INFERÊNCIA INDIRETA DE ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO PARAIBANO POR CURVAS COTA-VOLUME E ANÁLISE MULTIESCALA NO PLANO COMPLEXIDADE-ENTROPIA.

Ana Kerma Araujo Gomes de Sousa[1]; Laércio Leal dos Santos[2]; Fernando Henrique Antunes de Araújo[3]; Ricardo de Aragão[4]

RESUMO – O assoreamento reduz progressivamente a capacidade útil dos reservatórios e compromete a segurança hídrica, o abastecimento humano e a operação hidráulica. A mensuração direta desse processo depende, em geral, de levantamentos batimétricos periódicos e campanhas de campo de elevado custo. Este estudo propõe uma abordagem indireta para investigar mudanças estruturais e dinâmicas em cinco reservatórios do semiárido paraibano: Engenheiro Arcoverde, Jatobá I, Lagoa do Arroz, Mãe d'Água e Sumé. A metodologia combinou a reconstrução da relação cota-volume V(H), a análise de diferenças de volume para cotas equivalentes, a aplicação da Entropia de Permutação e da Complexidade Estatística no Plano Complexidade-Entropia de Causalidade Permutacional (CECP) e a avaliação temporal por janelas deslizantes. Os resultados indicaram deslocamentos negativos da curva V(H), especialmente em Mãe d'Água, Engenheiro Arcoverde e Lagoa do Arroz, sugerindo perda indireta de capacidade útil. No CECP, os reservatórios apresentaram alta entropia e baixa a moderada complexidade. A análise temporal evidenciou diferenças na estabilidade dinâmica entre os sistemas estudados, destacando Sumé como o reservatório mais estável e Mãe d'Água como aquele com maiores indícios de fragilização estrutural. Os resultados demonstram o potencial da integração entre curvas cota-volume e quantificadores informacionais para diagnóstico preliminar de reservatórios em contextos com restrição de dados experimentais.

ABSTRACT– Sedimentation progressively reduces reservoir storage capacity and affects water security and hydraulic operation. Direct assessment usually requires repeated bathymetric surveys and costly field campaigns. This study proposes an indirect approach to investigate structural and dynamic changes in five reservoirs located in the semi-arid region of Paraíba, Brazil. The methodology combined storage-elevation curve reconstruction, storage difference analysis, permutation entropy, statistical complexity within the Complexity–Entropy Causality Plane (CECP), and sliding-window analysis. Results revealed negative shifts in storage-elevation curves, particularly for Mãe d'Água, Engenheiro Arcoverde and Lagoa do Arroz, suggesting indirect storage-capacity reduction. CECP results indicated high entropy and low-to-moderate complexity. Sliding-window analysis highlighted differences in temporal stability among reservoirs, with Sumé presenting the most robust behavior and Mãe d'Água showing the strongest signs of structural vulnerability. The proposed framework provides a promising alternative for reservoir diagnosis in data-scarce environments.

Palavras-Chave – assoreamento; mananciais; entropia de permutação;

INTRODUÇÃO

O assoreamento constitui um dos principais fatores de degradação da capacidade de armazenamento dos reservatórios. A deposição progressiva de sedimentos reduz o volume útil disponível, comprometendo o abastecimento humano, a irrigação, a regularização de vazões e a segurança hídrica, especialmente em regiões semiáridas.

Tradicionalmente, a avaliação da perda de capacidade depende de levantamentos batimétricos, ecobatimetria e modelagem hidrossedimentológica. Embora robustas, essas abordagens demandam recursos financeiros e operacionais consideráveis, limitando sua aplicação contínua em muitos reservatórios brasileiros.

Por outro lado, séries históricas de volume armazenado e cota d'água são amplamente disponíveis em sistemas de monitoramento hidrológico. A exploração dessas informações pode fornecer evidências indiretas de alterações estruturais nos reservatórios. Nesse contexto, a utilização da relação cota-volume associada a métricas da teoria da informação surge como alternativa promissora para caracterização da dinâmica hidrológica.

O objetivo deste trabalho foi avaliar se a combinação entre deslocamentos temporais da curva cota-volume, quantificadores do Plano Complexidade-Entropia de Causalidade Permutacional (CECP) e estatísticas em janelas deslizantes permite identificar mudanças compatíveis com perda de capacidade útil em reservatórios do semiárido paraibano

