



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Transporte fluvial de sedimentos e nutrientes a montante do Reservatório da Hidrelétrica Caconde, bacia do Alto Rio Pardo (MG)

Rafaela Inês dos Reis¹, Diego de Souza Sardinha²

¹O texto é parte da dissertação de mestrado, defendida pela primeira autora e orientada pelo segundo autor, no Curso de Mestrado em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Alfenas (Unifal). E-mail: rafaelareis30@outlook.com. ²Professor Associado da Universidade Federal de Alfenas (Unifal), lotado no Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Laboratório de Ecossistemas Aquáticos e Solos (LEAS) do Campus de Poços de Caldas (MG). E-mail: diego.sardinha@unifal-mg.edu.br (autor correspondente).

Artigo recebido em 25/11/2020 e aceito em 04/05/2021

RESUMO

Um dos principais mecanismos de perda de nutrientes ocorre por meio da erosão hídrica do solo. Como o Rio Pardo é o principal afluente do Reservatório da Hidrelétrica Caconde, utilizado para geração de energia elétrica, captação de água, pesca e lazer, este trabalho avaliou o transporte fluvial de sedimentos e nutrientes à montante deste. Para isso, as águas foram monitoradas uma vez por mês, entre maio de 2018 a abril de 2019 para os seguintes parâmetros, temperatura, pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, turbidez, nitrato, fosfato, sulfato, sólidos totais (ST), dissolvidos (STD) e em suspensão (STS). Os resultados demonstram que a bacia apresenta qualidade da água dentro dos padrões para a maioria dos parâmetros analisados, no entanto, para pH nos meses de junho (5,1) e abril (5,4) e oxigênio dissolvido nos meses de maio (3,0 mg/L) e setembro (4,6 mg/L) as concentrações estão abaixo do limite permitido. As rochas da bacia não possuem grande quantidade de nitrato, fosfato e sulfato em sua composição mineralógica, no entanto, a aplicação de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e sulfatados em áreas agrícolas podem contribuir com a remoção de partículas e íons do solo influenciando no transporte fluvial anual de sedimentos (STD = $24,0 \times 10^3$ t, STS = $41,8 \times 10^3$ t e ST = $65,9 \times 10^3$ t) e nutrientes ($\text{NO}_3^- = 3,0 \times 10^3$ t, $\text{SO}_4^{2-} = 5,6 \times 10^3$ t e $\text{PO}_4^{3-} = 480$ t). Estes elementos quando adentram em um ambiente lântico, podem ocasionar efeitos adversos como assoreamento e eutrofização, diminuindo o volume e a qualidade da água utilizável.

Palavras-chave: deflúvio, escoamento de base, transporte específico, diluição, uso do solo.

Sediments and nutrients fluvial transport upstream Caconde Hydroelectric Dam, Alto Rio Pardo (MG) basin

ABSTRACT

One of the main mechanisms of nutrient loss in the soil occurs through water erosion. As the Pardo River is the main tributary for Caconde Hydroelectric Reservoir, used for electricity generation, water collection, fishing and recreation, this work evaluated sediments and nutrients fluvial transport upstream the reservoir. Thus, waters were monitored once a month, between May 2018 and April 2019 for the following parameters, temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, turbidity, nitrate, phosphate, sulfate, total solids (TS), dissolved (TDS) and in suspension (TSS). The results demonstrate that the basin presents water quality within the standards for most of the analyzed parameters, however, for pH in June (5.1) and April (5.4) and dissolved oxygen in May (3.0 mg.L^{-1}) and September (4.6 mg.L^{-1}) concentrations were below the permitted limit. The basin rocks doesn't present large amounts of nitrate, phosphate and sulfate in their mineralogical composition, however, nitrogen, phosphates and sulfates fertilizers application in agricultural areas can contribute to the particles and ions removal from the soil, therefore influencing sediments (STD = 24.0×10^3 t, STS = 41.8×10^3 t and ST = 65.9×10^3 t) and nutrients ($\text{NO}_3^- = 3.0 \times 10^3$ t, $\text{SO}_4^{2-} = 5.6 \times 10^3$ t and $\text{PO}_4^{3-} = 480$ t) annual river transport. These elements, in a lentic environment, can cause adverse effects such as siltation and eutrophication, decreasing volume and quality of the usable water.

Keywords: defluvium, river base flow, specific transport, dilution, land use.

Introdução

A modificação da paisagem para o desenvolvimento das mais diversas atividades urbanas, agrícolas e de geração de energia por hidroeletricidade, tem gerado impactos positivos e negativos. Como impactos positivos, pode-se citar o aumento na produção de alimentos, qualidade e bem estar da população, geração de empregos, dentre outros. Por outro lado, estas atividades também podem gerar impactos negativos sobre os mananciais e reservatórios, principalmente pela produção e transporte de sedimentos e nutrientes.

Os processos hidrogeoquímicos de uma bacia hidrográfica são influenciados diretamente pelo uso da terra, gerando sérios problemas, como perda de quantidade e qualidade da água por assoreamento e eutrofização. Dentre a perda de mananciais, destaca-se a dos recursos hídricos armazenados em reservatórios que se manifesta pela queda da qualidade das águas, devida à poluição, bem como pela diminuição do volume armazenado, devido ao assoreamento (Cabral e Filho, 2018; Calado et al., 2020; Anjinho et al., 2020; Rocha et al., 2020). Segundo Araújo et al. (2018) a eutrofização pode acarretar a deterioração dos ecossistemas aquáticos, e seu controle implica no emprego de diferentes técnicas de manejo e recuperação que devem ser aplicadas tanto na totalidade da bacia hidrográfica quanto no reservatório que se deseja recuperar.

Muitos estudos têm relacionado a qualidade da água superficial com a erosão do solo, mostrando que um dos principais mecanismos de perda de nutrientes dos ambientes ocorre por meio da erosão hídrica do solo, uma vez que eles são transportados pela enxurrada, podendo estar associados aos sedimentos suspensos ou dissolvidos na água (Braga et al., 2018; Sardinha et al., 2019; Félix-Faure et al., 2019; Melo et al., 2020; Libânio e Sardinha, 2020; Degrande et al., 2020; Martins et al., 2020).

Diante do exposto, faz-se necessário, além da avaliação do aporte de sedimentos e nutrientes, analisar a dinâmica da bacia hidrográfica por meio de estudos de suas características físicas, morfológicas e hidrológicas e de parâmetros de qualidade das águas superficiais, além disto, deve-se avaliar os impactos dos diferentes usos da terra (Alves et al., 2019; Rodrigues et al., 2019; Souza et al., 2020; Bifano et al., 2020; Okumura et al., 2020; Sousa et al., 2021; Quinelato et al., 2021).

A bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (BHARP) possui uma área de 2.451,13 km² e está localizada na mesorregião geográfica sul-sudoeste de Minas Gerais, abrangendo os municípios de Ipuúna, Santa Rita de Caldas, Caldas, Andradas,

Poços de Caldas, Bandeira do Sul, Campestre e Botelhos, até desaguar no Reservatório da Hidrelétrica Caconde, estado de São Paulo. O Rio Pardo é o principal afluente do Reservatório, utilizado para geração de energia elétrica, captação de água, pesca e lazer. A qualidade da água é o reflexo do uso e ocupação da terra, e, atividades agropecuárias, crescimento demográfico e adensamento populacional são atividades que compõem a bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo.

Com isso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o transporte fluvial de sedimentos e nutrientes, à montante do Reservatório da Hidrelétrica Caconde (SP) visando identificar se o uso da terra ao longo da bacia pode afetar de maneira significativa os usos múltiplos deste importante reservatório utilizado para geração de energia elétrica, atividades turísticas e captação de água para abastecimento.

Material e métodos

Caracterização fisiográfica e morfométrica

Para a caracterização fisiográfica, foram levantados dados sobre a litologia, pedologia, uso e ocupação do solo, hidrografia, altimetria e declividade, sendo utilizados os softwares Quantum GIS 2.18 with GRASS 7.0.5 e Google Earth Pro para tratamento das imagens e geração de mapas. Visitas de campo foram realizadas com a finalidade de verificar, atualizar e validar as classes de relevo e usos do solo, utilizando equipamento GPS (Global Positioning System) modelo Garmin (Map 62S).

O mapa litológico foi gerado a partir de arquivos disponibilizados pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, folhas Caldas, Poços de Caldas, Ouro Fino e Andradas, em escala 1:100.000 (CODEMIG, 2019). O mapa pedológico foi elaborado a partir da base de dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Portal GeoInfo escala 1:1.000.000 (EMBRAPA, 2019). Para uso e ocupação do solo foi utilizada a classificação supervisionada de imagem, máxima verossimilhança (MAXVER), multiespectral do satélite Landsat 8, datada de 29 de maio de 2019, na órbita/ponto 219/75 do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, com resolução espacial de 30 metros (INPE, 2019). A classificação foi submetida a análise com a aplicação do Coeficiente Kappa com 86 % de acurácia.

O mapa hidrográfico foi gerado a partir do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, utilizando dados otocodificados de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Grande, em

escala 1:50.000 (IGAM, 2019). Para o Modelo Digital de Elevação (MDE) foram utilizadas imagens Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), resolução espacial de 30 metros do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2019). As cenas escolhidas foram SRTM1S22W047V3 e SRTM1S23W047V3, sendo realizado o mosaico das cenas e posterior

conversão do sistema de referência espacial em SIRGAS 2000 / UTM 23S.

A bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo também foi caracterizada morfometricamente desde a nascente do Rio Pardo até o ponto de amostragem, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Características morfométricas analisadas na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG).

Características morfométricas	Tipos de análises
Características geométricas	Área total
	Perímetro total
Características da rede de drenagem	Comprimento do eixo principal
	Padrão de drenagem
	Densidade de drenagem (Dd)
Característica do relevo	Comprimento do curso d'água principal
	Comprimento total dos cursos d'água
	Altitude mínima
	Altitude média
	Altitude máxima
	Amplitude altimétrica
	Declividade mínima
	Declividade média
	Declividade máxima

Fonte: elaborado pelos autores utilizando as metodologias de Villela e Mattos (1975); Christofolletti (1980).

Processos hidrológicos

Os dados da precipitação mensal durante o ano de estudo, compreendido entre maio de 2018 e abril de 2019, foram obtidos por meio de estações pluviométricas pertencentes ao Departamento Municipal de Eletricidade (DME, 2019) de Poços de Caldas-MG: PCH Pedro Affonso Junqueira (Antas I - Barramento), coordenadas S 21° 46' 4.30" e W 46° 36' 27.80" a 1173.0 m de altitude; PCH Walter Rossi (Antas II - Barragem do Cipó), coordenadas S 21° 51' 10.48" e W 46° 36' 34.81" a 1268.0 m de altitude. E da rede hidrometeorológica (ANA, 2019) da Agência Nacional de Águas: Beira de Santa Rita, coordenadas S 22° 1' 23.88" e W 46° 18' 14.04" a 1140.0 m de altitude.

