


A Contribuição do Modelo FPEIR/TOPSIS no Diagnóstico Ambiental da Segurança Hídrica de Áreas Atingidas pela Barragem B1, Brumadinho, MG


The Contribution of the FPEIR/TOPSIS Model in The Environmental Diagnosis of Water Security in Areas Affected by the B1 Dam, Brumadinho, MG

*Priscila Aparecida da Rocha Honorato*¹ 

*Marcos Antônio Timbó Elmiro*² 

*Marcelo Antonio Nero*³ 

*Plinio da Costa Temba*⁴ 

*Helder Lages Jardim*⁵ 

Palavras-chave

Bacia Hidrográfica
Indicadores
Recursos hídricos
Socioambientais
Análise multicritério

Resumo

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, em Minas Gerais, tem sofrido com eventos climáticos extremos e os impactos do rompimento das barragens da Vale S.A. em Brumadinho, em 2019. Destaca-se a importância da análise multicritério de decisão associada a um modelo conceitual para diagnosticar a segurança hídrica na região, com base em indicadores socioambientais. O estudo propõe e analisa indicadores socioambientais, utilizando a metodologia FPEIR, para avaliar a segurança hídrica e aprimorar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos na Bacia do Rio Paraopeba (BHRP). A abordagem combina o modelo de análise multicritério TOPSIS com o método de pesos de entropia, utilizados para hierarquizar os municípios com melhor segurança hídrica. A análise revelou desafios críticos, como crescimento populacional, industrialização e expansão agropecuária, que intensificam a contaminação hídrica. Brumadinho e Betim foram classificados como os municípios mais vulneráveis, apresentando altos índices de doenças de veiculação hídrica e infraestrutura de tratamento de esgoto insuficiente. A intensa atividade industrial e agrícola agrava os riscos ambientais, exemplificados pelo rompimento das barragens. O estudo destacou as pressões socioambientais e a importância de abordagens integradas. Os resultados apontaram a necessidade de políticas públicas robustas, práticas agrícolas sustentáveis, gestão participativa, melhoria da infraestrutura e adaptação às mudanças climáticas para garantir a segurança hídrica e a qualidade de vida.

Keywords

Hydrographic Basin
Indicators
Water resources
Socio-environmental
Multicriteria analysis

Abstract

The Paraopeba River Basin, located in the state of Minas Gerais, Brazil, has been severely impacted by extreme climatic events and the 2019 Vale S.A. dam failures in Brumadinho. This study underscores the importance of integrating multi-criteria decision analysis with a conceptual model to diagnose water security in the region based on socio-environmental indicators. Employing the DPSIR methodology, socio-environmental indicators are proposed and analyzed to assess water security and to support the planning and management of water resources in the Paraopeba River Basin (BHRP). The approach combines the TOPSIS multi-criteria analysis model with the entropy weight method to rank municipalities according to their levels of water security. The analysis identified critical challenges, including population growth, industrialization, and agricultural expansion, which exacerbate water contamination. Brumadinho and Betim emerged as the most vulnerable municipalities, exhibiting high rates of waterborne diseases and inadequate wastewater treatment infrastructure. Intense industrial and agricultural activities have further heightened environmental risks, as exemplified by the dam failures. The study underscores socio-environmental pressures and highlights the importance of integrated approaches. The findings emphasize the need for robust public policies, sustainable agricultural practices, participatory management, infrastructure improvements, and climate change adaptation to ensure water security and improve quality of life.

1

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. honoratopriscila1@gmail.com

² Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. timboelmiro@gmail.com

³ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. marcelo-nero@ufmg.br

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. tembamobile@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. hljardim@gmail.com

INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP) tem sofrido eventos extremos relacionados ao clima, como longos períodos de seca e chuvas intensas, além de ter sido duramente afetada pelo rompimento da barragem B-I de rejeitos, pertencente ao complexo da Mina Córrego do Feijão da mineradora Vale S.A., que se rompeu e na sequência colapsou as barragens (B-IV e B-IV-A) atingindo o ribeirão Ferro-Carvão Feijão em direção ao Rio Paraopeba, no município de Brumadinho, em 2019, tema amplamente abordado por alguns autores como Nero *et al.* (2024) e Lima *et al.* (2021). Adicionalmente, existem riscos associados ao rompimento de outras barragens na região, o que coloca o abastecimento da população e as atividades produtivas em risco iminente de escassez hídrica grave (ARMBH, 2021). Dentro desse cenário, a Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) é uma possível forma de planejamento e gerenciamento da água, já que para mitigar riscos é necessário um esforço conjunto entre autoridades governamentais, instituições locais e a comunidade, visando realizar uma gestão de conflitos de planejamento e proteger os recursos hídricos.

Avanços nesse entendimento da organização e funcionamento dos sistemas ambientais têm promovido pesquisas que avaliam a segurança hídrica de bacias hidrográficas por meio de indicadores ambientais, econômicos e sociais. Como podemos citar o estudo de Alves *et al.* (2024) que analisaram a relação do Índice de Segurança Hídrica (ISH) com indicadores socioeconômicos em microrregiões de água e esgoto no estado da Paraíba, Brasil, considerando também o método estatístico de “Análise de Componentes Principais (ACP)”, sendo que os resultados demonstraram a existência de uma relação positiva entre valores de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e de Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades (IDSC) com o ISH (os municípios apresentaram índices baixos e médios nas duas microrregiões mesmo com condições favoráveis em termos de cobertura da rede de abastecimento). No entanto, as dimensões de resiliência, ecossistêmica e econômica, incluindo investimentos e Produto Interno Bruto (PIB), mostram um sentido oposto, indicando que essas variáveis exerceram influência negativa sobre o ISH.

Já Zlat *et al.* (2024) quantificaram o impacto da segurança hídrica no desenvolvimento econômico e social com base em um novo modelo

de equação estrutural, de modo a identificar mudanças na variável latente Índice de Segurança Hídrica no período de 2000–2022 para os 27 Estados-Membros da União Europeia. A metodologia baseou-se no uso de sistemas de equações estruturais e no Teste de Kruskal-Wallis de Amostras Independentes para identificar as influências das medidas de segurança hídrica em indicadores econômicos e sociais e avaliar disparidades regionais de desenvolvimento de políticas ambientais em relação ao desenvolvimento econômico e social. Os resultados obtidos apontaram a correlação significativa entre densidade populacional, níveis de poluição e os custos associados à manutenção da qualidade da água. Ao final concluíram que os resultados são úteis para os formuladores de políticas econômicas, ambientais e sociais otimizarem as estratégias europeias de desenvolvimento sustentável.

