

HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL NA BACIA DO RIO PIAUÍ, PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL DO BRASIL, MINAS GERAIS

Hydrogeochemistry and surface water quality in the Piauí river basin, eastern Brazilian pegmatite province, Minas Gerais.

Julielem Caroline Souza

Geógrafa e Mestra em Geologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

caroline.julielem@ufvjm.edu.br

Hernando Baggio Filho

Doutor em Geologia pela Universidade Federal de Minas Gerais

Professor do Departamento de Geografia e do Programa de Pós-Graduação

em Geologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

hbaggio@ufvjm.edu.br

Lilyan de Almeida Cunha

Engenheira Geóloga e Mestra em Geologia pela Universidade

Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Doutoranda em Geologia

Regional pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

lilyan.cunha@ufvjm.edu.br

Iago Cordeiro Godinho

Licenciado em Geografia e Mestre em Geologia pela Universidade

Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

iago.cordeiro@ufvjm.edu.br

Frank Alison de Carvalho

Mestre em Saúde, Sociedade e Ambiente, Doutorando em Ciência Florestal pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

frank.carvalho@ufvjm.edu.br

Kelviana de Cassia Ramalho

Bacharela em Ciência e Tecnologia e Graduanda em Engenharia Geológica

pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

kelviana.ramalho@ufvjm.edu.br

Letícia Antunes Melo Santos

Licenciada em Geografia e Mestranda em Geologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil.

antunes.leticia@ufvjm.edu.br

Matheus Simões Santos

Doutor em Geologia pela Universidade Federal Fluminense, Brasil.

matheus_simoes@id.uff.br

Recebido: 05/06/2026

Aceito: 15/08/2026

Resumo

As análises geoquímicas são fundamentais para avaliar a qualidade da água em bacias hidrográficas sob influência de atividades minerárias e estresse hídrico. Este estudo avaliou a qualidade ambiental da água superficial da bacia do rio Piauí (MG), confrontando parâmetros físico-químicos e químicos com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. A amostragem contemplou os períodos seco e úmido, totalizando 34 amostras. As variáveis físico-químicas foram medidas *in situ* com sonda multiparâmetros, e os elementos químicos foram quantificados por ICP-OES. Foram identificadas desconformidades pontuais para turbidez, cor verdadeira, pH, oxigênio dissolvido, surfactantes (LAS) e fósforo total. Nitrato e nitrito permaneceram abaixo dos limites normativos. Entre os elementos analisados, os valores reportados para Al, Cu, Cd, Fe, Mn e Pb superaram os padrões em parte das amostras, enquanto Ba, Zn e Li permaneceram abaixo dos respectivos limites. A PCA explicou 57,0% da variância total nos dois primeiros componentes e permitiu reconhecer os principais padrões de variabilidade hidrogeoquímica da bacia do rio Piauí. Conclui-se que a qualidade hídrica resulta da interação entre o fundo geoquímico natural e aportes antrópicos, reforçando a necessidade de monitoramento sistemático e de estratégias integradas de gestão dos recursos hídricos em um contexto de vulnerabilidade ambiental.

Palavras-chave: Rio Piauí, Recursos Hídricos, Geoquímica Ambiental, Mineração, Lítio.

Abstract

Geochemical analyses are essential for assessing water quality in river basins affected by mining activities and hydrological stress. This study evaluated the environmental quality of surface water in the Piauí River Basin (Minas Gerais, Brazil) by comparing physicochemical and chemical parameters with the limits established by Brazilian CONAMA Resolution No. 357/2005. Sampling covered the dry and wet seasons and comprised 34 water samples. Physicochemical variables were measured *in situ* using a multiparameter probe, and chemical elements were quantified by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Local exceedances were identified for turbidity, true color, pH, dissolved oxygen, surfactants (LAS), and total phosphorus. Nitrate and nitrite remained below the regulatory limits. Among the elements analyzed, reported concentrations of Al, Cu, Cd, Fe, Mn, and Pb exceeded the standards in part of the samples, whereas Ba, Zn, and Li remained below their respective limits. The first two principal components explained 57.0% of the total variance, and PCA helped identify the main hydrogeochemical variability patterns in the Piauí River Basin. Overall, water quality reflects the interaction between the natural geochemical background and anthropogenic inputs, reinforcing the need for systematic monitoring and integrated water-resource management in an environmentally vulnerable setting.

Keywords: Piauí River, Water resources, Environmental geochemistry, Mining, Lithium.

1. INTRODUÇÃO

A exploração mineral acompanha a trajetória histórica da humanidade e constitui um importante vetor de desenvolvimento econômico, industrialização e inovação tecnológica (Barreto, 2001). No cenário contemporâneo, a crescente demanda por minerais críticos assumiu caráter estratégico, uma vez que esses recursos são essenciais à transição para

matrizes energéticas de menor intensidade de carbono e à reestruturação das cadeias produtivas globais (IEA, 2022, 2023).

Nesse contexto, o lítio destaca-se como insumo estratégico em uma dinâmica competitiva global na qual Chile, Argentina, Austrália e China figuram entre os principais produtores (IEA, 2023). Sua relevância decorre, sobretudo, da expansão da demanda por baterias de íons de lítio utilizadas em dispositivos eletrônicos, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia associados a fontes renováveis (IEA, 2023). Esse cenário consolida o lítio como um dos pilares da transição energética contemporânea e evidencia sua centralidade nas transformações tecnológicas, econômicas e geopolíticas em curso (IEA, 2022; Flexer; Baspineiro; Galli, 2018).

No Brasil, os pegmatitos constituem a principal fonte de lítio, processado industrialmente, sobretudo, nas formas de carbonato e hidróxido de lítio. O carbonato apresenta aplicações nas indústrias cerâmica, farmacêutica e metalúrgica e na fabricação de baterias recarregáveis, enquanto o hidróxido de lítio se tornou estratégico para baterias de alto desempenho empregadas em veículos elétricos (IEA, 2023). Os depósitos mais expressivos concentram-se nas porções norte e nordeste de Minas Gerais, associados à Província Pegmatítica Oriental do Brasil, com destaque para o Distrito Pegmatítico de Araçuaí, uma das principais áreas produtoras de lítio do país e caracterizada pela ocorrência de pegmatitos do tipo LCT (lítio-césio-tântalo) (Pedrosa-Soares e Chaves, 2009).

Apesar de sua relevância econômica, a atividade minerária pode gerar impactos ambientais significativos, particularmente sobre os sistemas hídricos (Younger, 2002). A mobilização, a dispersão e a persistência de elementos potencialmente tóxicos em ambientes aquáticos constituem importantes vetores de degradação da qualidade da água, podendo comprometer seus usos múltiplos e a integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos (Alloway, 2013; WHO, 2022). Essa problemática torna-se ainda mais sensível diante da crescente escassez de recursos hídricos e da expansão da mineração em regiões sujeitas ao estresse hídrico (IEA, 2022). A deterioração da qualidade da água também pode ampliar a exposição humana a substâncias tóxicas e agentes patogênicos, com repercussões para a saúde pública (WHO, 2022; CETESB, 2018).

Nesse contexto, a implementação de instrumentos legais voltados à proteção dos recursos hídricos assume papel fundamental para a prevenção da degradação ambiental e para a gestão sustentável das bacias hidrográficas. No Brasil, destaca-se a Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece a classificação dos corpos d'água superficiais,

define padrões de qualidade e orienta o monitoramento ambiental, constituindo um dos principais referenciais normativos para avaliação da qualidade das águas e para o gerenciamento dos recursos hídricos nacionais (Brasil, 2005).

Apesar da crescente expansão da mineração de lítio no Vale do Jequitinhonha, ainda são escassos estudos que avaliem, de forma integrada, a qualidade das águas superficiais e de abastecimento em bacias hidrográficas inseridas na Província Pegmatítica Oriental do Brasil, considerando simultaneamente a influência das características geológicas, das atividades minerárias e das condições hidrológicas sobre a distribuição dos elementos químicos dissolvidos. Essa lacuna torna-se ainda mais relevante diante das recentes anomalias climáticas que têm alterado a disponibilidade hídrica regional, potencializando os processos de mobilização, transporte e concentração de contaminantes nos sistemas fluviais. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade físico-química e geoquímica das águas superficiais e de abastecimento da bacia hidrográfica do rio Piauí (MG), por meio da comparação dos resultados obtidos com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e da aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA), visando identificar os principais processos hidrogeoquímicos e distinguir as contribuições de origem geogênica e antrópica que controlam a qualidade da água na bacia.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no Vale do Jequitinhonha, no nordeste do estado de Minas Gerais, e abrange os municípios de Itaipé, Caraí, Novo Cruzeiro, Araçuaí e Itinga (Figura 1). A bacia hidrográfica do rio Piauí drena uma área de aproximadamente 1.172 km² e está delimitada pelas coordenadas geográficas 16°42'10,52" e 17°21'46,87" S e 41°56'30,51" e 41°37'39,06" W.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger (1948), a bacia apresenta clima BSh (semiárido quente), com elevada variabilidade hidroclimática. Em 2023, o aumento das temperaturas e a redução da precipitação máxima mensal (139,8 mm), em relação a 2022 (294 mm), coincidiram com acentuado estresse hídrico e com a redução da vazão do rio Piauí de 0,90 m³ s⁻¹, em agosto de 2022, para 0,10 m³ s⁻¹, em dezembro de 2023, em contexto de El Niño. A menor disponibilidade hídrica reduziu a capacidade de diluição do sistema, favorecendo a concentração de constituintes dissolvidos e a expressão de anomalias geoquímicas na bacia.