A partir dos dados pluviométricos mensais obtidos das estações, calculou-se a precipitação acumulada de 10 e 5 dias anteriores ao dia da amostragem, como subsídio para análise da vazão. Os cálculos foram obtidos através da média aritmética da Equação (1).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (1)$$

Onde: P_m = precipitação média na bacia (mm); P_i = precipitação no i-ésimo pluviômetro (mm); n = número total de pluviômetros.

Em decorrência da grande extensão e com vistas a comparar as médias pluviométricas durante o período de estudo, utilizou-se o método de Thiessen (1911). O cálculo foi realizado pela média ponderada entre a precipitação de cada estação e o peso a ela atribuído, que é a área de influência da precipitação em cada estação, conforme Equação (2).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times P_i}{A} \quad (2)$$

Onde: P_m = precipitação média na bacia (mm); A_i = área de influência no i-ésimo pluviômetro (km²); P_i = precipitação no i-ésimo pluviômetro (mm); A = área total da bacia (km²).

A vazão foi determinada utilizando-se uma régua limnimétrica graduada para medida de nível da água, trena de aço graduada para largura e micromolinetes Flow Rate Sensor Vernier para velocidade (0,00 a 4,00 m/s $\pm$ 0,01 m/s). A vazão foi estimada de acordo com a Equação (3).

$$Q = V \times A \quad (3)$$

Onde: Q = vazão (m³/s); V = velocidade média de escoamento do curso d'água (m/s); A = área (m²).

A vazão específica é a relação entre a vazão e a área de influência do ponto de

amostragem, e, serve como um indicador que permite comparar o nível da produção de água entre diferentes bacias hidrográficas. A estimativa da vazão específica foi determinada através da Equação (4).

$$Q_e = \left(\frac{Q_m}{A_i} \right) \times 1000 \quad (4)$$

Onde: Q_e = vazão específica média (L/s/km²); Q_m = vazão média do ponto de amostragem (m³/s); A_i = área de influência do ponto de amostragem (km²)

Para a modelagem do balanço hídrico, considerou-se a precipitação pluvial como a única entrada de água e o deflúvio como a principal saída. O deflúvio foi calculado pela Equação (5), levando em conta a vazão medida nos dias de amostragem, os dias do mês e a área da bacia até o ponto de amostragem.

$$Defl = \frac{Q \times dias}{A} \quad (5)$$

Onde: Defl. = deflúvio (mm); Q = vazão (m³/s); dias = segundos (s); A = área da bacia (m²).

O saldo do balanço hídrico foi calculado pela Equação (6) e pode assumir valores negativos ou positivos. Quando o saldo é positivo há armazenamento de água no sistema e, quando negativo déficit no sistema hidrológico.

$$Saldo = P - Defl \quad (6)$$

Onde: Saldo = saldo (mm); P = precipitação (mm); Defl. = deflúvio (mm).

Qualidade da água

As águas fluviais foram monitoradas uma vez por mês durante o período compreendido entre maio de 2018 e abril de 2019 e caracterizadas físico e quimicamente em três pontos na calha do rio: margem esquerda, no eixo principal da corrente e margem direita (25% - 50% - 25%) e os resultados foram obtidos por meio da média aritmética.

Para isso, foi utilizado equipamento com eletrodos de leitura direta no próprio local de amostragem, com o medidor portátil U-50 Multiparameter Water Quality Checkers da Horiba, previamente calibrado, sendo analisadas as seguintes variáveis: temperatura (método termistor, de -10 a 55°C ± 0,3°C); pH (método de eletrodo de vidro, de 0,0 a 14,0 ± 0,1 pH); condutividade elétrica (método do eletrodo 4AC, de 0,0 a 100,0 µS/cm ± 0,1 %); oxigênio dissolvido (método polarográfico, de 0,0 a 50,0 mg/L ± 0,2 mg/L); sólidos totais dissolvidos (conversão de condutividade, de 0,0 a 100,0 g/L ± 5,0 g/L) e

turbidez (fonte de luz LED, de 0,0 a 800,0 NTU ± 1,0 NTU).

Para coleta e análise dos sólidos totais em suspensão e dos nutrientes nitrato, fosfato e sulfato, utilizou-se a garrafa do tipo Van Dorn. Foram coletados aproximadamente 330 mL de água, a uma profundidade de 0,5 m nas porções 25% (margens) e a 1 m na porção 50% (eixo principal). As amostras foram compostas em uma única alíquota, totalizando aproximadamente 1.000 mL, armazenada em vasilhame de polietileno, acondicionada em caixa térmica contendo gelo (~4°C).

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Ecossistemas Aquáticos e Solos (LEAS) do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas (ICT/UNIFAL) e analisada até uma hora após a coleta, segundo as normas da NBR 9898:1987 (ABNT, 1987).

Amostras de sólidos totais em suspensão (STS) foram realizadas em triplicata segundo metodologia gravimétrica (APHA, 2012). As concentrações de sólidos totais (ST = STD + STS) foram calculadas pela soma de sólidos totais suspensos e dissolvidos. Os teores dos íons nitrato NO₃⁻ (método de redução de cádmio, de 0 a 30,0 ± 0,3 mg/L), fosfato PO₄³⁻ (método do ácido ascórbico, de 0,02 a 2,5 ± 0,01 mg/L) e sulfato SO₄²⁻ (método sulfaver 4, de 0 a 70 ± 0,9 mg/L) foram quantificados por espectrofotômetro modelo DR 890 da Hach Company (HACH, 2009).

Modelos de regressão potencial e diluição teórica

As espécies químicas dissolvidas nas águas fluviais geralmente obedecem à tendência de diluição com o aumento da vazão (Stevaux e Latrubesse, 2017). Neste sentido, adotou-se, o modelo potencial, que expressa relação inversa entre sólidos totais dissolvidos (STD) e vazão (Q), conforme a Equação (7). Nesta equação a e b são variáveis de ajuste e o expoente b negativo configura o coeficiente de diluição da função matemática.

$$C_{STD} = a \times Q^{-b} \quad (7)$$

O comportamento fluvial em relação à concentração de sólidos em suspensão (STS) na maioria dos rios do planeta obedece a uma tendência de aumento da concentração de sólidos em suspensão conforme aumenta a vazão (Stevaux e Latrubesse, 2017). Essa dinâmica é expressa tradicionalmente por um modelo de regressão potencial, conforme a Equação (8). Com isso, a e b

consiste em variáveis de ajuste e o expoente b geralmente positivo, expressa a relação direta entre vazão e concentração.

$$C_{STS} = a \times Q^b \quad (8)$$

Tendências de relação estatística (R^2) também foram realizadas em planilha eletrônica de cálculo para identificar as relações entre as variáveis independentes (x) e dependentes (y), ou seja, as variáveis físico e químicas analisadas nas águas do Alto Rio Pardo.

O modelo de diluição teórica da Equação (9) proposto por Kattan e Probst (1986), permite avaliar a dinâmica de espécies químicas em relação à vazão de um determinado corpo hídrico. Este modelo contribui para identificar possíveis fontes pontuais ou difusas no comportamento dos nutrientes, nitrato, fosfato e sulfato presentes nas águas fluviais da bacia.

$$C_i = \frac{C_{max} \times Q_{min}}{Q_t} \quad (9)$$

Onde: C_i = concentração da espécie química referente à curva de diluição (mg/L); C_{max} = concentração máxima observada na série (mg/L); Q_{min} = vazão mínima observada na série (m^3/s); Q_t = vazão do dia de amostragem (m^3/s).

Transporte fluvial de sedimentos e nutrientes

O transporte fluvial de sólidos totais, suspensos e dissolvidos e de cada nutriente dissolvido (nitrato, fosfato e sulfato) foram estimados em t/ano pelo do método estocástico, tendo como variáveis a concentração média ponderada pela vazão (C_{MP}) e vazão média anual do Alto Rio Pardo ($Q_{média}$), conforme as Equações (10) e (11).

$$C_{MP} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (10)$$

Onde: C_{MP} = concentração média ponderada do parâmetro nas águas fluviais (mg/L); C_i = concentração do parâmetro na i -ésima amostra (mg/L); Q_i = vazão do rio durante a coleta da i -ésima amostra (m^3/s).

$$T_{fluvial} = 31,536 \times C_{MP} \times Q_{média} \quad (11)$$

Onde: $T_{fluvial}$ = transporte fluvial anual do parâmetro nas águas fluviais (t/ano); C_{MP} = concentração média ponderada pela vazão do parâmetro nas águas fluviais (mg/L); Q = vazão média anual (m^3/s).

O transporte específico foi estimado a partir dos dados anuais do transporte fluvial e da área de drenagem do ponto de amostragem da bacia do Alto Rio Pardo ($1.627,05 \text{ km}^2$), obtendo assim o resultado em $t/\text{km}^2/\text{ano}$.

Resultados e discussão

Fisiografia e morfometria

O Rio Pardo nasce na Serra de Ipuíuna, município de Ipuíuna, estado de Minas Gerais e percorre uma distância de 144 km entre os municípios de Santa Rita de Caldas, Caldas, Campestre, Bandeira do Sul, Poços de Caldas e Botelhos, até desaguar no Reservatório Caconde, no estado de São Paulo (Figura 1). O reservatório da Usina Hidrelétrica Caconde iniciou suas operações em 1966, possui uma área de 31 km^2 , capacidade de acumular 555 bilhões de litros d'água e potência instalada para a geração de 80,4 MW (ANA, 2018).

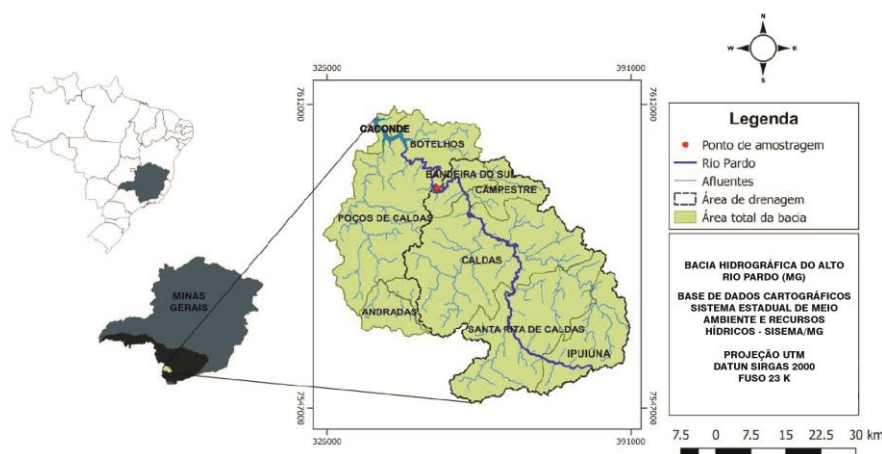


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG) com o ponto de amostragem, área de drenagem e municípios. Fonte: elaborado pelos autores com base em IGAM, 2019.