Com base nessa premissa, a análise de indicadores permite acompanhar e avaliar o desempenho de bacias hidrográficas ao longo do tempo, identificar áreas de melhoria e implementar ações adequadas para garantir a segurança hídrica de forma equilibrada.

Na presente pesquisa o objetivo geral foi analisar um conjunto de indicadores socioambientais para o diagnóstico da segurança hídrica em municípios da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP), em Minas Gerais, sendo que o mesmo se caracteriza por uma síntese da pesquisa desenvolvida por Honorato (2024). Para tanto, selecionou-se indicadores utilizando o modelo conceitual FPEIR (Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta) e os classificou de acordo com sua capacidade de alterar o estado dos recursos hídricos em termos de quantidade e qualidade. Complementarmente, a classificação da disponibilidade hídrica dos municípios, realizada pelo método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), o qual é aplicado inclusive em Aires e Salgado (2024), permitiu identificar quais municípios possuem melhor desempenho em segurança hídrica.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O uso de modelos conceituais e análises multicritério é fundamental para abordar a complexidade dos sistemas ambientais e sociais, especialmente em regiões com desafios de segurança hídrica (Salamé *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2019). Modelos conceituais, como o FPEIR,

permitem a estruturação de problemas com base em relações causais e dinâmicas socioambientais, facilitando a identificação de pressões, impactos e respostas (Liu *et al.*, 2018). Já as análises multicritério, como o TOPSIS, fornecem métodos robustos para a classificação e hierarquização de alternativas, incorporando múltiplos indicadores e critérios (Zhang *et al.*, 2023).

Modelo Força Motriz – Pressão – Impacto-Resposta (FPEIR)

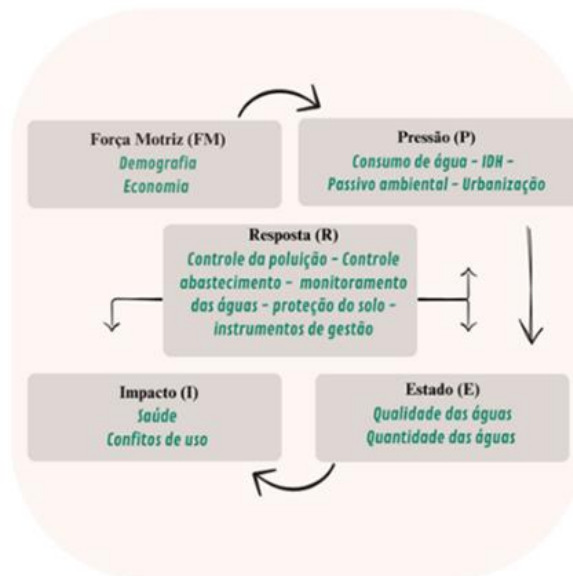
O modelo FPEIR (Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta), também conhecido por seu acrônimo em inglês DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response), foi proposto por Rapport e Friend (1979).

Esse modelo oferece uma estrutura para identificar problemas ambientais em uma

localidade, incluindo suas causas, impactos e possíveis soluções por meio de indicadores. Como, por exemplo, no estudo desenvolvido por Shi *et al.* (2021), que aplicaram o modelo de forma satisfatória na avaliação da segurança hídrica em bacias na província de Jiangxi, China; também pode ser citado o estudo desenvolvido por Acostupa *et al.* (2018), no diagnóstico ambiental do Pantanal Lucre-Huacarpay.

A estrutura circular do modelo FPEIR, capta o ciclo contínuo de influências (Figura 1), enfatizando como forças motrizes, pressões, mudanças de estado, impactos e respostas estão interconectados, orientando, em última análise, a tomada de decisão para o desenvolvimento sustentável e alocação de recursos nos sistemas hídricos (Pirrone *et al.*, 2005).

Figura 1 – Exemplo de esquema conceitual dos indicadores FPEIR



Fonte: Os autores (2024).

A segurança hídrica, segundo a Organização das Nações Unidas (UN, 2013), é definida como a capacidade de uma população de garantir o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar a saúde, o bem-estar humano, o desenvolvimento socioeconômico e a preservação dos ecossistemas. Para realizar a análise da segurança hídrica no médio curso da BHRP

foram selecionados 30 indicadores (Tabela 1), sendo sete de forças motrizes (FM), cinco indicadores de pressão (P), quatro de estado (E), dois de impacto (I) e doze de respostas (R). A seleção de indicadores baseou-se na avaliação do estado dos recursos hídricos e sua relação com os indicadores de Força Motriz, Pressão, Impacto e Resposta.

Tabela 1 – Indicadores de Segurança Hídrica

Nome	Grandeza	Unidade	Nome	Grandeza	Unidade
FM.01	Taxa geométrica de Crescimento Anual	% a.a.	E.04	Lâmina explotável (LE)	mm/ano
FM.02	Habitantes por km ²	hab./km ²	I.01	Doenças de veiculação hídrica	n ^o
FM.03	Estabelecimentos agropecuários	n ^o	I.02	Conflito de uso	n ^o
FM.04	Área Cultivada	%	R.01	Domicílios ligados à rede de esgoto	%
FM.05	Estabelecimentos industriais	n ^o	R.02	Tratamento de esgoto	%
FM.06	Exploração mineral	n ^o	R.03	Coleta seletiva	sim/não
FM.07	Área urbanizada	%	R.04	Aterro sanitário	sim/não
P.01	Total de água consumida por ano	m ³ /ano	R.05	Fiscalizações	n ^o
P.02	Total de água tratada	m ³ /ano	R.06	Domicílios ligados à rede de abastecimento	%
P.03	Acidentes ambientais	n ^o	R.07	Percentual da perdas de água	%
P.04	Barragens de rejeito	n ^o	R.08	Estações de monitoramento	n ^o
P.05	IDH-M	-	R.09	Fluviômetros	n ^o
E.01	Média do (IQA)	-	R.10	Cobertura vegetal nativa	%
E.02	Parâmetros alterados conforme DN 08/22	n ^o	R.11	Área protegida	%
E.03	Vazões mínimas (Q ₇₁₀)	n ^o	R.12	Instrumentos de gestão	n ^o

Fonte: Os autores (2024).

Para diagnosticar a segurança hídrica dos municípios, a abordagem avaliou 30 indicadores segmentados pelo modelo FPEIR. Indicadores qualitativos foram codificados como variáveis binárias, com "SIM" atribuído a 1 e "NÃO" a 0. A aplicação do TOPSIS e o cálculo dos pesos foram modelados usando Excel® e linguagem Python, com as bibliotecas pandas, numpy e matplotlib.

Método TOPSIS

O método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) é um recurso aplicado na análise de decisão multicritério, também conhecido como método de distância de solução ideal.