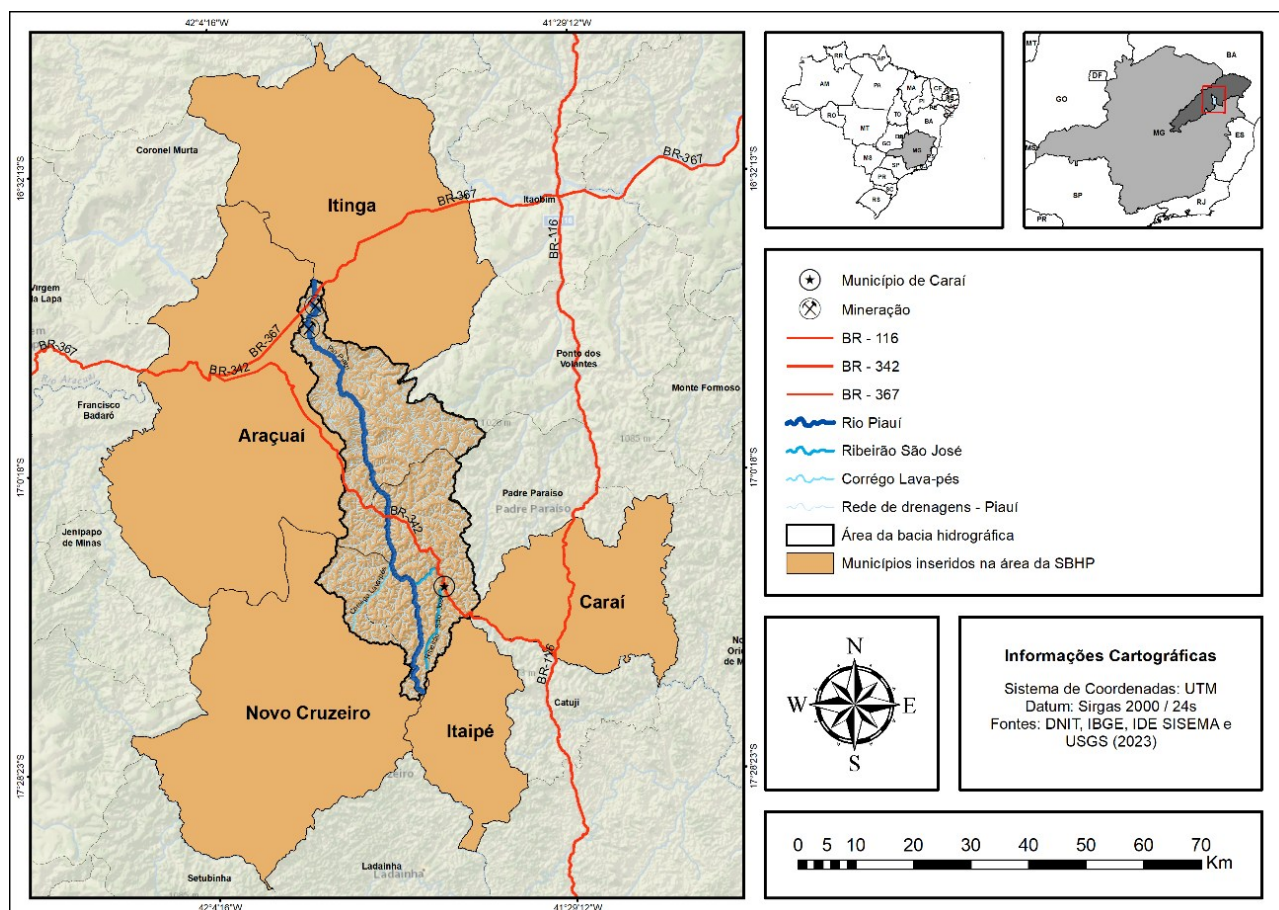


Figura 1 – Inserção regional da área de estudo nos recortes nacional (Brasil), estadual (Minas Gerais) e municipal. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

A bacia do rio Piauí está inserida em uma zona de ecótono entre os domínios morfoclimáticos da Mata Atlântica, do Cerrado e da Caatinga, o que confere à região uma elevada heterogeneidade fitofisionômica (Otoni, 2018; Embrapa, 2024). O gradiente vegetacional exibe uma transição bem definida ao longo do perfil longitudinal da bacia: formações florestais densas e de porte arbóreo dominante caracterizam o alto curso, enquanto o baixo curso é progressivamente dominado por vegetação lenhosa, tortuosa e de menor porte, adaptada às restrições edafoclimáticas locais (Souza, 2024; Cunha *et al.*, 2025).

O arcabouço geológico da área de estudo encontra-se inserido no contexto do Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares, 2007), sendo constituído predominantemente por unidades proterozoicas, representadas pelo Leucogranito Itaípe e pelas Formações Ribeirão da Folha (quartzo-mica xisto), Salinas (xisto, metaconglomerado e metafilito), Capelinha (xisto e quartzito) e Concórdia do Mucuri (gnaisse, quartzito e xisto) (Cunha *et al.*, 2025). As unidades paleozoicas são representadas pelo Monzogranito e pelos granitos Teixeira, enquanto a Unidade Serra do Tombo, de idade mesozoica, é composta por

brechas de tálus recobertas por rochas piroclásticas. Os depósitos cenozoicos compreendem depósitos aluvionares e coberturas detrítico-lateríticas (Filho, 2014; Paes et al., 2010) (Figura 2).

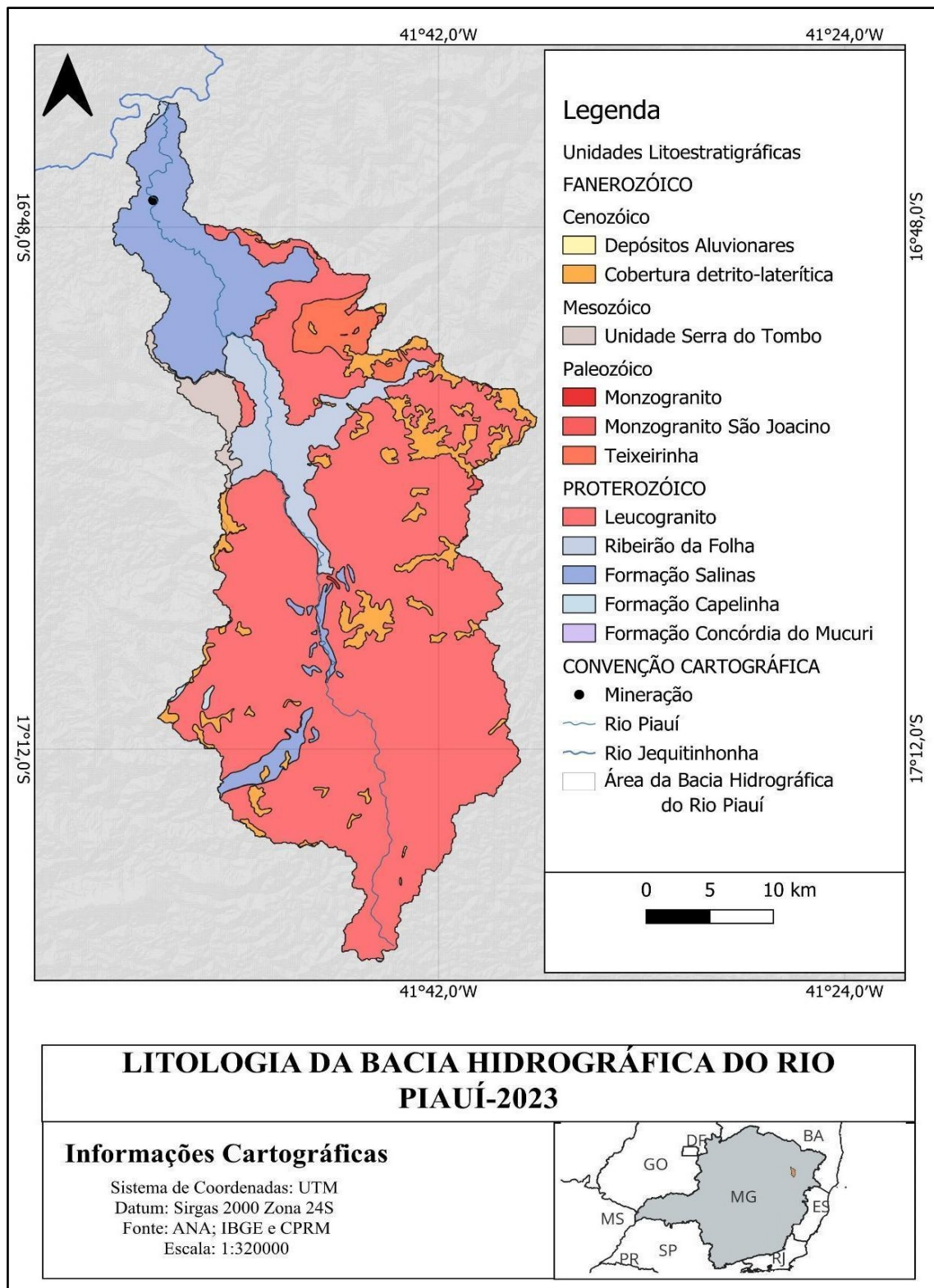


Figura 2 – Mapa litológico da bacia do rio Piauí e sua relação com a rede de drenagem.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A compartimentação geomorfológica da área de estudo subdivide-se em três domínios principais: (i) Superfícies Tabulares, caracterizadas por chapadas e platôs de topo aplainado; (ii) Compartimento Intermediário, composto por planaltos e colinas em avançado estágio de dissecação; e (iii) Depressões Interplanálticas e feições correlatas. O relevo exhibe superfícies de aplainamento, pontuadas por relevos residuais e feições do tipo *inselberg* (pães de açúcar). Também ocorrem depressões sedimentares associadas a eventos deposicionais do Paleógeno-Neógeno, além de sistemas de vales e terraços fluviais que evidenciam processos de exumação e retrabalhamento da paisagem (Souza, 2024; Cunha et al., 2025).

Na porção a montante da bacia do rio Piauí (Figura 3), predomina a agricultura familiar, condicionada pelo déficit hídrico regional. A jusante, observa-se maior diversificação do uso da terra, com destaque para a agropecuária extensiva e a mineração de lítio associada a corpos pegmatíticos. A expansão minerária tem promovido reconfigurações territoriais e intensificado as pressões antrópicas sobre os sistemas hídricos e ambientais.