A bacia do Alto Rio Pardo possui uma área total de $2.451,13 \text{ km}^2$, entretanto, neste estudo foi

Reis, R. I.; Sardinha, D. S.

considerado apenas a área de drenagem até o ponto de amostragem, correspondente a $1.627,05 \text{ km}^2$. O

ponto de amostragem foi determinado utilizando como referência mapas da bacia hidrográfica e trabalhos de campo para definir o local de melhor acesso antes da área alagada e/ou remanso do reservatório (Figura 1).

Quanto a geologia, parte da área de estudo se encontra no Complexo Varginha-Guaxupé e nos terrenos das unidades litoestratigráficas do Complexo Alcalino Poços de Caldas, Complexo Pinhal-Ipuiúna, Unidade Sienito Pedra Branca, Unidade Sienito Capituva e Granitoide Caconde (IGAM, 2010).

A área apresenta uma litologia com predominância de monzonitos (rocha ígnea com minerais de Ca-Na plagioclásio, e, K-feldspato, piroxênios, hornblenda e biotitas), ortognaisses (rocha metamórfica quartzo-feldspática), granito (rocha ígnea com predominância de K-feldspato, e,

Na-Ca plagioclásio, biotita e muscovita), sienitos e fonólitos (rochas alcalinas com predominância de feldspato alcalino, feldspatoides, piroxênio sódico e hornblenda), correspondendo a aproximadamente 21%, 20%, 18%, 13% e 11% da área, respectivamente (Figura 2A).

Dentro do contexto geomorfológico a bacia abrange áreas do Planalto Atlântico, na subzona do Planalto Sul de Minas, subdividida em três unidades morfológicas: a Superfície do Alto Rio Grande, o Planalto de São Pedro de Caldas e Planalto de Poços de Caldas (CPRM, 1979). A área apresenta superfícies de relevos ondulados com colinas e morros de declividade média de 15%, representando aproximadamente 57% da área total da bacia (Figura 2B).

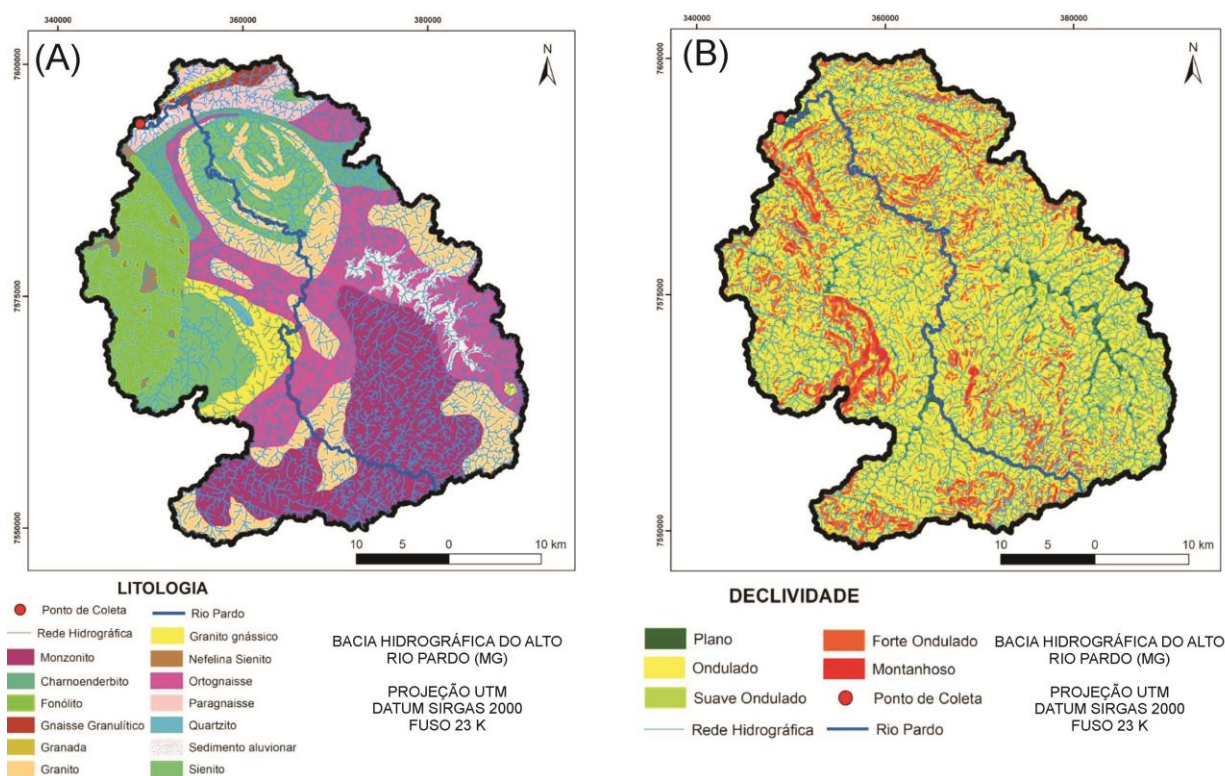


Figura 2. (A) Litologia da bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG). (B) Declividade da bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG). Fonte: elaborado pelos autores com base em CODEMIG (2019) e USGS (2019).

Quanto a clima Reboita et al. (2015), utilizando o método de classificação de Köppen-Geiger com base nos dados interpolados de temperatura média do ar e precipitação, classificou a região do sul do estado de Minas em Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente) e Cwb (clima temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente) por influência das regiões de altitude elevada. Quanto a precipitação Cavalcanti et al. (2016) mencionam que a região possui pluviosidade média anual em

torno de 1.500 a 1.700 mm utilizando dados no período de 1961 a 1990.

Na área de estudo há o predomínio de Argissolo Vermelho Amarelo, seguido de Cambissolo Háplico e Latossolo Vermelho, correspondendo a aproximadamente 43%, 37% e 9% da área, respectivamente (Figura 3A). Os Argissolos são de profundidade variável, moderado a bem drenado e textura média/argilosa ou argilosa, sendo típicos de relevos movimentados (EMBRAPA, 2018), sendo que, Argissolo Vermelho Amarelo predominam nas áreas com

culturas agrícolas e pastagens, e Argissolo Vermelho na porção leste do município de Caldas. Cambissolos são mal a acentuadamente drenados, apresentando, em muitos casos, fases cascalhenta, pedregosa e/ou rochosa de baixa fertilidade natural (EMBRAPA, 2018). Na área de estudo predomina nas porções leste e oeste em terras preparadas para cultivos agrícolas (Figura 3A).

Dentre as variadas atividades agrícolas, a cafeicultura e a pecuária leiteira tem destaque no sul do estado (ABIC, 2020). Na área de estudo há o predomínio de culturas agrícolas (café, milho, batata, feijão e soja), ocupando uma área de aproximadamente 39% da bacia. As pastagens

utilizadas para criação de bovinos de corte e leiteiros ocupam cerca de 16 % da área. Quanto a cobertura vegetal, a área de estudo está inserida dentro do bioma Mata Atlântica, em área de domínio da Floresta Estacional Semidecidual Montana, Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana e Floresta Ombrófila Mista (IEF, 2008). Áreas ocupadas por mata nativa e floresta plantada representam cerca de 19% de área ocupada por fragmentos florestais isolados, com formações mais densas em relevo fortemente ondulado a montanhoso, principalmente em topos de morros (Figura 3B).

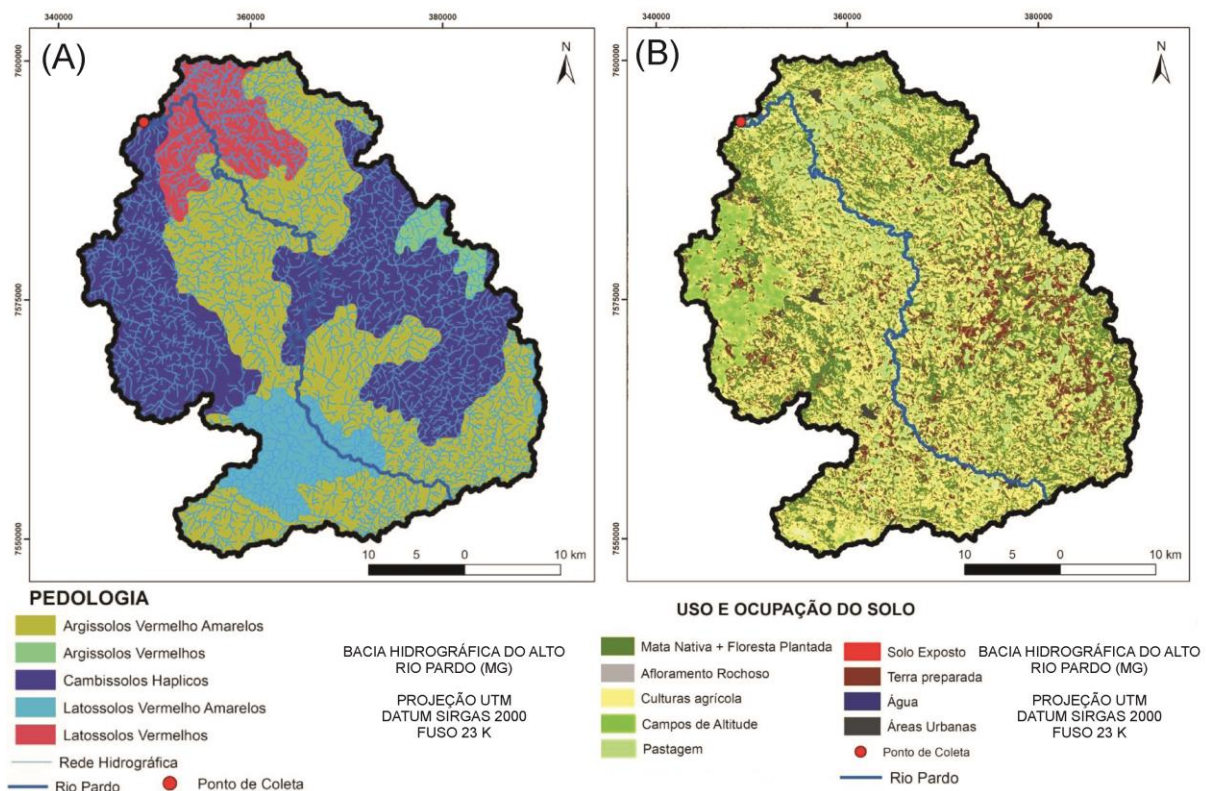


Figura 3. (A) Tipos de solos da bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG). (B) Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG). Fonte: elaborado pelos autores com base em EMBRAPA (2019) e INPE (2019).

Os resultados da caracterização morfométrica estão apresentados na Tabela 2. Para os cálculos foi considerado a área de drenagem desde a nascente até o ponto de amostragem (1627,05 km²). O curso principal do Rio Pardo possui comprimento de 100,34 km desde a nascente até o ponto de amostragem, com um perímetro de 269,24 km. O padrão de drenagem é do tipo dendrítica, que se caracteriza pelas formas arborescentes e ocorre em áreas com predomínio de rochas cristalinas, típicas da bacia do Alto Rio Pardo.

