



Avaliação espaço-temporal de qualidade da água no córrego Mumbuca, área urbana de Monte Carmelo/MG

Caroline Yuka Mori Saito; Roseli Mendonça Dias; Maria Lyda Bolanos Rojas; Marcio Ricardo Salla; Edmar Isaias de Melo; Ivania Beatriz Almeida de Souza; Daiane Gabriela Ribeiro; Daise Aparecida Rossi; Universidade Federal de Uberlândia

Palavras-chave

Diagnóstico ambiental;
Poluição da água;
Índice de Qualidade das Águas;
Córrego Mumbuca

Keywords

Environmental diagnosis;
Water pollution;
Water Quality Index;
Mumbuca stream

Resumo: A qualidade da água em corpo hídrico de pequeno porte próximo a áreas urbanas pode ser reflexo do aumento da demanda hídrica para usos múltiplos e de problemas de infraestrutura urbana, cujas informações sobre os índices de qualidade são escassas. O presente estudo objetivou avaliar as variáveis que exercem maior influência no Índice de Qualidade das Águas (IQA) no córrego Mumbuca, área urbana de Monte Carmelo/MG, e sua sazonalidade. Amostras de água foram coletadas bimestralmente e as variáveis oxigênio dissolvido (OD), temperatura, pH, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrato, fósforo total, turbidez e sólidos totais foram avaliadas e utilizadas para o cálculo e classificação do IQA conforme definições da Nacional Sanitation Foundation (NSF). A análise multivariada evidenciou que a variável OD possui um efeito positivo e DBO, turbidez, nitrato e fósforo total tiveram efeitos negativos. Os resultados mostraram que o córrego Mumbuca apresenta valores de IQA-NSF médio e ruim, evidenciando o possível impacto provocado pela atividade antrópica e lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego na área urbana.

Abstract: The water quality of small water bodies near urban areas can reflect the increased water demand for multiple uses and urban infrastructure problems, for which information on quality indices is scarce. This study aimed to evaluate the seasonality and variables that exert the greatest influence on the Water Quality Index (WQI) in the Mumbuca stream, in the urban area of Monte Carmelo/MG. Water samples were collected bimonthly and the variables dissolved oxygen (DO), temperature, pH, thermotolerant coliforms, biochemical oxygen demand (BOD), nitrate, total phosphorus, turbidity and total solids were evaluated and used to calculate the WQI and its classification according to the definitions of the National Sanitation Foundation (NSF). The multivariate analysis showed that the DO variable had a positive effect, while BOD, turbidity, and total nitrate and phosphorus had negative effects. The results showed that the Mumbuca stream had average and poor IQA-NSF values, evidencing the possible impact caused by human activity and the discharge of raw domestic sewage directly into the stream in the urban area.



Introdução

A demanda hídrica para usos múltiplos possivelmente aumentará 24% até 2030 no Brasil, ultrapassando a marca de 2,5 milhões de litros por segundo, com destaque aos usos consuntivos para abastecimento público, indústrias e agricultura irrigada; a evolução dos usos da água advém do desenvolvimento econômico e do processo de urbanização, com reflexo direto na qualidade da água junto às áreas urbanas em função dos problemas estruturais com o saneamento básico (ANA, 2019).

No estado de Minas Gerais (MG) o atendimento total de água à população e a coleta e o tratamento de esgoto correspondem a 84,16%, 67,05% e 56,94%, respectivamente, para o ano base de 2022; quando os indicadores de água e o esgotamento sanitário são observados para o município de Monte Carmelo/MG, o atendimento total de água passa a ser de 99,11% e a coleta e o tratamento de esgoto de 99,66% e 74,12%, respectivamente, para o mesmo ano base (SNIS, 2024).

Diversos problemas de infraestrutura urbana refletem na qualidade da água junto ao corpo hídrico receptor, tais como ausência de rede coletora de esgoto, ausência de interceptores de esgoto, estações de tratamento de esgoto ineficientes e subdimensionadas, ligações clandestinas de esgoto sanitário em rede de drenagem pluvial e ligações clandestinas de água pluvial em rede de esgoto. Especificamente na área urbana de Monte Carmelo/MG, apesar da existência de uma estação de tratamento de esgoto, a rede coletora incompleta e lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego ocasionam a poluição do córrego urbano.

Infelizmente, os órgãos ambientais não trazem informações para a comunidade sobre a qualidade da água em cursos de pequeno porte, principalmente em trechos próximos às áreas urbanas (SISEMA, 2024). Especificamente na área urbana de Monte Carmelo/MG, a existência de um programa de monitoramento de qualidade da água no córrego Mumbuca, em ponto a montante e jusante do lançamento de esgoto sanitário tratado, está vinculado às condicionantes ambientais para operação de estação de tratamento, onde periodicamente são analisados diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos inseridos em resolução ambiental nacional (Resolução CONAMA Nº 357 e Resolução CONAMA Nº 430) (BRASIL, 2005; BRASIL, 2011) e estadual (Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH Nº 8) (MINAS GERAIS, 2022).

Para a divulgação à comunidade da variação sazonal da qualidade de água por trechos de cursos de água maiores, órgãos ambientais como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Sistema Estadual do Meio Ambiente (SISEMA - Minas Gerais) utilizam o Índice de Qualidade das Águas – IQA, a fim de proporcionar um caráter menos técnico na interpretação dos resultados. Os índices de qualidade não são considerados um instrumento de atendimento à legislação ambiental, e sim uma forma de comunicação fácil e direta com o público sobre as condições ambientais dos cursos d'água (VON SPERLING, 2007).

O monitoramento e o índice de qualidade das águas são importantes instrumentos para controle ambiental e gestão de recursos hídricos no país (LEITÃO et al., 2015), já que permite a caracterização e a análise de tendências em bacias hidrográficas. Indicadores de qualidade de água também contribuem para determinar possíveis causas e consequências da perda de qualidade ambiental de forma mais abrangente, além de permitir diferenciar entre impactos antrópicos e naturais (FERREIRA; CUPOLILLO, 2016).