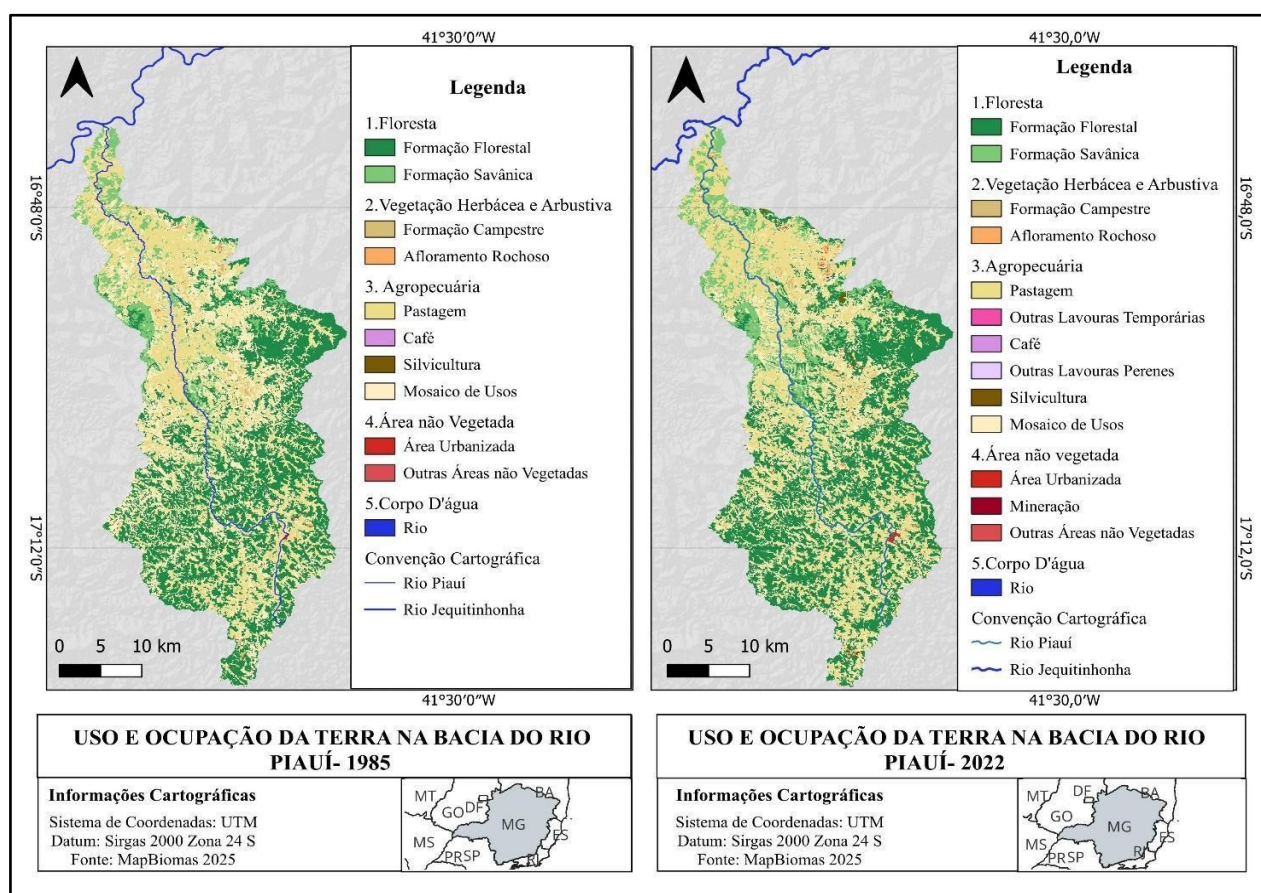


Figura 3 – Mapas temáticos representando a dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do rio Piauí ao longo de um período de 37 anos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi estruturada por meio de uma abordagem metodológica integrada, de natureza quali-quantitativa, desenvolvida em etapas complementares. A fase inicial compreendeu levantamento bibliográfico e cartográfico, processamento de dados geoespaciais em ambiente SIG, delimitação morfométrica da bacia e mapeamento fisiográfico e das classes de uso e cobertura da terra. Para o diagnóstico da qualidade hídrica, foi estabelecida uma rede amostral composta por 17 estações de monitoramento distribuídas ao longo do eixo principal do rio Piauí e de seus principais tributários, de modo a representar a variabilidade espacial e áreas sob diferentes pressões antrópicas e controles geogênicos (Figura 4).

As campanhas de amostragem foram realizadas no período seco (agosto de 2022) e no período úmido (dezembro de 2023), totalizando 34 amostras. Em cada estação, as alíquotas de água foram coletadas em frascos de polietileno de alta densidade de 500 mL, previamente descontaminados em solução de ácido nítrico a 10% e enxaguados com água deionizada. No momento da coleta, as amostras destinadas à quantificação de elementos-traço foram filtradas em membrana de 0,45 µm, acidificadas com HNO₃ até pH < 2 e mantidas sob refrigeração a 4 °C, em caixas térmicas, até a análise laboratorial, seguindo as diretrizes do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2023).

As variáveis físicos-químicas: potencial hidrogeniônico (pH), potencial de oxirredução (ORP), condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), salinidade, oxigênio dissolvido (OD) e temperatura da água, foram determinadas *in situ* com uma sonda multiparâmetros Hanna HI9829, previamente calibrada com soluções-padrão. A turbidez foi mensurada em campo com turbidímetro eletrônico microprocessado Hanna. Alíquotas adicionais foram destinadas à determinação da cor verdadeira, quantificada em laboratório por espectrofotometria digital microprocessada, segundo métodos analíticos normatizados.

As concentrações dos elementos Al, Ba, Cd, Cu, Fe, Li, Mn, Pb e Zn foram quantificadas por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES). Os teores de nitrito (NO₂⁻), nitrato (NO₃⁻) e fósforo total (P) foram determinados por fotometria digital microprocessada. Os surfactantes aniônicos do tipo alquilbenzeno sulfonato linear (LAS) foram determinados por espectrofotometria visível em fotocolorímetro digital microprocessado (Alfakit, modelo AT 100P). A estrutura multivariada dos dados e as relações entre as variáveis e as estações de amostragem foram avaliadas por Análise de Componentes Principais (PCA), executada no ambiente R/RStudio, dados abaixo do limite

de detecção ($<LD$) foram substituídos por $\frac{1}{2} LD$; padronização (Z-score), devido à disparidade de unidades (mg/L, $\mu S/cm$, NTU e, pH), as variáveis foram padronizadas (média = 0, desvio-padrão = 1), permitindo a análise via Matriz de Correlação; dimensões e variância: A Dim1 explica 37,6% e a Dim2 explica 19,4% da variação, totalizando 57,0% da variância hidrogeoquímica acumulada, software e pacote/função versão do R: R 4.4.2.

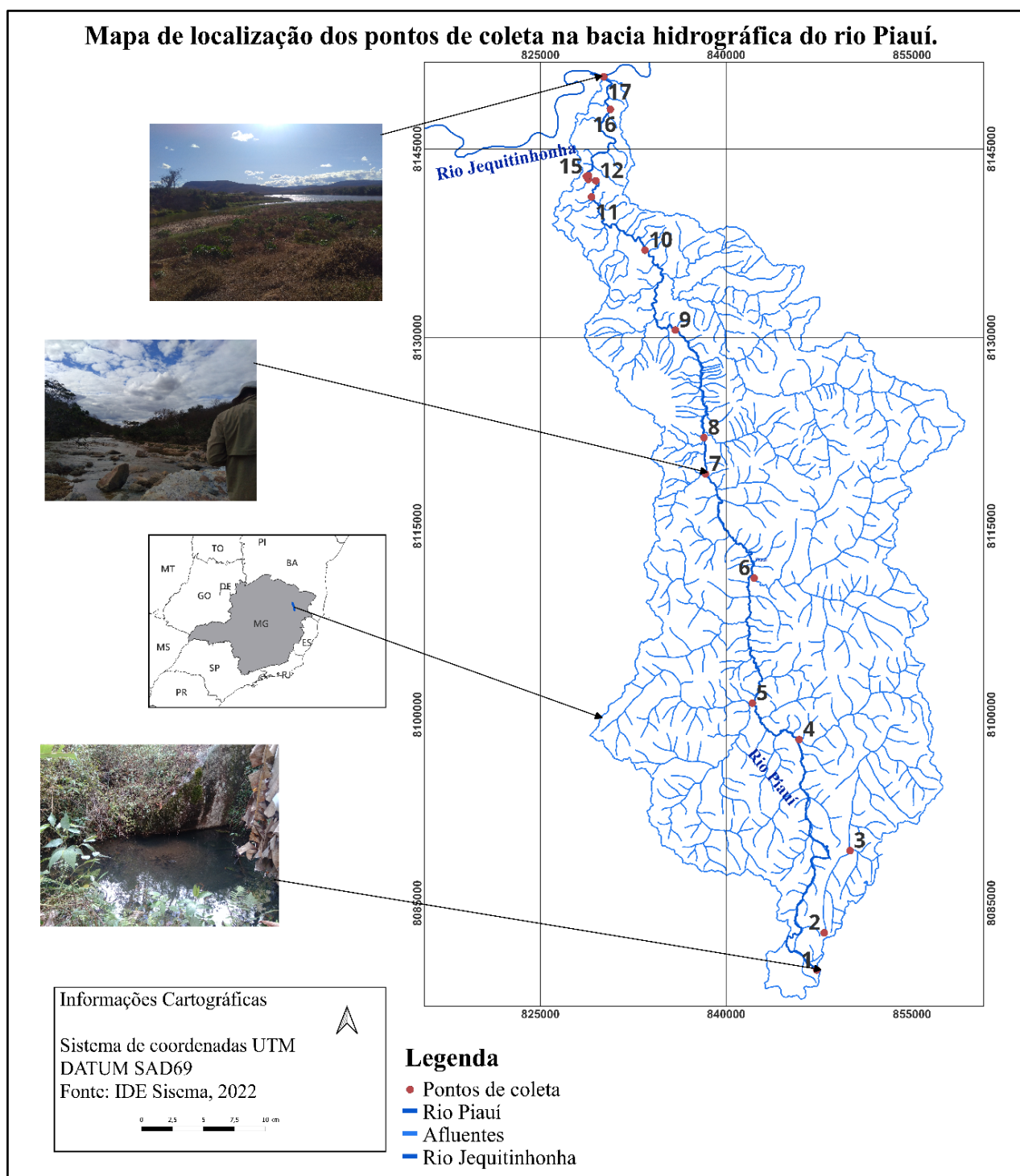


Figura 4 – Rede de drenagem e distribuição espacial das estações de amostragem na bacia hidrográfica do rio Piauí, Minas Gerais. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os critérios de qualidade ambiental adotados para as águas superficiais foram baseados na Resolução CONAMA nº 357/2005. Esse instrumento estabelece classes e padrões de qualidade para águas doces, salobras e salinas, de acordo com seus usos preponderantes. Os dados hidrogeoquímicos obtidos neste estudo foram comparados aos padrões aplicáveis às águas doces de Classe 2, que contemplam, entre outros usos, o abastecimento para consumo humano após tratamento convencional, a proteção das comunidades aquáticas e a irrigação.

