



## **Livro de Resumos**

**"Água, Cavernas, Meio Ambiente e Mineração  
em Busca de um Futuro Sustentável"**

**Belo Horizonte, MG**

**14 e 15 de maio de 2026**

### **Organização**

**Rodrigo de Paula e Paulo Galvão**

*Presidentes da comissão organizadora*



## Nota de boas-vindas e agradecimentos

É com grande satisfação que apresentamos os Anais do IV Café Hidrogeológico, realizado nos dias 14 e 15 de maio de 2026, em Belo Horizonte, na Universidade Federal de Minas Gerais. O evento reuniu mais de 400 participantes entre estudantes, pesquisadores, profissionais, representantes de instituições públicas e empresas, promovendo debates e intercâmbio de conhecimentos nas áreas de hidrogeologia, espeleologia, mineração e meio ambiente.

Esta publicação reúne 73 trabalhos científicos, divididos em 46 resumos simples e 27 expandidos, refletindo a diversidade de pesquisas, experiências e aplicações desenvolvidas nessas áreas. Os trabalhos publicados<sup>1</sup> neste volume foram avaliados pela Comissão Científica das áreas temáticas do evento, assegurando o rigor técnico e científico do processo de seleção e publicação. A dedicação da comissão foi fundamental para garantir a qualidade e a relevância dos trabalhos apresentados.

A Comissão Organizadora agradece a todos os autores, palestrantes, ministrantes de minicursos, avaliadores e participantes que contribuíram para o sucesso desta edição. Esperamos que este volume contribua para a disseminação do conhecimento científico, o fortalecimento de redes de colaboração e desenvolvimento de novas pesquisas e iniciativas voltadas à gestão sustentável dos recursos naturais.

A realização deste evento só se tornou possível graças aos nossos alunos e voluntários do LEHID, apoiadores e patrocinadores, que acreditam na importância da ciência, da inovação e da integração entre os diversos setores da sociedade. A todos os parceiros que contribuíram para tornar esta iniciativa uma realidade, registramos nossos mais sinceros agradecimentos.



**Rodrigo de Paula**

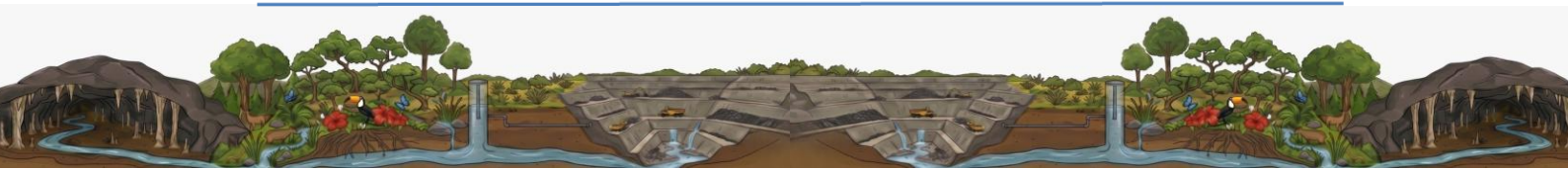


**Paulo Galvão**

*Presidentes da comissão organizadora*

---

<sup>1</sup> **Nota aos leitores.** Os trabalhos publicados aqui foram avaliados quanto à sua adequação temática e conformidade com as normas do evento. O conteúdo técnico-científico, dados, interpretações e redação são de inteira responsabilidade de seus respectivos autores, não refletindo necessariamente o posicionamento da Comissão Científica, da Comissão Organizadora ou das instituições envolvidas.

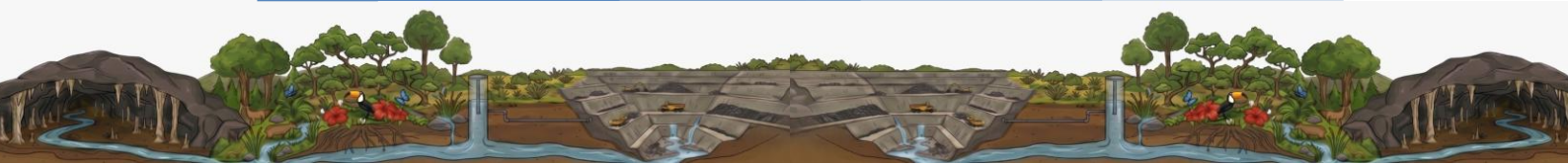


## Realização



SUSTENTABILIDADE  
COM(O) PROPÓSITO

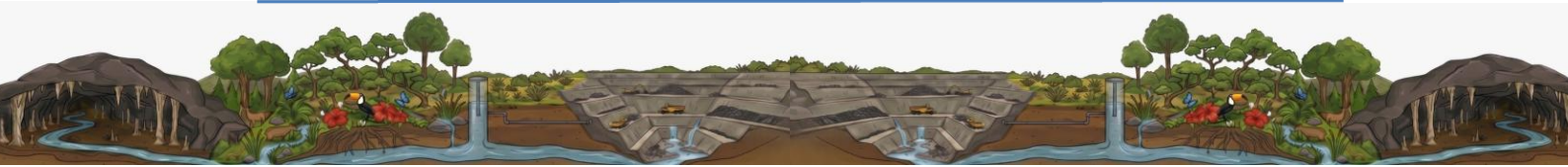
## Apoio



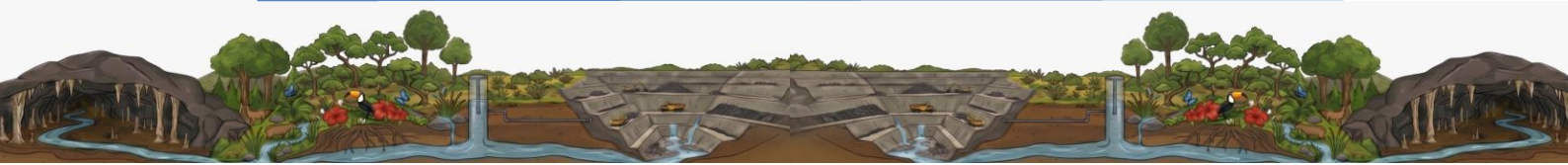
## Patrocínio Ouro



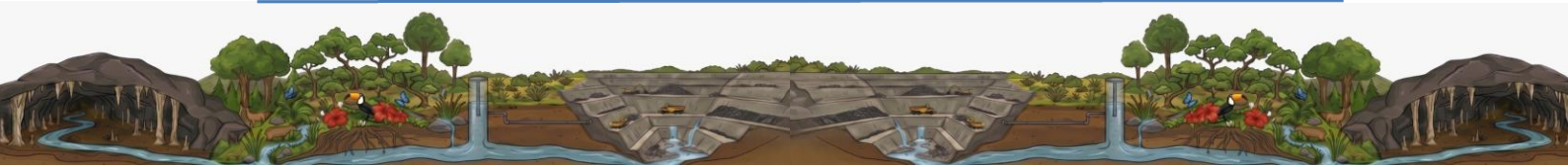
## Patrocínio Ouro



## Patrocínio Bronze



# Resumos Simples



## Avaliação da degradação do tinopal sob condições de ausência de luz e refrigeração

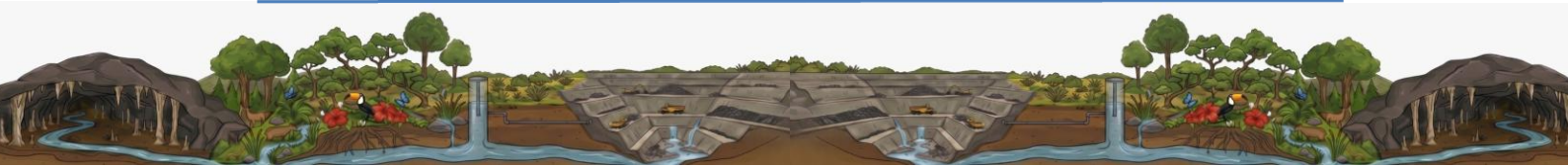
Luiza Monteiro Espíndola <sup>1</sup>, Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>2</sup>, Gabriel Coelho Diniz Lopes de Sousa <sup>3</sup>, Letícia Pereira dos Santos Monteiro <sup>4</sup>, Rafael Fernando Marinho Quintão <sup>5</sup>, Vitória Gomes Macêdo <sup>6</sup>, Paulo Henrique Ferreira Galvão <sup>7</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [luizaespindola88@gmail.com](mailto:luizaespindola88@gmail.com)

### Resumo

Para determinar o fluxo subterrâneo (trajetória, velocidade e direção), os traçadores fluorescentes são comumente utilizados por apresentarem baixa toxicidade e serem solúveis em água. Destaca-se o Tinopal CBS-X, muito utilizado para entender a dispersão de contaminantes e conexão entre o ambiente subterrâneo. Apesar disso, a conservação adequada das amostras contendo traçadores é limitada pela disponibilidade de recursos em campo, resultando no armazenamento sem refrigeração e/ou na realização dos ensaios após longos períodos. Dessa maneira, o objetivo desse trabalho é determinar a degradação desse traçador após o armazenamento em local escuro e à temperatura ambiente em diferentes períodos, a fim de compreender a possibilidade de flexibilização das condições de armazenamento. Então, foi utilizada uma solução de 1000 ppb feita a partir de 1 mg de tinopal adicionado em 1 litro de água ultrapura. A água ultrapura foi utilizada para evitar reações e interferências dos íons e da matéria orgânica e o traçador. Essa solução foi diluída em outras três amostras de concentrações de 100 ppb, 50 ppb e 10 ppb. As amostras foram analisadas em um fluorímetro no modelo GGUN-FL após 24, 48, 72 e 240 horas. Após 24 horas, a menor concentração (10 ppb) apresentou maior degradação (cerca de 18,7%), enquanto a maior concentração (100ppb) não apresentou degradação significativa. A concentração intermediária apresentou uma degradação que foi atribuída à limitação do método por apresentar flutuações nos menores intervalos de tempo. Após a última análise (240 horas), observou-se que houve degradação em todas as concentrações, sendo 3,09% (100 ppb), 9,56% (50 ppb) e 37,6% (10 ppb). Dessa forma, os resultados indicam que esse traçador não apresenta estabilidade ao longo das horas sendo armazenado sem refrigeração e na ausência de luz, especialmente em menores concentrações.

**Palavras-chave:** Traçadores, Fluxo subterrâneo, Fluorímetro.



# Hidroquímica e Potabilidade das Águas do Aquífero Bação nos Municípios de Ouro Preto e Itabirito – MG

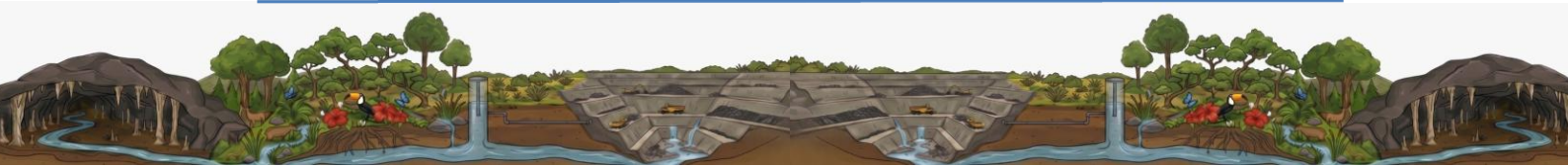
Maria Clara Nascentes Morgado <sup>1</sup>, Estefânia Fernandes dos Santos <sup>2</sup>, Mariângela Garcia Leite <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Ouro Preto. Autor correspondente [maria.morgado@aluno.ufop.edu.br](mailto:maria.morgado@aluno.ufop.edu.br)

## Resumo

O Complexo Bação, localizado entre Ouro Preto e Itabirito, no Quadrilátero Ferrífero, constitui um importante domínio hidrogeológico associado ao sistema aquífero granito-gnáissico, desenvolvido em rochas fraturadas e recobertas por espesso manto de intemperismo, o que confere ao sistema características intermediárias entre meios fissurais e porosos (Alkmim & Marshak, 1998; Brito et al., 2021). Nesse contexto, considerando a relevância das águas subterrâneas na região e as pressões associadas a atividades antrópicas, especialmente a mineração (Paixão et al., 2019), este trabalho teve como objetivo caracterizar a hidroquímica e avaliar a potabilidade das águas do Aquífero Bação. Para isso, foram selecionados seis poços cadastrados nos sistemas IDE SISEMA e SIAGAS, distribuídos entre os municípios de Ouro Preto e Itabirito, nos quais foram realizadas coletas de água subterrânea em janeiro de 2025, conforme APHA (2017). Em campo, foram medidos temperatura, pH, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido, enquanto as análises laboratoriais incluíram cátions e elementos-traço por ICP-OES e ICP-MS, e ânions por colorimetria, com posterior interpretação por diagramas de Scholler e comparação com os padrões da OMS e da Resolução CONAMA nº 396/2008. Os resultados mostraram que a composição química das águas varia conforme o contexto litológico e estrutural das áreas amostradas. Nas áreas associadas a gnaisses bandados do tipo TTG e migmatitos, observaram-se baixos níveis de mineralização, com predomínio de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  e baixos teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$ , indicando menor tempo de residência e curta interação água-rocha. Em setores com maior diversidade litológica e presença de zonas miloníticas, verificou-se maior enriquecimento em íons dissolvidos, especialmente sódio, potássio e sulfato, sugerindo que o fraturamento e as descontinuidades estruturais favorecem a circulação subterrânea e intensificam a interação geoquímica entre a água e a matriz mineral (Lana et al., 2013). Quanto à potabilidade, os parâmetros físico-químicos permaneceram dentro dos limites estabelecidos para águas subterrâneas de Classe 1, com pH entre 5,85 e 7,13, condutividade elétrica entre 98,5 e 286  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e sólidos totais dissolvidos abaixo dos valores de referência. Os elementos inorgânicos analisados também não ultrapassaram os limites normativos, indicando ausência de contaminação significativa por metais. Em síntese, a hidroquímica das águas subterrâneas do Aquífero Bação é condicionada pela litologia e pelas estruturas geológicas do meio aquífero, enquanto a análise de potabilidade indica qualidade compatível com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396/2008.

**Palavras-chaves:** Água subterrânea; Complexo Bação; Aquífero cristalino; Hidroquímica; Potabilidade.



# Estimativa de Parâmetros Hidrodinâmicos em Aquíferos com Dados Públicos Escassos: Aplicação de Métodos Simplificados aos Grupos Nova Lima e Formação Cauê

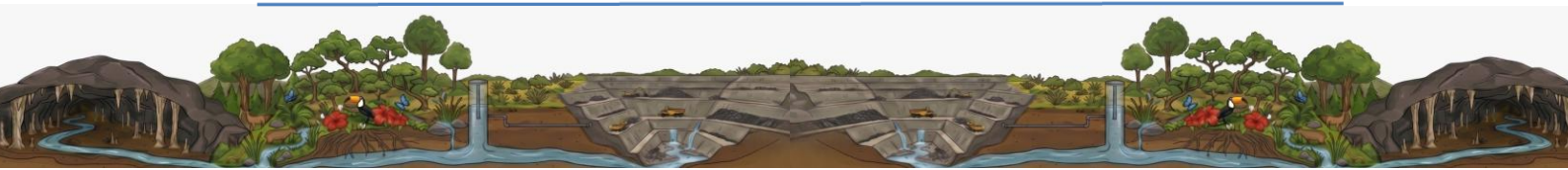
Mariana Sigolo Figueiredo <sup>1</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor Correspondente: [mfsigolo@ufmg.br](mailto:mfsigolo@ufmg.br)

## Resumo

A caracterização hidrodinâmica de aquíferos fissurais em rochas metamórficas e metassedimentares é essencial para a gestão de águas subterrâneas, especialmente no contexto do Quadrilátero Ferrífero (MG), onde esses sistemas sustentam abastecimento público e uso industrial. Os métodos clássicos de análise de testes de bombeamento exigem séries temporais completas de rebaixamento para ajuste de curvas-tipo, dado frequentemente indisponível em bases públicas, o que torna necessário o uso de métodos alternativos capazes de extrair informação hidrodinâmica relevante a partir de dados mínimos disponibilizados em domínio público. O presente trabalho tem por objetivo estimar os parâmetros transmissividade (T) e condutividade hidráulica (K) de quatro poços tubulares profundos inseridos no Grupo Nova Lima e na Formação Cauê, utilizando apenas dados públicos do Sistema de Informações de Águas Subterrânea (SIAGAS), sendo eles: nível estático (NE), nível dinâmico ao final do teste (ND), vazão estabilizada (Q) e duração do bombeamento ( $t = 24$  h). Para tanto, são aplicados três métodos matemáticos simplificados: Logan (1964), Brown (1953) e Cooper-Jacob (1946) em ponto único, além de análise de sensibilidade *OAT* (*one-at-time*), ao coeficiente de armazenamento (S) e curvas sintéticas de Theis (1935) para verificação de consistência. Os métodos de Logan e Brown estimam a transmissividade (T) a partir da capacidade específica (Q/s), usando relações empíricas derivadas de Cooper-Jacob. Já o método de Cooper-Jacob em ponto único calcula T iterativamente com base em (s, t) e um valor assumido de S, validado pela condição  $u < 0,05$ . Como não há poço de observação, S foi variado entre  $10^{-1}$  e  $10^{-5}$ , intervalos reportados na literatura para aquíferos livres, semi-confinados e fissurais em rochas do Quadrilátero Ferrífero. A condutividade hidráulica foi encontrada pela relação  $K = T/b$ , onde b é a espessura saturada estimada a partir da profundidade útil e do NE. O método de Cooper-Jacob ( $S = 10^{-3}$ ) converge com Logan, indicando coerência interna da abordagem. A análise de sensibilidade *OAT* revelou que variações de S em quatro ordens de grandeza resultam em alterações de  $\pm 15$  a 25% em T, devido à dependência logarítmica. As curvas sintéticas de Theis, geradas a partir de um código em *RStudio*, utilizando os parâmetros estimados, reproduziram com precisão o ponto observado ( $t = 24$  h), validando a consistência física dos resultados. Apesar da quantidade reduzida de pontos utilizada conclui-se que a combinação dos métodos é uma alternativa viável para estimar parâmetros hidrodinâmicos com dados mínimos. A metodologia pode ser aplicada ao SIAGAS/SGB, ampliando o uso de dados existentes em estudos regionais de aquíferos fissurais no Brasil.

**Palavras-chave:** aquífero fissural; parâmetros hidrodinâmicos; métodos simplificados; dados públicos de poços; Quadrilátero Ferrífero.



# Classificação de Águas Contaminadas por Arsênio em Minas Gerais por Meio de Algoritmos de Aprendizado de Máquina

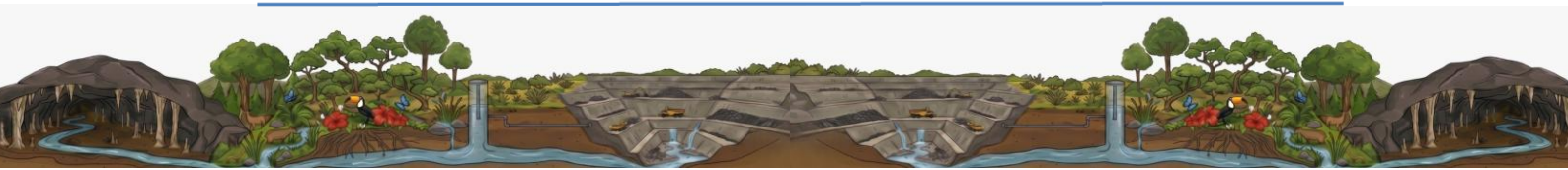
Marina Muniz de Queiroz <sup>1</sup>, Ana Elis Moraes de Almeida <sup>2</sup>, Artur Assreuy Diniz <sup>3</sup>, Jaielle Rodrigues Nascimento <sup>4</sup>, Fernanda Ribeiro Menezes <sup>5</sup>, Míriam Cristina S. Amaral <sup>6</sup>, Silvia Maria A. C. Oliveira <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [marinamunizdequeiroz@gmail.com](mailto:marinamunizdequeiroz@gmail.com)

## Resumo

O arsênio é um metaloide tóxico que ocorre naturalmente no ambiente, mas cuja concentração em corpos hídricos pode aumentar significativamente em decorrência de atividades antrópicas. Reconhecido como carcinogênico, o arsênio está associado, quando há exposição prolongada, a diversos efeitos adversos à saúde, incluindo diferentes tipos de câncer e danos aos sistemas cutâneo, cardiovascular, respiratório e neurológico. Em resposta, agências ambientais estabeleceram o limite máximo de 10 µg/L de arsênio em água potável. No Brasil, o estado de Minas Gerais é rico em recursos minerais, particularmente ouro, sendo especialmente suscetível à contaminação por arsênio em águas superficiais. Neste estudo, foram analisados dados estaduais de monitoramento de águas superficiais com o objetivo de identificar áreas com concentrações elevadas de arsênio. No entanto, tais dados estão disponíveis apenas em pontos com amostragem regular, o que resulta em extensas áreas sem informação. Para suprir essa limitação, foram desenvolvidos modelos de aprendizado de máquina com o objetivo de prever a concentração de arsênio em regiões não monitoradas, utilizando variáveis ambientais, químicas e geográficas. Os modelos foram construídos com os algoritmos *gradient boosting machine*, *random forest* e redes neurais artificiais. As variáveis preditoras do modelo incluíram material geológico predominante, domínios hidrogeológicos, distância mínima até a área ativa de mineração de ouro mais próxima, área de contribuição a montante, porcentagem de área de pastagem, área agrícola e de mineração de ouro na bacia de contribuição a montante de um ponto. O algoritmo de *random forest* apresentou o melhor desempenho, com R<sup>2</sup> de 0,481, RMSE de 2,461 e MAE de 1,255 para o conjunto de teste. A partir desse modelo, as bacias dos rios das Velhas, Paracatu e Piranga foram identificadas como as mais impactadas. Adicionalmente, outras três sub-bacias (Piracicaba, Santo Antônio e Afluentes Mineiros do Alto Jequitinhonha) também apresentaram trechos com concentrações estimadas superiores a 10 µg/L. A identificação de áreas críticas de contaminação é fundamental para orientar futuras investigações em saúde pública e fortalecer as estratégias de monitoramento nessas regiões.

**Palavras-chave:** arsênio; monitoramento; *random forest*; redes neurais artificiais; *gradient boosting machine*.



# Modelagem de Transporte Reativo em Phreeqc Para Análise do Desempenho de Barreiras de Argila no Tamponamento de Efluentes Ácidos

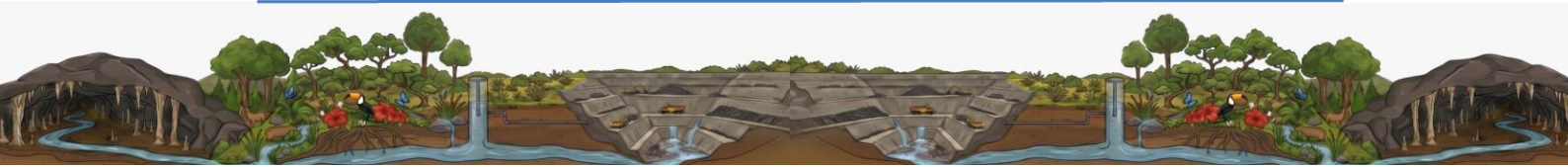
Nathan Martins <sup>1</sup>, Layane Silva <sup>2</sup>, Gregorio Faversani <sup>3</sup>, Lilian Hubner <sup>4</sup>, Felipe Costa <sup>5</sup>,  
Eduardo Cervi <sup>6</sup>, Gabriel Silveira <sup>7</sup>

<sup>1</sup> WSP. Autor Correspondente: [nathan.martins@wsp.com](mailto:nathan.martins@wsp.com).

## Resumo

A modelagem hidrogeoquímica é amplamente utilizada para estimar a qualidade da água em sistemas, integrando processos de mistura, equilíbrio químico e interação água-rocha. Quando associada ao transporte reativo, essa abordagem representa não apenas a composição química das soluções, mas também sua transformação ao longo do fluxo em meios porosos. Este trabalho, realizado pela WSP, avaliou o potencial de tamponamento de uma barreira de argila submetida a efluentes com elevado sulfato e acidez, por meio de simulações geoquímicas reativas no PHREEQC. Foram definidos 26 cenários de entrada, 13 típicos e 13 conservadores, contemplando condições hidroquímicas contrastantes ao longo do tempo. Dentre eles, 9 representam o aporte de efluentes provenientes de uma pilha e 4 de um lago. Em termos construtivos, a barreira apresentou variações na proporção de argila, saprólito e geomembrana, com espessuras entre 1 e 9 metros. A composição inicial da argila foi parametrizada com base em ensaios de caracterização mineralógica (DRX e MEV) e geoquímica (USEPA 1313 e capacidade de troca catiônica). O modelo de transporte reativo foi estruturado em uma coluna unidimensional discretizada em 45 células, representando o meio argiloso da barreira. No PHREEQC, cada célula corresponde a um volume reacional no qual a solução é transportada e reequilibrada sucessivamente. Os shifts representam os avanços sucessivos da solução ao longo da coluna, permitindo acompanhar a evolução temporal e espacial da composição química do efluente. A cada etapa, o programa calcula de forma integrada os processos de advecção, dispersão e difusão, seguidos pelas reações químicas em cada célula. Foram consideradas reações de equilíbrio, dissolução e precipitação mineral, adsorção em superfícies minerais e troca iônica. Essa estrutura permitiu avaliar o tamponamento progressivo do efluente e a evolução da capacidade de retenção geoquímica da barreira ao longo do tempo. Entre os resultados, observou-se a elevação do pH para valores próximos de 7, evidenciando o potencial neutralizante da barreira, bem como a dissolução de goethita concomitante à precipitação de hematita, processo que favoreceu a retenção de arsênio e alguns metais a níveis conformes aos limites da CONAMA, além da atenuação de determinados cátions por meio de troca iônica. A barreira mostrou-se efetiva no tamponamento dos efluentes.

