialmente adequado para séries temporais ambientais e hidrológicas, que frequentemente não atendem aos pressupostos clássicos de normalidade e homocedasticidade (Sen, 1968; Kendall, 1975). Este teste baseia-se na análise de ordens e sinais, em vez de médias e variâncias, o que o torna robusto frente à presença de valores extremos.

Utiliza-se o teste de hipótese com nível de significância de 5%, em que a hipótese nula (H_0) é a de que não há tendência. Para esse nível de significância, rejeita-se a hipótese nula se o módulo da estatística de teste Z for maior do que 1,96. Outra forma de análise e que corrobora para a decisão é a verificação do resultado do p-valor. Caso ele seja menor do que 0,05 significa que rejeita a hipótese nula concluindo que há tendência significativa.

A série histórica foi segmentada em seis blocos de 15 anos, sobre os quais se aplicaram as mesmas análises gráficas e estatísticas. Essa abordagem permitiu uma avaliação mais detalhada da evolução das vazões ao longo do tempo, possibilitando a identificação de possíveis mudanças estruturais ou padrões em diferentes períodos.

Análise dos Dados

Os Dados fluviométricos foram extraídos da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Utilizou-se a série de dados fluviométricos no período de janeiro de 1931 a

dezembro de 2024. Por meio do programa Microsoft Excel®, foram construídas as séries de vazões totais e das médias mensais anuais ao longo dos anos. A partir dessas series, verificou-se a tendência e estacionariedade com a criação de gráficos de dispersão e com a inclusão da linha de tendência linear.

Os dados foram analisados através do teste de Mann-Kendall, uma metodologia estatística não paramétrica amplamente empregada em estudos hidrológicos e ambientais. A aplicação do teste seguiu duas etapas iniciando-se pela organização cronológica dos dados mensais, que foram convertidos em médias anuais para facilitar a análise de tendências de longo prazo. Em seguida, realizou-se a aplicação do teste a qual é calculada com base no número de pares de observações (x_j, x_i) da série temporal, com j > i , conforme a equação:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sng(x_j - x_i) \quad 1)$$

em que:

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & se\ x_j - x_i > 0 \\ 0, & se\ x_j - x_i = 0 \\ -1, & se\ x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad 2)$$

A variância da estatística S é estimada para o cálculo do valor Z, conforme:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var\ (S)}}, & se\ S > 0 \\ 0, & se\ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & se\ S < 0 \end{cases} \quad 3)$$

A interpretação estatística baseou-se na formulação de duas hipóteses: a hipótese nula (H_0), que assume que a série não apresenta tendência, caracterizando-a como estacionária; e a hipótese alternativa (H_1), indicando que a série apresenta tendência crescente ou decrescente, sendo não estacionária. A decisão estatística adotou o nível de significância de 5%, no qual rejeita-se H_0 se |Z|>1,96. Alternativamente, quando o p-valor resulta em um valor menor do que 0,05, a tendência é considerada estatisticamente significativa.

Para identificar possíveis mudanças estruturais ou alterações em subperíodos, a série foi segmentada em seis blocos de 15 anos, com aplicação individual do teste de Mann-Kendall em cada trecho. Essa abordagem permite detectar tendências locais e verificar a persistência ou quebra de estacionariedade ao longo do tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 1, estão apresentados os dados do Teste Mann-Kendall a série de dados de 1931 a 2024, a qual apresenta tendencia decrescente de vazão ao longo dos anos estatisticamente significativa. A média anual é uma transformação linear direta da vazão total anual. O teste de Mann-Kendall é invariante a transformações lineares. Por isso, o resultado foi o mesmo entre a vazão total anual e a média. Se realizada a multiplicação ou divisão de todos os valores da série por uma constante positiva (como 1/12), o resultado do teste será o mesmo.

Período 1931-2024	Estatística S	Variância de S	Estatística Z	Valor-p	Tendência
Vazões totais anuais	−1443	93.734	−4,71	0,00000248	**Decrescente (fortemente significativa)**
Vazões médias anuais	−1443	93.734	−4,71	0,00000248	**Decrescente (fortemente significativa)**

Tabela 1 - Dados de média mensal da vazão, desvio padrão e taxa anual para cada período estudado.

As figuras 1 e 2 apresentam as vazões históricas totais anuais e médias anuais com respectivas tendências.