Com base nesse arcabouço normativo, os resultados obtidos foram avaliados quanto à conformidade com os limites estabelecidos pela legislação vigente. Essa abordagem permitiu não apenas classificar a qualidade das águas analisadas, mas também identificar potenciais riscos associados às concentrações observadas, fornecendo uma interpretação integrada das condições ambientais da bacia hidrográfica.

4.1. Parâmetros físico-químicos e indicadores de qualidade da água

As flutuações térmicas no rio Piauí refletem o balanço termodinâmico governado por fatores hidromorfológicos e pelo estado de conservação da zona ripária. Segmentos com supressão da mata ciliar e sob influência de aportes de efluentes exibiram gradientes térmicos elevados devido à maior incidência de radiação solar. Essa sensibilidade ambiental reitera a centralidade do parâmetro na regulação ecológica fluvial (Baggio, 2008), visto que anomalias térmicas alteram a cinética de reações químicas, o metabolismo da biota e a solubilidade de gases dissolvidos, notoriamente o oxigênio (Bento, 2020). Ressalta-se que, embora a temperatura exerça controle primário sobre tais processos biogeoquímicos, a Resolução CONAMA nº 357/2005, não estipula limites absolutos para o corpo hídrico, restringindo-se a normatizar o gradiente térmico em zonas de mistura.

Os parâmetros físico-químicos apresentaram comportamento espacial e sazonal distinto na bacia do rio Piauí (Tabela 1). A turbidez exibiu expressiva variabilidade espacial. Durante o período úmido, os maiores valores ocorreram nas estações P13 (76,73 UNT) e P16 (182,33 UNT), sendo que P16 superou o limite de 100 UNT estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces de Classe 2. Esse incremento pode refletir o aporte de material particulado por escoamento superficial, processos erosivos e remobilização de sedimentos. No contexto hidrológico anômalo de 2023, a baixa vazão

também pode ter favorecido o acúmulo local de partículas em trechos sujeitos a maior pressão do uso da terra.

Na campanha do período úmido, a cor verdadeira ultrapassou o limite máximo de 75 mg Pt L⁻¹, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, em diversas estações de amostragem, registrando-se os picos nos pontos P13 (197,99 mg PL⁻¹) e P16 (170,41 mg Pt L⁻¹) (Tabela 1). A elevação substancial desse parâmetro evidencia o aporte intensificado de compostos cromóforos no meio aquático, processo decorrente do escoamento superficial difuso que carrega matéria orgânica dissolvida e substâncias húmicas e fúlvicas, originadas da lixiviação dos solos. Adicionalmente, a conversão do uso da terra na bacia e eventuais lançamentos efluentes, atuam como fontes antrópicas sinérgicas para o incremento da cor. Ressalta-se que, o regime de baixa vazão observado no ciclo pluviométrico de 2023 reduziu significativamente a capacidade de diluição e a vazão de depuração do sistema fluvial, potencializando o acúmulo desses constituintes orgânicos e minerais na coluna d'água.

O pH exibiu relativa estabilidade espacial na maior parte da bacia, embora tenham sido observadas desconformidades pontuais em relação ao intervalo normativo de 6,0 a 9,0 estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Na campanha do período seco, registrou-se leve caráter acidificado em P2 (5,95) e condição alcalina acentuada em P13 (9,87). Durante o período úmido, a amplitude temporal do parâmetro intensificou-se: o ponto P2 apresentou acidez mais pronunciadas de 4,78, ao passo que, os pontos P6, P13 e P14 excederam o limite superior da legislação, apresentando valores de 9,08, 10,36 e 9,33, respectivamente. A condição ácida observada em P2, especialmente sob maior pluviosidade, relaciona-se à lixiviação de solos ricos em matéria orgânica e substâncias húmicas, associada à fraca capacidade de tamponamento alcalino do substrato cristalino granítico-pegmatítico. Por outro lado, a forte alcalinização registrada nos pontos P13 e P14 (ambos sob influência de drenagem e estagnação em operações de mineração), decorre da combinação entre a dissolução de silicatos/carbonatos locais, eventuais efluentes de processos minerais e a intensa atividade fotossintética do fitoplâncton e macrófitas em trechos de menor vazão.

ORIGINAL ARTICLE

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos da água nos períodos seco e úmido na bacia hidrográfica do rio Piauí.

Pontos	Turbidez (Período seco)	Turbidez (Período úmido)	Cor verdadeira (Período seco)	Cor verdadeira (Período úmido)	pH (Período seco)	pH (Período úmido)	OD (Período seco)	OD (Período úmido)	LAS (Período seco)	LAS (Período úmido)	STD (Período seco)	STD (Período úmido)
P1	0,72	4,98	4,16	9,01	6,05	5,78	5,11	5,97	0,000	1,060	0,018	0,000
P2	1,06	2,33	2,24	1,45	5,95	4,78	3,61	4,78	0,050	0,000	0,015	0,000
P3	0,08	0,59	0,00	18,27	7,11	7,98	8,03	5,32	0,020	0,003	0,079	0,100
P4	12,87	6,08	6,67	50,27	7,40	7,91	5,38	6,71	0,000	0,000	0,042	0,100
P5	13,23	16,37	28,14	125,13	8,76	7,08	6,91	2,54	0,060	0,000	0,068	0,100
P6	7,55	24,47	21,56	138,48	7,16	9,08	4,89	8,17	0,000	0,000	0,087	0,100
P7	22,73	22,20	2,72	130,31	7,60	8,40	5,61	6,43	0,830	0,510	0,041	0,100
P8	21,03	21,87	6,98	126,21	7,80	8,25	6,53	6,78	0,070	0,247	0,042	0,100
P9	17,50	14,37	4,62	149,79	7,63	7,69	5,26	4,61	0,980	0,000	0,043	0,100
P10	15,37	8,51	9,35	40,01	7,78	7,76	5,61	5,04	0,540	0,000	0,057	0,100
P11	10,63	6,31	4,56	46,09	7,75	6,88	5,25	3,45	0,040	0,000	0,059	0,100
P12	15,30	9,99	3,48	65,58	7,75	8,96	5,48	6,34	0,000	0,000	0,062	0,100
P13	21,73	76,73	12,37	197,99	9,87	10,36	13,22	19,46	0,273	0,140	1,598	1,700
P14	10,53	15,27	5,49	137,49	8,48	9,33	6,16	7,00	0,147	0,200	0,068	0,200
P15	6,56	3,75	0,00	65,41	7,43	7,74	5,85	4,23	0,330	0,000	0,066	0,100
P16	8,59	182,33	0,08	170,41	7,85	7,14	5,70	2,93	0,110	0,153	0,069	0,900
P17	19,67	18,73	19,17	91,34	7,23	7,57	5,66	4,85	0,427	0,000	0,019	0,000
CONAMA 357/05	100 UNT	100 UNT	75 mg Pt/L	75 mg Pt/L	6 a 9,0	6 a 9,0	5 mg/L	5 mg/L	0,5 mg/L	0,5 mg/L	500 mg/L	500 mg/L

Fonte: Autores, 2026.

As concentrações de OD, exibiram expressiva variabilidade espacial na Bacia Hidrográfica do Rio Piauí, com episódios marcantes de desconformidade em relação ao limite mínimo de 5 mg L^{-1} , estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Na campanha do período úmido, as depleções mais severas foram registradas nas estações em P5 ($2,54 \text{ mg L}^{-1}$) e P16 ($2,93 \text{ mg L}^{-1}$), além de violações ao padrão normativo observadas em P2, P9, P11, P15 e P17. Essa desoxigenação da coluna d'água reflete a ação combinada de fatores hidrológicos, térmicos e biogeoquímicos. O regime de excepcional baixa vazão registrado em 2023, atenuou o turbilhonamento e a dinâmica de reaeração atmosférica do escoamento fluvial, prolongando o tempo de residência da água. Simultaneamente, o escoamento superficial difuso carregado pelas primeiras chuvas incrementou a carga de matéria orgânica biodegradável no meio aquático. A oxidação microbiana desse material orgânico, potencializada pelas elevadas temperaturas da água, acelerou as taxas de respiração heterotrófica e a DBO, consumindo o OD e comprometendo a capacidade de autodepuração do sistema e a manutenção da vida aquática.

Embora a Resolução CONAMA nº 357/2005, não estabeleça um valor limite para CE, este parâmetro constitui um indicador geoquímico fundamental da carga iônica total e dos sólidos dissolvidos na bacia. O perfil longitudinal da CE revelou um comportamento predominantemente homogêneo ao longo da calha principal, com valores tipicamente baixos ($\leq 100 \mu\text{S/cm}$), característicos de drenagens inseridas sobre o embasamento granítico-pegmatítico de baixa solubilidade. Contudo, uma anomalia hidrogeoquímica foi registrada na estação P13, onde a CE atingiu $3.197 \mu\text{S cm}^{-1}$, na campanha seca e $3.446 \mu\text{S cm}^{-1}$, período úmido. Essa discrepância de ordens de grandeza em P13 localizado em área de estagnação (*sump*), sob influência direta de atividades minerárias reflete a intensa dissolução iônica provenientes do intemperismo em rochas e rejeitos expostos, além da lixiviação de insumos operacionais e de lavra. A persistência dos altos valores mesmo no período chuvoso, evidencia que o aporte contínuo de íons dissolvidos supera a capacidade de diluição promovida pelas precipitações pluviométricas.

