doi: 10.5123/S2176-6223202501768

Tendências sazonais e integração multivariada de indicadores hidroquímicos no rio Maguari-Açu

Seasonal trends and multivariate integration of hydrochemical indicators in the Maguari-Açu River

Neuton Trindade Vasconcelos Junior[1], Yasmim Oliveira dos Santos[2], Mônia Maria Carvalho da Silva[3], Kleber Raimundo Freitas Faial[3], Eliane Brabo de Sousa[4], Kelson do Carmo Freitas Faial[1]

[1] *Instituto Evandro Chagas, Seção de Meio Ambiente, Laboratório de Geoquímica e Saúde, Ananindeua, Pará, Brasil*
[2] *Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Ambiental e Sanitária, Belém, Pará, Brasil*
[3] *Instituto Evandro Chagas, Seção de Meio Ambiente, Laboratório de Química Ambiental e Saúde, Ananindeua, Pará, Brasil*
[4] *Instituto Evandro Chagas, Seção de Meio Ambiente, Laboratório de Cianobactérias e Bioindicadores Aquáticos, Ananindeua, Pará, Brasil*

RESUMO

OBJETIVO: Investigar a variação espaço-temporal e as correlações multivariadas entre indicadores hidroquímicos na bacia do rio Maguari-Açu, na Região Metropolitana de Belém, Estado do Pará, Brasil. MATERIAIS E MÉTODOS: Foram realizadas seis campanhas de amostragem em 11 pontos ao longo do ciclo hidrológico. As análises incluíram parâmetros físico-químicos *in situ* e quantificação de metais por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente. Aplicaram-se análise de componentes principais e agrupamento hierárquico. RESULTADOS: Os dados revelaram ampla variabilidade nos parâmetros analisados, influenciada por fatores sazonais e pressões antrópicas, como lançamento de esgotos e uso desordenado do solo. As análises multivariadas identificaram três agrupamentos principais relacionados à salinização, à dinâmica redox e à presença de atividades humanas. CONCLUSÃO: A qualidade da água na bacia do rio Maguari-Açu encontra-se comprometida em diversos trechos, especialmente devido às interferências antrópicas e à sazonalidade climática. Os resultados evidenciam potenciais impactos sobre a saúde ambiental e a população local, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo, intervenções de gestão e políticas públicas voltadas à segurança hídrica. Este estudo fornece subsídios técnicos para a mitigação de impactos ambientais e conservação de ecossistemas aquáticos, especialmente no contexto das mudanças climáticas e da realização da COP30 em Belém.

Palavras-chave: Qualidade da Água; Metais Pesados; Análise Multivariada; Saúde Ambiental; Ecossistema Amazônico.

ABSTRACT

OBJECTIVE: To investigate the spatiotemporal variation and multivariate correlations among hydrochemical indicators in the Maguari-Açu River basin, located in the Metropolitan Region of Belém, Pará State, Brazil. MATERIALS AND METHODS: Six sampling campaigns were carried out at 11 sites throughout the hydrological cycle. Analyses included *in situ* physicochemical parameters and quantification of metals by inductively coupled plasma optical emission spectrometry. Principal component analysis and hierarchical cluster analysis were applied. RESULTS: The data revealed wide variability in the analyzed parameters, influenced by seasonal factors and anthropogenic pressures such as sewage discharge and unregulated land use. Multivariate analyses identified three main clusters related to salinization, redox dynamics, and human activities. CONCLUSION: Water quality in the Maguari-Açu River basin is compromised in several stretches, mainly due to anthropogenic interference and climatic seasonality. The results highlight potential impacts on environmental health and the local population, emphasizing the need for continuous monitoring, management interventions, and public policies aimed at ensuring water security. This study provides technical evidence to support mitigation of environmental impacts and conservation of aquatic ecosystems, particularly in the context of climate change and the upcoming COP30 in Belém.

Keywords: Water Quality; Metals, Heavy; Multivariate Analysis; Environmental Health; Amazonian Ecosystem.

Correspondência / Correspondence:
Neuton Trindade Vasconcelos Junior
Instituto Evandro Chagas, Seção de Meio Ambiente, Laboratório de Geoquímica e Saúde.
Rodovia BR-316, km 7, s/n, CEP: 67030-000. Bairro: Levilândia – Ananindeua, Pará, Brasil
Tel: +55 (91) 98201-4622
E-mail: neutonjunior@iec.gov.br

INTRODUÇÃO

A 30ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP30), que será realizada em Belém do Pará em 2025, destaca a Amazônia como eixo estratégico nas discussões globais sobre mudanças climáticas, especialmente no que se refere à conservação dos recursos hídricos e à adaptação aos seus impactos[1,2]. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC), as projeções para o período de 2016 a 2035 indicam alterações significativas em variáveis hidrometeorológicas, sobretudo em regiões tropicais como a Amazônia[3]. Tais mudanças afetam diretamente a disponibilidade e a qualidade da água, comprometendo a capacidade dos corpos hídricos de diluir poluentes e manter o equilíbrio ecológico, além de expor a população local a contaminantes presentes em águas destinadas ao consumo, à pesca ou ao lazer[4,5].

As bacias amazônicas desempenham funções essenciais na regulação climática global e na oferta de serviços ecossistêmicos[6]. Estudos recentes reforçam que os ecossistemas aquáticos tropicais são particularmente sensíveis às mudanças climáticas, com efeitos já observados em corpos d'água da bacia amazônica, como o rio Pará[7]. A degradação desses sistemas, impulsionada por pressões antrópicas e alterações hidrológicas, repercute diretamente na saúde, na segurança alimentar e nas atividades econômicas das populações locais[8,9].

Nesse contexto, o estudo da bacia do rio Maguari-Açu, localizada na Região Metropolitana de Belém, torna-se estratégico para subsidiar políticas públicas e ações de governança hídrica[10,11]. A análise temporal de indicadores hidroquímicos é fundamental para o monitoramento de impactos ambientais, permitindo identificar áreas vulneráveis, padrões de contaminação e tendências críticas[4]. Tais resultados contribuem para a avaliação de riscos potenciais à população, como a contaminação por metais, o aumento de sólidos dissolvidos e as mudanças na qualidade da água para abastecimento, lazer e pesca, além de oferecer subsídios para medidas de mitigação e educação ambiental[12].

Pesquisas recentes têm evidenciado intensa contaminação por metais em canais pluviais e corpos d'água urbanos da Amazônia. Santana[13] observou concentrações de cádmio (Cd), cobalto (Co) e cobre (Cu) na água acima dos limites legais em várias bacias, indicando contaminação antrópica e risco ecológico, de acordo com os parâmetros estabelecidos para águas doces de classe II. Em Macapá, o canal do Jandiá apresentou concentrações de Cd, chumbo (Pb), cromo (Cr) e níquel (Ni) nos sedimentos de fundo superiores aos valores recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS), sugerindo risco adicional à saúde das populações que utilizam essas águas para consumo ou atividades recreativas[14].

A aplicação de técnicas multivariadas é reconhecida como ferramenta eficaz para compreender os processos ambientais complexos que influenciam a qualidade da água, permitindo identificar simultaneamente diferentes fontes de poluição[15]. A modelagem multivariada tem se mostrado útil no monitoramento contínuo da qualidade da água, especialmente em contextos urbanos, oferecendo subsídios para o controle da poluição e para a gestão sustentável dos recursos hídricos[16]. Dessa forma, é possível prever áreas de maior risco à população e planejar ações de mitigação específicas, aumentando a resiliência hídrica e a proteção da saúde pública[17].

Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar a variação espacial e temporal de metais e parâmetros físico-químicos no rio urbano Maguari-Açu, localizado em Ananindeua, estado do Pará, na Amazônia brasileira, considerando os diferentes usos do entorno e a influência da sazonalidade. Além disso, busca-se discutir os resultados à luz das mudanças climáticas, fornecendo subsídios concretos para a gestão ambiental, a proteção da população local e o fortalecimento de pesquisas sobre resiliência hídrica em áreas urbanas amazônicas.