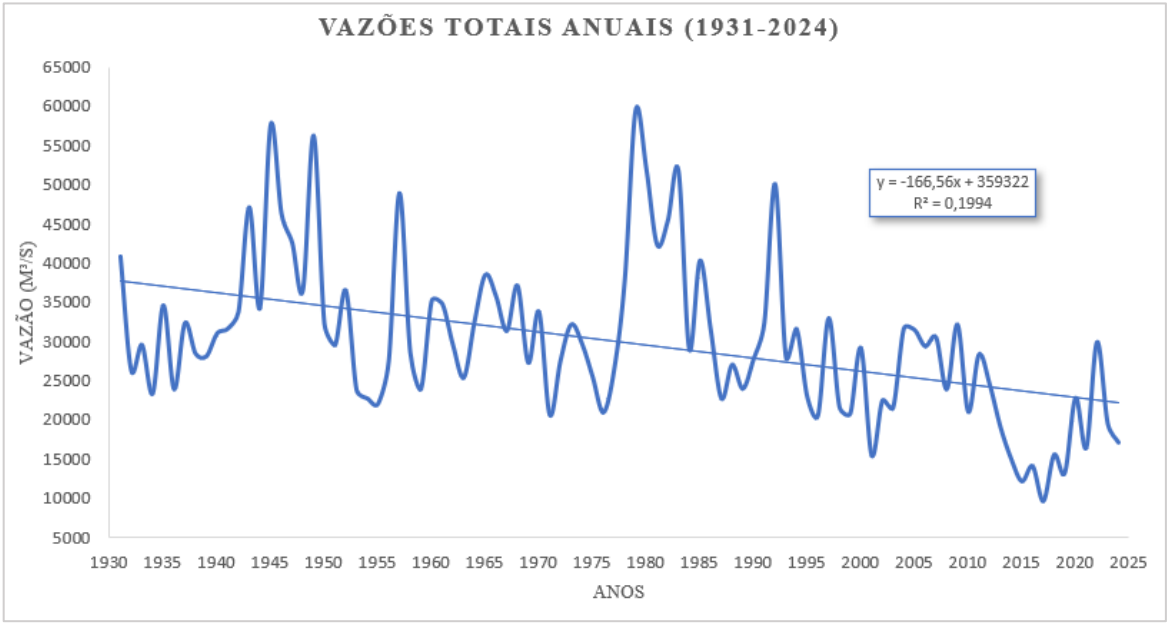


Figura 01 - Vazões totais anuais afluentes ao reservatório de Sobradinho

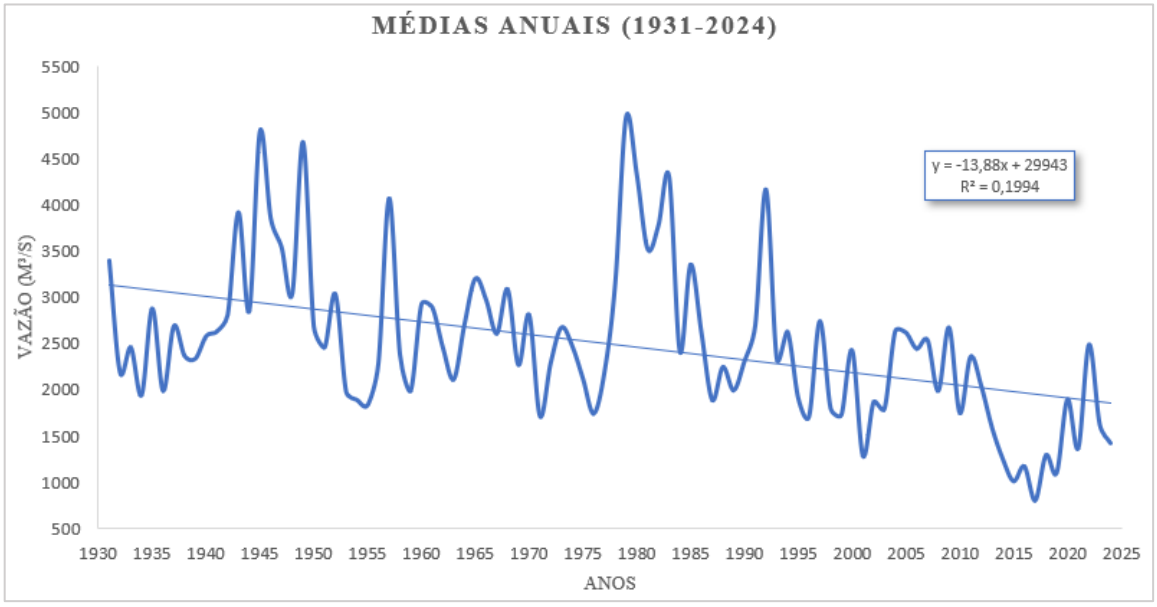


Figura 02 - Vazões médias anuais afluentes ao reservatório de Sobradinho

Na tabela 2, são visualizados os resultados da aplicação do Teste Mann-Kendall a série de dados, os quais revelam valores de Z crescentes e negativos a cada período avaliado, evidenciando declínio nas vazões ao passar dos anos e cada vez mais significativas (a partir de 1976). O teste é amplamente utilizado para detectar tendências monotônicas (seja de aumento ou diminuição) em séries temporais, sem pressupor distribuição normal dos dados (Yue et al., 2002).

Período	Estatística S	Estatística Z	Valor-p	Tendência
1931-1945	+1493	+1,85	0,0649	**Crescente (marginal)**
1945-1960	-2836	-3,51	0,00045	**Decrescente (significativa)**
1961-1975	-732	-0,90	0,366	**Sem tendência significativa**
1976-1990	-2411	-2,98	0,0029	**Decrescente (significativa)**
1991-2005	-2354	-2,91	0,0036	**Decrescente (significativa)**
2006-2024	-4821	-4,19	0,000028	**Decrescente (fortemente significativa)**