O método TOPSIS é uma técnica de tomada de decisão utilizada para avaliar alternativas com base em um conjunto de critérios. Ele é amplamente aplicado em áreas como gestão ambiental, engenharia, economia e outras disciplinas onde decisões complexas precisam ser tomadas considerando múltiplos fatores. O método TOPSIS, inicialmente proposto por

Hwang e Yoon (1981), tem sido amplamente adotado em uma variedade de estudos. Por exemplo, Aires e Salgado (2024) utilizaram uma abordagem multicritério baseada em R-TOPSIS para avaliar reservatórios de água no semiárido do Brasil. Outro estudo relevante é o de Zhang *et al.* (2023), que aplicaram o TOPSIS para analisar o desempenho da governança ecológica agrícola na província de Henan. Elshoubaky *et al.* (2023) aplicaram o método na seleção de materiais de construção sustentáveis, considerando a avaliação do ciclo de vida. Além disso, a adaptação do TOPSIS a um ambiente difuso, conforme descrito por Carnero (2020), facilita a avaliação da responsabilidade ambiental das organizações de saúde, contribuindo para a promoção da saúde pública por meio da melhoria das práticas de sustentabilidade ambiental. A sua aplicação segue os seguintes passos:

Etapa 1 – Cálculo dos pesos (w) (Equação 1): Primeiramente, calcula-se a entropia para cada indicador, o "Entropy Weight Method", inicialmente proposto por Shannon e Wiener em 1949. Este método tem sido aplicado em diversas

áreas, como em Yang *et al.* (2022), que o utilizaram para decisões de engenharia, e Luo *et al.* (2022), que o aplicaram na avaliação de riscos de leishmaniose visceral zoonótica.

$$w = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^m (1-E_j)} \quad (1)$$

A entropia (E) é uma medida de diversidade ou incerteza nos dados, e é utilizada para determinar a importância relativa de cada indicador na tomada de decisão. Indicadores com maior entropia indicam maior variabilidade nos dados e, portanto, podem receber pesos mais baixos, enquanto critérios com menor entropia podem receber pesos mais altos (Tabela 2).

Etapa 2 - Construção da Matriz de Decisão Normalizada (Equação 2): Uma matriz de decisão normalizada é criada, onde cada linha representa um município e cada coluna representa um indicador. Essa matriz é fundamental para calcular as distâncias das alternativas aos valores ideais.

Etapa 3 - Multiplicação dos Pesos (Equação 3): Os pesos (w , Equação 1) são então multiplicados pela matriz de decisão normalizada.

$$V = v_{ij} (m \times n) = r_{ij} \times w_{ij} \quad (2)$$

Etapa 4 - Determinação dos Valores Ideais (Equação 4 e 5): São calculados dois tipos de soluções ideais: a melhor e a pior.

$$A = (v_{ij})_{n \times m} = \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & \cdots & v_{nm} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Solução Ideal Positiva A+: Contém os melhores valores para cada indicador.

$$SIP = v^+ = (\max_i v_{ij} | j \in j_b), (\min_i v_{ij} | j \in j_{nb}) | \in [1 \dots m] \quad (4)$$

Solução Ideal Negativa A-: Contém os piores valores para cada indicador

$$SIN = v^- = (\min_i v_{ij} | j \in j_b), (\max_i v_{ij} | j \in j_{nb}) | \in [1 \dots m] \quad (5)$$

Etapa 5 - Cálculo das Distâncias: Calcula-se a distância euclidiana entre cada alternativa e as soluções ideais (positiva e negativa) (Equação 6 e 7). Essas distâncias são usadas para determinar o quão próximo cada alternativa está das soluções ideais.

$$SIP = D_i^+ = [\sum_{j=1}^m (V_i - V_j^+)^2]^{0,5} \quad (6)$$

$$SIN = D_i^- = [\sum_{j=1}^m (V_i - V_j^-)^2]^{0,5} \quad (7)$$

Etapa 6 - Determinação da Proximidade Relativa (Equação 8): Com base nas distâncias calculadas, é determinada a proximidade relativa de cada alternativa em relação às soluções ideais. Quanto mais próximo de uma solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa, melhor é a alternativa.

Etapa 7 - Ordenar as Alternativas (Tabela 2): Finalmente, as alternativas são classificadas de acordo com sua proximidade relativa às soluções ideais, com as mais próximas da solução ideal positiva sendo consideradas as melhores opções.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (8)$$

Tabela 2 – Pesos dos indicadores de acordo com o método Entropia

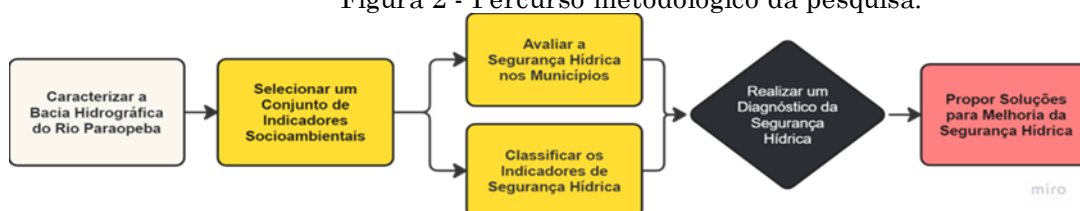
Indicador	Peso (w)	Indicador	Peso (w)
FM.01	0,0198	E.04	0,0879
FM.02	0,0216	I.01	0,0690
FM.03	0,0234	I.02	0,0311
FM.04	0,0149	R.01	0,0183
FM.05	0,0219	R.02	0,0303
FM.06	0,0418	R.03	0,0122
FM.07	0,0144	R.04	0,0122
P.01	0,0507	R.05	0,0463
P.02	0,0469	R.06	0,0156
P.03	0,0242	R.07	0,0215
P.04	0,0530	R.08	0,0709
P.05	0,0246	R.09	0,0387
E.01	0,0287	R.10	0,0293
E.02	0,0531	R.11	0,0267
E.03	0,0207	R.12	0,0303

Fonte: Os autores (2024).

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia (Figura 2) deste estudo é baseada em dois pilares principais: o relatório técnico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2008) e o estudo de Yin e Yuan (2022).

Figura 2 - Percurso metodológico da pesquisa.



Fonte: Os autores (2024).

O relatório do IPT diagnosticou a situação dos recursos hídricos na Bacia do Rio Grande (SP/MG) utilizando o modelo FPEIR. O estudo de Yin e Yuan avaliou o desenvolvimento verde da região de Pequim-Tianjin-Hebei, combinando FPEIR-TOPSIS com o método de pesos de entropia. Esses elementos proporcionam uma abordagem compreensiva para entender e gerir os recursos hídricos de maneira sustentável, contribuindo para estratégias de gestão sustentável e políticas de segurança hídrica na bacia do Rio Paraopeba.

