

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

MATEUS SALA PINTO

**CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA DO RIO PARAOPEBA E
GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DO RESERVATÓRIO DE RETIRO
BAIXO (MG)**

**POÇOS DE CALDAS/MG
2024**

MATEUS SALA PINTO

**CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA DO RIO PARAOPEBA E
GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DO RESERVATÓRIO DE RETIRO
BAIXO (MG)**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia
Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas.
Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Diego de Souza Sardinha

**POÇOS DE CALDAS/MG
2024**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas

Biblioteca Campus Poços de Caldas

Pinto, Mateus Sala.

Caracterização morfométrica da bacia do Rio Paraopeba e geoquímica dos sedimentos de fundo do reservatório de Retiro Baixo (MG) / Mateus Sala Pinto. - Poços de Caldas, MG, 2023.

91 f. : il. -

Orientador(a): Diego de Souza Sardinha.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Uso da Terra. 2. Dissecação de relevo. 3. Índices de poluição. 4. Gestão dos recursos hídricos. I. Sardinha, Diego de Souza, orient. II. Título.

MATEUS SALA PINTO

Caracterização morfométrica da bacia do Rio Paraopeba e geoquímica dos sedimentos de fundo do reservatório de Retiro Baixo (MG)

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovado em: 06 de outubro de 2023.

Prof. Dr. Diego de Souza Sardinha Presidente da Banca Examinadora Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Fernando Verassani Laureano
Instituição: Vale

Prof. Dr. Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Diego de Souza Sardinha, Professor do Magistério Superior**, em 06/10/2023, às 11:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1108120** e o código CRC **5B3DD0BD**.

Dedico este trabalho à Maristela Bianca Sala Pedroso
e Luis Tadeu de Carvalho Pinto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, professor Dr. Diego de Souza Sardinha, pela oportunidade, paciência, dedicação e pelo incentivo nos momentos em que precisei. Pela orientação além da academia, pelo conceito de limite do desconhecido, e finalmente, pela confiança em meu trabalho.

Agradeço também aos companheiros de campo, Jéssica, David, Cochise e Pedro, pelos momentos cansativos e divertidos que o trabalho campo pode proporcionar.

Agradeço à minha família, especialmente às minhas mães, Maristela Bianca Sala Pedroso e Elizete Aparecida Sala Melo, pela presença reconfortante e pelo seu amor incondicional em todos os momentos. Ao meu pai Luis Tadeu de Carvalho Pinto, pela orientação e dedicação em me ensinar os valores mais valiosos, que fizeram de mim um homem. Aos meus irmãos, aos de sangue e os de consideração.

Agradeço aos meus amigos do coração, que sabem quem são, pelos muitos momentos que foram minha família, meus conselheiros, meus parceiros e confidentes.

Agradeço à minha namorada Flávia Liz, pela paciência, amor, dedicação e carinho, e aos conselhos me ajudaram muito nos momentos que duvidei de mim mesmo, meu muito obrigado.

À secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais pelo suporte e atendimento prestado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O presente trabalho objetivou a caracterização morfométrica da bacia do Rio Paraopeba e a geoquímica dos sedimentos de fundo do Reservatório de Retiro baixo, situado no exultório da bacia. A análise morfométrica indicou uma heterogeneidade da caracterização geomorfológica que implica na diferenciação dos padrões de drenagem. A litologia apresenta tendência ao escoamento superficial e textura fina das rochas, no alto e médio curso, enquanto no baixo curso a capacidade de infiltração aumenta, devido à ocorrência de formações sedimentares. Pela análise da integral hipsométrica, observou-se que se trata de uma região madura e de alta dissecação do relevo. As análises geoquímicas foram realizadas através de amostragem de perfil de sedimento em 3 pontos (P1, P2 e P3). As análises foram realizadas para os elementos maiores, traços e terras raras. As concentrações dos elementos Cr, Ba, Ni, Co, foram observados em valores acima dos limites guia de referência para contaminação e efeitos adversos a biota nativa. Os índices litogênicos preveem maior contribuição dos elementos Al, Fe, Si, Ba e Zr. Os índices FC, FE, Igeo apontam enriquecimento significativo para os elementos Mn, P, Co, Cu, W, Zn e W, quando comparados com o fundo geoquímico natural de referência. Os índices de maturidade química e grau de alteração demonstram diferenciação das camadas mais profundas do perfil de sedimento, quanto ao grau de intemperismo do material, sendo mais elevadas nas amostras mais superficiais. A análise geoquímica dos elementos terras raras (ETR's) evidenciou novamente esta diferenciação, onde foram observadas menores concentrações destes elementos nas camadas mais profundas do sedimento. A mobilidade dos elementos maiores, indicam aporte dos elementos Mn, Fe e Al, e depleção dos demais. A caracterização geoquímica do sedimento de fundo do reservatório pode ser utilizada como uma ferramenta para monitorar a qualidade do reservatório e identificar possíveis fontes de contaminação, subsidiando políticas públicas voltadas para a gestão e preservação dos recursos hídricos.

Palavras-chave: uso da terra; dissecação do relevo; índices de Poluição; gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

The present work aimed at the morphometric characterization of the Paraopeba River basin and the geochemistry of the bottom sediments of the Retiro Baixo Reservoir, located in the basin's outflow. The morphometric analysis indicated a heterogeneity in the geomorphological characterization that implies the differentiation of drainage patterns. The lithology presents a tendency to surface runoff and fine texture of the rocks, in the upper and middle courses, while in the lower course the infiltration capacity increases, due to the occurrence of sedimentary formations. By analyzing the hypsometric integral, it was observed that this is a mature region with high relief dissection. Geochemical analyzes were carried out through sediment profile sampling at 3 points (P1, P2 and P3). The analyzes were carried out for major elements, traces and rare earths. The concentrations of the elements Cr, Ba, Ni, Co, were observed at values above the reference guide limits for contamination and adverse effects on native biota. The lithogenic indices predict a greater contribution of the elements Al, Fe, Si, Ba and Zr. The FC, FE, Igeo indices indicate significant enrichment for the elements Mn, P, Co, Cu, W, Zn and W, when compared with the natural geochemical reference background. The chemical maturity and degree of alteration indices demonstrate differentiation of the deeper layers of the sediment profile, in terms of the degree of weathering of the material, being higher in the more superficial samples. The geochemical analysis of rare earth elements (REEs) again highlighted this differentiation, where lower concentrations of these elements were observed in the deeper layers of the sediment. The mobility of the larger elements indicates the contribution of the elements Mn, Fe and Al, and depletion of the others. The geochemical characterization of the bottom sediment of the reservoir can be used as a tool to monitor the quality of the reservoir and identify possible sources of contamination, supporting public policies aimed at the management and preservation of water resources.

Keywords: land use; relief dissection; pollution indexes; water resources management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Mapa Hidrográfico e hierarquia de drenagem Bacia Paraopeba.....	23
Figura 2 -	Localização da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba com os pontos de amostragem no Reservatório de Retiro Baixo.....	30
Figura 3 -	Mapa domínios Geológicos da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.....	32
Figura 4 -	Mapas (geomorfológico e hipsométrico) da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.....	34
Figura 5 -	Regime pluviométrico e clima da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.....	36
Figura 6 -	Mapa pedológico da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba	7
Figura 7 -	Mapa de regiões urbanas, estações de tratamento de esgoto e áreas de deposição de resíduos.	38
Figura 8 -	Poligonais minerárias cadastradas na bacia, por substância.	39
Figura 9 -	Mapa da situação da coleta e tratamento de esgoto dos municípios da bacia do rio Paraopeba.	40
Figura 10 -	Curva Hipsométrica da Bacia do Rio Paraopeba.	48
Figura 11 -	Perfil Longitudinal Rio Paraopeba e o ajuste de melhor tendência.	49
Figura 12 -	Projeção dos resultados obtidos no diagrama de variação de Harker para elementos maiores (% em peso)	53
Figura 13 -	Principais metais analisados em perfil de profundidade nos sedimentos de fundo.....	55
Figura 14 -	Gráficos de dispersão de concentração das amostras de elementos maiores.	56
Figura 15 -	Principais elementos traços analisados em perfil de profundidade nos sedimentos de fundo.....	59
Figura 16 -	Gráficos de dispersão de concentração das amostras de elementos traços e menores.	61
Figura 17 -	Diagramas multielementares dos sedimentos de fundo.	64
Figura 18 -	Diagrama de abundância das amostras dos perfis de sedimentos mostrando o padrão de fracionamento dos ETR's. Os dados foram normalizados pela média dos condritos C1 (Evensen; Hamilton; O'Nions, 1978).	67
Figura 19 -	Índice geoquímico Fator de Contaminação (FC) para os sedimentos de fundo do reservatório de Retiro Baixo.	70

Figura 20 -	Índice geoquímico Fator de Enriquecimento (FE) para os sedimentos de fundo analisados no reservatório de Retiro Baixo.....	71
Figura 21 -	Índice de Geoacumulação (Igeo) para os sedimentos de fundo analisados no reservatório de Retiro Baixo	73
Figura 22 -	Índices de contribuição Litogênica e antrópica para elementos maiores, traços e terras raras em P1	74
Figura 23 -	Índices de contribuição Litogênica e antrópica para elementos maiores, traços e terras raras em P2	75
Figura 24 -	Índices de contribuição Litogênica e antrópica para elementos maiores, traços e terras raras em P3	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Informações gerais sobre a fonte de dados fisiográficos utilizados neste trabalho	2
Tabela 2 -	Análise morfométrica linear e de forma da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (Alto, Médio e Baixo, respectivamente).....	41
Tabela 3 -	Análise morfométrica espacial da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (Alto, Médio e Baixo, respectivamente).	44
Tabela 4 -	Análise morfométrica hipsométrica da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (Alto, Médio e Baixo, respectivamente).....	46
Tabela 5 -	Geoquímica dos elementos maiores (óxidos) analisados nos sedimentos de fundo.....	52
Tabela 6 -	Geoquímica dos elementos traços analisados nos sedimentos de fundo.....	58
Tabela 7 -	Geoquímica dos elementos traços analisados nos sedimentos de fundo.....	60
Tabela 8 -	Geoquímica dos elementos terras raras analisados nos sedimentos de fundo	65
Tabela 9 -	Resultados dos elementos terras raras normalizados	66
Tabela 10 -	Intervalos de classificação e cores correspondentes FC.....	69
Tabela 11 -	Intervalos de classificação e cores correspondentes FE.....	71
Tabela 12 -	Intervalos de classificação e cores correspondentes Igeo.	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	RIOS E RESERVATÓRIOS	15
2.2	SEDIMENTOS DE FUNDO.....	16
2.3	ELEMENTOS TRAÇOS E TERRAS RARAS	18
2.4	FUNDO GEOQUÍMICO DE REFERÊNCIA.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	ANÁLISE MORFOMÉTRICA.....	23
3.2	ANÁLISE MORFOMÉTRICA LINEAR	24
3.3	ANÁLISE MORFOMÉTRICA ESPACIAL.....	25
3.4	ANÁLISE MORFOMÉTRICA HIPSOMÉTRICA	26
3.5	GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS DE FUNDO.....	27
3.6	CONTRIBUIÇÃO GEOGÊNICA E/OU ANTROPOGÊNICA	28
4	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREAS DE ESTUDO.....	30
4.1	GEOLOGIA	31
4.2	GEOMORFOLOGIA	33
4.3	CLIMA	34
4.4	PEDOLOGIA E USO DA TERRA.....	35
5	ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA DO RIO PARAPEBA.....	41
5.1	ANÁLISE MORFOMÉTRICA LINEAR	41
5.2	ANÁLISE MORFOMÉTRICA ESPACIAL.....	43
5.3	ANÁLISE MORFOMÉTRICA HIPSOMÉTRICA	45
5.4	DISCUSSÃO.....	49
6	GEOQUÍMICA.....	52
6.1	ELEMENTOS MAIORES	52
6.2	ELEMENTOS TRAÇOS.....	57
6.3	ELEMENTOS TERRAS RARAS.....	64
6.4	DISCUSSÃO.....	67
7	CONTRIBUIÇÃO GEOGÊNICA E/OU ANTROPOGÊNICA	69
7.1	FATOR DE CONTAMINAÇÃO.....	69
7.2	FATOR DE ENRIQUECIMENTO	70

7.3	ÍNDICE DE GEOACUMULAÇÃO	72
7.4	CONTRIBUIÇÃO LITOGÊNICA E ANTRÓPICA	74
7.5	DISCUSSÃO	76
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A gestão e preservação dos recursos hídricos têm se tornado questões prioritárias na agenda ambiental contemporânea, dada sua importância para o desenvolvimento sustentável das sociedades. Como forma de contribuição para sua gestão, é fundamental realizar a caracterização de bacias hidrográficas e reservatórios, que juntamente com as análises dos processos de ocupação e atividades antrópicas, se tornam uma ferramenta muito útil para entender como essa dinâmica influencia a qualidade e disponibilidade da água.

A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba localiza-se em uma região com grandes áreas de mineração, culturas agrícolas, pecuária, além de possuir grande influência de parte dos municípios da região metropolitana de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. A Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo é um empreendimento para geração de eletricidade, construído no baixo curso do Rio Paraopeba, aproximadamente 300 km da Barragem I da Vale, onde os rejeitos da Mina Córrego do Feijão verteram após o rompimento, no dia 25 de janeiro de 2019. A área inundada pelo reservatório é de 22,58 km², com um comprimento de 1,351,67 metros e barragem de 45 metros de altura. Sua construção foi realizada entre os anos 1973 e 1981, nos municípios de Curvelo e Pompeu, com o propósito de controlar as cheias, gerar energia hidrelétrica e fornecer água para agricultura e outros usos.

O presente trabalho faz uma abordagem integrada que busca realizar a caracterização morfométrica da bacia do Rio Paraopeba e a geoquímica dos sedimentos de fundo do Reservatório de Retiro Baixo.

No que se refere à geoquímica dos sedimentos de fundo, esse tema adquire especial relevância, pois representam um importante receptor de elementos químicos e compostos provenientes de diversas fontes naturais e antrópicas, uma vez que a exploração mineral foi uma das atividades econômicas mais importantes e impactantes na bacia do Rio Paraopeba. Desde o período colonial, a região era conhecida por suas riquezas minerais, especialmente pela presença de ouro, e nos últimos 50 anos a extração de minério de ferro foi a principal atividade exercida. A compreensão da composição química possibilita a identificação de possíveis contaminações e o monitoramento de mudanças ao longo do tempo, fornecendo informações valiosas para o desenvolvimento de políticas de gerenciamento ambiental mais efetivas e direcionadas.

Com base nessas perspectivas, este trabalho se propõe a oferecer uma contribuição significativa para a compreensão da dinâmica hidro geomorfológica da Bacia do Rio Paraopeba, bem como para o conhecimento da distribuição geoquímica dos sedimentos de fundo do

Reservatório de Retiro Baixo. A partir da integração desses conhecimentos, vislumbra-se o fortalecimento da capacidade de tomada de decisão por parte dos gestores ambientais, possibilitando uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos e, conseqüentemente, a preservação desse importante ecossistema.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é realizar a caracterização morfométrica da bacia do Rio Paraopeba e Geoquímica dos sedimentos de fundo do Reservatório de Retiro Baixo (MG). Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos devem ser realizados:

- a) Realizar a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba;
- b) Realizar a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba;
- c) Avaliar a geoquímica dos sedimentos de fundo do Reservatório de Retiro Baixo;
- d) Avaliar a contribuição geogênica e/ou antropogênica nos sedimentos de fundo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RIOS E RESERVATÓRIOS

Os rios representam níveis de base para os processos exógenos que atuam nas vertentes e suas águas são os agentes mais importantes no transporte de materiais intemperizados provenientes das encostas (Perez-Filho *et al.*, 2006). Eles constituem elementos geomorfológicos capazes de refletir, direta ou indiretamente, as condições ambientais ou as suas alterações. Essas condições ambientais estão vinculadas à relação entre fatores litológicos, estruturais, tectônicos, geomorfológicos, pedológicos, climáticos e uso e cobertura do solo (Christofoletti, 1981). As interações entre estes fatores condicionam a dinâmica fluvial e, conseqüentemente, as feições erosivas e deposicionais resultantes.

Os elementos químicos são encontrados naturalmente na litosfera, hidrosfera, atmosfera e nos organismos vivos, e sua distribuição, mobilidade, e disponibilidade são diretamente dependentes das condições físicas, químicas e biológicas do ambiente (Dupré; Gaillardet; Viers, 2003; (Batki; Kucuksezgin; Uluturhan, 2008). O processo natural que mais influência no regime de transporte destes elementos é o intemperismo físico-químico do substrato natural geológico da crosta terrestre. Este é um processo destrutivo, que permite o desagregamento e fracionamento da rocha matriz em partículas menores, mantendo a estrutura primária dos minerais constituintes (intemperismo físico) e surgimento de novos minerais (secundários) a partir de reações químicas que alteram a composição inicial do material (intemperismo químico) (Tardy, 1971).

O intemperismo químico está relacionado com o transporte de materiais dissolvidos pelos rios, tendendo a um aprofundamento do perfil de alteração do solo (Bortoletto Junior; Mortatti; Probst, 2003). A erosão mecânica age principalmente na superfície, nivelando o relevo continental e transportando a matéria solúvel e em suspensão através dos rios para o oceano (Tardy, 1971). A composição de íons dissolvidos, matéria solúvel e em suspensão nas águas dos rios fornece indicações da meteorização química e mecânica do sistema de interação água/rocha/solo de uma determinada bacia hidrográfica (Tardy, 1971).

No Brasil, o primeiro barramento artificial ocorreu no Rio Tietê, dando origem à barragem Edgard de Souza que tinha a finalidade de geração de energia elétrica (Pedrazzi, 2014). Ao contrário dos lagos, os reservatórios são formados pela ação direta do homem com o barramento de um vale natural ou a formação artificial de lagos (Esteves, 1998). Outra característica peculiar dos reservatórios é a presença de vazões defluentes sujeitas ao controle,

sendo este relacionado à exploração humana, porém, as variações das vazões defluentes geram flutuações no nível da água e podem acarretar alterações nas condições físicas, químicas e biológicas da água (Esteves, 1998). Como consequência, podem ocorrer impactos na qualidade das águas, diminuição da velocidade e da concentração de oxigênio dissolvido, precipitação de íons e sedimentos, assoreamentos, aumento da quantidade de nutrientes, entre outros.

Segundo Esteves (1998), durante as tempestades, os sedimentos são transportados em canais tributários e no canal principal de um rio, e à medida que a velocidade do fluxo e a turbulência diminuem após, as partículas suspensas se assentam, acumulando-se ao longo do leito do rio e em ambientes lênticos. Reservatórios inseridos no sistema hídrico, mais à jusante, diminuem a velocidade do fluxo e a turbulência, fazendo com que o sedimento transportado por escoamento acumule nestes ambientes, sendo depositados na camada superior do leito dos corpos d'água (Tardy, 1971). Essa camada representa o transporte e deposição recente do material suscetível à erosão, vindos da bacia hidrográfica e dos rios tributários. Eventualmente o transporte deste material continua na base do leito, principalmente a fração granulométrica mais fina.

2.2 SEDIMENTOS DE FUNDO

O conceito de qualidade da água é muito mais amplo do que a simples caracterização da água pela fórmula molecular H_2O . Isto porque a água, devido a suas propriedades de solvente e à sua capacidade de transportar partículas, incorpora a si diversas impurezas, as quais definem a qualidade da água (Von Sperling, 2014). A qualidade da água como um conjunto de características de natureza física, química e biológica que assegura determinado uso ou conjunto de usos, devendo estar dentro de certos limites ou padrões previstos na legislação vigente para que estes possam ser viabilizados (Derísio, 2017).

Segundo Von Sperling (2014), a qualidade da água é resultante de fenômenos naturais e da atuação do homem, ou seja, a qualidade de uma determinada água é função do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica. Informações sobre a qualidade da água em nosso país ainda são incipientes ou inexistentes em muitas bacias hidrográficas. A ausência de redes estaduais de monitoramento em algumas unidades da federação e a heterogeneidade das redes de monitoramento existentes no país (número de parâmetros analisados, frequência de coleta) dificultam a avaliação da qualidade das águas superficiais em um país de dimensões continentais como o Brasil (ANA, 2022). A Resolução nº 357/2005 do CONAMA, classifica as diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como

condições e padrões para lançamento de efluentes.

A qualidade da água de reservatórios é bem diferente do que ocorre em rios, lagos e estuários. Segundo Tundisi e Matsumura Tundisi (2008), ainda que os elementos químicos que venham a contribuir para a degradação da qualidade de água possam ser os mesmos, a escala temporal-espacial dos fenômenos que ocorrem em reservatórios é bastante distinta das escalas de rios e estuários. Como consequência, os processos físicos, químicos e biológicos apresentam características, intensidades e importâncias também bastante diferenciadas (Branco; Cleary; Porto, 1991). É importante ressaltar segundo Serafim-Junior *et al.*, (2010) que os estudos sobre a capacidade de suporte e monitoramento da qualidade da água em reservatórios constituem ferramentas importantes para mitigar os impactos negativos e definir seus múltiplos usos.

Na avaliação de recursos hídricos, os sedimentos têm sido um dos mais importantes indicadores do nível de contaminação de ecossistemas aquáticos, pois representam um compartimento potencial para o acúmulo de elementos-traço metálicos e outros contaminantes (geoacumulação), que pode resultar em efeitos ecológicos adversos, e a redução da vida útil de reservatórios que tem como finalidade a produção de energia elétrica (Nascimento, 2003).

O estudo de metais potencialmente tóxicos nos sedimentos de fundo tem grande importância na avaliação da qualidade de ecossistemas aquáticos pelo fato desses elementos não serem naturalmente degradados, nem permanecerem fixados pelos sedimentos continuamente, podendo retornar para a coluna d'água quando alteradas algumas de suas condições ambientais, tais como pH, potencial redox, salinidade ou presença de quelantes orgânicos (Bevilacqua *et al.*, 2009; Cotta; Rezende; Piovani, 2006; Ferreira; Horta; Cunha, 2010; Lemes, 2001; Santos; Santos; Oliveira, 2008; Yu; Yan; Wang, 2010). Alguns estudos vêm demonstrando a importância da quantificação dos metais presentes neste compartimento, visto que este, além de ter a capacidade de acumular elementos-traço, também atua como fonte de nutrientes e contaminantes que podem retornar para a coluna d'água diante de alterações nas condições físico-químicas da água (Arain *et al.*, 2008; Bevilacqua *et al.*, 2009; Bonai *et al.*, 2009; Franklin, 2010; Lemes, 2001).

Ao redor do mundo, várias pesquisas mostram altas concentrações de metais, elementos-traço e poluentes orgânicos em sedimentos de ecossistemas aquáticos próximos a áreas industrializadas e urbanizadas (IARC, 2012). Segundo Baird (2002), os metais podem ser fixados nos sedimentos por três vias: adsorção, complexação ou precipitação. De acordo com Lemes (2001), esse fenômeno está relacionado com o tamanho da partícula mineral, sendo observado que, com a diminuição do grão, as concentrações de nutrientes e contaminantes aumentam, fato este que tem feito muitos pesquisadores preferirem trabalhar com a fração de

grãos finos do sedimento.

A principal fonte de matéria orgânica em águas naturais é a descarga de esgotos sanitários (Piveli; Kato, 2005). Pelo fato do material húmico ser um dos responsáveis por aumentar a afinidade entre o sedimento e os metais, pode-se dizer que este material pode estar presente como uma discreta partícula ou como uma camada de partículas de argila (Bonai *et al.*, 2009; Förstner; Wittmann, 1981 apud Lemes, 2001). Além da capacidade de acumular elementos-traço, os sedimentos atuam como fonte de nutrientes e contaminantes que podem ser liberados para a coluna d'água por processos de difusão, ressuspensão, dragagem, entre outros (Jesus, 2008).

2.3 ELEMENTOS TRAÇOS E TERRAS RARAS

Considera-se elemento-traço toda espécie química natural que está presente no meio ambiente em baixas concentrações, usualmente $< 1.000 \text{ mg/Kg}$ ou $< 0,1\%$ (Pierzynski; Sims; Vance, 1994; Sparks, 2001). Essa denominação tem sido melhor aceita em muitas publicações (Mcbride, 1994; Kabata-Pendias; Pendias, 2001; Sparks, 2003) em relação à expressão “metal pesado”, a qual nunca foi oficializada por algum organismo ligado à área de química (p.e., IUPAC).

O termo “elementos terras raras” ou “metais de terras raras” refere-se, literalmente, a um grupo de 17 elementos metálicos, incluindo 15 lantanídeos, escândio e o ítrio (IUPAC, 2005). Os lantanídeos são elementos com número atômico (Z) entre 57 e 71, isto é do lantânio ao lutécio. O ítrio ($Z = 39$) também é considerado dentro do grupo dos ETR, visto que possui propriedades químicas e físicas muito semelhantes aos lantanídeos (Viera, 1997). O escândio Sc ($Z = 21$), embora não apresente um comportamento químico e físico de um elemento terra rara típico (lantanídeos), sua inclusão nesse grupo é justificada com base nas suas propriedades químicas e também por ocorrer na natureza associado, sob o ponto de vista mineralógico, aos demais elementos do grupo (Abrão, 1994; Lapidou-Loureiro, 1994). Contudo, a diferença do seu comportamento físico e químico em relação aos demais elementos do grupo é tão grande que alguns pesquisadores afirmam que o escândio ocupa uma posição intermediária entre as terras raras típicas e os elementos tetravalentes do grupo IVB (Ti, Zr, Hf) (Abrão, 1994).

Berzelius e Gan propuseram em 1814 a divisão dos ETR em dois subgrupos baseada nas propriedades químicas, físicas e no raio iônico dos elementos (Gerasimovsky, 1959); o do cério (ou terras raras leves, ETRL) e do ítrio (ou terras raras pesados, ETRP). Dentro de cada grupo, as propriedades elementares são muito similares e, por isso, quase sempre são

encontrados juntos em depósitos minerais (Lapido-Loureiro, 1994). São conhecidos como ETRL os elementos escândio (Sc), lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), samário (Sm) e o európio (Eu). No grupo dos elementos pesados, encontram-se o ítrio (Y), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb) e lutécio (Lu) (Viera, 1997 e Schüller *et al.*, 2011). Ocasionalmente o termo elementos terras raras médio (ETRM) é utilizado para elementos a partir do Pm ao Ho (Henderson, 1984).

Sob o ponto de vista geoquímico, os ETR pertencem ao grupo dos elementos litófilos e seus teores são inversamente proporcionais ao peso atômico (Henderson, 1984). Além disso, representam um marcante exemplo da regra de Oddo-Harkins (Kabata-Pendias; Pendias, 2001). De acordo com essa regra, os elementos de número atômico (Z) par são mais abundantes que os de número atômico ímpar. Como um grupo, os ETR constituem o décimo quinto componente mais abundante da crosta terrestre (Taylor; McLennan, 1985), apresentando uma concentração média estimada entre 150 a 220 mg kg⁻¹ (Long *et al.*, 2010). Cério e ítrio são os ETR mais abundantes e apresentam teores na crosta maiores que o do chumbo, cobre, molibdênio e arsênio (Castor; Hedrick, 2006; Greenwood; Earnshaw, 1984; Henderson, 1996). Lantânio e neodímio ocorrem em quantidades semelhantes às do chumbo (Castor; Hedrick, 2006). Túlio, o mais raro dos elementos de terras raras, pode ser encontrado com mais frequência do que o ouro, platina ou iodo (Brown *et al.*, 1990 e Chemie, 2005) e todos são mais comuns que a prata e o mercúrio (Taylor; McLennan, 1985). Promécio é mais conhecido como um elemento artificial devido à baixa estabilidade dos seus isótopos em condições naturais (Greenwood; Earnshaw, 1984 e Cotton, 2006). No entanto, existem relatos da sua ocorrência em quantidades muito pequenas em depósitos de minério de urânio (Hedrick; Cordier, 2008).

Alguns ETR possuem comportamentos distintos no ambiente que podem ser observados graficamente a partir de uma tendência de deslocamento de sua posição em relação aos demais ETR. Essa mudança no padrão dentro de um ETR é definida como anomalia (Henderson, 1984). Os elementos que exibem mais de um estado de oxidação estão mais sujeitos às anomalias, como é o caso, principalmente, do Ce e do Eu.

2.4 FUNDO GEOQUÍMICO DE REFERÊNCIA

O termo “background geoquímico” foi, originalmente, introduzido em meados do século XX, para diferenciar a abundância de elementos nas formações rochosas mineralizadas e não-mineralizadas. Desde então, o termo tem sido utilizado em diferentes áreas das ciências ambientais, o que tem conduzido à ampliação de seu significado e à geração de variantes sem

haver, no entanto, uma definição precisa.

Para Gough (1993), o significado mais comum do termo refere-se à escala de valores das concentrações de alguns elementos para um local influenciado por atividades antropogênicas. Todavia, conforme exposto por Plumlee (1999), em estudos de exploração geoquímica, o termo background se refere à concentração anômala de um elemento em um material sob investigação, tais como rochas, solos, plantas ou água.

De acordo com Galuszka (2007), um dos assuntos mais importantes, nos estudos ambientais recentes, diz respeito ao estabelecimento de valores de background geoquímico para elementos e componentes orgânicos nos sistemas bióticos e abióticos. A relação entre as alterações naturais e as proporcionadas pela ação antrópica nas espécies químicas é uma questão que, segundo o autor, envolve implicações importantes nas áreas da geologia, toxicologia e biologia, bem como em outros campos do conhecimento. Isto é especialmente importante, quando análises geoquímicas de concentrações de elementos tóxicos são requeridas.

Vários estudos indicam uma elevação significativa na concentração de elementos-traço nos ecossistemas, após a revolução industrial (Villeneuve; Holm, 1984; Richardson, 1992), sendo essa elevação muito bem documentada, sobretudo em sedimentos (Aston *et al.*, 1973; Gschwend; Hites, 1981; Baudo; Giesy; Muntau, 1990; Galuska ; Migaszewski, 2004). Diante disso, conforme exposto por Fadigas *et al.* (2006), é comum, durante a avaliação da extensão da poluição de uma área, comparar teores totais de elementos-traço obtidos desses locais com valores encontrados em condições naturais. Nesse caso, tais resultados são utilizados para calcular valores de background geoquímico, os quais permitem estabelecer padrões de qualidade ambiental, estudar o impacto de fontes de poluição antropogênicas ou, ainda, identificar fontes naturais de poluição, em uma determinada área (Reimann; Garrett, 2005; Reimann; Filzmoser; Garrett, 2005; Galuszka, 2007). Em caso de valores anômalos positivos, as influências antrópicas ocorrem, por definição, como contaminação (Matschullat, 2000a).