Embora diferentes tipos de parâmetros possam ser considerados para a determinação do índice de qualidade das águas (PRABAGAR et al., 2023), a metodologia de IQA desenvolvida pela *National Sanitation Foundation* (NSF) dos Estados Unidos tem enorme aceitação (SIQUEIRA; APRILE; MIGUÉIS, 2012; SANTIAGO; JESUS; SANTOS, 2016; SANTOS et al., 2018); a metodologia considera nove parâmetros para caracterização da qualidade da água bruta: oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitrato, fosfato total, temperatura da água, turbidez e sólidos totais.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a sazonalidade do IQA-NSF no córrego Mumbuca, área urbana de Monte Carmelo/MG, além de avaliar estatisticamente, por meio de Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* PCA, em inglês), os parâmetros que mais exercem influência sobre a qualidade da água por ponto de monitoramento.

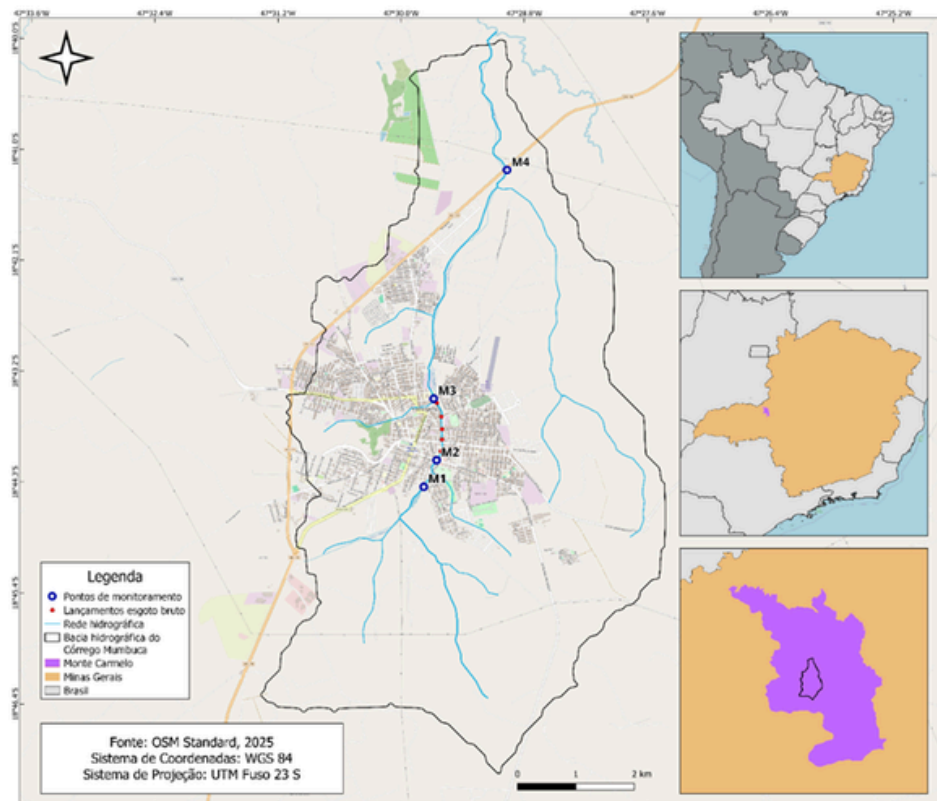
Material e métodos

Área de estudo

A sub-bacia do córrego Mumbuca está totalmente inserida no município de Monte Carmelo, Minas Gerais, cujos principais usos e ocupação da terra incluem agricultura, pecuária e urbanização; o destaque da economia regional é a produção de telhas, tijolos, artefatos cerâmicos, além da produção de café (PELEGRINI; SANTIL, 2021). Segundo NOVAIS; BRITO; SANCHES (2018), o clima no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba é tropical com seis a sete meses secos e intensidade pluviométrica média anual entre 1300 e 1450 mm. O córrego estende-se por cerca de 14 km, desde sua nascente principal na região sul, a uma altitude próxima a 970 m, até seu deságue no rio Perdizes na região norte, a uma altitude próxima a 821 m; o rio Perdizes é um tributário do rio Paranaíba em área remansada do reservatório da Central Hidrelétrica Emborcação, também em sua margem esquerda.

Praticamente toda a área urbana de Monte Carmelo/MG está concentrada no médio curso do córrego, com pequenos fragmentos populacionais fora da sub-bacia na porção oeste (ver Figura 1); a população urbana total é de 47692 habitantes e densidade populacional de 35,51 hab/km² (IBGE, 2022). Ainda na Figura 1, estão apresentados os quatro pontos de monitoramento inseridos no alto e médio curso, em região à montante da urbanização (ponto M1), na região urbanizada (pontos M2 e M3) e jusante da urbanização (ponto M4). O ponto M1 foi escolhido em razão de não ter interferência da urbanização na qualidade da água, já os pontos M2 e M3 se localizam onde as atividades antrópicas e lançamento de esgoto doméstico bruto no córrego influenciariam a qualidade da água e o ponto M4 após o lançamento do esgoto tratado pela Estação de Tratamento de Esgoto.

De acordo com DMAE (2023), a característica do esgoto tratado pela ETE e lançado no córrego assume 1,26.10⁸ NMP/100 mL para coliformes termotolerantes e 151,52 mg/L para DBO (relatório de monitoramento ambiental de dezembro de 2023), além de 0,64 mg/L para nitrato, 47,04 mg/L para amônia e 2,62 mg/L para fósforo total (relatório de monitoramento ambiental de novembro de 2023). Os principais tributários ao córrego Mumbuca são urbanos, incluindo os córregos Exposição, Olaria e Monjolo, além do córrego Lambari em área rural (ver Figura 1).

Figura 1 - Localização da sub-bacia do córrego Mumbuca e identificação dos pontos de monitoramento.

Fonte: elaborado pelos autores, 2024

Aproximadamente 40% da demanda de água para abastecimento urbano é suprida pelas captações superficiais nas cabeceiras dos córregos Mumbuca e Lambari; o restante da demanda é suprido por poços tubulares profundos distribuídos na área urbana (DMAE, 2021). A porcentagem populacional com acesso ao sistema de abastecimento de água é de 99,11%, coleta de esgoto de 99,66% e esgoto tratado de apenas 74,12% (SNIS, 2024). Apesar da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da cidade de Monte Carmelo ter capacidade para tratar 100% da carga poluente gerada, a rede de coleta e transporte não contempla toda a área urbana, além do que existem lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego entre os pontos de monitoramento M2 e M3 (MARQUES; COSTA; MATSUOKA, 2019; DMAE, 2021).