Silva et al. (2009) citam que a densidade de drenagem está relacionada ao substrato rochoso, declividade do terreno e principalmente, ao grau de permeabilidade das formações superficiais que estruturam a paisagem. Celarino e Ladeira (2014) em estudo da densidade de drenagem na bacia do Rio Pardo-MG/SP, encontraram valores de (1,81 km/km²) considerados anômalos superiores, que podem estar relacionados à geologia regional e também à alta declividade, que favorece o escoamento superficial da bacia do Alto Rio Pardo (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG).

Tipos de análises	Resultados
Área total (km ²)	1.627,05
Perímetro total (km)	269,24
Comprimento do eixo principal (km)	56,60
Padrão de drenagem	Dendrítica
Densidade de drenagem (km/km ²)	1,98
Comprimento do curso d'água principal (km)	100,34
Comprimento total dos cursos d'água (km)	3.229
Altitude mínima (m)	915
Altitude média (m)	1.188
Altitude máxima (m)	1.796
Amplitude altimétrica (m)	881
Declividade mínima (%)	0
Declividade média (%)	15
Declividade máxima (%)	86

Fonte: elaborado pelos autores.

A bacia, com um comprimento total dos cursos d'água de 3.229 km, apresenta densidade de drenagem anômala superior igual a 1,98 km de cursos d'água por km² de área (Tabela 2), próximo ao encontrado por Celarino e Ladeira (2014). A amplitude altimétrica da bacia é de 881 m, e mínima de 915 m, máxima 1.796 m e média 1.188 m (Tabela 2) indicando alta variação (altitude e elevação) que podem influenciar na precipitação, perdas de água por evaporação e transpiração e, conseqüentemente, sobre o deflúvio médio.

Processos hidrológicos

A Figura 4 apresenta as variações pluviométricas mensais durante o período de estudo, indicando períodos de baixa pluviosidade em maio a setembro, variações de 12,33 mm (julho) a 87,67 mm (setembro), sendo julho o mais crítico. Altas precipitações ocorreram entre outubro e abril, variação de 181,43 mm (janeiro) a 284,07 mm (dezembro).

Para o período de maio a abril, a precipitação anual segundo a média aritmética e o

método de Thiessen foram de 1.740,94 mm e 1.763,47 mm, respectivamente (Tabela 3). Ao se comparar as médias, percebe-se que as diferenças são pequenas, sendo o método de Thiessen o que apresentou valor maior. Além disso, os valores são os próximos aos encontrados por Cavalcanti et al. (2016) de 1.500 a 1.700 mm.

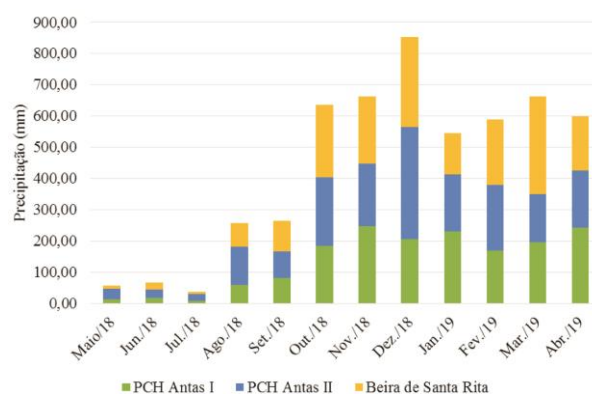


Figura 4. Pluviosidade média mensal na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG) entre 2018-2019.

Tabela 3. Precipitação média anual na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG), pela média aritmética e método de Thiessen (2018-2019).

Estação	Localidade	Precipitação anual (mm)	Área (km²)	% em relação ao total da área	Fator peso	Precipitação ponderada (mm)
PCH Antas 1	Poços de Caldas	1.649,26	173,39	10,66	0,11	175,76
PCH Antas 2	Poços de Caldas	1.798,75	138,61	8,52	0,09	153,24
Beira de Sta Rita	Sta Rita de Caldas	1.774,80	1.315,05	80,82	0,81	1.434,47
Total	Média aritmética	1.740,94	1.627,05	100		
	Média de Thiessen					1.763,47

A vazão mensal mínima correspondeu ao mês de setembro (9,07 m³/s), enquanto que a Reis, R. I.; Sardinha, D. S.

máxima foi em janeiro (66,0 m³/s) com média anual de 33,97 m³/s (Figura 5 e Tabela 4). Os

menores e maiores valores de vazão foram registrados nos meses secos e chuvosos indicando uma influência sazonal deste parâmetro na bacia estudada, variação de aproximadamente 57 m³/s.

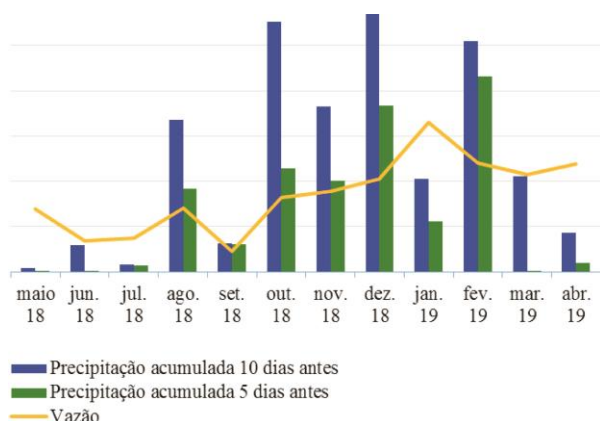


Figura 5. Relação entre vazão e precipitação em 10 e 5 dias anteriores às datas de amostragem na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG).

Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 6 representa a calha do Rio Pardo durante o período de estudo, demonstrando a variação da vazão, com baixa entre o período de maio e setembro e alta entre o período de outubro e abril. A vazão variou em função de parâmetros hidrológicos, sendo que o aumento da vazão

alterou o curso do rio em sua seção transversal característica no mês de dezembro (Figura 6).

A precipitação também pode ter contribuído para o carreamento de sedimentos que provavelmente acumularam-se no lado esquerdo, causando grande deformidade na calha do Rio Pardo no ponto de amostragem entre outubro a abril (Figura 6). De um modo geral, o formato elíptico observado pode contribuir para a diminuição da velocidade da corrente fluvial, devido às enxurradas serem distribuídas, acarretando em uma menor magnitude da vazão (Mello e Silva, 2013). Estas características também podem ser verificadas na relação do balanço hídrico da bacia (Tabela 5).

Conforme o balanço hídrico da Tabela 5, nos meses de maio e julho em que a precipitação esteve abaixo de 20 mm, verifica-se um saldo hídrico negativo de -27,37 mm e -12,13 mm, respectivamente, onde provavelmente o escoamento superficial do Rio Pardo é alimentado pelo escoamento de base (escoamento subterrâneo). Durante os meses de agosto e setembro, apesar do significativo aumento do volume da precipitação comparado com os meses anteriores, o saldo hídrico ainda esteve abaixo da média anual, provavelmente devido ao processo de recarga das águas subterrâneas que alimentaram as águas superficiais durante o período de estiagem.

Tabela 4. Relação da vazão e precipitação acumulada 10 e 5 dias anteriores ao dia da amostragem na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG).

Data	Precipitação acumulada 10 dias antes (mm)	Precipitação acumulada 5 dias antes (mm)	Vazão (m³/s)
03/05/18	1,50	0,25	27,97
14/06/18	11,68	0,37	13,68
12/07/18	3,33	3,02	14,86
09/08/18	67,33	36,69	28,14
14/09/18	12,75	12,06	9,07
18/10/18	110,55	45,60	32,76
23/11/18	73,00	40,30	35,41
21/12/18	114,20	73,45	41,13
24/01/19	40,90	22,20	66,00
21/02/19	101,75	86,35	48,09
29/03/19	42,10	0,25	42,94
26/04/19	17,30	4,20	47,59

Fonte: elaborado pelos autores com base em ANA (2019) e DME (2019).

O processo de recarga do lençol freático alcançou o pico no mês de setembro, em que o deflúvio e a vazão atingiram o menor nível anual, 14,45 mm e 9,07 m³/s, respectivamente. O aumento da precipitação na estação chuvosa, de outubro a abril, influenciam positivamente, alcançando um

saldo de 216,36 mm em dezembro, mês mais chuvoso do ano (284,07 mm). Em janeiro, o deflúvio e a vazão alcançam seu nível máximo anual, com 108,65 mm e 66 m³/s, respectivamente, provavelmente pela chuva acumulada do mês anterior (Tabela 5).

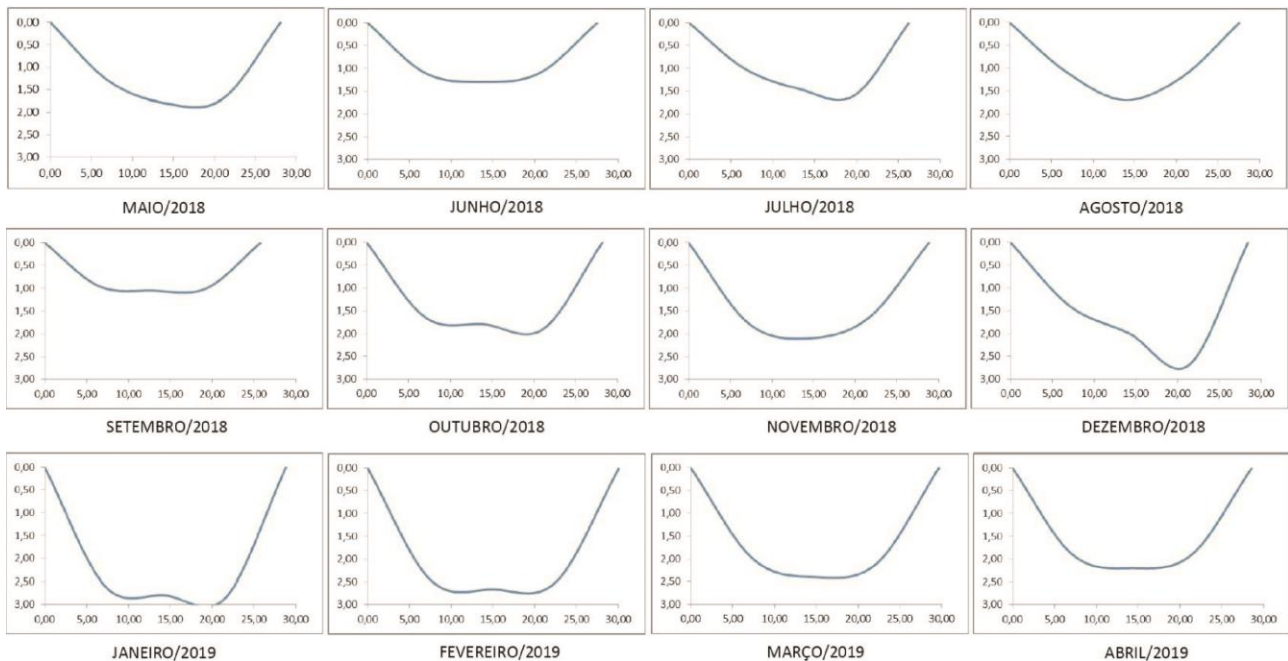


Figura 6. Representação da calha do Rio Pardo no ponto de amostragem durante o período de estudo.