Tabela 2. Dados de média mensal da vazão, desvio padrão e taxa anual para cada período estudado.

O período 1931-1945 (Figura 3), apresentou comportamento isolado dos demais períodos analisados. A regressão linear indica um acréscimo médio anual de aproximadamente +70,88 m³/s, o que sugere uma leve elevação nas vazões médias ao longo desse período (Tabela 3).

Período	Média Mensal (m³/s)	Desvio Padrão	Taxa anual (m³/s)
1931–1945	2787,69	1896,68	+70,88
1945–1960	2842,67	2034,45	–106,48
1961–1975	2557,94	1716,55	–46,75
1976–1990	2986,39	2347,96	–92,14
1991–2005	2286,81	1745,05	–74,56
2006–2024	1722,77	1440,70	–57,71
Total da Série	**2496,33**	**1920,66**	

Tabela 3. Dados de média mensal da vazão, desvio padrão e taxa anual para cada período estudado.

O período de 1945-1960 (Figura 3B) revelou uma tendência decrescente estatisticamente significativa, sendo o maior declínio observado em toda a série. A taxa de decréscimo estimada pela regressão linear foi de –106,48 m³/s por ano (Tabela 3), refletindo um forte impacto sobre os regimes de vazão, possivelmente relacionado a mudanças no uso e ocupação do solo ou variabilidade climática.