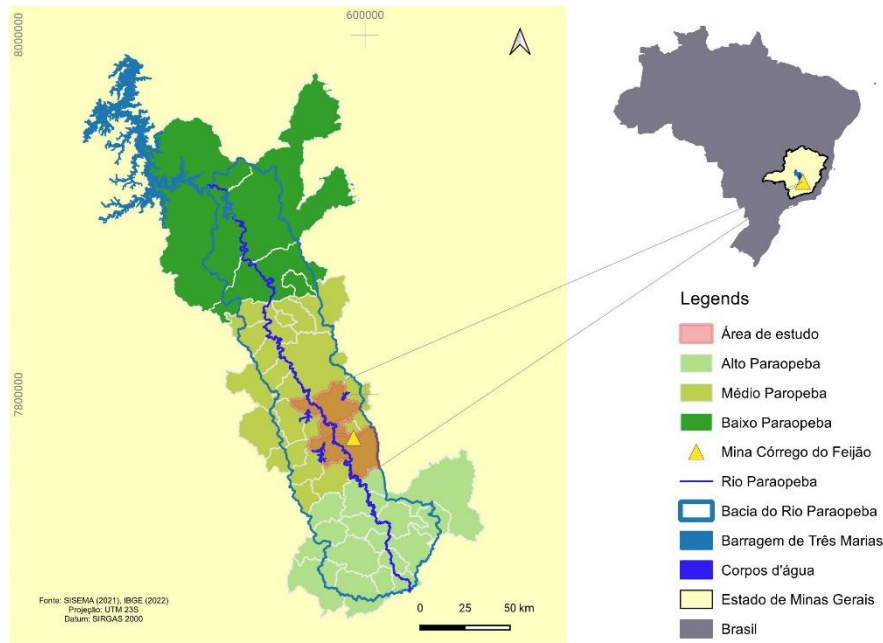
As etapas envolvendo a classificação dos indicadores foram modeladas utilizando

planilhas eletrônicas e linguagem Python com as bibliotecas pandas, numpy e matplotlib.

Caracterização da área de estudo

A bacia do rio Paraopeba (BHRP) (Figura 3), localizada na região central de Minas Gerais, cobre aproximadamente 13.640 km² e integra o Alto São Francisco, sendo estratégica para o abastecimento hídrico, mineração e atividades industriais.

Figura 3 - Mapa de localização da Bacia do Rio Paraopeba



Fonte: Os autores (2024).

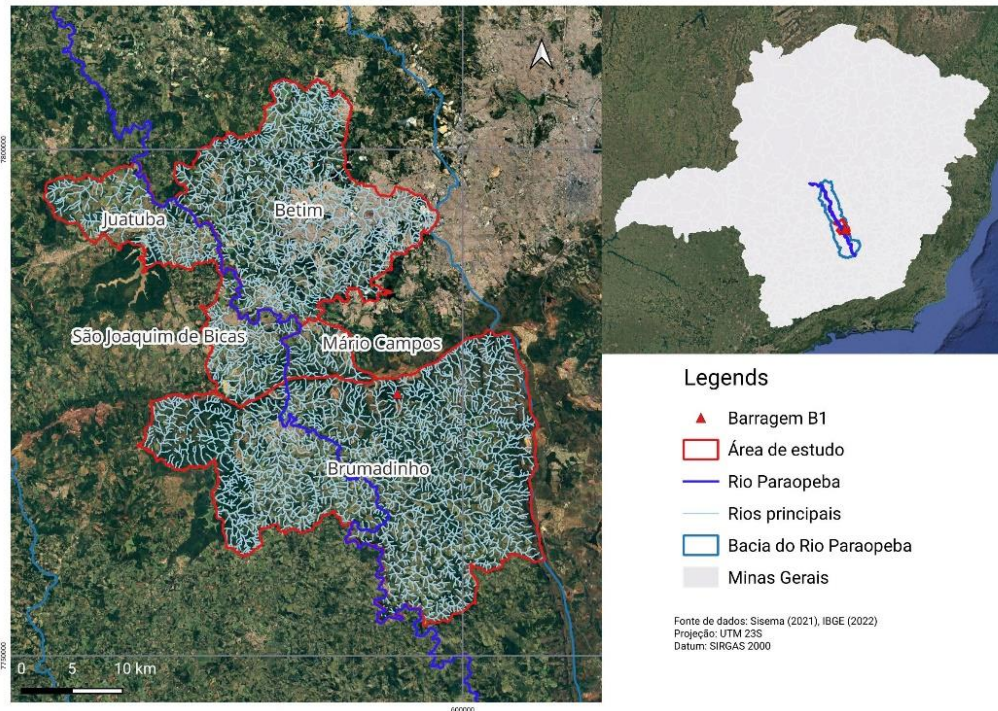
Ela drena para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Três Marias com capacidade total de geração de energia de cerca de 396 MW. É crucial para o abastecimento de água e a sustentabilidade ecológica, uma vez que fornece 53% da água para Belo Horizonte, Minas Gerais. Apresenta relevo variado, com planaltos e depressões, e uma geologia diversificada composta por rochas do Complexo Cristalino, formações ferríferas do Grupo Minas e depósitos sedimentares, além de sistemas de falhas que influenciam a hidrologia subterrânea (COBRAPE, 2020). O clima predominante é tropical de altitude (Cwb), com temperaturas médias entre 18 °C e 22 °C e chuvas anuais de 1.000 a 1.400 mm, concentradas no verão, enquanto o inverno é seco (COBRAPE, 2020). Os solos variam entre Latossolos, Cambissolos, Argissolos e Neossolos Flúvicos (COBRAPE, 2020). A vegetação original, composta por Cerrado e Mata Atlântica em transição, incluindo cerrado típico, mata ciliar e florestas semidecíduais, foi amplamente substituída por pastagens, agricultura e mineração, restando fragmentos em áreas protegidas (COBRAPE, 2020). Economicamente, a bacia do Rio Paraopeba é diversificada, destacando-se na mineração, siderurgia, indústria petroquímica e automobilística, produção de bebidas, serviços,

geração de energia hidrelétrica, pecuária e agricultura. O parque industrial é bastante desenvolvido, com indústrias de extração de minerais metálicos e não metálicos, produtos metalúrgicos e siderúrgicos, alimentos, têxteis, vestuário, calçados, entre outros. Entre os principais impactos ambientais estão a mineração, com destaque para o rompimento de barragens, o desmatamento e a urbanização, que afetam a qualidade da água, os solos e a biodiversidade, tornando o planejamento ambiental essencial para a região.