Programa de monitoramento

As amostragens bimestrais nos pontos de monitoramento M1, M2, M3 e M4 ocorreram entre abril de 2023 e abril de 2024, que englobam períodos de estiagem e chuvoso. Todo o planejamento de campo, preparo dos frascos, coleta e preservação das amostras de água seguiram as orientações contidas nas ABNT: NBR 9897/1987 (ABNT, 1987a) e ABNT: NBR 9898/1987 (ABNT, 1987b).

O Oxigênio Dissolvido e a Temperatura foram medidos in loco com auxílio dos equipamentos *Dissolved Oxygen Meter* (HI9146, HANNA) e *Multiparameter* (HI9829, HANNA). O pH foi determinado com auxílio do medidor de pH de bancada - pH Plus. Os métodos para determinação dos demais parâmetros encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1 - Equipamentos e metodologias utilizados para determinação dos parâmetros.

Parâmetro	Métodos	Equipamentos
Coliformes termotolerantes	9221 <i>Multiple-Tube Fermentation Technique - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (APHA, 2017).	-
Demanda Bioquímica de Oxigênio	5210 D. <i>Respirometric Method - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (APHA, 2017).	Sistema para medição respirométrica (OxiTop)
Nitrato	4500-NO ₃ ⁻ B. <i>Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (APHA, 2017).	Espectrofotômetro Uv-Vis (DR 5000, HACH)
Fósforo Total	4500-P B. <i>Sample Preparation; 4. Sulfuric Acid-Nitric Acid Digestion - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (APHA, 2017).	Chapa aquecedora (208 D, Nova Ética), Espectrofotômetro Vis (V-M5, BEL)
Turbidez	2130 B. <i>Nephelometric Method - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (APHA, 2017).	Turbidímetro de bancada (AP2000, Policontrol)
Sólidos Totais	2540 B. <i>Total Solids Dried at 103-105 °C - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (APHA, 2017). E método gravimétrico pela ABNT:NBR 10664/1989 (ABNT, 1989).	Estufa de secagem e esterilização (SL 100, SOLAB), Mufla (Quimis)

Fonte: elaborado pelos autores, 2024

IQA-NSF

Para o cálculo do IQA-NSF foi utilizado o produtório ponderado, conforme Equação (1).

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Na qual: *IQA* é o Índice de Qualidade das Águas, com variação entre 0 e 100; *n* é a quantidade de parâmetros (nove); *q_i* é a concentração de cada parâmetro; *w_i* é o peso de cada parâmetro, entre 0 e 1, fixado em função da sua influência na qualidade da água (0,17 para OD, 0,15 para coliformes termotolerantes; 0,12 para pH; 0,10 para DBO; 0,10 para diferença de temperatura; 0,10 para nitrato; 0,10 para fósforo total; 0,08 para turbidez e 0,08 para sólidos totais).

Após o cálculo do IQA, o valor obtido (um número entre 0 e 100) foi interpretado pelas faixas de valores do IQA e classes definidas pela *National Sanitation Foundation* (NSF) (Excelente: 90 < IQA ≤ 100, Bom: 70 < IQA ≤ 90, Médio: 50 < IQA ≤ 70, Ruim: 25 < IQA ≤ 50, Muito ruim: 0 < IQA ≤ 25).

Análise de Componentes Principais

Mais conhecido na literatura como PCA (*Principal Component Analysis*), a avaliação estatística multivariada da Análise de Componentes Principais foi utilizada na avaliação de variáveis que mais influenciaram na qualidade da água por ponto de monitoramento (M1, M2, M3 e M4). No presente estudo, essas variáveis são representadas pelos nove parâmetros utilizados no cálculo do IQA-NSF mais a vazão superficial; a vazão foi inserida nessa análise estatística pois é responsável pelo transporte e diluição da carga poluente.

Esta metodologia permite transformar um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionados e que são identificados como componentes principais. Em outras palavras, a avaliação estatística de componentes principais é uma técnica para redução do tamanho ou dimensão do conjunto de dados complexos, preservando a representatividade de cada variável (JOLLIFFE e CADIMA, 2016). Essa redução no conjunto de dados complexos facilita a identificação das variáveis que mais influenciam na qualidade da água por ponto de monitoramento.

Cada novo conjunto de variáveis não correlacionadas forma um eixo principal ou componente principal. A quantidade de eixos principais é similar ao número de variáveis. Apenas os dois primeiros eixos principais são utilizados (eixo X ou Componente Principal 1 e eixo Y ou Componente Principal 2), os quais explicam a maioria das variâncias dos resultados dos nove parâmetros de qualidade da água e da vazão superficial. O estudo utilizou a ferramenta computacional de uso livre Past4.03 para a análise estatística multivariada PCA.

Resultados e discussão

O principal agente poluidor do córrego Mumbuca é o esgoto doméstico bruto advindo do lançamento no córrego, cuja característica típica, de acordo com Tchobanoglous e Burton (1991), assume $10^6 - 10^7$ NMP/100 mL para coliformes termotolerantes, 220 mg/L para DBO, 15,0 mg/L para nitrogênio orgânico, 25,0 mg/L para amônia, 8,0 mg/L para fósforo total e 720 mg/L para sólidos totais. O parâmetro turbidez geralmente não é monitorado diretamente em esgoto doméstico, podendo, no entanto, ser estimado a partir da correlação com os sólidos suspensos totais (KRAJEWSKI, 2018). Os lançamentos de esgoto doméstico bruto se concentram nos tributários urbanos, córrego Exposição e córrego Olaria, e no próprio córrego Mumbuca entre os pontos de monitoramento M2 e M3 (Figura 2).