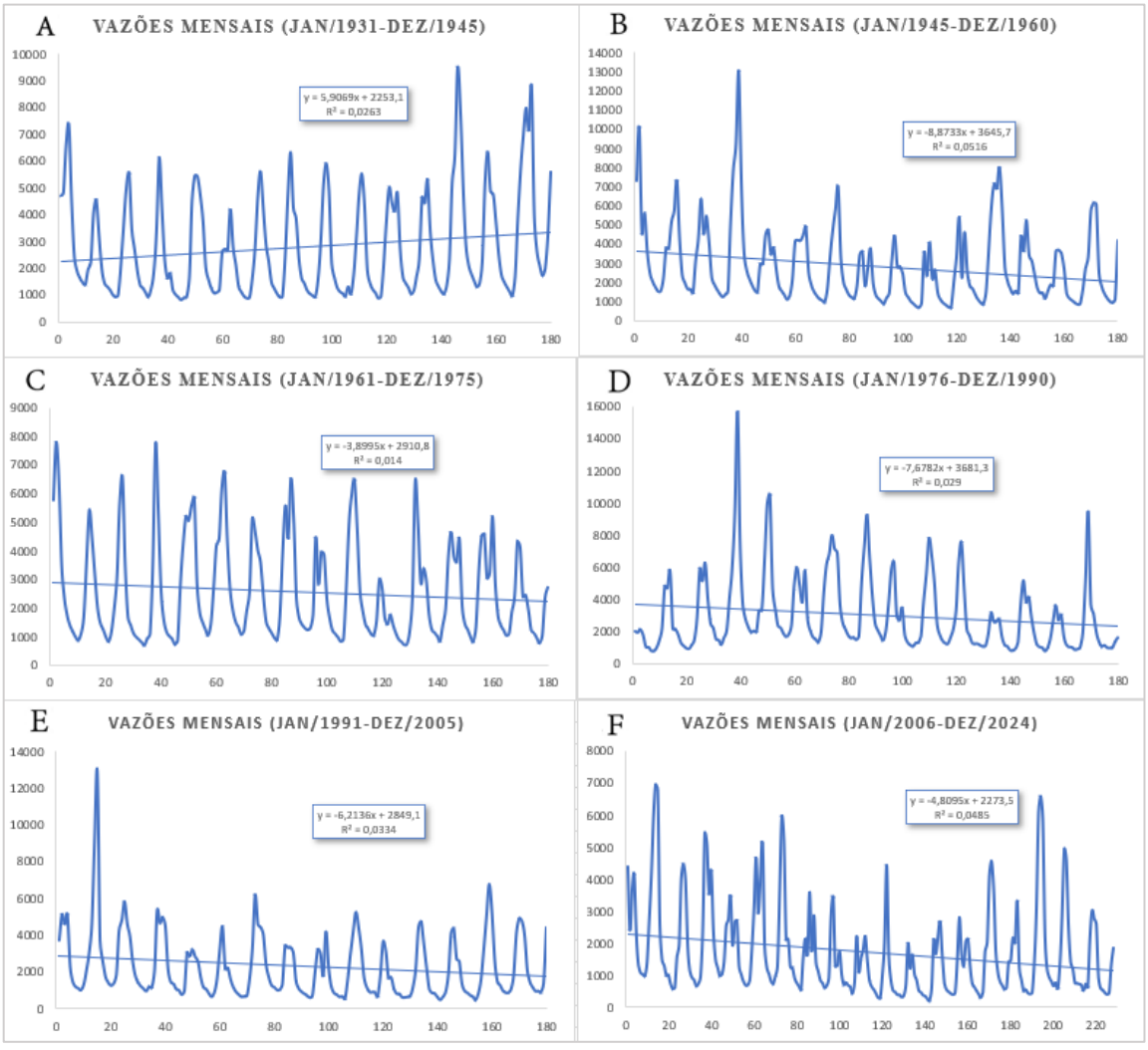


Figura 3. Representação gráfica das vazões do reservatório de Sobradinho-BA nos períodos de 1931-1945 (A), 1945-1960 (B), 1961-1975 (C), 1976-1990 (D), 1991-2005 (E) e 2006-2024(F) e suas respectivas linhas de tendência.

Já no período 1961-1975 (Figura 3C) os resultados não indicaram uma tendência estatisticamente significativa, mesmo que a taxa de declínio estimada tenha sido –46,75 m³/s por ano (Tabela 3). A ausência de significância estatística pode estar associada à maior variabilidade natural das vazões nesse período.

No período 1976-1990 (Figura 3D), a tendência negativa volta a se destacar de forma significativa, com uma taxa de queda anual de –92,14 m³/s (Tabela 3). Esses resultados reforçam a hipótese de uma tendência sustentada de redução nas vazões médias iniciada após a década de 1940.

Assim como no período anterior, o período de 1991-2005 (Figura 3E) observa-se novamente uma tendência decrescente estatisticamente significativa, com uma taxa de queda média de –74,56 m³/s por ano (Tabela 3). Essa continuidade sugere um possível efeito cumulativo de pressões antrópicas e eventos climáticos extremos.

O período mais recente, 2006-2024 (Figura 3F) apresentou a tendência decrescente mais forte de toda a série analisada, com um declínio médio anual de –57,71 m³/s (Tabela 2). Apesar de a taxa ser ligeiramente menor que a observada nos anos 1945–1960, a significância estatística é ainda mais robusta, indicando uma tendência consistente de redução nas vazões.