MATERIAL E MÉTODO

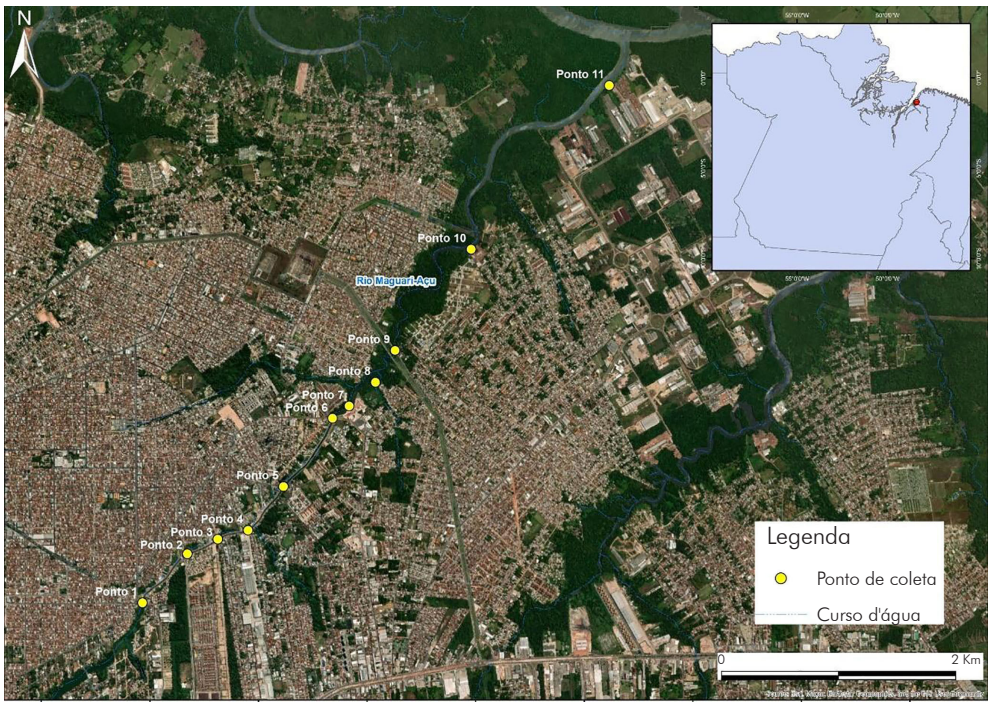
ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na bacia do rio Maguari-Açu, localizada na Região Metropolitana de Belém, estado do Pará, Brasil, abrangendo o município de Ananindeua, com aproximadamente 507.838 habitantes em 2024[18]. A região apresenta processo acelerado de urbanização, com áreas já consolidadas e outras em expansão; o uso do solo é predominantemente voltado à agricultura e à construção civil[19,20].

A hidrografia é marcada pelo rio Maguari-Açu, que deságua no furo do Maguari e delimita a região a noroeste com Belém. O rio sofre influência das marés em sua porção margeada por vegetação, uma vez que parte de seu curso foi retificada e transformada em canal pluvial. O clima é equatorial quente e úmido, com temperatura média próxima de 25 °C e precipitação anual entre 2.250 e 2.500 mm, concentrada de janeiro a junho[21]. Os meses mais chuvosos são fevereiro, março e abril, enquanto os menos chuvosos correspondem ao período de agosto a novembro.

AMOSTRAGEM E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizadas seis campanhas de amostragem na bacia do rio Maguari-Açu, distribuídas em 11 pontos, durante o período menos chuvoso (outubro a dezembro de 2024) e o mais chuvoso (fevereiro a abril de 2025). As amostragens abrangeram áreas residenciais, industriais e de lazer, com coordenadas variando entre 1°19'17,37"S e 1°21'40,87"S de latitude e 48°21'22,42"W e 48°23'52,12"W de longitude (Figura 1). A seleção dos pontos considerou os diferentes usos do entorno (residencial, industrial e recreativo), a influência do escoamento superficial e a proximidade de potenciais fontes de contaminação, de modo a representar gradientes espaciais e padrões sazonais de contaminação.



Fonte: Eliane Brabo (2025).

Figura 1 – Trecho do rio Maguari-Açu, no município de Ananindeua, estado do Pará, Brasil (área de estudo), com a localização dos pontos de coleta utilizados no estudo

Os pontos MA01–MA06 correspondem a canais de drenagem urbana em áreas residenciais; os pontos MA07–MA09 situam-se, respectivamente, em um píer de lazer, em uma margem periférica residencial e em uma ponte urbana com intenso tráfego de veículos. Já os pontos MA10 e MA11 localizam-se na margem do rio, em área industrial associada à atividade madeireira (Figura 1). Essa distribuição permitiu avaliar variações espaciais e impactos de diferentes pressões antrópicas.

Todos os procedimentos seguiram as recomendações da 24ª edição do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW)[22]. As amostras foram coletadas em frascos de polipropileno de 1 L, utilizando baldes de aço inoxidável previamente esterilizados.

As variáveis físico-químicas, pH, temperatura (T), condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), oxigênio dissolvido (OD) e potencial de oxirredução (ORP), foram medidas *in situ* com sonda multiparâmetros HI9828 (Hanna®), conforme os métodos SMEWW 500-H^+B, 2550B, 2510B, 2510A, 4500-O e 2580B[22].

ANÁLISE DE AMOSTRAS

Foram analisados alumínio (Al), bário (Ba), ferro (Fe), manganês (Mn), sódio (Na) e zinco (Zn), conforme o método SMEWW 3020B[22]. Para Al e Fe (fração dissolvida), alíquotas de 50 mL foram filtradas e acidificadas com 500 µL de HNO_3 65% (*Emsure® Merck*, Estados Unidos). Para Ba, Mn, Na e Zn (fração total), outra alíquota de 50 mL foi acidificada com 500 µL de HNO_3 65% e 250 µL de HCl 37%.

As análises foram realizadas por ICP-OES (*Vista-MPX®*, Austrália), em configuração axial, controlada pelo software *ICPExpert Vista* 4.1.0[23]. O Al foi quantificado na linha espectral de 396,152 nm; o Ba em 455,403 nm; o Fe em 238,204 nm; o Mn em 257,610 nm; o Na em 588,592 nm; e o Zn em 212,857 nm. Entre os parâmetros instrumentais utilizados: potência de 1,0 kW, fluxo de plasma de 15 L/min, bomba a 30 rpm, tocha de 2,4 mm e nebulizador tipo *V-groove*.

VALIDAÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO

A validação contemplou linearidade, exatidão (recuperação) e limites de detecção (LD) e de quantificação (LQ). As curvas de calibração foram construídas no intervalo de 0,025 a 3,2 mg/L, a partir de soluções padrão certificadas (*Inorganics Venture®*, Estados Unidos).

A exatidão analítica foi avaliada pela porcentagem de recuperação, conforme a Equação 1, utilizando o material de referência SRM 1643f (*National Institute of Standards and Technology* – NIST, Estados Unidos)[24].

$$Recuperação\ (\%) \frac{CE}{CT} \times 100 \qquad (1)$$

Onde CE é a concentração determinada experimentalmente e CT é a concentração certificada no material de referência padrão.

O LQ foi determinado segundo o DOQ-CGCRE-008 (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro)[25], pela análise de dez brancos fortificados com a menor concentração da curva; o LD foi estimado como um terço do LQ.

As recuperações variaram de 95,5% a 102,7%, indicando boa concordância entre os valores certificados e experimentais. De acordo com a *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC,

Appendix F)[24], um método é considerado exato quando a recuperação varia de 80% a 110%.