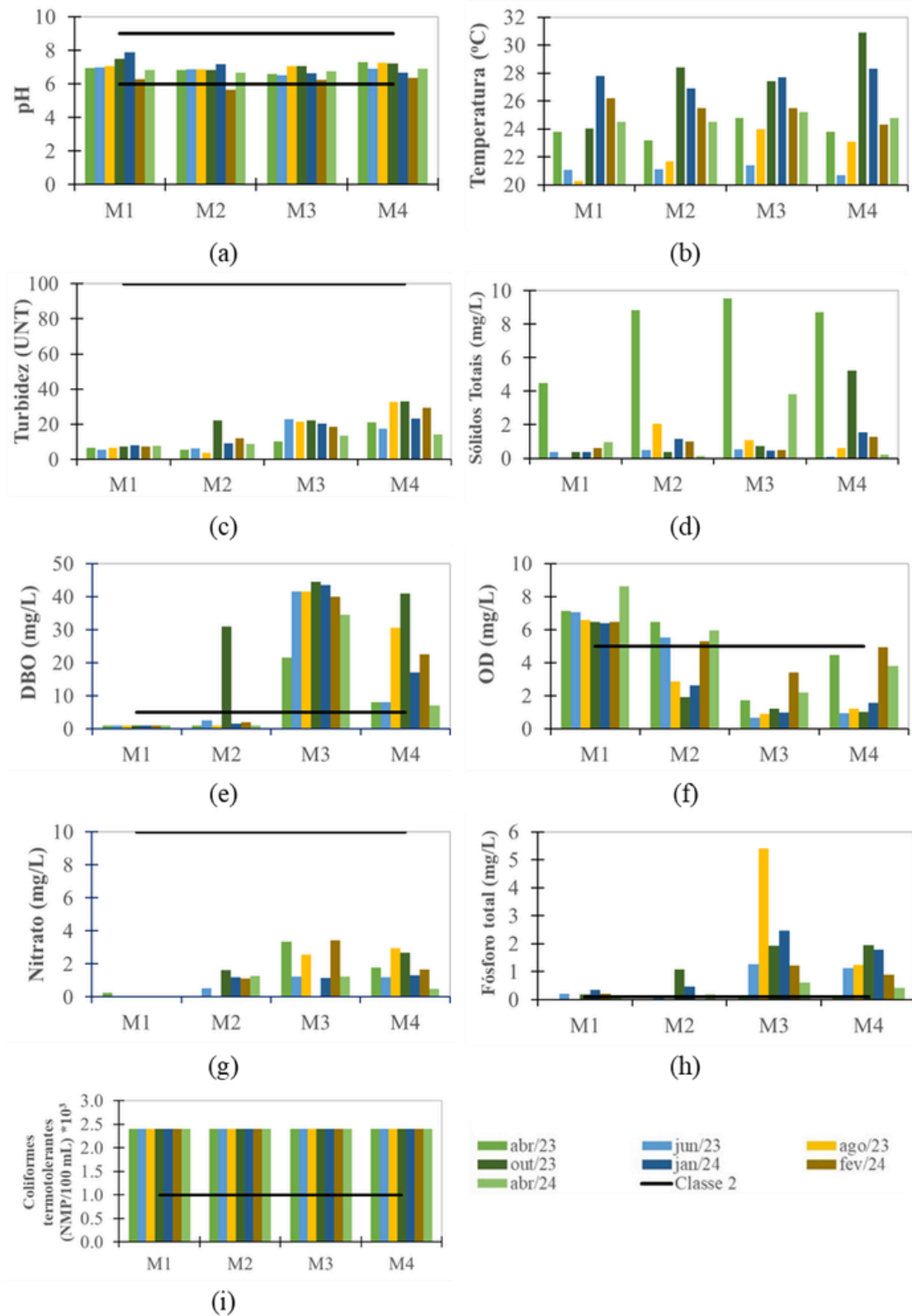
Figura 2 - (a) Final do córrego retificado na área urbana; (b) Lançamento de esgoto bruto próximo a M3; (c) Ponto de monitoramento M2; (d) Ponto de monitoramento M3.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

A Figura 3 traz a variação espaço-temporal dos parâmetros físicos, químicos e biológicos inseridos no cálculo do IQA-NSF e os limites dos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para Classe 2 do curso de água.

Figura 3 - Variação espaço-temporal dos parâmetros de qualidade da água e limites dos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005).



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

O ponto de monitoramento M1 está situado imediatamente a jusante do principal reservatório de acumulação de água para fins de abastecimento público, ainda a montante da área urbana, que confere uma boa qualidade da água nesta região. De acordo com a Figura 3, os menores valores de turbidez (entre 5,60 e 8,07 UNT), sólidos totais (entre 0,04 e 4,50 mg/L), DBO (entre 1,0 e 5,0 mg/L), nitrato (entre 0,01 e 0,26 mg/L) e fósforo total (entre 0,01 e 0,36 mg/L) são observados no ponto de monitoramento M1. Também em M1, a reduzida presença de matéria orgânica carbonácea proporciona elevada concentração de OD (entre 6,38 e 8,63 mg/L).

Já no ponto de monitoramento M2, a qualidade da água é influenciada pelas ligações de esgoto bruto no tributário córrego Exposição, cujos valores dos parâmetros mantiveram-se superiores aos encontrados em M1 (ver a Figura 3). O lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego Mumbuca na região central da área urbana trouxeram os maiores passivos ambientais no ponto de monitoramento M3. Nesse ponto foram monitoradas as maiores concentrações de sólidos totais (entre 0,47 e 9,56 mg/L), DBO (entre 5,0 e 44,5 mg/L), nitrato (entre 0,01 e 3,40 mg/L) e fósforo total (entre 0,06 e 5,40 mg/L), além das menores concentrações de OD (entre 0,65 e 3,40 mg/L) (ver a Figura 3).

No ponto de monitoramento M4, em região a jusante da área urbana, apesar da afluência de esgoto sanitário tratado pela ETE, o processo de autodepuração ocasiona uma ligeira melhoria na qualidade da água em comparação com o ponto M3, alcançando concentrações de OD entre 0,94 e 4,95 mg/L, DBO entre 5,0 e 41,0 mg/L, nitrato entre 0,49 e 3,0 mg/L e fósforo total entre 0,06 e 1,96 mg/L (ver Figura 3). A sequência traz uma discussão detalhada por parâmetro de qualidade da água monitorado no córrego Mumbuca.