A aplicação do teste de Mann-Kendall em subperíodos da série histórica (1931–2024) revelou padrões temporais distintos na tendência das vazões. No período inicial (1931–1945), observou-se uma tendência crescente marginal, indicando possível aumento das vazões, embora com significância estatística limitada. Já entre 1945 e 1960, a tendência se inverteu de forma marcante, com uma queda significativa nas vazões.

Essa quebra na estacionariedade é reforçada pelas tendências significativamente negativas que se consolidam a partir de 1976, com destaque para o período mais recente (2006–2024), que apresentou a queda mais acentuada. Estes resultados indicam que as séries de vazão não permanecem estáveis ao longo do tempo, contrariando o pressuposto de estacionariedade muitas vezes assumido em análises hidrológicas tradicionais (Kundzewicz & Robson, 2004).

A detecção supracitada indica que o sistema estudado atualmente opera com um regime de disponibilidade muito inferior ao projetado originalmente. Isso impacta diretamente os usos

da água do reservatório; ignorar a tendência de queda nas vazões pode levar a colapsos sistêmicos na produção de alimentos e na geração de energia.

Essas mudanças podem ser atribuídas a uma combinação de fatores climáticos (como alterações nos regimes de precipitação e aumento da temperatura) e antrópicos, como intensificação do uso da terra, expansão urbana e demanda hídrica crescente (Milly et al., 2008; Paredes-Trejo et al., 2016). A constatação de tendências descendentes consistentes nas últimas décadas reforça a importância de incorporar a não estacionariedade nos estudos de previsão e planejamento de recursos hídricos (Burn et al., 2010).

A utilização desses dados de não estacionariedade na atualidade - visto que o período mais recente analisado (2006-2024) apresenta a tendência decrescente mais acentuada - subsidia medidas de gestão de conflitos do uso da água. Tais dados servem como ferramenta jurídica e técnica para, por exemplo, revisões de outorga e priorização de usos essenciais, como abastecimento humano e dessedentação animal.

Em última análise, esses resultados funcionam como sinal de alerta para a urgência de adoção de modelos de otimização estocástica mais robustos que levem em consideração a não estacionariedade da série de vazões. Essa incorporação permite que os gestores adotem políticas de operação mais resilientes e devidamente adaptadas às mudanças climáticas.

CONCLUSÃO

Os resultados indicam a quebra da estacionariedade nas séries de vazão, especialmente a partir de 1945, com tendência negativa estatisticamente significativa nas décadas mais recentes. A aplicação conjunta do teste de Mann-Kendall e da regressão linear evidencia que o comportamento hidrológico da bacia tem se alterado ao longo do tempo, possivelmente em resposta a fatores climáticos e antrópicos. Esses achados reforçam a necessidade de considerar a não estacionariedade em estudos de gestão de recursos hídricos e modelagem hidrológica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). (2024). *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe Anual 2024*. Brasília: ANA.

BURN, D. H.; SHARIF, M. (2010). A framework for quantifying the impact of climate change on water availability in basins with regulated flows. *Hydrological Processes*, 24(19), p. 2650–2661.

CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco. (2020). *Reservatório de Sobradinho: Características Técnicas*. Recife: CHESF.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO (CBHSF). (2022). *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Revisão 2022*. Maceió: CBHSF.

KENDALL, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. London: Charles Griffin.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. J. (2004). Change detection in hydrological records: A review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), p. 7–19.

MANN, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), p. 245–259.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A. et al. (2022). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and ecological impacts and adaptation strategies. *International Journal of Climatology*, 42, p. 4889–4915.

MENDES, L. A. et al. (2015). Trade-Off Analysis among Multiple Water Uses in a Hydropower System: Case of São Francisco River Basin, Brazil. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10).

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 552 p.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). (2024). *Plano Anual da Operação Energética dos Reservatórios – Ciclo 2024–2028*. Rio de Janeiro: ONS.

PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; RODRIGUES, T. R. (2016). Trend analysis of long-term precipitation in Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, 36(8), p. 2653–2669.

SCANLON, B. R.; FAKHREDDINE, S.; RATEB, A. et al. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, p. 87–101.

SEN, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), p. 1379–1389.

YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16(9), p. 1807–1829.

YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B. (2003). Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross correlation. *Hydrological Sciences Journal*, 48(1), p. 51–63.