A bacia é subdividida hidrológicamente em três setores: Alto, Médio e Baixo Paraopeba. Cada um desses setores apresenta características particulares em termos de geomorfologia e uso do solo. A atividade minerária, particularmente a exploração de minérios de ferro e manganês, concentra-se na região do Quadrilátero Ferrífero (Médio Paraopeba) e tem impactos significativos na qualidade da água e na vida aquática.

Nesse cenário, a área de estudo restringe-se a cinco municípios localizados no médio curso do Rio Paraopeba: Betim, Brumadinho, Mário Campos, Juatuba e São Joaquim de Bicas (Figura 4).

Figura 4 - Localização da área de estudo.



Fonte: Os autores (2024).

Esses municípios foram selecionados devido ao impacto direto ou indireto sofrido pelas consequências do rompimento das barragem B1, ocorrido em 25 de janeiro de 2019, no município de Brumadinho. Esse desastre ressaltou a vulnerabilidade da bacia em relação às atividades industriais e de mineração, destacando a necessidade urgente de adotar medidas de gestão e conservação dos recursos hídricos para prevenir futuros impactos ambientais. A seleção desses municípios permite uma análise focada nos locais mais afetados e

vulneráveis, facilitando a identificação de estratégias específicas para mitigar os impactos e promover a sustentabilidade hídrica na região.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

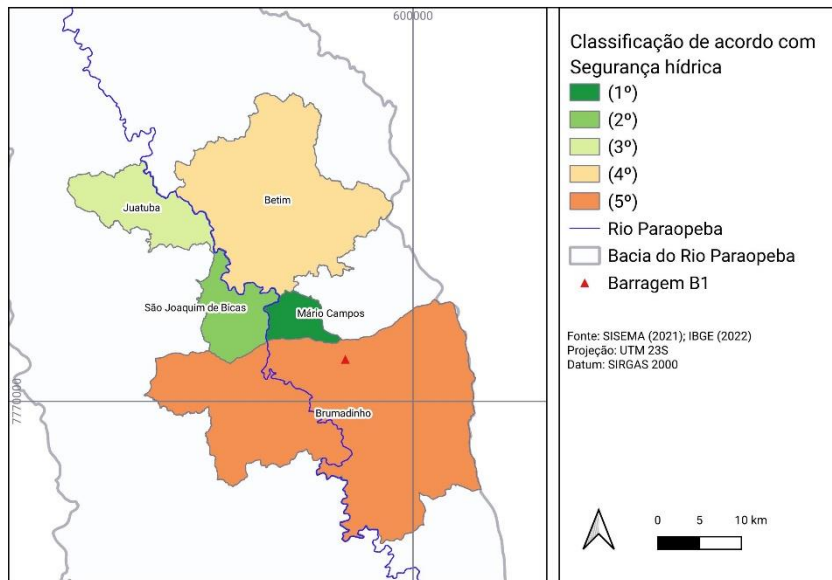
A análise ordenou os municípios em relação à insegurança hídrica, com Brumadinho liderando, seguido por Betim, São Joaquim de Bicas, Juatuba e Mário Campos (Tabela 3 e Figura 5).

Tabela 3 - Classificação dos municípios de acordo com o método TOPSIS

Município	Índice de Similaridade
Brumadinho	0,5949
Betim	0,4873
Juatuba	0,2389
São Joaquim de Bicas	0,2364
Mário Campos	0,2317

Fonte: Os autores (2024).

Figura 5 - Classificação dos municípios em relação a segurança hídrica



Fonte: Os autores (2024).

Considerando o relacionamento dos indicadores apresentados na Tabela 4 foi construída uma matriz para análise da situação da qualidade e quantidade das águas superficiais, subterrâneas e de abastecimento dos municípios em análise para entender como os indicadores atuam na porção média da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP).

Os municípios classificados com nível mais baixo na classificação apresentam maior insegurança hídrica devido a altos índices de acidentes ambientais, doenças de veiculação hídrica, perda de água e baixa taxa de tratamento de esgoto. Municípios em posições superiores mostram melhor segurança hídrica com melhores índices de tratamento de esgoto, menos acidentes ambientais e melhor cobertura vegetal nativa.

Brumadinho merece grande atenção devido à alta incidência de doenças de veiculação hídrica (7.353), refletindo problemas na qualidade do saneamento e no acesso à água potável,

impactando negativamente a saúde pública e a segurança hídrica. O município apresenta desempenho misto em coleta (50,6%) e tratamento de esgoto (10,7%). Além disso, lidera em parâmetros alterados conforme a DN08 de 2022, comprometendo ainda mais a segurança hídrica.

A intensa exploração mineral, com 306 processos minerários ativos, exerce grande pressão sobre os recursos hídricos. As 24 barragens de rejeito representam um risco significativo, aumentando a probabilidade de desastres ambientais. O rompimento da barragem do Córrego do Feijão é um exemplo claro dos riscos de contaminação que essas estruturas podem causar. Brumadinho também possui a maior quantidade de estabelecimentos agropecuários (443) e a maior demanda total de água (643,36 milhões m³/ano), sendo o maior consumidor de água na região.

Tabela 4 - Indicadores de situação da qualidade e quantidade das águas

	Indicador	Unidade	Betim	Brumadinho	Juatuba	Mário Campos	São Joaquim de Bicas
Força motriz	FM.01	% a.a.	0,69	1,14	2,75	1,57	2,5
	FM.02	hab./km ²	1197,01	60,86	316,6	451,76	478,66
	FM.03	n°	233	443	42	140	120
	FM.04	%	47,64	43,54	52,76	53,02	49,82
	FM.05	n°	48	20	27	13	52
	FM.06	n°	123	306	32	35	66
	FM.07	%	27,82	1,62	17,02	13,86	18,97
Pressão	P.01	m ³ /ano	87,03 milhões	643,36 milhões	1,90 milhões	98,69 milhões	2,58 milhões
	P.02	m ³ /ano	19,16 bilhões	2,56 bilhões	2,28 bilhões	882,13 milhões	2,76 bilhões
	P.03	n°	50	30	19	1	6
	P.04	n°	3	24	0	3	0
	P.05	-	0,735	0,712	0,705	0,678	0,674
Estado	E.01	-	61,3	65,3	48,1	47,4	53,3
	E.02	n°	2	4	sd	2	3
	E.03	n°	0,2085	0,4256	1,0486	1,6805	1,4739
	E.04	mm/ano	58,75	58,75	58,75	58,75	58,75
Impacto	I.01	n°	125838	7353	6118	2946	2001
	I.02	n°	8	32	3	0	8
Resposta	R.01	%	76	50,6	32,39	13,8	36,5
	R.02	%	76,4	10,7	29,89	9,9	0
	R.03	%	1	1	1	1	0
	R.04	-	1	1	1	1	1
	R.05	n°	1721	833	226	169	192
	R.06	%	89,0	82,9	89,6	97,2	90,9

Fonte: Os autores (2024).