As concentrações certificadas e obtidas foram, respectivamente: Al (0,133 e 0,127 mg/L), Ba (0,513 e 0,524 mg/L), Fe (0,093 e 0,094 mg/L), Mn (0,037 e 0,038 mg/L), Na (18,640 e 18,855 mg/L) e Zn (0,074 e 0,073 mg/L).

Não foi possível aplicar testes de recuperação para pH, T, CE, STD, OD e ORP, pois não há materiais de referência certificados para esses parâmetros.

PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS

A estatística descritiva foi aplicada aos dados, inicialmente organizados no software *Microsoft Excel® 2019*[26] e posteriormente analisados no *Minitab® 20.2*[27]. Foram construídos *boxplots* para avaliar a variabilidade dos dados; para explorar padrões multivariados, elaborou-se uma matriz normalizada com 66 amostras e 12 variáveis, submetida à Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* – PCA) e à Análise de Agrupamento Hierárquico (*Hierarchical Cluster Analysis* – HCA). Valores inferiores ao LD e ao LQ foram substituídos por LD/2 e LQ/2, respectivamente, a fim de evitar distorções estatísticas nas análises multivariadas[28].

RESULTADOS

ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A Tabela 1 apresenta os valores médios, desvios padrão e intervalos observados para os parâmetros investigados, além dos LD, LQ e dos Valores Máximos Permitidos (VMP) estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005[29].

As Figuras 2 e 3 mostram os *boxplots* com a variação sazonal dos parâmetros físico-químicos e dos metais ao longo das campanhas, permitindo observar a dispersão dos dados e as tendências sazonais.

A análise das águas superficiais do rio Maguari-Açu revelou variações sazonais marcantes. A temperatura variou de 26,0 a 31,2 °C (média: 28,8 °C), com pico em dezembro de 2024, coincidindo com o início do período mais chuvoso. A CE variou de 66,4 a 16 530 µS/cm (média: 1.332,9 µS/cm), atingindo valores máximos em outubro e reduzindo-se com o aumento da pluviosidade.

O ORP oscilou entre –77,8 e 274,2 mV (média: 111,1 mV), refletindo a transição de condições redutoras para oxidantes, com pico em abril de 2025. O pH variou de 5,9 a 9,0 (média: 6,8), predominando condições levemente ácidas a neutras. Os STD oscilaram de 32,2 a 8 090 mg/L (média: 714,5 mg/L), com maiores valores no período menos chuvoso e redução a partir de fevereiro, evidenciando a influência hidrológica.

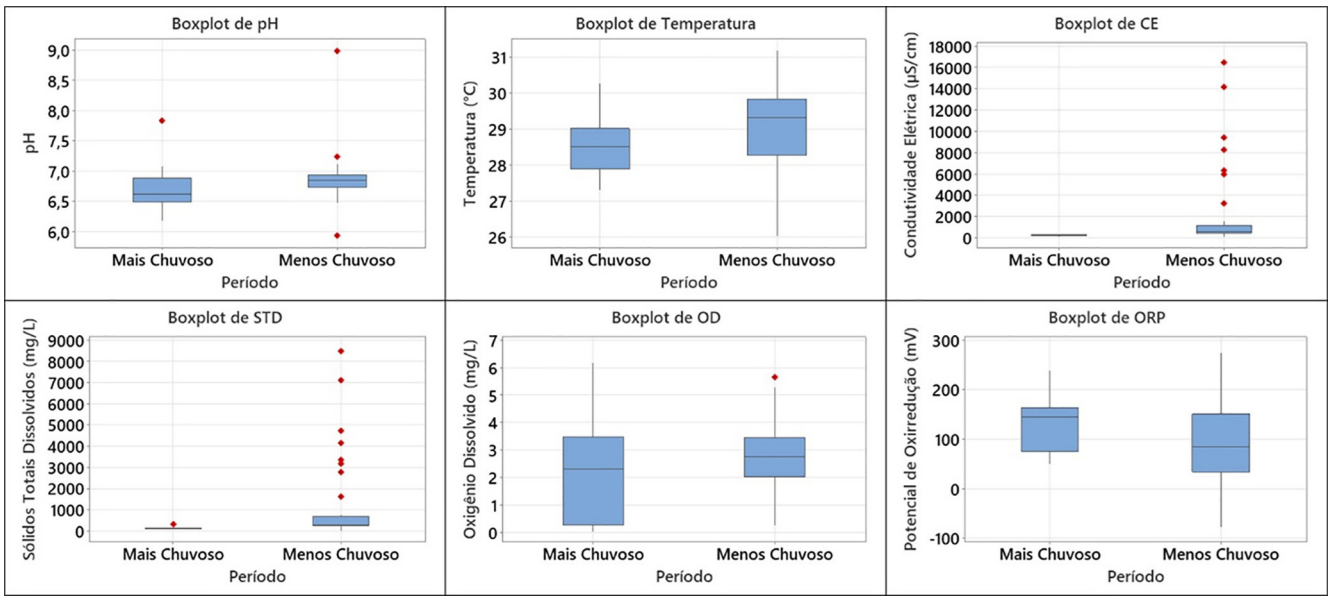
O OD variou de 0,04 a 6,19 mg/L (média: 2,5 mg/L), com menores valores em fevereiro e recuperação em abril. As concentrações de Al variaram de 0,004 a 1,07 mg/L (média: 0,09 mg/L), aumentando no período mais chuvoso. O Ba variou de 0,004 a 0,212 mg/L (média: 0,06 mg/L); o Fe apresentou média de 0,72 mg/L (intervalo: 0,05–2,18 mg/L), com acúmulo no período menos chuvoso; o Mn oscilou de 0,004 a 0,130 mg/L (média: 0,050 mg/L); e o Zn manteve-se em níveis baixos (0,004–0,076 mg/L; média: 0,02 mg/L).

Tabela 1 – Análise estatística dos parâmetros físico-químicos e químicos da qualidade da água superficial na bacia hidrográfica do rio Maguari-Açu, município de Ananindeua, estado do Pará, Brasil.

Parâmetro	Média ± DP	Mínimo	Máximo	LD	LQ	VMP
pH	6,80 ± 0,39	5,92	9,00	N.A.	N.A.	6,0–9,0
T (°C)	28,78 ± 1,09	26,02	31,19	N.A.	N.A.	N.A.
CE (µS/cm)	1.332,90 ± 3.079,59	66,41	16.530,0	N.A.	N.A.	N.A.
STD (mg/L)	714,51 ± 1 584,00	47,0	8.467,0	N.A.	N.A.	500,0
OD (mg/L)	2,50 ± 1,56	0,04	6,19	N.A.	N.A.	> 5,0
ORP (mV)	111,06 ± 72,38	–77,80	274,20	N.A.	N.A.	N.A.
Al (mg/L)	0,09 ± 0,14	0,004	1,07	0,01	0,03	0,1
Ba (mg/L)	0,06 ± 0,06	0,004	0,21	0,01	0,03	0,7
Fe (mg/L)	0,72 ± 0,62	0,05	2,18	0,01	0,03	0,3
Mn (mg/L)	0,05 ± 0,02	0,004	0,13	0,01	0,03	0,1
Na (mg/L)	165,10 ± 359,19	3,13	1.539,00	0,01	0,03	–
Zn (mg/L)	0,02 ± 0,02	0,004	0,08	0,01	0,03	0,18