As concentrações do Surfactante Aniônico Alquilbenzeno Sulfonato Linear (LAS) exibiram marcante variação sazonal no período de monitoramento. Durante a campanha do período seco, os pontos P7 ($0,83 \text{ mg L}^{-1}$) e P9 ($0,98 \text{ mg L}^{-1}$), excederam o valor limite permissível de $0,50 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Na campanha do período úmido, apenas o P7 ($0,51 \text{ mg L}^{-1}$), manteve-se em situação de não conformidade com o padrão legal. A detecção de LAS em níveis superiores ao limite

normativo evidencia a contaminação persistente por fontes antrópicas pontuais e difusas, derivadas predominantemente do lançamento de efluentes domésticos sem o devido tratamento. A atenuação temporal das concentrações no período chuvoso (como verificado no ponto P9) é atribuída ao efeito de diluição promovido pelo incremento da descarga fluvial, enquanto a permanência de desconformidade em P7 mesmo sob maior pluviosidade indica um aporte contínuo e expressivo de efluentes residenciais e comerciais nas áreas urbanizadas de contribuição.

Os valores de STD mantiveram-se relativamente estáveis na maior parte da bacia. A estação P13 apresentou os maiores registros em ambas as campanhas, com 1,598 mg L⁻¹ no período seco e 1,700 mg L⁻¹ no período úmido (Tabela 1). Apesar dos valores relativamente mais elevados nesse ponto, todas as amostras permaneceram abaixo do limite de 500 mg L⁻¹ estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

O comportamento observado em P13 é consistente com a maior condutividade elétrica registrada na mesma estação, que sugere maior carga de constituintes dissolvidos. Esse padrão pode estar associado à drenagem da área minerária e à lixiviação de materiais expostos, entretanto, considerando que as concentrações de STD permaneceram dentro do limite normativo, esse parâmetro, isoladamente, não indica comprometimento da qualidade da água. ()

A ORP, exibiu oscilações sazonais marcantes, parâmetro para o qual a Resolução CONAMA nº 357/2005, não estabelece um limite de referência. Durante a campanha do período seco, o valor máximo de ORP, foi registrado na estação P15 (280,8 mV), ao passo que, na campanha do período úmido, a maior ORP ocorreu em P8 (162,8 mV). A predominância de valores positivos de ORP em toda a rede de amostragem atesta condições hidrogeoquímicas oxidantes na coluna d'água, ambiente favorável à imobilização de metais redox. Em síntese, a integração dos parâmetros físico-químicos revela anomalias espacialmente restritas, com destaque para a não conformidade crítica em termos de cor verdadeira, pH, OD e LAS. Nesse cenário, a estação P13 sobressaiu-se de forma sistemática por registrar os picos absolutos de cor verdadeira, pH, CE, STD e dinâmicas extremas de oxigenação, configurando uma assinatura hidroquímica única e fortemente alterada em relação ao background hidrogeoquímico regional. Essa constatação ratifica que o monitoramento do rio Piauí exige uma abordagem integrada entre os controles geoquímicos naturais e os vetores de impacto antrópico/minerário locais.

4.2. Nutrientes e compostos nitrogenados na água

As concentrações de nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) e fósforo total (P) nos períodos seco e úmido, apresentadas na Tabela 2, permitiram avaliar a variabilidade espacial e temporal desses parâmetros e sua conformidade com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces de Classe 2. Nitrato e nitrito permaneceram abaixo dos limites normativos em todas as estações, enquanto o fósforo apresentou valores pontualmente elevados e maior heterogeneidade espacial e temporal.

Tabela 2 – Concentrações de nitrato, nitrito e fósforo total nos períodos seco e úmido.

Pontos	Nitrato (Período seco)	Nitrato (Período úmido)	Nitrito (Período seco)	Nitrito (Período úmido)	Fósforo (Período seco)	Fósforo (Período úmido)
P1	0,271	0,504	0,030	0,003	0,000	0,717
P2	0,312	1,238	0,020	0,010	0,297	0,207
P3	2,509	1,238	0,020	0,000	0,053	0,250
P4	4,240	1,65	0,050	0,010	1,067	0,443
P5	0,000	1,238	0,020	0,010	0,863	184,333
P6	0,477	1,796	0,030	0,020	0,673	2,297
P7	1,703	1,204	0,060	0,010	1,410	169,667
P8	2,070	0,000	0,083	0,010	1,623	375,333
P9	0,150	0,000	0,060	0,000	1,507	0,903
P10	0,688	1,225	0,093	0,000	1,237	0,647
P11	0,241	1,225	0,070	0,000	0,373	0,653
P12	0,236	1,896	0,040	0,020	1,220	1,090
P13	1,206	2,600	0,070	0,393	2,453	3,067
P14	0,288	1,225	0,060	0,010	0,270	1,560
P15	0,446	1,225	0,050	0,000	0,0633	0,000
P16	0,191	1,229	0,033	0,060	0,420	2,233
P17	0,755	1,288	0,060	0,010	1,797	0,823
CONAMA 357/05	10 mg/L	10 mg/L	1 mg/L	1 mg/L	0,1 mg/L	0,1 mg/L

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

As concentrações de nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-), mantiveram-se em conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (Classe 2), em todas as estações de amostragem (Tabela 2). Para NO_3^- , o teor máximo foi registrado no ponto P4 durante o período seco ($4,24 \text{ mg L}^{-1}$), valor consideravelmente inferior ao limite permissível de 10 mg L^{-1} . Quanto ao NO_2^- , a maior concentração ocorreu no ponto P13 no período úmido ($0,393 \text{ mg L}^{-1}$), também abaixo do valor máximo permitido de 1 mg L^{-1} . A elevação pontual do nitrito em P13, pode estar associada às condições de estagnação e retenção hídrica no *sump* do empreendimento, as quais favorecem ambiente redutor para

as etapas intermediárias de desnitrificação e nitrificação incompleta, além do potencial aporte de compostos nitrogenados residuais. Essa constatação foi interpretada de forma integrada aos demais parâmetros físico-químicos e operacionais registrados na estação.)

As concentrações de fósforo apresentaram elevada variabilidade espacial e temporal, com valores superiores ao limite de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ aplicável a ambientes lóticos de Classe 2. No período úmido, os maiores registros foram observados em P5 ($184,333 \text{ mg L}^{-1}$), P7 ($169,667 \text{ mg L}^{-1}$) e P8 ($375,333 \text{ mg L}^{-1}$), como mostra a Tabela 2. A variabilidade observada pode estar associada à contribuição de diferentes fontes e processos atuantes na bacia, incluindo aportes de efluentes domésticos, atividades agropecuárias e remobilização de materiais. Adicionalmente, a ocorrência de apatita nos pegmatitos da região constitui potencial fonte geogênica de fósforo, cuja contribuição para as concentrações observadas podem estar associadas em conjunto com as fontes antrópicas. A baixa vazão no período úmido, registrada em dezembro de 2023, pode ainda ter favorecido a concentração de solutos e reduzido a capacidade de diluição do sistema.

As concentrações P, exibiram expressiva variabilidade espacial e sazonal, registrando-se desconformidades acentuadas em relação ao limite de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 Classe 2. Durante a campanha do período úmido, os teores mais elevados foram observados nos pontos P5 ($184,333 \text{ mg L}^{-1}$), P7 ($169,667 \text{ mg L}^{-1}$) e P8 ($375,333 \text{ mg L}^{-1}$), (Tabela 2). Do ponto de vista hidrogeoquímico e ambiental, os elevados níveis de fósforo no sistema fluvial refletem a ação sinérgica entre controles geogênicos e antrópicos. Na Província Pegmatítica Oriental, o fósforo possui origem natural associada ao intemperismo químico de minerais acessórios como a apatita e fosfatos secundários presentes nas rochas granítico-pegmatíticas. Contudo, os picos observados coincidem com a influência de fontes antrópicas difusas e pontuais, tais como o carreamento de fertilizantes fosfatados empregados na agricultura, o manejo de efluentes da pecuária e o descarte *in natura* de efluentes. Cabe ressaltar que, a condição de baixa vazão pluviométrica observada no ciclo de dezembro de 2023, atenuou a capacidade de diluição e autodepuração da rede hidrográfica, potencializando a concentração desse nutriente na coluna d'água.

4.3. Composição geoquímica da água: elementos maiores e traço

A Tabela 3 apresenta as concentrações de Al, Fe e Mn, e a Tabela 4 reúne os elementos-traço Cu, Ba, Cd, Pb, Zn e Li nas águas analisadas nos períodos seco e úmido, em comparação com os valores de referência da Resolução CONAMA nº 357/2005 Classe

2. Os resultados mostram variabilidade espacial e sazonal, com elementos que permaneceram abaixo dos limites normativos e outros que apresentaram valores reportados acima dos padrões em parte das amostras, indicando a coexistência de controles geogênicos e possíveis contribuições antrópicas.

Tabela 3 – Concentrações de alumínio, ferro e manganês nas águas da bacia hidrográfica do rio Piauí nos períodos seco e úmido.