Conforme proposto por Matschullat *et al.* (2000a), background seria uma medida relativa usada para distinguir concentrações naturais de um dado elemento e a influência das atividades antrópicas nessas concentrações. Para os autores Reimann e Garrett (2005), (Reimann; Filzmoser; Garrett, 2005) e Galuszka (2007), o estabelecimento de valores de background geoquímico de determinados elementos para uma área é crucial, pois permite a separação das contribuições geogênicas/ biogênicas de um meio específico (águas, solos, sedimentos, plantas) daquelas de origem antrópica. Uma vez estabelecidos valores de background, para elementos traço, é possível a elaboração de mapas geoquímicos com enfoque geoambiental, considerados ferramentas importantes na gestão territorial e que podem ser

transformados em guias de alerta aos gestores públicos, com relação à necessidade de remediação de locais onde são identificadas concentrações anômalas de elementos-traço (Costa, 2007).

Nesse contexto, têm sido utilizadas diferentes metodologias para se estabelecerem valores de background para elementos-traço, sendo que as mais comuns são: o uso de valores considerados normais (citados na literatura), a proposição de faixas de referência obtidas a partir de amostras-controle, tomadas em áreas sem atividade antrópica (Casarini, 2000; Crock; Severson; Gough, 1992), e a separação entre valores normais e anômalos, obtidos de uma coleção de dados, que inclui amostras contaminadas e não contaminadas (Wang, 1994; Tobias; Bech; Algarra, 1997a; Tobias; Bech; Algarra, 1997b). Todavia, no Brasil, ainda não foi elaborado um sistema amplo contendo padrões de referência de elementos-traço, para a avaliação de áreas em relação à contaminação por esses elementos e poucos exemplos de trabalhos nacionais podem ser citados.

Visando identificar e definir o fundo geoquímico natural regional e/ou local das bacias de drenagem do Rio Paraopeba e do Reservatório de Retiro Baixo, foram consideradas as concentrações dos principais elementos químicos de interesse dos últimos centímetros de profundidade de cada perfil de sedimento de fundo amostrados, sendo normalizados quando necessário, a fim de representar o fundo geoquímico natural regional (FGNR) das bacias de drenagem estudadas.

As concentrações dos principais elementos potencialmente tóxicos de fundo geoquímico natural global utilizadas no presente estudo foram: a camada mais profunda de sedimento, resultante de uma deposição mais antiga e por isso considerada menos alterada pelas atividades antrópicas e representa o fundo geoquímico natural; as médias dos Folheios, proposto por Turekian e Wedepohl (1961); dos sedimentos fluviais amazônicos, proposto por Martin e Meybeck (1979); e do condrito carbonáceo (Sun, 1982).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta a fonte de dados fisiográficos utilizados neste trabalho para a caracterização da bacia do Rio Paraopeba.

Tabela 1 - Informações gerais sobre a fonte de dados fisiográficos utilizados neste trabalho

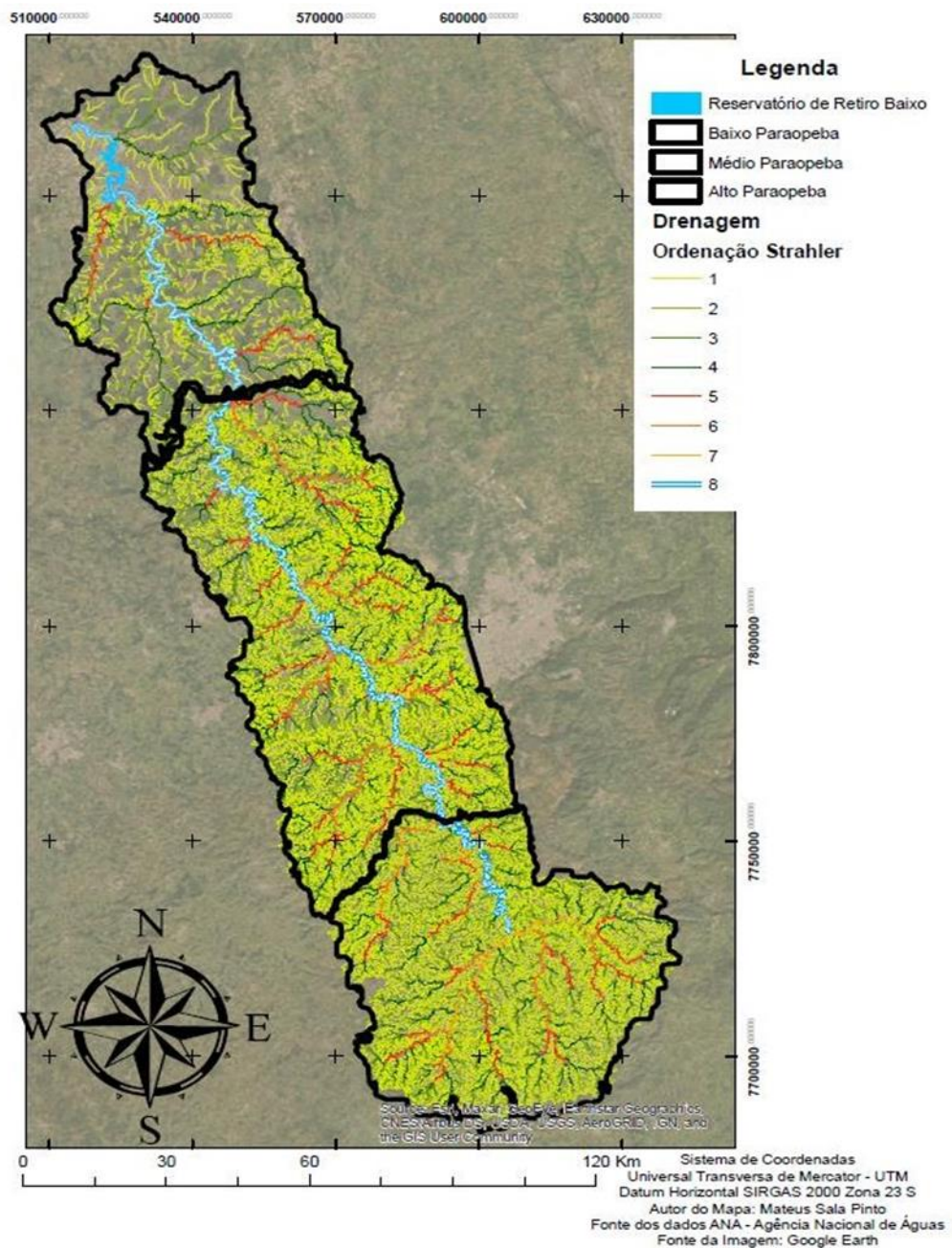
Dados	Fonte	Informações gerais
Limites municipais e regionais, hidrografia, massa d'água.	IDE-SISEMA Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	Plataforma criada pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (SISEMA); Acesso em: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/
Subdivisão da bacia hidrográfica do rio Paraopeba	Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (PDRH Paraopeba) disponibilizado no Portal InfoHidro.	Ferramenta integrante do Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos (InfoHidro). Acesso em: http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/
Geologia, geomorfologia e pedologia	IDE-SISEMA Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	Mapeamento geológico realizado pela CODEMIG e CPRM Acesso em: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/
Rede Hidrográfica	ANA – Agência Nacional de Águas IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas	Mapeamento realizado pelo IGAM e ANA. Acesso em: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/
Dados Saneamento Básico MG	IDE-SISEMA Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	Levantamento realizado pela FEAM e ARSAE-MG Acesso em: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/
Clima	IDE-SISEMA Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	Acesso em: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/
Vegetação	IDE-SISEMA Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	Mapeamento da vegetação realizado pelo IEF. Acesso em: http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/

Fonte: O Autor (2024).

3.1 ANÁLISE MORFOMÉTRICA

O levantamento da rede de drenagem foi efetuado através dos dados obtidos da base cartográfica atualizada em 2017, obtida a partir do Mapeamento Sistemático Brasileiro (ANA, 2017). A Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) foi gerada a partir da cartografia digital para a bacia do Rio São Francisco, especificamente da sub-bacia do Rio Paraopeba (Figura 1).

Figura 1 - Mapa Hidrográfico e hierarquia de drenagem Bacia Paraopeba



Fonte: O Autor (2024).

Para a análise morfométrica foi utilizado o modelo digital de terreno (MDT) obtido através das imagens do satélite Alos Palsar, de março de 2011, com resolução espacial de 30m, obtido através da base de dados (<https://search.asf.alaska.edu>). Os índices morfométricos foram subdivididos considerando a subdivisão da bacia do Rio Paraopeba em Alto, Médio e Baixo curso.

3.2 ANÁLISE MORFOMÉTRICA LINEAR

O índice razão de textura (R_{tex}) de uma bacia é dado pela relação entre o número total de rios de primeira ordem e o respectivo perímetro em quilômetros (Smith,1950), Equação 1.

$$R_{tex} = N_t / p \quad (1)$$

Onde: R_{tex} = razão de textura (canais/km); N_t = número total de rios de primeira ordem; p = perímetro da bacia hidrográfica (km).

O índice de circularidade (I_c), proposto por Miller (1953), é a relação entre a área total da bacia e a área de um círculo com o mesmo perímetro da bacia hidrográfica. Valores próximo a 1 indicam uma tendencia da forma da bacia ser próxima a um círculo, Equação 2.

$$I_c = 12,57 \times A / (p^2) \quad (2)$$

Onde: I_c = índice de circularidade; A = área da bacia hidrográfica (km²); p = perímetro da bacia hidrográfica (km).

A Densidade de drenagem (D_d) foi inicialmente definida por Horton (1945). Ela é a relação entre o comprimento total dos canais de uma bacia hidrográfica e a área total dessa bacia hidrográfica. Esse parâmetro é dado pela Equação 3.

$$D_d = L_t / A \quad (3)$$

Onde: D_d = Densidade de drenagem (km/km²); L_t = comprimento total dos canais (km); A = área total da bacia hidrográfica (km²).

O índice Coeficiente de manutenção (C_m) é dado pelo inverso da densidade de Drenagem (D_d) e segundo Borsato e Martoni (2004), indica a área de drenagem necessária para sustentar um quilometro de canal, conforme Equação 4.

$$C_m = 1 / D_d \quad (4)$$

Onde: C_m = Coeficiente de manutenção (km^2/km); D_d = Densidade de drenagem (km/km^2).

A densidade hidrográfica (D_h) é a relação existente entre o número de segmentos de canais fluviais e a área da bacia de drenagem, e tem por finalidade comparar a frequência de canais de água existentes em uma área de tamanho padrão, segundo Veríssimo, Novo e Veríssimo (1996), sendo expressa através da Equação 5.

$$D_r = N / A \quad (5)$$

Onde: D_h = densidade hidrográfica (canais/ Km^2); N = número total de cursos d'água (canais); A = área da bacia considerada (Km^2).

3.3 ANÁLISE MORFOMÉTRICA ESPACIAL

O ordenamento dos canais nos cursos d'água na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba foram realizados segundo a hierarquização proposta por Strahler (1964). O índice razão de bifurcação (R_b), proposta por Horton (1932) é determinado com base na ordem hierárquica proposta por Strahler (1964), (N_o) número de segmento de canais pertencentes a esta ordem, e (N_o-1) número de canais pertencentes a uma ordem imediatamente inferior, e posteriormente é utilizado o valor médio, conforme Equação 6.

$$R_b = (N_o) / (N_o-1) \quad (6)$$

Onde: R_b = razão de bifurcação; N_o = número de segmento de canais pertencentes a uma ordem; (N_o-1) número de canais pertencentes a uma ordem imediatamente inferior.

O índice de comprimento médio dos canais é a razão entre o comprimento médio de canais de determinada ordem, pelo comprimento médio de canais de uma ordem imediatamente inferior (Horton 1932), conforme Equação 7.

$$I_{cm} = (L_{mu}) / (L_{mu-1}) \quad (7)$$

Onde: I_{cm} = comprimento médio dos canais; L_{Mu} = relação dos comprimentos médios dos canais de determinada ordem (m); L_{Mu-1} = comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior (m).

A razão entre os dois últimos índices citados, segundo Horton (1932), é utilizada para confirmar a probabilidade de ocorrência de cheias além da planície de inundação, quanto menor esta razão, maior é a probabilidade, Equação 8.

$$I_{cm}/R_b \quad (8)$$

Onde: I_{cm} = comprimento médio dos canais; R_b = razão de bifurcação.

O índice de extensão do percurso fluvial (E_{ps}), calcula a distância média percorrida pelo escoamento superficial entre o interflúvio e o canal permanente e expressa o desenvolvimento hidrológico fisiográfico da bacia, segundo a Equação 9.

$$E_{ps} = D_d \times 0,5 \quad (9)$$

Onde: E_{ps} = extensão do percurso fluvial (km); D_d = densidade de drenagem (km/km²).

O Índice de sinuosidade (I_s) é a relação entre o comprimento do canal principal e a distância do eixo do vale (segmento nascente-exutório) e foi inicialmente proposto por Horton (1945). Esse índice demonstra o grau de divagação de um curso fluvial. Este parâmetro é dado pela Equação 10.

$$I_s = L / d_v \quad (10)$$

Onde: I_s = Índice de sinuosidade; L = comprimento total do canal principal (km); d_v = distância vetorial entre os pontos extremos do canal (km).

3.4 ANÁLISE MORFOMÉTRICA HIPSOMÉTRICA

Na análise morfométrica hipsométrica, procura-se entender a relação da bacia de drenagem com as faixas de altitude. Para isso é necessário estudar os índices gradiente de canais (G_c), coeficiente de massividade (C_{mas}), relação de relevo (R_{rel}), coeficiente de rugosidade (I_{rug}), coeficiente de rugosidade (C_{rug}) e área da integral hipsométrica (A_{ih}).

O índice gradiente de canais (G_c) é expresso em porcentagem na forma de declividade do canal principal, calculado pela Equação 11, através da diferença entre as cotas de montante e jusante dele ($H_{máxc}$), dividido pelo seu comprimento (Hack, 1973).

$$G_c = (H_{máx} / L_{total}) \times 100 \quad (11)$$

Onde: G_c = gradiente de canais (%); $H_{máxc}$ = diferença entre as cotas de montante e jusante (m); L = comprimento do canal principal (m).

O Coeficiente de massividade (Christofolletti, 1974) é a relação da altura média da bacia (H média) a e sua área (A), conforme Equação 12.

$$C_{mas} = H \text{ média} / A \quad (12)$$

Onde: C_{mas} = coeficiente de massividade (km/km²); H média = altura média da bacia (km); A = área da bacia (km²).

A relação de relevo (R_r) estabelece a relação entre a amplitude altimétrica da bacia hidrográfica e o comprimento do canal principal (Schumm, 1956). Este parâmetro é dado pela Equação 13 e pode indicar a capacidade energética dos cursos d'água da bacia hidrográfica.

$$R_r = (\Delta a/L) \times 100 \quad (13)$$

Onde: R_r = relação de relevo (%); Δa = amplitude altimétrica (m); L = comprimento do canal principal (m).

O índice de rugosidade (I_{rug}) é calculado através da Equação 14, ou seja, do produto da amplitude altimétrica do rio principal e a densidade de drenagem, correlacionando as declividades, os comprimentos das vertentes com a densidade de drenagem (Strahler, 1957).

$$I_{rug} = \Delta h_{rp} \times D_d \quad (14)$$

Onde: I_{rug} = índice de rugosidade (m/km²); Δh_{rp} = amplitude altimétrica do rio principal (km); D_d = densidade de drenagem (km/km²).

O cálculo da integral hipsométrica foi realizado através da Equação 15 de Pike e Wilson (1971).

$$A_{hi} = (H_{média} - H_{min}) / (H_{max} - H_{min}) \quad (15)$$

Onde: A_{hi} = área da integral hipsométrica; $H_{média}$ = altitude média da bacia (m); H_{min} e H_{max} = menor e a maior altitude da bacia, respectivamente (m).

3.5 GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS DE FUNDO

Os sedimentos de fundo foram coletados através de um amostrador manual de sedimentos Kajak-Brinkhurst (K-B corer) no dia 26/05/2021. Os sedimentos foram extraídos com êmbolo de polietileno e separados em segmentos de aproximadamente 5 cm. As camadas

extremas, mais próximas à superfície e as mais profundas do sedimento, foram desconsideradas para todas as análises, pois supõe-se que houve mistura mecânica, nos primeiros e últimos centímetros da coluna de sedimento.

As amostras foram enumeradas sequencialmente de cima para baixo e posteriormente encaminhadas ao Laboratório de Ecossistemas Aquáticos e Solos (LEAS) da UNIFAL- MG, campus Poços de Caldas. Após catalogação e separação, as amostras foram encaminhadas à SGS Geosol Laboratórios Ltda na unidade matriz em Vespasiano/MG. Para a realização da análise geoquímica efetuou-se o preparo das amostras (secagem a 105°C, britagem a 3 mm, homogeneização, quarteamento, pulverização de 250 a 300 g em moinho de aço 95% 150 mesh) no laboratório de preparação física de amostras da SGS Geosol Laboratórios.

No laboratório geoquímico da SGS Geosol Laboratórios foram analisados os principais óxidos (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O e P₂O₅), elementos traços e terras raras (Ba, Co, Cs, Ga, Hf, Cr, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Y, Zr, Tl, Zn, Cu, Mo, Ni, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu e Sc). Os principais óxidos, alguns elementos traços (Ba, Cr, Sr, Zn, Zr e V) e H₂O foram determinados por fusão com metaborato de lítio através de espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry – ICP OES). Já os elementos terras raras e outros elementos traços (Co, Cs, Cu, Ga, Hf, Mo, Nb, Ni, Rb, Sn, Sc, Ta, Th, Tl, U, W e Y) foram determinados por fusão com metaborato de lítio através de espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICP MS).

3.6 CONTRIBUIÇÃO GEOGÊNICA E/OU ANTROPOGÊNICA

O Fator de contaminação (FC) avalia o nível de contaminação dos sedimentos e é definido como o quociente entre a concentração do metal no sedimento e o seu nível de concentração natural ou background no sedimento (Hakanson, 1980). O FC é calculado pela Equação 16 e corresponde à poluição durante um período para um dado metal (Loska *et al.*, 1997).

$$CF = [M]_{sed} / M_{ref} \quad (16)$$

Onde: CF = fator de contaminação; [M] sed = concentração do elemento metálico M no sedimento; [M] ref = concentração do mesmo elemento metálico M na referência geoquímica de fundo (camada de deposição mais antiga, que indica as condições menos alteradas do

processo de sedimentação e deposição).

O fator de enriquecimento (FE ou “Enrichment Factor” - EF) é um índice que permite avaliar o enriquecimento de um elemento através da normalização por outro elemento considerado mais estável e imóvel no ambiente. Foi proposto em 1979 por Buat-Menard, segundo Szefer e Skwarzec (1988) e Loska *et al.*, (1997, 2003 e 2004). Para calcular o fator de enriquecimento (FE) na Equação (17) foi usado Sc como o elemento de normalização, uma vez que normalmente exibe um comportamento estável ao longo do tempo.

$$FE = (Mi/Sc) amostra / (Mi/Sc)refe \quad (17)$$

Onde: FE = fator de enriquecimento; (Mi / Sc) amostra é a razão entre a concentração do metal de interesse (Mi) e Sc na amostra de sedimento; (Mi / Sc) ref corresponde à razão entre a concentração do metal de interesse (Mi) e Sc do background geoquímico de referência usados.

Além disso, para avaliar o grau de poluição por metais estudados no reservatório de Retiro Baixo, foi utilizado o índice de geoacumulação (Igeo), introduzido por Müller e Suess (1979) segundo a Equação (18).

$$Igeo = \text{Log}_2 \times [(M)_{sed} / (1,5 \times M_{ref})] \quad (18)$$

Onde: Igeo = índice de geoacumulação; [M] sed = concentração do elemento metálico M no sedimento; [M] ref = concentração do mesmo elemento metálico M na referência geoquímica de fundo (camada de deposição mais antiga, que indica as condições menos alteradas do processo de sedimentação e deposição).

Por fim, para avaliar as contribuições naturais e antropogênicas na amostragem do testemunho de sedimento no curso inferior do reservatório, foi utilizada a abordagem proposta por Shotyk *et al.*, (2000) segundo as Equações (19) e (20).

$$[M]_{lito} = [Sc]_{sed} \times [(M)_{ref} / (Sc)_{ref}] \quad (19)$$

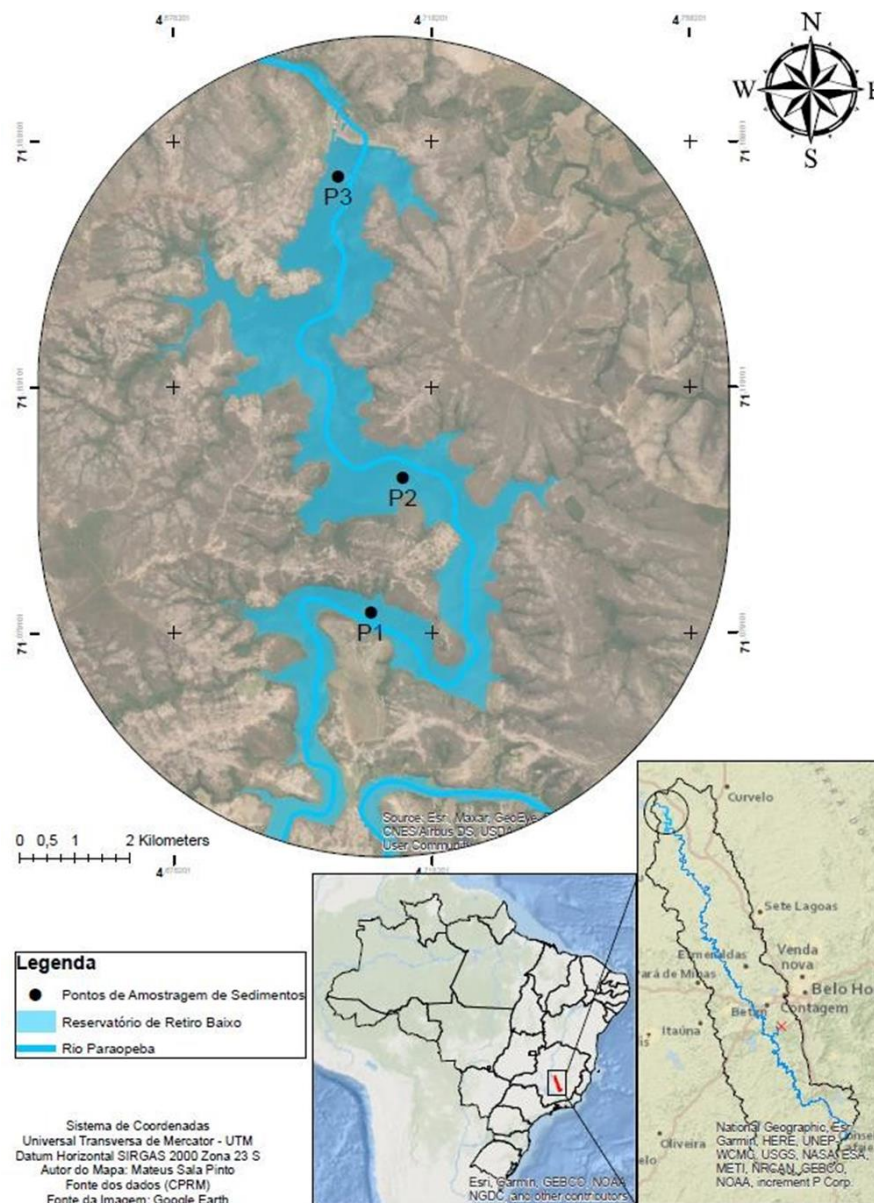
$$[M]_{ant} = [M]_{sed} - [M]_{lit} \quad (20)$$

Onde: [M]lit = concentração natural e/ou litogênica do metal estudado; [M]antr = concentração antropogênica do metal estudado; [Sc] sed = concentração de Sc no sedimento; ([M] ref / [M] lit) = corresponde à razão entre metais e Sc na referência regional litogênica; [M] sed = concentração do metal no sedimento.

4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba possui uma área de 12.054,25 km² ou 5,14% do território da bacia do rio São Francisco. O Reservatório da Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo foi construído entre os anos 1973 e 1981 no baixo curso do Rio Paraopeba abrangendo uma área de 22,58 km² (Figura 2).

Figura 2 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba com os pontos de amostragem no Reservatório de Retiro Baixo



Fonte: O Autor (2024).

A nascente do Rio Paraopeba está localizada ao sul no município de Cristiano Ottoni e sua foz é no Rio São Francisco, cujo trecho está alagado devido o represamento no reservatório de Três Marias, no município de Felixlândia, abrangendo aproximadamente 1.318.885 de

habitantes (CBHSF, 2021). Sua forma é alongada na direção Norte-Sul com quase 300 km de extensão e média de 40 km de largura. Limita-se a leste com o Quadrilátero Ferrífero e a bacia do rio das Velhas, e a oeste com a bacia do rio Pará, finalizando na represa de Três Marias.

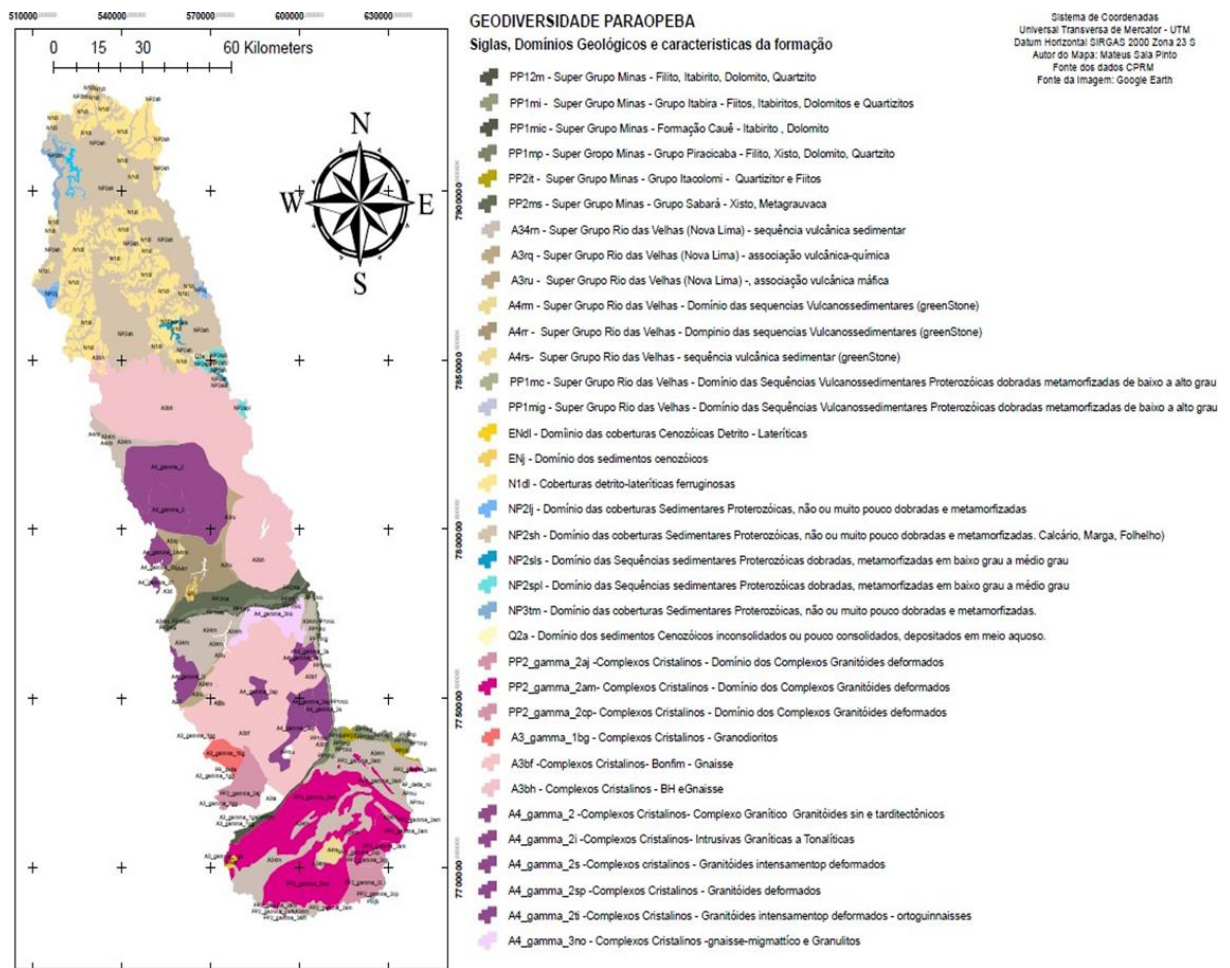
4.1 GEOLOGIA

Inserida na porção meridional do Cráton do São Francisco (Carvalho, 2014), a bacia hidrográfica do rio Paraopeba apresenta o substrato composto de diferentes litologias (Figura 2) associadas a três compartimentos geológicos (CODEMIG, 2019): Embasamento Cristalino e Quadrilátero Ferrífero (alto e médio curso), que apresentam evidências para a extração dos minérios metálicos, e Bacia Intracratônica do São Francisco – Grupo Bambuí (baixo curso), que apresenta rochas calcárias e metapelíticas, litotipos facilmente intemperizáveis, o que pode facilitar o assoreamento (Viglio, 2018).

Segundo CPRM (2001), a região drena terrenos conformados em rochas das Formações Paraopeba e Três Marias, do Grupo Três Marias (Proterozóico Superior), a leste e sudeste, a bacia do médio e alto rio Paraopeba drena a região cárstica da Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí), e rochas granito-gnáissicas dos Complexos Belo Horizonte e Bonfim (Arqueanos) e as unidades dos Supergrupos Minas e Rio das Velhas (Proterozóico Superior e Arqueano, respectivamente).