METODOLOGIA

Área de estudo e base de dados

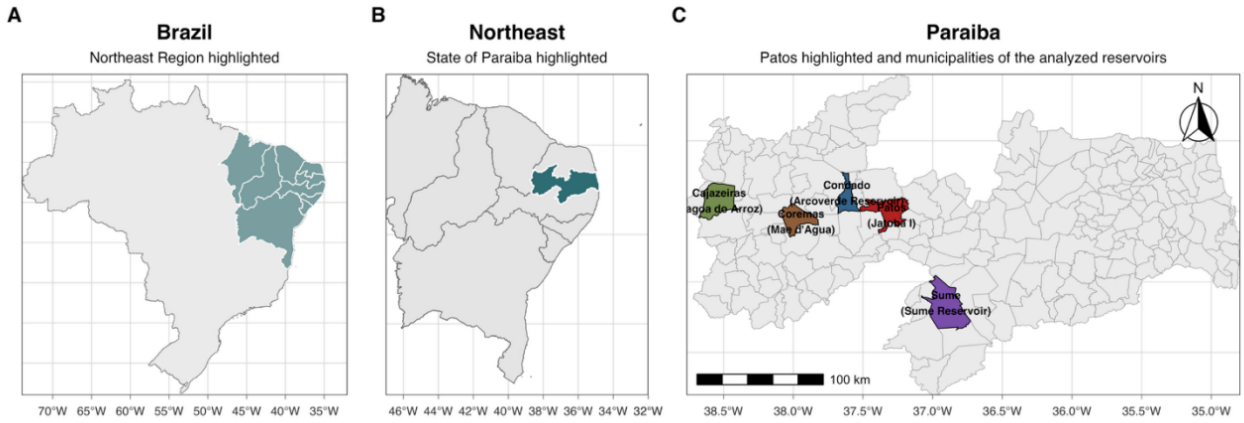
Foram utilizados dados de volume armazenado e cota d'água disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESA). Entre os reservatórios monitorados, cinco apresentaram cobertura temporal adequada para aplicação da metodologia: Engenheiro Arcoverde, Jatobá I, Lagoa do Arroz, Mãe d'Água e Sumé.

As séries foram divididas em três períodos: 2009–2014, 2015–2019 e 2020–2026, além da análise considerando todo o intervalo disponível.

Reconstrução da curva cota-volume

A relação V(H) foi reconstruída a partir de medianas condicionais por classes de cota e posteriormente regularizada por regressão isotônica, garantindo comportamento monotonamente crescente. A comparação entre períodos foi realizada por meio das diferenças de volume para cotas equivalentes. Valores negativos de $\Delta V(H)$ foram interpretados como indícios indiretos de redução da capacidade de armazenamento.

Figura 1: Localização geográfica da área de estudo em escalas encadeadas. Os painéis A-C mostram a posição da Paraíba no Brasil e no Nordeste, bem como a localização dos municípios associados aos cinco mananciais selecionados: Condado, Patos, Cajazeiras, Coremas e Sumé.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026.

Plano Complexidade-Entropia

A dinâmica das séries foi analisada por meio da Entropia de Permutação e da Complexidade Estatística calculadas a partir dos incrementos diários de volume. Foram adotados dimensão de incorporação $D = 4$ e atraso temporal $\tau = 1$. Cada série foi representada por um ponto no plano CECP, definido pelas coordenadas Entropia (H) e Complexidade (C).

Além disso, calculou-se a distância geométrica ao ponto (1,0), denominada eficiência geométrica (E), utilizada como descritor complementar da posição das séries no plano.

Janelas deslizantes

Para avaliar a estabilidade temporal dos indicadores, foram utilizadas janelas de 120 observações com deslocamento de 7 observações. Essa estratégia permitiu acompanhar a evolução temporal da eficiência geométrica ao longo do período analisado.

A análise da relação cota-volume revelou deslocamentos negativos em diferentes reservatórios, indicando redução indireta da capacidade útil ao longo do tempo. Os sinais mais expressivos ocorreram em Mãe d'Água, Engenheiro Arcoverde e Lagoa do Arroz, enquanto Sumé apresentou maior estabilidade estrutural.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 1 – Diferença média de volume (ΔV médio) entre os períodos 2020–2026 e 2009–2014 para cotas equivalentes nos reservatórios analisados. Valores negativos indicam menor volume armazenado no período mais recente, sugerindo redução indireta da capacidade útil.

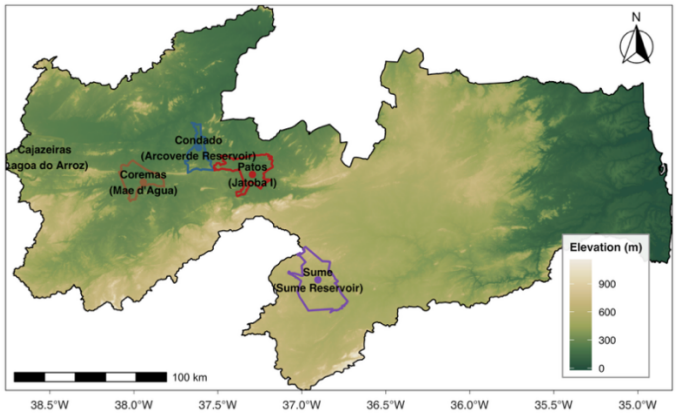
Reservatório	ΔV médio (hm³)
Mãe d'Água	-46,871
Eng. Arcoverde	-5,160
Lagoa do Arroz	-1,771
Jatobá I	-0,086

Reservatório	ΔV médio (hm³)
Sumé	-0,001

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026.

