AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO (BA) POR MEIO DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Cleide Cruz Soares[1]; Carlos Alexandre Borges Garcia[2]; Silvânio Silvério Lopes da Costa[3]

RESUMO: O monitoramento da qualidade da água em reservatórios é essencial para subsidiar a gestão dos recursos hídricos e garantir seus múltiplos usos. Este estudo avaliou a qualidade da água do Reservatório de Sobradinho, no rio São Francisco, por meio de técnicas de estatística multivariada, visando identificar padrões temporais e relações entre variáveis limnológicas, hidrológicas e climáticas. Foram analisados dados de 45 campanhas de monitoramento realizadas entre 2016 e 2021, contemplando parâmetros físico-químicos, biológicos, precipitação e vazão. Aplicaram-se análise estatística descritiva, correlação de Pearson e Análise de Componentes Principais (ACP). Os resultados evidenciaram correlações significativas entre transparência, alcalinidade, nitrogênio total, condutividade elétrica e vazão, indicando influência do regime hidrológico sobre a dinâmica do reservatório. A ACP explicou 58,7% da variabilidade dos dados nas três primeiras componentes, permitindo identificar padrões ambientais relevantes. Apesar da ausência de diferenças sazonais marcantes, observaram-se alterações graduais na qualidade da água, reforçando a importância do monitoramento contínuo e de estratégias de gestão da bacia hidrográfica.

ABSTRACT: Monitoring water quality in reservoirs is essential to support water resource management and ensure its multiple uses. This study evaluated the water quality of the Sobradinho Reservoir on the São Francisco River using multivariate statistical techniques, aiming to identify temporal patterns and relationships between limnological, hydrological, and climatic variables. Data from 45 monitoring campaigns conducted between 2016 and 2021 were analyzed, encompassing physicochemical, biological, precipitation, and flow parameters. Descriptive statistical analysis, Pearson correlation, and Principal Component Analysis (PCA) were applied. The results showed significant correlations between transparency, alkalinity, total nitrogen, electrical conductivity, and flow, indicating the influence of the hydrological regime on the reservoir's dynamics. PCA explained 58.7% of the data variability in the first three components, allowing the identification of relevant environmental patterns. Despite the absence of marked seasonal differences, gradual changes in water quality were observed, reinforcing the importance of continuous monitoring and watershed management strategies.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento ambiental; Estatística multivariada.

[1]Universidade Federal de Sergipe: Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Cleidesoares60@gmail.com.

[2]Universidade Federal de Sergipe: Departamento de Química. Carlosabgarcia@gmail.com.

[3]Universidade Federal de Sergipe: Núcleo de Competência em Petróleo e Gás de Sergipe. Silvanioslc@gmail.com.

1- INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre os recursos hídricos, decorrente do crescimento populacional, da expansão das atividades econômicas e das mudanças no uso do solo, tem intensificado os problemas relacionados à disponibilidade e à qualidade da água. Entre os principais impactos destacam-se o lançamento de poluentes, o aporte excessivo de nutrientes, o assoreamento e a alteração dos processos naturais dos ecossistemas aquáticos, comprometendo seus múltiplos usos e a manutenção da biodiversidade (TUNDISI, 2006; TUNDISI, 2009; BRASIL, 1997).

Os reservatórios artificiais desempenham papel fundamental na geração de energia, abastecimento e regularização de vazões, mas sua implantação modifica a dinâmica hidrológica e limnológica dos ambientes aquáticos. Alterações no tempo de residência da água, no transporte de sedimentos e nutrientes e nos processos físicos, químicos e biológicos podem influenciar significativamente a qualidade da água, tornando indispensável o monitoramento contínuo desses ecossistemas (MAAVARA *et al*., 2015; LU *et al*., 2016; COURA, 2020).

Além do acompanhamento sistemático dos parâmetros físico-químicos, o uso de ferramentas estatísticas para interpretação integrada dos dados tem se tornado cada vez mais importante. Em séries históricas de monitoramento ambiental, a grande quantidade de variáveis analisadas dificulta a identificação de tendências e relações entre os fatores que condicionam a qualidade da água. Assim, métodos estatísticos multivariados, especialmente a Análise de Componentes Principais (ACP), reduzem a complexidade dos dados, identificam padrões espaço-temporais e reconhecem os principais fatores responsáveis pela variabilidade observada, constituindo importante suporte para a gestão dos recursos hídricos (WANG *et al*., 2013; COURA, 2020; HAIR *et al*., 2009).