Os Complexos Belo Horizonte e Bonfim ocupam parte significativa do substrato litológico da área de estudo (Figura 3). O Complexo Belo Horizonte é composto de gnaisses cinzentos, que frequentemente exibem bandamento composicional e feições de migmatização (Chaves, 1996; Perillo, 1998). Em alguns locais são encontrados migmatitos e corpos granitoides. Já o Complexo Bonfim apresenta anfíbolitos, gnaisses, tonalitos, granitos, metadiabásios e diabásios (Teixeira; Canzian, 1994). Os corpos granitoides sin a tardi tectônicos que afloram na área de estudo são representados pelas litologias da Suíte Intrusiva Mato Dentro e o Maciço Granitoide de Maravilhas Cachoeira da Prata. A Suíte Intrusiva engloba corpos granitoides biotíticos de grão grosso. O granito Pará de Minas aflora no alto curso do Ribeirão das Lajes e é uma rocha de grão grosso, pouco foliada e caracterizada por biotita grosseira (Romano, 2007; Tuller *et al*, 2010).

Figura 3 - Mapa domínios Geológicos da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba



Fonte: O Autor (2024)

As rochas do Supergrupo Minas ocupam a parte central da área de estudo, que constitui em termos estruturais a Sinclinal Gandarela. A base do Supergrupo Minas é Grupo Caraça, com metaconglomerados, quartzitos e filitos. Sobre este grupo localiza-se o Grupo Itabira composto, especialmente, por formações ferríferas (Formação Cauê) e por formações carbonáticas (Formação Gandarela). O Grupo Itabira é recoberto pelo Grupo Piracicaba, composto por rochas terrígenas de ambientes deltáticos e plataformais intercaladas com lentes carbonáticas (Alkimim e Marshak, 1998).

O Supergrupo Rio das Velhas compreende rochas metassedimentares xistosas e metavulcânicas (Dorr, 1969). Estas rochas compõem os grupos Nova Lima (base), mais antigo, e Maquiné, mais jovem. Segundo Etter *et al.*, (2003) contato entre os grupos é representado por formações ferríferas bandadas (BIFs), sericita-quartzito xistos variavelmente grafitosos com bancos submétricos de quartzitos piritosos e lentes de metaconglomerados polimíticos com seixos de metachert, BIFs (de fácies óxido com magnetita, carbonato e sulfeto), xistos pelíticos,

máficos e ultramáficos e quartzo de veio em matriz quartzítica xistosa verde com cloritóide, clorita e muscovita, piritita e outros sulfetos detríticos (Féboli *et al.*, 2010).

Situada no Médio e Baixo curso da bacia, encontra-se a cobertura sedimentar detrítica do Neoproterozóico (Supergrupo São Francisco, Grupo Bambuí). No Grupo Bambuí, a Formação Sete Lagoas constitui-se principalmente de calcarenitos finos a médios, cinza escuros a pretos, laminados a maciços, com níveis de siltitos beges, cinza e amarelados (CODEMIG, 2019). É composta por siltitos e folhelhos cinza a cinzaesverdeados, com lentes de calcário cinza escuro. Esta unidade ocorre entre duas formações carbonatadas (Formação Sete Lagoas subjacente e Lagoa do Jacaré sobrejacente).

Outra ocorrência na área (Baixo Paraopeba), são as coberturas detrítico lateríticas e coberturas lateríticas com concreções ferruginosas. São depósitos e solos residuais arenosos, esbranquiçados, com níveis lateríticos localizados em uma grande extensão de área (CODEMIG, 2019). Constitui-se predominante de material proveniente da alteração das rochas subjacentes que não foi transportado. Pode se constituir em depósitos arenosos a argilosos dependendo da rocha que os tiver originado.

As coberturas detrítico lateríticas ferruginosas ocupam uma considerável parte da área de estudo. Sua gênese é resultante da neoformação dos minerais, sendo compostos por hidróxidos de ferro e alumínio, produtos da alteração pedogenética de rochas cristalinas. (Bigarella *et al*, 2007). Segundo Lanza (2012), essas coberturas são produtos da alteração pedogênica de rochas sedimentares e metamórficas. As coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas funcionam como uma couraça, protegendo a superfície da ação erosiva

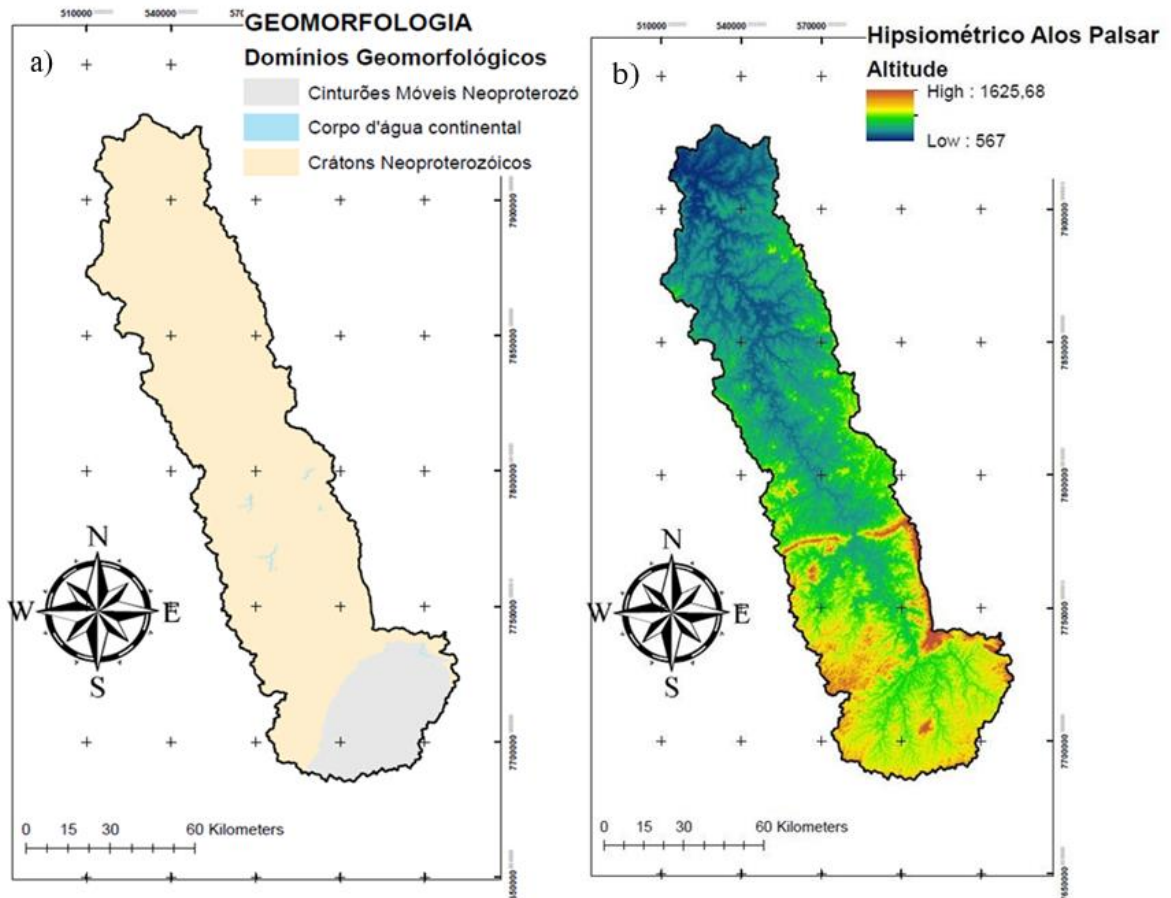
4.2 GEOMORFOLOGIA

As regiões geomorfológicas representam compartimentos inseridos nos conjuntos litomorfoestruturais que, sob a ação dos fatores climáticos pretéritos e atuais, lhes conferem características genéticas comuns, agrupando feições semelhantes, associadas às formações superficiais e às fitofisionomias (IBGE, 2009). As seguintes regiões geomorfológicas estão presentes na bacia hidrográfica do rio Paraopeba (SISEMA, 2021): Depressão do São Francisco; Planalto Centro-Sul Mineiro; Planaltos do Leste de Minas; e Quadrilátero Ferrífero.

O relevo da bacia (Figura 4) é caracterizado por planaltos, depressões e áreas dissecadas resultantes predominantemente da alternância de atuação de processos morfoclimáticos associados ao condicionamento geológico (Durães, 2010). As unidades geomorfológicas existentes são: Planalto Dissecado do Centro-Sul e Leste de Minas, Depressão São Franciscana, Planalto do São Francisco e Quadrilátero Ferrífero (Durães, 2010). O relevo é caracterizado

pela presença de montes arredondados com dois principais conjuntos de topografia acidentada e elevada, e de topografia plana ou levemente ondulada (FEAM, 2011).

Figura 4 – Mapas (geomorfológico e hipsométrico) da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba



Fonte: O Autor (2024)

Legenda: a) Mapa Geomorfológico da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba

b) Mapa Hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba

A região Depressão do São Francisco é predominante no Baixo Paraopeba. Na área do Planalto Atlântico, é possível distinguir formas de relevo bem definidas e numerosas subdivisões, entre elas o Planalto Centro-Sul Mineiro, que é mais representativo no Médio Paraopeba, mas também está presente no Alto Paraopeba junto aos Planaltos do Leste de Minas (Baptista *et al.*, 2010).

A declividade da área mapeada é composta principalmente por segmentos de relevo plano (54,72 %), suave ondulado (39,04%), ondulado (6,07%) e fortemente ondulado (0,17%). As áreas mais declivosas coincidem com as áreas mais elevadas e, principalmente, com o CGGM (Complexo Granítico - Gnáissico – Migmatítico), conforme Figuras 2 e 3.

4.3 CLIMA

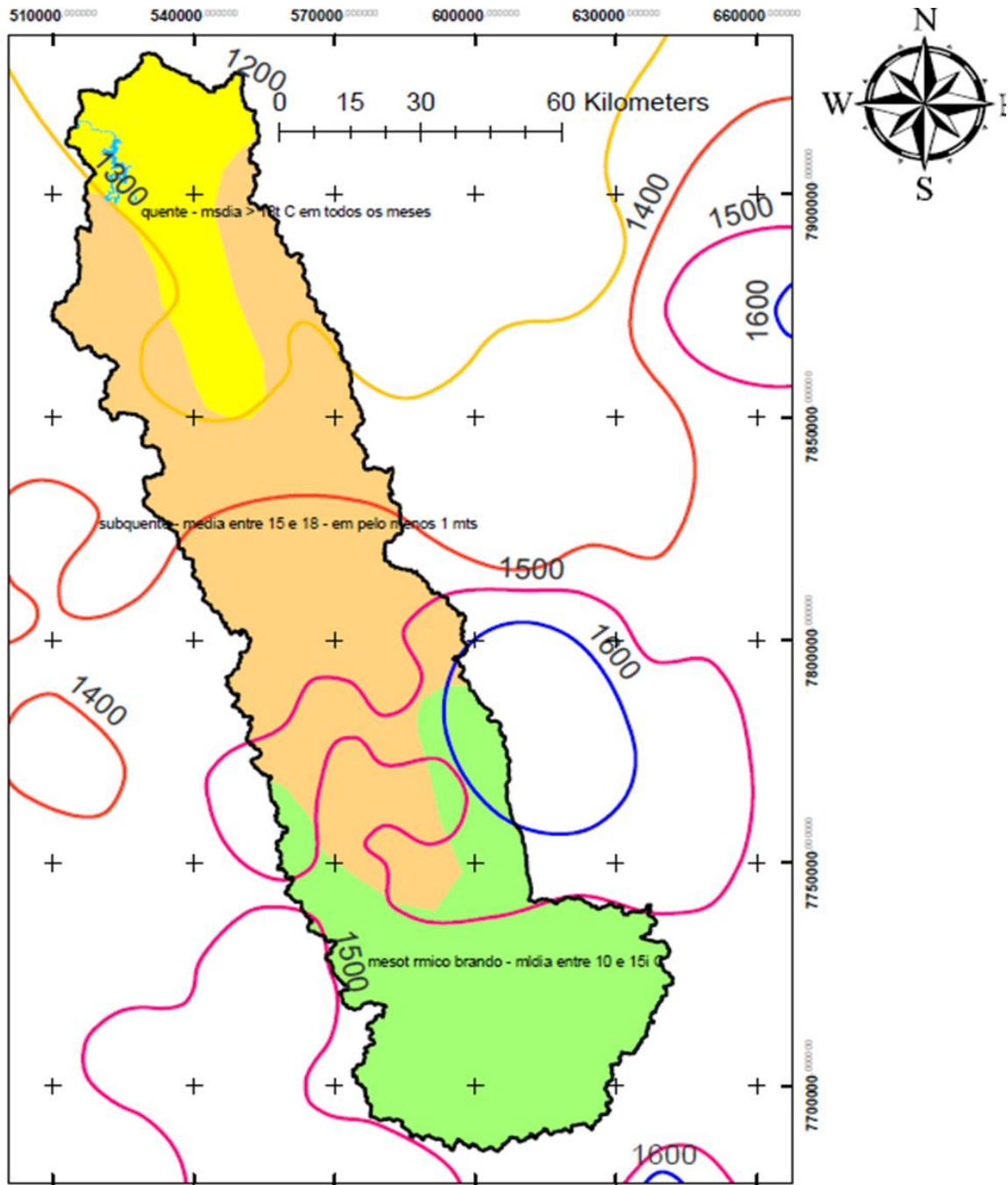
A bacia apresenta temperatura média anual variando entre 19 e 23°C, sendo as menores temperaturas encontradas na porção sul devido à orografia e maiores latitudes, ocorrendo um aumento da temperatura à medida que se alcançam latitudes mais baixas (CPRM, 2001). Segundo FEAM (2011), o clima característico é o tropical de altitude cujos verões são brandos e temperaturas mais amenas, inferiores a 20°C, no mês mais quente, as temperaturas médias variam de 20°C a 25°C e no mês mais frio, as temperaturas variam entre 15°C e 20°C.

De acordo com Nimer (1979), o clima da região é caracterizado como tropical de altitude (tipo CWa segundo a Classificação de Köppen), geralmente quente com regime pluviométrico, marcado por duas estações distintas uma seca e outra chuvosa. O período chuvoso é o de reposição e excedente entre os meses de outubro e março, com registro dos maiores valores de precipitação, sobretudo, em dezembro, 309,2 mm e 256,7 mm, em Florestal e Sete Lagoas, respectivamente (Figura 5). O segundo período (seco), perdura entre os meses de abril a setembro, no qual se observa os menores valores registrados, 13,1 mm em Florestal e 7,8 mm em Sete Lagoas. Os totais anuais se diferem nas duas estações meteorológicas, sendo totalizado em Florestal 1.426,8 mm e em Sete Lagoas 1.271,9 mm (Nimer, 1979).

4.4 PEDOLOGIA E USO DA TERRA

Segundo Durães (2010), na bacia do Rio Paraopeba afloram Argissolos, Cambissolos, Latossolos e Neossolos Litólicos. As classes mais presentes são Cambissolo Háptico distrófico e o Latossolo vermelho-amarelo distrófico (Figura 6). Cambissolos apresentam baixa fertilidade, pequena profundidade e a ocorrência de pedras na massa do solo, enquanto Latossolos são profundos e bem drenados e os principais impedimentos ao aproveitamento são a baixa fertilidade e a presença de alumínio tóxico para as plantas (Amaral *et al.*, 2004).

Figura 5 - Regime pluviométrico e clima da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba



Isoietas de precipitação média anual Clima

Milímetros de chuva (mm)

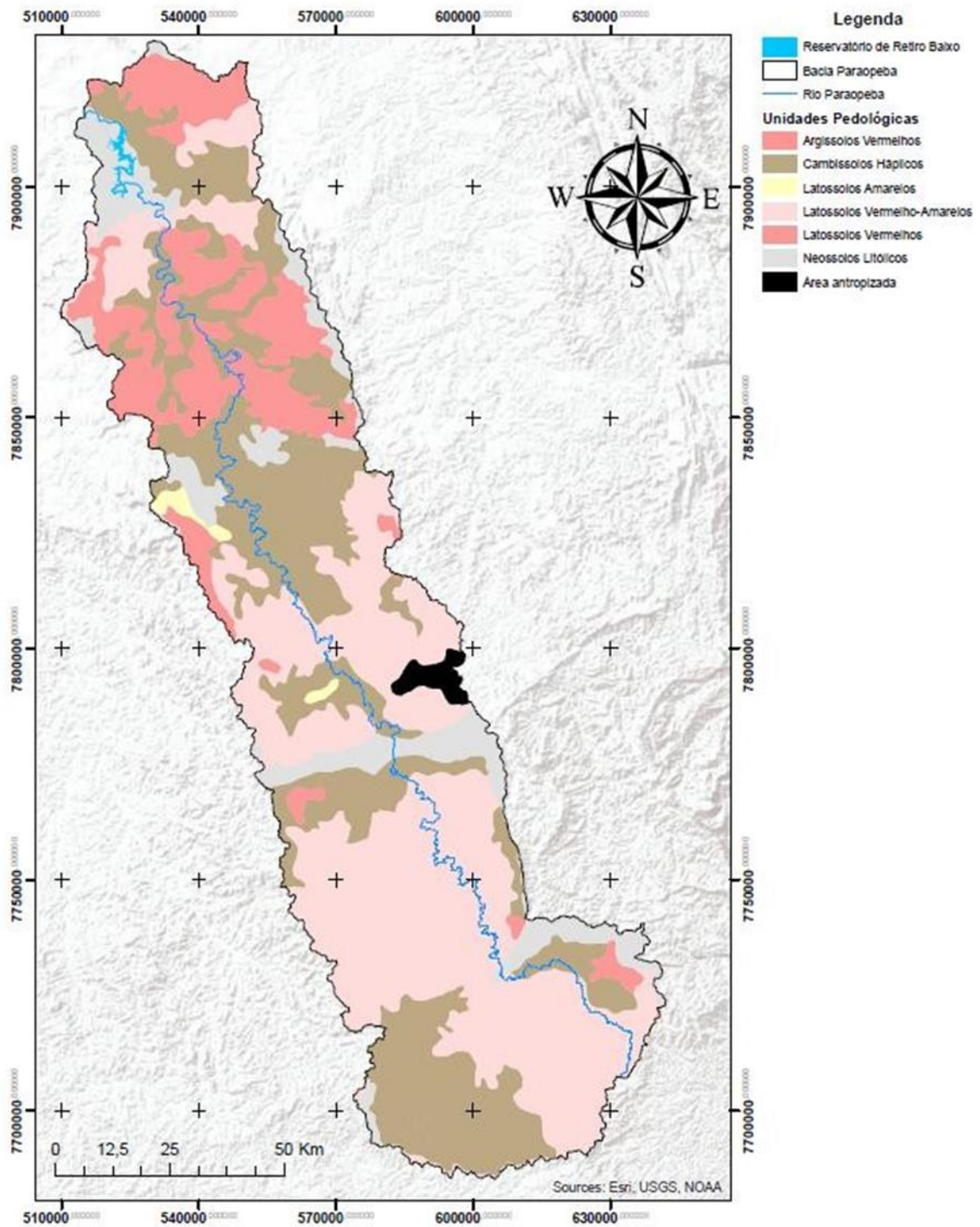
- 1300
- 1400
- 1500
- 1600

Zona climática

- Tropical Brasil central mesotérmico
- Tropical Brasil central quente
- Tropical Brasil central subquente

Fonte: O Autor (2024).

Figura 6 - Mapa pedológico da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba



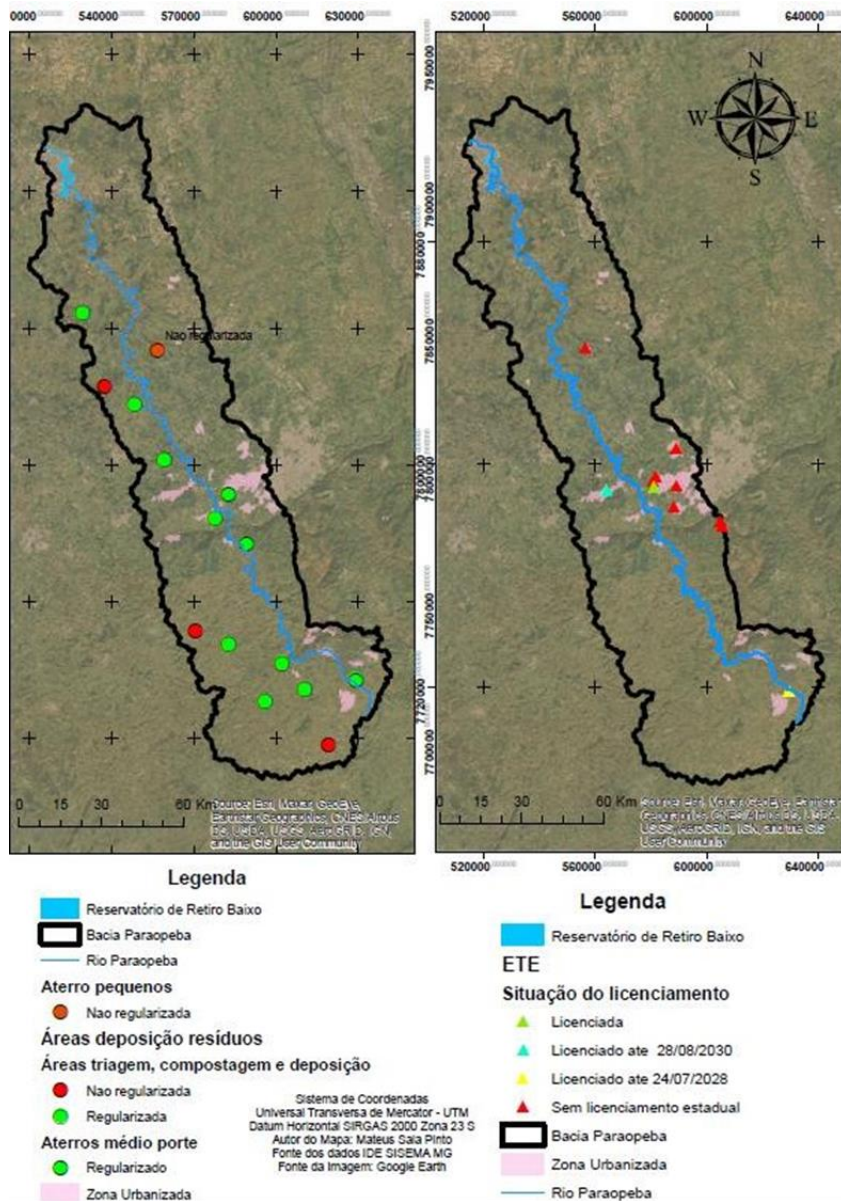
Sistema de Coordenadas
 Universal Transversa de Mercator - UTM
 Datum Horizontal SIRGAS 2000 Zona 23 S
 Autor do Mapa: Mateus Sala Pinto
 Fonte dos dados (CPRM)
 Fonte da Imagem: Google Earth

Fonte: O Autor (2024).

No Médio Paraopeba também se destacam Argissolos Vermelho-Amarelo distróficos

que apresentam uma mistura dos óxidos de ferro. As principais restrições para uso estão relacionadas à fertilidade e susceptibilidade à erosão (Amaral et al., 2004). Quanto ao uso da terra, a região da bacia (Figuras 7, 8 e 9) é marcada por exploração agrícola, pastagens, ocupação urbana, áreas de cerrado e mata nativa, uma pequena extensão de plantio de eucalipto e extensa área de solo exposto (Durães, 2010). As principais atividades econômicas são a mineração, siderurgia, indústrias dos ramos metalúrgico, automobilístico e petroquímico, agropecuária e, as atividades minerárias são desenvolvidas ao longo de toda a bacia (FEAM, 2011).

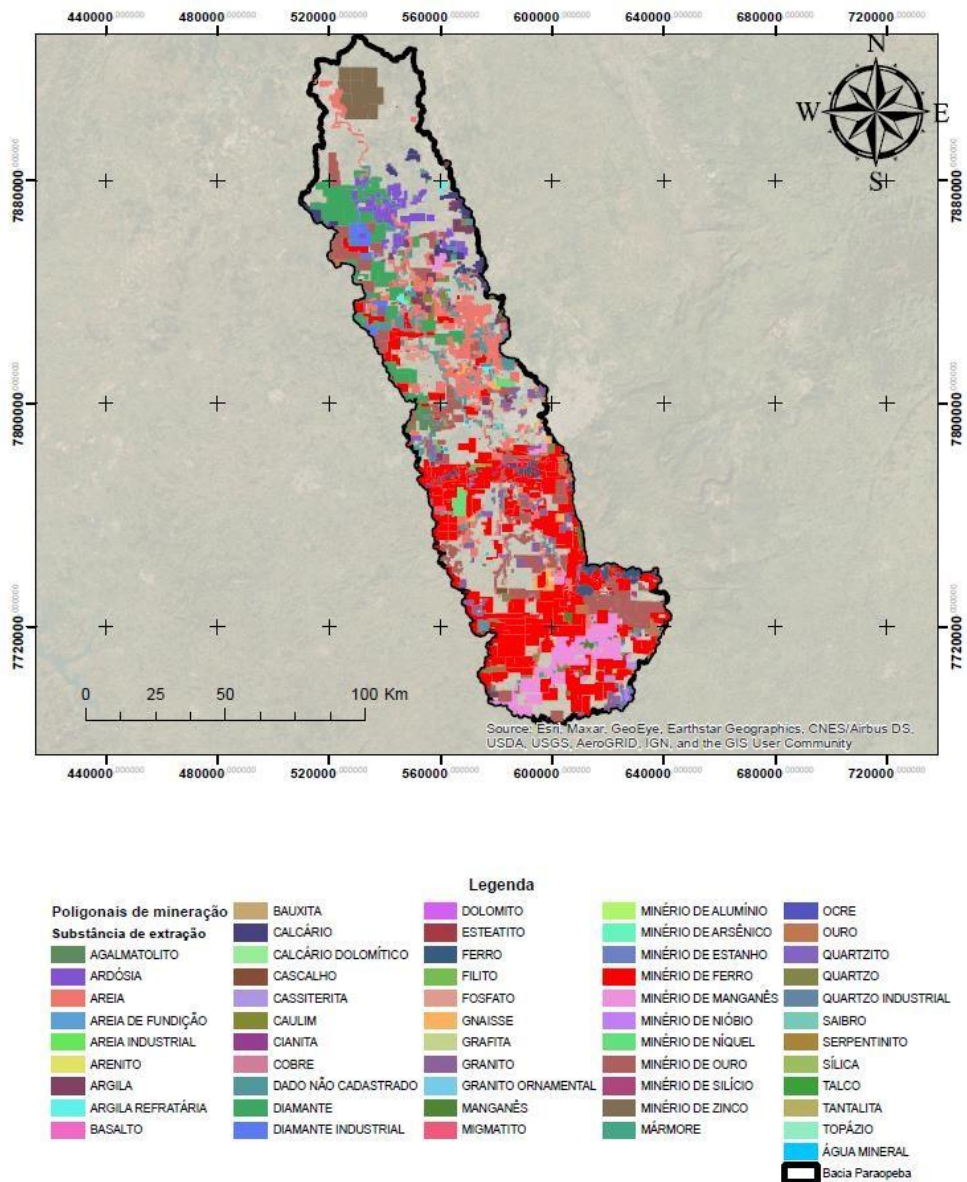
Figura 7 - Mapa de regiões urbanas, estações de tratamento de esgoto e áreas de deposição de resíduos



Fonte: O Autor (2024).

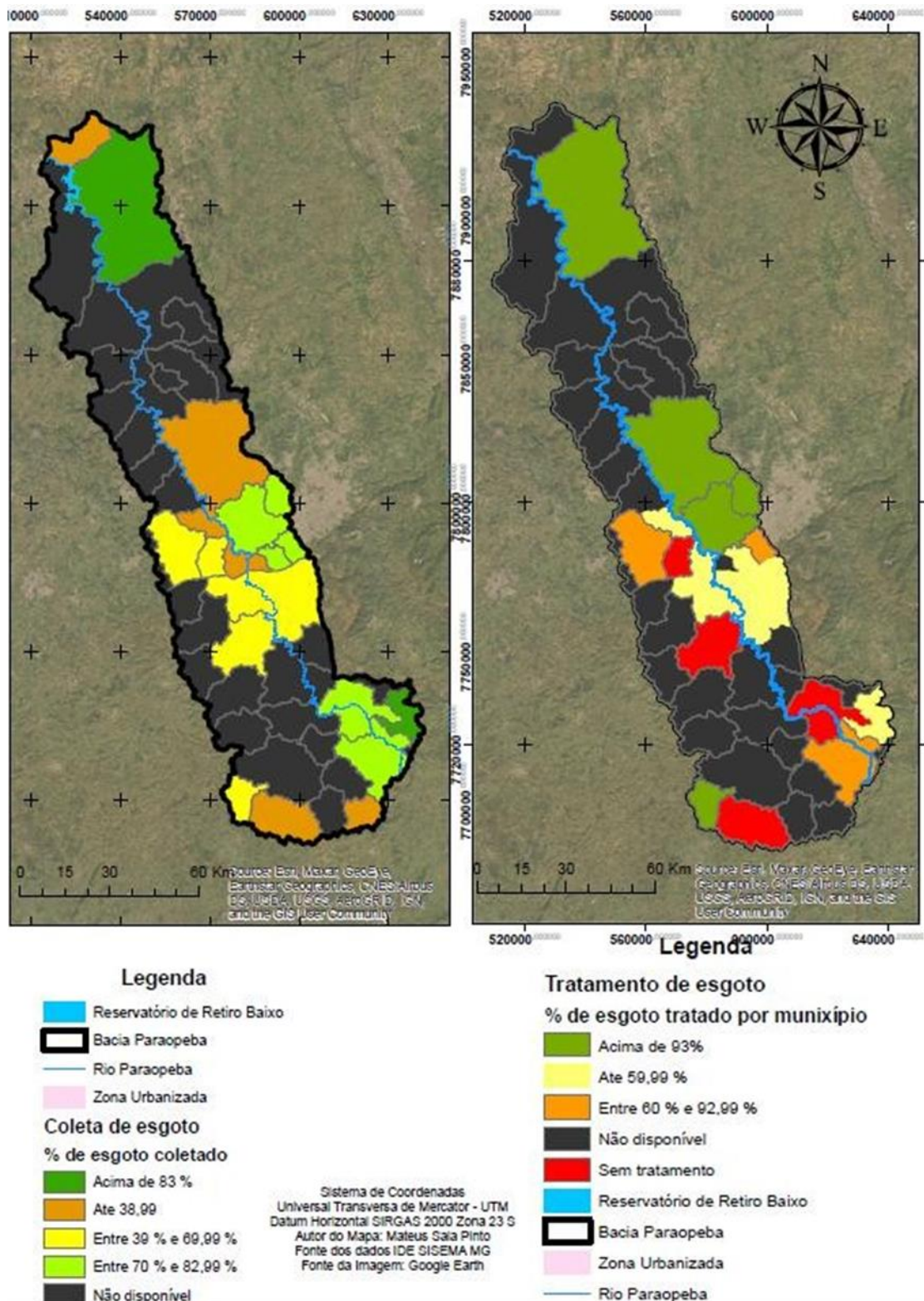
O potencial industrial está ligado à proximidade com a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) destacando-se os municípios de Conselheiro Lafaiete, Ouro Branco, Congonhas, Sarzedo, Ibirité e, principalmente, em Contagem e Betim, onde reside a maior parte da população da bacia (IBGE 2020; SISEMA, 2021). O crescimento urbano, atrelado a exploração mineral, industrial e pecuária nas regiões metropolitanas e cidades de médio e pequeno porte também contribuem para o atual uso e exploração da terra (Figuras 8 e 9).