O parâmetro pH manteve-se entre 6,7 e 7,1 durante a maioria do período nos pontos M1 até M4 (ver Figura 3a), mantendo dentro do limite de 6,0 a 9,0 estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para corpo hídrico Classe 2. A tendência de diminuição do pH em período chuvoso (VARELA et al., 2020; DAMASCENO et al., 2015), ocasionada pelos solos ácidos carregados superficialmente e decomposição de matéria orgânica, não foi observada na Figura 3a. Independente da época do ano, devido ao aporte constante de carga poluente do lançamento de esgoto doméstico bruto e do esgoto tratado na ETE, os processos de degradação da matéria orgânica por microrganismos aeróbios, amonificação, nitrificação e mineralização do fósforo orgânico não resultaram em variações significativas de pH.

Em relação ao parâmetro temperatura, no ponto M1 os valores estiveram entre 20,3 e 27,8°C e média igual a 23,9°C; no ponto M2, a temperatura variou entre 21,1 e 28,4°C e média igual a 24,4°C; no ponto M3 variou entre 21,4 e 27,7°C com média de 25,1°C; no ponto M4 variou entre 20,7 e 30,9°C e média igual a 25,1°C (ver Figura 3b); as variações sazonais são ocasionadas pelas características climáticas da região (OLIVEIRA et al., 2008). Em uma mesma campanha de campo, a variação espacial tem relação com os horários das amostragens, ou seja, está relacionada com a variação horária de radiação solar; em função da proximidade entre os pontos de monitoramento, as características geométricas similares no córrego (profundidade e largura) provavelmente não influenciaram na variação de temperatura (BARROSO, 2017).

Uma visão geral na Figura 3c verifica-se que houve aumento do parâmetro turbidez ao longo do percurso no córrego Mumbuca, mantendo-se dentro do padrão (≤ 100 UNT) estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 2; focado no ponto M4 situado à jusante da urbanização, o uso e ocupação da terra para agricultura e pecuária não trouxe aporte de turbidez em período chuvoso. A variação foi de 5,60 a 8,07 UNT com média de 6,99 UNT no ponto M1, 3,6 a 22,3 UNT com média de 9,68 UNT no ponto M2, 10,17 a 22,9 UNT com média de 18,47 UNT no ponto M3 e 14,23 a 33,17 UNT com média de 24,4 UNT no ponto M4. O aumento dos valores médios de turbidez de M1 para M2 tem relação com a qualidade da água no córrego Exposição, o qual também recebe esgoto doméstico bruto em algumas regiões; a grande quantidade de carga poluente lançada no córrego na região central de Monte Carmelo/MG fez com que o valor médio da turbidez em M3 dobrasse em comparação com M2; mais a jusante da área urbana, agravado pelo lançamento de esgoto tratado pela ETE municipal, o valor médio da turbidez em M4 foi 32,1% superior ao valor em M3, passando de 18,47 UNT em M3 para 24,40 UNT em M4. Apesar do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) não realizar o monitoramento do parâmetro turbidez na saída da ETE, Oyem et al. (2022) estimaram a turbidez em esgoto doméstico bruto na faixa de 10 a 60 UNT e tratado na faixa de 8 a 34 UNT.

Os cenários para os parâmetros sólidos totais (ST) e turbidez são parecidos, com aumento de concentração ao longo do percurso no córrego Mumbuca; não existe a tendência de que o uso e ocupação da terra para agricultura e pecuária tenha ocasionado significativo aporte de sólidos totais em período chuvoso. A variação de sólidos totais foi de 0,029 a 0,952 mg/L com média de 0,367 mg/L no ponto M1, 0,138 a 6,382 mg/L com média de 1,659 mg/L no ponto M2, 0,472 a 6,69 mg/L com média de 1,97 mg/L no ponto M3 e 0,108 a 5,249 mg/L com média de 1,404 mg/L no ponto M4 (ver Figura 3d). As influências das cargas poluentes do lançamento de esgoto doméstico bruto relatadas na variação do parâmetro turbidez entre M2 e M3 são válidas para o parâmetro sólidos totais.

Uma visão geral do parâmetro demanda bioquímica de oxigênio (DBO) ao longo do córrego evidencia o elevado impacto do lançamento de esgoto doméstico bruto, com variação média de 5,7 mg/L no ponto M2 para 38,0 mg/L no ponto M3; já no ponto M4, em função do processo de autodepuração entre M3 e M4, a concentração média de DBO reduziu para 19,0 mg/L (ver Figura 3e). A maior capacidade de diluição da carga poluente durante o período chuvoso foi observada nos pontos M3 e M4, cujos valores de DBO foram inferiores.

Ainda na Figura 3e, em todas as campanhas no ponto M1 e na maioria das campanhas no ponto M2, a DBO manteve-se dentro do padrão ($\leq 5,0$ mg/L) estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 2; já no ponto M3, em função do lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego, e no ponto M4, em função do lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego e do esgoto tratado na ETE, todas as campanhas mantiveram a DBO fora do padrão ($\leq 5,0$ mg/L) estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 2, entre 21,5 e 44,5 mg/L no ponto M3 e entre 7,0 e 41,0 mg/L no ponto M4. A concentração de DBO em esgoto doméstico bruto é próxima a 220 mg/L (TCHOBANOGLOUS e BURTON, 1991), enquanto em esgoto tratado pela ETE é próxima a 150 mg/L, de acordo com o relatório de monitoramento ambiental de dezembro de 2023 disponibilizado por DMAE (2023).