**Palavras-chave:** Transporte Reativo; PHREEQC; Tamponamento; Barreira de Argila; Modelagem.



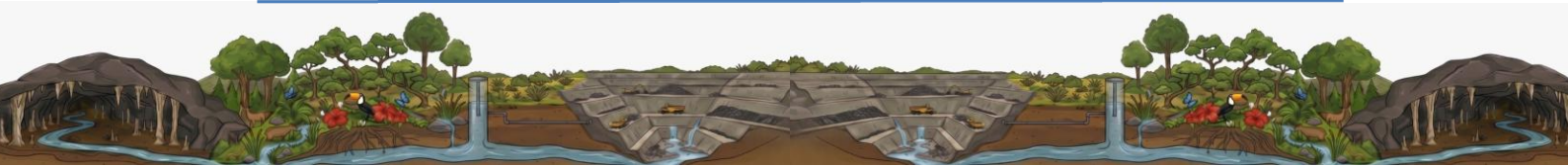
# Modelagem de Transporte Reativo em Phreeqc: Análise de Barreira de Argila no Tamponamento de Efluentes Ácidos

Gregorio Faversani <sup>1</sup>, Layane Silva <sup>2</sup>, Nathan Martins <sup>3</sup>, Lilian Hubner <sup>4</sup>, Felipe Costa <sup>5</sup>, Eduardo Cervi <sup>6</sup>, Gabriel Silveira <sup>7</sup>

<sup>1</sup> WSP. Autor correspondente: [gregorio.faversani@wsp.com](mailto:gregorio.faversani@wsp.com)

## Resumo

A modelagem hidrogeoquímica é amplamente utilizada para estimar a qualidade da água em sistemas de mineração, integrando processos de mistura, equilíbrio químico e interação água-rocha. Quando associada ao transporte reativo, essa abordagem representa não apenas a composição química das soluções, mas também sua transformação ao longo do fluxo em meios porosos. Este trabalho avaliou, por meio de simulações geoquímicas no PHREEQC, a atenuação natural da carga química de efluentes caracterizados por pH ácido e concentração de metais quando submetidos a uma barreira de argila. A sensibilidade do modelo foi avaliada considerando duas fontes de efluentes: o lago de uma cava e uma pilha de estéril, associadas a duas condições hidroquímicas representativas: caso típico e caso conservador, além de diferentes variações de design da barreira, definidas a partir das proporções entre argila, saprólito e geomembrana, com espessuras entre 1 e 9 metros. Essas combinações resultaram em 26 cenários simulados, sendo 4 geometrias de barreira associadas ao efluente do lago e 9 geometrias associadas à pilha, ambas avaliadas para os cenários típico e conservador. A composição inicial da argila foi parametrizada com base em ensaios de caracterização geoquímica, que envolveram ensaios de lixiviação (USEPA 1313), mineralogia (DRX e MEV) e a determinação da capacidade de troca catiônica (CTC). O modelo de transporte reativo foi estruturado em uma coluna unidimensional discretizada em 45 células, representando o meio argiloso da barreira. No PHREEQC, cada célula corresponde a um volume no qual a solução é transportada e reequilibrada sucessivamente. Os *shifts* representam os avanços da solução ao longo da coluna, permitindo acompanhar a evolução temporal e espacial da qualidade do efluente. A cada etapa, o software calcula, de forma integrada, os processos de advecção, dispersão e difusão, seguidos pelas reações químicas. Adotou-se a base de dados termodinâmicos *lnl.dat* e foram consideradas reações de equilíbrio, dissolução e precipitação mineral, adsorção em superfícies minerais e troca iônica. Essa estrutura permitiu avaliar a capacidade de retenção geoquímica da barreira ao longo do tempo. Entre os resultados, observou-se a neutralização do pH, bem como a diminuição da concentração de metais a níveis conformes aos limites da CONAMA nº 430/2009. Por meio de mecanismos como adsorção na argila e troca iônica, a barreira mostrou-se efetiva na atenuação dos efluentes.



# Utilização de Sensores de Baixo Custo para Levantamento Topográfico em Zonas Ripárias

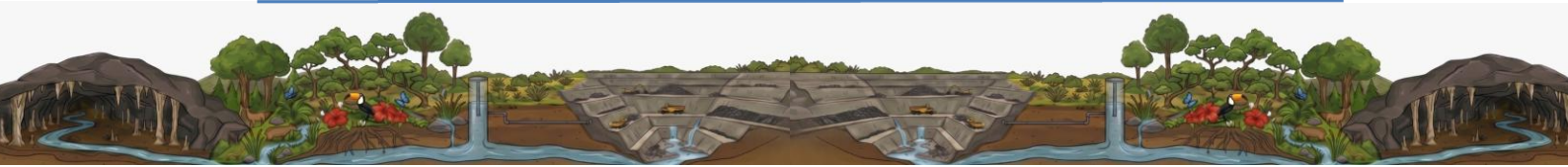
Hersília de Andrade e Santos <sup>1</sup>, Pedro Augusto dos Anjos Souza <sup>2</sup>, Rodrigo Gabriel de Oliveira Bastos <sup>3</sup>, Alexandre Senna de Araújo <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Autor Correspondente: [hsantos@cefetmg.br](mailto:hsantos@cefetmg.br).

## Resumo

A precisão dos dados topográficos é fundamental para a modelagem hidrodinâmica, uma vez que a geometria dos canais fluviais condiciona a dinâmica do escoamento superficial e influencia diretamente variáveis como a altura da lâmina d'água, a velocidade, a vazão e o transporte de sedimentos. No entanto, a obtenção dessas informações frequentemente é limitada pela baixa resolução de dados provenientes de plataformas orbitais ou pelo elevado custo de tecnologias como sensores aerotransportados. Nesse contexto, este trabalho investiga a viabilidade do uso do sensor LiDAR integrado ao iPad M3 Pro, em conjunto com o *software* Dot3D Pro (versão 6.2.1), com o objetivo de avaliar sua acurácia e aplicabilidade em levantamentos topográficos ripários para a geração de nuvens de pontos e Modelos Digitais de Elevação (MDE). O estudo foi conduzido no córrego Taboões, localizado no Parque Estadual da Serra do Rola-Moça (Ibirité/MG), escolhido por apresentar boas condições de preservação e morfologia adequada ao escaneamento terrestre, respeitando o alcance nominal de aproximadamente 5 metros do sensor. O processamento das nuvens de pontos foi realizado no *software* CloudCompare. Os resultados indicam que o método apresentou baixa variação nas medições de distâncias e elevações, quando comparado às medições manuais, realizadas por trena, evidenciando potencial para aplicações de levantamento topográfico. Contudo, o modelo apresentou limitações associadas à presença de vegetação densa, variações de iluminação e elementos em movimento, o que exigiu etapas adicionais de filtragem e interpolação durante o processamento dos dados. Dessa forma, conclui-se que o uso do LiDAR embarcado em dispositivos móveis configura-se como uma alternativa inovadora, promissora e de baixo custo para levantamentos topográficos em ambientes ripários, especialmente em aplicações de pequena escala e que demandam rápida aquisição de dados. Apesar disso, ainda necessita de melhorias na coleta de informações em cenários mais complexos, particularmente quanto à representação da vegetação, superfícies irregulares e ambientes dinâmicos.

**Palavras-chave:** Modelo digital de elevação; Levantamento topográfico; Zona ripária; LiDAR; Nuvem de pontos.



# Análise e Influência da Escolha do Cenário Para Remoção de Barragens: Estudo de Caso na Bacia do Rio Doce

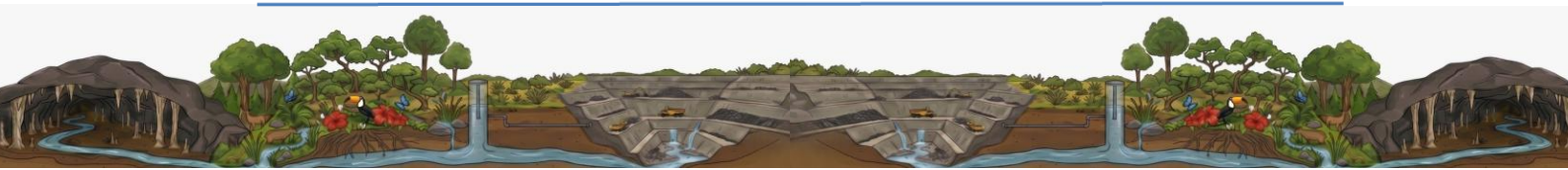
Hersília de Andrade e Santos <sup>1</sup>, Rodrigo Gabriel de Oliveira Bastos <sup>2</sup>, Pedro Augusto dos Anjos Souza <sup>3</sup>, Alexandre Senna de Araújo <sup>4</sup>, Vitória Barbosa Graciano <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Autor Correspondente: [hsantos@cefetmg.br](mailto:hsantos@cefetmg.br).

## Resumo

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce possui um histórico de vastas intervenções antrópicas, marcadas principalmente pela construção de barragens para mineração, geração de energia elétrica, abastecimento público, entre outras atividades. Entretanto, o levantamento de tais estruturas ascende para preocupações voltadas ao acompanhamento da qualidade das mesmas, aos riscos de rompimento, aos custos de manutenção, ao encerramento de vida útil, às perdas ecossistêmicas e aos impactos socioeconômicos associados. Sendo assim, a remoção de barragens surge como uma estratégia viável para a restauração da conectividade fluvial e recuperação de ecossistemas. Este estudo teve como objetivo modelar a remoção de barragens de geração de energia elétrica, localizadas na Bacia do Rio Doce, avaliando as alterações no regime hidrológico. Foram simulados diferentes cenários de remoção das estruturas, considerando remoções parciais, totais, individuais. O hidrograma do cenário atual foi comparado com o hidrograma para os cenários de remoção individual e combinada, durante o período entre 2006 à 2024, com uso dos métodos de Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA) e de Alcance da Variabilidade (RVA). A remoção total dos reservatórios apresentou maior alteração no RVA bruto, mas análises pelo porte e geração de energia elétrica do barramento indicou que a remoção de uma barragem é mais eficiente. Conclui-se que a modelagem baseada em múltiplos cenários é uma ferramenta imprescindível para embasar políticas públicas de descomissionamento, permitindo mitigar riscos hidrológicos e maximizar os benefícios socioambientais para a população inserida na Bacia do Rio Doce.

**Palavras-chave:** Remoção de barragem; Modelagem; Hidrologia; Restauração fluvial; Gestão de recursos hídricos.



# Caracterização Hidrogeológica e Hidroquímica do Complexo Belo Horizonte, na Cidade de Pará De Minas, Minas Gerais

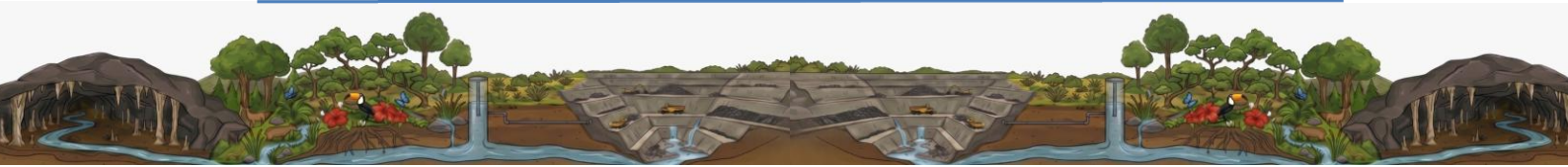
Vitor Hugo Junqueira Hyppolito <sup>1</sup>, Estefânia Fernandes dos Santos <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Ouro Preto. Autor correspondente: [vitorhjh@gmail.com](mailto:vitorhjh@gmail.com)

## Resumo

O crescimento da demanda global por recursos hídricos subterrâneos torna essencial o controle rigoroso de sua qualidade e extração, especialmente em regiões estratégicas para a produção agrícola, como Pará de Minas (MG). No Brasil, a ausência de integração entre diferentes fontes de informação dificulta estudos mais abrangentes, e, na região, há escassez de pesquisas que associem caracterização hidrogeológica e hidroquímica à modelagem inversa. Diante desse cenário, o trabalho teve como objetivo caracterizar os sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do Rio Pará, em Pará de Minas, Minas Gerais, focando em aspectos hidrogeológicos e hidroquímicos para estimar parâmetros essenciais para uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos. A metodologia incluiu um levantamento bibliográfico, a coleta de dados sobre poços tubulares, visitas a campo, coleta e análise de amostras de água, análises laboratoriais (ICP-OES e ICP-MS) e aplicação do software PHREEQC para modelagem hidrogeoquímica inversa. Os principais resultados revelaram que a qualidade da água subterrânea é controlada principalmente pela interação com os minerais da matriz rochosa. A modelagem inversa indicou que minerais como Hausmanita, Aragonita e Calcita estão em condições de subsaturação, sugerindo dissolução ativa no aquífero. Por outro lado, minerais como Gibbsita, Goetita e Hematita apresentaram valores de índice de saturação positivos, indicando condições geoquímicas favoráveis à sua precipitação. Essa pesquisa contribui para a gestão e manutenção do aquífero, minimizando os riscos associados à sua exploração e fornecendo uma base sólida para a gestão sustentável dos recursos hídricos na região.

**Palavras-chave:** Hidrogeologia, Hidroquímica, Modelagem Inversa, PHREEQC, Pará de Minas.



# Uso de Isótopos Estáveis ( $\delta^2\text{H}$ E $\delta^{18}\text{O}$ ) como Indicadores da Condição de Umidades Relativas em Bacia de Recarga

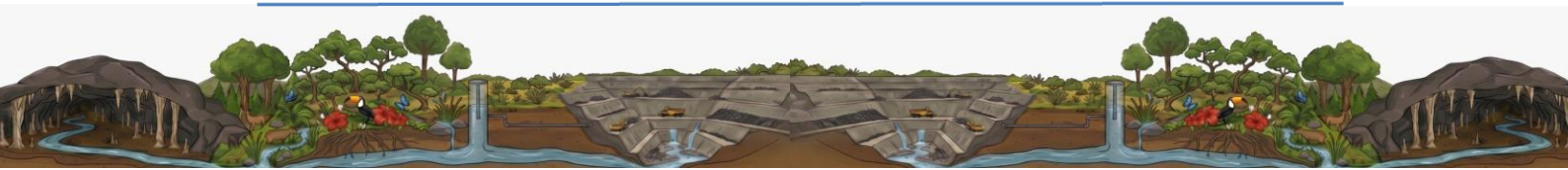
Elydio Soares <sup>1</sup>, João Vitor <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, <sup>2</sup> Instituto Federal do Norte de Minas Gerais.  
Autor correspondente: [alydio.soares@cdtn.br](mailto:alydio.soares@cdtn.br)

## Resumo

As reservas hídricas subterrâneas são recursos fundamentais para a sustentabilidade ambiental, social e econômica em várias regiões e comunidades. Na região Norte de Minas Gerais, a bacia do rio Peruaçu, que pertence à bacia do rio São Francisco, apresenta características ambientais diversas, com áreas de preservação ambiental e urbanas. Essa diversidade é caracterizada por condições distintas de umidade, tanto atmosférica quanto do solo. A realização da pesquisa teve como objetivo identificar a condição da umidade relativa atmosférica na área da bacia do Peruaçu, analisando distintas regiões dentro da mesma bacia de recarga, por meio da análise das concentrações de isótopos estáveis em amostras de água subterrânea provenientes de poços das regiões. As águas subterrâneas das áreas próximas à cidade de Januária e as águas coletadas na região da área de preservação ambiental das cavernas do Peruaçu foram analisadas quanto às concentrações dos isótopos de deutério e oxigênio 18 ( $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ). As frações isotópicas das amostras tiveram uma diminuição dos isótopos pesados comparadas às da precipitação local. Os resultados demonstraram que a equação da Linha Meteórica das Águas Subterrâneas (LMAS), possui menor valor do excesso de deutério (d-excess), comparado à equação da Linha Meteórica Local (LML). Isso demonstra um incremento de isótopos pesados das águas infiltradas, tanto na região das áreas de preservação quanto na área urbana. Esse resultado pode ser explicado pela evaporação causada pela condição de umidade relativa tanto atmosférica como do solo no momento da recarga das águas subterrâneas.

**Palavras-chave:** isótopos estáveis, umidade, Peruaçu, água subterrânea, d-excess.



# Determinação da Composição Isotópica da Água Subterrânea ( $\delta^2\text{H}$ E $\delta^{18}\text{O}$ ) na Bacia do Rio Peruaçu - MG

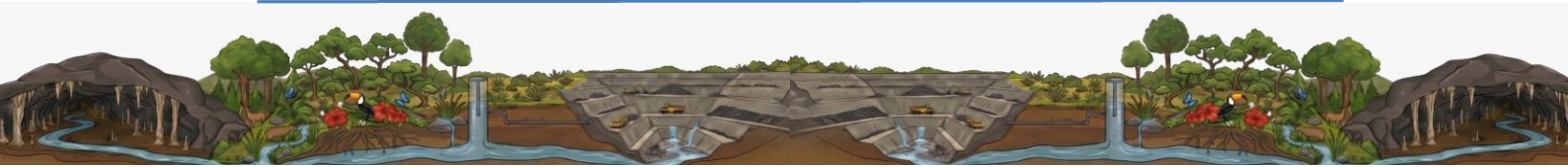
Elydio Soares <sup>1</sup>, João Vitor <sup>2</sup>, Ricardo Gomes Passos <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, <sup>2</sup> Instituto Federal do Norte de Minas Gerais.  
Autor correspondente: [alydio.soares@cdtn.br](mailto:alydio.soares@cdtn.br)

## Resumo

As reservas hídricas subterrâneas são recursos fundamentais para a sustentabilidade ambiental, social e econômica em várias regiões e comunidades. Na região Norte de Minas Gerais, a bacia do rio Peruaçu, que pertence à bacia do rio São Francisco, apresenta características ambientais diversas, com áreas de preservação ambiental e urbanas. Essa diversidade é caracterizada por condições distintas de umidade, tanto atmosférica quanto do solo. Como parte de um estudo hidrogeológico na área, em fase de desenvolvimento, foram coletadas amostras preliminares da água subterrânea na região para determinação da composição isotópica, em termos de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ . As amostras foram coletadas em distintas regiões, em termos climatológicos locais, dentro da mesma bacia: águas subterrâneas das áreas próximas à cidade de Januária e águas coletadas na região da Área de Preservação Ambiental Cavernas do Peruaçu. Os valores de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  das amostras apresentaram-se todos enriquecidos em termos de isótopos pesados, em relação à assinatura isotópica esperada para a precipitação local, além de exibirem agrupamentos isotópicos distintos entre as regiões amostradas. A reta da equação de regressão linear obtida para as amostras de água subterrânea apresentou menor valor do excesso de deutério (d-excess), comparado à equação da Linha Meteórica Local (LML). Esse comportamento pode ser explicado por processos de evaporação parcial antes ou durante a recarga, associados às condições de baixa umidade relativa, seja na superfície (corpos d'água rasos, lagos) ou na zona não saturada, ou ainda por mistura com águas previamente evaporadas. As diferenças entre os grupos isotópicos podem estar relacionadas a variações climatológicas locais nas áreas e a diferentes condições de recarga, incluindo efeitos de altitude, sazonalidade da precipitação e mecanismos distintos de infiltração.

**Palavras-chave:** isótopos estáveis; umidade; Peruaçu; água subterrânea; d-excess.



# Análise da Estabilidade Temporal e Integridade da Rodamina WT em Ambiente Controlado de Baixa Luminosidade e Temperatura Ambiente

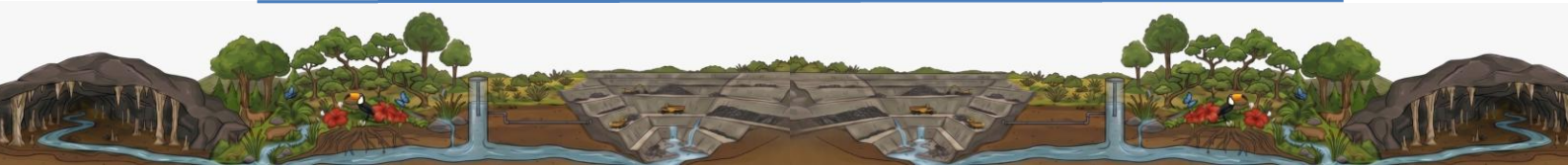
Gabriel Coelho Diniz Lopes de Sousa <sup>1</sup>, Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>2</sup>, Letícia Pereira dos Santos Monteiro <sup>3</sup>, Luiza Monteiro Espíndola Soares <sup>4</sup>, Rafael Fernando Marinho Quintão <sup>5</sup>, Vitória Gomes Macêdo <sup>6</sup>, Paulo Henrique Ferreira Galvão <sup>7</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [gabrielcoelhods@gmail.com](mailto:gabrielcoelhods@gmail.com)

## Resumo

Traçadores corantes são substâncias que podem ser utilizadas em meio subterrâneo para determinar direções de fluxo, velocidade da água, conectividade hidráulica e parâmetros de transporte em um sistema aquífero. São caracterizados por sua detectabilidade mesmo em concentrações extremamente baixas, tipicamente em razões de massa próximas a  $10^{-9}$ . Dentre os traçadores artificiais, os corantes fluorescentes como a Rodamina WT, são amplamente utilizados devido à sua elevada detectabilidade em baixas concentrações, em escalas de microgramas ou nanogramas por litro, e relativa estabilidade fotoquímica. No entanto, a confiabilidade dos dados coletados em campo depende da estabilidade da amostra até o momento de sua análise laboratorial. Dessa forma, este trabalho objetivou avaliar a estabilidade temporal da Rodamina WT sob condições controladas de armazenamento e diferentes concentrações. Foram analisadas amostras líquidas em concentrações distintas (10, 50 e 100 ppb) no intervalo de 24 h, 48 h, 72 h e 240 h armazenadas em um abrigo com ausência de luminosidade e à temperatura ambiente. As análises foram realizadas utilizando-se um fluorímetro de campo GGUN-FL, capaz de detectar simultaneamente múltiplos traçadores em escalas parte por trilhão. Os resultados obtidos demonstram alta estabilidade da Rodamina WT, que obteve uma redução média de apenas 0,63 ppb em um intervalo de 10 dias, variando 0,84%, 0,28%, 0,78% nas concentrações de 10, 50 e 100 ppb. Por fim, conclui-se que a o traçador corante analisado não apresenta degradação significativa quando armazenado em temperatura ambiente sem incidência de luz solar, indicando que essa é uma alternativa segura de estocagem de amostras de Rodamina WT, minimizando possíveis erros de análise. Além disso, é notável que, em meio subterrâneo, onde as condições de iluminação e temperatura se assemelham à aplicada experimentalmente, a Rodamina WT se mostra um excelente traçador corante com alta capacidade conservativa, sendo capaz de manter, por 10 dias, concentrações menores na ordem de 10 ppb, perdendo apenas 0,78 ppb da massa inicial.

**Palavras-chave:** Traçador corante, Fluorímetro, Degradação, Conservação, armazenamento.



# Phreeqc Applied to Effluent Quality Prediction in Future Stockpiles of a Lithium Mine

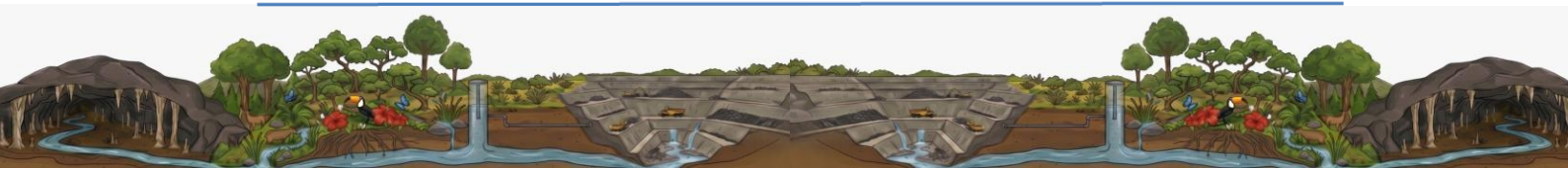
Gabriel Silveira <sup>1</sup>, Eduardo Cervi <sup>2</sup>, Gregório Faversoni <sup>3</sup>, Layane Silva <sup>4</sup>, Nathan Martins <sup>5</sup>, Felipe Costa <sup>6</sup>

<sup>1</sup> WSP. Corresponding author: [gabriel.silveira@wsp.com](mailto:gabriel.silveira@wsp.com)

## Abstract

This study presents the hydrogeochemical modeling to predict the quality of effluents associated with drainage from two future stockpiles in a lithium mining operation, comprising one waste rock pile and one combined waste rock and tailings pile. The objective was to estimate the temporal evolution of surface runoff and seepage chemistry generated by these structures, providing a technical basis to support environmental management, mitigation strategies, and monitoring programs, with focus on the assessment of acid rock drainage and metal leaching (ARD/ML) potential. The conceptual model was developed based on detailed geochemical characterization and on the lithological and mineralogical variability of the materials composing the stockpiles. Preliminary characterization results indicated that acidity generation and metal release are primarily associated with sulfide-rich minerals, whereas silicate dominated materials exhibit low geochemical reactivity and more stable behavior. This conceptual understanding informed the definition of modeling assumptions and guided the evaluation of drainage scenarios and their potential environmental implications. PHREEQC was used to simulate effluent quality scenarios (base and upper case) by integrating a conceptual framework that incorporates water balance condition and stockpile development. Input solutions were derived from mineralogical data and calibrated using Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) test results. Chemical contributions from different materials were weighted according to their proportional lithologies and their temporal evolution on a monthly and annual pile basis. Modeling results indicated alkaline pH conditions (8,17 to 8,95) throughout the simulated period for both structures, attributed to buffering by calcium bearing minerals. Under these conditions, metal mobility was predicted to be limited due to precipitation and sorption processes. No exceedances were predicted relative to the effluent discharge limits of CONAMA Resolution 430 of 2011. When compared to the Class 2 water quality criteria of CONAMA Resolution 357 of 2005, isolated exceedances were identified for manganese in the waste rock and tailings pile, and for barium and manganese in the waste rock pile. These results enhance the understanding of system behavior and support proactive environmental management throughout the life cycle of the stockpiles.

**Key words:** hydrogeochemical modeling; acid mine drainage; metal leaching; effluent quality prediction.



# Automatizando a Complexidade: Uma Solução Digital para Classificação de Resíduos na Nova ABNT NBR 10.004:2024

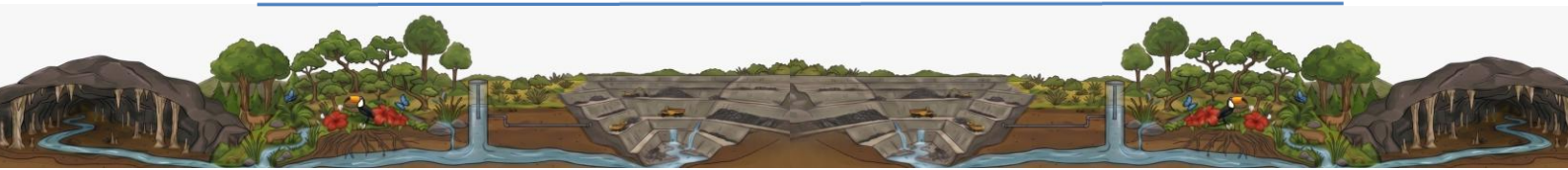
Gregorio Faversani <sup>1</sup>, Gabriel Silveira <sup>2</sup>, Pedro Leite <sup>3</sup>, Arthur Santos <sup>4</sup>, Eduardo Cervi <sup>5</sup>, Nathan Martins <sup>6</sup>, Felipe Costa <sup>7</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [gregorio.faversani@wsp.com](mailto:gregorio.faversani@wsp.com)

## Resumo

A atualização da ABNT NBR 10004:2024 representa uma mudança significativa nos critérios de caracterização e classificação de resíduos no Brasil, especialmente com a incorporação de ensaios geoquímicos alinhados a práticas internacionais. Embora publicada em 2024, sua aplicação obrigatória ocorrerá apenas em 2027, estabelecendo um período de transição que se encerra ao final de 2026. Nesse contexto, observa-se um aumento expressivo na execução de ensaios laboratoriais, impulsionado pela necessidade de adequação normativa por parte de empresas de diversos setores. A nova versão da norma introduz um fluxo decisório estruturado em etapas, no qual a classificação dos resíduos como perigosos ou não perigosos depende da origem, tipologia e resultados analíticos obtidos. Esse processo é organizado em um fluxograma que orienta a execução sequencial das investigações, exigindo a interpretação integrada de múltiplos parâmetros e limites estabelecidos. Diante desse cenário, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta digital voltada à automação do processo de classificação de resíduos conforme a nova norma. A solução integra: Python, para extração, transformação e carga (ETL) de dados laboratoriais; Linguagem R, para processamento, regras lógicas e análises estatísticas; e Shiny, para visualização interativa dos resultados. A ferramenta foi projetada para replicar as regras de decisão definidas pela norma em cada etapa do fluxograma, permitindo a leitura estruturada dos resultados analíticos, sua validação e o enquadramento automático dos resíduos em categorias preliminares ao longo do processo. Ao final, o sistema consolida as informações e fornece a classificação final do resíduo. Os resultados demonstram que a automação reduz em cerca de 80% o tempo de trabalho, enquanto a padronização do fluxo analítico minimiza erros e aumenta a rastreabilidade das decisões. Em um contexto de alta demanda e prazos regulatórios restritos, a ferramenta se apresenta como uma solução eficiente para apoiar empresas na adequação à norma para diversos resíduos, ainda no período de transição.