Figura 8 - Poligonais minerárias cadastradas na bacia, por substância.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 9 - Mapa da situação da coleta e tratamento de esgoto dos municípios da bacia do rio Paraopeba



Fonte: O Autor (2024).

5 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA DO RIO PARAOPEBA

5.1 ANÁLISE MORFOMÉTRICA LINEAR

A bacia hidrográfica do Rio Paraopeba drena uma área total de 12.040,41 km² em um perímetro de 884,5 Km, totalizando aproximadamente 24 mil km de extensão fluvial. A forma da bacia, segundo o método de Lima (2002) é compreendido pela figura geométrica na qual a área da bacia pode ser circunscrita, neste caso, a forma da bacia como um todo se aproxima mais de uma área retangular, apresentando comprimento médio de 259,24 km e comprimento pela área de 0,021 km (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise morfométrica linear e de forma da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (Alto, Médio e Baixo respectivamente)

Alto Paraopeba									
Área	P	Forma	Lb	Lb/A	Rtex	Ic	Dd	Cm	Dh
(km ²)	(km)		(km)	(km)	(NT/km)		(km/km ²)	(km ² /km)	(n ^o canais km ²)
3732,8	377,1	Quadrangular	78,4	0,02	23,47	0,3	2,32	0,43	5,02
Médio Paraopeba									
Área	P	Forma	Lb	Lb/A	Rtex	Ic	Dd	Cm	Dh
(km ²)	(km)		(km)	(km)	(NT/km)		(km/km ²)	(km ² /km)	(n ^o canais km ²)
5073,6	489,1	Retangular	127	0,02	24,41	0,3	2,4	0,41	4,74
Baixo Paraopeba									
Área	P	Forma	Lb	Lb/A	Rtex	Ic	Dd	Cm	Dh
(km ²)	(km)		(km)	(km)	(NT/km)		(km/km ²)	(km ² /km)	(n ^o canais km ²)
3234,1	489,1	Retangular	89,4	0,03	3,92	0,3	0,93	1,07	0,99

Fonte: O Autor (2024).

Legenda: P = perímetro; Lb = Comprimento da bacia; A = área; Rtex = razão de textura; Ic = índice de circularidade; Dd = densidade de drenagem; Cm = coeficiente de manutenção; Dh = densidade hidrográfica.

A razão de textura (Rtex) permite inferir qualitativamente a capacidade de infiltração da água e o escoamento superficial, além de contribuir juntamente com outros índices como a densidade de drenagem e a declividade média (Vieira; Camargo, 1991). Segundo França (1968), a razão de textura pode ser classificada da seguinte forma: valores menores que 2,5, grosseira, entre 2,5 e 6,2 são médias e acima de 6,2 como fina. O valor encontrado para o alto, médio e baixo cursos da bacia do Rio Paraopeba são de 23,47; 24,41 e 3,92, respectivamente. Ou seja, este número representa a quantidade canais de primeira ordem para cada quilômetro de perímetro de bacia (Tabela 2). Baixos valores de razão de textura (Rtex) geralmente podem

estar associados a regiões de rochas permeáveis, o que pode facilitar a infiltração de água no solo, diminuindo o escoamento superficial (Tonello *et al.*, 2006). Logo na bacia processos de formação de escoamento superficial são predominantes no alto e médio curso e estão associados a baixa capacidade de infiltração dos solos, contudo o oposto é observado no baixo curso da bacia, onde os processos de infiltração de água são favorecidos devido a granulometria média das rochas que compõem a área, segundo classificação de França (1968).

O Índice de circularidade (I_c), segundo (Alves; Castro; Lana, 2001), quanto mais próximo de 1, mais próxima da forma circular será a bacia hidrográfica e valores menores que 0,51 indicam um escoamento superficial contínuo com baixa propensão a inundação. Os valores encontrados para a bacia do rio Paraopeba são de 0,32; 0,26 e 0,25 (Alto, Médio e Baixo, respectivamente); que remete a níveis de escoamento alto, devido a forma alongada da bacia, que tendem a ser menos suscetíveis a grandes cheias (Tabela 2).

A densidade de drenagem (D_d) representa o comportamento hidrológico de determinada área ou sua capacidade de gerar novos cursos de água. Em um mesmo ambiente climático, a densidade de drenagem é um parâmetro que está relacionado ao comportamento hidrológico das rochas, rochas mais impermeáveis facilitam o escoamento superficial e possibilitam a formação de mais canais, aumentando a densidade de drenagem, por outro lado, rochas porosas facilitam a infiltração da água e podem provocar a diminuição do número de canais e, conseqüentemente, da densidade de drenagem (Christofolletti, 1980).

De acordo com Villela e Mattos (1975) a densidade de drenagem pode variar de 0,5 Km/Km² para bacias com pouca drenagem, e valores acima de 3,5 Km/Km² para bacias excepcionalmente bem drenadas. Em síntese, os valores encontrados (2,32; 2,40 e 0,93) de D_d , para o Alto, Médio e Baixo Paraopeba respectivamente, indicam favorecimento ao escoamento superficial no alto e médio curso, e conseqüentemente a formação de mais cursos d'água, em contrapartida, no Baixo Paraopeba o valor é menor, o que indica uma maior capacidade de infiltração e conseqüentemente, menor capacidade de geração de cursos d'água por unidade de área. Logo, a interpretação desde índice sugere que no alto e médio curso da bacia há maior tendência de processos de erosão mecânica, segundo Beltrame (1994).

Para o coeficiente de manutenção (C_m) conforme (Alves; Castro; Lana, 2001) os valores de referência oscilam entre 2 km²/km para altos índices e 0,3 km²/Km para baixos índices de capacidade de manutenção de canais. Este índice indica que à medida que vai aumentando a dissecação do relevo, vai diminuindo a área disponível para o entalhamento de novos canais, ou seja, o coeficiente de manutenção indica a área média que permanece isenta de entalhes (Campanharo, 2010). Os valores encontrados para a bacia do rio Paraopeba são: de 0,43; 0,41

e 1,07 km²/km (Alto, Médio e Baixo Paraopeba). Estes valores indicam que no Alto e Médio Paraopeba é exigida uma menor área para que o canal de drenagem possa se implementar e desenvolver, por outro lado, no Baixo Paraopeba este valor é maior, indicando que o relevo está em um estado mais avançado de dissecação no Alto-Médio curso, quando comparado com o Baixo (Tabela 2).

Quanto a densidade hidrográfica (Dh), a bacia do Rio Paraopeba apresenta 4,79 canais para cada km² de bacia no Alto Paraopeba; 4,74 canais para cada km² no Médio Paraopeba; e 0,99 canais por km² no Baixo Paraopeba. Segundo classificação de Lollo (1995) estes valores são interpretados como média capacidade de geração de novos rios no Alto e Médio Curso, e baixa capacidade para o Baixo Curso da bacia, e segundo Strahler (1957) e Christofolletti (1979) essa classificação apresenta sistema de drenagem do tipo dendrítica, onde a bacia de escoamento se assemelha a uma árvore (Tabela 2).

5.2 ANÁLISE MORFOMÉTRICA ESPACIAL

Foram identificados 45.690 segmentos de canais de curso d'água na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba em um ordenamento 8 segundo a hierarquização proposta por Strahler (1964). Para o índice de bifurcação (Rb), Strahler (1952) encontrou valores para áreas de relevo rebaixado igual a 3,55; Horton (1945) de 2,27 para superfícies aplainadas e Castro e Carvalho (2009) valores abaixo de 2,0 para relevos colinosos. Os valores encontrados para o Alto, Médio e Baixo Paraopeba são de 0,58; 0,60 e 0,64, indicando que a bacia se encontra em regiões moderado nível de dissecação e situada área de relevo colinoso (Tabela 3).

Segundo Bertolini e Deodoro (2018) relevos muito dissecados são constituídos de vales profundos ou incisos e topos pouco largos. Considerando as características fisiográficas, principalmente no que se refere ao Cráton São Francisco, o resultado encontrado pode estar relacionado as características de regiões cratônicas, que são porções da litosfera continental de longa estabilidade e resistência mecânica, formada por relevos colinosos, planaltos com baixas altitudes e algumas depressões. A 1ª Lei de Horton (1945) estabelece que o número de canais das várias ordens que constitui uma bacia de drenagem segue aproximadamente uma série geométrica inversa, na qual o 1º termo da sequência é a 1ª ordem. Dessa forma, a premissa apresentada conclui que o número de canais de uma dada bacia decresce das ordens inferiores para as superiores. Não foi observado este comportamento quando analisamos a quantidade de segmentos de cursos d'água de ordem 8, que é ligeiramente superior a quantidades para rios de ordem 7.

Tabela 3 - Análise morfométrica espacial da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba

Curso	N	O	Rb	Icm	Icm/Rb	L (km)	Eps (km)	Is
Alto	18607	8	0,58	0,56	0,96	89,38	1,16	2,93
Médio	23897	8	0,6	0,59	0,98	230,66	1,2	1,15
Baixo	3186	8	0,64	0,66	1,03	168,79	0,46	2,45

Fonte: O Autor (2024).

Legenda: N = Número de segmentos de canais encontrados na bacia; O = Ordem da bacia hidrográfica; Rb = Índice razão de bifurcação; Icm = Índice de comprimento médio dos canais; L = Comprimento do rio principal ; Eps = Índice de extensão do percurso fluvial ; Is = Índice de sinuosidade.

A análise do índice de comprimento médio de canais (Icm), cujos valores encontrados são de 0,56; 0,59 e 0,66, para o Alto, Médio e Baixo Paraopeba, respectivamente, demonstra uma irregularidade na concentração das extensões dos cursos d'água, possuindo uma extensão nos comprimentos de forma diferente que sugere a Lei dos comprimentos de Horton (1932). A 2ª Lei de Horton (1945) determina que o comprimento médio dos canais das várias ordens que compõe uma bacia hidrográfica segue aproximadamente uma série geométrica direta, onde, o comprimento tende a ser maior nas ordens superiores (próximos a foz), em relação aos canais de ordens inferiores (próximos às nascentes).

Esse comportamento é observado somente quando analisamos os canais de ordem 7 e 8 no Baixo Paraopeba. Sendo assim, é razoável considerar que o entalhamento de novos cursos d'água é predominantemente mais acentuado nas áreas próximas as nascentes, e nos altos topográficos, e ainda, de forma geral a capacidade de infiltração do substrato geológico é maior nas áreas próximas a foz do rio principal e nos baixos topográficos, fazendo com que a extensão dos rios de ordem superior seja menor.

A razão entre o índice de comprimento médio dos canais os o índice de bifurcação é utilizado para confirmar a probabilidade de ocorrência de cheias além da planície de inundação, quanto menor esta razão, maior é a probabilidade, segundo Strahler (1952). Os valores próximos a 1 encontrados nas sub-bacias sugerem baixa probabilidade de ocorrência de eventos de cheia além da planície de inundação.

O curso principal do rio Paraopeba possui um comprimento de 488,83 km, e o desenvolvimento hidrológico fisiográfico da bacia, calculado pelos índices de extensão médio do percurso fluvial (Eps) de 1,16; 1,2 e 0,46 km (Alto, Médio e Baixo Paraopeba respectivamente) indica a distância média percorrida pelo escoamento superficial entre os interflúvios e os canais permanentes (pontos de concentração) dos canais (Tabela 3).

Para o Índice de sinuosidade (Is) os valores próximos de 1 indicam canais mais retilíneos, nos quais o controle estrutural pode ser significativo ou pode haver alta capacidade

energética, acima de 2 canais mais tortuosos, com menor capacidade energética, e intermediários (entre 1 e 2) canais em estágio transicional entre rios retilíneos e sinuosos (Alves e Castro, 2003). Segundo Christofolletti (1980), o valor 1,5 representa o limite inferior para determinar que um curso fluvial é meandrante. O valor encontrado para a bacia do rio Paraopeba foi de 2,04 (Tabela 3).

Em geral, quanto mais retilíneo for o canal, maior a relação largura/ profundidade, canais tortuosos são mais estreitos e profundos (baixa proporção largura/profundidade) além de possuírem maior porcentagem de silte e argila no perímetro e nas margens, embora esta porcentagem não seja requisito para que um rio seja sinuoso (Schumm, 1963). Segundo Schumm (1963) em rios retilíneos a carga de fundo torna-se constituída exclusivamente de material grosso, e em relação vazão e sinuosidade, em geral, quanto maior a vazão, maior a carga em suspensão e maior a porcentagem de silte e argila, portanto maior a sinuosidade e menor a relação largura-profundidade.

Sob condições de clima úmido, há maior carga em suspensão e maior porcentagem de silte e argila (resultante do forte intemperismo), associada à maior vazão que leva à formação de rios meandantes com elevada sinuosidade; ao passo que, sob condições de clima árido/semiárido, a menor vazão e maior quantidade de material grosso na carga de fundo e menor carga em suspensão leva à dominância de rios retilíneos ou até entrelaçados (Schumm, 1963; Boyd e Schumm, 1995; Ouchi, 1985). Os valores encontrados para o Rio Paraopeba (Alto, Médio e Baixo) são de 2,93; 2,15 e 2,45; indicam que o canal principal do rio Paraopeba é tortuoso, possuindo baixo gradiente, favorecendo prioritariamente o transporte (carga em suspensão) da granulometria mais fina (silte e argila).

Essa característica, está associada a dificuldade que o substrato geológico oferece ao entalhamento dos canais, relevo e geomorfologia e, também as condições de clima úmido que, sob condições de escoamento de altas vazões contribui para formação de rios tortuosos da bacia do Rio Paraopeba. No Alto Paraopeba o índice assume o maior valor para a bacia, isso se deve ao alto grau de deflexão que o canal principal sofre na região de Congonhas, onde há o contato com os litotipos Domínio dos Complexos Granitoides deformados e Domínio das Sequências Vulcano sedimentares tipo Greenstone Belt.

5.3 ANÁLISE MORFOMÉTRICA HIPSOMÉTRICA

Na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba, a altitude média é de 772 m acima do nível do mar, variando entre 567 e 1625 m, resultando em uma amplitude altimétrica de 1058 m. O

gradiente de canais (G_c) para o rio Paraopeba é de 0,0913% (considerando desde a nascente até o exultório). Alves e Castro (2003) em estudo na bacia do Rio do Tanque (Minas Gerais) assumem como declividade baixa valor para o $G_c = 0,012\%$. Devido a heterogeneidade e variação das características do relevo e a extensão do curso d'água principal, os valores foram relativamente baixos, no entanto, quando calculados para o Alto Paraopeba o gradiente de canais (G_c) é de 0,21%, no Médio 0,045% e no Baixo 0,049%. Na cabeceira da bacia as maiores declividades imprimem maiores velocidades ao escoamento superficial, e nessas regiões o potencial erosivo é maior que no médio e baixo curso da bacia, que por sua vez, são regiões predominantemente de transporte e sedimentação (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise morfométrica hipsométrica da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba

Alto Paraopeba				
Gc	Cmas	Rrel	Irug	Aih
(%)	(km/km ²)	(%)	(m/km)	
0,21%	0,0002	0,96	447,8	0,17
Médio Paraopeba				
Gc	Cmas	Rrel	Irug	Aih
(%)	(km/km ²)	(%)	(m/km)	
0,044	0,0001	0,38	244,81	0,07
Baixo Paraopeba				
Gc	Cmas	Rrel	Irug	Aih
(%)	(km/km ²)	(%)	(m/km)	
0,049	0,0002	0,28	77,42	0,15

Fonte: O Autor (2024).

Legenda: G_c = Gradiente de canais em %; C_{mas} = Coeficiente de massividade; R_{rel} = Relação de relevo; I_{rug} = Índice de rugosidade; C_{rug} = Coeficiente de rugosidade; A_{ih} = Área da integral hipsométrica.

O Coeficiente de Massividade (C_{mas}) busca caracterizar a bacia quanto a distribuição de terras baixas e altas, de modo que índices inferiores a 0,5 correspondem a bacias com distribuição maior de terras baixas (Borsato, 2005). Como o coeficiente de Massividade define o estágio de evolução do relevo uma área de drenagem, e devido à grande extensão da área da bacia, o coeficiente em questão assumiu baixos valores, indicando que a maior parte de bacia está localizada em terrenos em estágio de equilíbrio (Tabela 4).

A razão de relevo encontrada para a bacia do rio Paraopeba é de 0,96 % para o Alto curso, 0,38 % para o Médio curso e 0,28 % para o Baixo curso. Os valores são considerados altos para o a Alto e Médio curso da bacia, e médio para o baixo Paraopeba (Piedade, 1980). A nascente do curso d'água principal do rio Paraopeba se encontra a uma altitude de aproximadamente 1050 m, no alto-médio curso há elevações próximas a 1630 m, enquanto no

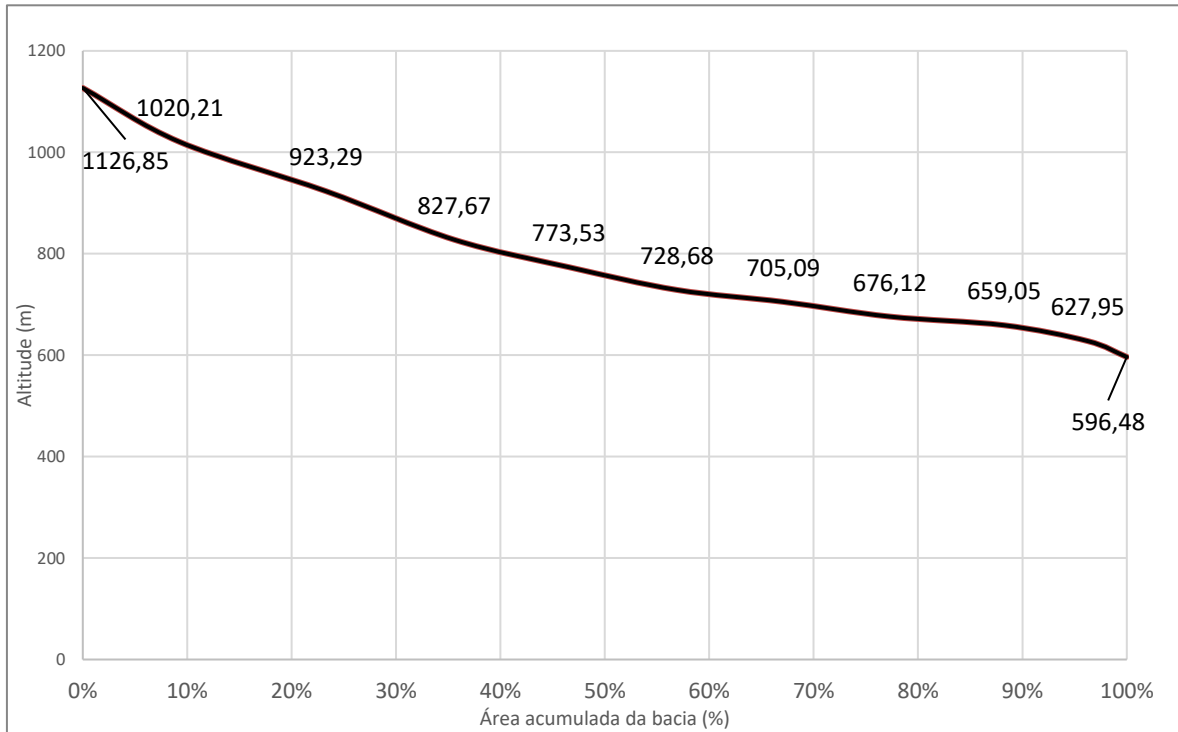
baixo curso 600 m. Essas características geram uma amplitude altimétrica que influenciam na razão de relevo, influenciada por áreas de morros (relevo irregular) próximas a nascente e no alto-médio curso, a qual vai se abrandando até a foz, onde o relevo é mais plano.

Valores altos para o índice de rugosidade (Irug) de acordo com Strahler (1957), implicam em vertentes íngremes e longas. Para uma correta interpretação deste índice é necessário observar conjuntamente os valores da amplitude altimétrica e densidade de drenagem. O valor encontrado foi de 447,80 para o Alto curso; 244,81 para o Médio e 77,42 para o Baixo Paraopeba. Devido à grande extensão de seus percursos fluviais, grande amplitude altimétrica e ao relevo onde predomina a paisagem de mares de morros (localizados nas partes altas ou cabeceiras da bacia), os valores para o índice são maiores no Alto Paraopeba, e vão diminuindo conforme avançamos para sua foz, onde as vertentes são aplainadas.

A curva hipsométrica tem como finalidade, segundo Chistofolletti (1980), entender a maneira pelo qual o volume rochoso abaixo da superfície topográfica está distribuído desde a base até o topo. Uma integral de 60% indica que a erosão removeu 40% do volume de massa da bacia entre planos de referência passando pelo divisor e a foz (Schumm, 1956). Quando se atinge a maturidade, as curvas tendem a estabilizar entre integrais de 40 e 60%, as quais marcam o ponto inicial do estágio de equilíbrio de desenvolvimento da bacia hidrográfica (Strahler, 1952; Schumm, 1956). Portanto, valores elevados (entre 100 e 60%) indicam topografia relativamente jovem sob controle tectônico ativo, ao passo que valores baixos remetem a avançado e longo processo de denudação de bacias ou paisagens mais antigas, raramente sob influência de deformação recente (Strahler, 1952; Schumm, 1956; Cheng *et al.*, 2018).

A curva hipsométrica gerada a partir dos dados de elevação, e área acumulada da bacia resultou em uma área da integral hipsométrica (Aih) de 17,41%, 7,23% e 15,25% (Alto, Médio e Baixo Paraopeba - Tabela 4) revelando a característica de uma bacia madura em avançado e longo processo de denudação com paisagens mais antigas, raramente sob influência de deformação recente (Figura 10). A tendência da curva sigmoide da Figura 10, intercalada por partes convexas e côncavas, indicam a evolução geomórfica em diferentes estágios, desde sua nascente até a sua foz. Estas tendências podem estar relacionadas, segundo Sinha-Roy (2002), a processos de denudação difusos (movimentos de massa e erosão areolar - concavidade para baixo no setor da cabeceira), ou a processos combinados de denudação difusa e linear (concavidade para baixo no setor da foz). No entanto, o clima, a litologia e a estrutura também podem influenciar nos processos fluviais e conseqüentemente a curva hipsométrica da bacia do rio Paraopeba.

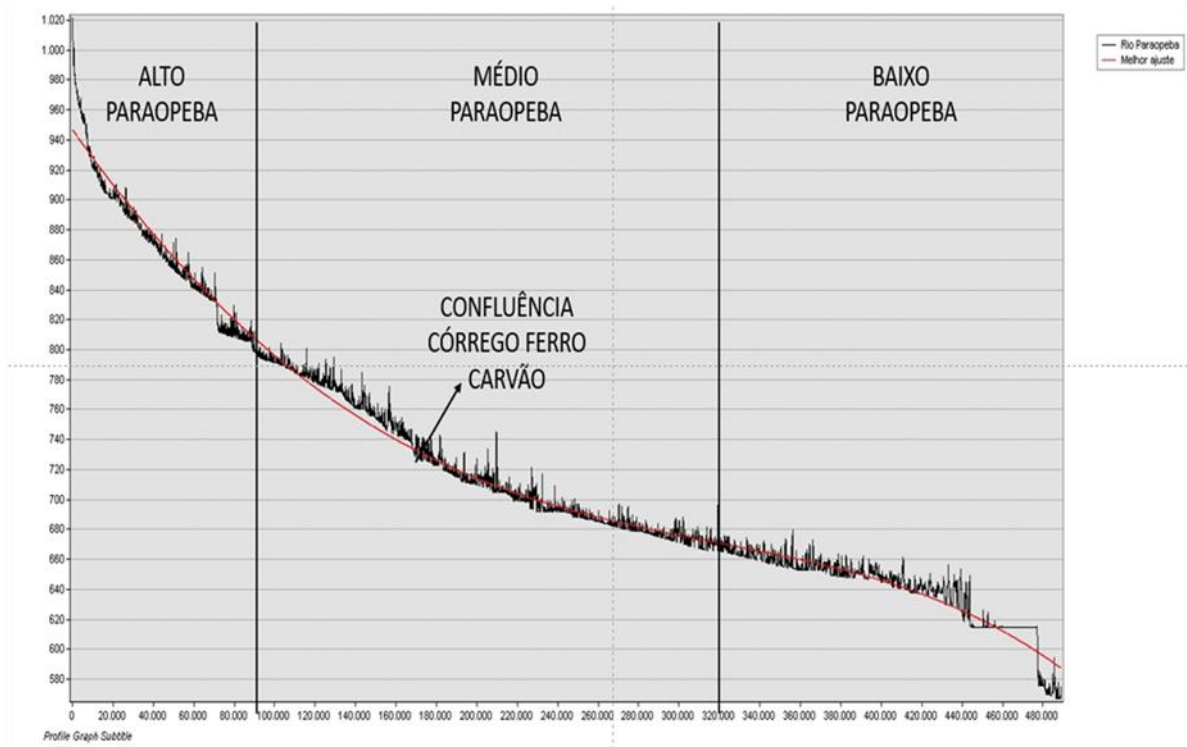
Figura 10 - Curva Hipsométrica da Bacia do Rio Paraopeba



Fonte: O Autor (2024).

A comparação entre o perfil longitudinal de um rio e sua linha de melhor tendência pode apontar setores de soerguimento (anomalias positivas ou inflexões abruptas no perfil) ou subsidência (anomalias negativas ou inflexões abruptas no perfil), assim como setores de degradação e agradação (Boyd e Schumm, 1995; Holbrook e Schumm, 1999). Os pontos do perfil longitudinal (Figura 11) distantes da curva de melhor ajuste (linha vermelha) revelam pontos anômalos, que podem estar associados a falhas geológicas, mudança das estruturas geológicas e de relevo.

Figura 11 - Perfil Longitudinal Rio Paraopeba e o ajuste de melhor tendência



Fonte: O Autor (2024).

5.4 DISCUSSÃO

Na análise morfométrica na bacia foi observado a existência de regiões com características distintas quanto a permeabilidade do substrato rochoso, forma das sub-bacias, entre outros, que influenciam diretamente na dinâmica intempérica, erosiva e deposicional. O índice razão de textura nos mostrou que no alto e médio curso, a bacia apresenta pequena capacidade de infiltração de água, pois a textura do substrato rochoso é classificada como fina.

Esta configuração é avaliada com maior potencial de formação de curso d'água nestas regiões, o que é refletido nos índices de densidade de drenagem e densidade hidrográfica, onde foram observados altos valores, o que indica a ocorrência de maiores quantidades de cursos d'água. Já na região do baixo Paraopeba, o índice de textura observado é classificado como granulometria grossa, e portanto, com características que permitem e facilitam a infiltração da água, e assim, possui menor potencial para geração de cursos d'água, o que também foi refletido nos índices densidade de drenagem e densidade hidrográfica, que apresentaram baixos valores.

O índice coeficiente de manutenção nos permitiu diferenciar a bacia, quanto a dissecação do relevo e área disponível para entalhamento de novos canais. Os valores são menores no alto e médio curso, e maiores no baixo. Isso significa que o relevo e a paisagem se

encontram em maiores níveis de dissecação no alto/médio curso, do que no baixo, corroborando como o que foi afirmado anteriormente, o potencial erosivo no alto/médio curso é maior, tendo como consequência uma maior dissecação do relevo, e por isso, tem maior potencial de contribuição dos elementos ali encontrados, do que quando comparados com o baixo curso da bacia. O índice de bifurcação mostrou valores muito próximos entre as bacias utilizadas para comparação (Alto, Médio e Baixo Paraopeba), e os valores encontrados remetem a médio nível de dissecação do relevo.

Quando comparadas as ocorrências de cursos d'água, quanto a classificação de sua ordem por Strahler, as quantidades de segmentos de curso d'água, é esperado, segundo a primeira Lei de Horton, que esta razão siga uma ordem geométrica inversa, esperando maiores quantidades de cursos d'água de primeira ordem do que rios de ordens superiores. Foi constatado a existência de maiores quantidades de segmentos fluviais de ordem 8 do que de ordem 7, contrariando o que era previsto pelos autores supracitados. Este fato pode estar correlacionado com a menor quantidade de cursos d'água (mostrados pelos índices de densidade hidrográfica e de drenagem), observados na região do baixo Paraopeba, que deixa de contribuir significativamente com esta relação.

O índice comprimento médio de canais ajuda na compreensão desta distribuição, e pela segunda lei de Horton é esperado maiores comprimentos dos canais de ordem inferiores, do que canais de ordem superiores. Os resultados deste índice evidenciam que ocorre o oposto na bacia (maiores comprimentos para canais de ordem superior) e este comportamento pode estar associado as características do regime pluviométrico e razão de textura, os entalhamentos dos leitos fluviais são mais intensos na cabeceira da bacia (altos topográficos), onde maiores comprimentos de cursos d'água inferiores são entalhados pelos processos erosivos, e de maneira contrária, nas regiões de baixo topográfico e próximas ao exultório tem menor potencial para formação dos leitos, tendo como consequência menores comprimentos para os rios de ordem superior.