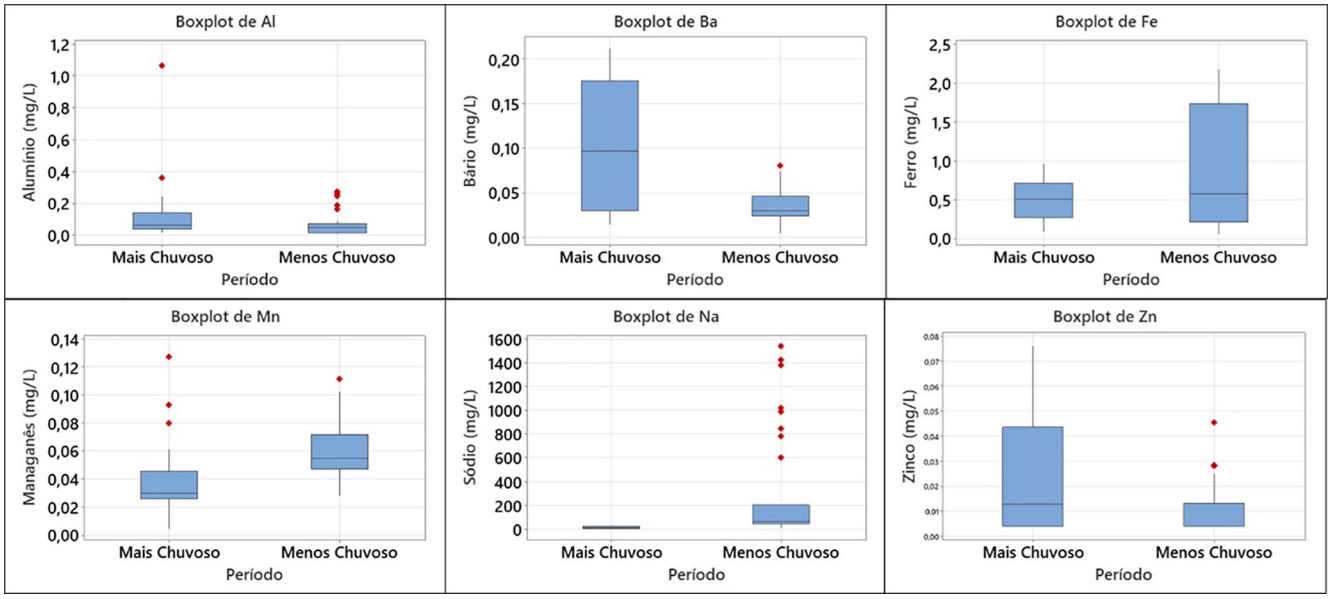
N.A.: Não se aplica; DP: Desvio padrão; LD: Limite de detecção; LQ: Limite de quantificação; VMP: Valor Máximo Permitido; pH: Potencial hidrogeniônico; T: Temperatura; CE: Condutividade elétrica; STD: Sólidos totais dissolvidos; OD: Oxigênio dissolvido; ORP: Potencial de oxirredução; Al: Alumínio; Ba: Bário; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Na: Sódio; Zn: Zinco.

Nota: N.A. indica que não há valor máximo permitido estabelecido para o parâmetro na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357, de 17 de março de 2005. Para os parâmetros pH, T, CE, STD, OD e ORP, não se aplicam LD ou LQ.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2 – *Boxplots* dos parâmetros físico-químicos da água superficial do rio Maguari-Açu, comparando os períodos chuvoso e menos chuvoso. A linha central representa a mediana, as caixas indicam os quartis e os pontos correspondem aos valores atípicos (*outliers*)



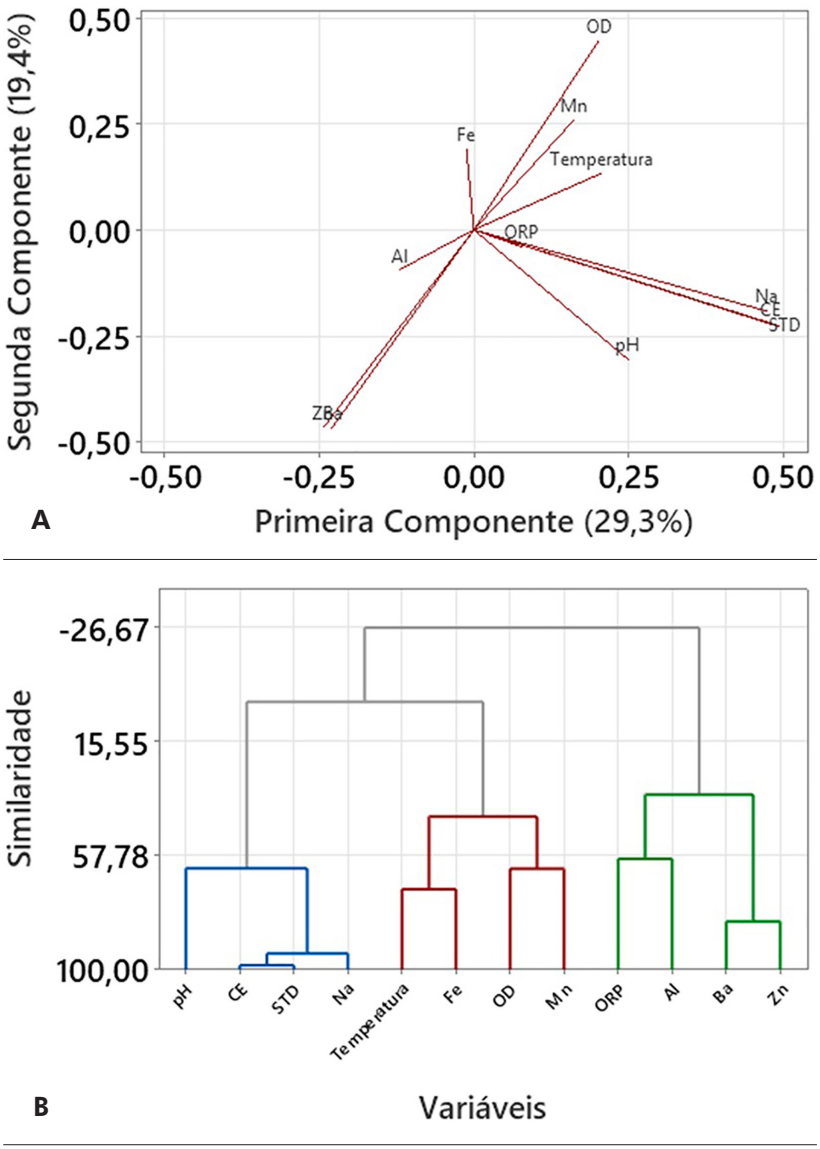
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – *Boxplots* das concentrações de metais na água superficial do rio Maguari-Açu, comparando os períodos chuvoso e menos chuvoso. A linha central representa a mediana, as caixas indicam os quartis e os pontos correspondem aos valores atípicos (*outliers*)

A PCA mostrou que as quatro primeiras componentes explicaram 74,8% da variância total (PC1 = 29,3%; PC2 = 19,4%; PC3 = 15,0%; PC4 = 11,1%). A PC1 foi influenciada por Na, CE e STD, associando-se à salinização e indicando um gradiente de mineralização da água. A PC2 foi influenciada por OD e Mn (carregamentos positivos) e por Ba e Zn (negativos), refletindo processos de oxirredução e disponibilidade de metais, nos quais a diminuição do OD pode favorecer a mobilização de Mn. A PC3 destacou Fe e ORP, relacionados à mobilização de metais, enquanto a PC4 evidenciou Al e temperatura, indicando processos físico-químicos influenciados por variações térmicas e pelas interações entre metais no sedimento e na coluna d'água.

No gráfico da PCA (Figura 4A), foram representadas apenas as componentes PC1 e PC2, que juntas explicaram 48,7% da variância total, permitindo visualizar a dispersão e o agrupamento das amostras.