**Palavras-chave:** resíduos, caracterização geoquímica, norma brasileira, automação, Python.



# Modelagem Hidrogeotécnica para Avaliação de Sistema de Mitigação por Bombeamento e Injeção em Barragens

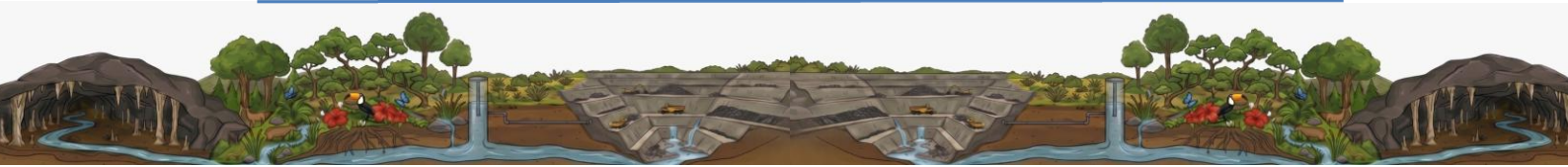
Debora Barbosa <sup>1</sup>, João Ribeiro <sup>2</sup>, Felipe Costa <sup>3</sup>, Kamylla Silva <sup>4</sup>

<sup>1</sup> WSP. Autor correspondente: [debora.barbosa@wsp.com](mailto:debora.barbosa@wsp.com).

## Resumo

A presença de contaminantes em barragens associadas à disposição de rejeitos demanda soluções de mitigação/remediação que conciliem eficiência hidráulica e segurança geotécnica. Sistemas de bombeamento e injeção são amplamente utilizados para o controle e a contenção de plumas contaminantes, sendo seu desempenho dependente da compreensão integrada do fluxo subterrâneo e do comportamento do maciço. Nesse contexto, a modelagem hidrogeotécnica constitui uma importante ferramenta para avaliação e otimização dessas estratégias. Este trabalho apresenta a aplicação de modelagem hidrogeotécnica na avaliação de sistemas de mitigação por bombeamento e injeção em duas barragens próximas (1 e 2), com foco na análise do comportamento hidráulico e na eficiência de captura da pluma. Os resultados demonstram que os modelos conceitual e numérico representam de forma consistente o sistema aquífero, apesar das limitações inerentes à modelagem em meio fraturado. A simulação do desligamento dos poços evidenciou a relevância dos sistemas de remediação existentes, ainda que com limitações na interceptação do fluxo. Na Barragem 1, a proximidade com um rio de grande porte, associada à presença de uma camada de cascalho de alta condutividade hidráulica, condiciona fortemente o regime de fluxo. As variações no nível do rio influenciam a carga hidráulica e a eficiência do bombeamento. Embora os poços sejam efetivos na interceptação do fluxo, a taxa de injeção atual é insuficiente para promover a inversão do gradiente, sendo necessário o aumento da capacidade de injeção para melhoria do desempenho do sistema. Na Barragem 2, as simulações indicam tendência de migração de massa dissolvida para jusante, com possível extrapolação dos limites do empreendimento em horizonte aproximado de dez anos, em concordância com evidências de campo. A ausência de dados hidrogeológicos recentes a jusante representa uma limitação relevante. Recomenda-se o aprofundamento da caracterização geológica, estrutural e hidrogeológica, com ênfase na conectividade e persistência das fraturas que controlam o fluxo, aprimorando a representação do meio fraturado e melhorando o desempenho preditivo do modelo. A inserção de poços de bombeamento adicionais no modelo permitiu avaliar um cenário de maior contenção hidráulica, porém, a elevada heterogeneidade do aquífero fraturado reduz a viabilidade de replicação em campo. Como alternativa, a implantação de uma nova caixa de contenção a jusante se mostra mais robusta e coerente com o padrão de fluxo identificado. Apesar das limitações de dados, da variabilidade hidrogeológica e das incertezas inerentes à modelagem, os modelos apresentaram desempenho satisfatório para subsidiar a tomada de decisões, permitindo a identificação de áreas prioritárias para investigação e monitoramento, bem como a definição de direções preferenciais de fluxo, tempos de trânsito e potenciais zonas de chegada a jusante.

**Palavras-chave:** modelagem numérica; barragens; fluxo de contaminantes; mitigação; aquífero.



# Rebaixamento do Nível D'água e Gestão de Recursos Hídricos em Mineração de Ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG)

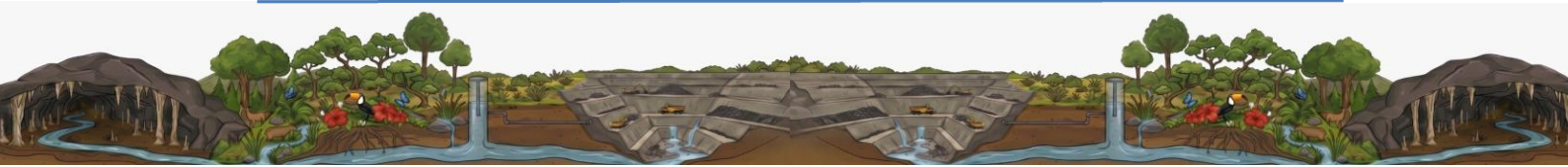
Alvaro Costa Figueiredo <sup>1</sup>, Gustavo Mendes Soares Mota <sup>2</sup>, Daniela Cristina Costa Da Silva <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Companhia Siderurgia Nacional – CSN. Autor correspondente: [alvaro.figueiredo@csn.com.br](mailto:alvaro.figueiredo@csn.com.br)

## Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre o sistema de rebaixamento e a gestão das águas subterrâneas na mina Casa de Pedra, localizada no município de Congonhas/MG, de propriedade da CSN Mineração, inserida no contexto hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. Essa região destaca-se não apenas pela expressiva produção de minério de ferro, mas também por abrigar importantes reservas de água subterrânea, fundamentais para o abastecimento das cidades e comunidades do entorno. Diante dessa importância e do potencial considerável de geração de impactos sobre os recursos hídricos, torna-se necessário o monitoramento contínuo e a implementação de ações mitigadoras. O sistema de rebaixamento em operação desde 1992, iniciou-se com dois poços, com vazão média de 100 m<sup>3</sup>/h, sendo posteriormente expandido conforme o avanço da lavra, sempre visando à eficiência operacional e à manutenção da disponibilidade hídrica nas sub-bacias adjacentes. Neste contexto, o monitoramento hidrogeológico entra como a principal ferramenta de controle e identificação dos possíveis impactos gerados pelo rebaixamento. Desde 1990 já foram instalados 216 instrumentos de medição de nível d'água (Piezômetros e INA's) e 61 pontos de medição fluviométricos (vertedouros, calhas parshall e calhas H) para monitoramento de nível e vazão dos cursos d'água. Atualmente a CSN tem pontos de vazão espalhados por todos os córregos do entorno ao empreendimento, garantindo assim o monitoramento semanal das vazões de descarga do aquífero. Adicionalmente, são realizados inventários bianuais de nascentes em 20 sub-bacias inseridas na área do empreendimento, contemplando a avaliação de parâmetros físico-químicos, vazão e condições locais. Os resultados indicam que, das 20 sub-bacias monitoradas, apenas cinco apresentaram redução de vazão associada ao rebaixamento do nível d'água, com intensificação no período de 2016 a 2017, em decorrência de condições de recessão hídrica no sudeste do Brasil nos anos de 2014 a 2017. Como medida mitigadora, foi implementado, a partir de 2016, um sistema de reposição hídrica nos cursos d'água afetados. Atualmente, observa-se que as vazões dos córregos impactados são iguais ou superiores às condições pré-rebaixamento, sendo realizada a reposição média mensal de aproximadamente 157 mil m<sup>3</sup> de água. Os resultados evidenciam a eficácia das estratégias adotadas e reforçam a importância de redes de monitoramento bem estruturadas para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos em áreas de mineração, permitindo a identificação, o controle e a mitigação de impactos sem prejuízo aos demais usuários das bacias hidrográficas.

**Palavras-chave:** rebaixamento, monitoramento, mineração, sustentabilidade, água.



# Hydrological Response of the Umbeluzi River Basin to Different Land use and Land Cover Scenarios Using the Swat Model

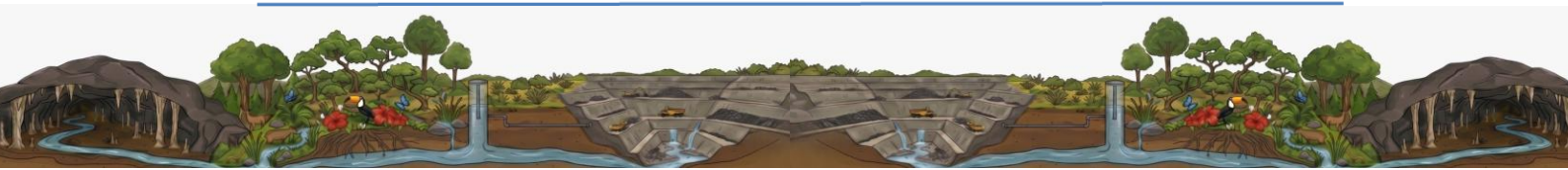
Samuel José Marquês Timano <sup>1</sup>, José Luísa João Chaora <sup>2</sup>, Michael Silveira Thebaldi <sup>3</sup>, Elton Francisco Amadeus <sup>4</sup>, Adérito Celestino Cau <sup>5</sup>, Mateus Pimentel de Matos <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Federal University of Lavras; <sup>5</sup> Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine  
Corresponding author: [samuel.timano1@estudante.ufla.br](mailto:samuel.timano1@estudante.ufla.br)

## Abstract

Changes in land use and land cover significantly influence the hydrological response of river basins, impacting water availability, runoff patterns, and the occurrence of extreme hydrological events. In this context, hydrological models such as SWAT are widely used to simulate hydrological processes and evaluate the effects of different land-use scenarios on water resources. This study assessed the impact of various land use and land cover scenarios on water availability in the Umbeluzi River basin, Mozambique, using the SWAT hydrological model integrated with topographic, pedological and climatic historical data (1994–2023), and land use data within a GIS environment. The basin was divided into 27 sub-basins and 506 Hydrological Response Units (HRUs). Sensitivity analysis using the SUFI-2 method identified CN2, SOL\_AWC, ESCO, and ALPHA\_BF as the most influential variables. Calibration (1997–2017) and validation (2018–2023) had adequate performance ( $NSE > 0.74$ ;  $R^2 > 0.78$ ;  $PBIAS \approx 13\%$ ). Three future scenarios were simulated: urban expansion (+20% impervious area), agricultural intensification (+30% cultivated area), and reforestation (+25% vegetation cover), compared to current conditions. Results showed urbanization increased peak flows by up to 22% and lowered Q95 to 1.55 m<sup>3</sup>/s, raising vulnerability to floods and water shortages. Agricultural intensification increased peak flows by 10% and reduced Q95 to 1.68 m<sup>3</sup>/s and indicated greater flow seasonal variability. Reforestation decreased peak flows by up to 18% and increased Q95 to 1.95 m<sup>3</sup>/s, enhancing flow regulation. These findings suggest that restoration efforts and sustainable land management improve hydrological resilience, while urban expansion and intensive agriculture compromise regional water security. The study underscores SWAT's usefulness as a tool for supporting integrated management of tropical watersheds under anthropogenic pressure.

**Keywords:** water resources management; water availability; hydrological modeling.



# Assessment of Groundwater Corrosivity in Tacaratu City Pernambuco State, Brazil

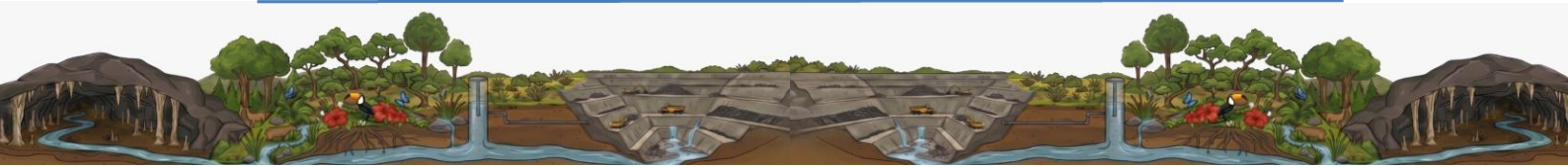
Samuel José Marquês Timano <sup>1</sup>, José Luísa João Chaora <sup>2</sup>, Jone Chaicuinda Sumbulero <sup>3</sup>, Michael Silveira Thebaldi <sup>4</sup>, Luiz António Lima <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Lavras. Corresponding author: [samuel.timano1@estudante.ufla.br](mailto:samuel.timano1@estudante.ufla.br)

## Abstract

Groundwater quality plays a fundamental role in water supply security and on the hydraulic infrastructure's lifespan, particularly in semi-arid regions where groundwater is often the primary water source. In this context, hydrochemical indices are widely used to assess the corrosive or scaling potential of groundwater and support water resources management strategies. This study evaluated the corrosive potential of groundwater in Tacaratu city, Pernambuco State, Brazil, using classical hydrochemical indices integrated with spatial analysis in a GIS environment. Twenty groundwater samples collected from tubular wells were analyzed according to the ABNT Standard NBR 9898:2022 procedures, considering physicochemical variable including pH, alkalinity, hardness, chlorides ( $\text{Cl}^-$ ), sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), temperature, and total dissolved solids (TDS). Corrosivity was assessed using the Larson-Skold Index (LS), Langelier Saturation Index (LSI), and Ryznar Stability Index (RSI). Results indicated a predominance of corrosive groundwater, with LS values ranging from 0.48 to 15.17, LSI varying between -5.39 and 0.26, and RSI ranging from 7.79 to 25.22, indicating high chemical aggressiveness, particularly in areas associated with sandstone, phyllite, and shale lithologies characterized by low alkalinity and elevated concentrations of aggressive ions. Spatial interpolation using ordinary kriging in QGIS 3.36 identified critical zones with higher corrosion risk. The findings indicate that geological characteristics strongly influence groundwater hydrochemistry and highlight the importance of preventive management strategies, including material selection and chemical treatment, to ensure infrastructure durability and sustainable groundwater use in semi-arid environments. This study also demonstrates the applicability of hydrochemical indices integrated with GIS as an effective tool to support groundwater quality management under geochemical constraints.

**Keywords:** groundwater quality; corrosion indices; hydrochemistry; GIS; water resources management.



# Geocomputação aplicada à análise espaço-temporal do Índice de Umidade de Thornthwaite na Província de Gaza, Moçambique

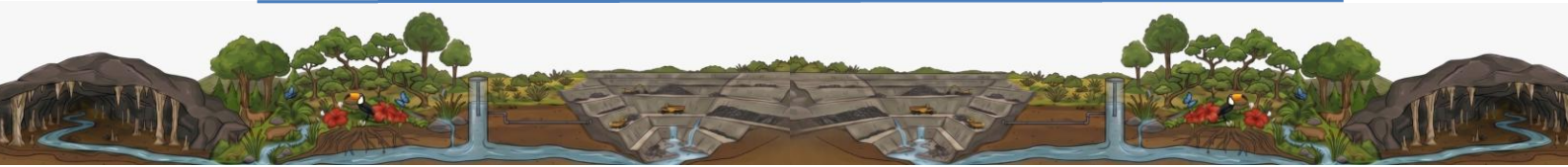
Adérito Celestino Cau <sup>1</sup>, Marcelo de Carvalho Alves <sup>2</sup>, Felipe Schwerz <sup>3</sup>, Neima Arlindo Munave <sup>4</sup>, Samuel José Marquês Timano <sup>5</sup>, Joaquina da Márcia Jaime Muchico <sup>6</sup>, Severino José Macôo <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Lavras; <sup>4</sup> Universidade Eduardo Mondlane. Autor correspondente:  
[aderito.caul@estudante.ufla.br](mailto:aderito.caul@estudante.ufla.br)

## Resumo

As mudanças climáticas impõem desafios crescentes ao planejamento e ao desenvolvimento sustentável, sendo essencial compreender seus impactos sobre as zonas climáticas. A delimitação climática fornece indicadores do potencial do ambiente físico e subsidia a gestão adequada dos recursos naturais, especialmente em regiões vulneráveis como a Província de Gaza, sul de Moçambique. Nesse contexto, a classificação climática permite identificar áreas com características homogêneas, fundamentais para a definição de estratégias territoriais. Este estudo aplica técnicas de geocomputação para mapear e analisar a evolução do Índice de Umidade (Im) de Thornthwaite, comparando o período histórico (1970-2000) com projeções futuras (2021-2040, 2041-2060, 2081-2100) do modelo CMIP6 ACCESS-CM2 no cenário intermediário SSP2-4.5. Utilizando a linguagem R e os pacotes *terra*, *geodata*, *SPEI*, *sf* e *ggplot2* foram processados dados climáticos de precipitação pluvial anual (mm) e temperatura média do ar anual (°C), na resolução espacial 2,5 arc-min, para calcular a evapotranspiração potencial (PET) e o balanço hídrico climatológico com capacidade de armazenamento de água no solo de 100 mm. A partir do Im, o território foi classificado em sete categorias, desde Árido até Superúmido. No período histórico, predominaram as classes Subúmido úmido (45,3% da área) e Subúmido seco (33,6%). Nos cenários de simulações futuras, observaram-se um aumento da classe Subúmido úmido em 2041-2060 (48,1%), seguido de redução para 42,0% em 2081-2100, com o surgimento de áreas Superhúmidas (até 1,2%) e pequenas manchas Semiáridas (0,2%). As classes Úmido e Superúmido também apresentam variações espaciais, refletindo a complexidade das mudanças na disponibilidade hídrica. A abordagem geocomputacional mostrou-se eficaz para integrar múltiplos cenários, automatizar o processamento e gerar produtos cartográficos padronizados, contribuindo para a tomada de decisão em adaptação climática e gestão de recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Geocomputação; Índice de Umidade de Thornthwaite; CMIP6; Província de Gaza; balanço hídrico.



## Detecção de Fluorescência Sob Exposição Solar

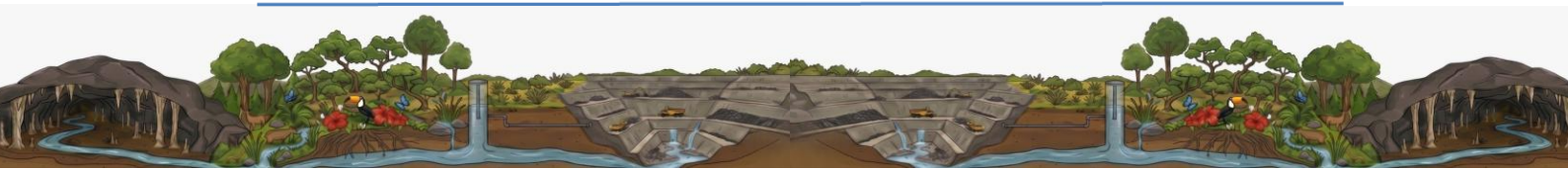
Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>1</sup>, Gabriel Coelho Diniz Lopes de Sousa <sup>2</sup>, Letícia Pereira dos Santos Monteiro <sup>3</sup>, Luiza Monteiro Espíndola <sup>4</sup>, Rafael Fernando Marinho Quintão <sup>5</sup>, Vitória Gomes Macêdo <sup>6</sup>, Paulo Henrique Ferreira Galvão <sup>7</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [anamarianascgs@gmail.com](mailto:anamarianascgs@gmail.com)

### Resumo

O uso de traçadores corantes é um dos principais métodos utilizados para a investigação do fluxo de água subterrânea, e é aplicado em um amplo contexto de sistemas hidrogeológicos. O Tinopal CBS-X é um dos corantes licenciados para rastreamento de águas devido à sua baixa toxicidade e à sua característica translúcida, conveniente quando a coloração visível de um curso d'água deve ser evitado. O presente estudo busca estudar o comportamento de degradação do Tinopal CBS-X quando exposto à luz solar, visando quantificar essa degradação sob uma condição específica de armazenamento. Para a realização do experimento foram preparadas soluções de Tinopal CBS-X de 10, 50 e 100 ppb que posteriormente foram armazenadas em garrafas de plástico translúcido de 500 ml e mantidas sob exposição da luz solar. Para a análise das concentrações, foi utilizado um cronograma de 24, 48, 72 e 240 horas de amostragem após a primeira exposição. Os resultados foram aferidos com um equipamento fluorímetro calibrado para detectar concentrações entre 1 e 100 ppb do traçador em questão. Os resultados indicam uma degradação total na concentração de Tinopal CBS-X de 94,90% (10 ppb), 94,34% (50 ppb) e 87,87% (100 ppb), após 240h de exposição. Nota-se o impacto da degradação nas primeiras 24h de exposição, onde é verificado uma perda de 30 a 50% da massa inicial de traçador. A amostra de 10 ppb perdeu cerca de 52,1% da massa inicial enquanto as amostras de 50 e 100 ppb perderam cerca de 30%. O estudo evidencia o caráter não conservativo do Tinopal CBS-X quando exposto à luz solar, com resultados mais consideráveis associados a baixas concentrações iniciais do traçador. Ademais, o tipo de armazenagem também pode estar relacionado às perdas nas concentrações, haja vista que o plástico translúcido ainda permite a passagem da luz e pode causar algum aumento na degradação total. Para resultados mais robustos com relação a este último, recomenda-se estudos e experimentos complementares.

**Palavras-chave:** Traçadores Corantes, Degradação, Tinopal CBS-X; Hidrogeologia.



# Simulado Externo Prático Executado no Contexto do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração

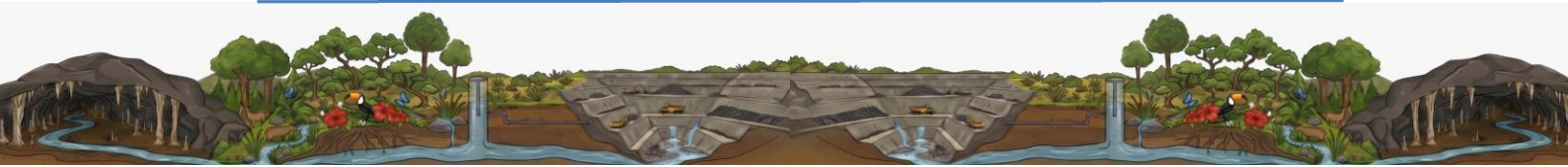
Bárbara Alves Bastos <sup>1</sup>, Alana Luiza Gonçalves Ferreira <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG); <sup>2</sup> Vale S.A. Autor correspondente: [Barbaraalves34@gmail.com](mailto:Barbaraalves34@gmail.com)

## Resumo

A realização de simulado externo prático do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) constitui um instrumento essencial para a verificação da efetividade dos procedimentos de gestão de emergência e para o fortalecimento da capacidade de resposta das comunidades potencialmente afetadas. Essa atividade integra o conjunto de ações preventivas previstas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e nas diretrizes estabelecidas pela Agência Nacional de Mineração (ANM), desempenhando papel estratégico na mitigação de impactos socioambientais e no atendimento às exigências regulatórias vigentes. O simulado externo prático tem como objetivo principal testar, em condições controladas, os fluxos operacionais estabelecidos no PAEBM, incluindo os mecanismos de comunicação, o acionamento dos sistemas de alerta e alarme, a atuação das equipes internas e externas envolvidas e a execução das ações de autoproteção pela população localizada nas áreas potencialmente impactadas. Durante a execução do simulado, são operacionalizados os cenários de emergência previamente definidos a partir dos estudos técnicos, em especial os mapas de inundação, bem como os procedimentos relacionados aos níveis de emergência, à responsabilização institucional e às rotas de fuga estabelecidas. A participação da comunidade permite verificar o grau de compreensão das orientações repassadas, a clareza das mensagens de alerta, a efetividade dos sistemas sonoros e a adequação das áreas seguras previstas, possibilitando a identificação de fragilidades operacionais e oportunidades de aprimoramento dos instrumentos de gestão. Sob a perspectiva regulatória, a realização de simulado externo prático atende aos requisitos avaliados no âmbito da Avaliação de Conformidade e Operacionalidade (ACO), sobretudo no que se refere à validação da aplicabilidade do PAEBM e à capacitação dos agentes envolvidos. Os registros obtidos contribuem para a melhoria contínua da segurança da barragem e para a consolidação de evidências de conformidade perante o órgão regulador. Adicionalmente, o simulado fortalece a integração entre o empreendedor, os órgãos de proteção e defesa civil, as autoridades locais e a comunidade. Dessa forma, a realização de simulados externos práticos do PAEBM configura-se como uma prática indispensável no contexto da gestão de riscos associados às barragens de mineração, contribuindo para o aumento da resiliência dos territórios, para a redução da vulnerabilidade das populações potencialmente afetadas e para o aprimoramento contínuo dos sistemas de prevenção e resposta a emergências.

**Palavras-chave:** Simulado externo prático; PAEBM; segurança de barragens; gestão de emergências; autoproteção comunitária.



# Operação de Bombeamento para Controle Ambiental da Contaminação: Estudo de Caso do Controle de Plumas de Inorgânicos

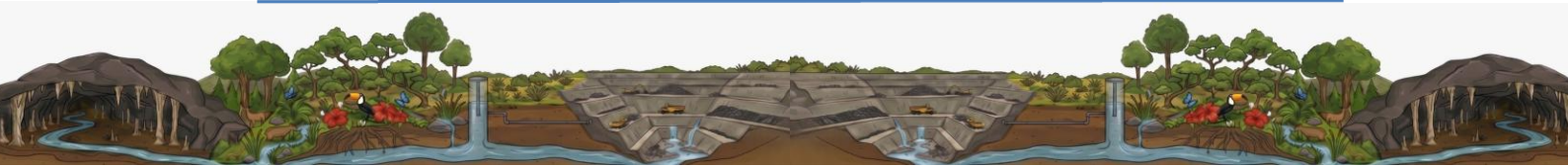
Ana Fumian <sup>1</sup>, João Ribeiro <sup>2</sup>, Kamylla Silva <sup>3</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [ana.fumian@wsp.com](mailto:ana.fumian@wsp.com).