O Reservatório de Sobradinho, localizado no rio São Francisco, destaca-se por sua importância estratégica para a segurança hídrica e energética do nordeste brasileiro, desempenhando funções essenciais na geração hidrelétrica, regularização de vazões e atendimento aos múltiplos usos da água. Nos últimos anos, a redução das vazões operacionais e os eventos de escassez hídrica reforçaram a necessidade de compreender os efeitos dessas mudanças sobre a qualidade da água e sobre o funcionamento do ecossistema aquático (CHESF, 2021; ANA, 2020).

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água do Reservatório de Sobradinho utilizando dados de monitoramento obtidos entre 2016 e 2021 e aplicando análises estatísticas descritivas e multivariadas para identificar padrões temporais e

relações entre variáveis limnológicas, hidrológicas e climáticas. Os resultados fornecem subsídios para o aprimoramento das estratégias de monitoramento e para a gestão sustentável dos recursos hídricos na bacia do rio São Francisco.

2- MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado no Reservatório de Sobradinho, localizado no rio São Francisco, estado da Bahia, Brasil. O reservatório constitui um dos principais empreendimentos hidrelétricos do país, desempenhando papel estratégico na regularização de vazões, geração de energia elétrica e garantia dos usos múltiplos da água na região Nordeste. Com aproximadamente 320 km de extensão e área inundada de cerca de 4.214 km², destaca-se por sua elevada capacidade de armazenamento e influência sobre a dinâmica hidrológica da bacia (CHESF, 2020; ANA, 2020).

Os dados analisados foram obtidos no ponto de monitoramento SOB 19, integrante do Programa de Monitoramento Ambiental conduzido pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), localizado no reservatório de Sobradinho. Esse programa foi implantado em 2016 com o objetivo de acompanhar possíveis alterações ambientais associadas às condições hidrológicas e operacionais do sistema, especialmente durante períodos de redução das vazões defluentes.

Coleta de dados e variáveis analisadas

Foram analisadas 45 campanhas de monitoramento realizadas entre agosto de 2016 e setembro de 2021. As amostras superficiais de água foram coletadas utilizando garrafa do tipo *Van Dorn* e transportadas sob refrigeração para análises laboratoriais, seguindo protocolos padronizados de monitoramento limnológico.

As determinações *in situ* incluíram temperatura da água, potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, salinidade, sólidos totais dissolvidos e transparência da água por meio do disco de Secchi. Em laboratório foram determinados alcalinidade, dureza total, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrogênio total, ortofosfato, fósforo total, carbono orgânico total, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), turbidez e clorofila-a, empregando metodologias descritas

por APHA (1995; 2006), Golterman *et al*. (1978), Mackereth *et al*. (1978), Koroleff (1976), Strickland e Parsons (1960), Nusch (1980) e Wetzel e Likens (2000). Informações referentes à precipitação pluviométrica e à vazão do reservatório também foram incorporadas às análises.

Tratamento estatístico

Inicialmente, foi realizada análise estatística descritiva das variáveis monitoradas, utilizando medidas de tendência central e dispersão para caracterizar o comportamento dos dados ao longo do período estudado. Posteriormente, aplicou-se a correlação de Pearson para investigar associações lineares entre os parâmetros de qualidade da água, as variáveis hidrológicas e os indicadores climáticos. Em seguida, empregou-se a Análise de Componentes Principais (ACP), técnica de estatística multivariada amplamente utilizada para reduzir a dimensionalidade de grandes conjuntos de dados ambientais e identificar os fatores responsáveis pela maior parte da variabilidade observada (HAIR *et al*., 2009).

A ACP permitiu sintetizar as relações entre as variáveis físico-químicas, biológicas e hidrológicas, evidenciando agrupamentos e padrões temporais relacionados à dinâmica do reservatório.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz de correlação de Pearson evidenciou associações significativas entre diversos parâmetros físico-químicos, hidrológicos e biológicos, indicando que a dinâmica da qualidade da água no Reservatório de Sobradinho é resultado da interação entre processos naturais e condições operacionais do sistema.