Pontos	Alumínio (Período seco)	Alumínio (Período úmido)	Ferro (Período seco)	Ferro (Período úmido)	Manganês (Período seco)	Manganês (Período úmido)
P1	0,1858	0,0907	0,2714	0,2622	0,0101	0,0027
P2	0,2243	0,0907	0,2179	0,1585	0,0101	0,1375
P3	0,0486	0,0907	0,0731	0,1308	0,0101	0,0027
P4	0,5430	0,1172	1,7300	0,8320	0,0101	0,0246
P5	0,6320	0,6980	1,2010	3,1930	0,0101	0,4932
P6	0,1654	0,0907	1,2040	0,5560	0,0552	0,0027
P7	2,7170	0,3158	1,3930	0,5440	0,0101	0,0221
P8	2,3860	0,0907	1,0610	0,0862	0,0101	0,0943
P9	1,7840	0,0907	1,0820	0,2731	0,0101	0,8930
P10	0,5830	0,3861	1,1310	1,2180	0,0101	1,1990
P11	0,3507	0,6420	0,6510	1,1160	0,0101	1,1190
P12	1,4480	0,4667	1,2280	1,0310	0,0101	1,0730
P13	0,5920	0,1880	0,4391	0,3937	0,0101	0,0027
P14	0,2985	0,4362	0,5400	1,6100	0,0101	1,4620
P15	0,2301	0,1740	0,4501	0,2275	0,0101	0,0027
P16	0,3349	0,2827	0,5730	0,5030	0,0101	0,4190
P17	2,1410	0,0907	2,2530	0,1087	0,0101	0,0027
CONAMA 357/05	0,1 mg/L	0,1 mg/L	0,3 mg/L	0,3 mg/L	0,1 mg/L	0,1 mg/L

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

As concentrações de Al, superaram o limite máximo de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, na ampla maioria das estações de amostragem, corroborando o padrão hidrogeoquímico reportado por Silva et al. (2025) para a região. Esse enriquecimento sistemático evidencia o proeminente controle geogênico exercido pelas litologias do embasamento cristalino da Província Pegmatítica Oriental, caracterizado pela alteração hidrolítica de rochas granitóides e pegmatíticas, compostas majoritariamente por aluminossilicatos, micas e argilominerais. O intemperismo químico hidrolítico desses minerais libera o Al para os solos e drenagens superficiais. A mobilidade e a especiação aquosa do elemento são fortemente dependentes do pH: em trechos com acidificação da água (ponto P2, pH 4,78), a solubilização do alumínio é maximizada na forma iônica livre (Al^{3+}), espécie de elevada mobilidade e toxicidade aquática. Por outro lado, em valores de pH

neutros a levemente alcalinos, o elemento tende a se complexar ou precipitar na forma de hidróxidos de alumínio, atuando como colóide em suspensão. Dessa forma, a combinação entre o arcabouço litológico aluminoso e os processos de lixiviação sob condições de acidez local explica a ampla dispersão do Al na bacia.

O Fe, excedeu o Limite Permitido de $0,3 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, em diversas estações de amostragem da bacia. Na campanha do período seco, as maiores concentrações foram registradas em P4 ($1,73 \text{ mg L}^{-1}$) e P17 ($2,253 \text{ mg L}^{-1}$), enquanto durante a campanha do período úmido sobressaíram-se os pontos se P5 ($3,193 \text{ mg L}^{-1}$) e P14 ($1,61 \text{ mg L}^{-1}$). Teores elevados desse elemento comprometem as propriedades organolépticas da água, induzindo sabor metálico e incremento de cor e turbidez, além de favorecerem a formação e precipitação de oxihidróxidos coloidais na coluna d'água. A gênese desse enriquecimento decorre do intemperismo químico de minerais ferromagnesianos e oxihidróxidos presentes no embasamento granítico-pegmatítico e nos solos latossólicos regionais, associado a potenciais aportes antrópicos derivados da drenagem de lavras e intervenções no uso do solo. Sob a perspectiva hidrológica, a interpretação dos dados do período úmido exige considerar que a vazão média registrada em dezembro de 2023 ($0,10 \text{ m}^3/\text{s}$), foi anormalmente inferior àquela observada na campanha seca ($0,90 \text{ m}^3/\text{s}$). Esse déficit hídrico severo reduziu significativamente o volume de descarga e a capacidade de diluição do sistema fluvial, indicando que a elevação dos teores de Fe no ciclo chuvoso reflete o acúmulo de solutos pela menor vazão e pela carga lavada do solo, e não o padrão típico de diluição esperado para o pico da estação pluviométrica.

Os teores Mn, exibiram marcante variabilidade sazonal ao longo da rede de amostragem. Durante a campanha do período seco, os valores mantiveram-se espacialmente homogêneos e estritamente abaixo do Limite Máximo Permitido de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, registrando uma concentração média de $0,0101 \text{ mg L}^{-1}$. Contudo, na campanha do período úmido, foram observados picos de concentração acentuados nas estações P10, P11, P12 e P14, culminando no valor máximo de $1,462 \text{ mg L}^{-1}$, patamar superior em mais de dez vezes ao limite normativo. Esse comportamento temporal atípico não decorreu do efeito estocástico de diluição pela descarga fluvial, visto que, a vazão aferida na campanha úmida ($0,10 \text{ m}^3/\text{s}$) foi anormalmente inferior à observada na estação seca ($0,90 \text{ m}^3/\text{s}$). Esse déficit hidrológico severo em 2023, atenuou drasticamente a capacidade de diluição do sistema aquático, promovendo o acúmulo de solutos na coluna d'água via lixiviação inicial do solo e

evapotranspiração. Do ponto de vista hidrogeoquímico, o enriquecimento de Mn, deriva do intemperismo químico de minerais ferromagnesianos e acessórios presentes no embasamento granítico-pegmatítico e latossolos, somado a descarga de efluentes e drenagens de mineração. A ocorrência síncrona e correlacionada de picos de Fe e Mn atesta um controle geoquímico compartilhado, governado pelo intemperismo acoplado desses metais e pela dinâmica de oxirredução/dissolução redutiva de óxidos e hidróxidos mistos de Fe-Mn na interface água-sedimento.

A avaliação das concentrações de Cu em relação ao limite de $0,009 \text{ mg L}^{-1}$ estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 deve considerar a limitação analítica do método empregado. No período seco, todas as estações apresentaram valores reportados de $0,0097 \text{ mg L}^{-1}$, correspondentes ao limite de detecção (LD) do equipamento. Como esse valor é ligeiramente superior ao limite estabelecido pela legislação, não é possível determinar, para essas amostras, se as concentrações efetivas de Cu estavam em conformidade ou desconformidade com o padrão normativo. No período úmido, foram registradas concentrações superiores ao LD em P5, P10, P11, P12 e, sobretudo, P14 ($0,2549 \text{ mg L}^{-1}$), situado a jusante de um empreendimento minerário. O cobre ocorre naturalmente em minerais sulfetados, como a calcopirita, e em minerais secundários, além de estar associado a diferentes usos industriais (Rodrigues, Silva e Guerra, 2012). Em ambientes aquáticos, sua presença pode decorrer tanto do intemperismo de rochas quanto de fontes antrópicas, incluindo mineração, uso de insumos agrícolas e lançamento de efluentes.

As concentrações de Cu em relação ao valor limite de $0,009 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, foi interpretada à luz das especificações do método analítico empregado. Na campanha do período seco, todas as estações registraram o valor idêntico de $0,0097 \text{ L}^{-1}$, correspondente ao limite de detecção (LD) ou de quantificação (LOQ) do equipamento. Como o LD/LOQ é ligeiramente superior ao padrão estabelecido pela norma, a constatação numérica desse valor limite não implica, isoladamente, a não conformidade do manancial, não sendo possível inferir violação efetiva do limite normativo.

ORIGINAL ARTICLE

Tabela 4 – Concentrações de elementos-traço nas águas da bacia hidrográfica do rio Piauí nos períodos seco e úmido.

Pontos	Cobre (Período seco)	Cobre (Período úmido)	Bário (Período seco)	Bário (Período úmido)	Cádmio (Período seco)	Cádmio (Período úmido)	Chumbo (Período seco)	Chumbo (Período úmido)	Zinco (Período seco)	Zinco (Período úmido)	Lítio (Período seco)	Lítio (Período úmido)
P1	0,0097	0,0221	0,0015	0,2698	0,0089	0,0240	0,0580	0,0196	0,0015	0,0092	0,0000	0,0320
P2	0,0097	0,0221	0,0015	0,2877	0,0089	0,0044	0,0580	0,0181	0,0015	0,0107	0,0000	0,0290
P3	0,0097	0,0221	0,0015	0,351	0,0089	0,0044	0,0580	0,0207	0,0015	0,0176	0,0000	0,0020
P4	0,0097	0,0221	0,0015	0,2061	0,0089	0,0044	0,0580	0,0129	0,0015	0,0183	0,0000	0,0000
P5	0,0097	0,1607	0,0015	0,2368	0,0089	0,0044	0,0580	0,0604	0,0015	0,0708	0,0000	0,0000
P6	0,0097	0,0221	0,0015	0,2214	0,0089	0,0044	0,0580	0,0129	0,0015	0,0090	0,0000	0,0000
P7	0,0097	0,0221	0,0015	0,2059	0,0089	0,0044	0,0580	0,0163	0,0015	0,0175	0,0000	0,0000
P8	0,0097	0,0221	0,0015	0,2262	0,0089	0,0044	0,0580	0,0214	0,0015	0,0138	0,0000	0,0000
P9	0,0097	0,0221	0,0015	0,2657	0,0089	0,0044	0,0580	0,0146	0,0015	0,0285	0,0000	0,0000
P10	0,0097	0,1277	0,0015	0,2424	0,0089	0,0044	0,0580	0,0479	0,0015	0,0436	0,0000	0,0010
P11	0,0097	0,1663	0,0015	0,2689	0,0089	0,0044	0,0580	0,0365	0,0015	0,0566	0,0130	0,0000
P12	0,0097	0,1208	0,0015	0,2533	0,0089	0,0044	0,0580	0,0573	0,0015	0,0313	0,0000	0,0160
P13	0,0097	0,0221	0,0015	0,1651	0,0089	0,0044	0,0580	0,0227	0,0015	0,1334	0,7190	0,9270
P14	0,0097	0,2549	0,0015	0,2888	0,0089	0,0044	0,0580	0,0384	0,0015	0,0396	0,0110	0,2370
P15	0,0097	0,0221	0,0015	0,2823	0,0089	0,0044	0,0580	0,0129	0,0015	0,0057	0,0000	0,0050
P16	0,0097	0,0732	0,0015	0,2623	0,0089	0,0044	0,0580	0,0405	0,0015	0,0568	0,0130	0,0600
P17	0,0097	0,0221	0,0015	0,2007	0,0089	0,0044	0,0580	0,0129	0,0015	0,0163	0,0000	0,0000
CONAMA 357/05	0,009 mg/L	0,009 mg/L	0,7 mg/L	0,7 mg/L	0,001 mg/L	0,001 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L	0,18 mg/L	0,18 mg/L	2,5 mg/L	2,5 mg/L

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Por outro lado, no período úmido foram detectadas concentrações substancialmente superiores ao LD em P5, P10, P11, P12 e, com expressivo destaque para o P14 ($0,2549 \text{ mg L}^{-1}$), localizado a jusante de um empreendimento minerário. O incremento de Cu em águas superficiais pode ter origem geogênica, associada ao intemperismo de minerais sulfetados primários e minerais secundários presentes nas rochas da bacia, ou decorrer de contribuições antrópicas, tais como o escoamento superficial de áreas de mineração e usos industriais (Rodrigues, Silva e Guerra, 2012). Além, do descarte de efluentes domésticos e a aplicação de defensivos agrícolas à base de cobre.