## Resumo

Os sistemas de remediação ambiental são essenciais para o controle, mitigação e recuperação de áreas contaminadas, especialmente onde há risco de propagação de contaminantes no meio subterrâneo. No setor de mineração, esses riscos estão geralmente ligados a estruturas de disposição de resíduos e rejeitos, que podem atuar como fontes de contaminação ao solo e migrar para os aquíferos, sendo transportados pelo meio subterrâneo. Dentre as tecnologias de remediação existentes para aplicação em unidades aquíferas, destacam-se sistemas de bombeamento, como por exemplo: Pump & Treat, barreiras hidráulicas e hidrocortinas, cuja eficiência depende diretamente do monitoramento contínuo e da adequada gestão operacional. Nesse sentido, o acompanhamento sistemático dessas estruturas torna-se indispensável para assegurar seu desempenho e a efetividade das ações de remediação. O presente trabalho objetiva apresentar a sistematização de dados e informações hidrogeológicas, aliada a um calendário de visitas técnicas mensais a sistemas de mitigação, com vistas à identificação das condições operacionais de bombas, detecção de falhas elétricas e otimização de resultados, utilizando a ferramenta Power BI como visualizador e integrador dos dados coletados. A compilação dos dados obtidos de campo refletem em resultados que demonstram que a integração entre dados hidrogeológicos, inspeções de instrumentos de medida, bombas e aplicação de uso de ferramentas de análise de dados possibilita maior controle sobre o desempenho do sistema de bombeamento, permitindo não apenas a identificação antecipada de desvios operacionais, mas também o acompanhamento do avanço de plumas de contaminação existentes na área, como o aprimoramento do entendimento das condições de fluxos da água subterrânea. Essa abordagem possibilita a consolidação de informações relevantes para a gestão dos sistemas, a partir da análise de dados de volume de bombeamento, níveis d'água subterrânea (NA) medidos em piezômetros e poços de monitoramento, bem como controle de vazões de bombeamento realizadas pelo sistema. Dessa forma, tal integração permite alcançar elevado grau de controle e conhecimento sobre a operação dos sistemas de remediação, promovendo maior eficiência na contenção e no gerenciamento de contaminantes inorgânicos.

**Palavras-chave:** sistema de remediação; gerenciamento de áreas contaminadas; hidrogeologia; contaminantes inorgânicos; mineração.



# Vulnerabilidade de Aquíferos em Biomas Brasileiros Sob Influência Climática e Antrópica

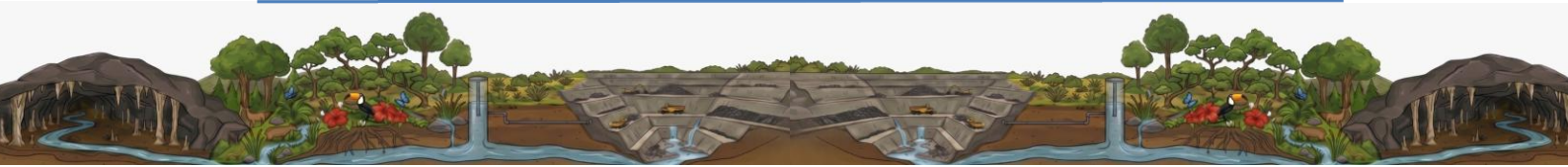
Izadora Barroso Santos <sup>1</sup>, Ana Luisa Quintanilha Candido <sup>2</sup>, Victor Rezende Moreira <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Autor correspondente: [izadorabarroso@ufmg.br](mailto:izadorabarroso@ufmg.br)

## Resumo

A crescente intensificação das mudanças climáticas e das transformações no uso e cobertura do solo tem ampliado as pressões sobre os recursos hídricos, especialmente em regiões onde as águas subterrâneas desempenham papel estratégico no abastecimento. Este estudo investigou a vulnerabilidade das águas subterrâneas em três biomas brasileiros, Cerrado, Mata Atlântica e Caatinga, a partir da integração de indicadores hidroclimáticos, hidrogeoquímicos e de uso do solo, considerando a importância dos aquíferos como reservas essenciais para a segurança hídrica. Os diferentes tipos de aquíferos, granulares, fraturados e cársticos, apresentam respostas distintas às variações climáticas, sendo fortemente influenciados por eventos extremos, como estiagens prolongadas e chuvas intensas, que modulam os processos de recarga, diluição e concentração de solutos. Nesse sentido, a análise de tendência dos sólidos totais dissolvidos (STD), por meio do teste de Mann Kendall, revelou padrões distintos e não uniformes entre os biomas. Na Caatinga, observaram-se indícios de intensificação da concentração iônica associados à evapoconcentração em um cenário de baixa renovação hídrica e elevada evapotranspiração (superior a 2000 mm/ano). Esse processo favorece o aumento da salinidade e a mobilização de elementos como o arsênio, especialmente em áreas com predominância de pastagens. No Cerrado, as tendências indicaram aumento da mineralização, com valores de tau de Kendall ( $\tau$ ) superiores a 0,70, associados ao incremento de cálcio, magnésio e sulfato. Esse comportamento reflete a intensificação da atividade agropecuária e a lixiviação de fertilizantes e corretivos do solo em aquíferos de elevada permeabilidade. Por outro lado, áreas com maior estabilidade da cobertura vegetal apresentaram redução dos STD ( $\tau = -0,75$ ) e do sódio ( $\tau = -0,53$ ), indicando menor aporte de solutos. Na Mata Atlântica, os resultados indicaram maior estabilidade hidrogeoquímica, com valores negativos de STD ( $\tau$  entre -0,41 e -0,62), além da redução de metais como ferro ( $\tau = -0,58$ ) e arsênio ( $\tau = -0,71$ ). Esses padrões ocorrem mesmo diante do avanço da urbanização (de 1,77% para 5,02%) e da mineração (até 11,2%), sugerindo que processos de autodepuração e controle de fontes podem estar compensando parte das pressões antrópicas. De forma geral, os resultados sugerem que a vulnerabilidade das águas subterrâneas não ocorre de maneira homogênea, sendo definida por mecanismos específicos em cada bioma. Assim, as estratégias de gestão devem considerar essas particularidades, como o controle da lixiviação de insumos agrícolas no Cerrado, a mitigação dos processos de salinização na Caatinga e a proteção das zonas de recarga frente à urbanização na Mata Atlântica, a fim de garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos.

**Palavras-chave:** Mudanças Climáticas; Segurança Hídrica; Águas Subterrâneas; Hidrogeoquímica; Uso do Solo.



## Comportamento da Rodamina WT em Ambiente Controlado

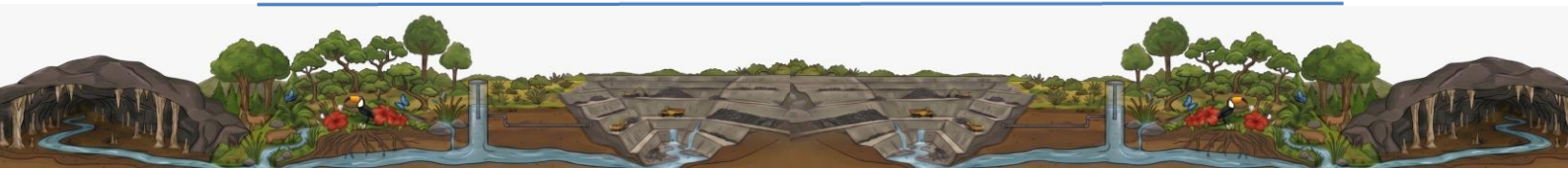
Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>1</sup>, Gabriel Coelho Diniz Lopes de Sousa <sup>2</sup>, Letícia Pereira dos Santos Monteiro <sup>3</sup>, Luiza Monteiro Espíndola <sup>4</sup>, Rafael Fernando Marinho Quintão <sup>5</sup>, Vitória Gomes Macêdo <sup>6</sup>, Paulo Henrique Ferreira Galvão <sup>7</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [anamarianascgs@gmail.com](mailto:anamarianascgs@gmail.com)

### Resumo

A aplicação de traçadores corantes é uma técnica já consolidada dentro do campo da hidrogeologia para estudos envolvendo a investigação e caracterização do fluxo subterrâneo. No entanto, devido à alta reatividade e comportamento dessas substâncias, seu manuseio e aplicação podem, por vezes, serem dificultados. Na literatura disponível, a Rodamina WT é descrita como um dos tipos de traçadores corantes mais utilizados em estudos hidrogeológicos, devido à sua alta estabilidade, não toxicidade e alta detectabilidade, mesmo em baixas concentrações. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a variação dos níveis de concentração de Rodamina WT diluída em água ao se variar o tempo de exposição da substância em um ambiente refrigerado controlado. Com isso, busca-se compreender como o traçador irá degradar ao longo do tempo. Para tanto, foi feito um experimento de laboratório onde foram preparadas três soluções de Rodamina WT a 12, 63 e 112 ppb em água ultrapura e essas foram armazenadas em garrafas de plástico translúcido de 500 ml dentro de um refrigerador à temperatura constante de 5 °C, sem iluminação. A análise dessas amostras foi feita considerando intervalos de 24, 48, 72 e 240 horas após o primeiro armazenamento, utilizando um fluorímetro previamente calibrado com a solução do traçador em questão. As variações verificadas nas concentrações foram: 5 a 15% (112 ppb), 20 a 12% (63 ppb) e 2 a 17% (12 ppb), levando em consideração todo o período de análise. Não foi verificado um padrão nos resultados das amostras, tendo concentrações que variaram tanto para mais quanto para menos a partir da concentração inicial, dentro dos intervalos apresentados. Dessa maneira, pode-se concluir que não houve degradação significativa das soluções de Rodamina WT quando armazenadas sob local refrigerado e sem exposição à luz. As flutuações verificadas podem ser advindas do tempo de leitura no equipamento, já que este necessita de um tempo de estabilização maior para que a leitura possa ser feita com maior precisão. Ademais, o experimento evidencia o caráter estável da Rodamina WT, e indica que a refrigeração e ausência de luz podem ser técnicas eficazes no armazenamento de amostras de traçadores.

**Palavras-chave:** Traçadores Corantes, Degradação, Hidrogeologia.



# Modelagem Numérica Aplicada à Exploração Elevada de Poços em Aquitardos: Barragem de Rejeitos ou Rio Perene como Fontes de Recarga?

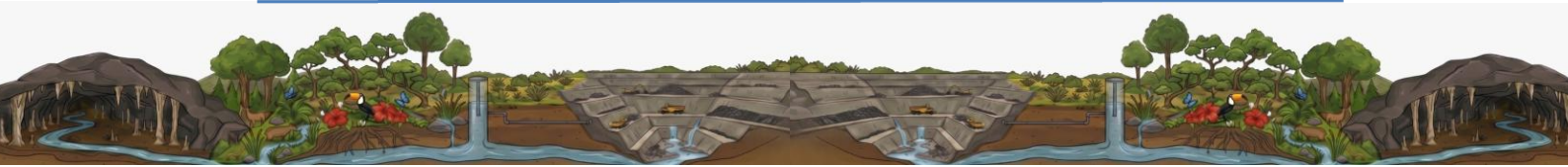
Andreia Resende <sup>1</sup>, Leonardo Machado <sup>2</sup>, Isabella Andrade <sup>3</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [andreia.resende@wsp.com](mailto:andreia.resende@wsp.com)

## Resumo

O presente estudo hidrogeológico tem como objetivo avaliar, por meio de modelagem numérica no FEFLOW, a origem das contribuições hídricas que alimentam três poços tubulares profundos operados pela COPASA no município de Congonhas (MG), destinados ao abastecimento público por captação de água subterrânea. Esses poços estão situados nas proximidades de três barragens de rejeitos já descaracterizadas, localizadas na margem oposta do rio Maranhão. De acordo com informações do processo de outorga disponíveis no Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM), o sistema de abastecimento municipal contava, em 2007, com 33 poços tubulares (23 em operação e 10 desativados), além de cinco mananciais superficiais. Posteriormente, a operação foi racionalizada, sendo mantidos em funcionamento contínuo apenas três poços (C-01, C-02 e C-03), que permanecem atualmente ativos e responsáveis pelo suprimento hídrico do município. Do ponto de vista geológico, os poços encontram-se alocados em xistos do Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas), caracterizada como uma unidade de baixa condutividade hidráulica, e que, portanto, atuam como aquitardos, cuja capacidade de armazenamento e transmissão de água é, em condições naturais, limitada. Entretanto, as elevadas vazões exploradas indicam um comportamento hidráulico que não é compatível, de forma isolada, com as propriedades típicas dessa unidade, sugerindo a atuação de mecanismos adicionais de recarga e/ou a presença de heterogeneidades estruturais que favorecem o fluxo, uma vez que localmente, a região está sob o domínio de importantes falhas e lineamentos estruturais. Nesse contexto, foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional de fluxo subterrâneo, utilizando o software FEFLOW, sendo um dos objetivos a investigação das fontes de contribuição hídrica aos poços e a dinâmica de escoamento no sistema aquífero-aquitardo. Os poços foram representados no modelo com *descreate features* e, para os dados históricos de níveis d'água, incorporou-se a série de dados de bombeamento disponibilizados no site do SIAM. Também foi incorporado ao modelo, as principais feições hidrogeológicas da área de estudo, que incluem um curso d'água perene adjacente aos poços e, na margem oposta, uma barragem de rejeitos de minério de ferro. Os resultados da modelagem indicam que o bombeamento contínuo dos poços promove a indução de fluxo a partir do rio adjacente, configurando um processo de recarga induzida rio-aquífero, o qual sustenta parte significativa das vazões exploradas. Esse comportamento evidencia uma forte conexão hidráulica entre o sistema superficial e o meio subterrâneo, mesmo em um contexto dominado por materiais de baixa permeabilidade.

**Palavras-chave:** Poços; barragem de rejeitos; aquitardos; modelo numérico; fluxo.



# Modelagem Numérica e Sistemas de Contenção de Fluxos Contaminados em Barragem de Rejeitos em Região de Clima Desértico

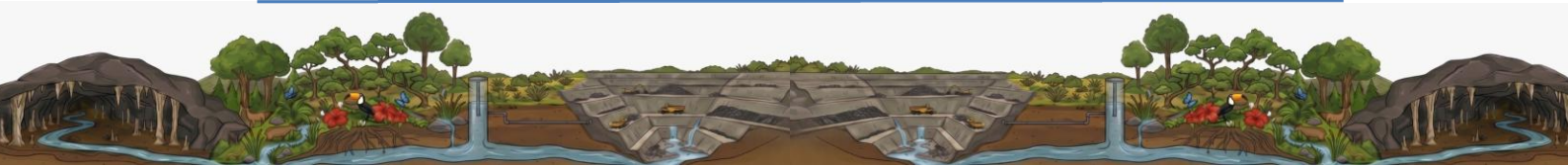
Anne Carneiro da Costa Brumatti <sup>1</sup>; Felipe André Ferreira Costa <sup>2</sup>, Isabella Brito Andrade <sup>3</sup>, Leonardo Machado <sup>4</sup>, Andreia Lais Pereira Resende <sup>5</sup>, Debora Maria Diniz Barbosa <sup>6</sup>, LÍlian Trindade Hubner <sup>7</sup>, Adrieli Thalia Pereira <sup>8</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [anne.brumatti@wsp.com](mailto:anne.brumatti@wsp.com)

## Resumo

O objetivo do estudo foi avaliar o comportamento hidrogeológico de uma barragem de rejeitos localizada em uma região de clima árido, com ênfase na calibração de um modelo numérico no qual a estrutura não foi explicitamente representada na malha, sendo simulada por meio de condições de contorno. A área de estudo está localizada no município de Tierra Amarilla, no Deserto do Atacama, Chile, numa região caracterizada por baixa recarga e relevo com altitudes entre 700 m e 1.100 m. A barragem de rejeitos, objeto de estudo, consiste em três muros de contenção (Norte, Principal e Sul), um sistema de transporte e distribuição de rejeitos (TDS), um sistema de coleta e recirculação de água limpa (RWS) e um sistema de recuperação de infiltração (SRI). O SRI, principal sistema de coleta de água que infiltra pela barragem, é composto por um muro de drenagem com aproximadamente 30 m de profundidade e 1 m de espessura. A estrutura é de extrema importância para contenção do fluxo contaminado proveniente barragem, antes que este seja capturado pelo raio de rebaixamento da cava, evitando a mistura e mantendo uma boa gestão de águas na unidade. O sistema, que apresenta alta eficiência, é responsável por coletar vazões da ordem de 300 L/s. A modelagem foi realizada no software FEFLOW® 7.10, com representação dos drenos basais e do SRI por condições de primeiro tipo, enquanto a barragem foi simulada como condição de terceiro tipo, com o auxílio do parâmetro de taxa de transferência interna (*in-transfer rate*). O projeto compreendeu duas etapas de calibração, seguidas por uma etapa final de simulação. Os resultados, tanto nos níveis de água, como nas vazões, evidenciaram o aumento progressivo das cargas hidráulicas na região da barragem, como resultado do aumento da elevação da lagoa, enquanto o SRI apresentou comportamento relativamente estável, uma vez que compreende uma região de alto controle do fluxo. Foram geradas duas simulações de fluxo para a operação contínua da estrutura (2025 a 2041), considerando duas lagoas com volumes diferentes: 300.000 m<sup>3</sup> (cenário base) e 700.000 m<sup>3</sup> (análise de sensibilidade). Em ambos os casos, os resultados indicam aumento contínuo das vazões de saída, um comportamento diretamente relacionado à expansão da estrutura e ao aumento dos níveis tanto da água da lagoa quanto dos rejeitos descarregados. Comparativamente, os fluxos captados pelo dreno basal e pelo SRI aumentam em 17% e 13%, respectivamente, no cenário de maior volume.

**Palavras-chave:** Modelagem numérica, condições de contorno, barragem de rejeitos, contenção de fluxos, clima desértico.



# Aplicativos Interativos em R para Calibração de Modelos FEFLOW em Regime Permanente e Transiente

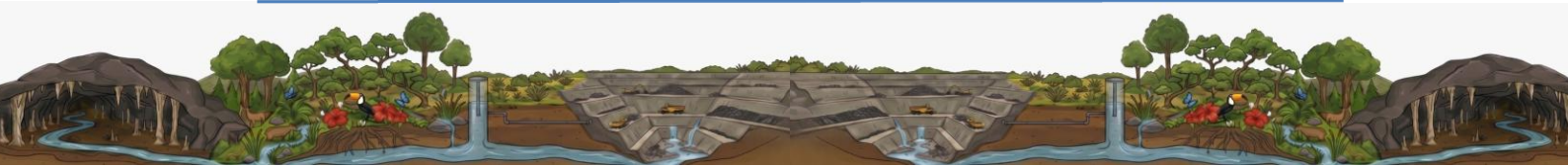
Arthur Santos <sup>1</sup>, Leonardo Machado <sup>2</sup>, Pedro Henrique Leite <sup>3</sup>, Felipe André Costa <sup>4</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [arthur.santos@wsp.com](mailto:arthur.santos@wsp.com).

## Resumo

O Aplicativo de Análise em Permanente e o Aplicativo de Análise em Transiente são ferramentas web interativas desenvolvidas em R com o framework Shiny, voltadas ao suporte à calibração de modelos numéricos de fluxo subterrâneo gerados no software FEFLOW. Construídos com bibliotecas como hydroGOF, plotly, leaflet, sf e ggplot2, os aplicativos são acessados diretamente pelo navegador, sem necessidade de instalação local, e foram projetados para tornar o processo de calibração mais ágil, visual e intuitivo. O Aplicativo de Análise em Permanente permite importar os arquivos de saída do FEFLOW, comparar cargas hidráulicas observadas e calculadas por grupos hidrogeológicos, visualizar gráficos de dispersão, heatmaps de resíduos e mapas interativos, com opção de exclusão individual de pontos da análise. O Aplicativo de Análise em Transiente amplia esse escopo para modelos transientes, oferecendo o acompanhamento temporal de múltiplos cenários de simulação, o cômputo automático de métricas de ajuste como NRMS, NSE, PBIAS,  $R^2$ , MAE e RMSE, mapas de rebaixamento animados e classificação do desempenho de calibração por ponto de observação. Ambas as ferramentas priorizam a facilidade de uso e a eficiência operacional: as interfaces são organizadas em abas temáticas, os parâmetros são configuráveis diretamente na tela e todos os resultados — gráficos, tabelas e relatórios — podem ser baixados individualmente ou em lote no formato ZIP, incluindo imagens PNG de alta resolução compostas por scatter plots, mapas de resíduos e tabelas de estatísticas em um único layout. Essa abordagem reduz significativamente o tempo gasto em pós-processamento manual, centraliza as análises em um único ambiente e facilita o compartilhamento de resultados entre equipes, representando um ganho concreto de produtividade no fluxo de trabalho de modelagem hidrogeológica.

**Palavras-chave:** FEFLOW; calibração de modelos hidrogeológicos; regime permanente; regime transiente; R Shiny.



# Comparação das Concentrações de Poluentes Atmosféricos em Dias Normais e Durante Ondas de Calor em Belo Horizonte-MG, Brasil

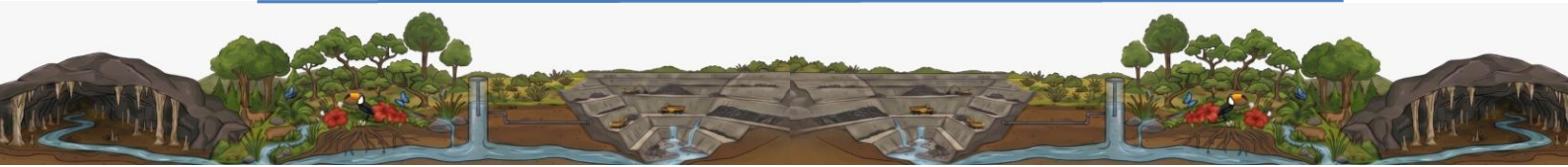
Larissa Lorryne Ferreira Martins <sup>1</sup>, Ana Elis Moraes de Almeida <sup>2</sup>, Marina Muniz de Queiroz <sup>3</sup>, Artur Assreuy Diniz <sup>4</sup>, Jaielle Rodrigues Nascimento <sup>5</sup>, Fernanda Ribeiro Menezes <sup>6</sup>, Silvia Maria A. C. Oliveira <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [larissafferreira\\_martins@hotmail.com](mailto:larissafferreira_martins@hotmail.com)

## Resumo

Períodos prolongados de calor extremo são reconhecidos por aumentar os riscos à saúde, uma vez que favorecem o acúmulo de estresse térmico no organismo, elevando a probabilidade de desfechos adversos, como desidratação, exaustão por calor e insolação. Além disso, a persistência de altas temperaturas compromete a recuperação noturna, intensificando os efeitos acumulados ao longo do dia. Neste contexto, este estudo teve como objetivo analisar a concentração de poluentes atmosféricos (PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>, CO) em dias considerados normais e durante episódios de ondas de calor em Belo Horizonte, no período de janeiro de 2019 a outubro de 2024. As ondas de calor foram definidas com base em um critério climatológico, considerando dias em que a temperatura máxima diária exceda em pelo menos 5 °C a normal climatológica mensal por três dias consecutivos. Adicionalmente, foram avaliados os limiares de 4,5 °C e 4 °C em uma análise de sensibilidade, a fim de investigar a influência da definição adotada sobre os resultados. A comparação entre períodos de onda de calor e dias normais foi realizada com base na mediana das concentrações dos poluentes, utilizando o teste de Mann-Whitney. Observou-se aumento estatisticamente significativo ( $p < 0,05$ ) para todos os parâmetros analisados durante os eventos de calor extremo, considerando os três critérios para definição de ondas de calor adotados. O aumento mais expressivo foi identificado para o material particulado grosso (PM<sub>10</sub>), cuja mediana passou de 22,97 µg/m<sup>3</sup> em dias normais para 49,71 µg/m<sup>3</sup> durante as ondas de calor, representando um incremento de 116,38%. De forma semelhante, a mediana do ozônio (O<sub>3</sub>) aumentou 83,7% (de 32,85 para 60,37 µg/m<sup>3</sup>), evidenciando a influência da radiação solar e das altas temperaturas na formação secundária desse poluente. Os resultados obtidos são consistentes com a literatura, que aponta o calor extremo como um fator que intensifica processos como a ressuspensão de partículas, reações fotoquímicas e a estagnação atmosférica, contribuindo para o acúmulo de poluentes na atmosfera.

**Palavras-chave:** qualidade do ar; ondas de calor; poluição urbana; material particulado; ozônio.



# Assinaturas Hidrogeoquímicas de Águas Internas e Externas em Caverna Ferrífera de Carajás (PA): Implicações da Infiltração

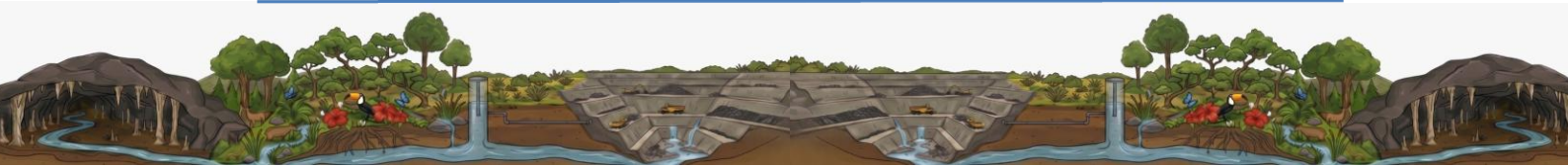
Bárbara Luiza Alves Colen <sup>1</sup>, Andréia Carvalho Marotta <sup>2</sup>, Georgete Macedo Dutra <sup>3</sup>, Rafael Salvador Neves Coelho <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Spelayon Consultoria. Autor correspondente: [barbara.colen@spelayonconsultoria.com.br](mailto:barbara.colen@spelayonconsultoria.com.br)

## Resumo

Cavernas ferríferas configuram sistemas hidrogeológicos dinâmicos, nos quais a infiltração de águas meteoricas ocorre preferencialmente por descontinuidades estruturais, com percolação ao longo do perfil de alteração e posterior acumulação em ambientes subterrâneos. A interação entre o fluxo hídrico, substrato ferruginoso e matéria orgânica (MO) condiciona padrões hidrogeoquímicos distintos entre ambientes internos e externos. Este trabalho tem como objetivo investigar essas diferenças hidrogeoquímicas associadas a uma caverna localizada no platô S11C, no município de Canaã dos Carajás (PA). As análises foram realizadas em duas campanhas sazonais (períodos seco e chuvoso) ao longo de um ano hidrológico, incluindo amostras do acúmulo de água subterrânea perene e de drenagem externa intermitente, próxima à entrada da caverna. Os resultados evidenciam a presença de águas internas de baixa mineralização, com condutividade elétrica variando de 12,20 (seca) a 47,97 (chuva)  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , os valores mais elevados na estação chuvosa sugerem maior tempo de residência e intensificação das interações água-rocha no interior da caverna. O pH apresenta contraste marcante entre os ambientes, com valores ácidos no empoçamento subterrâneo (4,66–4,78) e próximos à neutralidade na drenagem externa ( $\approx 7,02$ ), indicando a atuação de processos de acidificação ligados a infiltração, quando a água entra em contato com a decomposição de MO do solo, promove liberação de ácidos orgânicos, também à oxidação de minerais ferrosos, processos típicos de ambientes ferruginosos sob cobertura vegetal densa, e, por fim, à interação com MO e guano no tempo de permanência da água no interior da caverna. As concentrações de metais dissolvidos (interno e externo) são, em geral, baixas, com destaque para ferro (até 0,29 mg/L na seca) e alumínio (até 0,06 mg/L na seca), compatíveis com o contexto local e indicativas de mobilidade limitada sob condições oxidantes e de baixo pH. Os dados microbiológicos mostram aumento expressivo de coliformes totais no período chuvoso ( $>1500$  NMP/100 mL), sem detecção de *Escherichia coli*. De forma integrada, os resultados indicam que o sistema é controlado por recarga meteorica. As diferenças observadas entre águas internas e externas refletem uma combinação entre tempo de residência, conectividade hidrológica, processos geoquímicos locais e ausência de contaminações antrópicas, que contribuem para as diferenças químicas observadas nas águas estudadas.