Tabela 5. Relação do balanço hídrico na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG) durante o período de estudo.

Mês	Dias	Precipitação (mm)	Vazão (m ³ /s)	Vazão específica (l/s/km ²)	Deflúvio (mm)	Saldo (mm)
Maio	31	18,67	27,97	17,19	46,04	-27,37
Junho	30	21,95	13,68	8,41	21,79	0,16
Julho	31	12,33	14,86	9,13	24,46	-12,13
Agosto	31	85,28	28,14	17,30	46,32	38,96
Setembro	30	87,67	9,07	5,57	14,45	73,22
Outubro	31	212,00	32,76	20,13	53,93	158,07
Novembro	30	220,97	35,41	21,76	56,41	164,56
Dezembro	31	284,07	41,13	25,28	67,71	216,36
Janeiro	31	181,43	66,00	40,56	108,65	72,79
Fevereiro	28	196,17	48,09	29,56	71,50	124,66
Março	31	220,70	42,94	26,39	70,69	150,01
Abril	30	199,70	47,59	29,25	75,81	123,89
Total	365	1.740,94	407,64	250,53	657,76	1083,18
Média	30	145,08	33,97	20,88	54,81	90,26

No geral, o sistema hidrológico da área estudada apresentou déficits no período seco e superávit na estação chuvosa. A produção de água no período das chuvas representou cerca de 93,27 % do balanço hídrico da bacia, demonstrando que há predomínio do escoamento superficial na alimentação das águas fluviais da bacia do Alto Rio Pardo. O balanço hídrico realizado também mostrou que a área estudada é bastante representativa, do ponto de vista da recarga de aquíferos regionais.

Qualidade da água

Os resultados das análises físico e químicas das águas fluviais estão apresentados na Tabela 6. O Alto Rio Pardo não possui enquadramento, segundo o Art. 42 da Resolução CONAMA nº 357 de 2005, enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas classe 2 (BRASIL, 2005). Em relação à temperatura, o menor valor foi registrado no mês de julho (13,1°C) e o máximo em janeiro (23,8°C), com média anual de 20,6°C, podendo assim observar uma variação de aproximadamente 10,7°C na temperatura da água entre o verão e o inverno.

Barcelos et al. (2017) em estudo da qualidade da água na bacia do Córrego Sucuri,

estado de Goiás, encontram um valor médio de temperatura da água de 23,5°C. No Lago Bonsucesso, também no estado de Goiás, Alves et al. (2019) encontram um valor médio de temperatura da água de 23,8°C. Por outro lado, em cursos hídricos afluentes ao reservatório do Lobo, estado de São Paulo, Anjinho et al. (2020)

encontram um valor médio de temperatura da água de 19,7°C. Os resultados demonstram que os valores de temperatura da água podem ser influenciados por diversos fatores como, localização, sazonalidade, hora da amostragem, mata ciliar, etc.

Tabela 6. Resultados das análises físico e químicas das águas fluviais da bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG).

Data	Vazão (m ³ /s)	Temp. (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	Turb. (NTU)	OD	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	STD	STS	ST
03/05/18	28,0	19,5	6,5	38,0	1,9	3,0	0,4	0,0	0,1	25,0	5,0	30,0
14/06/18	13,7	18,1	5,1	34,0	0,9	6,0	2,4	0,0	0,2	22,0	2,0	24,0
12/07/18	14,9	13,1	6,8	33,7	3,0	8,5	2,2	0,0	0,3	22,0	0,7	22,7
09/08/18	28,1	17,4	7,0	37,3	6,1	5,3	1,5	1,0	0,2	24,3	4,1	28,4
14/09/18	9,1	20,8	6,8	33,7	19,0	4,6	1,3	2,0	0,2	22,0	3,2	25,2
18/10/18	32,8	21,9	6,0	35,3	75,7	7,2	4,3	8,0	0,9	22,3	58,9	81,2
23/11/18	35,4	21,5	7,1	27,3	42,2	7,9	6,7	5,0	0,5	17,7	27,9	45,6
21/12/18	41,1	23,7	6,1	29,0	100,6	8,5	2,8	9,0	0,6	19,0	42,7	61,7
24/01/19	66,0	23,8	6,5	32,0	46,4	5,2	2,8	9,0	0,5	20,7	55,2	75,9
21/02/19	48,1	22,9	7,0	29,3	55,3	6,3	2,9	7,0	0,5	19,3	103,5	122,8
29/03/19	42,9	21,9	6,5	25,7	48,0	6,7	1,6	5,0	0,4	16,3	26,3	42,6
26/04/19	47,6	22,1	5,4	58,0	28,6	5,0	2,6	3,0	0,4	37,7	24,9	62,6
Média	34,0	20,6	6,4	34,4	35,6	6,2	2,6	4,1	0,4	22,4	29,5	51,9
Desvio Padrão	16,5	3,1	0,6	8,4	31,8	1,7	1,6	3,6	0,2	5,5	31,2	30,4
C_{MP}	--	--	--	--	--	--	2,8	5,3	0,4	22,4	39,1	61,5

Legenda: Temp. = temperatura; pH = potencial hidrogeniônico; Cond.= condutividade; Turb.= turbidez; OD = oxigênio dissolvido; NO₃⁻ = nitrato; SO₄²⁻ = sulfato; PO₄³⁻ = fosfato; STD = sólidos totais dissolvidos; STS = sólidos totais em suspensão; ST = sólidos totais; C_{MP}= média ponderada pela vazão.

Com relação ao pH, as variações foram entre 5,1 mínima e máxima de 7,1 nos meses de junho e novembro, respectivamente, com média anual de 6,4. Os resultados indicam que as águas se encontram próximas da neutralidade, dentro da faixa de 6 a 9 recomendada pela Resolução CONAMA n° 357/2005 para águas doces (BRASIL, 2005), exceto para as amostragens dos meses de junho (5,1) e abril (5,4).

Barcelos et al. (2017), encontram um de pH de 7,5 atribuindo a diminuição das taxas de gás carbônico favorecida pelo enriquecimento de nitrogênio e fósforo, tornando a água mais alcalina. Anjinho et al. (2020) observaram um pH de 5,8 relacionando este valor com a presença da vegetação ciliar e matéria orgânica em decomposição, que aumenta a liberação de ácidos húmicos, provocando uma diminuição nos valores de pH.

Os valores de condutividade elétrica tiveram uma média anual de 34,4 µS/cm, 25,7 µS/cm em março e 58 µS/cm em abril. O intemperismo das rochas da bacia pode elevar a condutividade, no entanto, à contribuição devido ao uso do solo, efluentes advindos de fontes pontuais (efluentes domésticos e industriais) e

difusas (agricultura e pecuária) também podem contribuir para o aumento da condutividade.

Segundo Alves et al. (2019) unidades hidrográficas com alta exploração do solo apresentam maiores temperaturas e, ainda, maior condutividade elétrica, sendo o aumento desta variável em decorrência do escoamento superficial, e, em bacias hidrográficas com predomínio de vegetação ocorre o contrário, menor temperatura e condutividade. Conforme Anjinho et al. (2020) a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) fixou um limite de 100 µS/cm para indicar ambientes geralmente impactados. Todos os valores deste estudo estão abaixo deste limite.

Quanto à turbidez, houve grande variação entre o período seco e úmido, apresentando valor mínimo de 0,9 NTU e máximo 100,6 NTU, próximo do limite de 100 NTU estabelecido pela Resolução CONAMA n° 357/2005 para rios de classe 2. A média anual foi de 35,6 NTU.

Luíz et al. (2012) em estudo na bacia hidrográfica do rio Taquaral, no Paraná, encontraram turbidez elevada (141 NTU) nos dias em que ocorreu chuva de 30 mm, e turbidez baixa (5,27 NTU) no dia sem chuva, fato que pode ser explicado, segundo os autores, por processos

erosivos devido ao uso do solo pela agricultura mecanizada e temporária nas áreas de maior declividade da bacia.

Os resultados de oxigênio dissolvido demonstraram variações de 3,0 mg/L a 8,5 mg/L, média anual de 6,2 mg/L. A concentração mínima exigida pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 é de 5,0 mg/L, sendo as amostragens dos meses de maio (3,0 mg/L) e setembro (4,6 mg/L) abaixo deste limite.

A diminuição dos valores, segundo Barcelos et al. (2017) pode estar associada à entrada de material originado das áreas agrícolas, que contribui para o aumento na carga de material fosfatado e promove decréscimo na concentração de oxigênio dissolvido nas águas. Além disso, observou-se uma pequena tendência de relação ($R^2 = 0,61$) entre as concentrações de oxigênio dissolvido e nitrato (Figura 7A), possivelmente devido as reações de oxidação da amônia para nitrato no processo de nitrificação.

As concentrações de nitrato (NO_3^-) apresentam grande variação entre o período seco e chuvoso, média ponderada anual de 2,8 mg/L e com concentrações inferiores ao limite de 10,0 mg/L estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2. Silva e Silva (2020)

na área urbana de Teresina no Piauí, encontraram valores médios de nitrato variando de 0,038 mg/L a 0,110 mg/L, considerados baixos, visto que a bacia apresenta usos do solo com intensa atividade antrópica, no entanto, preocupante devido a intensificação do processo de eutrofização na área de estudo.

Libânio e Sardinha (2020) no Rio Muzambo tributário do Reservatório de Furnas em Minas Gerais, encontram valores médios de nitrato 2,32 mg/L (variando de 1,00 mg/L a 4,40 mg/L). Os autores também encontraram uma tendência de relação para os íons nitrato e fosfato, indicando que os mesmos podem ter se originado principalmente da aplicação de fertilizantes nitrogenados e fosfatados. Neste trabalho também foram encontradas tendências de relação ($R^2 = 0,70$) para os íons nitrato e fosfato, conforme Figura 7B.

O íon sulfato (SO_4^{2-}), não foi detectado nas amostras dos meses mais secos (maio, junho e julho), enquanto que nos meses chuvosos (dezembro e janeiro) as concentrações atingiram 9,0 mg/L com média ponderada anual de 5,3 mg/L. Sardinha et al. (2013) associaram a presença de sulfato com aportes antropogênicos como tráfego de veículos, queima de combustíveis fósseis, queimadas e carvoarias.