O parâmetro oxigênio dissolvido (OD) é fundamental para a manutenção dos organismos aeróbios, cujas concentrações baixas podem causar a morte dos peixes e criar condições de anaerobiose nos cursos de água (VON SPERLING, 2007). Existe uma relação inversa entre os parâmetros DBO e OD (ver Figuras 3e e 3f), motivada principalmente pelos fenômenos ambientais simultâneos de reaeração natural e degradação aeróbia da matéria orgânica carbonácea (CHAPRA, 1997). O elevado impacto do lançamento de esgoto doméstico bruto também foi observado para o parâmetro OD ao longo do córrego, com valor médio de 7,0 mg/L no ponto M1, 4,4 mg/L no ponto M2, 1,6 mg/L no ponto M3 e 2,6 mg/L no ponto M4 (ver Figura 3f). O aumento de OD entre M3 e M4, para a maioria das campanhas de campo, mostra que a reaeração ou oxigenação natural prevaleceu sobre a desoxigenação advinda da degradação da matéria orgânica carbonácea. Essa incidência da reaeração natural sobre a desoxigenação é aumentada durante o período chuvoso, em função da maior intensidade de turbulência na superfície líquida, resultando valores médios de 0,9 mg/L em período seco e 2,1 mg/L em período chuvoso no ponto do monitoramento M3 e valores médios de 1,1 mg/L em período seco e 3,9 mg/L em período chuvoso no ponto M4. Ainda na Figura 3f, em todas as campanhas no ponto M1, OD manteve-se dentro do padrão ($\geq 5,0$ mg/L) estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 2, com valores entre 6,4 mg/L e 8,6 mg/L. O lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego Exposição ocasionaram o decaimento elevado de OD no ponto M2 em alguns meses, reduzindo para 1,9 mg/L em outubro de 2023; já nos meses de abril de 2023 e abril de 2024, OD manteve-se entre 5,9 mg/L e 6,5 mg/L em M2; já nos pontos M3 e M4, em função do lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego, todas as campanhas mantiveram OD fora do padrão (≥ 5 mg/L) estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 2, entre 0,7 e 3,4 mg/L no ponto M3 e entre 0,9 e 4,9 mg/L no ponto M4 (ver Figura 3f). As elevadas concentrações de DBO (próxima a 220 mg/L) e amônia (próxima a 25,0 mg/L) no esgoto doméstico bruto, de acordo com Tchobanoglous e Burton, 1991, demandam elevada concentração de OD nos processos de degradação da matéria orgânica carbonácea e nitrificação de amônia para nitrato.

A reduzida concentração de nitrato no córrego indica a presença de esgoto bruto recente. De acordo com Tchobanoglous e Burton (1991), o nitrato mantém-se próximo a zero em esgoto doméstico bruto. Dessa forma, as baixas concentrações nos pontos M2, M3 e M4 relacionam-se ao esgoto bruto lançado diretamente no córrego. Em todas as campanhas e pontos, a concentração de nitrato esteve dentro do padrão ($\leq 10,0$ mg/L) estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 2, com valores entre 0,010 e 0,26 mg/L no ponto M1, entre 0,01 e 1,64 mg/L no ponto M2, entre 0,01 e 3,43 mg/L no ponto M3 e entre 0,49 e 2,95 mg/L no ponto M4 (ver Figura 3g).

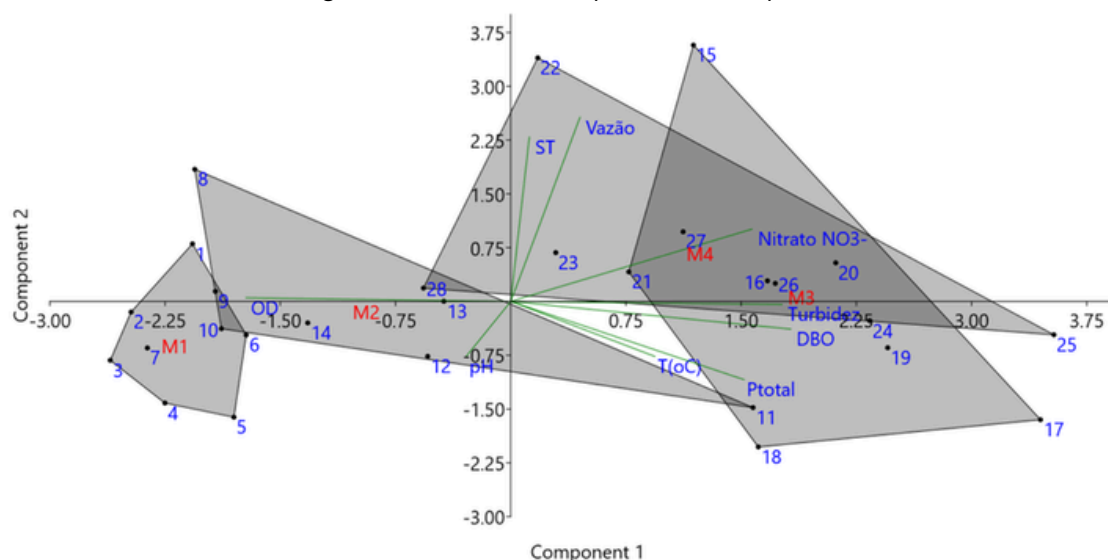
Os cenários para os parâmetros nitrato e fósforo total são parecidos, apesar de que a mineralização de fósforo orgânico para inorgânico não ocasiona o consumo de OD. As concentrações nos pontos M2, M3 e M4 estão relacionadas ao esgoto bruto lançado diretamente no córrego. Em todas as campanhas e pontos, a concentração de fósforo total esteve em desacordo com o padrão ($\leq 0,10$ mg/L) estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 2, com valores entre 0,10 e 0,36 mg/L no ponto M1, entre

0,10 e 1,23 mg/L no ponto M2, entre 0,10 e 5,40 mg/L no ponto M3 e entre 0,10 e 1,96 mg/L no ponto M4 (ver Figura 3h). Para o cálculo do IQA-NSF ocorreu a conversão do fósforo total (como P) a fósforo total (como PO_4^{3-}); para se expressar a concentração em termos de fosfato, deve-se multiplicar por 3,066.

Quanto ao parâmetro biológico, em todas as amostras foram encontrados coliformes termotolerantes > 2.400 NMP/100 mL (ver Figura 3i), indicando contaminação fecal causada pelo lançamento de esgoto bruto no córrego. Em todas as campanhas e pontos, a quantidade de coliformes termotolerantes esteve fora do padrão (≤ 1000 NMP/100 mL) estabelecido pela Resolução CONAMA N° 357 (BRASIL, 2005) para a Classe 2.

A avaliação estatística multivariada da Análise de Componentes Principais foi utilizada na avaliação da influência dos parâmetros inseridos no IQA e da vazão superficial na qualidade da água por ponto de monitoramento. O biplot para os componentes principais explicou 61,57% da variância total dos resultados dos parâmetros, sendo 42,26% da variância no componente 1 (eixo X na Figura 4) e 19,31% da variância no componente principal 2 (eixo Y na Figura 4).

Figura 4 - Análise de Componentes Principais.