**Palavras-chave:** Cavernas ferríferas; Hidrogeologia; Infiltração; Processos geoquímicos; Carajás.



# Desempenho Analítico de Fluorímetros e Influência do Solvente na Quantificação de Traçadores Fluorescentes em Hidrogeologia

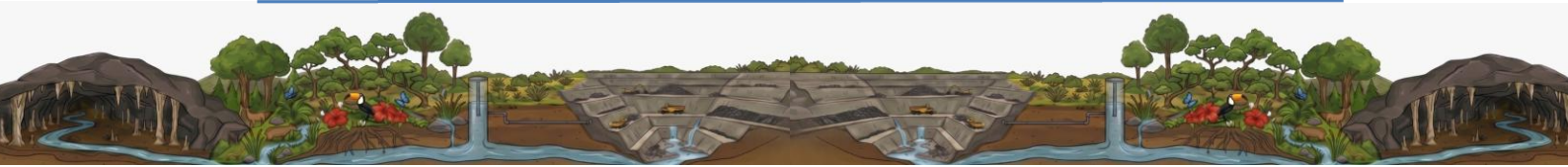
Bianca M. F. Ladislau <sup>1</sup>, Fernando C. D. Costa <sup>2</sup>, Rodrigo S. D. Paula <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Estudos Hidrogeológicos – LEHID. Autor correspondente: [bialadislau@gmail.com](mailto:bialadislau@gmail.com)

## Resumo

A espectroscopia de fluorescência molecular é uma técnica analítica sensível, amplamente utilizada na quantificação de analitos em baixas concentrações. O fenômeno da fluorescência ocorre pela emissão de radiação eletromagnética na região do ultravioleta-próximo ao visível, resultante do retorno das moléculas ao estado fundamental após excitação por fótons, desde que mantido o estado excitado singlete. Moléculas rígidas e ricas em elétrons  $\pi$  apresentam maior tendência à fluorescência, sendo denominadas fluoróforos. Entre essas substâncias, destacam-se os corantes fluorescentes utilizados como traçadores em estudos hidrogeológicos. Esses compostos são introduzidos artificialmente em corpos hídricos com o objetivo de investigar a distribuição, o comportamento e as rotas de fluxo subterrâneo. Sua aplicação é favorecida por propriedades como baixa toxicidade, caráter conservativo e baixos limites de detecção. Exemplos amplamente empregados incluem Rodamina WT, Fluoresceína sódica e Tinopal CBSx. A determinação da fluorescência pode ser realizada por meio de fluorímetros de bancada ou portáteis. Neste estudo, objetivou-se comparar o desempenho analítico desses dois tipos de equipamentos, bem como avaliar a influência do solvente na resposta analítica. Para isso, foram preparadas soluções em triplicata de Rodamina B e Fluoresceína sódica, utilizando dois solventes distintos: água ultrapura e solução de hidróxido de potássio (KOH) 5% em etanol. Para cada condição, foram construídas curvas de calibração nas concentrações de 10, 25, 50, 75 e 100 ppb, com os sinais registrados em milivolts (mV). A partir dos dados obtidos, foram elaborados gráficos lineares correlacionando sinal (mV) e concentração (ppb). Foram avaliados os coeficientes angulares, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e as sensibilidades analíticas. Os resultados indicaram que a água ultrapura é o solvente mais adequado para a construção das curvas de calibração, apresentando maior estabilidade e reprodutibilidade. Em contraste, o uso de etanol em meio alcalino levou à oxidação do solvente, resultando em alteração de cor e interferência significativa nos sinais analíticos, com variações expressivas nos valores obtidos para ambos os traçadores.

**Palavras-chave:** Fluorescência, Fluorímetro, Calibração, Traçadores, Sensibilidade.



# Proposta Metodológica para Avaliação de Adequabilidade à Recarga Gerenciada de Aquíferos em Sistemas Cársticos: Uma Abordagem Via Pca-Sig

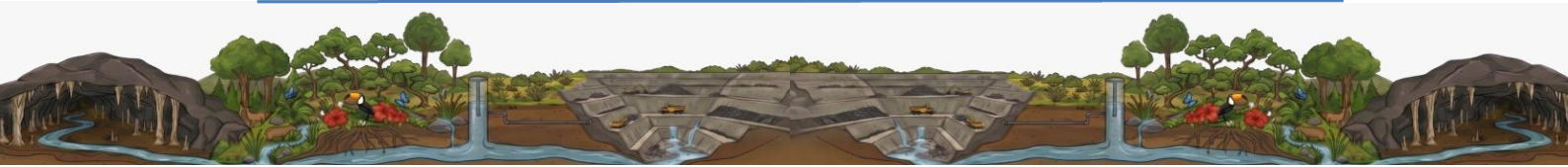
Camila S. Schuch <sup>1</sup>, Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>1</sup>, Pedro Assunção <sup>1</sup>, Paulo Galvão <sup>1</sup>, Rodrigo de Paula <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [camilaschuch@gmail.com](mailto:camilaschuch@gmail.com)

## Resumo

A gestão sustentável de aquíferos cársticos representa um dos maiores desafios hidrogeológicos contemporâneos, dado que esses sistemas fornecem até 25% da água doce global (Ford e Williams, 2007), mas apresentam extrema vulnerabilidade à superexploração, mudanças climáticas e contaminação. Esta proposta metodológica faz parte de um doutorado que avalia a implementação de Recargas Gerenciadas de Aquífero (*Managed Aquifer Recharge* - MAR) no município de Sete Lagoas (MG), onde o crescimento urbano acelerado impõe um quadro de superexploração ao Sistema Aquífero Cárstico Sete Lagoas (SACSL), apresentando a formação de extensos cones de rebaixamento e riscos de subsidência (Schuch et al., 2023; Galvão et al., 2024). Nesse contexto, a MAR surge como uma solução estratégica, mas a seleção de locais para a implementação desses sistemas no carste é dificultada pela forte anisotropia e heterogeneidade hidráulica intrínseca a esses ambientes (Xanke, 2017; Itani et al., 2022). Propõe-se o desenvolvimento de uma metodologia para mapear a adequabilidade de locais para MAR, visando superar a subjetividade inerente aos métodos tradicionais de Análise de Decisão Multicritério (MCDA). A pesquisa pretende integrar Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Análise de Componentes Principais (PCA) para estabelecer uma ponderação de critérios baseada puramente em dados. Diferente do Processo Analítico Hierárquico (AHP), que depende do julgamento de especialistas (Sallwey et al., 2019), a abordagem proposta prevê o uso da estatística multivariada para derivar os pesos das variáveis a partir da variância estatística do sistema físico local. Serão avaliados parâmetros como densidade de lineamentos, feições cársticas, condutividade hidráulica e grau de confinamento, dentre outros. O peso estatístico ( $W_i$ ) de cada fator será calculado pelo produto entre a carga fatorial ( $F_{ij}$ ) e a variância explicada pelo componente principal correspondente ( $E_j$ ), seguindo a formulação:  $W_i = \sum^n (F_{ij} \times E_j)$ . A  $j=1$  integração final das variáveis será processada em ambiente SIG através da Combinação Linear Ponderada (WLC), resultando no Índice de Adequação para Recarga Gerenciada (IMAR), definido pela equação:  $IMAR = \sum V_i \times P_i$ . Onde  $V_i$  representa o valor padronizado da variável (pixel) e  $P_i$  o peso estatístico derivado da PCA. A integração dos dados via Combinação Linear Ponderada (WLC) permitirá a espacialização do Índice de Adequação para MAR (IMAR), indicando zonas aptas para determinados métodos de recarga. A robustez do modelo será validada por análises de sensibilidade, assegurando que a identificação de áreas prioritárias na sub-bacia do Ribeirão Jequitibá seja fundamentada em dados estatísticos. Os resultados esperados são de que a PCA confira maior rigor científico e transparência ao processo decisório, fornecendo uma ferramenta replicável para gestão e planejamento hídrico em terrenos cársticos complexos

**Palavras-chave:** Recarga Gerenciada de Aquíferos; Estatística Multivariada; PCA; Hidrogeologia Cárstica; SIG-MCDA.



# Influência da Variabilidade Pluviométrica nas Vazões de Deságue de Cavas

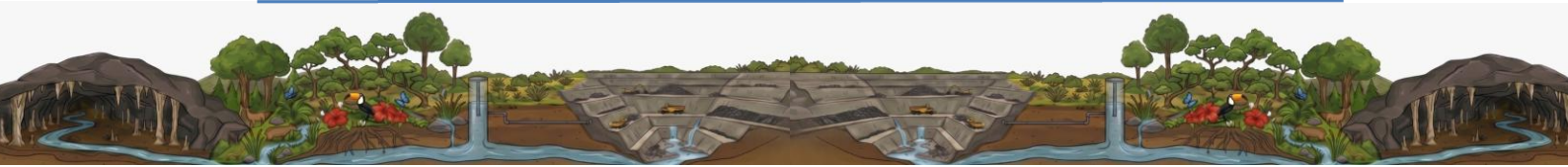
Caroline Favoreto da Cunha <sup>1</sup>, Mariana Sigolo Figueiredo <sup>2</sup>, Victoria Piva Scassiotti <sup>3</sup>, Júlio Lôbo Sampaio <sup>4</sup>, Mariana Miranda Kalil <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [marinamunizdequeiroz@gmail.com](mailto:marinamunizdequeiroz@gmail.com)

## Resumo

A água é um recurso estratégico para viabilizar empreendimentos minerários, tanto em termos de disponibilidade hídrica quanto pelos custos associados ao seu manejo, tais quais outorga, cobrança pelo uso da água, bem como implantação e operação de sistemas de captação, tratamento, monitoramento, recirculação e descarte ambientalmente adequado (ANA e IBRAM, 2024; IBRAM, 2025). A disponibilidade hídrica é diretamente afetada pela variabilidade pluviométrica, intensificada pelas mudanças climáticas, podendo ampliar as incertezas sobre os impactos na operação mineira (IPCC, 2013; ANA e IBRAM, 2024). Nesse contexto, a incorporação dessa variabilidade em análises quantitativas torna-se relevante para a avaliação de cenários operacionais futuros, contribuindo para a redução de incertezas e para o suporte à tomada de decisões no planejamento e na operação de minas. Nesse sentido, foi desenvolvido um modelo numérico hidrogeológico em FEFLOW para uma área de lavra, visando estimar as vazões necessárias ao deságue da drenagem de fundo de cava, associadas ao *water inflow*. A variabilidade pluviométrica foi avaliada e considerada no modelo numérico, a partir de cinco cenários distintos, baseados em uma série sintética de 17 anos, representativos dos seguintes cenários: extremamente seco (mín.), seco (P25), mediano (P50), chuvoso (P75), extremamente chuvoso (máx.). Os resultados indicam que o cenário máximo apresenta volumes anuais de deságue cerca de 37% superiores ao cenário P50, enquanto o cenário mínimo representa uma redução da ordem de 26%, caracterizando a condição de menor custo operacional. Os cenários intermediários mantêm-se próximos ao cenário esperado, com variações de aproximadamente 2 a 3% no P25 e de 11% no P75. No que se refere aos impactos sobre os cursos d'água, não se verificou influência significativa sobre o fluxo subterrâneo regional e sobre as vazões de base do curso d'água adjacente. Esse comportamento está associado à baixa permeabilidade das formações geológicas locais, restringindo os efeitos do bombeamento a alterações locais no regime de fluxo. Os resultados evidenciam a importância de incluir a variabilidade pluviométrica em estudos hidrogeológicos aplicados à mineração, uma vez que esta influencia os custos operacionais associados ao uso da água. A abordagem permite identificar não apenas o custo médio esperado do desaguamento, mas também os períodos mais críticos e favoráveis, fornecendo subsídios consistentes para o planejamento operacional e a avaliação de riscos hidrogeológicos.

**Palavras-chave:** Variabilidade pluviométrica; Modelos hidrogeológicos; Desaguamento; Recursos hídricos na mineração; OPEX.



# Estimativa da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos pelo Método GOD em Itatiaiuçu (MG)

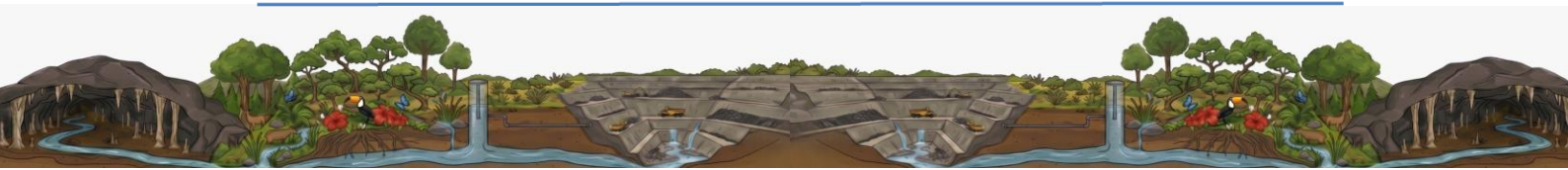
Daniela Teixeira Dutra <sup>1</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>2</sup>, Jorge Geraldo Roncato Júnior <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [danidtd@ufmg.br](mailto:danidtd@ufmg.br)

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo estimar a vulnerabilidade natural de aquíferos no município de Itatiaiuçu por meio da aplicação do método GOD. Foram utilizados dados provenientes do SIAGAS, a partir do qual foram identificados 37 poços cadastrados na área de estudo. Dentre estes, apenas 4 poços apresentaram informações hidrogeológicas completas, contemplando nível estático, tipologia aquífera e caracterização geológica, atendendo aos requisitos necessários para a aplicação do método GOD. Para a realização das análises, foi utilizado o sistema GOD, que avalia a vulnerabilidade aquífera com base em três parâmetros: grau de confinamento da água subterrânea (G), ocorrência de estratos de cobertura (O) e distância até o lençol freático (D). O parâmetro G classifica o grau de confinamento da água subterrânea, variando de valores baixos, associados a aquíferos confinados (maior proteção), a valores elevados, relacionados a aquíferos livres (menor proteção). O parâmetro O considera a litologia da zona não saturada, variando conforme o grau de consolidação dos materiais. Já o parâmetro D é definido a partir do nível estático dos poços, sendo classificado em intervalos fixos de profundidade. A vulnerabilidade é obtida a partir do produto dos parâmetros G, O e D, cujos valores variam entre 0 e 1. O índice resultante é classificado em cinco classes de vulnerabilidade: insignificante (0–0,1), baixa (0,1–0,3), média (0,3–0,5), alta (0,5–0,7) e extrema (0,7–1,0). De acordo com dados disponibilizados pelo SIAGAS, os poços analisados exploram aquíferos fissurais, sob condições livres e semi-confinadas, associados às unidades geológicas Formação Nova Lima, Formação Cauê e o Complexo Belo Horizonte. Os níveis estáticos registrados variaram entre 2,16 m e 34,9 m, indicando distintas condições de proteção natural dos aquíferos. Os índices GOD calculados variaram de 0,30 a 0,46, enquadrando-se predominantemente na classe de vulnerabilidade média. Observou-se que poços com nível d'água mais raso apresentaram maior vulnerabilidade, enquanto condições semi-confinadas e maiores profundidades contribuíram para menor susceptibilidade à contaminação. Como limitação, destaca-se a baixa disponibilidade de dados completos, o que reduz a representatividade espacial da análise. Ainda assim, os resultados fornecem uma avaliação preliminar relevante sobre a vulnerabilidade dos aquíferos na área de estudo.

**Palavras-chave:** Hidrogeologia; Aquífero Fissural; Nível Estático; Contaminação de Aquíferos; Quadrilátero Ferrífero.



# Lixiviação *IN SITU* de Terras Raras: Ensaio Piloto com Traçador em Depósito no Sul da Bahia

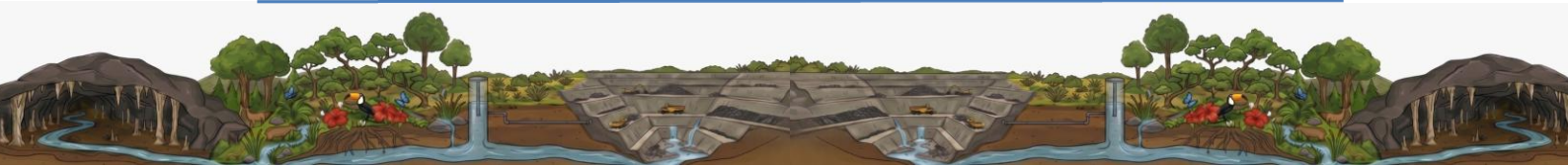
Débora Barbosa <sup>1</sup>, Lilian Hubner <sup>2</sup>, Isabella Andrade <sup>3</sup>, Leonardo Machado <sup>4</sup>, Andreia Resende <sup>5</sup>, Anne Brumatti <sup>6</sup>, Adrieli Pereira <sup>7</sup>, Felipe Costa <sup>8</sup>

<sup>1</sup> WSP. Autor correspondente: [debora.barbosa@wsp.com](mailto:debora.barbosa@wsp.com)

## Resumo

O Brasil detém a segunda maior reserva mundial de elementos terras raras (ETR), com cerca de 23% dos recursos globais e depósitos favoráveis em termos de abundância e viabilidade de extração. Apesar disso, a produção nacional permaneceu abaixo de 1% da produção mundial em 2024, evidenciando a necessidade de avanços no conhecimento técnico-científico, especialmente no desenvolvimento de estratégias de exploração mais eficientes e economicamente viáveis. A lixiviação *in situ* (ISR) em depósitos de adsorção iônica permite a recuperação direta de ETR sem etapas convencionais de beneficiamento, com eficiências superiores a 90%. A técnica está consolidada industrialmente e é empregada em países como China, Mianmar e Malásia. A injeção de soluções lixiviantes promove reações de troca iônica, dessorvendo os ETR e mobilizando-os na fase aquosa, transportando-os pelo fluxo percolante. A solução carregada (Pregnant Leach Solution – PLS) é coletada ao final do processo para extração de ETR. Para avaliar a viabilidade técnica da aplicação da ISR em depósitos de ETR no sul do estado da Bahia, estão sendo conduzidos ensaios de lixiviação *in situ* em escala piloto. O método consiste na injeção controlada de traçador em poços previamente instalados na área mineralizada, permitindo a percolação da solução pela matriz argilosa e a recuperação da solução carregada em poços de monitoramento. Como solução lixivante, utilizam-se geralmente sulfato de amônio ou sulfato de magnésio, sendo este último uma alternativa ambientalmente mais favorável e igualmente eficaz. Entretanto, como abordagem preliminar e de baixo impacto, optou-se por utilizar traçador corante, como a Fluoresceína ou Rodamina WT, em substituição a agentes lixiviantes reativos, permitindo a investigação dos padrões de fluxo, conectividade hidráulica e tempos de residência no meio aquífero, sem riscos associados à mobilização de contaminantes. A infraestrutura implantada inclui captação de água em açudes ou corpos d'água adjacentes, armazenamento em tanques e sistemas automatizados de injeção. O arranjo experimental compreende 9 poços de injeção e 6 poços de monitoramento estrategicamente posicionados. O monitoramento consiste na determinação da fluorescência das amostras de água coletadas nos poços, utilizando fluorímetro portátil de campo. As amostras são coletadas em intervalos de tempo pré-definidos, permitindo o acompanhamento da passagem do traçador. O ensaio será concluído quando os valores de fluorescência registrados nos poços retornarem ao nível de *background*. Os resultados subsidiarão o aprimoramento do modelo hidrogeológico conceitual e o dimensionamento de futuras aplicações em escala operacional. Em etapas futuras, será desenvolvido um modelo hidrogeológico de fluxo capaz de estimar a demanda hídrica, simular o comportamento do lixivante no meio aquífero e avaliar riscos associados à aplicação da ISR em escala de operação real.

**Palavras-chave:** terras raras; adsorção iônica; lixiviação *in situ* (ISR); traçador; hidrogeologia.



# Hidrogeoquímica e Tendências de Qualidade das Águas Subterrâneas na Bacia do Rio Verde Grande, com Base em Monitoramento de Longo Prazo

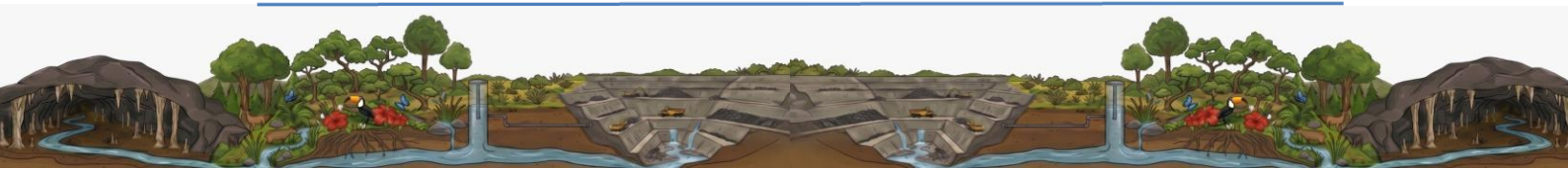
Fábio Henriques Fernandes <sup>1</sup>, Clara de Ávila Reis <sup>2</sup>, Victor Rezende Moreira <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [fabio1303.fh@gmail.com](mailto:fabio1303.fh@gmail.com)

## Resumo

A gestão de águas subterrâneas em regiões semiáridas sob pressão antrópica crescente demanda a compreensão integrada dos processos dominantes e da evolução temporal hidroquímica. Nesse contexto, o estudo teve como objetivo analisar a evolução hidroquímica e a qualidade das águas subterrâneas na bacia do rio Verde Grande (norte de Minas Gerais, Brasil), com base em uma série histórica de monitoramento do IGAM (2005 a 2024). Foram selecionados 31 pontos, cada um com mais de 12 campanhas de monitoramento e amostras com erro de balanço de carga inferior a 10%. Foram avaliados parâmetros físico-químicos, íons maiores e metais, com análise de conformidade em relação à Resolução CONAMA n° 396/2008. A evolução temporal foi investigada por meio do teste de tendência de Mann-Kendall. A caracterização hidroquímica foi realizada utilizando diagramas de Piper e diagramas de processos, enquanto a variabilidade dos dados foi analisada por técnicas multivariadas, como Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA). Os resultados indicaram predominância de águas bicarbonatadas cálcicas a cálcico-magnesianas em todas as unidades hidrogeológicas, com controle dominante da interação água-rocha. A análise de qualidade revelou aumento das não conformidades na unidade aluvial para consumo humano, de 8,73% (T1) para 12,46% (T3), enquanto na unidade siliciclástica observou-se redução de 15,02% para 11,0% no mesmo período. Parâmetros como sólidos totais dissolvidos e nitrato apresentaram frequências elevadas de não conformidade, com destaque para o nitrato na unidade aluvial, atingindo aproximadamente 35% em T2 e T3. Para metais, manganês apresentou frequências de 56% de não conformidade na unidade siliciclástica. A análise temporal indicou tendências como aumento de manganês e sulfato em parte dos pontos (até 100% de tendência crescente em algumas unidades), enquanto ferro e sólidos totais dissolvidos apresentaram predominância de tendências decrescentes. A PCA explicou 72,9% da variância e evidenciou gradiente principal de mineralização associado a cálcio, sulfato e sólidos totais dissolvidos. A HCA confirmou a formação de grupos hidroquímicos distintos. De forma integrada, os resultados demonstraram que a evolução da qualidade das águas subterrâneas na bacia é resultado da interação dinâmica entre processos naturais e pressões antrópicas.

**Palavras-chave:** Hidroquímica; Águas subterrâneas; Análise de tendência; Estatística multivariada; Monitoramento hídrico.



# Monitoramento de Plumhas de Contaminantes Inorgânicos em Áreas de Atividade Mineiro-Industrial

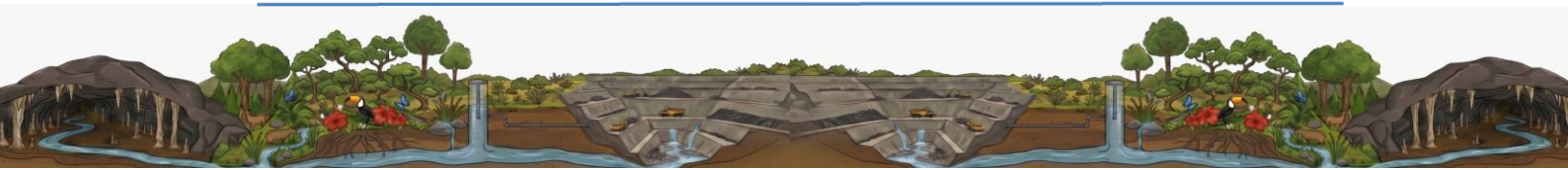
Fernanda Buchi <sup>1</sup>, João Ribeiro <sup>2</sup>, Kamylla Silva <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [marinamunizdequeiroz@gmail.com](mailto:marinamunizdequeiroz@gmail.com)

## Resumo

Áreas sob influência de atividades mineiro-industriais apresentam elevado potencial de impacto sobre os recursos hídricos, principalmente no que tange à formação e evolução de plumhas de contaminação em aquíferos. Nesse contexto, o monitoramento ambiental contínuo das águas subterrâneas, águas superficiais e sedimentos é fundamental para a compreensão acerca dos processos hidrogeoquímicos atuantes e para a avaliação da qualidade ambiental ao longo do tempo. A análise integrada dessas matrizes possibilita o acompanhamento da dinâmica das substâncias químicas de interesse (SQIs), bem como a identificação de tendências de mobilização, atenuação ou persistência dos contaminantes no meio. O presente trabalho teve como objetivo aprimorar o entendimento hidrogeológico e hidrogeoquímico de áreas impactadas por atividades mineiro-industriais, por meio da avaliação da evolução espacial e temporal das plumhas de contaminação. Além disso, buscou compreender a hidrodinâmica dos diferentes aquíferos presentes na área de estudo, bem como avaliar o comportamento das substâncias químicas de interesse (SQIs) em função das condições ambientais, com vistas a subsidiar a tomada de decisão no gerenciamento de áreas contaminadas. A metodologia adotada foi baseada na realização de campanhas periódicas de monitoramento ambiental, incluindo a coleta de amostras de água subterrânea em poços de monitoramento, além da avaliação de águas superficiais e sedimentos. Os dados obtidos foram submetidos a tratamento estatístico, incluindo análises de tendência por meio do teste de Mann-Kendall, o que permitiu a identificação de variações nas concentrações ao longo do tempo. Adicionalmente, foram empregadas ferramentas de interpretação hidrogeoquímica, como a elaboração de diagramas de Pourbaix (Eh-pH), com o objetivo de compreender os mecanismos de especiação e mobilidade das SQIs no ambiente. A integração dos resultados possibilitou a avaliação da geometria e do comportamento das plumhas de contaminação, por meio da análise de mapas de isoconcentração, bem como a predição de tendências evolutivas das concentrações. Essa abordagem integrada forneceu subsídios técnicos para a verificação da delimitação das plumhas, avaliação de tendências de estabilidade ou variação espacial das concentrações, além da identificação de possíveis mudanças nos mecanismos de mobilidade das SQIs.