O índice de sinuosidade mostrou que nas três regiões distintas o percurso do rio principal é classificado como tortuoso, em maior intensidade para o Alto Paraopeba, principalmente devido ao grande desvio angular com relação ao norte, que o Rio Paraopeba faz na região de Betim, provavelmente devido ao contato com litotipos mais resistentes ao entalhamento e causas tectônicas. Esta característica faz com que o escoamento energético do rio principal tenha baixos níveis energéticos de escoamento, e por consequência, menor capacidade de transporte de particulados no fluxo hídrico. Esta característica, associada às declividades observadas, contata-se que a bacia em geral tem baixa capacidade de transporte de particulados,

principalmente no médio-baixo curso, onde as declividades são menores. O índice gradiente de canais mostrou que as declividades do canal principal, no alto curso são bem maiores que as declividades no médio e baixo, mostrando novamente as diferenças de potencial erosivo (maior no alto e menor no médio e baixo curso).

Na análise hipsométrica foi observado que há maior distribuição de terras baixas do que de altos topográficos na bacia. A integral hipsométrica sugere alto grau de evolução do relevo, resultante dos processos modificadores da paisagem, e indicam que a bacia é madura, sofreu processos longos e avançados de desnudação. O perfil longitudinal do rio principal nos permitiu observar inflexões no relevo (variações abruptas entre o perfil longitudinal e a curva de melhor tendência) onde estão localizados pontos de degradação e agradação. Estes pontos também podem estar em contato com falhas geológicas, mudanças abruptas da litologia e relevo, e/ou acréscimo da carga sedimentar, o que pode estar relacionado com a característica tortuosa do escoamento do Rio Principal, fazendo com que haja redirecionamentos da direção do leito fluvial.

6 GEOQUÍMICA

6.1 ELEMENTOS MAIORES

Os resultados das análises geoquímicas dos elementos maiores nos sedimentos de fundo do Reservatório de Retiro Baixo encontram-se na Tabela 5 que também foram plotados nos diagramas de Harker, tendo a SiO₂ (%) como índice de diferenciação (Figura 12) comparados com os dados geoquímicos de outros estudos do Brasil e do Mundo.

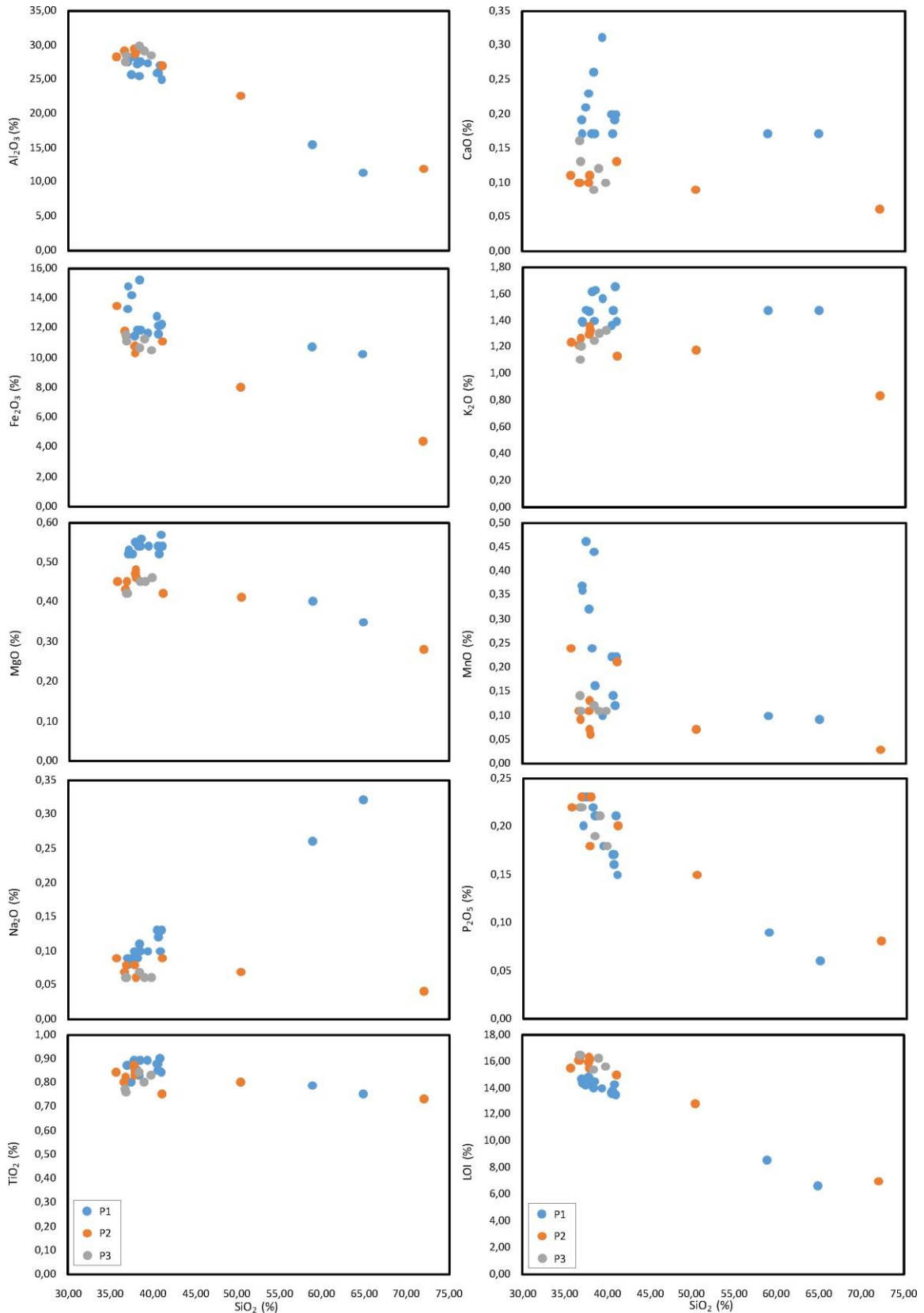
Tabela 5 - Geoquímica dos elementos maiores (óxidos) analisados nos sedimentos de fundo

Elemento	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	LOI	
Unidade	%												
LD	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-45,00	
Branco	0,03	0,03	<0,01	0,85	0,02	<0,01	0,01	0,03	<0,01	>90	<0,01	-0,12	
P1	5 cm	28,26	0,23	0,02	11,39	1,46	0,55	0,32	0,10	0,18	37,88	0,89	14,77
	10 cm	27,72	0,19	0,02	13,29	1,39	0,52	0,37	0,09	0,23	37,05	0,87	14,64
	15 cm	27,56	0,17	0,02	14,81	1,38	0,53	0,36	0,08	0,20	37,04	0,87	14,31
	20 cm	25,55	0,26	0,02	15,17	1,40	0,54	0,44	0,11	0,21	38,51	0,83	13,93
	25 cm	25,61	0,21	0,02	14,22	1,48	0,52	0,46	0,09	0,23	37,55	0,80	14,17
	30 cm	27,26	0,17	0,02	11,91	1,61	0,54	0,24	0,09	0,22	38,25	0,85	14,45
	35 cm	27,50	0,17	0,02	11,79	1,63	0,56	0,16	0,10	0,21	38,61	0,89	14,52
	40 cm	27,14	0,19	0,02	12,14	1,65	0,57	0,12	0,10	0,21	40,98	0,90	14,28
	45 cm	27,40	0,31	0,02	11,59	1,56	0,54	0,10	0,10	0,18	39,39	0,89	13,98
	50 cm	25,98	0,20	0,02	12,71	1,36	0,54	0,22	0,13	0,17	40,44	0,88	13,59
	55 cm	24,89	0,20	0,02	12,19	1,39	0,54	0,22	0,13	0,15	41,03	0,84	13,42
P2	60 cm	25,92	0,20	0,02	12,18	1,48	0,54	0,22	0,12	0,16	40,76	0,85	13,55
	65 cm	25,89	0,17	0,02	11,55	1,47	0,52	0,14	0,12	0,17	40,72	0,88	13,71
	70 cm	15,36	0,17	0,01	10,69	1,47	0,40	0,10	0,26	0,09	58,92	0,79	8,55
	75 cm	11,40	0,17	0,01	10,25	1,47	0,35	0,09	0,32	0,06	64,90	0,75	6,59
	5 cm	26,89	0,13	0,02	11,12	1,13	0,42	0,21	0,09	0,20	41,21	0,75	14,91
	10 cm	28,17	0,11	0,02	13,50	1,23	0,45	0,24	0,09	0,22	35,82	0,84	15,45
	15 cm	29,05	0,10	0,02	11,73	1,21	0,43	0,11	0,07	0,22	36,77	0,80	16,03
	20 cm	28,72	0,10	0,02	11,36	1,26	0,45	0,09	0,08	0,23	36,80	0,82	16,04
	25 cm	28,80	0,10	0,02	10,77	1,33	0,46	0,07	0,08	0,23	37,83	0,83	16,27
	30 cm	28,80	0,11	0,02	10,49	1,32	0,46	0,06	0,06	0,23	37,95	0,84	16,12
	35 cm	29,32	0,10	0,02	10,78	1,29	0,47	0,11	0,08	0,18	37,92	0,87	15,86
P3	40 cm	28,68	0,11	0,02	10,32	1,35	0,48	0,13	0,08	0,18	37,83	0,85	15,43
	45 cm	22,66	0,09	0,02	7,99	1,17	0,41	0,07	0,07	0,15	50,50	0,80	12,74
	50 cm	11,95	0,06	0,01	4,34	0,83	0,28	0,03	0,04	0,08	72,10	0,73	7,02
	8 cm	27,53	0,16	0,02	11,58	1,11	0,42	0,14	0,06	0,22	36,88	0,77	16,52
	16 cm	28,58	0,13	0,02	11,11	1,20	0,42	0,11	0,06	0,22	36,97	0,76	16,39
24 cm	29,07	0,12	0,02	11,20	1,30	0,45	0,11	0,06	0,21	39,11	0,80	16,16	
32 cm	29,81	0,09	0,02	10,63	1,25	0,45	0,12	0,07	0,19	38,47	0,84	15,41	
36 cm	28,57	0,10	0,02	10,52	1,32	0,46	0,11	0,06	0,18	39,87	0,83	15,61	

Fonte: O Autor (2024).

LD = Limite de detecção; LOI = Loss on Ignition/perda ao fogo. Determinação de Lítio – ICP95A - ICP OES.

Figura 12 - Projeção dos resultados obtidos no diagrama de variação de Harker para elementos maiores (% em peso)



Fonte: O Autor (2024).

De acordo com a Tabela 5 e Figura 12 nas amostras dos pontos P1 e P2 há diminuição da concentração de SiO₂ e aumento dos teores de Al₂O₃ das camadas da base para o topo. Os elementos Fe₂O₃ e MnO seguem o mesmo comportamento de variação, com aumento da base para o topo, no entanto com aumento das concentrações nas camadas intermediárias entre -20 cm a -25 cm (Tabela 5 e Figura 12).

Com relação a pedra ao fogo (LOI) a variação encontrada pode indicar, indiretamente, que os teores de matéria orgânica nas camadas mais profundas do sedimento são menores, provavelmente devido a autodepuração e ação microbiana. Comportamento semelhante é observado para P₂O₅ com concentrações menores nas camadas mais profundas dos sedimentos em relação as demais.

Outro ponto importante a ser destacado está relacionado as amostras do ponto P3 onde é possível observar que a variação dos óxidos em relação a concentração de SiO₂ é menor que nos demais pontos P2 e P3. Vale ressaltar que o ponto P3 está localizado próximo ao vertedouro do reservatório, ou seja, em um local mais distante da entrada do Rio Paraopeba, como em P1.

Para o elemento Cálcio (Ca), verifica-se uma considerável diminuição de sua concentração entre os pontos P1 e P3. A queda na concentração pode estar relacionada com a mobilidade e solubilidade em água, dependendo das condições do ambiente, principalmente em um ambiente redutor nas maiores profundidades, como em P3.

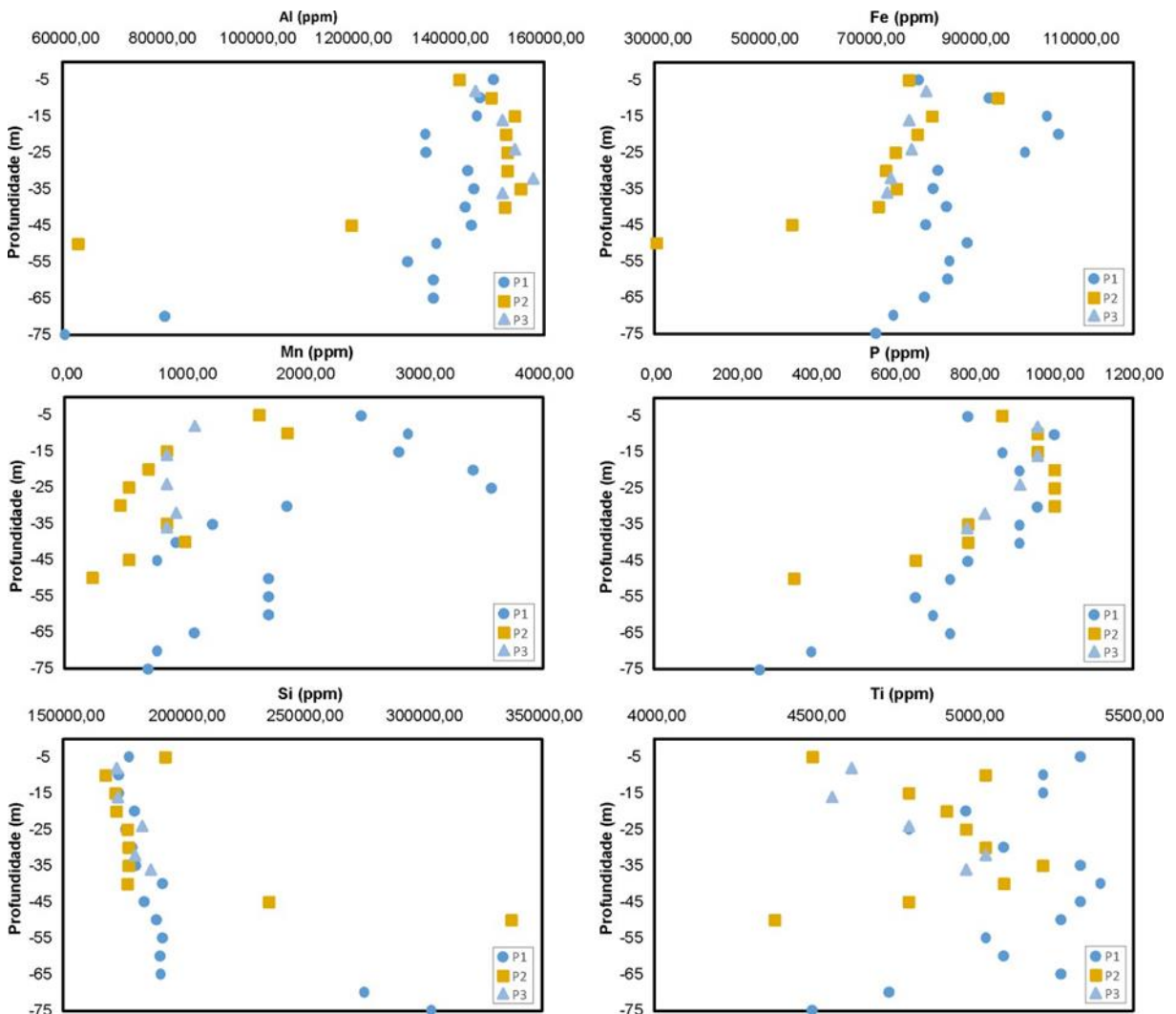
Para elemento Cr, foi observada pouca variação de sua concentração entre os pontos de amostragem, porém com aumento da base para o topo, sendo o ponto P3 de menor variação. O Cr pôde ser comparado com os valores guias de referência para elementos potencialmente tóxicos, onde na base do sedimento a concentração do elemento, que representa o valor de referência do background geoquímico da área, sua concentração é próxima os valores de Threshold Effect Level TEL (CCME, 1995) e valor de prevenção VP dos solos (CETESB, 2014), porém a partir das camadas mais superficiais, sua concentração atinge valores acima do Probable Effect Level PEL (CCME, 1995) podendo causar eventualmente efeitos adversos a biota (concentrações acima de 90 ppm).

Para os elementos K e Mg observa-se pequenas variações nas concentrações entre a base e o topo no ponto P3, diferentemente do observado para os pontos P1 e P2 com maiores concentrações nas camadas mais profundas do sedimento. Já as concentrações de Na apresentam uma diminuição entre os pontos P1 a P3. Vale ressaltar que, ao contrário do que foi observado para K e Mg, as concentrações de Na são maiores em P1 nas camadas mais profundas (base).

A fim de verificar a distribuição na concentração dos principais metais nos sedimentos

de fundo dos pontos P1, P2, e P3, a Figura 13 apresenta os elementos em perfil de profundidade. Para o Al observam-se altas concentrações em todos os pontos de amostragem, ligeiro aumento de P1 para P3, e nas camadas mais superficiais dos sedimentos estudados. Este é um elemento comum em minerais como feldspato e mica.

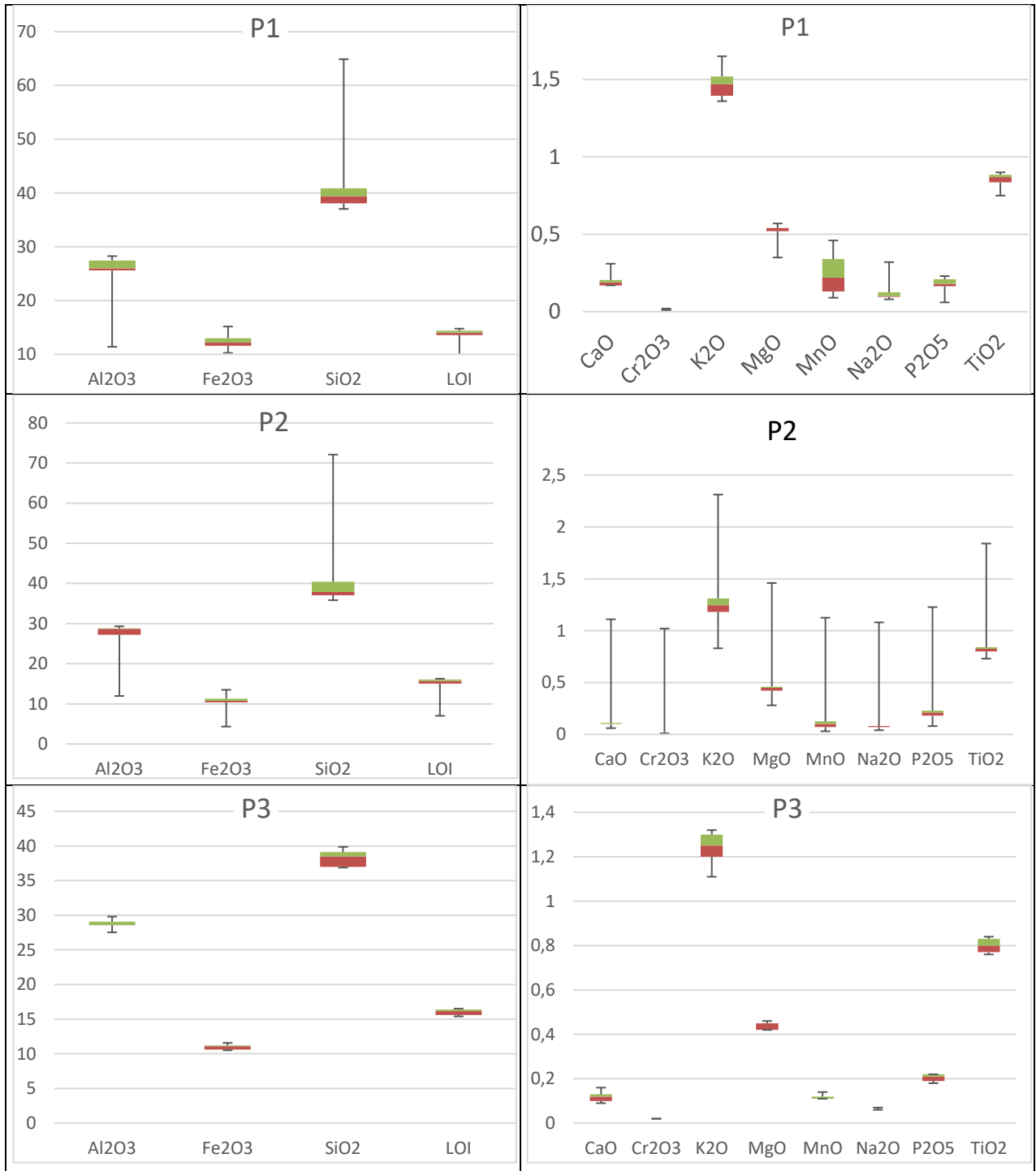
Figura 13 - Principais metais analisados em perfil de profundidade nos sedimentos de fundo



Fonte: O Autor (2024).

Na figura 14 a seguir, é mostrado os gráficos de dispersão para os elementos maiores, em (%) nos pontos P1, P2 e P3. O teste estatístico escolhido para avaliar as distribuições das concentrações é não paramétrico, mostrado através de um gráfico blogspot, devido as características das amostras, que supõe um N amostral igual a 1 (foi avaliado somente uma amostra de sedimento para cada profundidade da coluna de sedimentos, nos pontos de amostragem).

Figura 14 - Gráficos de dispersão de concentração das amostras de elementos maiores



Fonte: O Autor (2024).

O Fe também se mostrou muito abundante nos sedimentos de fundo do reservatório, entre 74 a 90 g/kg de sedimento, sendo que em P1 foram observados os maiores valores, e em P3, os menores. Cabe ressaltar a grande variação encontrada em P2 da base para o topo. Outro fator importante é o aumento nas camadas -25 cm e -15 cm de profundidade. Para Mn também se observam comportamentos semelhantes ao Fe, com aumento nas camadas -25 cm e -15 cm

de profundidade (Figura 13).

O P foi observado o aumento de sua concentração de P1 para P3, com aumento nas camadas mais superficiais do sedimento, sugerindo aporte e fixação do elemento no sedimento, provavelmente devido às consequências da ocupação antrópica na bacia (proximidade dos cursos d'água a grandes centros urbanos aporte de matéria orgânica devido ao esgoto e atividades agrícolas que utilizam o insumo na sua cadeia produtiva).

Com relação a Si maiores concentrações foram observadas nas camadas mais profundas, evidenciando que nessas camadas é observado um menor grau de alteração do material. Para o elemento Titânio (Ti), foi observada pouca variação de sua concentração entre os pontos de amostragem. Sua variação na coluna de sedimento é observada com ligeiro aumento das camadas mais profundas para as superficiais, sendo que em P3, a tendência foi de diminuição de sua concentração da base para o topo (Figura 13).

6.2 ELEMENTOS TRAÇOS

Nos dados das concentrações dos sedimentos por profundidade dos elementos traços em P1, P2 e P3 estão apresentados nas Tabelas 6 e 7 e na Figura 15. Analisando Ba, observou-se uma maior concentração em P1 e nas camadas mais profundas dos sedimentos em concentrações elevadas (principalmente em P1), acima do valor-guia valor de intervenção VI dos solos (CETESB, 2014) onde a partir desta concentração podem ocorrer efeitos adversos á biota. Contudo, por se tratar da camada deposição de sedimentos mais antiga, acredita-se que essa concentração seja naturalmente elevada. O Sr também possui maior concentração em P1, onde se observou diminuição da sua concentração da base para o topo da coluna de sedimentos, já em P2 e P3 observou-se um ligeiro aumento.

Analisando o comportamento de Zn, foi observada sua maior concentração mediana em P3 (92 ppm). Não houve tendência espacial de aumento ou diminuição de sua concentração entre os pontos de amostragem. Foi observado o enriquecimento do elemento da base para o topo da coluna de sedimentos, contudo, os valores ainda ficam bem distantes da concentração guia de referência TEL (CCME, 1995).

Para o Cu não há grande variação nas concentrações sendo em P3 os menores valores, e em P1 e P2 os maiores com anomalia na camada de 30 cm de profundidade atingindo próximos a 200 ppm, superando assim o limite de referência VI dos solos (CETESB, 2014). As camadas mais profundas dos sedimentos são ligeiramente menos concentradas do elemento do que as camadas mais superficiais, sugerindo que esta anomalia na concentração seja pontual.

Em P1 é observado um enriquecimento mais acentuado na camada de 35 cm de profundidade.

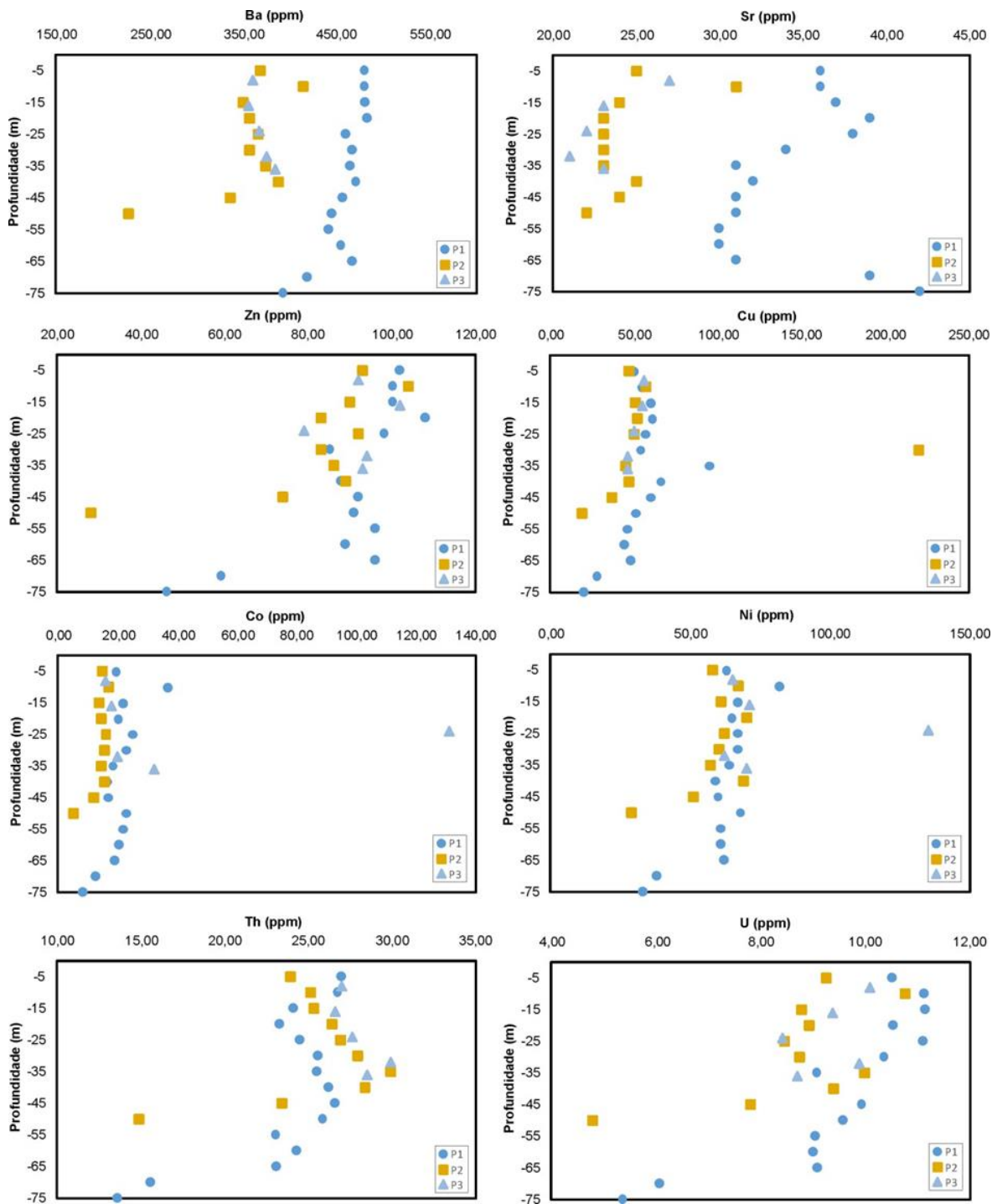
Tabela 6 - Geoquímica dos elementos traços analisados nos sedimentos de fundo

Elemento	Ba	Sr	Zn	Cu	Co	Ni	Th	U	
Unidade	ppm								
Limite de detecção	10	10	5	5	0,5	5	0,1	0,05	
Branco	<10	<10	9	<5	<0,5	<5	<0,1	<0,05	
P1	5 cm	479,00	36,00	102,00	50,00	19,60	63,00	27,00	10,52
	10 cm	479,00	36,00	100,00	55,00	36,90	82,00	26,70	11,13
	15 cm	481,00	37,00	100,00	60,00	21,90	67,00	24,10	11,15
	20 cm	483,00	39,00	108,00	61,00	20,30	65,00	23,30	10,54
	25 cm	460,00	38,00	98,00	57,00	25,20	67,00	24,50	11,11
	30 cm	467,00	34,00	85,00	54,00	23,00	67,00	25,60	10,34
	35 cm	465,00	31,00	86,00	95,00	18,50	64,00	25,50	9,06
	40 cm	470,00	32,00	88,00	66,00	16,60	59,00	26,20	9,41
	45 cm	457,00	31,00	92,00	60,00	16,90	60,00	26,60	9,91
	50 cm	445,00	31,00	91,00	51,00	23,00	68,00	25,80	9,58
	55 cm	442,00	30,00	96,00	46,00	21,90	61,00	23,00	9,05
	60 cm	454,00	30,00	89,00	44,00	20,40	61,00	24,30	9,00
65 cm	467,00	31,00	96,00	48,00	19,10	62,00	23,10	9,09	
70 cm	419,00	39,00	59,00	28,00	12,70	38,00	15,60	6,07	
75 cm	392,00	42,00	46,00	20,00	8,30	33,00	13,60	5,35	
P2	5 cm	368,00	25,00	93,00	47,00	15,00	58,00	23,90	9,25
	10 cm	414,00	31,00	104,00	57,00	17,00	67,00	25,10	10,75
	15 cm	350,00	24,00	90,00	51,00	13,90	61,00	25,30	8,78
	20 cm	357,00	23,00	83,00	52,00	14,50	70,00	26,40	8,92
	25 cm	366,00	23,00	92,00	50,00	16,10	62,00	26,90	8,46
	30 cm	357,00	23,00	83,00	220,00	15,60	60,00	27,90	8,73
	35 cm	374,00	23,00	86,00	45,00	14,40	57,00	29,90	9,99
	40 cm	388,00	25,00	89,00	47,00	15,40	69,00	28,40	9,39
45 cm	336,00	24,00	74,00	37,00	12,00	51,00	23,40	7,81	
50 cm	228,00	22,00	28,00	19,00	5,20	29,00	14,90	4,79	
P3	8 cm	360,00	27,00	92,00	56,00	15,90	65,00	27,00	10,08
	16 cm	356,00	23,00	102,00	55,00	17,90	71,00	26,60	9,36
	24 cm	367,00	22,00	79,00	50,00	130,90	135,00	27,60	8,42
	32 cm	375,00	21,00	94,00	46,00	19,90	62,00	29,90	9,87
	36 cm	384,00	23,00	93,00	46,00	32,20	70,00	28,50	8,70

Fonte: O Autor (2024).