No CECP, todos os reservatórios permaneceram em uma região caracterizada por elevada entropia e baixa a moderada complexidade. Esse comportamento sugere sistemas influenciados por múltiplas forças hidrológicas e operacionais, mas ainda preservando organização ordinal identificável.

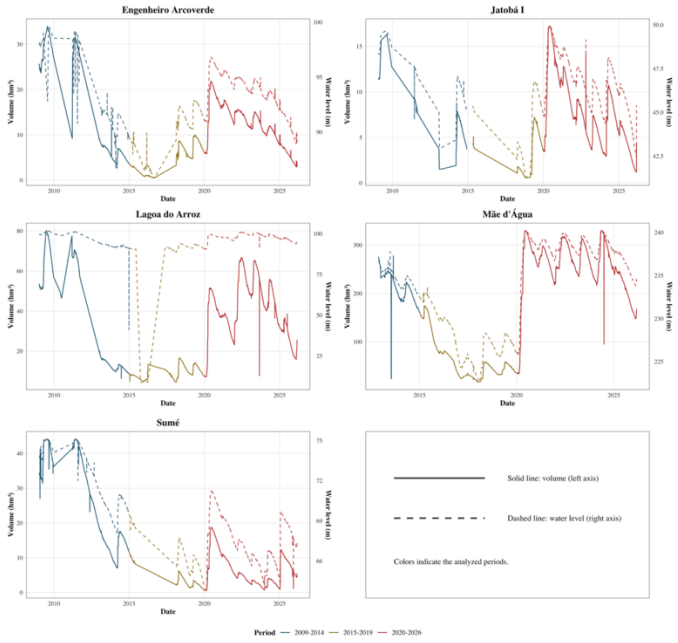
Figura 2: Contexto hipsométrico da Paraíba e localização dos municípios associados aos cinco mananciais analisados. A base de relevo reforça o enquadramento geomorfológico do estudo e evidencia o predomínio espacial do sertão paraibano no recorte empírico.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026.

A análise em janelas deslizantes demonstrou que a posição dos reservatórios no plano não permanece constante ao longo do tempo. A média e o desvio padrão da eficiência geométrica permitiram distinguir diferentes padrões de estabilidade dinâmica. Sumé apresentou o comportamento mais compatível com robustez funcional, combinando pequena alteração estrutural e recuperação parcial da eficiência nos períodos recentes. Em contraste, Mãe d'Água reuniu as evidências mais consistentes de perda estrutural de capacidade e simplificação progressiva da dinâmica ordinal.

Figura 3: Séries temporais de volume armazenado e cota d'água para os cinco reservatórios selecionados. Em cada painel, a linha contínua representa o volume no eixo vertical esquerdo, enquanto a linha tracejada representa a cota no eixo vertical direito. As cores indicam os três períodos fixos do estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2026.

A integração entre as análises estruturais e dinâmicas mostrou que a curva cota-volume e o CECP fornecem informações complementares. Enquanto a primeira evidencia possíveis alterações na capacidade de armazenamento, o segundo descreve mudanças na organização temporal dos incrementos de volume. Essa combinação amplia o potencial de diagnóstico de reservatórios monitorados apenas por séries operacionais.

CONCLUSÕES

A combinação entre curvas cota-volume, quantificadores do CECP e análise por janelas deslizantes mostrou-se eficiente para o diagnóstico indireto de reservatórios em contextos de limitação de dados experimentais.

Os resultados indicaram evidências mais fortes de perda indireta de capacidade útil nos reservatórios Mãe d'Água, Engenheiro Arcoverde e Lagoa do Arroz. Jatobá I apresentou alterações moderadas, enquanto Sumé demonstrou maior estabilidade estrutural e dinâmica.

A metodologia proposta não substitui levantamentos batimétricos, mas pode atuar como ferramenta preliminar de monitoramento e priorização de reservatórios para investigações mais detalhadas. Além disso, a aplicação do CECP à inferência indireta de assoreamento representa uma contribuição metodológica inovadora para a interface entre teoria da informação e engenharia de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Sistema de Monitoramento de Açudes. 2026.

ARAUJO, F. H. A. et al. 2019.

ARAUJO, F. H. A. et al. 2020.

BANDT, C.; POMPE, B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series. 2002.

FERNANDES, A.; ARAUJO, F. H. A. 2020.

FURNANS, J.; AUSTIN, B. Hydrographic survey estimates of reservoir sedimentation. 2008.

ROSSO, O. A. et al. Distinguishing noise from chaos. 2007.

SURIANO, J.; CARAM, L.; ROSSO, O. A. 2024.

YAN, Y. et al. Reservoir sedimentation assessment. 2018.

ENDALEW, A.; MULU, A. Reservoir sedimentation and storage loss assessment. 2022.

TESSEMA, A.; ZIMALE, F.; KEBEDEW, M. Reservoir capacity reduction analysis. 2024.

KOFFI, M. et al. Sediment retention and reservoir dynamics. 2025.