Entre as correlações positivas mais expressivas destacam-se aquelas entre transparência e condutividade elétrica (r = 0,73), alcalinidade e transparência (r = 0,77), alcalinidade e nitrogênio total (r = 0,75), vazão e alcalinidade (r = 0,77) e vazão e nitrogênio total (r = 0,72), demonstrando a influência conjunta do regime hidrológico sobre a disponibilidade e o comportamento dessas variáveis. Esses resultados corroboram a literatura, que aponta que alterações no tempo de residência da água, nas vazões afluentes e na mistura da coluna d’água podem modificar significativamente a

distribuição de nutrientes e as características físico-químicas em reservatórios tropicais (Esteves, 2011; Wetzel, 2001).

O aumento gradual da alcalinidade observado ao longo da série histórica pode estar relacionado à intensificação dos processos de decomposição da matéria orgânica e à mineralização no ambiente aquático, especialmente em períodos de menor renovação hídrica. Esse comportamento também pode refletir o aumento da concentração de bicarbonatos decorrente da maior permanência da água no reservatório e de processos biogeoquímicos associados ao metabolismo microbiano (Wetzel, 2001).

A associação positiva entre nitrogênio total e clorofila-a sugere que a disponibilidade de nutrientes pode estar favorecendo o desenvolvimento fitoplanctônico, ainda que outros fatores, como luminosidade, temperatura e tempo de residência da água, também exerçam papel importante no controle da produtividade primária. A elevação progressiva da clorofila-a, associada à redução da transparência em determinados períodos, indica uma possível evolução do estado trófico do reservatório, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo para prevenir processos de eutrofização.

A aplicação da Análise de Componentes Principais permitiu reduzir a complexidade do conjunto de dados e sintetizar aproximadamente 58,7% da variabilidade total nas três primeiras componentes principais, sendo 31,22% explicados pela PC1, 18,20% pela PC2 e 9,28% pela PC3, conforme Figuras 1 e 2. Esses resultados demonstram a eficiência da ACP na identificação dos fatores predominantes que controlam a qualidade da água no Reservatório de Sobradinho, facilitando a interpretação integrada de variáveis ambientais altamente correlacionadas.