Os valores de Ba, permaneceram abaixo do limite de $0,7 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, em todas as estações de amostragem. No período seco, os teores foram homogêneos e baixos ($0,0015 \text{ mg L}^{-1}$). No período úmido, ocorreu um incremento generalizado, atingindo o valor máximo de $0,351 \text{ mg L}^{-1}$, no ponto P3. Como P3 corresponde ao ponto de captação para o abastecimento público do município de Carai, esse resultado reforça a necessidade de monitoramento contínuo do manancial e do controle das etapas de tratamento de água. Do ponto de vista geogênico, a liberação do Ba está fortemente associada ao intemperismo químico dos feldspatos potássicos e micas, abundantes nos pegmatitos e granitóides da região. O acréscimo observado em dezembro de 2023 relaciona-se à lixiviação do solo e ao escoamento superficial difuso; contudo, dada a baixa vazão registrada no período, tal comportamento reflete a mobilização do elemento por carga lixiviada do terreno e não o aumento da descarga fluvial puramente diluidora. Assim, contribuições geogênicas e fontes antrópicas difusas devem ser consideradas conjuntamente na dinâmica do elemento na bacia.

As concentrações de Cd, foram condicionadas pelas limitações do método analítico empregado, cujo LD foi de $0,0089 \text{ mg L}^{-1}$, supera o valor limite permissível de $0,001 \text{ mg L}^{-1}$ estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Na campanha do período seco, todas as estações de amostragem registraram o valor de corte do equipamento ($0,0089 \text{ mg L}^{-1}$), inviabilizando o enquadramento direto das amostras quanto à conformidade normativa. Na campanha do período úmido, a maioria das amostras permaneceu abaixo do LD, sendo os dados não detectados imputados pela metade do LD/2 ($0,0044 \text{ mg L}^{-1}$) para fins de processamento estatístico. A única quantificação efetiva acima do LD ocorreu no ponto P1 ($0,024 \text{ mg L}^{-1}$), estação que apresentou concentração significativamente superior ao padrão legal, indicando um aporte pontual relevante com provável contribuição de fontes antrópicas na porção superior da bacia.

A interpretação das concentrações de Pb, deve considerar o limite de detecção (LD) do método, de $0,0580 \text{ mg L}^{-1}$, superior ao limite de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. No período seco, todas as estações apresentaram valores correspondentes ao LD, impossibilitando a avaliação de conformidade com o limite normativo. No período úmido, a maioria dos resultados permaneceu abaixo do LD, enquanto P5 apresentou concentração de $0,0604 \text{ mg L}^{-1}$, superior ao limite normativo. A presença de Pb pode ter origem geogênica vinculada à alteração intempérica de feldspatos potássicos e micas, além da contribuição de minerais acessórios. Alternativamente, o Pb pode derivar de fontes antrópicas como efluentes domésticos não tratados, fertilizantes fosphateados e descarte inadequado de resíduos orgânicos e inorgânicos.

As concentrações de Zn, permaneceram abaixo do limite de $0,18 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, em todas as amostras. No período seco, os valores foram homogêneos e próximos de $0,0015 \text{ mg L}^{-1}$. No período úmido, os picos observados em P5 ($0,0708 \text{ mg L}^{-1}$) e P13 ($0,1334 \text{ mg L}^{-1}$), abaixo do LD, sugerem um incremento por escoamento superficial e lixiviação. Do ponto de vista geogênico, o Zn na bacia pode derivar da alteração intempérica de silicatos e micas, bem como da dissolução de minerais acessórios típicos de pegmatitos e granitóides regionais. Adicionalmente, as contribuições antrópicas locais (uso de fertilizantes agrícolas, efluentes domésticos e contaminação por insumos metálicos) devem ser avaliadas em conjunto com o uso e ocupação na bacia.

O Li, apresenta singular relevância geoquímica e socioeconômica na Bacia Hidrográfica do rio Piauí, uma vez que a região está estrategicamente inserida na Província Pegmatítica Oriental do Brasil e é caracterizada pelo expressivo magmatismo pegmatítico da família LCT (Lítio-Césio-Tântalo). Em todas as estações de amostragem, as concentrações de Li, mantiveram-se estritamente em conformidade com o Limite Máximo Permitido de $2,5 \text{ mg L}^{-1}$, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Contudo, a estação P13 destacou-se por registrar os teores mais elevados da bacia, atingindo $0,719 \text{ mg L}^{-1}$, no período seco e $0,927 \text{ mg L}^{-1}$, no período úmido. Esse enriquecimento anômalo local alinha-se à posição geoespacial de P13, situado em uma bacia de contenção (*sump*) que recebe efluentes diretos e águas de escoamento de frentes de lavra minerária. A gênese dessa assinatura hidrogeoquímica decorre do intemperismo químico acelerado e da lixiviação mecânico-química de minerais litiníferos primários e alterados expostos nas pilhas de estéril e rejeitos predominantemente espodumênio. A elevação temporal dos teores de Li em P13 durante o ciclo chuvoso reflete a ação conjunta da lixiviação de

superfícies mineradas com a restrição hidrológica do período. A drástica redução no volume de descarga atenuou a capacidade de diluição do sistema aquático, sobrepondo o efeito de concentração de solutos à estacionalidade pluviométrica esperada.

4.4. Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise PCA (Figura 5), permitiu sintetizar os padrões hidrogeoquímicos da Bacia Hidrográfica do rio Piauí, mediante a redução da dimensionalidade dos dados sem perda substancial da informação original (Hair Jr. *et al.*, 2009). Os dois primeiros componentes espectrais retiveram 57,0% da variância total acumulada, dos quais 37,6% foram explicados pela PC1(eixo x) e 19,4% pela PC2 (eixo y). A PC1, ordenou as variáveis associadas aos processos de mineralização acentuada, alcalinização e contaminação por efluentes específicos, apresentando elevadas cargas positivas para CE, STD, pH, Turbidez, COR, OD, (NO_2^-), LAS e para os elementos Li, Zn e Ba. A PC2, capturou primariamente o sinal da mobilização hidrogeoquímica de metais e nutrientes sob controle litológico e pedológico, com cargas expressivas para Fe, Al, Mn, Cu, Pb, P e NO_3^- .

A distribuição espacial das estações de amostragem no plano multivariado refletiu a coexistência de diferentes assinaturas hidrogeoquímicas ao longo da bacia. O agrupamento formado pelas estações de montante P1, P2, P3 e P6, exibiu forte associação aos vetores ORP e Ba, sinalizando a predominância do controle geogênico regional, caracterizado por águas oxicanes e pelo intemperismo das rochas do embasamento granítico-pegmatítico. As estações P8 e P15 projetaram-se adjacentes a esse domínio basal, contudo, seus posicionamentos ligeiramente deslocados indicam a sobreposição de pressões decorrentes das alterações no uso e ocupação da terra em suas respectivas sub-bacias de contribuição. As estações P4 e P7 apresentaram correlação direta com o vetor com NO_3^- , padrão hidroquímico associado aos aportes de fertilizantes nitrogenados derivados de atividades agropecuárias e à disposição de efluentes sanitários urbanos.

Em contrapartida, o domínio composto pelos pontos P5, P9, P10, P11, P12 e P14 ordenou-se em função de elevadas cargas para os metais e nutrientes Al, Fe, Pb, Cu, Mn e P. Essa associação expressa a ação integrada do intemperismo hidrolítico sobre litologias aluminossilicatadas e ferromagnesianas, potencializada pelo revolvimento do solo e por intervenções de origem minerária e antrópica na bacia. A estação P13 configurou um domínio hidrogeoquímico singular e totalmente segregado dos demais pontos no espaço fatorial, associando-se aos picos de OD, CE, STD, Li, Zn e NO_2^- . Essa assinatura anômala é diretamente compatível com a sua localização em uma bacia de contenção (*sump*), sob

severa influência do efluente de lavra e da lixiviação de estéreis e rejeitos pegmatíticos. Por sua vez, a estação P16 associou-se às variáveis cor, pH e LAS, sinalizando o impacto combinado de compostos orgânicos cromóforos dissolvidos e o lançamento de efluentes domésticos não tratados. Em contraste, P5, P9, P10, P11, P12 e P14 apresentaram associação com Al, Fe, Pb, Cu, Mn e P, padrão que pode refletir tanto a influência das unidades litológicas quanto aportes relacionados às atividades antrópicas e minerárias. P13 apresentou assinatura hidrogeoquímica distinta, associada a OD, CE, STD, Li, Zn e NO_2^- , coerente com sua localização em um sump de drenagem sob influência direta da atividade extrativa. P16, por sua vez, mostrou associação com cor, pH e LAS, indicando influência combinada das características naturais e do uso e ocupação da terra.

Em síntese, a PCA discriminou com elevada precisão os principais drivers de variabilidade hidrogeoquímica no sistema hídrico, separando o sinal do background geogênico das contaminações pontuais e difusas decorrentes da mineração, pecuária e urbanização. Essa ordenação multivariada consolida o arcabouço diagnóstico para a gestão da qualidade da água na bacia, devendo ser integrada à análise espacial do uso da terra e às restrições hídricas locais.