A HCA corroborou os resultados da PCA (Figura 4B), revelando três grupos principais: (i) pH, CE, STD e Na; (ii) temperatura, OD, Fe e Mn; (iii) ORP, Al, Ba e Zn. O primeiro grupo correspondeu à PC1, relacionada à salinidade; o segundo refletiu os efeitos da oxigenação e da presença de metais-traço; e o terceiro expressou variações redox e aportes específicos de Al.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 – Análise estatística multivariada dos parâmetros físico-químicos e das concentrações de metais: (A) PCA, mostrando a distribuição dos pontos amostrais e a contribuição dos parâmetros para os componentes principais; (B) HCA, com dendrograma que demonstra os agrupamentos entre as amostras com base na similaridade dos dados

DISCUSSÃO

QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA SUPERFICIAL

A variação da temperatura refletiu fatores locais, como cobertura vegetal e transição sazonal característica da região[10]. Santana[13] observou variações de 22,06 a 24,71 °C, com valores mais baixos em áreas com maior cobertura de mata ciliar, evidenciando a modulação térmica da água por fatores ambientais locais. Essas oscilações podem afetar os ecossistemas aquáticos, alterando a composição de espécies e a disponibilidade de nutrientes, com reflexos sobre as comunidades que utilizam essa água[30].

A CE apresentou ampla dispersão, especialmente nos meses menos chuvosos, indicando a contribuição de efluentes urbanos e do escoamento superficial, além da concentração natural de íons durante a estiagem. Esses valores extremos podem ser explicados pela combinação de áreas urbanas com baixo índice de saneamento, despejo de esgotos domésticos e variações sazonais na vazão[31,6]. Santana[13] registrou CE elevada (>100 µS/cm) em bacias antropizadas, reforçando a relação entre urbanização, aporte de íons e aumento da condutividade elétrica, enquanto Vasconcelos Junior et al.[32] observaram CE mais estável em águas superficiais, embora também influenciada pelo regime de marés e pelo aporte de águas continentais. Além disso, valores muito baixos em pontos específicos podem refletir diluição por chuva, influência de água subterrânea ou fluxos locais com baixo teor iônico[33]. Níveis elevados de CE indicam possível risco à saúde humana, devido à presença de sólidos dissolvidos e contaminantes, afetando o consumo de água e os ecossistemas aquáticos utilizados pela população[34].

O ORP evidenciou a coexistência de condições oxidantes e redutoras, sendo os valores negativos mais frequentes em canais urbanos, onde há intensa atividade microbiana e decomposição de matéria orgânica[35,36]. A elevação progressiva do ORP durante o período mais chuvoso pode estar associada à renovação hídrica e ao aumento da oxigenação natural[37].

O Na apresentou forte variação sazonal e espacial, com valores elevados nos pontos jusantes e nos meses menos chuvosos, sugerindo processos de salinização local, influência urbana e baixa diluição natural. Esse padrão é compatível com o descrito por Dos Santos et al.[38] e Pereira et al.[7] Santana[13] também reportou valores elevados de Na em bacias urbanizadas, corroborando a influência antrópica na distribuição espacial do elemento. O excesso de Na pode ter implicações para a saúde humana, particularmente em populações que utilizam água não tratada, além de alterar os equilíbrios ecológicos naturais[39].

A média de pH foi superior à reportada por Vasconcelos Junior et al.[32] na foz do rio Maguari-Açu, o que pode refletir maiores efeitos sazonais sobre esse parâmetro na área de estudo[40]. Santana[13] relatou pH variando de 6,1 a 7,3, evidenciando tendência similar de valores mais elevados em áreas antropizadas. Rios amazônicos são naturalmente ácidos devido à decomposição da matéria vegetal e à baixa capacidade de tamponamento; no entanto, elevações no pH podem indicar influência antrópica, como despejos domésticos, ou variações sazonais relacionadas à vazão e à diluição. Essas alterações afetam a solubilidade e a toxicidade de metais, com possíveis impactos ecológicos e sobre a saúde humana[41-43].

O STD também refletiu o ciclo hidrológico, com concentrações mais elevadas no período menos chuvoso, devido à menor vazão fluvial[44]. Santana[13] observou STD mais altos em áreas antropizadas, enquanto Vasconcelos Junior et al.[32] registraram valores médios de 15,76 mg/L em águas superficiais, com variação sazonal associada ao aporte de águas continentais e à diluição durante os períodos chuvosos. O aumento do STD pode indicar contaminação por matéria orgânica, com consequências para a saúde dos ecossistemas e das comunidades locais[45].

Os níveis de OD indicaram oxigenação insuficiente e potencial risco de anoxia. Estudos anteriores em trechos distintos do rio Maguari-Açu confirmam a recorrência de baixos níveis de OD em sistemas aquáticos impactados por matéria orgânica[7,32]. Essa condição pode ser explicada pela alta densidade populacional, pelo lançamento de efluentes domésticos e industriais e pela ausência de infraestrutura de saneamento, fatores que aumentam a demanda bioquímica de oxigênio[46]. A leve recuperação observada nos meses finais pode estar relacionada ao aumento da pluviosidade e à renovação das águas[47].

A mobilização do Al pode estar associada à presença de matéria orgânica e à influência de áreas alagadas[48]. Santana[13] relatou concentrações de Al abaixo do limite legal, enquanto Vasconcelos Junior et al.[32] observaram valores variando de 0,0328 a 0,6966 mg/L, com picos durante a maré enchente, sugerindo influência do carreamento de metais e matéria orgânica. O Al, em concentrações elevadas, pode representar risco tóxico para organismos aquáticos e para a população humana, particularmente em comunidades que utilizam água para consumo direto[49].

O Ba, por sua vez, tem sua mobilidade associada à acidez da água e à presença de efluentes ricos em compostos solúveis[50,51]. Santana[13] registrou concentrações de Ba dentro dos limites legais, e Vasconcelos Junior et al.[32] observaram média de 0,0163 mg/L em águas superficiais, com leve incremento durante a maré enchente, reforçando a dinâmica de carreamento natural e a influência de marés.

O comportamento sazonal do Fe pode estar relacionado à lixiviação de solos ferrosos e a processos redox[52]. O Mn apresentou origem predominantemente natural, vinculada ao intemperismo de solos lateríticos e latossolos, com influência sazonal significativa, embora com menor impacto antrópico direto[53-55]. Santana[13] encontrou Fe e Mn abaixo dos limites legais, enquanto Vasconcelos Junior et al.[32] reportaram Fe acima do VMP em 81% das amostras, principalmente nos meses de março e maio, e Mn acima do limite em uma única amostra, destacando a influência do regime pluviométrico e do transporte de metais pelas marés. Altas concentrações de Fe e Mn podem ter implicações tóxicas, afetando organismos aquáticos e a saúde das populações locais que utilizam o recurso hídrico[56,57].

Por fim, o Zn apresentou as menores concentrações médias entre os metais analisados. A literatura aponta que sua presença está associada à adsorção em matéria orgânica e à lixiviação natural[58], com picos temporais atribuídos a episódios de escoamento superficial[59]. Santana[13] também reportou Zn abaixo dos limites legais, e Vasconcelos Junior et al.[32] não indicaram valores críticos, sugerindo predominância de processos naturais na determinação desse metal em águas superficiais.

PADRÕES MULTIVARIADOS E IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS

O gradiente de mineralização da água observado na PC1 está provavelmente associado à salinização e ao transporte de íons dissolvidos por escoamento superficial[60]. Os processos refletidos na PC2 indicam oxirredução e disponibilidade de metais, nos quais a diminuição do OD pode favorecer a mobilização de Mn, enquanto Ba e Zn podem apresentar maior solubilidade sob determinadas condições de pH e oxigenação[61–64]. Na PC3, Fe tende a precipitar ou se associar à matéria particulada em condições mais oxidadas (maior ORP), reduzindo sua concentração na fase dissolvida[65]. Já a PC4 evidencia que os processos

físico-químicos são modulados por variações térmicas e interações entre metais no sedimento e na coluna d'água[66].