Apesar de apresentar uma eficiência no abastecimento hídrico (31,8, considerada ótima), a alta demanda caracteriza um potencial problema de segurança hídrica em cenários de mudanças climáticas, podendo resultar em escassez de água. O indicador E04, que é a lâmina explotável (LE) (mm/ano), alta para todos os municípios, indica grande exploração de água subterrânea, acarretando vulnerabilidade significativa.

A análise é consistente ao considerar Betim como o segundo município com o pior desempenho em segurança hídrica. Betim enfrenta alta insegurança hídrica devido a vários fatores críticos. O município experimentou uma alta taxa de crescimento populacional na década de 1990, impulsionado pela atração de novas indústrias, mas essa taxa desacelerou até 2022. Apesar dessa desaceleração, Betim possui a densidade demográfica mais alta da região, com 1.197,01 habitantes por km². A combinação de uma densidade elevada com um crescimento populacional ainda positivo sugere uma pressão contínua sobre os recursos hídricos, tanto em termos de demanda quanto de poluição potencial por efluentes urbanos e industriais (Honorato, 2024). A elevada quantidade de estabelecimentos agropecuários (233) em Betim e o fato de 47,64% do território ser área cultivada, pressionam significativamente os recursos hídricos locais. A agricultura intensiva e a agropecuária demandam grandes volumes de água para irrigação e manejo de animais, aumentando o risco de escassez hídrica e poluição das fontes de água. Essa situação compromete a segurança hídrica, afetando o abastecimento humano e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos da região.

Além dos estabelecimentos agropecuários, Betim possui um número considerável de estabelecimentos industriais (48), e enfrenta intensa exploração mineral com 123 processos ativos, além de contar com três barragens. Essas atividades exercem uma pressão severa sobre os recursos hídricos locais, aumentando a demanda por água e o risco de contaminação, comprometendo a segurança hídrica e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos. A situação é agravada pelo consumo excessivo de água (87,03 milhões m³/ano) e pelo tratamento de grande volume de água (19,16 bilhões m³/ano).

Betim apresentou o maior número de acidentes ambientais (50) entre 2014 e 2022, destacando a necessidade de uma fiscalização mais rigorosa em atividades potencialmente poluidoras para evitar riscos aos recursos

hídricos. Mesmo com 1721 fiscalizações realizadas de 2006 a 2023, é evidente que os esforços precisam ser aprimorados para prevenir acidentes e garantir a proteção das fontes de água, essenciais para o abastecimento e para a sustentabilidade ambiental.

O município lidera no número de doenças de veiculação hídrica (125.838), especialmente dengue (116.678), possivelmente devido a deficiências no saneamento básico, no manejo inadequado de resíduos sólidos e falta de infraestrutura de drenagem urbana. Embora os indicadores de coleta de efluentes sanitários (76%), tratamento (76,4%) e disposição adequada de resíduos sólidos e coleta seletiva mostrem desempenho positivo, a proliferação de mosquitos transmissores continua sendo um desafio. É necessário intensificar ações de educação ambiental e controle de vetores, além de aprimorar a infraestrutura urbana para reduzir esses casos.

Betim apresenta um desempenho ruim na eficiência do abastecimento público (50,90%), com altas perdas de água durante o processo. Isso é preocupante, especialmente devido à grande demanda de água no município, levantando a necessidade urgente de melhorias na infraestrutura e na gestão dos recursos hídricos.

São Joaquim de Bicas enfrenta desafios em segurança hídrica, com densidade demográfica de 478,66 hab./km² e crescimento populacional de 2,5% a.a. O município trata 2,76 bilhões m³ de água por ano, mas perde 57,7%, indicando ineficiência no sistema de distribuição. A ausência de tratamento de esgoto (0%) e a baixa coleta regular (36,5%) impactam a saúde pública, refletida em 2001 casos de doenças de veiculação hídrica. Com 120 estabelecimentos agropecuários e 49,82% do território cultivado, a pressão sobre os recursos hídricos é alta. Melhorias na infraestrutura e gestão hídrica são essenciais para sustentabilidade e saúde pública.

Juatuba, em quarto lugar, enfrenta desafios moderados em segurança hídrica. Com 19 acidentes ambientais e 6118 casos de doenças de veiculação hídrica, há uma clara necessidade de melhorias na gestão ambiental e saneamento básico. A baixa taxa de tratamento de esgoto (29,89%) afeta a saúde pública, e a alta perda de água (55,3%) durante a distribuição, revela ineficiências significativas na infraestrutura hídrica. A urbanização crescente (17,02%) exerce pressão adicional sobre os recursos hídricos, exigindo um planejamento urbano sustentável. Juatuba trata 2,28 bilhões m³ de água por ano, com 89,6% dos domicílios

conectados à rede de abastecimento, refletindo bom acesso à água potável. No entanto, é crucial aprimorar a infraestrutura para reduzir perdas, melhorar a eficiência no uso dos recursos e expandir o tratamento de esgoto para melhorar a eficiência da saúde pública e proteger o meio ambiente.

Mário Campos, em quinto lugar, enfrenta desafios menores em segurança hídrica, com 2946 casos de doenças de veiculação hídrica devido a deficiências no saneamento básico e uma baixa taxa de tratamento de esgoto (9,9%). As perdas de água (34,7%) indicam ineficiências na distribuição, e o aumento da área urbanizada (13,86%) intensifica a demanda por água. Por outro lado, o município possui alta cobertura vegetal nativa (47,41%) e uma quantidade significativa de água tratada (882,13 milhões m³/ano). As áreas protegidas (33,12%) refletem um compromisso com a preservação, indicando investimentos na conservação ambiental e gestão eficiente dos recursos hídricos.

Nesse sentido, a gestão integrada dos recursos hídricos deve ser fortalecida, envolvendo planejamento e gestão participativos, garantindo a participação de todos os stakeholders, incluindo comunidades locais, indústrias e agricultores. A utilização de dados e análises científicas para fundamentar decisões políticas assegura que as medidas adotadas sejam baseadas nas melhores práticas e evidências disponíveis. Assim como, Políticas de sustentabilidade e educação ambiental são fundamentais. Além do monitoramento e avaliação contínuos da qualidade e quantidade da água através de sistemas avançados e tecnologias de automação permitem uma gestão eficaz.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando uma metodologia interdisciplinar, buscou-se entender as dinâmicas de pressão e resposta dentro da bacia hidrográfica, avaliando como fatores socioeconômicos e ambientais influenciam a gestão dos recursos hídricos.