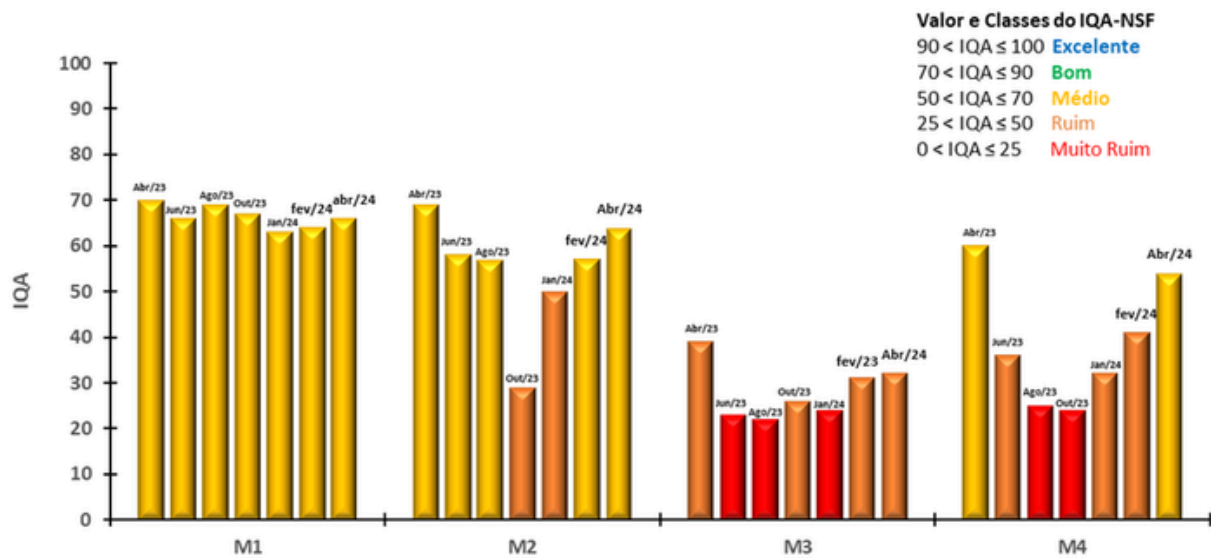
Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

Uma análise individualizada por ponto de monitoramento permite relacionar os parâmetros mais impactantes ou relevantes em cada época do ano. Em M1, a boa qualidade da água em todas as campanhas (pontos 1 até 7, na Figura 4) é refletida pelas elevadas concentrações do parâmetro OD; esta região está inserida a montante da área urbana e imediatamente a jusante do principal reservatório de abastecimento de água da cidade de Monte Carmelo/MG. Em M2, apesar da redução de OD e pH como consequência da carga poluente do tributário córrego Exposição, em nenhuma das campanhas (pontos 8 até 14 na Figura 4), os parâmetros ST, nitrato, turbidez, DBO e fósforo total foram relevantes. Em M3, a elevada carga poluente do lançamento de esgoto doméstico bruto evidencia a relevância, em ordem decrescente, dos parâmetros DBO, turbidez e nitrato em todas as campanhas (pontos 15 até 21, na Figura 4); os resultados estatísticos em M3 ilustram a importância da matéria orgânica carbonácea no equilíbrio do ecossistema aquático. Com foco no componente principal 2, o

período de estiagem, representado pelos pontos 3 e 4 em M1, pontos 10 e 11 em M2 e pontos 17 e 18 em M3, mostra a irrelevância da vazão superficial. No ponto de monitoramento M4, localizado a jusante da área urbana e da ETE municipal, é confirmada a relevância, em ordem decrescente, da vazão superficial e dos parâmetros ST, nitrato, turbidez e DBO em todas as campanhas (pontos 22 até 28, na Figura 4).

O diagnóstico da sazonalidade da qualidade de água superficial ao longo do córrego Mumbuca foi obtido por meio do IQA-NSF, cujos resultados estão ilustrados na Figura 5.

Figura 5 - Variação espaço-temporal de IQA-NSF no córrego Mumbuca.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

Para o ponto M1, os valores mínimos e máximos de IQA-NSF obtidos foram de 63 e 70, com valor médio de 66. O ponto M2 teve IQA-NSF entre 29 e 69, com valor médio de 55. No ponto M3, os valores oscilaram entre 22 e 39, com valor médio de 28. Já no ponto M4, os valores mínimos e máximos foram 24 e 60, com valor médio de 39. De acordo com os valores médios do IQA-NSF, os pontos de monitoramento M1 e M2 possuem índice de qualidade da água média, enquanto os pontos de monitoramento M3 e M4 possuem índice de qualidade da água ruim. Nos pontos de monitoramento M2, M3 e M4, os menores valores de IQA-NSF ocorreram no período de estiagem, enquanto os maiores em período chuvoso, demonstrando a influência da capacidade de diluição e transporte na qualidade da água superficial. Essa análise é possível, visto que as cargas poluentes advindas do lançamento de esgoto doméstico bruto são praticamente fixas ao longo do ano.

Conclusão

O estudo sobre a qualidade da água do córrego Mumbuca revelou que a poluição hídrica possivelmente está associada às atividades antrópicas e à infraestrutura urbana de Monte Carmelo/MG. Os resultados indicaram que, dos pontos monitorados, M1 e M2 apresentaram IQA-NSF médio, enquanto M3 e M4 apresentaram IQA-NSF ruim. A análise multivariada confirmou estatisticamente que variáveis como oxigênio dissolvido (OD) possuem um efeito positivo na qualidade da água, ao passo que a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), turbidez e concentrações de nitrato e fósforo total tiveram efeitos negativos.

Os dados sugerem que a qualidade da água foi pior nos períodos de estiagem, devido à menor capacidade de diluição e ao lançamento de esgoto doméstico bruto diretamente no córrego. As melhorias ligeiras observadas em M4, quando comparadas a M3, indicam algum grau de autodepuração no curso d'água após o tratamento do esgoto sanitário.

Em síntese, os baixos valores de IQA-NSF nos pontos de monitoramento do córrego Mumbuca ressaltam a necessidade de melhorias na infraestrutura de saneamento básico e no planejamento urbano para minimizar a poluição e preservar os recursos hídricos na região.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Uberlândia e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (APQ01699-17 Demanda Universal) pelo apoio à realização da pesquisa e financiamento e ao Departamento Municipal de Água e Esgoto de Monte Carmelo - MG.