O cluster formado por CE, STD, Na e pH indica forte influência antrópica[67], especialmente nos pontos MA01 a MA06. As concentrações elevadas de Na, principalmente nos pontos MA09 a MA11, podem estar associadas às intervenções urbanas ao longo da bacia, como a canalização de trechos do rio. Segundo Mesquita et al.[68], tais alterações comprometem o equilíbrio hidrodinâmico do sistema, podendo favorecer a penetração de água salgada mesmo em áreas distantes da foz.

Esse comportamento também é compatível com a dinâmica estuarina da região amazônica, onde a amplitude das marés e a redução da vazão diminuem a resistência ao avanço da água salgada em períodos de baixa precipitação[69]. Esses resultados apontam potencial de exposição para comunidades locais, destacando a necessidade de ações de monitoramento e educação sanitária.

O cluster composto por T, Fe, OD e Mn refletiu processos ambientais comuns, sobretudo relacionados à dinâmica redox e à influência de fatores físico-químicos na mobilidade dos metais[70]. Observou-se correlação moderada entre T e Fe, indicando que o aumento da temperatura pode favorecer a mobilização do metal a partir dos sedimentos, o que está de acordo com Liao et al.[71], que demonstraram que concentrações de Fe dissolvido tendem a aumentar em temperaturas acima de 15 °C, favorecendo sua liberação. De forma semelhante, a associação entre Mn e OD aponta para a sensibilidade desse metal às condições de oxirredução, já que tanto Mn quanto Fe apresentam comportamento redox dependente e são mobilizados em ambientes com baixa disponibilidade de oxigênio[70]. Essas dinâmicas sugerem impacto direto sobre a saúde ambiental, afetando a qualidade da água, os habitats aquáticos e as comunidades que dependem desse recurso.

Esse padrão reforça a hipótese de que a composição desse agrupamento é influenciada por processos sazonais, nos quais a estratificação térmica e o aporte pluviométrico modulam a disponibilidade de oxigênio e, consequentemente, a dinâmica geoquímica de metais redox-sensíveis[72,73].

O cluster formado por ORP, Al, Ba e Zn, apesar da baixa similaridade geral, indicou a atuação de fatores ambientais específicos que, em determinados pontos, influenciam conjuntamente a mobilidade e a distribuição desses parâmetros. Gad et al.[74] demonstraram que Ba e Zn apresentam comportamento conjunto em ambientes impactados por efluentes industriais e atividades agrícolas e, embora em outros contextos esses elementos apareçam em agrupamentos distintos, a correlação observada no presente estudo reforça a hipótese de que fontes pontuais ou difusas de contaminação influenciam simultaneamente a distribuição desses metais-traço.

Por fim, a correlação moderada entre ORP e Al sugere que o estado redox exerce influência sobre a mobilização do metal no ambiente aquático. Em águas superficiais, o Al tende a formar naturalmente camadas de óxidos que afetam sua solubilidade; entretanto, sua reatividade e disponibilidade são fortemente moduladas por variáveis físico-químicas, como pH e potencial de oxirredução[75]. Nesses contextos, processos como a degradação da matéria orgânica e o aporte de efluentes podem alterar o equilíbrio redox, promovendo mudanças na especiação química e na biodisponibilidade de metais no ambiente estuarino[76-78]. O monitoramento desses elementos é fundamental para prevenir riscos à saúde humana e ao ecossistema, orientando a gestão de recursos hídricos e políticas públicas.

Os resultados evidenciam a necessidade de ações de remediação voltadas à mitigação dos impactos antrópicos na bacia do rio Maguari-Açu, com ênfase na ampliação do saneamento básico, no controle de efluentes e na recuperação de áreas ripárias. A presença de Fe, Al, Mn e Na em concentrações elevadas indica potenciais riscos à saúde das comunidades que utilizam a água para consumo e recreação. Essas evidências reforçam a importância de políticas públicas integradas de monitoramento e gestão hídrica sustentável em ambientes urbanos amazônicos.

CONCLUSÃO

A qualidade da água na bacia do rio Maguari-Açu é fortemente influenciada pela sazonalidade e por pressões antrópicas, especialmente em áreas urbanas sem saneamento. Os parâmetros físico-químicos refletiram variações sazonais, com maiores concentrações no período seco e diluição natural durante o período chuvoso.

A PCA evidenciou gradientes distintos, destacando a salinização, a influência de efluentes urbanos e a dinâmica redox como fatores determinantes para a variação dos parâmetros físico-químicos e dos metais. A HCA identificou *clusters* específicos de amostras, indicando pontos mais impactados por atividades urbanas e áreas de menor renovação hídrica, o que reforça a importância do monitoramento espacial para a gestão ambiental.

A dinâmica redox (ORP, OD, Fe e Mn) destacou-se como fator determinante para a mobilidade e a biodisponibilidade de metais, sendo o Fe o principal contaminante, seguido por Al e Mn, com maior acúmulo em áreas de baixa renovação hídrica.

Os achados evidenciam a vulnerabilidade das bacias urbanas amazônicas e reforçam a necessidade de estratégias integradas para a gestão sustentável dos recursos hídricos. Além disso, indicam potenciais riscos à saúde das comunidades que dependem da água para consumo, pesca ou lazer, especialmente em trechos impactados por esgoto e atividades urbanas.

Os resultados fornecem subsídios técnicos para políticas públicas direcionadas à mitigação da

contaminação, ao monitoramento contínuo e a ações de educação ambiental, contribuindo para a resiliência hídrica urbana e para pesquisas futuras voltadas à conservação de ecossistemas aquáticos no contexto das mudanças climáticas.

APOIO FINANCEIRO

Este trabalho contou com o apoio institucional da Seção de Meio Ambiente do Instituto Evandro Chagas, que disponibilizou infraestrutura laboratorial e recursos técnicos para o desenvolvimento da pesquisa.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses relacionado a este trabalho.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

N.T.V.J.: coleta de dados e amostras, análises laboratoriais, análise estatística, interpretação dos resultados, redação inicial e edição final do manuscrito. Y.O.S.: coleta de dados e amostras, análises laboratoriais, análise estatística e interpretação dos resultados. M.M.C.S.: coleta de dados e análise estatística. K.R.F.F.: revisão crítica do manuscrito. E.B.S.: concepção e desenho do estudo, supervisão do projeto, financiamento, disponibilização de recursos, coleta de dados e amostras, e revisão crítica do manuscrito. K.C.F.F.: concepção e desenho do estudo, supervisão do projeto, financiamento, disponibilização de recursos, coleta de dados e amostras, e revisão crítica do manuscrito.

REFERÊNCIAS

1 Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional do Brasil (BR). Água será tema de destaque na COP30 com foco na adaptação às mudanças climáticas [Internet] 2025 mai 23 [citado 2025 mai 7]. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/agua-sera-tema-de-destaque-na-cop30-com-foco-na-adaptacao-as-mudancas-climaticas

2 Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará. Governo do Pará apresenta metas e compromissos ambientais e climáticos para a COP30 [Internet] 2025 fev 24 [citado 2025 mai 7]. Disponível em: https://www.semas.pa.gov.br/2025/02/24/governo-do-para-apresenta-metas-e-compromissos-ambientais-e-climaticos-para-a-cop30/

3 The Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press; 2013.

4 Agência Nacional de Águas do Brasil (BR). Mudanças climáticas e recursos hídricos [Internet]: avaliações e diretrizes para adaptação. 2018 mar 28 [citado 2025 mai 7]. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-soe/mudancas-climaticas/mudanca-climatica-e-recursos-hidricos-2013-avaliacoes-e-diretrizes-para-adaptacao

5 Marengo JA. Água e mudanças climáticas. Estud Av. 2008;22(63):83-96.

6 Nobre CA, Sampaio G, Borma LS, Castilla-Rubio JC, Silva JS, Cardoso M. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. Proc Natl Acad Sci U S A. 2016 Sep;113(39):10759-68.