O trabalho demonstrou a aplicabilidade do modelo FPEIR em contextos complexos como a BHRP, oferecendo uma base para políticas públicas e estratégias de gestão com uma visão holística do ambiente. Reiterou-se a importância de abordagens integradas como o modelo FPEIR em conjunto com métodos de análise multicritério, como o TOPSIS, para o diagnóstico e gestão da segurança hídrica. A compreensão das forças motrizes e pressões

sobre o ambiente e os recursos hídricos pode orientar respostas mais efetivas e sustentáveis, essenciais para proteger os recursos hídricos, vitais para o desenvolvimento socioeconômico e uma boa gestão ambiental da região.

Os resultados mostraram que o modelo FPEIR é eficaz para mapear interações entre atividades humanas e a saúde ambiental, identificando forças motrizes e pressões que impactam a segurança hídrica. A aplicação de indicadores específicos facilitou a análise do estado atual dos recursos hídricos, destacando áreas críticas que necessitam de intervenção para mitigar riscos de contaminação e escassez. A interpretação dos dados confirmou que pressões como o aumento da atividade industrial, mineradora e o uso intensivo da terra estão degradando a qualidade da água na região. Isso sugere que as respostas atuais são insuficientes e requerem políticas públicas mais robustas e engajamento comunitário efetivo.

Os municípios de Brumadinho, Betim, Juatuba, São Joaquim de Bicas e Mário Campos foram avaliados quanto à segurança hídrica utilizando o método TOPSIS, considerando indicadores críticos e a presença de planos de gestão.

Os planos de gestão (Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PMGIRS, Plano Municipal de Saneamento Básico - PMSB, Plano de Segurança Hídrica da Região Metropolitana de Belo Horizonte - PSH-RMBH, Plano Diretor - PD, Plano Nacional de Recursos Hídricos - PNRH) e PDDMA (Plano Diretor de Desenvolvimento Municipal), reforçam o compromisso dos municípios com a segurança hídrica. Esses planos proporcionam um quadro estruturado para abordar questões críticas de gestão de água, saneamento e resíduos, essencial para a sustentabilidade a longo prazo e a mitigação dos problemas enfrentados por cada município.

O estudo enfrentou limitações relacionadas à acessibilidade de dados de longo prazo e à falta de indicadores específicos sobre as dinâmicas locais, como o fornecimento de água mineral e por caminhão-pipa pela Vale S.A., após o rompimento da barragem. Até 2022, a Vale S.A. havia fornecido cerca de 3,9 bilhões de litros de água para a população ribeirinha, com 100 caminhões-pipa transitando diariamente para entrega emergencial de água (Vale S.A., 2022). Apesar de ser uma prática conhecida nos territórios atingidos, esses dados não são disponibilizados por município. Outro indicador que agregaria valor à análise seria o número de ribeirinhos e pescadores que abandonaram suas

atividades devido à proibição do uso da água bruta do Rio Paraopeba.

Essas lacunas dificultaram uma avaliação mais precisa de algumas respostas e estratégias de gestão adotadas na região. Pesquisas futuras poderiam se aprofundar nas dinâmicas locais e coletar dados primários sobre indicadores que tratem mais detalhadamente o contexto da segurança hídrica para a população atingida nos municípios da Bacia do Rio Paraopeba. Além disso, seria valioso desenvolver metodologias que integrem melhor a variabilidade climática e os impactos antropogênicos de longo prazo.

Para enfrentar os desafios identificados na segurança hídrica da bacia do Rio Paraopeba, é essencial implementar estratégias de resposta robustas e inovadoras. Primordialmente, é crucial aprimorar a infraestrutura de captação e tratamento de água. Adotar tecnologias avançadas de tratamento e expandir os sistemas de reuso de água tratada para irrigação agrícola e processos industriais pode reduzir a pressão sobre os recursos hídricos naturais.

FINANCIAMENTO

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Número do processo: 23072.216578/2022-51.

REFERÊNCIAS

- ACOSTUPA, Y.; ARÉSTEGUI, D.; CASTRO, E.; CHOQUEVILCA, W.; GUZMÁN, G.; SÁNCHEZ, P. Aplicación de la metodología FPEIR al diagnóstico ambiental del Humedal Lucre-Huacarpay, 2017. Yachay - **Revista Científico Cultural**, v. 6, n. 01, p. 90–114, 2018. <https://doi.org/10.36881/yachay.v6i01.33>
- AIRES, R. F. DE F.; SALGADO, C. C. R. A TOPSIS-Based Multicriteria Approach for Reservoir Assessment. **Sociedade & Natureza**, v. 36, n. e70948, p. 14, 2024. <https://doi.org/10.14393/SN-v36-2024-70948>.
- ALVES, A. P. de A.; FÉLIX, A. C. T.; BARBOSA, D. L.; BRANDÃO, I. A. de P.; PAZ, M. A. de F.; DA CRUZ, S. G. Análise da relação do Índice de Segurança Hídrica com indicadores socioeconômicos em microrregiões de água e esgoto, no Estado da Paraíba, Brasil. **Caderno Pedagógico**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 840–861, 2024. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n1-043>
- ARAÚJO, M. D. de; RIBEIRO, M. M. R.; BRAGA, C. F. C. Integrando a modelagem da alocação de água ao sistema de indicadores FPEIR: aplicação ao semiárido do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 1167–1181, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019184425>.
- ARMBH. Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Governo de Minas publica edital de licitação do Plano de Segurança Hídrica da RMBH, Belo Horizonte, p. 12, 2021. Disponível em: http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/wp-content/uploads/2022/05/ARMBH_RMBH_PSH_R_F001_R01.pdf. Acesso em: 23 abr. 2023
- CARNERO, M. C. Fuzzy TOPSIS Model for Assessment of Environmental Sustainability: A Case Study with Patient Judgements. **Mathematics**, v. 8, n. 11, 2020. <https://doi.org/10.3390/math8111985>
- COBRAPE, Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba/São Paulo. 2020. Disponível em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4272>. Acesso em: 20 maio 2023.
- COPAM, Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa nº 08/22**. 2022. <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- ELSHOUBAKY, S.; ELBELTAGI, E.; ELRAHMAN, M. A.; ELMASOUDI, I. System Dynamics and TOPSIS Models for Sustainable Building Materials Selection Considering Life Cycle Assessment. **Mansoura Engineering Journal**, v. 48, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3026>
- HONORATO, P. A. R. **A contribuição do modelo FPEIR/TOPSIS no diagnóstico ambiental da segurança hídrica do médio curso do Rio Paraopeba, MG**. Orientador: Antônio Marcos Timbó Elmira. 2024. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geociências, UFMG. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/77479>. Acesso em: 08 ago. 2024
- HWANG, C.-L.; YOON, K. Multiple attribute decision making: Methods and applications. A state-of-the-art survey. 1. ed. **Springer-Verlag**. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 1981. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
- IBGE. Malhas territoriais. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 21 jan. 2022
- IPT. Instituto de Pesquisa Tecnológica. **Diagnóstico da situação dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) – SP/MG (Relatório Síntese – R3)**. São Paulo: IPT, 2008. Disponível em: https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7113/diagnostico_sintese.pdf. Acesso em: 26 ago. 2023.
- LIMA, R. P., ELMIRO, M. A. T., NERO, M. A., TEMBA, P. DA C., FONSECA, B. M., CASTIGLIONE, L. H. G. Assessment of Digital Terrain Models in Dam Break Simulation Studies. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 27(spe), 2021. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000100005>
- LIU, X.; LIU, H.; CHEN, J.; LIU, T.; DENG, Z. Evaluating the sustainability of marine industrial