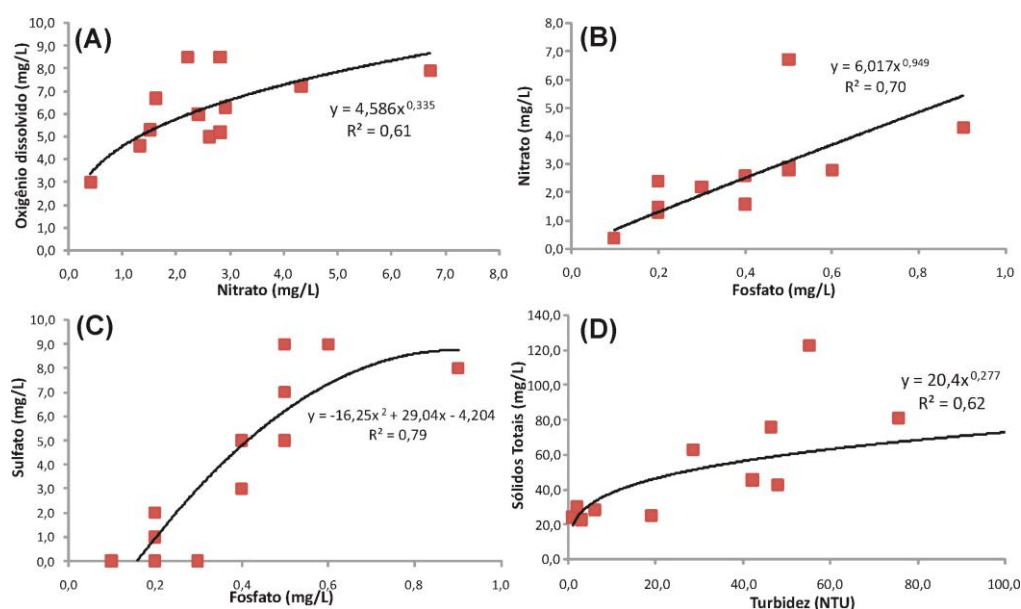


Figura 7. Tendência de relação estatística entre os principais parâmetros físicos e químicos analisados na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG). (A) Oxigênio dissolvido e Nitrato. (B) Nitrato e Fosfato. (C) Sulfato e Fosfato. (D) Sólidos Totais e Turbidez.

Em relação a concentração do íon fosfato (PO_4^{3-}) houve variação de 0,1 mg/L no período seco a 0,9 mg/L no período chuvoso e tendência de relação ($R^2 = 0,79$) com o íon sulfato. As rochas da bacia não possuem grande quantidade de nitrato, fosfato e sulfato em sua composição mineralógica, neste sentido, estas concentrações podem estar associadas a entradas antropogênicas, Reis, R. I.; Sardinha, D. S.

provavelmente devido ao uso da terra para atividades agrícolas com a aplicação de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e sulfatados.

As menores concentrações de sólidos totais dissolvidos foram encontradas no período chuvoso (16,3 mg/L), provavelmente pela fator de diluição das águas superficiais. Sardinha et al. (2019) na bacia do Córrego Ariranha, Minas Gerais,

encontraram variações de 21,0 mg/L (período chuvoso) a 37,0 mg/L (período seco) indicando também um processo de diluição pelo aumento da vazão. Os resultados estão em concordância com os resultados obtidos para a condutividade elétrica, que se relacionam diretamente com a concentração de íons dissolvidos em solução aquosa, conforme observado por Barcelos et al. (2017).

Conforme observado para turbidez, os valores de sólidos totais em suspensão aumentam com a vazão ao contrário de sólidos totais dissolvidos com aumento no período seco, onde a perenidade do Rio Pardo é mantida pelo escoamento de base. O aumento das concentrações de sólidos totais em suspensão pode estar relacionada com o aumento da erosão laminar e perda de solo na bacia durante o período chuvoso, conforme observado por Libânio e Sardinha (2020) e Melo et al. (2020).

A concentração média ponderada pela vazão para sólidos totais (61,5 mg/L), assim como os discutidos para sólidos totais em suspensão (39,1 mg/L), também podem estar relacionadas aos processos de erosão dos solos e de lixiviação de íons dissolvidos, conforme tendência de relação ($R^2 = 0,62$) com a Turbidez. As características fisiográficas da bacia do Alto Rio Pardo, litologia e mineralogia, relevos ondulados com colinas e morros, pluviosidade média anual em torno de 1.500 a 1.700 mm, Argissolos e Cambissolos em relevos movimentados cuja densidade de drenagem

favorece o escoamento superficial, juntamente com práticas agrícolas sem o manejo adequado (falta de curvas de nível, aração, aplicação de fertilizantes, defensivos, etc.) podem contribuir com a remoção de partículas e íons do solo contribuindo para o transporte fluvial de sedimentos e nutrientes.

Regressão potencial e diluição teórica

A dinâmica dos sedimentos em suspensão difere dos sedimentos dissolvidos, sendo fortemente associada ao período chuvoso e com aumento da vazão, com isso, grande parte do material suspenso é transportado no período de cheia ao longo de um ano hidrológico. Segundo Stevaux e Latrubesse (2017) ao contrário do que ocorre com a carga dissolvida, em geral a carga suspensa varia diretamente com a vazão do rio, uma vez que b é um expoente positivo que varia entre 2 e 3.

A relação entre sólidos totais em suspensão e vazão (Figura 8A) foi expresso pelo modelo potencial, $C_{STS} = a \times Q^b$ demonstrando um ajuste para o Alto Rio Pardo ($R = 0,68$) com coeficiente (b) positivo de 2,24. O diagrama de histerese apresenta movimento horário indicando que o pico da concentração de sólidos totais suspensos ocorre nos meses de maior vazão, evidenciando um efeito de erosão hídrica dos relevos movimentados da bacia (Figura 8B).

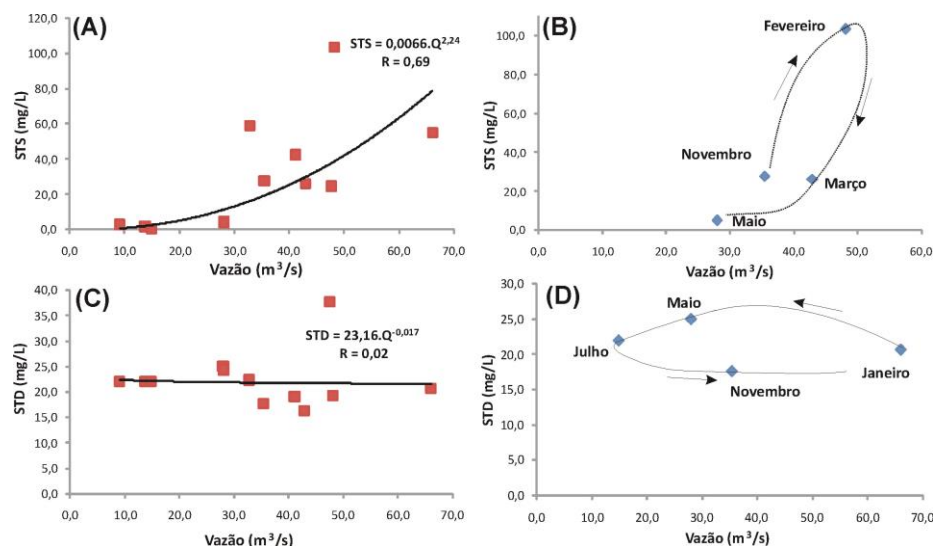


Figura 8. Relação entre Sólidos Totais em Suspensão (STS)/Dissolvidos (STD) e vazão na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo (MG). (A) Regressão potencial STS x Vazão. (B) Gráfico de histerese STS x Vazão. (C) Regressão potencial STD x Vazão. (D) Gráfico de histerese STD x Vazão.

Por outro lado, a relação de sólidos totais dissolvidos pela vazão (Figura 8C), modelo potencial, $C_{STD} = a \times Q^{-b}$, apresenta um fator de diluição ($-b$) em torno de 0,017, valor muito abaixo da faixa estabelecida por Walling e Webb (1986

apud Stevaux e Latrubesse, 2017) de 0,17 a 0,40 após o levantamento de 370 rios. Segundo Stevaux e Latrubesse (2017) um rio pode apresentar concentrações distintas para uma mesma descarga, dependendo da relação com a hidrografia. No caso

da bacia em estudo (Figura 8D), o movimento anti-horário da histerese, indica que o pico da concentração de sólidos totais dissolvidos pode ter ocorrido após o pico de vazão, ou seja, o aumento da vazão (diluição) pode ter acontecido antes do escoamento de base (subterrâneo), que é rico em íons mobilizados pela maior quantidade de água de chuva infiltrada, conforme observado nas Tabelas 4 e 5.

A variabilidade temporal das concentrações de sedimentos e nutrientes também foi analisada em função da evolução das respectivas vazões (hidrógrafa), identificando possíveis padrões do comportamento nos períodos chuvoso e seco, conforme a Figura 9.

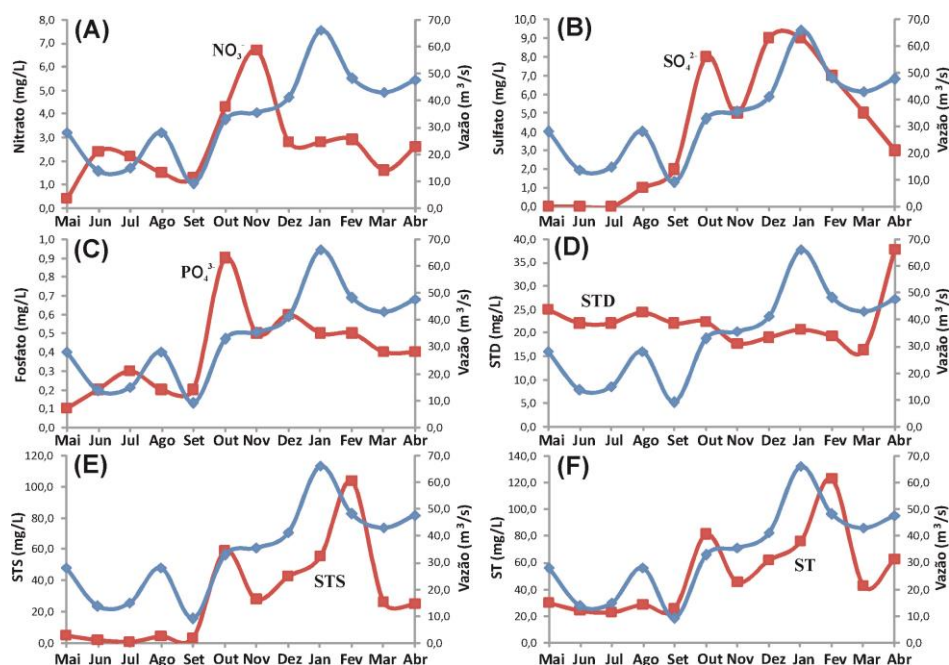


Figura 9. Distribuição das concentrações de sedimentos e nutrientes em função da vazão (hidrógrafa) na bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo. (A) Nitrato e Vazão. (B) Sulfato e Vazão. (C) Fوسفato e Vazão. (D) Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Vazão. (E) Sólidos Totais em Suspensão (STS) e Vazão. (F) Sólidos Totais (ST) e Vazão.