Não houve relação clara de aumento ou diminuição na concentração de Co entre P1 e P3, contudo. Na base da coluna de sedimentos os valores são próximos dos limites de referência TEL e VP dos solos (CCME, 1995 e CETESB, 2014). A amostra do P1 ultrapassa os limites de VI dos solos (CETESB, 2014) na camada de sedimento de 10 cm de profundidade, já em P3, o a concentração nos sedimentos de 25 cm de profundidade (aproximadamente 130 ppm) supera em muitos o valor de referência VI (CETESB, 2014) sugerindo contaminação pontual.

Figura 15 - Principais elementos traços analisados em perfil de profundidade nos sedimentos de fundo



Fonte: O Autor (2024).

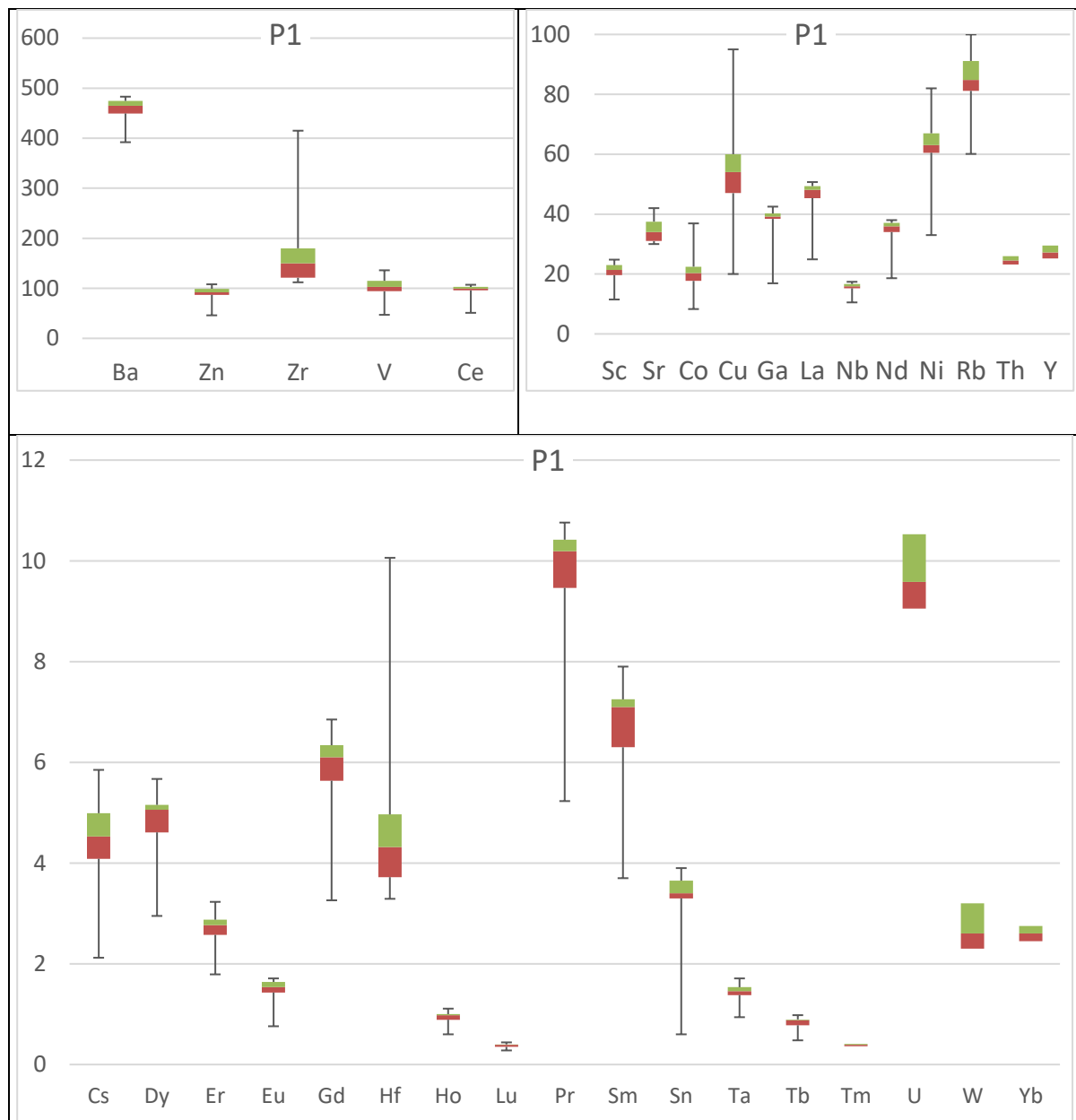
Tabela 7 - Geoquímica dos elementos traços analisados nos sedimentos de fundo

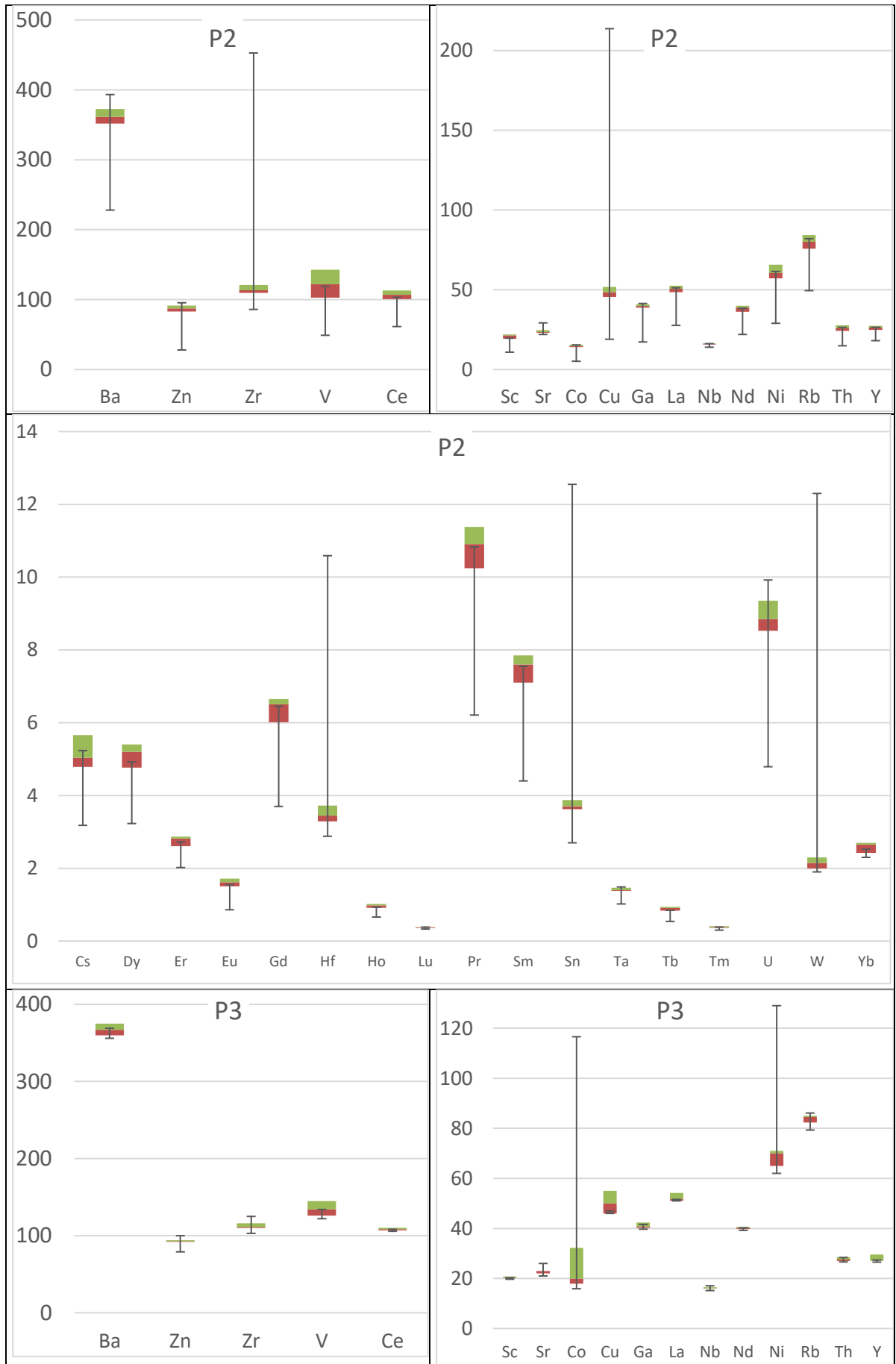
Elemento	Sc	Rb	Zr	Cs	Nd	Sm	Hf	Ta	W	
Unidade	(ppm)									
LD	0,5	0,2	5	0,05	0,1	0,1	0,0	0,05	0,1	
Branco	0,8	0,4	28	<0,05	<0,1	<0,1	0,14	0,07	0,6	
P1	-5	19,2	96,1	112	4,82	34,9	7,2	3,38	1,46	5
	-10	21,4	87,8	114	4,87	35,9	7	3,37	1,43	2,6
	-15	21,1	79,9	119	4,51	34,9	7,1	3,29	1,38	2,3
	-20	19,3	82,7	159	4,53	37,2	7,3	4,32	1,35	2,5
	-25	19,9	89,6	123	5,12	37,5	7,5	3,69	1,41	2,6
	-30	21,4	100	118	5,85	38	7,9	3,75	1,71	3,2
	-35	23,4	93,8	130	5,21	36,5	7,1	3,8	1,53	11,3
	-40	23,4	92,7	150	5,11	37,8	7,4	4,33	1,63	3,2
	-45	23,1	88,3	130	4,74	36,9	7,1	4,04	1,54	2,4
	-50	22,8	80,4	180	4,02	36,6	7,1	5,08	1,52	2,7
	-55	22	81,9	195	4,15	34,2	6,4	5,24	1,38	2,1
	-60	22,1	84,8	176	4,2	33,8	6,2	4,7	1,57	2,3
	-65	24,8	82	180	4,02	31,9	6,2	4,85	1,53	4,6
-70	14,6	65,1	366	2,65	21,7	4,3	8,98	0,94	1,5	
-75	11,5	60,1	415	2,12	18,6	3,7	10,06	1,18	1,6	
P2	-5	18,6	73,7	86	4,97	35,9	7	2,88	1,38	1,9
	-10	21,2	80,6	102	5,1	37,9	7,6	3,14	1,5	2
	-15	21,2	77,3	112	5,66	39,9	7,9	3,33	1,39	2
	-20	22,5	80,9	115	5,66	39,6	7,6	3,5	1,42	12,6
	-25	21,7	90,6	122	6,11	41,4	8,3	3,77	1,35	2,1
	-30	21,6	85,4	118	5,65	42,3	8	3,58	1,41	2,9
	-35	22,2	79,7	109	4,75	40,1	7,7	3,28	1,57	2,3
	-40	22,4	89	112	4,88	37,1	7,4	3,4	1,48	1,9
	-45	18	75,2	248	4,15	31,5	6,2	6,11	1,39	2,3
	-50	10,9	49,5	464	3,18	22	4,4	11,02	1,02	2,2
P3	-8	20,3	79,3	110	5,25	39,2	7,7	3,26	1,37	2,8
	-16	21	84,5	111	5,87	39,8	7,8	3,42	1,33	2,2
	-24	20,1	82,3	116	5,83	40,2	7,9	3,47	1,15	2,3
	-32	20,8	85	103	5,16	40,6	7,5	3,1	1,48	2,1
	-36	19,7	88,8	131	5,55	41	7,5	3,74	1,44	2,5

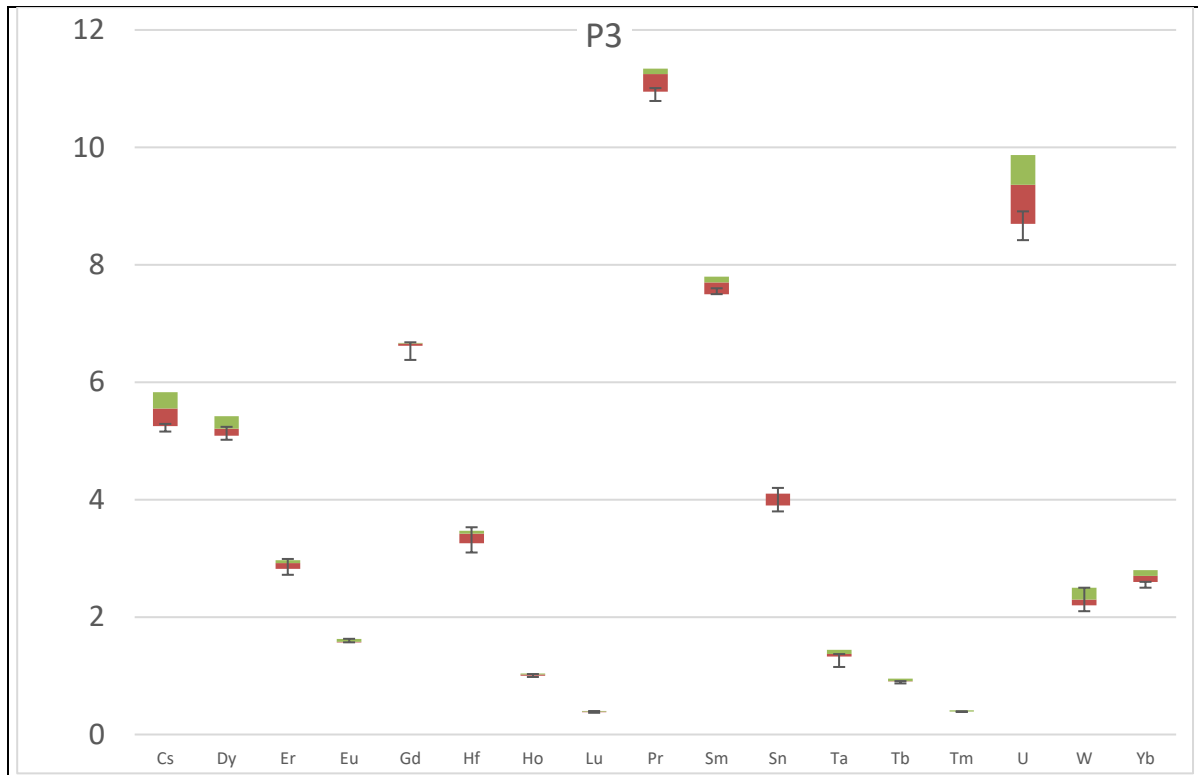
Fonte: O Autor (2024).

Na figura 16 abaixo, é mostrado os gráficos de dispersão para os elementos maiores, em (%) nos pontos P1, P2 e P3. O teste estatístico escolhido para avaliar as distribuições das concentrações é não paramétrico, mostrado através de um gráfico boxplot, devido as características das amostras, que supõe um N amostral igual a 1 (foi avaliado somente uma amostra de sedimento para cada profundidade da coluna de sedimentos, nos pontos de amostragem).

Figura 16 - Gráficos de dispersão de concentração das amostras de elementos traços e menores







Fonte: O Autor (2024).

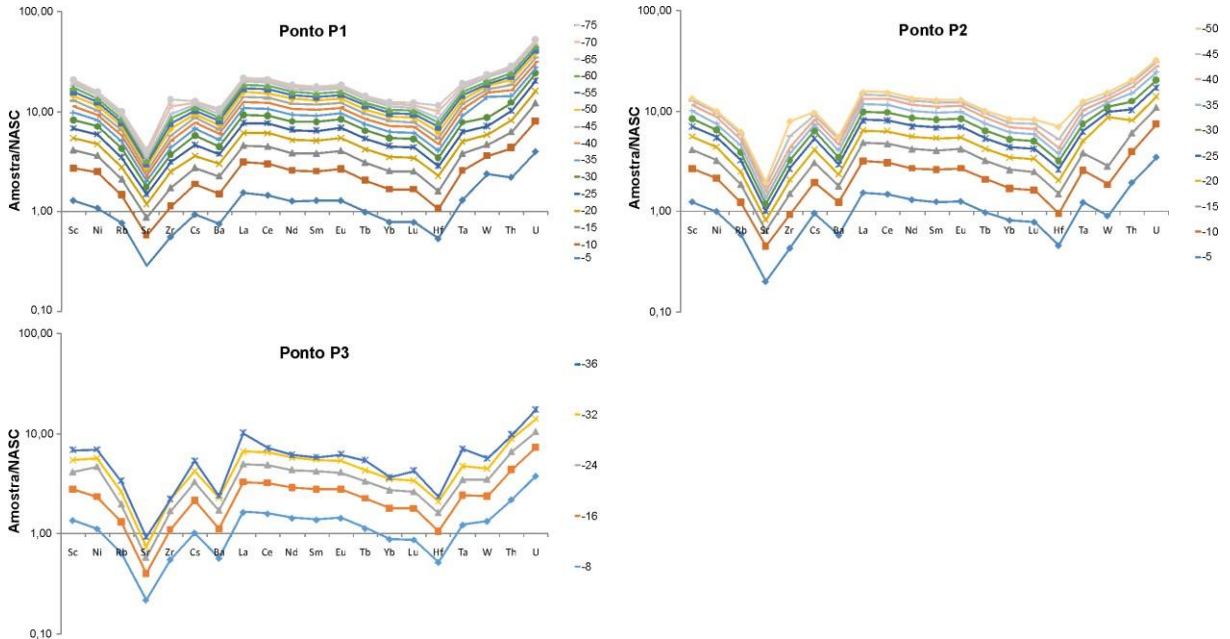
Para Ni, não houve tendência de enriquecimento ou diminuição de sua concentração quando analisamos a variação espacial dos pontos de amostragem. A maior mediana para o elemento foi em P3 (80 ppm), neste ponto, observa-se uma amostra com altos teores do elemento de maneira pontual, onde não é observado o enriquecimento gradativo, e sim, um abrupto aumento de sua concentração. O elemento Ni ocorre naturalmente nos sedimentos de maior profundidade em concentrações próximas ao valor-guia PEL (CCME, 1995), indicando que sua concentração natural pode ocasionar em efeitos tóxicos do elemento a biota, e nas camadas superficiais atinge o limite do valor guia de referência VI dos solos (CETESB, 2014).

Ocorre um ligeiro enriquecimento dos teores médios de Th quando se varia espacialmente os pontos de amostragem de P1 para P3. Em P1 e P2 observaram-se maiores variações para sua concentração. Quando analisamos seu comportamento com relação ao perfil de sedimento, há um enriquecimento na camada intermediária da coluna de sedimentos. A concentração mediana de U entre os pontos de amostragem pouco variou (valores próximos a 9,0 ppm), não havendo correlação clara de enriquecimento ou diminuição da concentração do elemento. Em P1 e P2 o ligeiro enriquecimento do elemento da base para o topo da coluna de sedimentos, o que não é observado com tanta clareza em P3.

Para avaliar os demais elementos traços da Tabela 7 os dados dos sedimentos de fundo deste estudo foram plotados em diagrama multi elementares da Figura 17 e normalizados de

acordo com North American Shale Composite NASC (Gromet et al. 1984). As concentrações dos elementos traços variam entre as amostras de cada perfil, havendo um maior enriquecimento nas amostras da base e empobrecimento das amostras do topo.

Figura 17 - Diagramas multielementares dos sedimentos de fundo



Fonte: O Autor (2024).

O enriquecimento das amostras da base pode estar relacionado ao fator intemperismo, as amostras entre -5 cm e -15 cm encontra-se na parte superior do perfil, ou seja, na porção de sedimentos, provavelmente depositados recentemente e que estiveram sob ação de alteração intempérica. Algumas amostras também apresentam uma tendência de enriquecimento na maioria dos elementos de alto potencial iônico (HFSE) e empobrecimento em elementos litófilos de grande raio iônico (LILE) (exceção do Ce e Eu).

6.3 ELEMENTOS TERRAS RARAS

Os elementos terras raras (ETR's) analisados nos sedimentos de fundo do reservatório de Retiro Baixo estão representados na Tabela 8. Os dados foram normalizados de acordo com o condrito C1 (Evensen; Hamilton; O'Nions, 1978).

Tabela 8 - Geoquímica dos elementos terras raras analisados nos sedimentos de fundo

Elemento	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Unidade	(ppm)														
LD	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	
Branco	0,4	0,2	<0,05	<0,1	<0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1	<0,05	
P1	-5	48,10	97,10	9,72	34,90	7,20	1,52	6,05	0,84	4,83	0,91	2,58	0,38	2,40	0,36
	-10	49,00	103,40	10,23	35,90	7,00	1,64	6,49	0,91	5,17	1,01	2,82	0,40	2,70	0,41
	-15	46,10	99,60	9,80	34,90	7,10	1,66	6,02	0,88	5,14	0,99	2,85	0,41	2,70	0,39
	-20	47,90	106,60	10,40	37,20	7,30	1,64	6,61	0,93	5,34	1,05	3,08	0,45	2,90	0,42
	-25	48,10	102,00	10,59	37,50	7,50	1,69	6,85	0,98	5,67	1,11	3,23	0,47	3,10	0,44
	-30	49,80	99,50	10,76	38,00	7,90	1,71	6,33	0,93	5,33	1,06	2,91	0,40	2,80	0,42
	-35	48,70	98,90	10,19	36,50	7,10	1,52	6,10	0,84	5,10	0,99	2,69	0,38	2,60	0,38
	-40	50,70	106,20	10,54	37,80	7,40	1,55	6,35	0,88	4,92	0,99	2,90	0,41	2,80	0,39
	-45	50,40	101,90	10,43	36,90	7,10	1,56	6,26	0,88	5,11	0,98	2,77	0,41	2,60	0,39
	-50	49,70	107,10	10,41	36,60	7,10	1,54	6,14	0,88	5,06	0,96	2,80	0,39	2,60	0,39
	-55	45,50	96,70	9,57	34,20	6,40	1,46	5,83	0,79	4,72	0,88	2,51	0,36	2,50	0,36
	-60	45,20	95,00	9,36	33,80	6,20	1,37	5,35	0,75	4,50	0,90	2,57	0,37	2,40	0,34
	-65	43,40	90,90	9,04	31,90	6,20	1,40	5,44	0,77	4,35	0,87	2,60	0,35	2,50	0,33
	-70	27,90	59,00	6,06	21,70	4,30	0,93	3,97	0,56	3,44	0,68	2,10	0,30	2,10	0,32
	-75	24,90	51,00	5,23	18,60	3,70	0,76	3,26	0,48	2,95	0,60	1,79	0,27	1,90	0,28
P2	-5	48,00	99,40	10,13	35,90	7,00	1,49	6,03	0,83	4,75	0,91	2,57	0,36	2,50	0,36
	-10	50,80	105,10	10,87	37,90	7,60	1,70	6,53	0,95	5,41	1,02	2,87	0,40	2,70	0,39
	-15	51,30	109,00	11,15	39,90	7,90	1,73	6,62	0,93	5,43	1,04	2,85	0,40	2,70	0,39
	-20	50,50	110,00	10,95	39,60	7,60	1,58	6,48	0,89	5,21	0,99	2,87	0,43	2,70	0,41
	-25	52,90	115,70	11,62	41,40	8,30	1,76	6,66	0,94	5,56	1,04	2,98	0,41	2,80	0,39
	-30	55,10	114,80	11,97	42,30	8,00	1,72	7,09	0,94	5,39	1,02	2,99	0,41	2,70	0,40
	-35	55,20	114,20	11,46	40,10	7,70	1,65	6,80	0,93	5,19	0,97	2,78	0,37	2,60	0,36
	-40	50,20	105,10	10,58	37,10	7,40	1,56	6,01	0,84	4,81	0,92	2,71	0,37	2,40	0,38
	-45	43,40	88,20	9,04	31,50	6,20	1,27	5,28	0,76	4,15	0,82	2,38	0,34	2,30	0,33
	-50	27,70	61,50	6,21	22,00	4,40	0,86	3,70	0,54	3,23	0,66	2,02	0,30	2,30	0,38
P3	-8	51,00	105,70	10,79	39,20	7,70	1,69	6,67	0,96	5,42	1,04	2,92	0,41	2,70	0,40
	-16	51,00	108,40	10,95	39,80	7,80	1,57	6,73	0,95	5,57	1,07	3,14	0,41	2,80	0,42
	-24	51,70	110,10	11,40	40,20	7,90	1,58	6,62	0,91	5,09	1,02	2,97	0,39	2,80	0,38
	-32	54,80	111,50	11,34	40,60	7,50	1,57	6,38	0,87	5,02	0,98	2,72	0,39	2,50	0,37
	-36	54,20	106,90	11,25	41,00	7,50	1,63	6,66	0,90	5,21	1,00	2,82	0,39	2,60	0,39

Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 9 encontram-se as somas dos ETR's leves (ETRL), ETR's pesados (ETRP), as razões normalizadas La/Eu, Gd/Lu, La/Lu, e os cálculos para a determinação de anomalias de európio e cério. No diagrama de abundância da Figura 18 observa-se um padrão de enriquecimento de ETRL e ETRP (este em menor grau que aquele) em relação ao condrito C1 e pequenas anomalias de Eu.

Tabela 9 - Resultados dos elementos terras raras normalizados

Ponto	Prof	(Σ ETR) _{cn}	(Σ ETRL) _{cn}	(Σ ETRP) _{cn}	(La/Eu) _{cn}	(Gd/Lu) _{cn}	(La/Lu) _{cn}	Eu/Eu*	Ce/Ce*
P1	-5	742,53	596,34	146,20	7,51	2,09	13,87	0,70	1,08
	-10	777,40	618,07	159,33	7,09	1,97	12,41	0,74	1,11
	-15	750,22	594,67	155,55	6,59	1,92	12,27	0,78	1,13
	-20	791,99	625,04	166,95	6,93	1,96	11,84	0,72	1,15
	-25	798,92	623,41	175,50	6,75	1,93	11,35	0,72	1,09
	-30	794,34	632,21	162,14	6,91	1,87	12,31	0,74	1,03
	-35	760,79	609,22	151,58	7,60	1,99	13,30	0,71	1,07
	-40	794,88	637,68	157,20	7,76	2,02	13,49	0,69	1,11
	-45	780,23	624,89	155,34	7,66	1,99	13,41	0,72	1,07
	-50	782,60	629,00	153,60	7,66	1,96	13,23	0,71	1,13
	-55	718,04	575,82	142,23	7,39	2,01	13,12	0,73	1,12
	-60	703,71	566,05	137,65	7,83	1,96	13,80	0,73	1,11
	-65	682,57	545,45	137,12	7,35	2,05	13,65	0,74	1,10
	-70	468,79	359,19	109,60	7,12	1,54	9,05	0,69	1,09
	-75	407,23	312,40	94,83	7,77	1,45	9,23	0,67	1,08
P2	-5	749,37	604,08	145,28	7,64	2,08	13,84	0,70	1,08
	-10	805,11	643,88	161,23	7,09	2,08	13,52	0,74	1,08
	-15	823,08	661,63	161,45	7,03	2,11	13,65	0,73	1,10
	-20	812,72	652,69	160,03	7,58	1,96	12,79	0,69	1,13
	-25	854,04	689,83	164,20	7,13	2,12	14,08	0,72	1,12
	-30	865,45	700,31	165,13	7,60	2,20	14,30	0,70	1,08
	-35	843,46	686,69	156,77	7,94	2,35	15,92	0,70	1,09
	-40	780,30	633,02	147,28	7,63	1,97	13,71	0,72	1,10
	-45	669,61	538,14	131,47	8,11	1,99	13,65	0,68	1,07
	-50	473,58	363,92	109,66	7,64	1,21	7,57	0,65	1,13
P3	-8	811,69	648,03	163,66	7,16	2,07	13,23	0,72	1,08
	-16	821,30	653,77	167,53	7,71	1,99	12,60	0,66	1,10
	-24	825,40	665,63	159,77	7,76	2,17	14,12	0,67	1,09
	-32	830,78	677,95	152,83	8,28	2,14	15,37	0,69	1,08
	-36	827,33	669,23	158,10	7,89	2,12	14,43	0,71	1,04

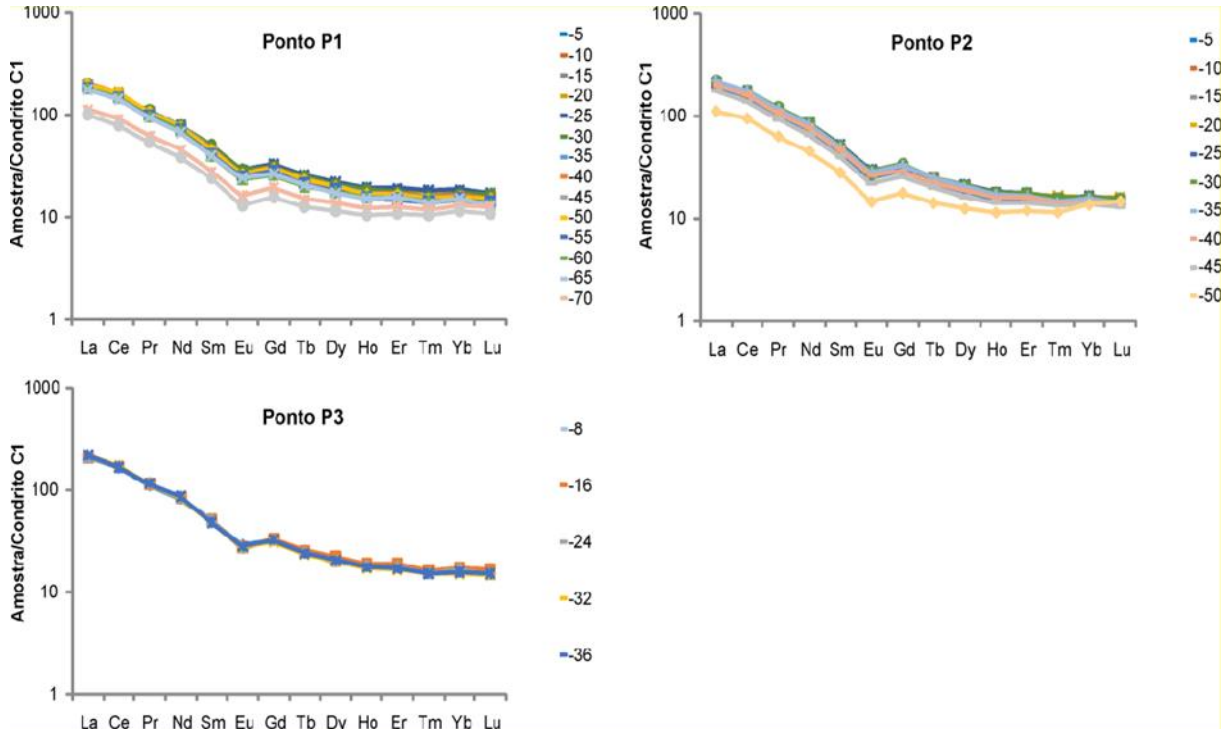
Fonte: O Autor (2024).