**Palavras-chave:** plumhas contaminantes; gerenciamento de áreas contaminadas; hidrogeologia; contaminantes inorgânicos; mineração.



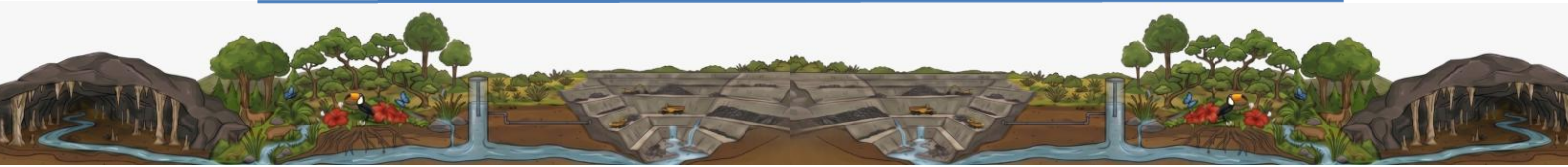
# Papel das Lagoas de Disposição de Rejeito na Recarga do Sistema Aquífero Alter do Chão – Mina Juruti (PA)

José Luiz Louzada <sup>1</sup>, Daniel Bertachini <sup>2</sup>, Rafael Coutinho <sup>3</sup>, Lucas Santos <sup>4</sup>

<sup>1</sup> MDGEO, Hidrogeologia e Meio Ambiente; <sup>3</sup> CARSTE, Ciência e Meio Ambiente; <sup>4</sup> Nexa Resources.  
Autor correspondente: [jlslouzada@gmail.com](mailto:jlslouzada@gmail.com).

## Resumo

Os estudos hidrogeológicos desenvolvidos na Mina Juruti (PA) evidenciam o papel das lagoas de disposição de rejeitos na dinâmica do Sistema Aquífero Alter do Chão. Esse sistema é composto por três unidades principais: um aquífero superficial isolado, desenvolvido em horizontes bauxíticos e lateríticos; um aquífero suspenso de ocorrência local; e uma unidade regional profunda de elevada permeabilidade, associada a quartzo-arenitos. Nesse contexto, as lagoas atuam como elementos adicionais no balanço hídrico, promovendo recarga verticalizada e influenciando localmente as condições potenciométricas. A recarga natural ocorre predominantemente pela infiltração direta da precipitação nos topos dos platôs, que constituem as principais zonas de alimentação do sistema. A presença das lagoas contribui para esse processo ao favorecer a percolação vertical da água, com efeitos mais pronunciados nas porções mais rasas do sistema aquífero. Análises isotópicas indicam que a recarga é majoritariamente meteórica recente, embora sejam observadas zonas de mistura e recarga mais lenta nas porções centrais dos platôs, com tempos de renovação entre 30 e 140 anos. A modelagem numérica tridimensional (MODFLOW), calibrada com erro médio normalizado inferior a 10%, permitiu avaliar a resposta do sistema sob cenários de variação sazonal climática. No cenário de maior precipitação, observou-se elevação das cargas hidráulicas, especialmente nas bordas dos platôs, refletindo a sensibilidade do sistema às condições de recarga. De forma geral, os resultados indicam que as lagoas contribuem para a manutenção dos níveis d'água locais, sem evidências de alterações significativas na dinâmica regional do aquífero. A análise integrada indica que a influência das lagoas se dá predominantemente por fluxos verticalizados, com baixa conectividade hidráulica lateral. Não foram identificadas evidências de conexões diretas entre as lagoas de disposição de rejeitos e as surgências mapeadas na área de estudo, sugerindo que o sistema mantém comportamento compartimentado. Do ponto de vista hidroquímico, as áreas influenciadas pela lavra e pelas lagoas apresentam concentrações mais elevadas de alumínio, ferro e manganês, compatíveis com a assinatura geoquímica natural dos materiais lateríticos e bauxíticos da região. Esses resultados indicam que as variações observadas estão associadas, em grande parte, aos processos naturais de intemperismo e à interação água-rocha. Conclui-se que as lagoas de disposição de rejeitos desempenham papel localizado na dinâmica hidrogeológica, atuando como fontes adicionais de recarga vertical, com limitada conectividade hidráulica com o sistema aquífero regional. Esses resultados reforçam a importância de abordagens integradas de monitoramento e modelagem para a compreensão dos processos hidrogeológicos em áreas operacionais do setor minerário.



# Integração de dados espaciais e análise estatística na avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos em ambientes tropicais

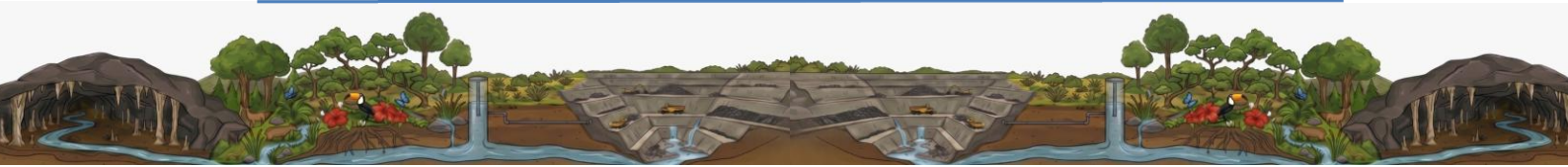
Júlia Gonçalves Ribeiro <sup>1</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>2</sup>, Paulo Galvão <sup>3</sup>, Ricardo de Araujo Cançado <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais; <sup>4</sup> WALM Engenharia. Autor correspondente:  
[juliagncribeiro@gmail.com](mailto:juliagncribeiro@gmail.com)

## Resumo

A avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos é amplamente utilizada como ferramenta de suporte à gestão territorial e ambiental, permitindo identificar áreas mais suscetíveis à contaminação e orientar ações de planejamento, proteção e monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos. Diversos métodos têm sido propostos para essa finalidade, baseando-se em diferentes critérios, como o tipo de aquífero e as características do meio físico. Dentre os métodos mais utilizados, destaca-se o método DRASTIC, a partir do qual foi desenvolvido, em 2025, o método GEOGRIC, que propõe ajustes nos pesos e critérios com o objetivo de aprimorar sua aplicação em países de clima tropical, como o Brasil. Nesse contexto, este trabalho propõe uma abordagem integrada entre modelagem espacial e análise estatística para a avaliação crítica e aprimoramento do método GEOGRIC. Para isso o método será aplicado em quatro tipos de sistemas aquíferos distintos: cárstico (Formação Sete Lagoas), fissural (Complexo Belo Horizonte), granular (Grupo Urucuia) e sistemas aquíferos múltiplos (Quadrilátero Ferrífero). Para cada área, serão elaborados mapas *raster* correspondentes aos sete parâmetros do método (Geologia, Epicarste, Uso e Ocupação do Solo, Grau de Confinamento, Recarga, Isópacas e Condutividade Hidráulica), os quais serão integrados por meio de álgebra de mapas em ambiente SIG para a geração do índice de vulnerabilidade intrínseca. Posteriormente, serão aplicadas análises estatísticas complementares, incluindo correlação bivariada (Spearman e Pearson), análise de sensibilidade univariada e Análise de Componentes Principais (PCA). Espera-se que a integração entre dados espaciais e técnicas estatísticas permita identificar padrões de redundância, hierarquias de influência e relações que não são evidentes em análises isoladas das variáveis, mas que se tornam perceptíveis quando consideradas de forma conjunta, contribuindo para o refinamento metodológico. Como resultado, a abordagem proposta tende a aumentar a robustez e a consistência da avaliação da vulnerabilidade intrínseca pelo método GEOGRIC, bem como sua aplicabilidade em diferentes contextos hidrogeológicos tropicais

**Palavras-chave:** vulnerabilidade; SIG; análise de sensibilidade; PCA; aquíferos tropicais.



# Modelagem Hidrogeológica de Fluxo e Transporte com Python/FloPy: Uma Abordagem Ágil e Reprodutível

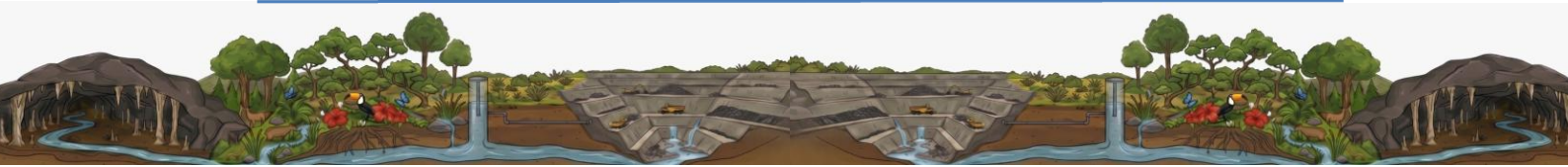
Leonardo Machado <sup>1</sup>, Felipe Costa <sup>2</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [leonardo.machado@wsp.com](mailto:leonardo.machado@wsp.com)

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e aplicação de um fluxo de trabalho totalmente automatizado para modelagem numérica integrada de fluxo subterrâneo e transporte de contaminantes, utilizando MODFLOW e MT3D/MT3D-USGS, implementados via Python e FloPy. A proposta busca fortalecer a reprodutibilidade, rastreabilidade e eficiência em todas as etapas da modelagem hidrogeológica — desde a construção conceitual até a análise de cenários para suporte à decisão em sistemas de remediação. A metodologia adota boas práticas de modelagem, incluindo definição do modelo conceitual, discretização espacial, configuração de condições de contorno e calibração do fluxo. Em seguida, acopla-se a modelagem de transporte, considerando processos advectivos, dispersivos e reativos, com parâmetros obtidos e interpretados a partir do estudo de caso real utilizado como base para o desenvolvimento do pipeline. A automação, estruturada por meio de módulos Python com controle de versões, ambientes reprodutíveis e registro sistemático da execução, garante padronização desde o pré-processamento dos dados até a geração dos produtos finais. Os objetivos específicos incluem: (i) padronizar a criação do modelo numérico em FloPy e de seus pacotes associados; (ii) realizar a calibração do fluxo com métricas quantitativas e procedimentos automáticos; (iii) acoplar o transporte de contaminantes ao modelo calibrado; (iv) produzir gráficos, tabelas e arquivos de saída reprodutíveis diretamente dos scripts; e (v) discutir a síntese dos resultados e implicações do uso de ferramentas automatizadas na prática da modelagem hidrogeológica. A biblioteca FloPy foi empregada para definir o domínio e a malha, instanciar pacotes do MODFLOW (discretização, propriedades hidráulicas, recarga, rios, poços e cargas constantes), importar dados de entrada como shapefiles e tabelas, calcular estatísticas de calibração, configurar e executar o modelo de transporte e gerar visualizações consistentes. Os resultados obtidos indicam coerência hidrogeológica, aderência a métricas de calibração reportadas na literatura e capacidade de representar cenários úteis para o planejamento e otimização de estratégias de remediação. Assim, o estudo demonstra que a automação em Python/FloPy constitui uma abordagem robusta e transparente para modelagem numérica de fluxo e transporte, contribuindo para maior eficiência, qualidade e confiabilidade nos processos de diagnóstico e tomada de decisão.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrogeológica; FloPy; MODFLOW; MT3D; Remediação.



# Análise de Contaminantes em Águas Subterrâneas Após o Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana- MG

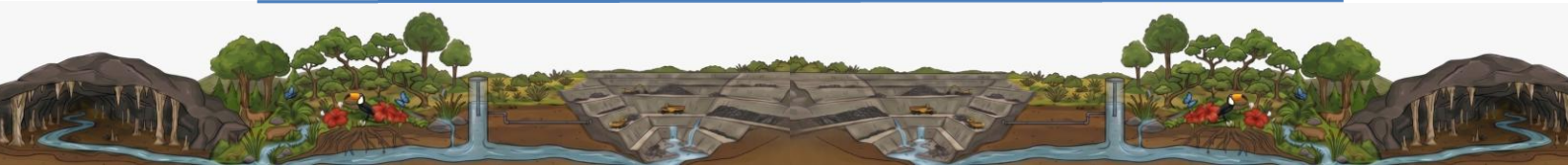
Ludymilla Agnes Ferreira <sup>1</sup>, Estefania Fernandes dos Santos <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Ouro Preto. Autor correspondente: [ludymilla.ferreira@aluno.ufop.edu.br](mailto:ludymilla.ferreira@aluno.ufop.edu.br).

## Resumo

O rompimento da Barragem de Fundão, em novembro de 2015, em Mariana (MG), liberou cerca de 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos, causando impactos ambientais extensos. Comunidades como Bento Rodrigues, Gesteira e Barra Longa foram diretamente afetadas, e aproximadamente 663 km de corpos hídricos sofreram degradação até o Oceano Atlântico. Apesar de diversos estudos sobre águas superficiais e sedimentos, ainda há lacunas quanto aos efeitos sobre as águas subterrâneas. Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade das águas subterrâneas em Barra Longa (MG), uma das áreas atingidas. Para isso, foram realizadas medições in situ de parâmetros físico-químicos, além de análises laboratoriais de cátions, ânions e metais potencialmente tóxicos. Os resultados foram comparados aos padrões estabelecidos pelo CONAMA. Os dados indicaram que as águas subterrâneas apresentam caráter levemente ácido, típico de aquíferos associados a rochas silicáticas e cristalinas, geralmente pobres em minerais dissolvidos. No entanto, análises laboratoriais revelaram concentrações pontualmente elevadas de metais como manganês, arsênio, cádmio e chumbo, em níveis superiores aos limites permitidos. Essas ocorrências variaram espacialmente entre os poços analisados, sugerindo influência das características do aquífero fissural e possível interação com os rejeitos depositados após o desastre. De modo geral, observou-se grande heterogeneidade na composição química das águas subterrâneas. Embora não seja possível atribuir de forma definitiva todas as anomalias à ação dos rejeitos, os resultados indicam que a interação entre a geoquímica natural das rochas e os resíduos liberados pode ter favorecido a mobilização de certos elementos. O estudo destaca, portanto, a importância do monitoramento contínuo da qualidade das águas subterrâneas em áreas impactadas por atividades minerárias e eventos ambientais de grande escala, visando à proteção dos recursos hídricos e da saúde das populações afetadas.

**Palavras-chave:** Rompimento de barragem; águas subterrâneas; metais pesados; contaminação ambiental; Barra Longa.



# Avaliação da Degradação da Fluoresceína em Ambiente Refrigerado

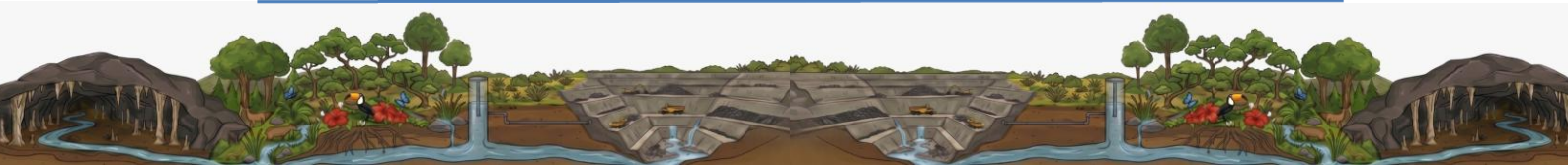
Luiza Monteiro Espíndola <sup>1</sup>, Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>2</sup>, Gabriel Coelho Diniz Lopes de Sousa <sup>3</sup>,  
Letícia Pereira dos Santos Monteiro <sup>4</sup>, Rafael Fernando Marinho Quintão <sup>5</sup>, Vitória Gomes Macêdo <sup>6</sup>,  
Paulo Henrique Ferreira Galvão <sup>7</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [luizaespindola88@gmail.com](mailto:luizaespindola88@gmail.com).

## Resumo

Os traçadores fluorescentes podem ser utilizados para determinar a velocidade e a direção do fluxo, sendo uma ferramenta importante para mapear a dispersão de contaminantes. Apesar de serem frequentemente utilizados, as amostras contendo traçadores precisam ser armazenadas corretamente para posterior análise laboratorial. Em muitos casos, as coletas são realizadas em locais remotos que não possibilitam condições adequadas de armazenamento. Segundo a ISO 5667-3, as amostras de águas subterrâneas são suscetíveis a mudanças em suas características durante o tempo entre a coleta e a análise, caso não sejam tomadas as medidas de precaução. Nesse contexto, a fluoresceína sódica é um traçador amplamente empregado por ser hidrossolúvel e inodora e apresentar baixa toxicidade. Diante desse cenário, esse estudo se propôs a analisar a degradação da fluoresceína em ambiente refrigerado ao longo de diferentes períodos e concentrações. Foi feita a diluição de uma solução 1000 ppb, preparada a partir de 1 mg de fluoresceína em 1 litro de água ultrapura, em três amostras com concentrações de 300 ppb, 50 ppb e 10 ppb. Essas amostras foram analisadas em um fluorímetro no modelo GGUN-FL após 24 horas, 48 horas, 72 horas e 240 horas. As amostras foram refrigeradas em uma geladeira na temperatura de 5 ° C. Para a maior e a menor concentração, houve degradação mínima. No entanto, na concentração intermediária (50 ppb), foi possível notar uma redução de 0,8% nas primeiras 48 horas; 5,7% em 72 horas e 12,9% em 240 horas. Para as primeiras 24 horas, não houve degradação significativa. Dessa forma, é possível notar que após maiores períodos, apesar da refrigeração, a solução tende a degradar. Pode-se considerar ainda que a fluoresceína é relativamente estável nas primeiras 48 horas, apresentando menos de 1% de degradação no caso da concentração intermediária, sendo um intervalo seguro para análise em laboratório. Para as demais concentrações, a estabilidade desse traçador demonstrou ser ainda mais elevada.

**Palavras-chave:** Traçadores, Fluorímetro, Armazenamento.



# Estudo Sobre Traçadores Artificiais: Comportamento da Fluoresceína com Diferentes Concentrações Aplicada ao Meio Natural

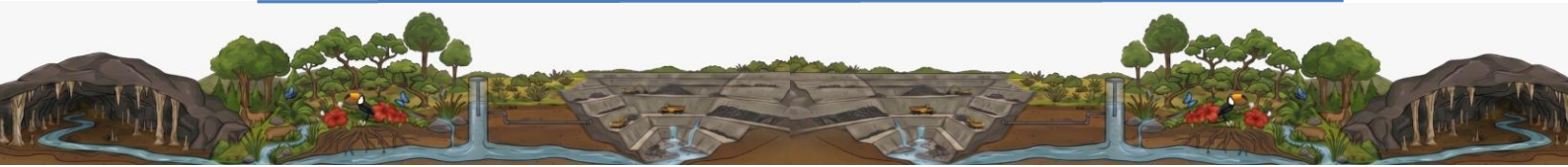
Vitória Gomes Macêdo <sup>1</sup>, Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>2</sup>, Gabriel Coelho Diniz Lopes de Sousa <sup>3</sup>,  
Letícia Pereira dos Santos Monteiro <sup>4</sup>, Rafael Fernando Marinho Quintão <sup>5</sup>, Luiza Monteiro Espíndola <sup>6</sup>,  
Paulo Henrique Ferreira Galvão <sup>7</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [vitoriagomesmacedo3@gmail.com](mailto:vitoriagomesmacedo3@gmail.com)

## Resumo

Os traçadores são materiais utilizados para determinar o caminho, tempo de trânsito e dispersão de substâncias na água, sendo divididos em ambientais ou artificiais. Para esta análise, foi empregada a Fluoresceína, um traçador artificial químico fluorescente orgânico que emite luz em uma determinada faixa de comprimento de onda. Este trabalho tem como objetivo analisar a degradação e o comportamento da fluoresceína quando exposta ao sol em três concentrações iniciais distintas: 125 ppb, 28 ppb e 5 ppb. Para o experimento, foram utilizados três recipientes plásticos com capacidade de 200 ml, onde as concentrações foram diluídas e expostas à luz solar para observar a fotodegradação em um período de 72 horas. Para medir a degradação, foram utilizados o fluorímetro e o software Fluor, permitindo o monitoramento das medições de Fluoresceína. A análise dos dados revela um decaimento contínuo e expressivo em todos os pontos de monitoramento ao longo do período. Na amostra de 125 ppb, observaram-se as quedas mais acentuadas no início, com uma redução consecutiva de aproximadamente 61% a cada intervalo de 24 horas, chegando a 10,98 ppb ao final das 72 horas. As amostras de 28 ppb e 5 ppb também seguiram a tendência de redução gradual, apresentando uma dissipação quase total ao fim do experimento, quando ambas atingiram valores inferiores a 0,60 ppb. Em suma, os resultados indicam que a Fluoresceína apresentou uma diluição consistente e previsível, com uma curva de queda persistente. Conclui-se que o traçador sofre um processo de degradação contínuo e acelerado quando exposto à luz solar, independentemente da concentração inicial. O monitoramento de 72 horas revelou que amostras de menor concentração (5 ppb e 28 ppb) tornam-se virtualmente indetectáveis em curto prazo, enquanto concentrações maiores apresentam quedas acentuadas logo nas primeiras horas.

**Palavras-chave:** Traçadores; Fluoresceína; Meio Ambiente; Degradação; Concentração.



# Avaliação da Fotodegradação da Rodamina WT em Ambientes Expostos: Estudo Aplicado Para Sistemas Hídricos

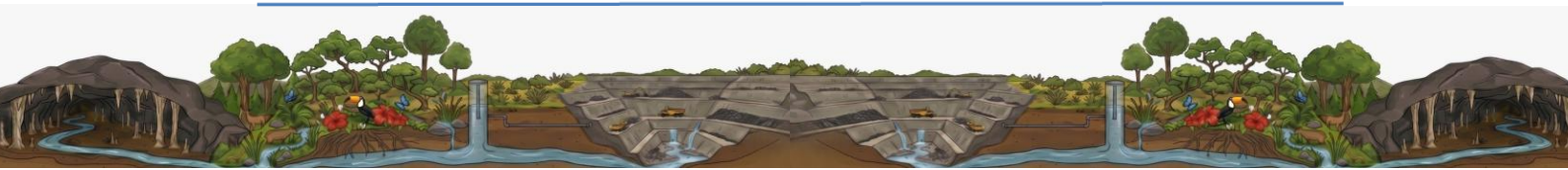
Letícia Pereira dos Santos Monteiro <sup>1</sup>, Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>2</sup>, Gabriel Coelho Diniz Lopes de Sousa <sup>3</sup>, Luiza Monteiro Espíndola <sup>4</sup>, Rafael Fernando Marinho Quintão <sup>5</sup>, Vitória Gomes Macêdo <sup>6</sup>, Paulo Henrique Ferreira Galvão <sup>7</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: letterpds@gmail.com

## Resumo

O manuseio de traçadores fluorescentes é um método de mapeamento da dinâmica das águas subterrâneas. A Rodamina WT está entre os traçadores fluorescentes mais utilizados nesta abordagem devido a sua facilidade no rastreamento. Para uma detecção precisa, é crucial saber o quanto ela se decompõe sob a luz solar, conhecido como fotodegradação, na atmosfera. Tal metodologia de armazenamento e proteção foi verificada por um experimento que examinou a forma como o traçador responde à irradiação solar. A Rodamina WT foi preparada em concentrações três para o teste. As amostras foram coletadas em potes de plástico branco de 200 ml e foram monitoradas em intervalos de 24 horas ao longo de três dias consecutivos. As amostras foram medidas a partir de um fluorímetro e lido pelo *software* Fluor, e seu uso foi mantido para rastrear a degradação ao longo do tempo. Os resultados, por sua vez, revelaram que as concentrações de 123,97 ppb e 56,54 ppb e 9,86 ppb não sofreram mudanças significativas, mantendo uma estabilidade durante o período de três dias sob exposição persistente. A concentração de 123,94 ppb exibiu resistência, reduzindo para 98,91 ppb ao final do terceiro dia (mudança de 20,20%). Para a concentração de 56,54 ppb, pouca mudança foi detectada, variando para 52,20 ppb (aproximadamente 7,68% de mudança). Mantendo o mesmo padrão de estabilidade, e a que menos teve decaimento, a concentração que começou com 9,86 ppb terminou o experimento com 9,64 ppb (variação de apenas 2,23%). Esses resultados reforçam a importância de considerar a sensibilidade à fotodegradação mencionada pelo manual do USGS (*Fluorometric Procedures for Dye Tracing*), que alerta para a vulnerabilidade desses traçadores à incidência solar. O experimento comprovou que, ao adotar a metodologia de proteção adequada, mesmo que a Rodamina WT seja lançada em condutos subterrâneos com intervalos abertos ou tempos longos de circulação, é possível preservar a integridade do traçador e garantir sua detecção, inclusive em concentrações mais baixas. Conclui-se então, que a metodologia foi eficaz para demonstrar que a proteção utilizada mitigou os efeitos da exposição solar, mantendo a estabilidade da Rodamina WT e assegurando que esse fator de risco seja controlado durante o rastreamento.