A partir da distribuição temporal das concentrações de sedimentos e nutrientes em função da vazão foi possível identificar que as concentrações de nitrato (Figura 9A) e fوسفato (Figura 9C) aumentam com o início do período chuvoso e da vazão específica (outubro e novembro - Tabelas 4 e 5), diminuindo as concentrações pelo efeito de diluição e escoamento de base nos períodos de cheia. Já as concentrações de sulfato (9B) apresentam dois picos (outubro e dezembro/janeiro) justamente o início e o pico de superávit da estação chuvosa (Tabelas 4 e 5), com o predomínio do escoamento superficial (deflúvio) e da vazão específica, indicando possíveis aportes antropogênicos no ponto de amostragem do Alto Rio Pardo pela erosão hídrica (liviviação de solos agrícolas pelas águas pluviais).

A carga de sólidos totais e em suspensão em relação à vazão anual (Figuras 9E e 9F) mostra que os maiores valores (picos) de concentração ocorrem simultaneamente durante o início das chuvas e logo após os picos de vazão, erosão hídrica provocada pelo escoamento das águas

pluviais (vazão específica). Além disso, foi possível verificar uma pequena tendência de diminuição das concentrações de sólidos totais dissolvidos (Figura 9D), no início do período de chuvas entre outubro e novembro, no entanto, conforme descrito anteriormente, a concentração deste parâmetro pode ter influências do escoamento de base (subterrâneo).

Com a comparação entre os modelos de regressão potencial e de diluição teórica da Figura 10, é possível fazer uma análise de proveniência dos nutrientes dissolvidos, distinguindo os elementos de origem pontual daqueles de origem difusa (Vendramini et al., 2014). Para íon sulfato (SO_4^{2-}) não foi possível realizar a regressão potencial e a diluição teórica, pois, não foram detectadas concentrações nas amostras dos meses de maio, junho e julho.

Os nutrientes nitrato (Figura 10A) e fوسفato (Figura 10B) não demonstram uma boa tendência de correlação com a vazão NO_3^- ($R = 0,24$) de coeficiente b de 0,34 e PO_4^{3-} ($R = 0,48$) de coeficiente b de 0,57. O comportamento inverso à

diluição desses nutrientes dissolvidos que exibem coeficiente b positivo, indicam que o aporte desses elementos se dá pela lixiviação durante os eventos de chuva ou por aporte atmosférico.

Segundo Oliveira et al. (2014) o distanciamento relativo entre as duas curvas, representa possíveis aportes difusos para a carga fluvial (relacionados com os processos de alteração de rochas, aportes atmosféricos ou resíduos agrícolas), enquanto a aproximação se relaciona aos aportes pontuais (esgotos domésticos ou efluentes industriais).

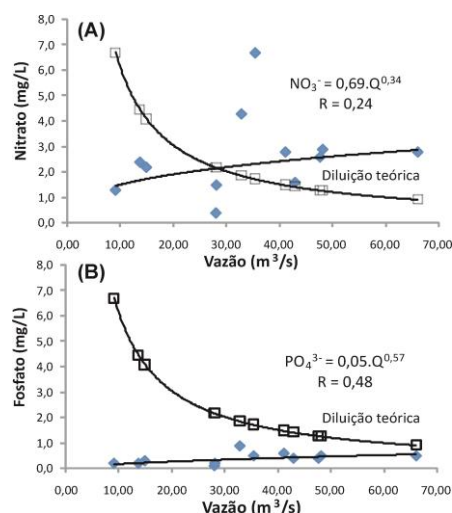


Figura 10. Relação da concentração de fosfato e nitrato em relação a vazão com as curvas de diluição no ponto de amostragem da bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo.

Transporte fluvial de sedimentos e nutrientes

O transporte fluvial de sedimentos e nutrientes foi de aproximadamente $3,0 \times 10^3$ t de NO_3^- , $5,6 \times 10^3$ t de SO_4^{2-} , 480 t de PO_4^{3-} , $24,0 \times 10^3$ t de STD, $41,8 \times 10^3$ t de STS e $65,9 \times 10^3$ t de ST que

são anualmente carregados e transportados ao Reservatório da Usina Hidrelétrica Caconde pelo Alto Rio Pardo (Tabela 7). Considerando a média ponderada pela vazão, área de drenagem do ponto de amostragem ($1627,05 \text{ km}^2$) e a carga anual transportada (t/ano), foi calculado o transporte específico ($\text{t/km}^2/\text{ano}$) da bacia do Alto Rio Pardo (Tabela 7).

Na bacia, a área urbana ocupa aproximadamente 1,5% (24 km^2), sendo 38% (641 km^2) ocupados por culturas agrícolas, 19% (306 km^2) por mata nativas e/ou florestas plantadas, 16% (261 km^2) por pastagens, sendo o restante ocupado por solos expostos, campos de altitude e água (Figura 3B). Neste sentido, a quantidade de material transportado por unidade de área ($1,84 \text{ t/km}^2/\text{ano}$ de NO_3^- , $3,46 \text{ t/km}^2/\text{ano}$ de SO_4^{2-} , $0,30 \text{ t/km}^2/\text{ano}$ de PO_4^{3-} , $14,77 \text{ t/km}^2/\text{ano}$ de STD, $25,75 \text{ t/km}^2/\text{ano}$ de STS e $40,52 \text{ t/km}^2/\text{ano}$ de ST) pode estar relacionado com as características fisiográficas, morfométricas e de uso da terra.

Na bacia do Alto Rio Pardo não afloram rochas com grandes quantidades de minerais que possuam NO_3^- , SO_4^{2-} e/ou PO_4^{3-} em sua composição, conforme também relatado por Libânio e Sardinha (2020) para a bacia do Rio Muzambo, afluente do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Fumas (MG). As bacias apesar de possuírem um contexto litológico e de uso do solo similar, apresentam valores diferentes no transporte fluvial de sedimentos e nutrientes (Tabela 7). Os altos valores encontrados neste estudo podem contribuir para o assoreamento (diminuindo o volume de água utilizável e de energia gerada) e para a eutrofização do ambiente lântico (diminuindo a qualidade da água para os usos múltiplos) do Reservatório da Usina Hidrelétrica Caconde.

Tabela 7. Transporte fluvial anual e transporte específico de sedimentos e nutrientes.

	Área (km^2)	NO_3^-	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	STD	STS	ST
		(t/ano)					
^a Alto Rio Pardo	1627,05	3000,31	5637,53	480,17	24036,20	41899,50	65935,70
^b Rio Muzambo	1322,00	846,46	182,72	64,27	14695,49	17051,08	31746,57
		(t/ km^2/ano)					
^a Alto Rio Pardo	1627,05	1,84	3,46	0,30	14,77	25,75	40,52
^b Rio Muzambo	1322,00	0,64	0,14	0,05	11,12	12,90	24,01

Legenda: NO_3^- = nitrato; SO_4^{2-} = sulfato; PO_4^{3-} = fosfato; STD = sólidos totais dissolvidos; STS = sólidos totais em suspensão; ST = sólidos totais; ^aEste estudo; ^bLibânio e Sardinha (2020).

Conclusões

Com uma altitude média de 1.188 m e predomínio de relevos movimentados, ondulados com colinas e morros, a bacia hidrográfica do Alto Rio Pardo apresenta uma predominância de rochas monzoníticas, ortognaisses, granitos, sienitos e

fonólitos. Estas características juntamente com o clima temperado úmido da região, precipitação em torno de 1.500 a 1.700 mm, deram origem a Argissolos, Cambissolos e Latossolos que produzem café, milho, batata, feijão, soja e servem de substrato para a criação de bovinos de corte, leiteiros e sustentam fragmentos florestais da Mata Atlântica.

A bacia, com um comprimento total de 3.229 km de cursos d'água, apresenta densidade de drenagem anômala superior igual a 1,98 km/km² indicando alta variação de altitude e elevação. Estas características podem contribuir para o escoamento superficial e a erosão hídrica, principalmente no período chuvoso onde ocorre aproximadamente 93% da produção de água, o que pode ocasionar prejuízos financeiros na produção agrícola, de energia e na qualidade das águas.

A temperatura da água apresenta uma variação de aproximadamente 10,7°C entre o verão e o inverno, o pH médio anual é próximo da neutralidade (6,4) e a condutividade elétrica varia entre 25,7 µS/cm e 58 µS/cm. Os valores de turbidez variam entre um mínimo de 0,9 NTU e máximo 100,6 NTU e o oxigênio dissolvido médio anual é de 6,2 mg/L. As concentrações de nitrato, sulfato e fosfato apresentam uma média ponderada anual de 2,8 mg/L, 5,3 mg/L e 0,4 mg/L respectivamente.

Na bacia, o aumento da vazão (diluição) pode estar ocorrendo antes do escoamento de base aumentando as concentrações de sólidos totais dissolvidos em abril (37,7 mg/L), já as concentrações de sólidos totais (122,8 mg/L) e em suspensão (103,5 mg/L) ocorrem nos meses de maior vazão, provável efeito da erosão hídrica dos solos nos relevos movimentados da bacia. As amostragens demonstram que a bacia apresenta qualidade da água dentro dos padrões para a maioria dos parâmetros analisados, no entanto, para pH nos meses de junho (5,1) e abril (5,4) e oxigênio dissolvido nos meses de maio (3,0 mg/L) e setembro (4,6 mg/L) as concentrações estão abaixo do limite.

As rochas da bacia não possuem grande quantidade de nitrato, fosfato e sulfato em sua composição mineralógica, no entanto, a aplicação de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e sulfatados em áreas de agricultura manual, mecanizada ou temporária em locais de maior declividade podem contribuir com a remoção de partículas e íons do solo influenciando no transporte fluvial anual de sedimentos (STD = 24,0x10³ t, STS = 41,8x10³ t e ST = 65,9x10³ t) e nutrientes (NO₃⁻ = 3,0x10³ t, SO₄²⁻ = 5,6x10³ t e PO₄³⁻ = 480 t). Junto a isso, a vazão específica média da bacia de 20,88 l/s/km² também pode contribuir na quantidade de material transportado por unidade de área (1,84 t/km²/ano de NO₃⁻, 3,46 t/km²/ano de SO₄²⁻, 0,30 t/km²/ano de PO₄³⁻, 14,77 t/km²/ano de STD, 25,75 t/km²/ano de STS e 40,52 t/km²/ano de ST).

Estes elementos quando adentram em um ambiente lântico (Reservatório da Hidrelétrica Caconde), podem ocasionar efeitos adversos na

qualidade do recurso hídrico. Com isso, além do trabalho poder contribuir com a gestão dos recursos hídricos, sugere-se que novos estudos possam ser realizados e com maior periodicidade, a fim de determinar a dinâmica dessa importante bacia hidrográfica localizada na região Sul do Estado de Minas Gerais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Pró Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação (PRPPG) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal) em especial a Prof^a. Vanessa Bergamin Boralli Marques pelo apoio logístico. Os autores também gostariam de agradecer a Prof^a. Josiclêda Domiciano Galvêncio pelas contribuições na melhora deste manuscrito.