Legenda: Prof = profundidade; cn: normalizado pelo condrito; Eu/Eu* = $Eu_n / (Sm_n \times Gd_n) 0.5$; Ce/Ce* = $Ce_n / (La_n \times Pr_n) 0.5$.

As amostras apresentam um padrão de fracionamento praticamente contínuo, caracterizado pelo empobrecimento de ETRL's aos ETRP's. A concentração de ETRs nos perfis intermediários, como em P1 – 40 cm (Σ ETR = 794,88 ppm) e em P2 – 30 cm (Σ ETR = 865,45 ppm) são maiores que nas porções da base P1 – 75 cm (Σ ETR = 407,23 ppm) e em P2 – 50 cm (Σ ETR = 473,58 ppm). Já o ponto P3 possui uma concentração com pequena variação entre a base e o topo (Figura 18).

De forma geral, o maior fracionamento dos ETRP's das amostras deste estudo evidencia a atuação do intemperismo nos sedimentos estudados, visto que a mobilidade/solubilização dos ETRP's é maior do que nos ETRL's durante os processos intempéricos.

Figura 18 - Diagrama de abundância das amostras dos perfis de sedimentos mostrando o padrão de fracionamento dos ETR's. Os dados foram normalizados pela média dos condritos C1 (Evensen; Hamilton; O'Nions, 1978)



Fonte: O Autor (2024).

6.4 DISCUSSÃO

A caracterização geoquímica do reservatório foi realizada por meio das análises dos principais elementos maiores, elementos traços e terras raras, nos pontos de amostragem P1, P2 e P3. É importante salientar as diferentes características dos pontos de amostragem, como já dito anteriormente, P1 é na zona mais próxima da foz do Rio Paraopeba no reservatório, P2 na região central, e P3 próximo ao vertedouro e a barragem que estruturam o reservatório. Em termos de energia de escoamento, teoricamente, espera-se que P1 tenha mais energia de escoamento do que P3, sendo P2 a zona intermediária.

Os resultados geoquímicos indicam que para o elemento Cr foi observado concentrações acima do PEL e próximos ao VI dos solos nos três pontos de amostragem. Na camada representativa do fundo geoquímico de referência o elemento é observado em valores abaixo destes limites. O elemento Ba foi observado acima dos limites dos valores guia de referência VI dos solos (CONAMA 454). A concentração no fundo geoquímico de referência está acima destes limites. Para o elemento Ni concentrações acima dos limites de referência PEL (legislação canadense) e muito próximas ao limite VI dos solos (ainda inferiores na maioria das

amostras). Em uma amostra de P1 (10 cm), e em uma amostra de P3 (24 cm) superou este valor. A concentração no fundo geoquímico natural de referência se inicia bem próximo do valor guia PEL, e como é constatado o comportamento de enriquecimento do elemento da base para o topo da coluna de sedimento, rapidamente supera este valor.

Para Co foi observado em concentrações superiores aos limites guia de referência VI dos solos em uma amostra de P1 (10 cm) e uma amostra de P3 (24 cm). Foram observadas as mesmas amostras anômalas em relação ao Ni, sugerindo que os elementos foram adsorvidos a coluna de sedimento no mesmo momento, e sua ocorrência podem provavelmente estarem associadas. Suas concentrações no fundo geoquímico natural de referência são observadas abaixo dos valores guia. Para Cu, foram observadas concentrações m abaixo dos valores guia de referência VI dos solos, e em P2, a camada de 30 cm de profundidade supera este valor.

7 CONTRIBUIÇÃO GEOGÊNICA E/OU ANTROPOGÊNICA

7.1 FATOR DE CONTAMINAÇÃO

O método proposto para classificar os níveis de contaminação, índice de contaminação (FC), utiliza intervalos específicos que são associados a uma gama de cores correspondentes, refletindo assim a classificação de contaminação, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Intervalos de classificação e cores correspondentes FC

INTERVALO	CLASSIFICAÇÃO	COR
$FC \leq 1$	Grau baixo de contaminação	Verde escuro
$1 < FC \leq 3$	Grau moderado de contaminação	Verde claro
$3 < FC \leq 6$	Grau considerável de contaminação	Amarelo
$FC > 6$	Grau alto de contaminação	Vermelho

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 19, a seguir, mostram os resultados para os principais elementos os quais foram observadas alterações consideráveis em suas concentrações. Os resultados do ponto P3 (zona lacustre ou próxima ao vertedouro) não mostram resultados que aponta alterações, segundo a classificação proposta. Além disso, foi utilizada a camada mais profunda de deposição como referência de normalização dos dados.

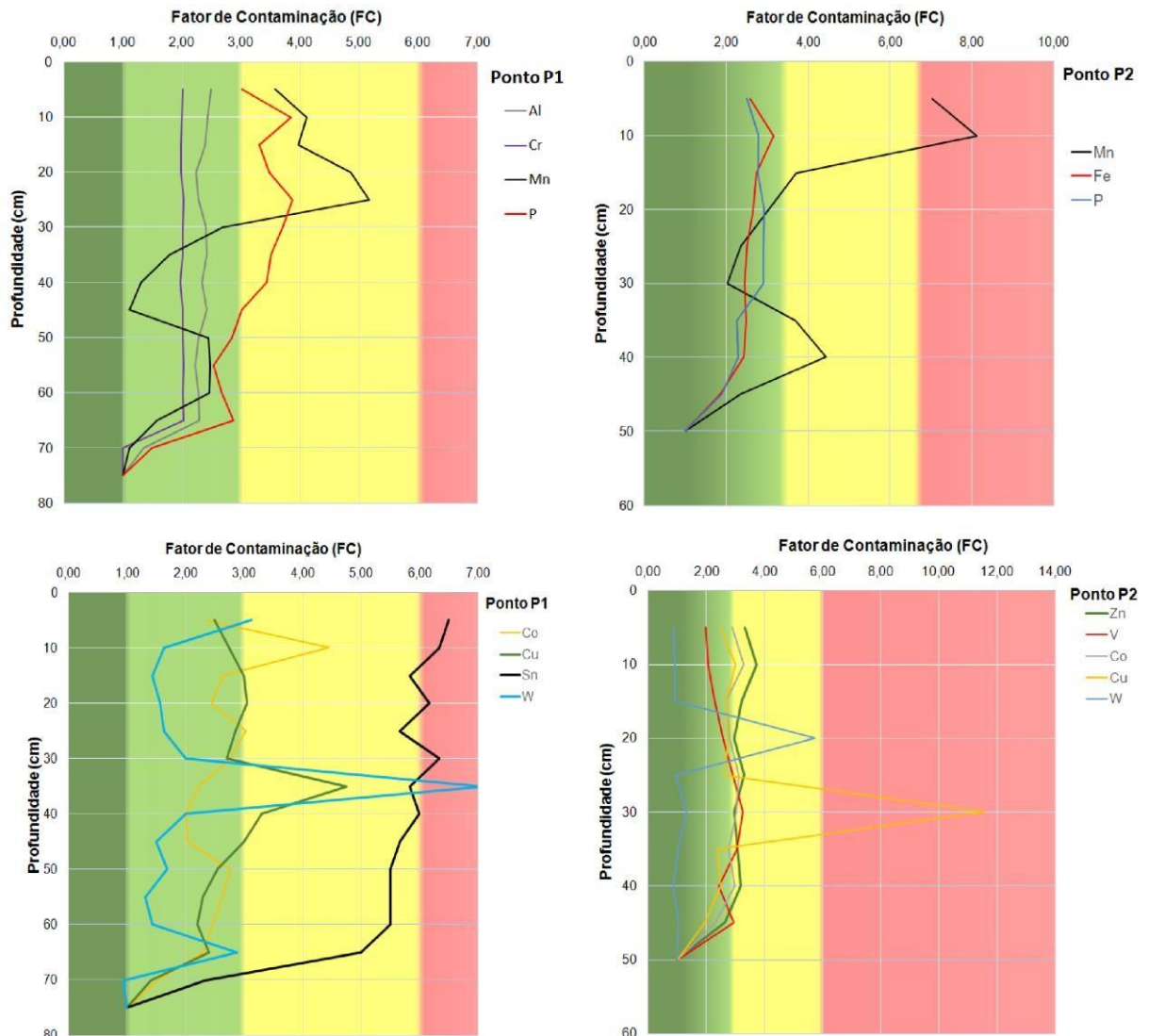
Observa-se na Figura 19 o comportamento dos elementos maiores em P1 quando submetidos à análise do índice geoquímico FC, em que as concentrações de P e Mn crescem abruptamente a partir das camadas intermediárias, atingindo níveis de concentração estabelecidas como grau considerável de contaminação, variando de 3 (caso do P) a 5 vezes no caso do (Mn). Esses resultados, por permitirem observar as das altas concentrações dos elementos em praticamente toda a coluna de sedimento.

O aumento significativo das concentrações, principalmente de Mn, atingindo valores que chegam a 8 vezes a concentração do elemento no background geoquímico de referência, indicando alto grau de contaminação em P2. Neste ponto observa-se também o enriquecimento considerável de P e Fe, sendo classificado como grau moderado de contaminação (Figura 19).

Para os elementos terras raras e traços, em P1, sob a ótica do índice geoquímico FC, observa-se que o elemento Sn atingi os maiores índices de contaminação (em quase todas as amostras), sendo classificados como grau alto de contaminação, e o Cu e Co, como considerável de contaminação. Para W, em apenas uma das amostras os níveis de concentração atingem altos

valores, não sendo observada a evolução crescente de sua concentração, indicando assim uma provável fonte pontual de contaminação do elemento (Figura 19).

Figura 19 - Índice geoquímico Fator de Contaminação (FC) para os sedimentos de fundo do reservatório de Retiro Baixo



Fonte: O Autor (2024).

A Figura 19 também apresenta o comportamento dos elementos Zn, V, Co, Cu e W em P2, cujas concentrações alcançam valores considerados como grau considerável de contaminação, e alto grau de contaminação para o Cu na camada de 30 cm de profundidade.

7.2 FATOR DE ENRIQUECIMENTO

O método proposto para classificar o nível de contaminação para o índice geoquímico Fator de Enriquecimento (FE) utiliza intervalos específicos que são associados a uma gama de

cores correspondentes, refletindo assim a classificação de contaminação (Tabela 11).

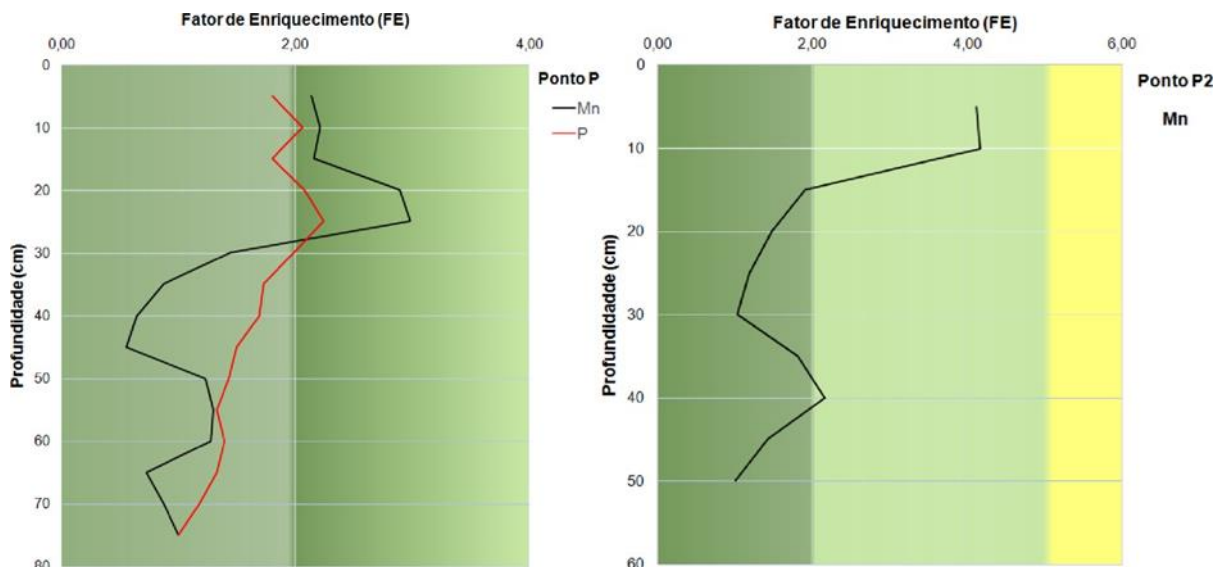
Tabela 11 - Intervalos de classificação e cores correspondentes FE

INTERVALO	CLASSIFICAÇÃO	COR
$FE \leq 2$	Deficiência de enriquecimento	Verde escuro
$2 < FC \leq 5$	Moderado enriquecimento	Verde claro
$5 < FC \leq 20$	Significativo enriquecimento	Amarelo
$20 < FE \leq 40$	Grau alto de enriquecimento	Vermelho
$FE > 40$	Extremamente enriquecido	Preto

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 20 apresenta os resultados do Fator de Enriquecimento (FE) para os principais elementos maiores que sofreram alterações nas amostras de P1 e P2 respectivamente. Os resultados do ponto P3 (zona lacustre ou próxima ao vertedouro) não mostram resultados que aponta alterações, sendo também utilizada a camada mais profunda de deposição como referência de normalização dos dados. Além disso, o elemento Sc foi empregado como elemento de referência para a normalização dos dados, por ser um elemento químico de pouca mobilidade no solo e fracamente associado às atividades humanas.

Figura 20 - Índice geoquímico Fator de Enriquecimento (FE) para os sedimentos de fundo analisados no reservatório de Retiro Baixo



Fonte: O Autor (2024).

As concentrações de Mn e P quando analisadas pelo índice FE atingem valores considerados moderado em P1, onde é observada a evolução do índice desde a base da coluna de sedimento. Em P2 Mn atingem a graduação de moderado enriquecimento.

7.3 ÍNDICE DE GEOACUMULAÇÃO

O método proposto para classificar o nível de contaminação para o Índice de Geoacumulação (Igeo) utiliza intervalos específicos que são associados a uma gama de cores correspondentes, refletindo assim a classificação de contaminação (Tabela 12). A Figura 21 mostra os resultados obtidos para índice de geoacumulação (Igeo) para os principais elementos maiores. O elemento Sc também foi empregado como elemento de referência para a normalização dos dados.

Tabela 12 - Intervalos de classificação e cores correspondentes Igeo

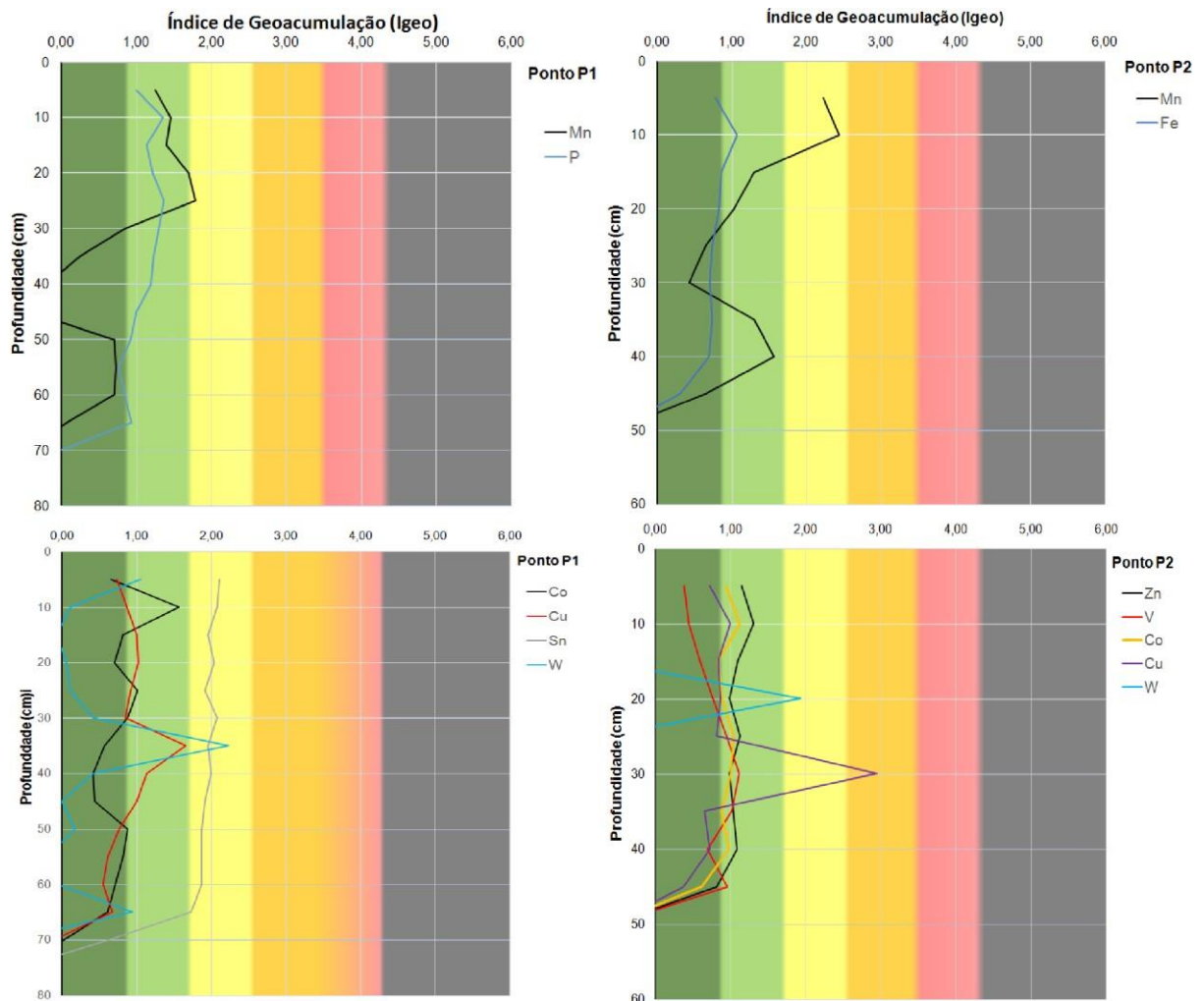
INTERVALO	CLASSIFICAÇÃO	COR
$I_{geo} \leq 0$	Praticamente não contaminado	Verde escuro
$0 < I_{geo} \leq 1$	Pouco contaminado a moderadamente contaminado	Verde claro
$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderadamente contaminado	Amarelo
$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderadamente contaminado a intensamente contaminado;	Laranja
$3 < I_{geo} \leq 4$	Intensamente contaminado	Vermelho
$I_{geo} > 4$	Intensamente contaminado a extremamente contaminado.	Preto

Fonte: O Autor (2024).

O índice Igeo para os elementos Mn e P em P1 demonstram resultados de moderadamente impactado para estes elementos nas camadas mais superficiais. Para os elementos Mn e Fe em P2, observa-se resultados de moderadamente impactado a intensamente nas camadas superficial para o Mn e pouco contaminado a moderadamente contaminado para o Fe.

Para os elementos terras raras e traços em P1. O elemento Co apresentou enriquecimento moderado na camada de 10 cm de profundidade. O Cu apresentou resultado de pouco a moderadamente. O elemento Sn apresentou resultados de moderadamente contaminado a intensamente contaminado para a camada mais superficial. O W apresentou uma amostra classificada como intensamente contaminada, mas que diverge do comportamento de enriquecimento do elemento, sugerindo contaminação pontual.

Figura 21 - Índice de Geoacumulação (Igeo) para os sedimentos de fundo analisados no reservatório de Retiro Baixo



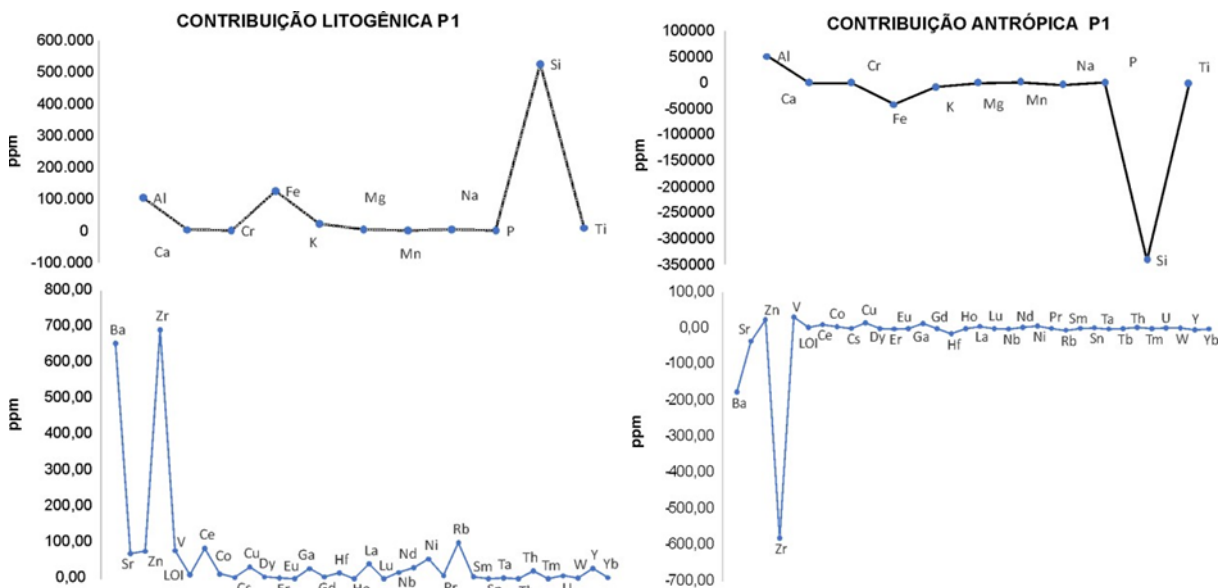
Fonte: O Autor (2024).

Em P2 O elemento Zn apresentou resultado de pouco contaminado à moderadamente contaminada nas camadas superficiais. O elemento V de pouco contaminado a moderadamente contaminado em amostras de 40 a 20 cm de profundidade. O Co apresentou Igeo classificado como pouco contaminado a moderadamente contaminado. O elemento Cu obteve um dado de intensamente contaminado, isolado dos demais, sendo que a grande concentração dos seus dados foi na classe pouco contaminada a moderadamente contaminado. O W apresentou uma amostra classificada como moderadamente contaminada, mas que diverge do comportamento de enriquecimento do elemento, que apresentou resultados de ausência de contaminação.

7.4 CONTRIBUIÇÃO LITOGÊNICA E ANTRÓPICA

O índice geoquímico de contribuição litogênica e antrópica buscam comparar as concentrações dos elementos nas camadas mais profundas e suas variações com relação ao elemento de referência (neste caso o Sc). Na figura 22 abaixo é possível observar o índice geoquímico de contribuição litogênica em P1, onde se espera, que nas camadas superficiais os elementos Al, Fe e Si, ocorram em elevados valores, visto que foi observado este comportamento nas camadas mais profundas do sedimento.

Figura 22 - Índices de contribuição Litogênica e antrópica para elementos maiores, traços e terras raras em P1



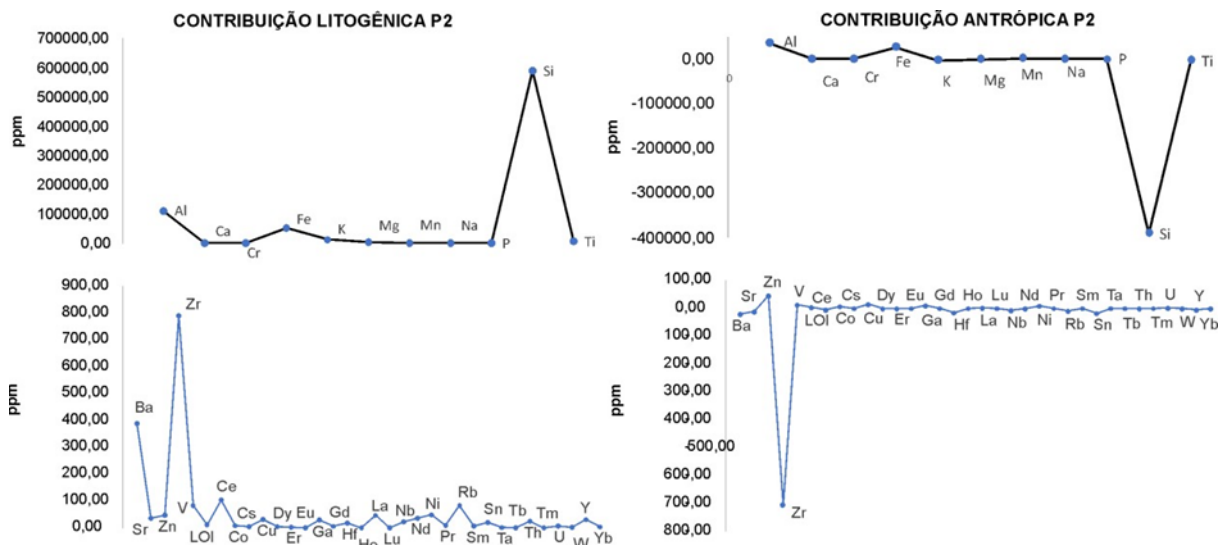
Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 22, o índice contribuição antrópica mostra valores negativos para o elemento Si, que possivelmente ocorre pelo aporte de sedimento menos concentrado neste elemento, depositado mais no topo da coluna de sedimento. Para o elemento Al observou-se um valor positivo, que indica que o Al ocorreu em concentrações mais elevadas que o esperado, devido ao aporte do elemento por sedimentos mais concentrados. Já o elemento Fe ocorreu em uma concentração menor que o esperado, evidenciando aporte de sedimentos menos concentrados. Pelo índice de contribuição litogênica é esperado maiores concentrações dos elementos Ba, Zr e Rb nas camadas mais superficiais do sedimento. O índice de contribuição antrópica é observado com saldo negativo para os elementos Ba e Zr, que era previsto ocorrerem em maiores concentrações, e que assim houve deposição de sedimento menos concentrados destes

elementos.

Na Figura 23 abaixo é mostrado os resultados para os índices considerando os elementos maiores no ponto de amostragem P2. Novamente pelo índice de contribuição litogênica são esperados altos valores para as concentrações de Si, Al e Fe. Sendo observado o saldo negativo para o elemento Si, evidenciando que a deposição mais recente de sedimento é menos concentrada neste elemento. Já o Al e Fe, observados com saldo positivo, são interpretados que os sedimentos depositados no topo da coluna de são mais concentrados nestes elementos que os da base.

Figura 23 - Índices de contribuição Litogênica e antrópica para elementos maiores, traços e terras raras em P2



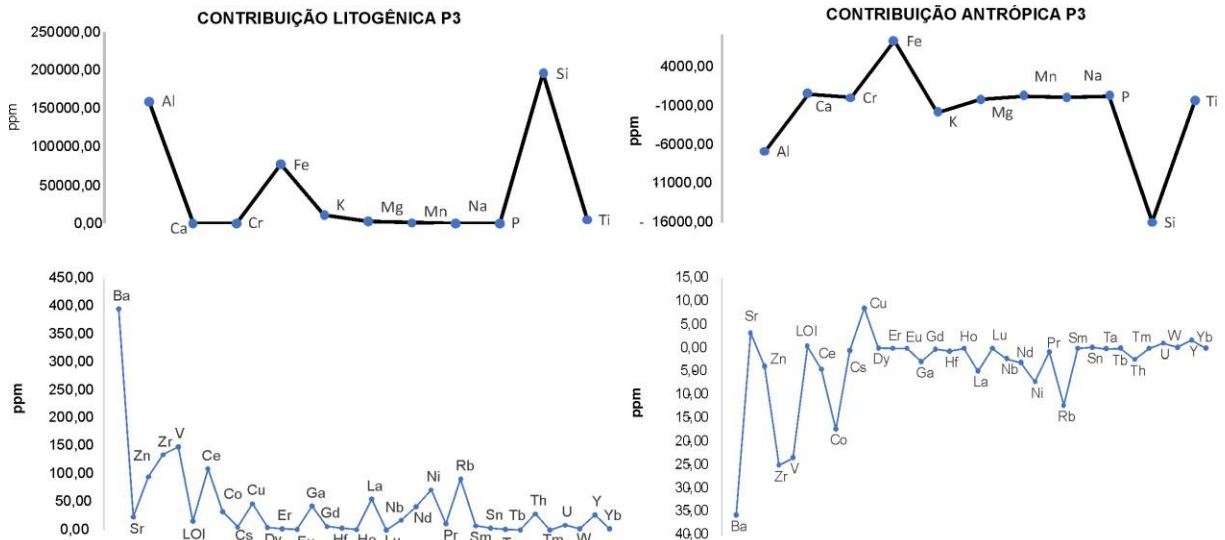
Fonte: O Autor (2024).

Para os elementos Ba, Zr, Ce e Rb, segundo índice contribuição litogênica para P2, são encontrados em maiores concentrações nas camadas profundas dos sedimentos e por isso se espera uma maior concentração destes elementos nas camadas superficiais. O índice de contribuição antrópica revela que o elemento Zr deveria ocorrer em maiores concentrações devido ao saldo negativo, e por isso é a deposição mais recente (topo da coluna de sedimentos) deste elemento deve ser menos concentrada.

Na Figura 24 estão os resultados dos índices para elementos maiores em P3, onde é observado que nas camadas de sedimento mais profundas os elementos Al, Si e Fe são mais abundantes e se espera uma maior concentração destes elementos nas camadas superficiais. O índice de contribuição antrópica revela que era se esperado concentrações maiores para os elementos Al e Si nas camadas superficiais, e que o elemento Fe ocorreu em concentrações

acima do esperado pelo índice.