**Palavras-chave:** Traçadores; Água subterrânea; Experimento; Decaimento; Concentração.



# Análise da Degradação de Amostras de Tinopal em Ambiente Refrigerado

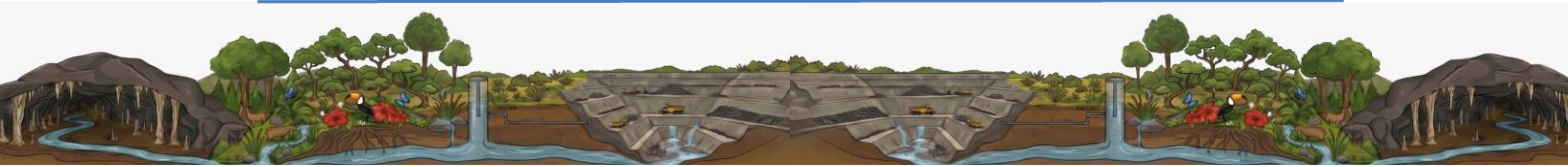
Rafael Fernando Marinho Quintão <sup>1</sup>, Ana Maria Nascimento Gonçalves <sup>2</sup>, Gabriel Coelho Diniz Lopes de Sousa <sup>3</sup>, Letícia Pereira dos Santos Monteiro <sup>4</sup>, Luiza Monteiro Espíndola <sup>5</sup>, Vitória Gomes Macêdo <sup>6</sup>, Paulo Henrique Ferreira Galvão <sup>7</sup>, Rodrigo Sérgio de Paula <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [rafafmquintao@gmail.com](mailto:rafafmquintao@gmail.com)

## Resumo

Ensaio de traçadores fluorescentes são uma ferramenta essencial para investigação de rotas de fluxo, interconectividade e mecanismos de transporte de águas subterrâneas. O TINOPAL CBSX é um traçador com propriedades de interesse pois, enquanto a utilização de outros traçadores como fluoresceína sódica e rodamina WT podem resultar na coloração da água e chamar atenção da população, esse traçador é quase imperceptível. Além disso, sua fluorescência é independente dos níveis de Ph encontrados na maior parte dos aquíferos. Por fim, seus comprimentos de onda são complementares aos de outros corantes frequentemente utilizados, permitindo a sua utilização simultânea em conto com a fluoresceína, por exemplo em ensaios compostos. Desse modo, este estudo tem o objetivo de analisar a degradação do tinopal CBS-X em um ambiente resfriado e não iluminado. Para a realização do experimento, foram preparadas 3 soluções de tinopal com concentrações de 10 ppb, 50 ppb e 100 ppb, feitas a partir da diluição de uma amostra de 1000 ppb confeccionada em laboratório, pesando-se 1mg de tinopal em 1L de água ultrapurificada. Em seguida as soluções aquosas foram armazenadas em um refrigerador, e mantidas sob temperatura constante de 5°C e sem influência da luz. A análise da concentração de amostras foi realizada 24 horas, 48 horas, 72 horas e 240 horas após o início do experimento em um fluorímetro modelo GGUN-FL, previamente calibrado com amostras de diferentes concentrações deste traçador. Os resultados obtidos demonstram degradação de 20% para a solução de 10ppb e degradação mínima a nula do traçador durante os 3 primeiros dias de análise para as concentrações de 50 e 100 ppb. Já na análise de 240 horas, as concentrações de 10 ppb, 50 ppb e 100 ppb sofreram degradações de 50%, 11% e 7% respectivamente, esses valores correspondem a uma média de 6 ppb para todas as concentrações durante todo o período de análise. Portanto, conclui-se que ambientes escuros e refrigerados, são ambientes efetivos para o armazenamento de amostras de concentrações altas e médias do TINOPAL CBS-X, no entanto, em concentrações menores, a degradação do traçador é significativa. Adicionalmente, foram identificadas concentrações residuais baixas de fluorescência relacionadas ao comprimento de onda utilizado para identificação de corantes como a fluoresceína, o que comprova a correlação entre os dois traçadores.

**Palavras-chave:** Traçadores, Tinopal, Fluorímetro.



# Além da Acurácia: Modelagem Hidrológica Baseada em LSTMS Avaliada com Xai e Assinaturas Hidroglógicas

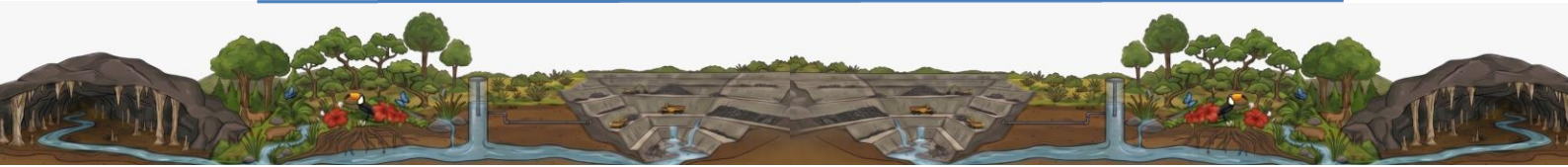
<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, [ernejosecanellas@ufmg.br](mailto:ernejosecanellas@ufmg.br)

Ernesto Canellas <sup>1</sup>, Rodrigo Perdigão <sup>2</sup>, André Ferreira <sup>3</sup>, Bruno Brentan <sup>4</sup>

## Resumo

Modelagem Hidrológica é essencial para a gestão de recursos hídricos, tomadas de decisão, previsão de eventos extremos e para o avanço da compreensão integrada do ciclo hidrológico. Nesse contexto, duas principais vertentes dominam: Modelos Fisicamente Embasados, que simulam os processos hidrológicos tais como a vazão nos cursos d'água utilizando equações físicas, e os Modelos Baseados em Dados, que usam técnicas estatísticas e/ou de machine learning para realizar as previsões. Apesar das técnicas de Inteligência Artificial (IA) terem apresentado resultados promissores na acurácia de sua previsão, particularmente em bacias com uma boa disponibilidade de dados, sua natureza inerente de “caixa-preta” gera preocupações se as representações internas do modelo estão alinhadas com os processos hidrológicos reais. Isto é especialmente importante quando os modelos são aplicados em eventos extremos, condições não-estacionárias, ou cenários além da distribuição de treinamento, onde altas métricas de performance isoladas não garantem previsões confiáveis ou fisicamente coerentes. Nesse estudo, foi avaliada a performance de um modelo de Long Short-Term Memory (LSTM) para modelagem hidrológica e verificada o quão efetivamente ele poderia representar comportamentos hidrológicos reais nas bacias do Rio Grande do Sul disponíveis na base de dados Catchment Attributes and Meteorology for Large-sample Studies (CAMELS-BR). O foco nessas bacias é especialmente relevante dada a importância hidrológica da região, susceptibilidade à eventos extremos, e características distintas quando comparadas aos climas temperados, onde a maioria dos modelos estabelecidos foram desenvolvidos. O modelo foi treinado usando dados de 55 bacias diferentes ao longo do estado. Essa abordagem de multi-bacias permite a LSTM a aprender padrões hidrológicos universais enquanto mantém a habilidade de prever condições de vazão em diferentes bacias hidrográficas. Os dados de entrada do modelo combinam atributos dinâmicos (precipitação, temperatura e evapotranspiração) com atributos estáticos da bacia (topografia, aridez, propriedades do solo). Dados de chuva acumulada foram construídos em janelas de 3-30 dias com o intuito de capturar os efeitos de memória da bacia como um aproximador das dinâmicas da umidade do solo. Adicionalmente, técnicas de Inteligência Artificial Explicável (XAI) juntamente com assinaturas hidrológicas (índice de escoamento de base, coeficiente de escoamento, elasticidade) foram aplicadas para verificar a coerência física do modelo na região. Após isso, a estrutura interna da LSTM - particularmente os estados das células - foram analisados e comparados com o comportamento hidrológico (acumulação de água no solo, dinâmicas das águas subterrâneas, etc.) em ambas as situações onde o XAI destacou, ou não destacou, consistência física. A efetividade da LSTM em bacias brasileiras destacou seu potencial como uma ferramenta complementar à modelagem hidrológica, oferecendo uma alternativa para os gestores de recursos hídricos.

**Palavras-Chave:** Modelagem Hidrológica, LSTM, IA Explicável, Assinaturas Hidrológicas, CAMELS-BR.



# Entre a Geologia e a Pressão Antrópica: Assinaturas Hidroquímicas do Quadrilátero Ferrífero – Sinclinal Moeda e Homoclinal Serra do Curral

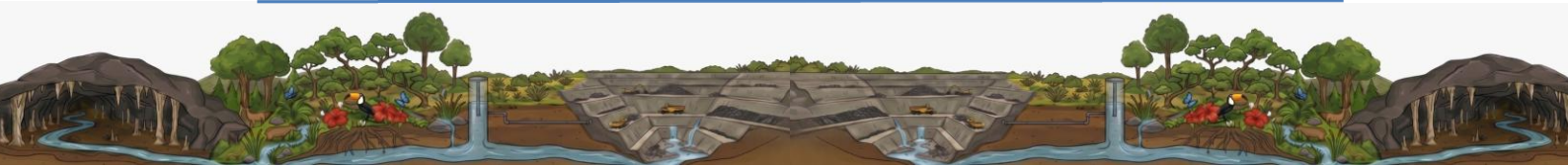
José Luiz Louzada <sup>1</sup>, Rafael Coutinho Soares <sup>2</sup>, Paulo Henrique Galvão <sup>3</sup>, Rodrigo de Paula <sup>4</sup>, Lucas Santos <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais; <sup>5</sup> Nexa Resources. Autor correspondente: [jlslouzada@gmail.com](mailto:jlslouzada@gmail.com)

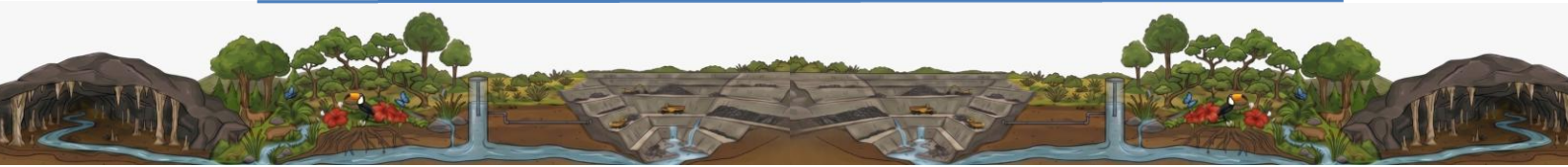
## Resumo

O Quadrilátero Ferrífero (QF), em Minas Gerais, abriga sistemas aquíferos estratégicos associados a diferentes contextos estruturais, como o Sinclinal Moeda, a oeste, e a Homoclinal Serra do Curral, a norte. Essas unidades desempenham papel fundamental na sustentação de mananciais e no abastecimento de comunidades locais. No entanto, as intensas mudanças no uso e ocupação do solo têm imposto pressões crescentes sobre a qualidade e a disponibilidade das águas subterrâneas na região. Apesar da reconhecida importância hidrogeológica do Quadrilátero Ferrífero, os dados hidroquímicos disponíveis ainda são dispersos o que dificulta uma avaliação integrada e comparativa entre diferentes domínios estruturais. Diante desse cenário, a avaliação das águas subterrâneas no QF, com foco na definição de Níveis de Fundo Natural (NBL) das unidades aquíferas, constitui uma abordagem fundamental para a identificação de assinaturas hidroquímicas e para a distinção entre processos geogênicos e antrópicos. A proposta busca compreender como diferentes configurações geológicas e estruturais controlam tanto as características hidroquímicas quanto a suscetibilidade dos aquíferos à contaminação. Para isso, serão realizadas campanhas sazonais de amostragem em poços tubulares e nascentes, distribuídas em diferentes unidades aquíferas e em distintos períodos hidrológicos, de modo a captar variações espaciais e sazonais. As análises incluirão a medição de parâmetros físico-químicos *in situ*, como pH, temperatura e condutividade elétrica, além de determinações laboratoriais de elementos estratégicos. A interpretação dos dados será apoiada por ferramentas hidrogeoquímicas, como os diagramas de Piper e Stiff, e por análises estatísticas multivariadas. A definição dos NBLs será baseada nos percentis 90 e 95 para identificação de anomalias permitindo avaliar posteriormente concentrações naturais e possíveis influências antrópicas. Como resultados, se espera definir valores de referência hidroquímicos para diferentes unidades aquíferas do Sinclinal Moeda e Homoclinal Serra do Curral, a identificação de padrões e anomalias associados a controles geogênicos e antrópicos. A pesquisa pretende preencher lacunas de informação, contribuindo para a obtenção de uma base científica integrada para o QF, capaz de subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, apoiar processos de licenciamento ambiental e orientar estratégias de monitoramento e proteção dos aquíferos em regiões sob intensa pressão antrópica.

**Palavras-Chave:** Quadrilátero Ferrífero; Hidroquímica; Níveis de Fundo Natural; Vulnerabilidade de Aquíferos; Gestão de Recursos Hídricos.



# Resumos Expandidos



# Integração Entre Planejamento de Lavra, Fechamento de Mina e Modelagem Hidrogeoquímica na Avaliação de Riscos em Lagos de Cava

Felipe Costa<sup>1</sup>, Lilian Hubner<sup>2</sup>, Isabella Andrade<sup>3</sup>, Nathan Martins<sup>4</sup>, Gregorio Favarsani<sup>5</sup>, Layane Silva<sup>6</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [felipe.costa@wsp.com](mailto:felipe.costa@wsp.com):

## Introdução

O fechamento de minas a céu aberto frequentemente resulta na formação de lagos de cava, cuja interação hidráulica e geoquímica com o meio geológico adjacente pode representar um importante vetor de risco ambiental, especialmente quando há potencial de geração ou mobilização de contaminantes. Em muitos empreendimentos, paredes naturais da cava apresentam baixas condutividades hidráulicas e atuam como aquíferos, retardando a contribuição de fluxos subterrâneos contaminados para bacias hidrográficas a jusante. Entretanto, essas mesmas unidades podem conter teores economicamente relevantes de minério, criando um conflito direto entre a manutenção de barreiras naturais de proteção ambiental e os objetivos econômicos da lavra.

No caso estudado, a parede sul da cava é composta por material de muito baixa permeabilidade (da ordem de  $10^{-9}$  m/s), que em condições de pós-fechamento e enchimento do lago funcionaria como um aquífero natural, retardando o aporte de fluxos subterrâneos potencialmente impactados às bacias a jusante. Contudo, a remoção desse material, motivada por seu interesse econômico, resultaria no vertimento do lago em direções ambientalmente sensíveis, o que não seria aceitável do ponto de vista ambiental.

Ao longo de anos, diversas alternativas técnicas para reorientação de fluxos superficiais e subterrâneos foram avaliadas na unidade, incluindo furos direcionais, drenos sob pilhas, fraturamento hidráulico, dentre outros. Apesar dos avanços conceituais, tais soluções mostraram-se limitadas em termos de custo, eficiência, construtibilidade ou robustez ambiental. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma solução integrada, baseada na articulação entre planejamento de lavra e estratégias de fechamento, na qual a geometria de uma pilha de estéril existente foi ajustada de modo a afastar o lago da parede sul da cava, com medida adicional de contenção de fluxos relacionada a implementação de barreira de baixa permeabilidade no pé da pilha em sua porção sul (Figura 1), reduzindo os fluxos subterrâneos direcionados às bacias a jusante.

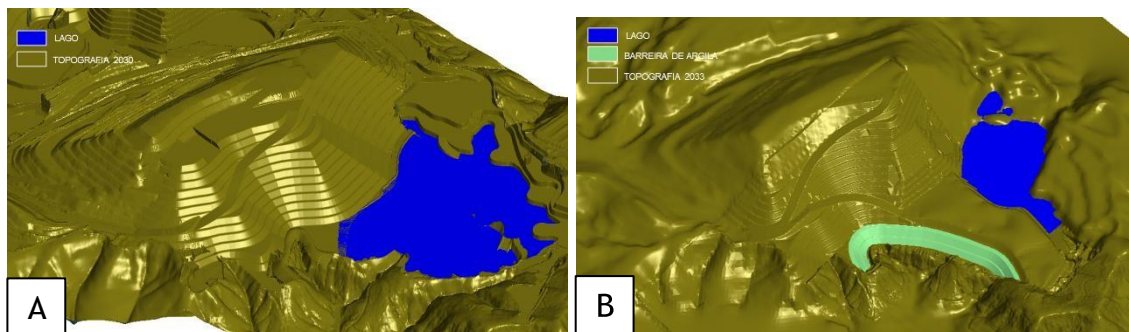
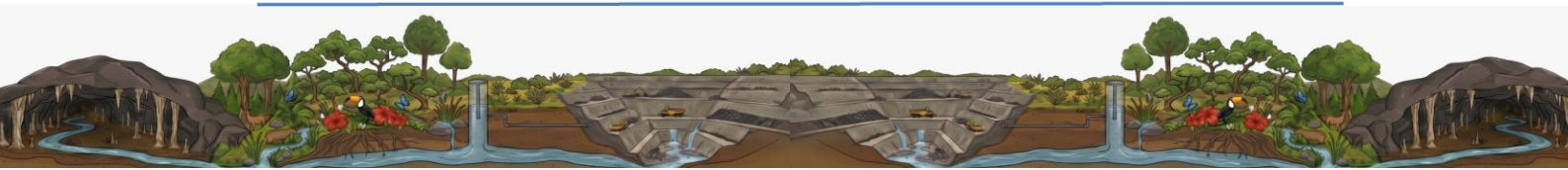


Figura 1: Lago da cava nas condições do cenário base, sem ajuste na geometria da pilha (A), e após o ajuste da geometria para afastamento do lago, com implantação de barreira de argila na base da pilha (B).



## Metodologia

A metodologia adotada baseou-se em uma abordagem integrada e multidisciplinar, envolvendo análises geotécnicas, hidrogeológicas, geoquímicas e ambientais, associadas a um processo estruturado de avaliação multicritério. Inicialmente, foram desenvolvidos e atualizados modelos conceituais e numéricos de fluxo, implementados no software FEFLOW, capazes de representar diferentes configurações das estruturas de mina em cenário de fechamento e de quantificar os fluxos subterrâneos direcionados às bacias a jusante nos distintos cenários avaliados.

Paralelamente, foram conduzidos estudos geotécnicos e construtivos para a definição de diferentes alternativas de barreira de baixa permeabilidade na base da pilha, incluindo variações na geometria da parede de argila, na impermeabilização da base por geomembrana e na incorporação de sistemas de drenagem interna voltados à dessaturação da pilha. Nesse contexto, foram também estimados os volumes necessários de argila e de outros materiais para a composição da barreira no pé da pilha, considerando critérios de desempenho hidráulico, estabilidade geotécnica e viabilidade construtiva.

De forma complementar, foram elaborados balanços hídrico e químico do lago da cava, com o objetivo de avaliar a evolução da qualidade da água do lago final após sua estabilização. A caracterização geoquímica da argila a ser utilizada na barreira permitiu sua avaliação como meio reativo, com potencial para atenuação de metais por processos de adsorção, troca iônica e precipitação, conforme descrito por Appelo e Postma (2005). A predição da qualidade da água do lago, bem como a avaliação do transporte geoquímico e do potencial reativo da argila, foram realizadas com o auxílio do software PHREEQC, possibilitando uma análise integrada dos efeitos hidrodinâmicos e geoquímicos associados às alternativas avaliadas.

Por fim, as alternativas técnicas foram comparadas por meio do método Analytic Hierarchy Process (AHP), conforme proposto por Saaty (1991), a partir da estruturação de uma hierarquia de critérios que contemplou aspectos construtivos, geotécnicos, hidrogeológicos, geoquímicos e ambientais. As matrizes de comparação paritária foram avaliadas quanto à consistência, e os pesos globais obtidos permitiram o ranqueamento das alternativas, subsidiando a seleção da solução mais robusta sob uma perspectiva integrada de risco e desempenho ambiental.

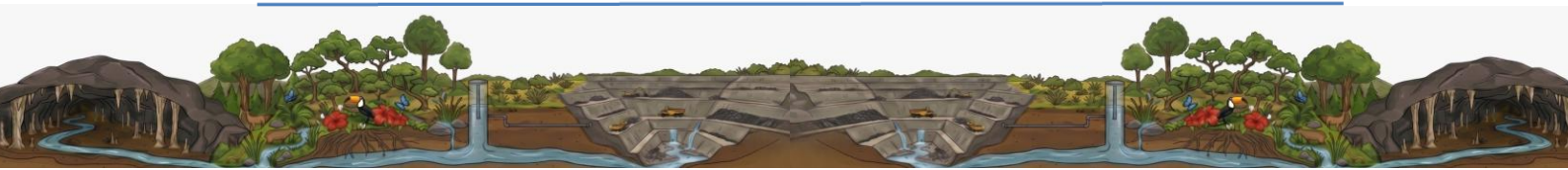
## Resultados e discussões

Os resultados indicaram que a mitigação dos riscos ambientais associados ao lago de cava depende da atuação integrada de quatro componentes principais. O primeiro refere-se ao afastamento físico do lago em relação à parede sul da cava, obtido por meio da extensão da pilha de estéril. O segundo componente diz respeito ao papel do sistema de drenagem interna da pilha, fundamental para a redução das pressões e do fluxo subterrâneo na pilha. O terceiro relacionado à definição de uma geometria adequada da barreira de argila, associada à impermeabilização da base da pilha por geomembrana. Por fim, os estudos geoquímicos demonstraram que a barreira de argila atua não apenas como elemento físico de contenção, mas também como meio reativo, promovendo a atenuação de metais e a melhoria da qualidade da água liberada a jusante. A análise das alternativas por meio do método AHP indicou que o cenário de pilha longa, caracterizado pelo maior afastamento do lago e pela extensão da geomembrana desde a barreira de argila até aproximadamente 100 m da base da pilha em direção ao lago, apresenta desempenho ambiental superior ao cenário de fechamento natural da cava. Esse arranjo mostrou-se mais eficiente na redução dos fluxos subterrâneos, na melhoria da qualidade da água a jusante e na robustez global da solução frente às incertezas técnicas inerentes às análises integradas.

## Conclusões

O estudo demonstrou que soluções integradas de planejamento de lavra e fechamento de mina podem representar alternativas ambientalmente mais eficientes e economicamente mais atrativas do que abordagens convencionais isoladas. A adequação da geometria da pilha, aliada à implantação de barreiras de baixa permeabilidade, sistemas de drenagem interna e elementos reativos, permitiu mitigar de forma consistente os riscos ambientais associados à formação de lagos de cava e sua conectividade com o meio ambiente.

Os resultados reforçam a importância de estratégias de fechamento concebidas ainda durante a fase de planejamento de lavra, permitindo a compatibilização entre objetivos econômicos e ambientais e reduzindo a necessidade de intervenções corretivas complexas no pós-fechamento. A aplicação do método AHP mostrou-se uma ferramenta robusta para apoiar a tomada de decisão em contextos complexos e



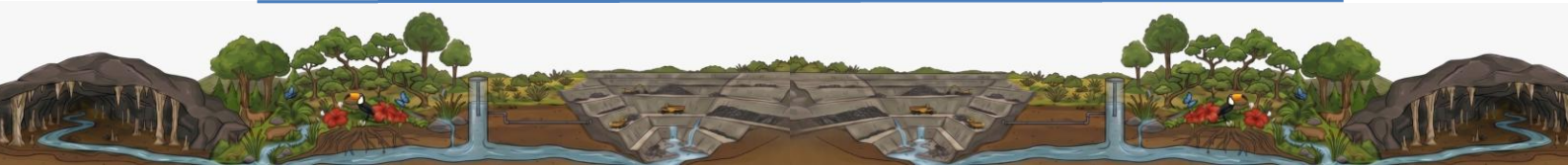
multidisciplinares, contribuindo para a seleção de soluções mais seguras e sustentáveis ao longo do ciclo de vida da mina.

### **Referências Bibliográficas**

Appelo, C. and Postma, D. (2005). Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd Edition, Balkema, Rotterdam. Londres.

Saaty, T.L., 1991. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operations Research.

**Palavras-chave:** Planejamento de Lavra; Fechamento de Mina; FEFLOW; PHREEQC; Análise Multicritério (AHP)



# Closing The Gap Between Water Balance And Reactive Geochemistry: A Python-Based Goldsim-Phreeqc Framework For Water Quality Prediction

Gregorio Faversani<sup>1</sup>, Nathan Martins<sup>2</sup>, Vinicius Garcia<sup>3</sup>, Felipe Costa<sup>4</sup>, Layane Silva<sup>5</sup>, Eduardo Cervi<sup>6</sup>, Gabriel Silveira<sup>7</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Corresponding Author: [gregorio.faversani@wsp.com](mailto:gregorio.faversani@wsp.com).

## Abstract

Predictive modelling of water quality in mining systems is often limited by simplified representations of geochemical processes within water balance models and by the restricted evaluation of hydrological scenarios. This study presents a integrated modelling framework that dynamically couples GoldSim and PHREEQC through a Python-based routine (PhreeqPy), enabling time-resolved simulation of reactive processes within a stochastic and dynamically coupled system.

The method was applied to a large-scale tailings storage facility (TSF) in Brazil, supported by a monitoring dataset collected since 2018 across more than 40 water quality monitoring points distributed among sumps, stockpiles, open pits, and the tailings dam. Reactive geochemical calculations were executed externally through PhreeqPy, allowing equilibrium-controlled reactions and dynamic mixing to be resolved at each daily timestep.

The integrated framework enabled the simulation of 50 stochastic hydrological realizations combined with two geochemical source-term scenarios, generating probabilistic envelopes of water quality evolution over a 15-year forecasting horizon. Results show that the model captured the range and trajectory of observed concentrations and differentiated the influence of hydrological variability versus source-term uncertainty, while enabling a broader characterization of long-term water quality trajectories across all modeled compartments. The approach provides a defensible basis for long-term forecasting and scenario-based water management under operational uncertainty.

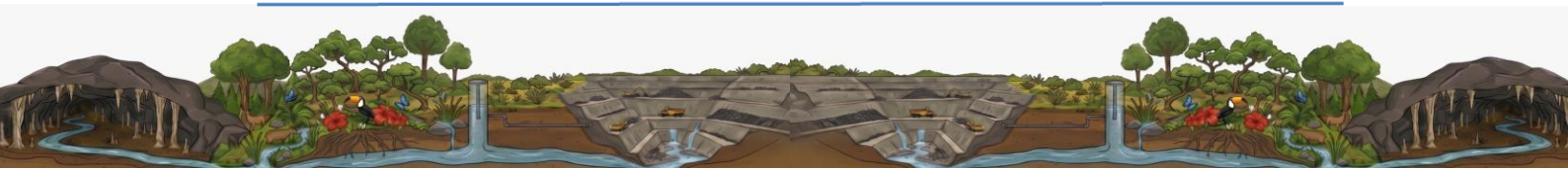
**Keywords:** Predictive model, Hydrogeochemistry, GoldSim, PHREEQC, Python

## Introduction

Predicting water quality in mining environments requires integrating hydrological processes with reactive geochemistry across spatial and temporal scales. Traditional decoupled approaches, where hydrology and geochemistry are modelled separately, often fail to capture dynamic feedback mechanisms that control flow paths, residence times, and chemical evolution, in addition to being limited in the number of scenarios and interactions that can be evaluated.

Tailings storage facilities add complexity due to operational practices, climate variability, and contributions from multiple sources. In these systems, water chemistry depends not only on mixing but also on thermodynamic constraints, mineral reactions, and redox changes.

This study presents a fully coupled hydrogeochemical framework linking GoldSim and PHREEQC through Python (PhreeqPy), enabling dynamic exchange of flows and compositions. The objective is to apply this integrated framework to a real mining system and evaluate its capability to reproduce observed trends, differentiate key controlling processes, and support long-term forecasting and predictive assessments.



## Conceptual Model and Data Integration

The workflow ensured alignment between the hydrogeological model, operational water balance, and geochemical processes. Monitoring and laboratory data were used to define representative source terms and ensure consistency between model inputs and observed operational interactions.

## Hydrological modelling (GoldSim)

GoldSim simulated daily water balance including operations, pumping, and climate inputs. A stochastic framework based on more than 50 years of precipitation data generated multiple realizations, quantifying hydrological variability (Figure 1). Daily flows were exported to the geochemical module for reactive calculations.