Referências

- ABIC. Associação Brasileira da Indústria de Café. 2020. Estatísticas; Produção Agrícola 2002 a 2016. 2016. Disponível em: <https://www.abic.com.br/estatisticas/producao-agricola-2/>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1987. NBR 9898: preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, 22p.
- Alves, W.S.; Morais, W.A.; Oliveira, L.D.; Pereira, M.A.B.; Martins, A.P.; Vasconcelos, S.M.A.; Ramalho, F.L. 2019. Análise das relações entre uso do solo e qualidade da água do Lago Bonsucesso, em Jataí, Estado de Goiás, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 326-342.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2019. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Portal HidroWeb. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf. Acesso em: 06 jun. 2019.
- Anjinho, P.S.; Neves, G.L.; Barbosa, M.A.G.A.; Mauad, F.F. 2020. Análise da qualidade das águas e do estado trófico de cursos hídricos afluentes ao reservatório do Lobo, Itirapina, São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 364-376.
- APHA. American Public Health Association. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. ed. Washington, 1935p.
- Araújo, D.R.; Mendonça, A.S.F.; Reis, J.A.T. 2018. Análise de variação e comparação de índices de estado trófico: reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos de Rio Bonito e

- Suíça. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 23, 55-62.
- Barcelos, A.A.; Ramalho, F.L.; Cabral, J.B.P.; Alves, W.S. 2017. Diagnóstico da qualidade das águas do córrego Sucuri (Caçu-Goiás). *Revista Brasileira de Geografia Física* v.10, n.4, 1312-1328.
- Bifano, R.B.A.; Marcolin, C.R.; Crepaldi, M.O.S.; Quinelato, R.V.; Okumura, A.T.R.; Silva, A.G.; Bandeira, M.L.S.F. 2020. Avaliação da Qualidade da Água em Microbacias Hidrográficas do Extremo Sul da Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 05, 24447-2461.
- Braga, C.C.; Cabral, J.B.P.; Lopes, S.M.F.; Oliveira, S.F.; Rocha, I.R. 2018. Qualidade dos sedimentos em relação à presença de metais pesados no reservatório da usina hidrelétrica de Caçu – GO. *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 959-972.
- BRASIL. 2005. 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, 27p.
- Cabral, J.B.P.; Filho, W.P. 2018. Técnicas de sensoriamento remoto aplicada análise da concentração de sólidos em suspensão na UHE Foz do Rio Claro – GO. *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 1526-1541.
- Calado, T.O.; Cardoso, A.S.; Marques, E.A.T.; Sobral, M.C. 2020. Planos diretores na articulação da gestão de recursos hídricos com o uso do solo no entorno de reservatórios. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 958-972.
- Cavalcanti, I.F.A.; Ferreira, N.J.; da Silva, M.G.A.J.; Dias, M.A.F.S. 2016. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de textos, 2º reimpressão, 464 p
- Celarino, A.L.S.O.; Ladeira, F.S.B. 2014. Análise morfométrica da bacia do Rio Pardo (MG e SP). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, 15, 471-491.
- Christofolletti, A. 1980. *Geomorfologia*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 188p.
- CODEMIG. Companhia de desenvolvimento econômico de Minas Gerais. 2019. Portal da geologia. Projeto Fronteiras de Minas. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>. Acesso em: 22 maio 2019.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1979. Projeto Sapucaí: relatório final. Escala 1:250.000. São Paulo, CPRM. DNPM/CPRM, 5 volumes, 289p.
- Degrande, E.J.S.; Firmino, G.V.; Torres, M.A.N. 2020. Dinâmica Fluvial e Caracterização Limnológica do Córrego do Cedro, Presidente Prudente -São Paulo/ Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.13, n. 04, 1851-1869.
- DME. Departamento Municipal de Eletricidade. 2019. Disponível em: <http://www.dme-pc.com.br/contato-top>. Acesso em: 06 jun 2019.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5º Edição revisada e ampliada, Brasília, 356 p
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2019. Portal GeoInfo. Mapa de solos do estado de Minas Gerais. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode/%3Alev_mg_estado_solos_lat_long_wgs84_vt. Acesso em: 04 junho 2019.
- Félix-Faure, J.; Gaillard, J. ; Descloux, S.; Chanudet, V.; Poirel, A.; Baudoin, J.M.; Avriillier, J.N.; Millery, A.; Dambrine, E. 2019. Contribution of Flooded Soils to Sediment and Nutrient Fluxes in a Hydropower Reservoir (Sarrans, Central France) *Ecosystems*, 22(2), 312-330.
- HACH. 2009. DR/820, DR/850 and DR/890. Portable Datalogging Colorimeter Instrument Manual. 2. ed. Loveland, Colorado, U.S.A: Hach Company, 68p.
- IEF. Instituto Estadual de Florestas. 2008. Inventário florestal de Minas Gerais: monitoramento da flora nativa: 2005-2007. Lavras: UFLA, 357 p.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 2019. Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais. IDE-Sisema. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 07 julho 2019.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Fundação Educacional de Ensino de Técnicas Agrícolas, Veterinárias e de Turismo Rural-Fundação ROGE. Plano diretor da bacia hidrográfica dos afluentes mineiros dos rios Mogi-Guaçu e Pardo (Unidade de Gestão GD6): Relatório Executivo Final. Delfim Moreira, 2010. 280 p.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2019. SGI 2.5 Divisão de Geração de Imagens (DIDGI). SGI. Imagem Geosistemas, São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Acesso em: 27 junho 2019.

- Kattan, Z., Probst, J. L. 1986. Transport en suspension et en solution par la Moselle en périodes de crue. Actes des Journées D'Hydrologie, "Crues et inondations", 143-167.
- Libânio, C.R.; Sardinha, D.S. 2020. Transporte anual de sedimentos e nutrientes do Rio Muzambo, tributário do Reservatório de Furnas (MG). RMRH - Revista Mineira de Recursos Hídricos, 1, 1-20.
- Luíz, A.M.E.; Pinto, C.M.L.; Scheffer, E.W.O. 2012. Parâmetros de cor e turbidez como indicadores de impactos resultantes do uso do solo, na Bacia Hidrográfica do Rio Taquaral, São Mateus do Sul-PR. Revista Ra'ega, 290-310.
- Martins, L.L.; Martins, W.A.; Moraes, J.F.L.; Júnior, M.J.P.; Maria, I.C. 2020. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Geografia Física 13, 576-594.
- Mello, C.R.; Silva, A.M. 2013. Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. Lavras: Editora UFLA, 455p.
- Melo, S.C.; Filho, J.C.A.; Carvalho, R.C.M.O. 2020. Curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão no Baixo São Francisco. Revista Brasileira de Geografia Física v. 13 n. 03, 1248-1262.
- Okumura, A.T.R.; Silva, A.G.; Silva, N.R.S.; Lopes, E.R.N.; Bifano, R.B.A.; Quilenato, R.V.Q.V. 2020. Determinação da qualidade da água de um rio tropical sob a perspectiva do uso. Revista Brasileira de Geografia Física 13, 1835-1850.
- Oliveira, H.; Motatti, J.; Moraes, G.M.; Vendramini, D.; Campo, K.B.G. 2014. Caracterização hidrogeoquímica da carga dissolvida nas bacias dos rios Jundiá e Capivari, São Paulo. Revista Geociências, v. 33, n. 2, 278-297.
- Quinelato, R.V.; Okumura, A.T.R.; Bifano, R.B.A.; Farias, E.S.; De Brito, J.M.S.; Ferreira, C.S.V.A.; Silva, J.B.L.; Bernardes, M.E.C.; Silva, A.G. Determinação da qualidade da água superficial e sua compatibilidade com os múltiplos usos: estudo de caso do estuário do rio Caraíva. 2021. Revista Brasileira de Geografia Física 14, 037-057.
- Reboita, M.S.; Rodrigues, M.; Silva, L.F.; Alves, M.A. 2015. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Climatologia, v. 17, 206-226.
- Rocha, C.M.C.; Lima, D.M.B.; Cunha, M.C.C.; Almeida, J.S. 2020. Submerged Macrophytes, Phytoplankton and Zooplankton in Tropical Reservoir. Revista Brasileira de Geografia Física 13, 2170-2179.
- Rodrigues, B.M.; Osco, L.P.; Antunes, P.A.; Ramos, A.P.M. 2019. Avaliação da influência do uso e cobertura da terra na qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Pirapozinho (SP). Revista Brasileira de Geografia Física 12, 738-753.
- Sardinha, D.S.; Bonotto, D.M.; Godoy, L.H.; Conceição, F.T.; Moreno, M.M.T. 2013. Influências geogênicas/antropogênicas na composição química das águas pluviais de Dois Córregos, bacia do Rio Jaú (SP). Revista Geociências, 32, 577-585.
- Sardinha, D.S.; Souza, A.D.G.; Silva, A.M.; Libânio, C.R.; Menezes, P.H.B.; Tiezzi, R.O. 2019. Índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) aplicado em afluente da Represa Bortolan em Poços de Caldas (MG). Revista DAE, 67, 95 - 108.
- Silva, D.G.; Melo, R.F.T.; Corrêa, A.C.B. 2009. A influência da densidade de drenagem na interpretação da evolução geomorfológica do complexo de Tanques do município de Brejo da Madre de Deus – Pernambuco, nordeste do Brasil. Revista de Geografia, Recife, 26, 294-306.
- Silva, H.B.; Silva, C.E. 2020. Qualidade da água de um parque urbano em Teresina, PI. Revista Brasileira de Geografia Física 13, 2371-2387.
- Sousa, K.A.; Espindola, G.M.; Silva, C.E. 2021. Análise de atributos limnológicos em reservatórios do semiárido nordestino. Revista Brasileira de Geografia Física 14, 357-371.
- Souza, D.F.; Silva, L.O.S.; Pinto, O.L. 2020. Qualidade física, química e biológica sazonal das águas superficiais da bacia hidrográfica do córrego Moeda em Três Lagoas/MS. Revista Brasileira de Geografia Física 13, 196-210.
- Stevaux, J.C.; Latrubesse, E.M. 2017. Geomorfologia fluvial. São Paulo, Oficina de Texto, 336p.
- Thiessen, A.H. 1911. Precipitation averages for large areas. Monthly Weather Review, 39, 1082-1089.
- USGS. United States Geological Survey. 2019. EarthExplorer. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em 14 julho. 2019.
- Vendramini, D.; Oliveira, H.; Mortatti, J. 2014. Avaliação do comportamento dinâmico da carga dissolvida e particulada fluvial de uma microbacia reflorestada com eucaliptos. Revista Ambiente e Água, 9, 499-525.
- Villela, S.M.; Mattos, A. 1975. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p.