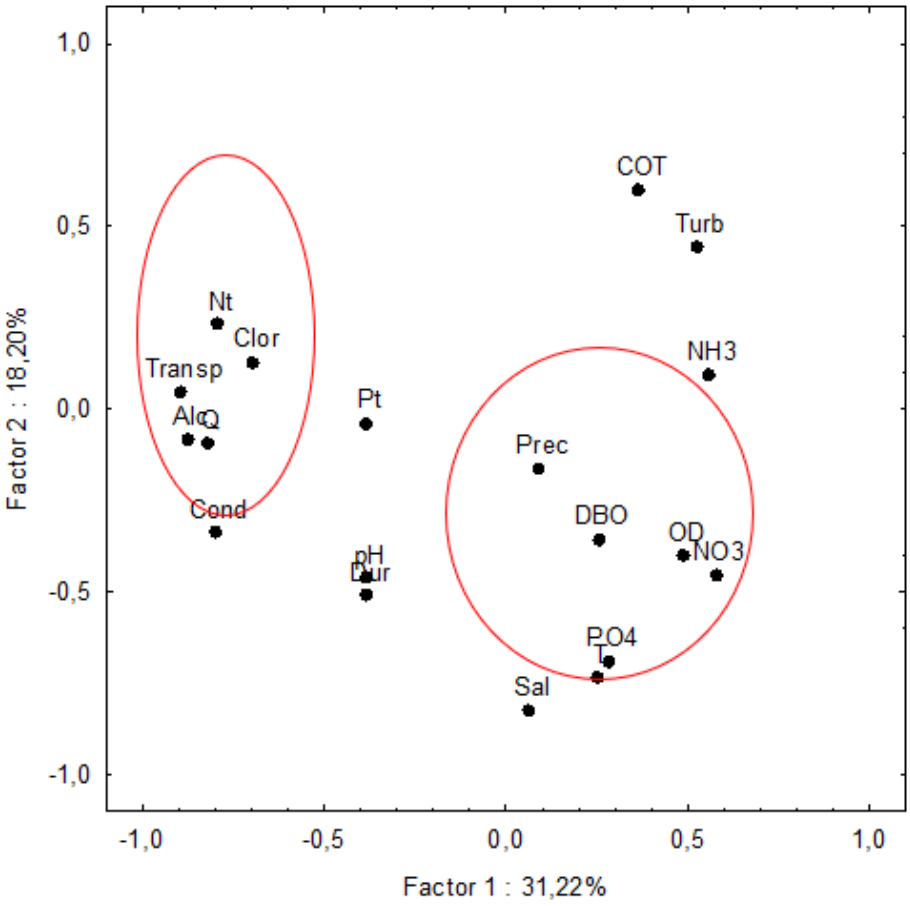


Figura 1: Análise de componentes principais aplicada às variáveis do monitoramento da qualidade da água do reservatório de Sobradinho (PC1 x PC2).

A formação dos agrupamentos observados nos diagramas da ACP evidencia que variáveis como vazão, alcalinidade, transparência, condutividade elétrica e nitrogênio total apresentam comportamento semelhante e contribuem de forma relevante para a variabilidade representada pela primeira componente principal. Esse padrão é consistente com a matriz de correlação de Pearson e sugere forte influência das condições hidrológicas sobre a dinâmica do reservatório.

Por sua vez, a segunda componente principal apresentou maior associação com variáveis relacionadas à turbidez e ao transporte de partículas, indicando que eventos pluviométricos e o consequente aporte de sedimentos podem alterar temporariamente a qualidade da água. Em reservatórios tropicais, esse comportamento é frequentemente observado devido ao carreamento superficial de sedimentos e nutrientes provenientes da bacia hidrográfica, afetando simultaneamente a transparência, a disponibilidade de nutrientes e a produtividade fitoplanctônica.

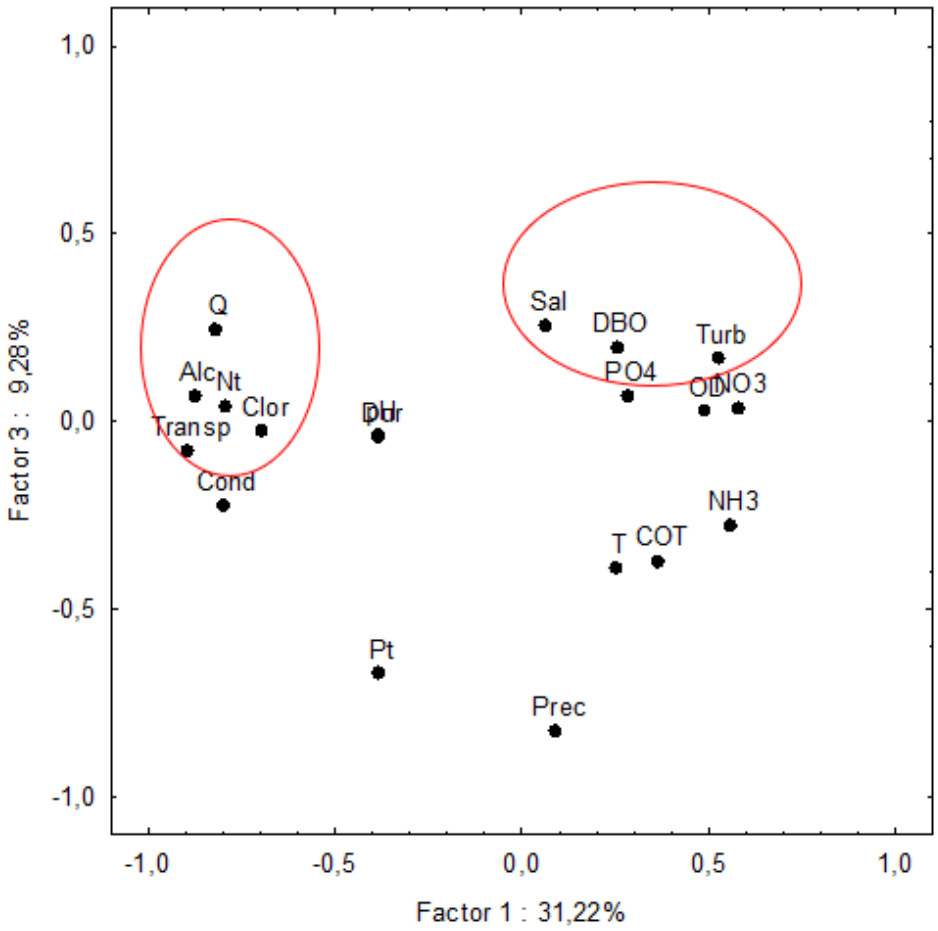


Figura 2: Análise de componentes principais aplicada às variáveis do monitoramento da qualidade da água do reservatório de Sobradinho (PC1 x PC3).