Figura 24 - Índices de contribuição Litogênica e antrópica para elementos maiores, traços e terras raras em P3



Fonte: O Autor (2024).

Na figura 24 também é mostrado os resultados dos índices onde vários destes elementos ocorreram em concentrações menores que as esperadas, que é o caso dos elementos Ba, Zr, V, Co e Rb, principalmente. O elemento Cu ocorreu em concentrações maiores que as esperadas.

7.5 DISCUSSÃO

Os índices geoquímicos avaliaram as variações de concentração dos elementos na coluna sedimentos, comparando-os com as concentrações observadas no fundo geoquímico natural de referência (camada mais profunda e preservada do sedimento). O índice FC apontou considerável grau de contaminação para os elementos Mn, P, Co e Cu; alto grau de contaminação para W e Sn; em P1. Considerável grau de contaminação para Zn, V, Co; alto grau de contaminação para Mn, Sn e W; em P2. Considerável grau de contaminação para Co em P3.

O índice FE apontou moderado enriquecimento para P, Mn e Sn em P1. Moderado enriquecimento para Mn e significativo enriquecimento para Cu em P2. Já p índice Igeo apontou moderadamente contaminado para Mn, P, Co e Cu, moderadamente a intensamente contaminado para W e Sn em P1. Moderadamente contaminado para Fe, Co, Zn, W e V, e moderadamente a intensamente contaminado para Mn e Cu em P2. Moderadamente a intensamente contaminado para Co em P3.

Os índices de contribuição Litogênica e Antrópica utilizam o Sc como referência, preveem variações de concentrações para os demais elementos, baseados na variação observada para este. Sendo assim, os índices de contribuição Litogênica previram altas concentrações de ocorrência dos elementos Al, Fe, Si, Ba e Zr, principalmente. Em P3 foram observados além destes, outros elementos cujas contribuições Litogênicas são altas, como Zn, V, Ce, Ni e Rb. Destes elementos, o Si e o Zr apresentaram comportamento oposto ao observado para o elemento de referência, onde foi constatada diminuição de suas concentrações da base para o topo da coluna de sedimentos.

O Instituto Mineiro de Águas (IGAM 2023) realizou o monitoramento da qualidade dos sedimentos ao longo do Rio Paraopeba devido ao rompimento da Barragem I da Vale no município de Brumadinho. As concentrações dos elementos obtidos através da análise geoquímica dos sedimentos do reservatório de Retiro Baixo foram comparadas com os valores das concentrações publicadas pelo IGAM (2023):

- As estações de amostragem escolhidas para comparação foram as estações BP036 e BP099, medições de maio de 2022, a primeira localizada no Rio Paraopeba na localidade de Melo Franco e a outra no Rio Paraopeba a montante de sua foz na barragem de Três Marias (o primeiro à montante em relação ao reservatório de Retiro Baixo, e o outro, à jusante)

- Os elementos comparados foram: Al, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Zn e V. As concentrações medianas encontradas para o reservatório de Retiro Baixo são maiores do que os valores encontrados para ambas as estações (BP036 e BP099) para os elementos Al, Cu, Cr, Zn, Ni e V;

- Para o Fe e Mn, as amostras deste estudo se mostraram menos concentradas do que a estação à montante (BP036) e mais concentradas do que a estação a jusante (BP099);

Isso mostra que o perfil de distribuição dos elementos estudados é muito variável e complexo. De forma geral, os sedimentos do reservatório são mais concentrados do que os dos cursos d'água, pois há acumulação e convergência do fluxo hídrico pelo e para o barramento, e consequentemente, devido à menor energia de escoamento disponível nos reservatórios, aumenta-se a taxa de sedimentação das partículas.

Contudo, verifica-se que há maiores concentrações dos elementos Fe e Mn na amostragem à montante do Reservatório de Retiro Baixo, mostrando que algumas regiões da bacia contribuem de forma mais relevante com o aporte de determinados elementos. As elevadas concentrações observadas na estação de Melo Franco (BP036) demonstram um alta contribuição geogênica e/ou antropogênica à montante do local do rompimento da barragem I da Vale, e representa condições do meio não alteradas pelo evento, e que ainda assim são

maiores que as concentrações do elemento em questão no reservatório de Retiro Baixo, mesmo quando os índices de contribuição apontam para significativo enriquecimento do elemento.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização geológica e geomorfológica da bacia revela uma grande variedade de domínios geológicos com depósitos minerais associados, incluindo minério de ferro, ouro, cobre e manganês. Além disso, a análise fisiográfica revela diferenças significativas nas características das sub-bacias, incluindo a capacidade de infiltração de água, densidade de drenagem e dissecação do relevo, que influenciam diretamente na dinâmica de formação dos sedimentos. Destaca-se também o uso da terra como a agricultura, mineração, indústrias e ocupação urbana, que têm o potencial de aumentar a contribuição de elementos químicos associados a essas atividades, resultando em alterações na qualidade dos recursos hídricos.

A análise geoquímica dos sedimentos de fundo do Reservatório de Retiro Baixo revela concentrações elevadas de alguns elementos, incluindo Mn, P, Cu, Co, V, W e Sn. Esses resultados indicam alterações nas concentrações consideradas naturais de alguns elementos, uma vez que algumas dessas concentrações (Cr, Ba, Ni, Co e Cu) estão acima dos limites guia de referência, o que pode representar riscos para a saúde humana e a biota aquática. Especificamente, o elemento Ba ocorre nessas concentrações mesmo no fundo geoquímico natural de referência, evidenciando que sua concentração natural na área é elevada e acima dos limites guia de referência.

A análise dos elementos terras raras revela um padrão de enriquecimento dos elementos terras raras leves (ETRL) em relação às terras raras pesadas (ETRP), o que é típico de processos de intemperismo. No entanto, as camadas mais profundas dos sedimentos mostram um menor grau de intemperismo, indicando que essas camadas podem refletir melhor as características geoquímicas naturais da região.

A caracterização geoquímica do sedimento de fundo do reservatório pode ser utilizada como uma ferramenta para monitorar a qualidade do reservatório e identificar possíveis fontes de contaminação. Os resultados também podem subsidiar a elaboração de políticas públicas voltadas para a gestão e preservação dos recursos hídricos, com isso, sugere-se futuras pesquisas e estratégias de monitoramento dos sedimentos de fundo na região do reservatório de Retiro Baixo.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, A. **Química e tecnologia das terras-raras**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1994. (Série Tecnologia Mineral, n. 66)
- ALKMIM, F. F. de; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil : evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, [s. l.], v. 90, n. 1-2, p. 29-58, jun. 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926898000321>>. Acesso em: 05 dez. 2022.
- ALVES, J. M. de P.; CASTRO, P. T. A. Influência das feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n.2, p. 117-124, 2003. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9821>>. Acesso em: 07 out. 2023.
- AMARAL, F. C. S. do; SANTOS, H. G. dos; AGLIO, M. L. D.; DUARTE, M. N.; PEREIRA, N. R.; OLIVEIRA, R. P. de; CARVALHO JUNIOR, W. de. **Aptidão agrícola das terras do Estado de Minas Gerais: revisão e atualização**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004.
- ANA. **Portal da Qualidade das Águas. Agência Nacional de Águas**, 2022. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/default.aspx>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- ARAIN, M. B.; KAZI, T. G.; JAMALI, M. K.; JALBANI, N.; AFRIDI, H. I.; SHAH, A. Total dissolved and bioavailable elements in water and sediment samples and their accumulation in *Oreochromis mossambicus* of polluted Manchar Lake. **Chemosphere**, [s. l.], v. 70, p. 1845-1856, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR1004**: Resíduos – Classificação Mineração – Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR13028**: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2006.
- ASTON, S.R.; BRUTY, D.; CHESTER, R.; PADGHAM, R.C. Mercury in lake sediments: A possible indicator of technological growth. **Nature**, [s. l.] v. 241, p. 450-451, 1973.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- BAPTISTA, Marcos Cristóvão *et al.* Aspectos Gerais do Meio Físico. *In*: MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. (Org.), **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2010, Cap. 2, p. 17-34. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/Geodiversidade_MG.pdf>. Acesso em 27 abr. 2023

BAUDO, R.; GIESY, J.P.; MUNTAU, H. **Sediments: chemistry and toxicity of in place pollutants**. Boston: Lewis Publishers, Ann Arbor, MI, 1990.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação**. Florianópolis: UFSC, 1994.

BERTOLINI, W. Z.; DEODORO, S. C. Estudo da dissecação do relevo no Alto Rio Piranga (MG). **Geociências**, [s. l.], v. 37, 2018.

BEVILACQUA, J. E.; SILVA, I. S.; LICHTIG, J.; MASINI, J. C. Extração seletiva de metais pesados em sedimentos de fundo do rio Tietê, São Paulo. **Química Nova**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 26-33, 2009.

BIGARELLA, J. J. *et al.* **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais: 2. ed.** Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007.

BONAI, N. C.; SOUZA-FRANCO, G. M.; FOGOLARI, O.; MOCELIN, D. J. C.; DAL MAGRO, J. Distribution of metals in the sediment of the Itá Reservoir, Brazil. **Acta Limnol. Bras.**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 245-250, 2009.

BORSATO, Flávio Henrique. **Caracterização física das bacias de drenagem do município de Maringá e os postos de combustíveis como potenciais poluidores**. 2005. Dissertação (Mestrado em Análise Regional e Ambiental) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

BORSATO, F.H.; MARTONI, A.M. Estudo das fisiografias das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences** Maringá. v. 26, n. 2, 2004. Disponível em: file:///C:/Users/guilh/Downloads/1391-4141-1-PB.pdf. Acesso em: 16 ago. 2022.

BOYD, K.F.; SCHUMM, S.A. Geomorphic evidence of deformation in the Northern part of the New Madrid seismic zone. *In*: SCHEDLOCK, K.M.; JOHNSTON, A.C. (eds.) **Investigations of the New Madrid seismic zone**. U.S. Geol. Survey Professional Paper. 1995.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 454, de 1 de novembro de 2012**. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional, 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=693>. Acesso em: 15 ago. 2023.

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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, v. 1, p. 58-63, 2005.

BROWN, P. H.; RATHJEN, A. H.; GRAHAM, R. D.; TRIBE, D. E. Rare earth elements in biological systems. *In*: GSCHNEIDNER Jr., K.A.; EYRING, L. (ed.). **Handbook on the**

Physics and Chemistry of Rare Earths. Amsterdam: Elsevier, 1990. v. 13, chap. 92, p. 423-453.

CAMPANHARO, Wesley Augusto. **Diagnostico físico da bacia do rio Santa Maria do Doce-ES**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2010.

CARVALHO, Alex de. **Processos morfogenéticos e condicionantes associados aos eventos de entulhamento dos fundos de Vales de afluentes do médio/baixo rio Paraopeba/MG**. 2014. Dissertação (Mestrado em Análise Ambiental) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2014.

CASARINI, Daniela Corbetta Peres. Proposta de valores de referência de qualidade e intervenção para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo. *In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE QUALIDADE DE SOLOS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2.*, 2000, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: CETESB, 2000. 165p.

CASTOR, S.B.; HEDRICK, J.B. **Rare Earth Elements**. Littleton, Colorado: Industrial Minerals Volume, 7th Edition, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006.

CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo-GO, através de técnica de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Scientia Plena**, [s. l.], v. 5, n. 2, 2009.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **CBH do Rio Paraopeba (SF3)**. Minas Gerais, 2021. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/2017/comites-de-afluentes/cbh-do-rio-paraopeba-minas-gerais/>. Acesso em: 30 maio 2021.

CCME - Canadian Council of Ministers of the Environment. **Protocol for the derivation of Canadian Sediment quality guidelines for the protection of aquatic life**. Ottawa, CCME, 1995.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Lista de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas**. São Paulo, 2014.

CHAVES, Antônio Oliveira. **Exames de diques máficos proterozóicos da porção meridional do Cráton do São Francisco (MG, Brasil): mapeamento, petrografia, geoquímica, geocronologia, petrogênese e geodinâmica de intrusão**. 1996. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, UFMG, Belo Horizonte, MG, 1996.

CHENG, Y.; HE, C.; RAO, G.; YAN, B.; LIN, A.; HU, J.; YU, Y.; YAO, Q. Geomorphological and structural characterization of the southern Weihe Graben, central China: Implications for fault segmentation. **Tectonophysics**, [s. l.], v. 722, p. 11-24, 2018.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**, v. 4, n. 8, p. 23-42, 1979.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1974.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS - CODEMIG. **Portal da Geologia**, 2019. Disponível em: www.portalgeologia.com.br. Acesso em: 25 jul. 2021.

COSTA, Antônio Tadeu. **Registro histórico de contaminação por metais pesados, associadas à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do Ribeirão do Carmo, QF: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais**. 2007. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

COTTA, J.A.O.; REZENDE, O.O.M.; PIOVANI, M.R. Avaliação do teor de metais em sedimento do rio Betari no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira – Petar, São Paulo, Brasil. **Química Nova**, [s. l.] v. 29, p. 40-45, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422006000100009>. Acesso em: 15 ago. 2022.

COTTON, S. **Lanthanide and Actinide Chemistry**. Uppingham, Rutland, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2006.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. Companhia de pesquisa de recursos minerais – **Serviço geológico do Brasil monitoramento especial da bacia do Rio Paraopeba**, [s. l.], 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. Superintendência Regional de Belo Horizonte. **Regionalização de vazões sub-bacias 40 e 41**, Convênio 015/2000 ANEEL – 013/CPRM/2000, Relatório Final. Belo Horizonte, 2001.

CROCK, J.G., SEVERSON, R.C., GOUGH, L.P. Determining baselines and variability of elements in plants and soils near the Kenai National Wildlife Refuge Alaska. **Water, Air, and Soil Pollution**, Netherlands, v. 63, n. 3/4, p. 253-271, 1992.

DERÍSIO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 2 ed. São Paulo: Signus, 2007.

DORR, J.V.N. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **USGS. Prof. Pap.** 641 - A, Washington. 1969.

DURÃES, Marília Ferreira. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. 2010. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

ETTER, Ana Flávia Velloso *et al.* Grupo Maquiné na região da Serra do Caraça, quadrilátero ferrífero, MG. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*, 8., 2003, São Pedro. **Anais [...]** São Pedro: SBG-Núcleos São Paulo e Rio de Janeiro/Espírito Santo, p.25, 2003.

EVENSEN, N. M.; HAMILTON, P. J.; O'NIONS, R. K. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, UK, vol. 42. Pergamon Press Ltd, pp. 1199 – 1212, 1978.

FADIGAS, F. de S. *et al.* Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 10, n.3, p. 699-705, 2006.

FÉBOLI, W.L.; Complexo Belo Horizonte. *In: TULLER, M.P; RIBEIRO, J.H; SIGNORELLI, N; FÉBOLI, W.L. ; PINHO J.M.M. (orgs).* 2010. **Projeto Sete Lagoas Abaeté, Estado de Minas Gerais: texto explicativo.** Belo Horizonte. CPRM, 2010. cap. 4.2.1, p. 28-30.

FERREIRA, A. P.; HORTA, M. A. P.; CUNHA, C. L. N. Avaliação das concentrações de metais pesados no sedimento, na água e nos órgãos de *Nycticorax nycticorax* (Garça-da-noite) na Baía de Sepetiba, RJ, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 2, p. 229-241, 2010.

FRANÇA, Geraldo Veloso. **Interpretação fotográfica de bacias e redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba.** 1968. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1968.

FRANKLIN, Ricardo Luiz. **Determinação de mercúrio total e orgânico e avaliação dos processos de metilação e desmetilação em sedimentos do Reservatório Rio Grande, Estado de São Paulo.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Plano para incremento do percentual de tratamento de esgotos sanitários na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.** Belo Horizonte: FEAM, 2011.

GAILLARDET, J.; VIERS, J.; DUPRÉ, B. Trace Elements in River Waters. *In* J. I. Drever (Ed.), **Treatise on Geochemistry, Surface and Groundwater, Weathering and Soils.** Amsterdam: Elsevier. 2003.

GALUSZKA, A. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland. **Environmental Geology**, [s. l.], v. 52, p. 861-870, 2007.

GERASIMOVSKY V. I. Geochemistry of rare earth elements. **International Geology Review**, [s. l.], 1959.

GOUGH, L.P. **Understanding our fragile environment.** Lessons from geochemical studies. United States Geological Survey Circular, [s. l.], v. 1105, 1993.

GREENWOOD, N. N.; EARNSHAW, A. **Chemistry of the elements.** 2nd ed. New York: Pergamon Press, 1984.

GROMET L.P., DYMEK R.F., HASKIN L.A., KOROTEV R.L. The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [s. l.], 48: p. 2469-2482, 1984.

GSCHWEND, P.M., HITES, R.A. Fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons to marine and lacustrine sediments in the northeastern US. **Geochimica Cosmochimica Acta**, [s. l.], v. 45, p. 2359- 2367, 1981.

HACK, J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal of Research of the United States Geological Survey**, [s. l.], v.1, n. 4, p. 421-429, 1973.

HAKANSON, L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control a Sedimentological Approach. **Water Research**, [s. l.], 14, 975-1001, 1980.

HENDERSON, P. (ed.). **Rare earth element geochemistry.** Amsterdam: Elsevier, 1984. (Developments in Geochemistry, v. 2).

HENDERSON, P. A. **Main group chemistry.** Oxford: Oxford University Press, 1996.

HOLBROOK, J.; SCHUMM, S.A. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogeny deformation in modern and ancient settings. **Tectonophysics**, [s. l.], v. 305, p. 287-306, 1999.

HORTON, R. E. Drainage basin characteristics. **American Geophysical Union**, [s. l.] v.13, n.1, p.350-361, 1932. Disponível em: doi: 10.1029/TR013i001p00350. Acesso em: 15 ago. 2022.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. **The Geological Society of America**, [s. l.], v.56, n.2, p.275-370, 1945. Disponível em: doi: 10.1177/030913339501900406. Acesso em: 15 ago. 2022.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER - IARC – **Arsenic, metals, fibers and dusts: a review of carcinogens.** [s. l.], v. 100 C. IARC Monographs, 526p., 2012. Disponível em: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/mono100C.pdf>. Acesso em: 25 maio 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual Técnico de Geomorfologia** (2ª ed.). Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Manuais Técnicos em Geociências, n. 4. Rio de Janeiro, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico 2020**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 maio 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE ÁGUAS - IGAM - **Avaliação da qualidade dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba, após o desastre na Barragem B1 no município, informativo 8 de maio de 2023**. [s. l.], 2023

INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DE MG. **IDE SISEMA MG**, 2022. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 21 maio 2022.

IUPAC (Union of Pure and Applied Chemistry). **Nomenclature of inorganic chemistry**. The Royal Society of Chemistry, [S. l.], 2005.

JESUS, Thiago Alves de. **Avaliação do histórico de impactos antrópicos na bacia de drenagem do Lago das Garças (São Paulo-SP), durante o século XX, com base nos estoques de nutrientes, metais pesados e compostos orgânicos em sedimento lacustre**. 2008. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 2001.

KUCUKSEZGIN, F.; ULUTURHAN, E.; BATKI, H. Distribution of heavy metals in water, particulate matter and sediments of Gediz River (eastern Aegean). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 141, p. 213-225, 2008.

LANA, C. E.; ALVES, J. M. de P.; CASTRO, P. T. A. Análise morfométrica da bacia do Rio do Tanque, MG - BRASIL. REM: **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 2, p. 121-126, 2001.

LANZA, Daniela Aparecida. **Mapeamento, Caracterização e Correlação de Superfícies de Aplainamento no Leste de Goiás, Norte de Minas Gerais e Oeste da Bahia**. 2012. 42f. Monografia (Graduação em Geografia) – UNICAMP – São Paulo, 2012.

LAPIDO-LOUREIRO F. E. **Terras Raras no Brasil: Recursos identificados, reservas. Estudos e documentos**. MCT/CNPq/CETEM, Rio de Janeiro, 1994.

LEMES, Maria José Lemes. **Avaliação de metais e elementos-traço em águas e sedimentos das bacias hidrográficas dos rios Mogiguaçu e Pardo, São Paulo**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares. São Paulo - SP, 2001.

LIMA, M.I.C. **Manual de análise de drenagem e seu significado geomorfológico e geológico**. Belém, PA: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2002.

LOLLO, João Alberto. **O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de**

elaboração do mapeamento geotécnico: sistematização e aplicação na quadrícula de Campinas. 1995. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

LOSKA, K, WIECHULA, D., KORUS, I. Metal contamination of farming soils affected by industry. **Environment International**, [s. l.], v30, 159-165, 2004.

LOSKA, K., CEBULA, J., PELCZAR, J., WIECHULA, D., KWAPULISKI, J. Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. **Water, Air and Soil Pollution**, [s. l.], 93, 347-365, 1997.

LOSKA, K., WIECHULA, D., BARSKA, B., CEBULA, E., CHOJNECKA, A. Assessment of Arsenic Enrichment of Cultivated Soils in Southern Poland. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v.12 n. 2, p 187-192, 2003.

MARTIN, J. M.; MEYBECK, M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v. 7, p. 173-206, 1979.

MCBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994.

MILLER, V. C. **A Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee**. Project NR 389-402, Technical Report 3. Columbia University, Department of Geology, ONR Geography Branch, New York, 1953.

MORTATTI J.; PROBST J.L.; BORTOLETTO JUNIOR, M.J. Piracicaba River basin: mechanical and chemical erosions. **UNESP Geociências**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 75-81, 2003.

MÜLLER, P.J; SUESS, E. Bulk sediment parameter of surface sediment samples. **Pangaea**, [s. l.], 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.53274>. Acesso em: 5 out. 2023.

NÍMER, E. Um Modelo Metodológico da Classificação de Climas. **Revista Brasileira de Geografia**, [s. l.], v. 41 n. 4., p. 59-8, 1979.

OUCHI, S. Response of alluvial rivers to slow active tectonic movement. **Geological Society of America Bulletin**, [s. l.], v. 96, p.504-515, 1985.

PEDRAZZI, F. J. M.; CONCEIÇÃO, F. T.; SARDINHA, D. S.; MOSCHINI-CARLOS, V.; POMPÊO, M. Avaliação da qualidade da água no reservatório de Itupararanga, Bacia do Alto Sorocaba (SP). **Revista Geociências**, [s. l.], v. 33, n. 1, 2014.

PEREZ-FILHO, Archimedes *et al.* Geomorfologia antropogênica: reativação da rede de drenagem e processos erosivos relacionados à construção civil. *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA*, 6., 2006, Goiânia. **Anais** [...]. Goiânia, 2006.

PERILLO, Marcelo. **Geologia, petrografia e geoquímica do Maciço Granitoide de Florestal**. 1998. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências/UFMG. Belo Horizonte, 1998.

PIEDADE, Gustavo Chiesura Rosa. **Evolução de voçorocas em bacias hidrográficas do município de Botucatu, SP**. 1980. 161 f. Tese (Livre-Docência) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 1980.

PIERZYNSKI, G. M.; SIMS, J. T.; VANCE, G. F. **Soils and environmental quality**. Lewis Publishers, Boca Raton, 1994.

PIKE, R.J.; WILSON, S. E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. **Geological Society of America Bulletin**, [s. l.], v.82, p. 1079-1084, 1971.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. 1ª ed. São Paulo: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

PLUMLEE, G.S. **The environmental geology of mineral deposits**. In: PLUMLEE, G.S., LOGSDON, J.J. (eds.). The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A, Processes, Techniques, and Health Issues. Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology, [s. l.], v. 6A, 1999.

PORTO, R. L. L.; BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W. **Hidrologia ambiental**. v.3. São Paulo: Edusp: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991.

REIMANN, C., GARRET, R.G. Geochemical background - concept and reality. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 350, p. 12-27, 2005.

REIMANN, C., FILZMOSE, P., GARRETT, R.G., Background and threshold: critical comparison of methods of determination. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 346, p. 1-16, 2005.

RICHARDSON, D.H.S. **Pollution monitoring with lichens**. Slough, England: Richmond Publishing Co. Ltd. 1992.

ROMANO, A. W.. **Programa Geologia do Brasil:folha SE.23-Z-C-IV – Pará de Minas**. UFMG/CPRM, Belo Horizonte, Folha Pará de Minas, 1:100.000 (Mapa), 2007.

SANTOS, J. S.; SANTOS, M. L. P.; OLIVEIRA, E. Estudo da mobilização de metais e elementos traços em ambientes aquáticos do semi-árido brasileiro aplicando análises de componentes principais. **Química Nova**, [s. l.], v. 31, n. 5, p. 1107-1111, 2008.

SCHÜLER, D.; BUCHERT, M.; LIU, R.; DITTRICH, S.; MERZ, C. **Study on Rare Earths and Their Recycling - Final Report**. The Greens/EFA Group in the European Parliament, [S. l.], 2011. Disponível em: <[http://www.ressourcenfieher.eu/publications/reports/Rare earths study_Oeko-Institut_Jan 2011.pdf](http://www.ressourcenfieher.eu/publications/reports/Rare%20earths%20study_Oeko-Institut_Jan%202011.pdf)>. Acesso em: 11 set. 2023.

SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New

Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, p. 597-646, 1956.

SCHUMM, S.A. Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains. **Geological Society of America Bulletin**, [s. l.], v. 74, p. 1089-1100, 1963.

SERAFIM-JÚNIOR, M.; PERBICHE-NEVES G.; BRITO, L.; GHIDINI, A.R.; CASANOVA, S.M.C. Variação espaço-temporal de Rotifera em um reservatório eutrofizado no sul do Brasil. **Iheringia, Sér. Zool.** [s. l.], 100 (3), 2010.

SHOTYK W., BLASER P., GRÜNIG A., CHEBURKIN A. K. A new approach for quantifying cumulative, anthropogenic, atmospheric lead deposition using peat cores from bogs: Pb in eight Swiss peat bog profiles. **The Science of the Total Environment**, [s. l.]; 249: 281-295, 2000.

SINHA-ROY, S. Hypsometry and landform evolution: Hypsometry and landform evolution: a case study in the Banas Drainage Basin, Rajasthan, with implications for Aravalli uplift. **Journal Geological Society of India**, [s. l.], v. 60, p.7-26, 2002.

SMITH, K.G. Standards for grading texture of erosional topography. **American Journal of Science**, [s. l.], v.248, p.655-68, 1950.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. London: Academic Press, 2003.

SPARKS, D. L. Elucidating the fundamental chemistry of soils: past and recent achievements and future frontiers. **Geoderma**, [s. l.], 100: p. 313-319, 2001.

STRAHLER, A. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. *In*: CHOW, V. (ed). **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw Hill, 1964.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, [s. l.], v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.

STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. New Halen: Transactions: **American Geophysical Union**, [s. l.], v.38. p. 913-920, 1957.

SUN, S. S. Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [s. l.], v. 46, p. 179–192, 1982.

SZEFER, P.; SKWARZEC, B. Distribution and possible sources of some elements in the sediment cores of the southern Baltic. **Marine Chemistry**, [s. l.], v. 23, p. 109–129, 1988. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203\(88\)90026-6](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4203(88)90026-6). Acesso em: 15 ago. 2022.

TARDY, Y. Characterization of the Principal Weathering Types by the Geochemistry of Waters from Some European and African Crystalline Massifs. **Chemical Geology**, [s. l.], 7, 253-271, 1971.

TAYLOR, S.R.; MCLENNAN, S.M. **The continental crust: its composition and evolution**. Oxford, UK: Blackwell, 1985.

TEIXEIRA, W.; CANZIAN, F. A evolução tectonotermal proterozóica do cráton do São Francisco, com base em interpretações geocronológicas K-Ar em rochas do seu embasamento. **Boletim. IG-USP. Série Científica**, [s. l.], v. 25, p. 61-80, 1994.

TOBIAS, F.J., BECH, J., ALGARRA, P.S. Establishment of the background levels of some trace elements in soils of NE Spain with probability plots. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 206, p. 255-265, 1997.

TOBIAS, F.J., BECH, J., ALGARRA, P.S. Statistical approach to discriminate background and anthropogenic input of trace elements in soils of Catalonia, Spain. **Water, Air, and Soil Pollution**, Netherlands, v. 100, p. 63-78, 1997.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; ALVARES, C. A.; RIBEIRO, S.; LEITE, F. P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões - MG. **Revista Árvore**, [s. l.], v.30, n.5, p.849-857, 2006.

TULLER, M. P.; RIBEIRO, J. H.; SIGNORELI, N.; FÉBOLI, L.; PINHO, J. M. M.. **Programa Geologia do Brasil: Projeto Sete Lagoas – Abaeté**. Belo Horizonte: CPRM, 2010.

TUNDISI, J.G.; TUNDISI-MATSUMURA, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

TUREKIAN, K. K.; WEDEPOHL, K. H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. **Geological Society of America Bulletin**, New York, v. 72, p. 175- 192, 1961.

VERÍSSIMO, M. E. Z.; NOVO, E. M. L. M. ; VERÍSSIMO, C. U. V. Estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Passaúna-PR, através de Parâmetros Morfométricos da Rede de Drenagem. **Revista de Geologia**. Fortaleza-CE, Vol. 9, p. 97-109, 1996.

VIEIRA, Sidney Rodrigues; CAMARGO, Otávio Augusto de. Variabilidade espacial de propriedades químicas do solo dentro de uma parcela experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 1991, Porto Alegre, RS. **Anais[...]** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 321 p., 1991.

VIERS, J., DUPRÉ, B., GAILLARDET, J. Chemical composition of suspended sediments in world Rivers: new insights from a new database. **Science of the Total Environment**. [s. l.], 407, 853– 868, 2009.

VIGLIO, E. P. **Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco**. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mcgraw Hill, 1975.

VILLENEUVE, J.P., HOLM, E. Atmospheric background of chlorinated hydrocarbons studied in Swedish lichens. **Hemosphere**, [s. l.], v. 13, p. 1133-1138, 1984.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. v. 1.

WANG, H.K. Research methodology for determining background levels of trace elements in Chinese soils. **Environmental Geochemistry and Health**, [s. l.], special issue, p.397-413, 1994.

YU, X.; YAN, Y.; WANG, WX. The distribution and speciation of trace metals in surface sediments from the Pearl River Estuary and the Daya Bay, Southern China. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 60, n. 8, p. 1364-1371, 2010.