7 Pereira FM, Pereira Junior A, Gomes DJC, Ribeiro HMC, Araújo JAC. Análise da qualidade da água da microbacia hidrográfica do Rio Maguari-Açu, Ananindeua-PA. Rev Bra Geogr Fís. 2024 Mar;17(2):845–859.

8 Moraes DSL, Jordão BQ. Degradação de Recursos Hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. Rev Saude Publica. 2002 mar;36(3):370-4.

9 Alpino TMA, Mazoto LM, Barros DC, Freitas CM. Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: uma revisão da literatura. Cienc Saude Coletiva. 2022 jan;27(01):273-86.

10 Ministério do Meio Ambiente do Brasil (BR). Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas: portaria MMA nº 150 de 10 de maio de 2016. Brasília (DF): MMA; 2016.

11 United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water. Paris: UNESCO; 2023. 189 p.

12 Ramos AS, Oliveira, VPS, Araújo TMR. Qualidade da água: parâmetros e métodos mais utilizados para análise de água de recursos hídricos superficiais. Holos Environ. 2019 jul;19(2):205-19.

13 Santana MAC. Qualidade da água e sedimentos em canais urbanos na cidade de Belém, Amazônia Oriental [dissertação]. Belém (PA): Universidade Federal Rural da Amazônia; 2025.

14 Barreto MAG, Gonçalves MF, Bezerra RM, Braga FS, Braga TGM, Paiva PFPR. Contaminação por metais pesados no canal do jandiá, município de Macapá-AP, Amazônia Brasileira. Rev Gest Soc Ambient. 2024;18(2):e04404.

15 Silva COF, Goveia D. Avaliação da qualidade ambiental de corpos hídricos urbanos utilizando análise multivariada. Inter. 2019 jul-set;20(3):947-58.

16 Centeno LN, Cecconello ST. Modelagem multivariada para identificação de fontes de poluição, por meio de parâmetros limnológicos da qualidade da água: um estudo de caso do Arroio Grande/RS. Rev Thema. 2021 mar;19(1):28-36.

17 Rodrigues Junior JC, Santos EM, Rocha D. Análise estatística multivariada para estudo da percepção socioambiental em um núcleo metropolitano. Inter. 2022 jul-set;23(3):685-702.

18 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística do Brasil. Cidades@: Brasil- Pará – Ananindeua - PA – Panorama [Internet]. Brasília (DF): IBGE; 2025 [citado 2025 Jun 19]. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/ananindeua/panorama

19 Pimentel MAS, Bastos E, Machado MG, Melo PA, Miranda AA, Pessoa PAL, et al. Análise preliminar de impacto ambiental nas nascentes do rio Maguariaçu – Ananindeua – PA. Anais do 6º Simpósio Nacional de Geomorfologia; 2006 set 6-10; Goiânia, Goiás. Goiânia (GO): UFG; 2006.

20 Santos LLM, Rodrigues RSS, Bittencourt GM. Morfometria das bacias hidrográficas dos rios Caraparu e Maguari-Açú, Região Metropolitana de Belém, Pará, Brasil. Rev Bras Gest Ambient. 2017;11(1):66-75.

21 Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. Estatística municipal: Ananindeua. Belém (PA): FAPESPA; 2024. 67 p.

22 American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. 24th ed. Washington (DC): American Public Health Association; 2023.

23 Varian Inc. ICPExpert Vista®: version 4.1.0 [software]. Mulgrave (AU): Varian Inc.; 2005.

24 AOAC International. Official methods of analysis of AOAC International: guidelines for standard method performance requirements (Appendix F). Maryland: AOAC International; 2016.

25 Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (BR). DOQ-CGCRE-008: orientação sobre validação de métodos analíticos. Rio de Janeiro (RJ): Inmetro; 2020.

26 Microsoft Corporation. Microsoft Office Excel®: version 2019 [software]. Redmond (WA): Microsoft Corporation; 2019.

27 Minitab LLC. Minitab Statistical Software®: versão 20.2. State College, PA, EUA: Minitab LLC; 2021.

28 Helsel DR. Statistics for censored environmental data using Minitab and R. 2th ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2012.

29 Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília (DF): Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2005 mar 18; Seção 1(53):58-63.

30 Artaxo P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. Estud Av. 2020 set-dez;34(100):53-66.

31 Damasceno MCS, Ribeiro HMC, Takiyama LR, De Paula MT. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais do Rio Amazonas na orla da cidade de Macapá, Amapá, Brasil. Rev Ambi Agua. 2015;10(3):598-613.

32 Vasconcelos Junior NT, Carneiro BS, Gomes LDCSB, Veiga MA, Medeiros AC, Faial KDCF. Avaliação quimiométrica da água superficial da Praia do Cruzeiro e imediações, na foz do rio Maguari, Icoaraci, Belém, Pará. Rev Foco. 2024;17(1):e4069.

33 Magalhães VS. Hidroquímica e qualidade das águas superficiais e subterrâneas em áreas sob influência de lavras pegmatíticas nas bacias dos córregos Água Santa e Palmeiras, município de Coronel Murta (MG) [dissertação]. Belo Horizonte (MG): Universidade Federal de Minas Gerais; 2006. 109 f.

34 Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo 2014. São Paulo (SP): CETESB; 2015. 374 p.

35 Araújo KS, Antonelli R, Gaydeczka B, Granato AC, Malpass GRP. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. Rev Ambi Agua. 2016 abr;11(2):387-401.

36 Bega JMM, Zanetoni Filho JA, Oliveira JN, Albertin LL. Análise espaço-temporal dos parâmetros oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio em um córrego urbano de Ilha Solteira (SP). In: Anais do 30° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental; 2019 jun 16-19; Natal, Rio Grande do Norte. São Paulo: ABES; 2019.

37 Li X, Przybyla C, Triplet S, Liu Y, Blancheton JP. Long-term effects of moderate elevation of oxidation–reduction potential on European seabass (Dicentrarchus labrax) in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng. 2015 Jan;64:15-9.

38 Santos IN, Horbe AMC, Silva MSR, Miranda SAF. Influência de um aterro sanitário e de efluentes domésticos nas águas superficiais do Rio Tarumã e afluentes - AM. Acta Amaz. 2006;36(2):229-36.

39 Cañedo-Argüelles M, Kefford BJ, Piscart M, Prat N, Schäfer RB, Schulz CJ. Salinisation of rivers: an urgent ecological issue. Environ Pollut. 2013 Feb;173:157-67.

40 Braga ES, Lucena LM, Almeida AJM, Pires MLT, Nascimento JEF, Sutti BO, et al. O ambiente estuarino e a variação de pH: limites naturais e observação experimental do efeito da acidificação sobre a biodisponibilidade de fósforo. Quim Nova. 2023 mai;46(6):591-607.

41 Silva MSR, Miranda SAF, Domingos RN, Silva SLR, Santana GP. Classificação dos rios da Amazônia: uma estratégia para preservação desses recursos. Holos Environ. 2013 nov;13(2):163-174.

42 Lopes YKL, Neu V, Felizzola JF, Teixeira LCGM, Costa CAS. Variabilidade hidrogeoquímica em águas do Estuário Amazônico. Ambienc. 2017 mai- ago;13(2):325-41.

43 Zhang P, Yang M, Lan J, Huang Y, Zhang J, Huang S, et al. water quality degradation due to heavy metal contamination: health impacts and eco-friendly approaches for heavy metal remediation. Toxics. 2023 Sep;11(10):828.

44 Lopes IDS. Hidroquímica dos rios Arienga e Murucupí, município de Barcarena (PA) [dissertação]. Belém (PA): Universidade Federal Rural da Amazônia; 2014. 140 f.

45 Weber-Scannell PK, Duffy LK. Effects of total dissolved solids on aquatic organisms: a review of literature and recommendation for salmonid species. Am J Environ Sci. 2007 Jan;3(1):1–6.

46 Piveli RP. Curso Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos. São Paulo: ESALQ/USP; 2006.

47 Silva AEP, Angelis CF, Machado LAT, Waichaman AV. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. Acta Amaz. 2008;38(4):733-42.