- parks based on the DPSIR framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 158–170, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.271>
- LUO, Z.; ZHOU, Z.; HAO, Y. Establishment of an indicator framework for the transmission risk of the mountain-type zoonotic visceral leishmaniasis based on the Delphi-entropy weight method. **Infect Dis Poverty**, v. 11, n. 122, 2022. <https://doi.org/10.1186/s40249-022-01045-0>.
- NERO M. A., DE MORAIS, V. T. P., ELMIRO M. A. T., GARCIA, R. A., CINTRA, J. P., MANCIPEMUÑOZ, N. A. Assessment of the influence of DTM quality on dam rupture simulation processes. **MOJ Ecology & Environmental Sciences (MOJES)**, v. 9, n. 2 p. 61 – 70, 2024. <https://doi.org/10.15406/mojes.2024.09.00308>
- PIRRONE, N.; TROMBINO, G.; CINNIRELLA, S.; ALGIERI, A.; BENDORICCHIO, G.; PALMERI, L. The Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) approach for integrated catchment-coastal zone management: preliminary application to the Po catchment-Adriatic Sea coastal zone system. **Regional Environmental Change**, v. 5, n. 2–3, p. 111–137, jun. 2005. <https://doi.org/10.1007/s10113-004-0092-9>
- RAPPORT, D.; FRIEND, A. **Towards a comprehensive framework for environmental statistics: a stress-response approach**. Orientador: Anthony Friend. 1979. 90f. Monograph - Statistics Canada. Disponível em: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.896799/publication.html>. Acesso em: 18 ago. 2023
- SALAMÉ, L.; BOGARDI, J. J.; SEBESVARI, Z.; TOCKNER, K.; YAZICI, B. Drivers, Pressures and Stressors: The Societal Framework of Water Resources Management. **Handbook of Water Resources Management: Discourses, Concepts and Examples**, [s. l.], p. 329–364, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60147-8_11
- SISEMA. Sistema Estadual de Informações Ambientais de Minas Gerais, 2021. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 21 jan. 2023.
- SHANNON, C. E.; WEAVER, W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: **University of Illinois Press**, 1949. Disponível em: https://pure.mpg.de/rest/items/item_2383164/component/file_2383163/content. Acesso em: 26 ago. 2023
- SHI, S.; TAO, X.; CHEN, X.; CHEN, H.; FITRI, A.; YANG, X. Evaluation of urban water security based on DPSIR model. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 880, n. 1, p. 012023, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012023>
- YANG, J.; XING, S.; QIU, R.; CHEN, Y.; HUA, C.; DONG, D. Mathematical Problems in Engineering Decision-Making Based on Improved Entropy Weighting Method: An Example of Passenger Comfort in a Smart Cockpit of a Car. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 1, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6846696>
- YIN, J.; YUAN, J. DPSIR-TOPSIS Model-Based Assessment of Green Development Performance in Beijing, Tianjin, and Hebei. **Advances in Engineering Technology Research**, v. 1, n. 2, p. 554–559, 2022. <https://doi.org/10.56028/aetr.2.1.544>
- UN. UNITED NATIONS. Water Security & the Global Water Agenda. A UN-Water Analytical Brief. Canada: ONU, 2013. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/water-security-and-global-water-agenda>. Acesso em: 26 ago. 2023.
- VALE S.A. **Balanco da Reparação: 1º Semestre de 2022**. 2022. Disponível em: https://vale.com/documents/d/guest/val3862-2_revista-balanco-da-reparacao-1-sem-22_final. Acesso em: 15 mai. 2024.
- ZHANG, P.; ZHANG, J.; GE, R.; ZHOU, Q. The impact of agricultural international trade on agro-ecological environment based on TOPSIS model. **Applied Mathematics and Nonlinear Sciences**, v. 8, n. 2, 2023. <https://doi.org/10.2478/amns.2023.1.00297>
- ZLATI, M. L. ANTOHI, V. M.; IONESCU, R. V.; ITICESCU, C.; GEORGESCU, L. P. Quantifying the impact of the water security index on socio-economic development in EU27. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 93, p. 101912, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.101912>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Priscila Aparecida da Rocha Honorato: concepção, coleta de dados, análise dos dados, elaboração do manuscrito, redação, discussão dos resultados.

Marcos Antônio Timbó Elmiro: análise dos dados, redação, revisão.

Marcelo Antônio Nero: redação, revisão

Plinio da Costa Temba: revisão

Helder Lages Jardim: revisão



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.



Disponível em:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321382839009>

Como citar este artigo

Número completo

Mais informações do artigo

Site da revista em redalyc.org

Sistema de Informação Científica Redalyc
Rede de Revistas Científicas da América Latina e do Caribe,
Espanha e Portugal
Sem fins lucrativos acadêmica projeto, desenvolvido no
âmbito da iniciativa acesso aberto

Priscila Aparecida da Rocha Honorato,
Marcos Antônio Timbó Elmiro, Marcelo Antonio Nero,
Plinio da Costa Temba, Helder Lages Jardim

**A Contribuição do Modelo FPEIR/TOPSIS no Diagnóstico
Ambiental da Segurança Hídrica de Áreas Atingidas pela
Barragem B1, Brumadinho, MG**

**The Contribution of the FPEIR/TOPSIS Model in The
Environmental Diagnosis of Water Security in Areas
Affected by the B1 Dam, Brumadinho, MG**

Sociedade & Natureza

vol. 37, núm. 1, e74110, 2025

Editada pela Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU,

ISSN: 0103-1570

ISSN-E: 1982-4513

DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v37-2025-74110>