Embora não tenha sido identificado um padrão sazonal uniforme ao longo de todo o período analisado, a ACP evidenciou mudanças temporais na estrutura dos dados ambientais, indicando que as variações interanuais de precipitação e as sucessivas reduções de vazão podem exercer influência mais marcante sobre a qualidade da água do que a sazonalidade climática propriamente dita. Esse resultado reforça a importância da adoção de abordagens multivariadas em programas de monitoramento ambiental, permitindo identificar tendências que dificilmente seriam percebidas por análises univariadas.

A evolução temporal dos escores da PC1 evidencia alterações graduais na estrutura da qualidade da água ao longo do período de monitoramento, corroborando a interpretação obtida pela ACP e reforçando que as mudanças observadas ocorreram de forma progressiva, sem um padrão sazonal bem definido

4- CONCLUSÕES

O monitoramento da qualidade da água em reservatórios é fundamental para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos e garantir seus múltiplos usos. Neste estudo, embora não tenham sido identificadas diferenças sazonais expressivas entre os parâmetros avaliados, a análise da série histórica revelou alterações graduais na qualidade da água do Reservatório de Sobradinho, indicando mudanças nas condições ambientais ao longo do período de monitoramento.

Os resultados reforçam a importância da manutenção e do fortalecimento dos programas de monitoramento ambiental, além da adoção de ações integradas de conservação e recuperação da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Medidas voltadas ao controle das fontes de poluição e ao planejamento da gestão hídrica são essenciais para preservar a qualidade da água, assegurar os serviços ecossistêmicos e garantir a segurança hídrica do reservatório.

Mesmo com a ACP mostrando-se adequada na sintetização dos padrões estudados, recomenda-se a adoção e aplicação de metodologias complementares para estudos futuros, possibilitando a investigação, por exemplo, de interações não lineares.

5- AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH) pelo apoio institucional e pelo incentivo ao desenvolvimento desta pesquisa.

6- REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual**. Brasília, DF: ANA, 2020.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19. ed. Washington, DC: APHA, 1995.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington, DC: APHA, 2006.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF). **Relatórios técnicos do Programa de Monitoramento Ambiental do Rio São Francisco**. Recife: CHESF, 2020.

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF). **Programa de Monitoramento Ambiental do Rio São Francisco: relatório técnico**. Recife: CHESF, 2021.

COURA, M. R. **Análise da alteração da qualidade das águas superficiais impactadas por usinas hidrelétricas recém implantadas na Amazônia**. 2020. 228 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

GOLTERMAN, H. L.; CLYMO, R. S.; OHNSTAD, M. A. M. **Methods for physical and chemical analysis of fresh waters**. 2. ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1978.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate data analysis**. 7. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

KOROLEFF, F. Determination of ammonia. In: GRASSHOFF, K. (ed.). **Methods of seawater analysis**. Weinheim: Verlag Chemie, 1976.

LU, Y. *et al.* Impacts of reservoir construction on riverine ecosystems: a review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 13, n. 12, 2016.

MACKERETH, F. J. H.; HERON, J.; TALLING, J. F. **Water analysis: some revised methods for limnologists**. Ambleside: Freshwater Biological Association, 1978.

MAAVARA, T. *et al.* Global phosphorus retention by river damming. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 51, p. 15603–15608, 2015. DOI: 10.1073/pnas.1511797112.

NUSCH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. **Archiv für Hydrobiologie – Beiheft Ergebnisse der Limnologie**, v. 14, p. 14–36, 1980.

STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. **A manual of seawater analysis**. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada, 1960.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, São Paulo, n. 70, p. 24–35, 2006.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 7–16, 2008.

WANG, Y. *et al.* Multivariate statistical techniques for evaluating spatial and temporal variations in water quality: a review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 185, p. 3981–3994, 2013.

WETZEL, R. G. **Limnology: lake and river ecosystems**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

WETZEL, R. G.; LIKENS, G. E. **Limnological analyses**. 3. ed. New York: Springer, 2000.