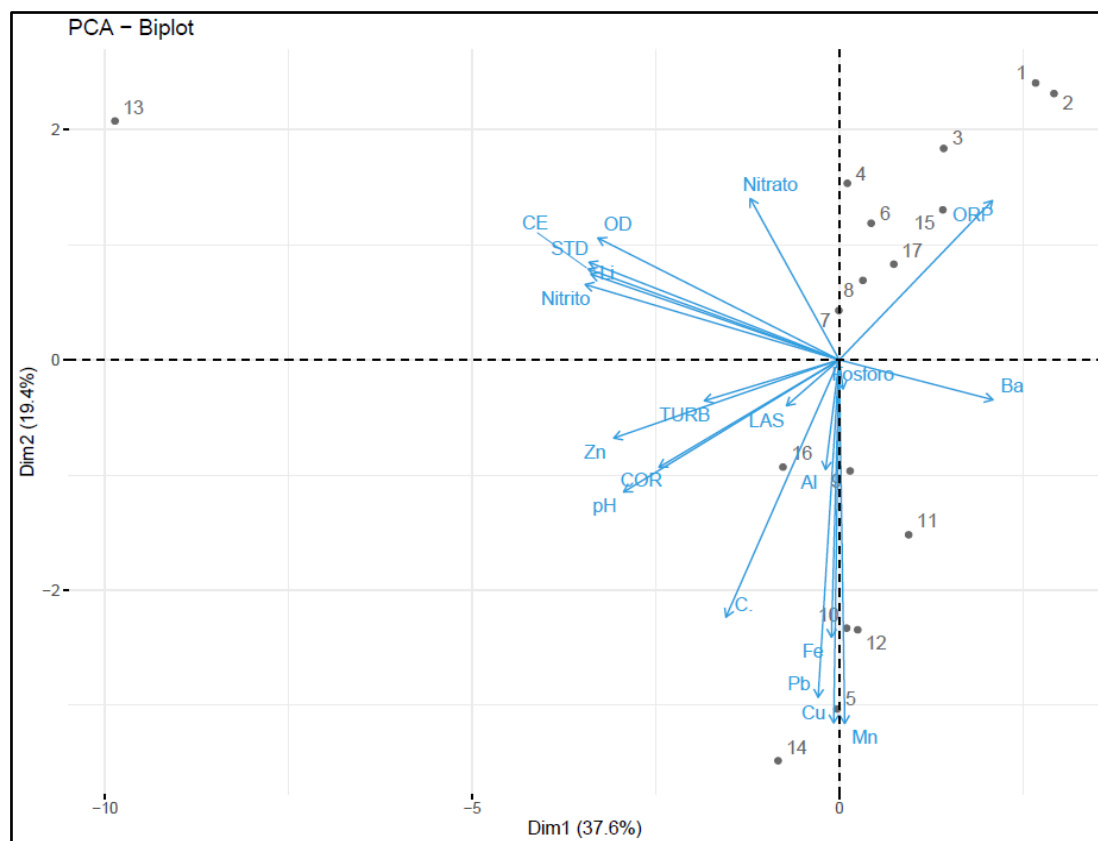


Figura 5 – Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) para os parâmetros de qualidade da água e as estações de amostragem da bacia do rio Piauí.

Fonte: Elaborado pelos autores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação hidrogeoquímica das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do rio Piauí, inserida no contexto geológico da Província Pegmatítica Oriental do Brasil, permitiu diagnosticar a qualidade hídrica e discriminar os controles geoquímicos, hidrológicos e antrópicos atuantes no sistema fluvial. Parte dos parâmetros monitorados permaneceu em conformidade com os padrões da Resolução CONAMA nº 357/2005 (Classe 2), enquanto variáveis como: cor verdadeira, OD, pH, LAS, P, Al, Fe e Mn, registraram não conformidades acentuadas e recorrentes. O conjunto dos dados atesta a sobreposição do background hidrogeoquímico regional, derivado do intemperismo hidrolítico do embasamento granítico-pegmatítico, por pressões antrópicas locais decorrentes do lançamento de efluentes domésticos não tratados, da agropecuária e das atividades de mineração de lítio.

A Análise da PCA explicou 57,0% da variância acumulada nos dois primeiros componentes e discriminou com precisão os drivers de variabilidade hidrogeoquímica na bacia. A ordenação multivariada segregou eficientemente as estações sob controle predominantemente geogênico, daquelas impactadas por vetores urbanos/agrícolas e, pela drenagem de mineração, confirmando a PCA como ferramenta robusta para a síntese diagnóstica em sistemas aquáticos complexos.

Dentre as estações de amostragem, a P13 destacou-se por apresentar a assinatura hidrogeoquímica mais anômala e segregada da bacia, caracterizada por valores extremos de pH (alcalinização severa), CE, STD e, pelos picos absolutos de Li (0,927 mg/L, Zn e NO_2^-). Essa assinatura é diretamente compatível com a sua posição geoespacial em uma bacia de contenção (*sump*) sob influência direta da lavra minerária e da lixiviação de pilhas de estéril e rejeitos de minerais litiníferos. Adicionalmente, detectaram-se enriquecimentos expressivos de Al, Fe e Mn, além, de traços de Cu, Cd e Pb, cuja avaliação quantitativa requer a rigorosa validação do LD e LQ analíticos, para evitar artefatos de amostragem.

Sob a perspectiva hidrológica, os resultados evidenciaram que a estacionalidade climática não deve ser interpretada de forma categórica: a campanha de dezembro de 2023, operacionalmente classificada como período úmido, registrou uma vazão anormalmente reduzida ($0,10\text{m}^3/\text{s}$) em comparação ao período seco ($0,90\text{ m}^3/\text{s}$). Esse déficit hídrico atenuou a capacidade de diluição da rede hidrográfica, sobrepondo o efeito de concentração de solutos por baixa descarga ao padrão sazonal de diluição esperado para o pico pluviométrico.

Para subsidiar a gestão sustentável da Bacia do rio Piauí frente à acelerada expansão da mineração de lítio, recomenda-se a consolidação de um programa de monitoramento contínuo com abordagem multimatriz. Essa estratégia deve integrar a especiação química na coluna d'água, a caracterização hidrogeoquímica dos sedimentos de fundo e a rigidez na validação dos parâmetros analíticos de laboratório, assegurando a proteção dos ecossistemas aquáticos e a segurança hídrica do abastecimento público na região.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da CAPES e da Companhia Brasileira de Lítio (CBL). Os autores expressam seus agradecimentos ao PPGGEO/UFVJM, ao LGA/UFVJM, ao Laboratório de Microbiologia do IFNMG – Campus Araçuaí e ao NGqA/IGC/UFMG pelo suporte institucional e técnico, fundamentais para a realização das análises laboratoriais.

REFERÊNCIAS

ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability**. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2013.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 24. ed. Washington: APHA, 2023.

BAGGIO, H. **Contribuições naturais e antropogênicas para a concentração e distribuição de metais pesados em água superficial e sedimento de corrente na bacia do rio do Formoso, município de Buritizeiro, MG**. 2008. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BARRETO, M. L. (ed.). **Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 215 p.

BENTO, C. C. **Análise geoquímica ambiental multielementar na caracterização da qualidade da água superficial do lago da barragem de Três Marias-MG: contribuições naturais e antropogênicas para as concentrações e distribuições dos parâmetros de qualidade da água**. 2020. Dissertação (Pós-Graduação) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de águas e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo: apêndice A: significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas de amostragem**. São Paulo: CETESB, 2018.

CUNHA, L. A.; BAGGIO, H.; CORDEIRO, I. G.; SOUZA, J. C.; CARVALHO, F. A.; RAMALHO, K. C.; SANTOS, L. A. M. Análise geoquímica e avaliação da contaminação por elementos potencialmente tóxicos nos sedimentos de fundo da bacia do rio Piauí (MG), inserida na província pegmatítica oriental do Brasil. **Caderno de Geografia**, v. 35, n. 82, p. 702, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2025v35n82p702>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Bioma Cerrado**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2024.

FILHO, J. C. M. **Mapa geológico: folha Novo Cruzeiro – SE.24-V-C-1**. Belo Horizonte: CODEMIG, 2014.

FLEXER, V.; BASPINEIRO, C. F.; GALLI, C. I. Lithium recovery from brines: a vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 639, p. 1188-1204, 2018.

HAIR JR., J. F.; BLACK, W. C.; BADIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Tradução de Adonai Schlup Sant'Anna. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The role of critical minerals in clean energy transitions**. Paris: IEA, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Sustainable and responsible critical mineral supply chains**. Paris: IEA, 2023.

KÖPPEN, W. **Climatologia: com un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

OTONI, T. C. O. **Levantamento etnobotânico de plantas utilizadas com fins medicinais e cosméticos em comunidades tradicionais do município do Araçuaí, Minas Gerais**. 2018. 140 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

PAES, V. J. C.; RAPOSO, F. O.; PINTO, C. P.; OLIVEIRA, F. A. R. **Projeto Jequitinhonha: estados de Minas Gerais e Bahia: geologia e recursos minerais das folhas Comercinho, Jequitinhonha, Almenara, Itaobim, Joáima e Rio do Prado**. Belo Horizonte: CPRM, 2010.

PEDROSA-SOARES, A. C.; CHAVES, M. L. S. C. **Eastern Brazilian Pegmatite Province: field trip guidebook**. Recife: PEG 2009 – 4th International Symposium on Granitic Pegmatites, 2009. 60 p.

PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; ALKMIM, F.; SILVA, L. C.; BABINSKI, M.; CORDANI, U.; CASTAÑEDA, C. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 15-30, 2007.

RODRIGUES, M. A.; SILVA, P. P.; GUERRA, W. Elemento químico cobre. **Química Nova na Escola**, v. 34, n. 3, p. 161-162, 2012.

SILVA, C.; MELLO, E.; MORAIS, M. I.; SOUZA, A. L. A.; SANTOS, A. L.; BARBOSA, F. J. Exposure of aluminum in the Araçuaí-Itinga lithium pegmatite district, Minas Gerais, Brazil: contaminant and toxicological effects on populations established nearby mining activities. **Journal of the Geological Survey of Brazil**, v. 8, n. 2, p. 77-91, 2025. DOI: <https://doi.org/10.29396/jgsb.2025.v8.n2.1>.

SOUZA, J. C. **Análise geoquímica da água superficial e de abastecimento da bacia hidrográfica do rio Piauí, localizada na província litinífera do estado de Minas Gerais**. 2024. Dissertação (Pós-Graduação) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for drinking-water quality**. 4th ed., updated 2022. Geneva: WHO, 2022.

YOUNGER, P. L. Mine water pollution from Kernow to Kwazulu-Natal: geochemical remedial options and their selection in practice. **Geoscience in South-West England**, v. 10, p. 255-266, 2002.