Referências

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil/Agência Nacional de Águas**. Brasília: ANA, 2019, 75 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9897: Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Rio de Janeiro, 1987a. 14 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9898: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Rio de Janeiro, 1987b. 22 p.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10664: Águas – Determinação de resíduos (sólidos) – Método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 1989. 7 p.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water and wastewater**, 23 rd.: Washington, 2017.

BARROSO, L. T. **Diversidade de peixes de riachos em áreas de cerrado: composição, estrutura e integridade de habitats**. 2017. 75 folhas. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação/CCBS) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2017.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 357, 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**.

Disponível em:

https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcdaltrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 18 jan. 2024.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 430, 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Disponível em:

<https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/RE0430-130511.PDF>. Acesso em: 18 jan. 2024.

CHAPRA, S. C. **Surface water-quality modeling**. McGraw-Hill Education, 1997. 784 p.

- DAMASCENO, M. C. S.; RIBEIRO, H. M. C.; TAKIYAMA, L. R.; PAULA, M. T. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais do rio Amazonas na orla da cidade de Macapá, Amapá, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, p. 598-613, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1606>. Acesso em: 09 maio 2024.
- DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Monte Carmelo**. 2021. Disponível em: <https://www.dmae.montecarmelo.mg.gov.br/plano-municipal-de-saneamento-basico>. Acesso em: 09 maio 2024.
- DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto de Monte Carmelo. **Relatório de Monitoramento Ambiental**. Monte Carmelo, 2023. Disponível em: <https://www.dmae.montecarmelo.mg.gov.br/>. Acesso em: 03 jul. 2025.
- FERREIRA, V.; CUPOLILLO, F. Diagnóstico, zoneamento, planejamento e gestão ambiental na dimensão territorial: diferenças e complementos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 5, p. 1428-1440, 2016. Acesso em: 22 jun. 2025.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Monte Carmelo – Panorama**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/monte-carmelo/panorama>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- JOLLIFFE, T; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. v. 374, n. 2065, p. 01-16, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>. Acesso em: 03 jul. 2025.
- KRAJEWSKI, J. L. B. TSS concentration in sewers estimated from turbidity measurements by means of linear regression accounting for uncertainties in both variables. **Water Science and Technology**, v. 50, n. 11, p. 81-88, 2018. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/50/11/81/419486/81.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2025.
- LEITÃO, V. S.; CUBA, R. M. F.; SANTOS, L. P. S.; NETO, A.S.S. Utilização do índice de qualidade de água (IQA) para monitoramento da qualidade de água em uma área de preservação ambiental. **Revista eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19 n. 3, p. 794-803, 2015. Acesso em: 20 jun. 2025.
- MARQUES, J. G. B.; COSTA, E. S.; MATSUOKA, J. V. Diagnóstico do sistema de esgotamento sanitário de Monte Carmelo de acordo com o plano municipal de saneamento básico. **Revista GeTeC**, v. 8, n. 20, p. 164-183, 2019. Disponível em: <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/1616>. Acesso em: 26 abr. 2024.
- MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG Nº 8, de 21 de novembro de 2022. **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**. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>. Acesso em 03 ago. 2024.
- NOVAIS, G. T.; BRITO, J. L. S.; SANCHES, F. O. Unidades climáticas do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 223-243, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/58520/36660>. Acesso: 29 abr. 2024.
- OLIVEIRA, L. C.; GOMES, B.M.; BAUMGARTNER, G.; SEBASTIEN, N.Y. Variação espacial e temporal dos fatores limnológicos em riachos da microbacia do Rio São Francisco Verdadeiro.

Engenharia Agrícola, v. 28, n. 4, p. 770-781, 2008. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000400017>. Acesso em: 29 abr. 2024.

OYEM, I. M.; OYEM, H. H.; IMARHIAGBE, E. E. Microbial and Physicochemical Qualities of Septic Tank Wastewater: An Evaluation. **East African Journal of Health and Science**, v. 4, n. 1, p. 41-60, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.37284/eajhs.4.1.469>. Acesso em: 04 jul. 2025.

PELEGRINI, M. S.; SANTIL, F. L. P. Aplicação de geotecnologias para auxílio na administração do cemitério municipal de Monte Carmelo – MG. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 2, p. 2696-2713, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.34188/bjaerv4n2-092>. Acesso em: 29 abr. 2024.

PRABAGAR S.; THURASINGAM S.; PRABAGAR J. Sediment analysis and assessment of water quality in spacial variation using water quality index (NSFWQI) in Moragoda canal in Galle, Sri Lanka. **Waste Management Bulletin**, v. 1, n. 2, p. 15-20, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.05.002>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SANTIAGO, B. E. C.; JESUS, T. B.; SANTOS, L. B. O. Avaliação da qualidade da água no perímetro urbano de Riachão do Jacuípe, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 4, p. 1058-1071, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.4.p1058-1071>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SANTOS, R. C. L.; LIMA, A. S.; CAVALCANTI, E. B.; MELO, C. M.; MARQUES, M. N. Aplicação de índices para avaliação da qualidade da água da Bacia Costeira do Sapucaia em Sergipe. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 33-46, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522017159832>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SIQUEIRA, G. W.; APRILE, F.; MIGUÉIS, A. M. Diagnóstico da qualidade da água do rio Parauapebas (Pará – Brasil). **Acta Amazonica**, v. 42, n. 3, p. 413-422, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000300014>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SISEMA - Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Infraestrutura de Dados Espaciais**. 2024. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério das Cidades. **Painel de Regionalização dos Serviços de Saneamento Básico no Brasil**. Ano Base 2022. Disponível em: www.snis.gov.br. Acesso em: 26 abr. 2024.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 1991. Metcalf And Eddy Inc. 3rd edition.

VARELA, A. W. P.; SOUZA, A. J. N.; AVIZ, M. D.; PINFILDI, J. V.; SANTOS, R. M.; SOUSA, P. H. C.; SANTOS, M. L. S. Qualidade da água e índice de estado trófico no rio Guamá, município de Belém (Pará, Brasil). **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 695-715, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e42020695-715>. Acesso em: 26 abr. 2024.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. v. 7.