48 Bouchez J, Gaillardet J, Lupker M, Louvat P, France-Lanord C, Maurice L, et al. Floodplains of large rivers: weathering reactors or simple silos? Chem Geol. 2012 Nov;332-333:166-84.

49 Botté A, Zaidi M, Guery J, Fichet D, Leignel V. Aluminium in aquatic environments: abundance and ecotoxicological impacts. Aquat Ecol. 2022 Jan;56:751-773.

50 Kravchenko J, Darrah TH, Mille RK, Lyerly HK, Vengosh A. A review of the health impacts of barium from natural and anthropogenic exposure. Environ Geochem Health. 2014 May;36(4):797-814.

51 Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for barium and barium compounds. Atlanta: Public Health Service; 2007.

52 Andre L, Franceschi M, Pouchan P, Atteia O. Using geochemical data and modeling to enhance the understanding groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, south-west of France. J Hydrol. 2005 Apr;305(1-4):40-62.

53 Secco C, Secco N, Batista F, Porto A, Delgado G, Cmarini G. Estudo preliminar de tipos de solos mais adequados para construções de taipa de mão em microrregiões do estado do Pará. In: Anais do 11° Encontro Latino Americano de Iniciação Científica; 2007 out 29-nov 2; São José dos Campos, São Paulo. Porto de Galinhas: UNIVAP; 2007.

54 Dantas S, Araújo CBC. Caracterização de solos lateríticos para utilização em pavimentos de baixo custo na cidade de Canindé/CE. In: Anais do 17° Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; 2014 set 9-13; Goiânia, Goiás. São Paulo: ABES; 2014.

55 Vaz MCG. Modelo para estudo de viabilidade de áreas para locação de aterros sanitários, aplicado ao município de Benevides – Pará [dissertação]. Belém (PA): Universidade da Amazônia; 2015.

56 Viana LF, Crispim BA, Sposito JCV, De Melo MP, Francisco LFV, Do Nascimento VA, et al. High iron content in river waters: environmental risks for aquatic biota and human health. Rev Ambi Agua. 2021 Jul;16(5):e2751.

57 Harford AJ, Mooney TJ, Trenfield MA, van Dam RA. Manganese toxicity to tropical freshwater species in low hardness water. Environ Toxicol Chem. 2015 Dec;34(12):2856-63.

58 Carvalho DP, Almeida R, Manzatto ÂG, Freitas OB, Bastos WR. Dynamics of metals in lacustrine sediments: case study of the Madeira River, Amazon region. Rev Bras Recurso Hídr. 2018;23(21):e21.

59 Charters FJ, O'sullivan AD, Cochrane TA. Influences of zinc loads in urban catchment runoff: Roof type, land use type, climate and management strategies. J Environ Manage. 2022 Nov;322:116076.

60 Gomes MCR, Cavalcante IN. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água subterrânea. Rev Agua Subter. 2017;31(1):134-49.

61 Namgung S, Chon CM, Lee G. Formation of diverse Mn oxides: a review of biogeochemical processes of Mn oxidation. Geosci J. 2018 Feb;2(22):373-81.

62 Jung H, Taillefert M, Sun J, Wang Q, Borkiewicz OJ, Liu P, et al. Redox cycling driven transformation of layered manganese oxides to tunnel structures. J Am Chem Soc. 2020 Feb;142(5):2506-13.

63 Gomes MCR, Anjos JASA, Daltro RR. Multivariate statistical analysis applied to the evaluation of groundwater quality in the central-southern portion of the state of Bahia - Brazil. Rev Ambi Agua. 2020;15(1):e2408.

64 El Ghizi S, Hssaissoune S, El Bouch M, Sadik M, Hasnaoui M. Assessment of heavy metal contamination in the water of Dayet Er-Roumi Lake (Morocco). Egyp J Aquat Biol Fish. 2021 Jul;25(4):1099-115.

65 Chen Y, Huang N, Li Y, Lu Y, Jiang Y, Zhou Z, et al. Physical and chemical processes driven by natural iron minerals in aquatic environments. Water Cycle. 2025;6:36-48.

66 Kazmi SSUH, Wang YYL, Cai Y, Wang Z. Temperature effects in single or combined with chemicals to the aquatic organisms: an overview of thermo-chemical stress. Ecol Indic. 2022 Oct;143:109354.

67 Sales JWF, Studart TMC, Becker H, Gomes RB, Souza Filho FDA, Sousa MCB. Indicadores de qualidade de água utilizando técnicas de análise multivariada. In: Anais do 18º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos; 2009 nov 22-26; Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Porto Alegre: ABRHidro; 2009.

68 Mesquita ALC, Paiva PFPR, Silva Júnior OM, Guimarães YS, Silva EBS, Santos APS, et al. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Maguari-Açu, Ananindeua-PA. Rev Contemp. 2024;4(7):1-21.

69 Santos AS. Modelagem matemática do sistema estuarino dos rios Mojuim e Mocajuba (Pará-BR) [dissertação]. Belém (PA): Universidade Federal do Pará; 2016. 60 f.

70 Valentini MHK, Santos GB, Franz HS, Silva LA, Fraga GDS, Mello NP, et al. Analysis of the influence of climatic factors on the concentration of iron and manganese in raw water intended for a water treatment system. Rev Bras Geogr Fís. 2022;15(5):2486-99.

71 Liao W-H, Planquette H, Moriceau B, Lambert C, Desprez De Gesincourt F, et al. The effect of temperature on the release of silicon, iron and manganese into seawater from resuspended sediment particles. Geochim Cosmochim Acta. 2023 Jun;351:1-13.

72 Gantzer PA, Lee DB, Little JC. Controlling soluble iron and manganese in a water-supply reservoir using hypolimnetic oxygenation. Water Res. 2009 Mar;43(5):1285-94.

73 Almeida ABB, Silva PBA, Lima MRP, Santos YTC, Moreira YW. Concentração de ferro e manganês em águas de abastecimento no município de Crato, Ceará: caracterização e proposta de tratamento. Aguas Subter. 2019 abr;33(2):162-77.

74 Gad M, Abou El-Safa MM, Farouk M, Hussein H, Alnemari AM, Elsayed S, et al. Integration of water quality indices and multivariate modeling for assessing surface water quality in Qaroun Lake, Egypt. Water (Basel). 2021 Aug;13(16):2258.

75 Wang R, Li P, Zhou W, Li Y, Gao K, Ouyang Y. Study on oxidation mechanism of aluminum surface under applied electric field. Mater Chem Phys. 2024 May;304:129224.

76 Camargo FAO, Santos GA, Zonta E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. Cienc Rural. 1999 mar;29(1):171-80.

77 Aquino RO. Investigação do estado trófico de um sistema estuarino amazônico (Pará, Brasil) sob influência antrópica [monografia]. Belém (PA): Universidade Federal do Pará; 2011. 51 f.

78 Oliveira RCB. Investigação do comportamento geoquímico de metais-traços em solos e sedimentos da bacia inferior do rio Jaguaribe, Nordeste do Brasil [tese]. Fortaleza (CE): Universidade Federal do Ceará; 2012.145 f.

Recebido em / Received: 28/8/2025
Aceito em / Accepted: 10/10/2025

Este artigo compõe a Seção Temática "Saúde e Meio Ambiente na Pan-Amazônia: Ciência, Território e Resistência em tempos de crise climática" em alusão à 30º Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 30).

Como citar este artigo / How to cite this article:

Vasconcelos Junior NT, Santos YO, Silva MMC, Faial KRF, Sousa EB, Faial KCF. Tendências sazonais e integração multivariada de indicadores hidroquímicos no rio Maguari-Açu. Rev Pan Amaz Saude. 2025;16:e202501768. Doi: https://doi.org/10.5123/S2176-6223202501768