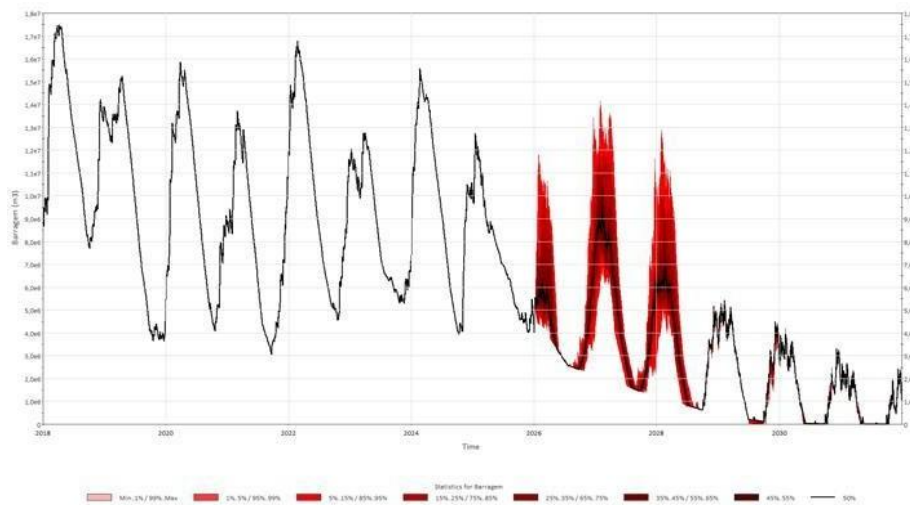


Figure 1: Probabilistic plot of the Tailings Storage Facility (TSF) volume with 50 realizations.

## Geochemical modelling (PHREEQC)

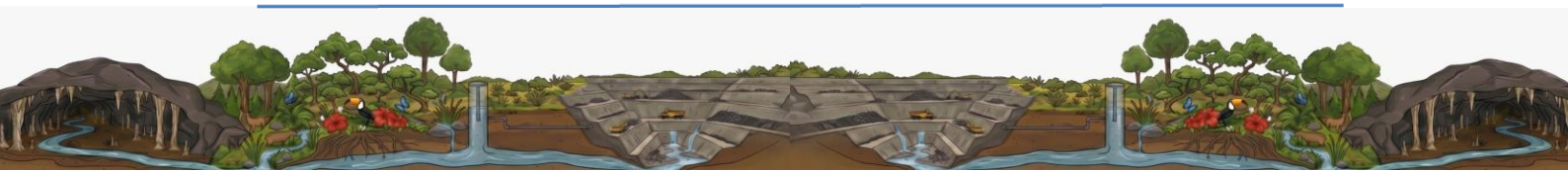
PHREEQC integration was implemented using the Contaminant Transport (CT) module and a Python-chem-based routine (PhreeqPy). At each timestep, flows and chemical compositions were transferred to PHREEQC, reactive calculations were executed, and updated concentrations returned to GoldSim. This allowed equilibrium-controlled reactions and dynamic mixing to be resolved consistently, enabling chemistry to evolve in response to hydrological changes.

## Scenario analysis and automation

Uncertainty was explored through multiple hydrological realizations and alternative geochemical source terms. Python automation ensured reproducibility, traceability, and efficient handling of large scenario sets.

## Calibration

Model calibration used observed monitoring data. Structures with well-defined flow regimes and consistent datasets showed strong agreement between simulated and observed concentrations. In contrast, compartments with limited flow constraints or less representative geochemical inputs required simplifying assumptions, increasing predictive uncertainty and highlighting data gaps.



## Results

The coupled GoldSim-PHREEQC framework captured both the magnitude and temporal direction of observed concentration trends in well-constrained structures, while highlighting data gaps and conceptual uncertainty in less monitored compartments. The simulations differentiated the relative influence of hydrological variability versus source-term uncertainty, showing that source-term composition is a primary control on long-term concentration trajectories, particularly under hydrological extremes.

The probabilistic simulation set (Figure 2) provided a more comprehensive representation of forecast uncertainty than deterministic or decoupled approaches. More importantly, it enabled a broader and more realistic characterization of long-term water quality trajectories, capturing the combined influence of hydrological variability and source-term composition across all modeled compartments. This predictive capability, central to the study, provides a robust basis for scenario-based evaluation and supports informed decision-making in operational water management.

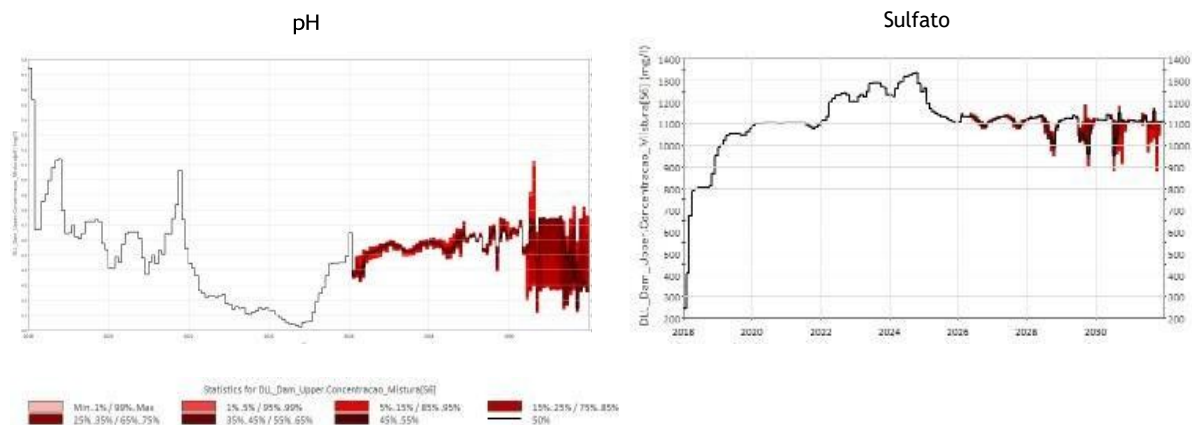
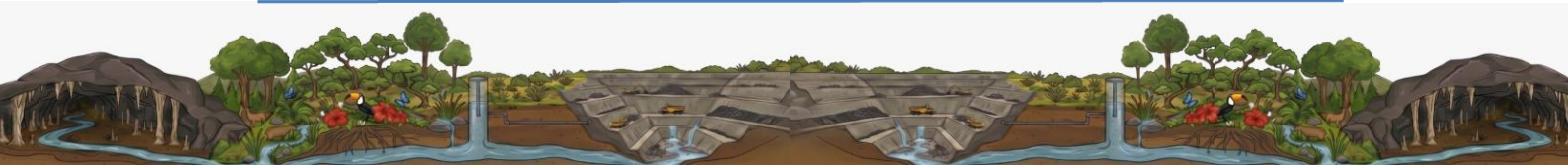


Figure 2: Probabilistic envelopes of water quality evolution for key constituents of concern.

## Conclusions

The study demonstrates a fully integrated GoldSim-PHREEQC modelling approach that addresses key limitations of decoupled methods. The framework enables consistent coupling between stochastic water balance and reactive geochemistry, improving representation of system dynamics and uncertainty.

This framework offers a practical and scalable pathway for integrating stochastic water balance and reactive geochemistry, improving confidence in long-term mine water quality forecasting and supporting risk-informed operational decision-making.



# Água que Corre nas Rochas: Sensibilização Ambiental Sobre as Águas e o Carste Em Sete Lagoas (MG)

Icaro Assis<sup>1,2</sup>, Carla Pereira<sup>2</sup>, Mariana Barbosa Timo<sup>2</sup>, Luiz Eduardo Panisset Travassos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID), Instituto de Geociências (IGC), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), <sup>2</sup> Escola Brasileira de Espeleologia (eBRe), <sup>3</sup> Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas).

Autor correspondente: [icaroassis@ufmg.br](mailto:icaroassis@ufmg.br)

## Resumo

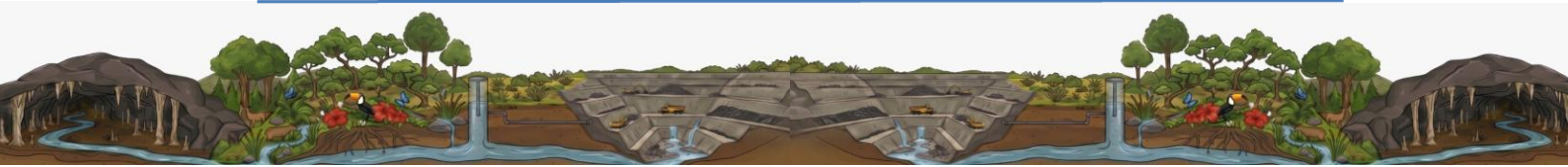
O presente trabalho apresenta e discute a ação de educação e sensibilização ambiental “Água que corre nas rochas: explorando o mundo das cavernas”, desenvolvida pela Escola Brasileira de Espeleologia (eBRe), em parceria com o Laboratório de Estudos Hidrogeológicos da UFMG (LEHID/UFMG), durante o VI Seminário Águas no Carste, realizado em 20 de março de 2026, no Monumento Natural Estadual Gruta Rei do Mato, em Sete Lagoas (MG). A atividade foi concebida para um público diverso, envolvendo estudantes, professores, universitários, visitantes e moradores, com o propósito de traduzir conhecimentos técnico-científicos sobre carste, formação de cavernas, circulação subterrânea da água, aquíferos e conservação ambiental para uma linguagem acessível, visual e participativa. Metodologicamente, o texto constitui um relato de experiência, de abordagem qualitativa e caráter descritivo, sustentado pelos roteiros da atividade e pela bibliografia sobre educação ambiental, ensino do carste e formação espeleológica. A ação desenvolveu-se em três momentos articulados: exibição comentada de vídeos; mediação interativa com maquetes, aquário didático e apresentação de pesquisas realizadas em Sete Lagoas; e oficina prática voltada ao ciclo da água. O relato indica que a combinação entre recursos visuais, mediação dialógica e participação ativa favorece a aproximação entre universidade, escola, gestão ambiental e sociedade, ampliando a inteligibilidade pública de processos subterrâneos pouco perceptíveis no cotidiano.

**Palavras-chave:** educação ambiental; carste; cavernas; sensibilização ambiental; Sete Lagoas.

## Introdução

A educação ambiental constitui um campo estratégico para ampliar a compreensão social sobre problemas e processos que afetam o meio ambiente, especialmente quando articulada às realidades concretas dos territórios e ao cotidiano dos sujeitos (BRASIL, 1999). Em regiões cársticas, essa discussão ganha relevância particular, pois envolve sistemas hidrogeológicos sensíveis, presença de cavernas, circulação subterrânea da água, recarga de aquíferos e diferentes formas de vulnerabilidade ambiental. Por se tratarem, em grande medida, de processos pouco visíveis a olho nu, a mediação pedagógica assume papel decisivo na tradução do conhecimento técnico-científico para públicos não especializados (MENDES, 2013).

No caso de Sete Lagoas, a centralidade do contexto hídrico-cárstico contrasta com lacunas de compreensão pública acerca do funcionamento do aquífero, de suas fragilidades e das implicações do uso intensivo da água subterrânea (CRUZ, 2024). Nesse cenário, práticas educativas que articulem informação científica, linguagem acessível e vínculo territorial tornam-se especialmente relevantes. Ao mesmo tempo, a trajetória recente da eBRe evidencia o potencial da formação espeleológica e da educação não formal como instrumentos de difusão do conhecimento e valorização do patrimônio subterrâneo (TIMO; RASTEIRO; MEYER, 2019; TIMO et al., 2023). Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar e analisar a ação educativa desenvolvida no VI Seminário Águas no Carste, destacando sua estrutura pedagógica e sua pertinência para processos de sensibilização ambiental em contexto cárstico.



## Materiais e Métodos

O texto foi elaborado como relato de experiência, de caráter descritivo e abordagem qualitativa. A atividade ocorreu no Monumento Natural Estadual Gruta Rei do Mato, em Sete Lagoas (MG), no âmbito do VI Seminário Águas no Carste, e foi organizada pela eBRe e pelo LEHID/UFMG para um público heterogêneo, composto por estudantes da educação básica e do ensino médio, professores, universitários, visitantes e moradores. A análise concentrou-se na relação entre objetivos, conteúdos, linguagem e recursos didáticos mobilizados.

A estrutura pedagógica foi dividida em três momentos principais. O primeiro consistiu na exibição comentada de vídeos introdutórios sobre carste, cavernas e ciclo da água, funcionando como porta de entrada temática e vocabulário comum para os participantes. O segundo correspondeu a uma mediação interativa com maquetes, esquemas visuais, aquário didático e apresentação de projetos técnico-científicos desenvolvidos em Sete Lagoas, buscando demonstrar, de modo concreto, processos como infiltração, percolação, armazenamento, transporte subterrâneo da água e fragilidade dos aquíferos. O terceiro momento consistiu em oficina prática voltada à representação do ciclo da água em sua totalidade, integrando evapotranspiração, condensação, precipitação, infiltração e escoamento. Os resultados foram discutidos qualitativamente, a partir do desenho pedagógico da ação e de sua coerência com a literatura utilizada.

## Resultados e Discussão

A ação apresentou coerência entre proposta temática, linguagem adotada e recursos didáticos mobilizados. A exibição comentada de vídeos cumpriu função inicial de sensibilização, introduzindo noções básicas sobre carste, formação de cavernas, circulação subterrânea da água e conservação ambiental de maneira acessível. Esse primeiro momento foi importante para reduzir a distância entre conceitos geocientíficos especializados e o repertório cotidiano do público, criando base comum para as etapas seguintes.

Na sequência, a mediação interativa com maquetes, aquário didático e apresentação de pesquisas realizadas em Sete Lagoas ampliou a dimensão concreta da experiência. Ao traduzir visualmente processos como infiltração, percolação, armazenamento e fluxo subterrâneo, a atividade tornou mais inteligíveis fenômenos que, em geral, permanecem abstratos para públicos leigos. Além disso, ao relacionar os conteúdos ao território de Sete Lagoas, a ação reforçou o vínculo entre conhecimento científico, realidade local e patrimônio natural, aspecto especialmente relevante em uma cidade marcada pela dependência de recursos hídricos subterrâneos e pela presença de feições cársticas expressivas (CRUZ, 2024).

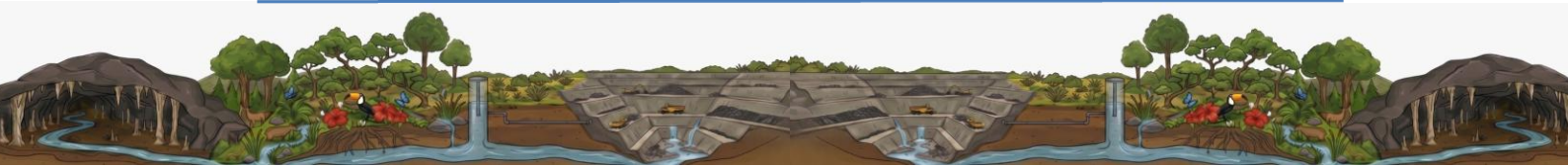
A oficina prática, por sua vez, deslocou os participantes para uma posição mais ativa, favorecendo maior envolvimento com os conteúdos trabalhados. Essa dimensão participativa dialoga com a literatura que enfatiza a importância de abordagens contextualizadas, visuais e práticas no ensino do carste e na educação ambiental (MENDES, 2013). Também converge com a experiência acumulada pela eBRe na formação espeleológica e na difusão pública do conhecimento sobre cavernas, patrimônio espeleológico e conservação (TIMO; RASTEIRO; MEYER, 2019; TIMO et al., 2023).

O desenho pedagógico da atividade sugere potencial para fortalecer a aproximação entre universidade, escola, gestão ambiental e sociedade civil. Em espaços não formais de educação, como seminários e unidades de conservação, a tradução do conhecimento técnico-científico para formatos lúdicos e participativos pode contribuir para ampliar o debate público sobre água, aquíferos, cavernas e responsabilidade socioambiental.

## Considerações Finais

A atividade “Água que corre nas rochas” mostrou-se pertinente como prática de educação e sensibilização ambiental voltada ao contexto cárstico de Sete Lagoas. Sua principal contribuição esteve na articulação entre linguagem acessível, recursos visuais, mediação técnico-científica e participação prática do público, reunindo elementos capazes de aproximar processos hidrogeológicos complexos do cotidiano social.

O relato também reforça a relevância de espaços não formais para a difusão pública das geociências e para a valorização do patrimônio hídrico e espeleológico. Em um município cuja dinâmica urbana e ambiental está fortemente relacionada ao carste, ações dessa natureza podem favorecer processos de pertencimento territorial, diálogo entre diferentes públicos e maior sensibilização para a conservação. Neste sentido, a experiência acentua o papel estratégico da educação ambiental como ponte entre ciência, território e sociedade, especialmente em contextos cársticos marcados pela alta vulnerabilidade e pela relevância hídrica.



## Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 abr. 1999.

CRUZ, Icaro Assis. Influências e pressões entre o contexto hídrico-cárstico e os processos antrópicos: uma abordagem holística das interações sistêmicas entre a sociedade e o contexto geológico na cidade de Sete Lagoas - MG e seus desdobramentos. 2024. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

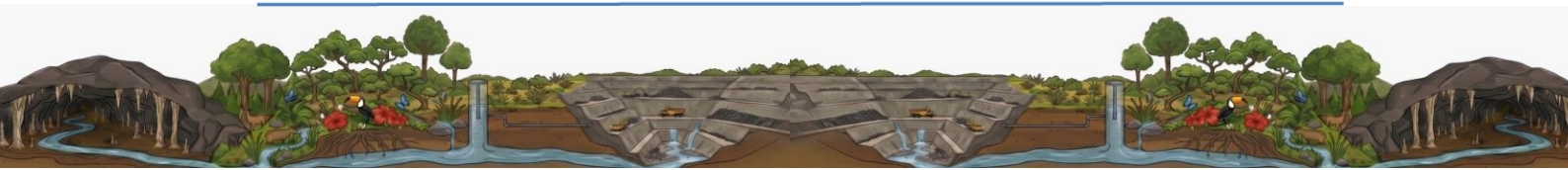
MENDES, Joseane Biazini. Propostas didáticas para o ensino do carste na educação básica. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MEYER, Bruna de Oliveira; TIMO, Mariana Barbosa; FIGUEIREDO, Luiz Afonso Vaz; DONATO, Christiane; ASSIS, Ícaro. Cartilhas didáticas: ferramentas essenciais para divulgação espeleológica. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 19., 2025, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: União Internacional de Espeleologia, 2025. p. 159-163, VIII.

TIMO, Mariana Barbosa; RASTEIRO, Marcelo; MEYER, Bruna de Oliveira. Formação de espeleólogos no Brasil: a fundação da Escola Brasileira de Espeleologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35., 2019, Bonito. Anais [...]. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2019. p. 466-473.

TIMO, Mariana Barbosa; FIGUEIREDO, Luiz Afonso Vaz; ARAGÃO, Tereza Maria Franca Muniz; PEREIRA, Carla Cristina Alves; COSTA, Willyam de Carvalho. Formação espeleológica no Brasil: os 5 anos de funcionamento da Escola Brasileira de Espeleologia (eBRe). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 37., 2023, Curitiba. Anais [...]. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2023. p. 443-447.

TIMO, Mariana Barbosa; FIGUEIREDO, Luiz Afonso Vaz; ARAGÃO, Tereza Maria Franca Muniz; SARMENTO, Ronaldo Lucrécio. Speleological Training in Brazil: the implementation of the Brazilian School of Speleology. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 18., 2022, França. Anais [...]. Savoie: União Internacional de Espeleologia, 2022.



# Revisão Bibliográfica dos Impactos Hidroambientais no Rio São Francisco e Suas Implicações Para Comunidade Barranqueira de Pirapora (MG)

Isabella Marques Silva Souza<sup>1</sup>, Ana Carolina Gonçalves Moreira<sup>2</sup>, Anna Carolina Viana Rodrigues<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [bellamarquessouza@gmail.com](mailto:bellamarquessouza@gmail.com).

## Resumo

O presente trabalho analisa através de uma revisão bibliográfica as dinâmicas socioambientais e territoriais da comunidade barranqueira de Pirapora, localizada no Alto curso do Rio São Francisco, articulando aspectos físicos e sociais que estruturam o modo de vida ribeirinho. A partir da análise da bacia hidrográfica, dos processos geomorfológicos e das transformações decorrentes de políticas desenvolvimentistas, o estudo evidencia como intervenções dessa natureza, especialmente a construção de hidrelétricas, a expansão agropecuária e a industrialização, alteraram profundamente a dinâmica fluvial e impactaram os modos de subsistência locais. A pesquisa demonstra que a degradação ambiental, o assoreamento, a contaminação hídrica e o controle artificial do regime do rio impactam diretamente atividades tradicionais como a pesca, a agricultura de vazante e o transporte fluvial.

**Palavras-chave:** impactos hidroambiental; comunidades ribeirinhas; Rio São Francisco; Pirapora; hidrelétricas.

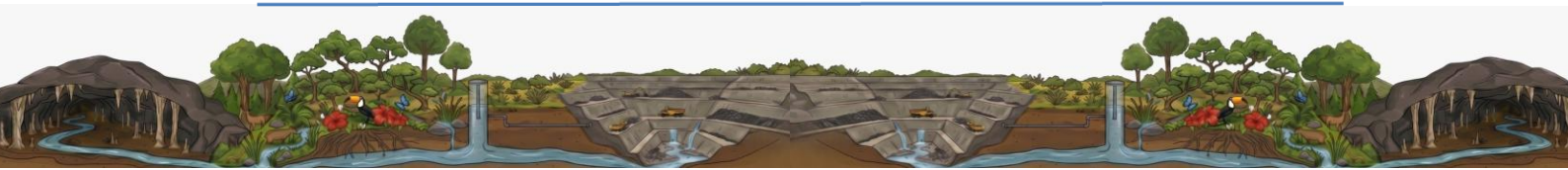
## Introdução

Em seu trecho em Pirapora, o Rio São Francisco caracteriza-se por baixa declividade, formação de planícies aluviais e intensa sedimentação, fatores que favorecem tanto a navegabilidade quanto a ocupação humana nas margens. No entanto, essas mesmas características tornam o ambiente altamente suscetível à erosão fluvial, ao assoreamento e a alterações provocadas por intervenções externas, formando uma paisagem comumente chamada de “barrancas” nas margens do rio. Os barranqueiros (nome ligado a essa condição geológica) de Pirapora constrói historicamente sua existência a partir da relação direta com o rio, que atua como eixo estruturador da vida econômica, social e cultural.

A partir do avanço de políticas desenvolvimentistas, sobretudo durante o período de modernização do Estado brasileiro no século XX, a relação dos barranqueiros com o rio foi profundamente transformada. A construção de barragens, a expansão da agropecuária e a instalação de atividades industriais alteraram o regime hidrológico, a qualidade da água e a dinâmica ecológica do rio, impactando diretamente os modos de vida ribeirinhos.

## Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida a partir da sistematização de revisões bibliográficas, articulando dados de natureza físico-natural e socioambiental sobre a região de Pirapora e o Alto São Francisco. Foram utilizados dados secundários provenientes de estudos acadêmicos sobre qualidade da água, uso do solo, impactos de barragens e modos de vida ribeirinhos. A análise foi ratificada pela inclusão de um componente empírico-qualitativo; relatos de experiências de moradores da região.



## Resultados e Discussões

O Alto curso do Rio São Francisco apresenta relevo suavemente ondulado, com colinas e vales largos formados por processos erosivos de longa duração. A região está inserida no Cráton do São Francisco, composta por formações sedimentares como arenitos e siltitos, altamente suscetíveis à erosão. Em Pirapora, o baixo gradiente fluvial favorece o acúmulo de sedimentos e a formação de planícies aluviais, resultando em margens instáveis (as barrancas) constantemente retrabalhadas pela dinâmica das águas. A substituição da vegetação ciliar por pastagens e monoculturas intensificou esses processos, ampliando o assoreamento e a degradação ambiental.

Nesse contexto, a agricultura de vazante aproveitava os solos férteis expostos durante os períodos de estiagem, permitindo o cultivo de alimentos básicos como milho, feijão e mandioca. Além disso, o transporte fluvial desempenhava papel fundamental na integração regional, sendo exercido por remeiros e barqueiros.

A intensificação das atividades agropecuárias e industriais provocou alterações significativas na qualidade ambiental do rio. O uso de agroquímicos, aliado à remoção da cobertura vegetal, resultou no aumento da erosão, da turbidez e da contaminação da água por metais e nutrientes. No âmbito industrial, a presença de distritos industriais contribuiu para na produção de efluentes, elevando a concentração de metais pesados como chumbo (Pb) e cádmio (Cd), comprometendo a qualidade da água e a saúde das populações locais.

As barragens hidrelétricas representam um dos principais vetores de transformação. Ao regular artificialmente o fluxo do rio, essas estruturas alteram o regime de cheias, reduzem a sedimentação natural e impactam diretamente a reprodução de espécies aquáticas. Tais transformações ambientais resultaram na desestruturação das atividades tradicionais. A pesca foi impactada devido à redução da biodiversidade, enquanto a agricultura de vazante tornou-se incerta em função do controle artificial das águas. O vínculo cultural com o rio também foi afetado, comprometendo práticas simbólicas, saberes tradicionais e manifestações culturais.

## Considerações Finais

A análise da comunidade barranqueira de Pirapora evidencia que o espaço geográfico é produzido pela interação entre processos naturais e ações humanas. O caso do Rio São Francisco demonstra que a modernização, embora tenha promovido avanços econômicos e energéticos, gerou impactos socioambientais, comprometendo a reprodução social das comunidades ribeirinhas. A degradação ambiental, a perda de autonomia e a fragilização cultural revelam que o chamado progresso não se distribuiu de forma equitativa, produzindo territórios marcados por desigualdades e conflitos. Dessa forma, o estudo reforça a importância de abordagens geográficas integradas, capazes de articular natureza e sociedade.

## Referências Bibliográficas

DICTORO, Vinícius P.; HANAI, Fernando Y. Simbolismos da água: valores, saberes e tradições dos moradores de Pirapora-MG nas margens do Rio São Francisco. Caderno de Geografia, Belo Horizonte, v. 27, n. 50, p. 621–641, 2017.

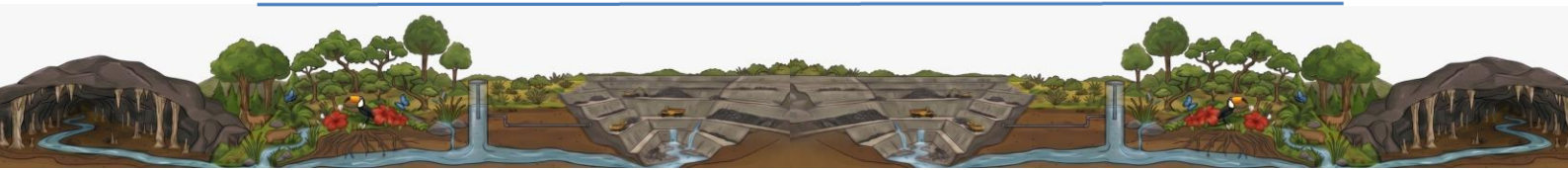
LOPES, Rubens. Barranqueiros do rio São Francisco. Revista Brasileira de Estudos Latino-Americanos (REBELA), v. 4, n. 1, p. 156–173, jan./abr. 20

14. Universidade Federal de Santa Catarina – Instituto de Estudos Latino-Americanos (IELA)

PEREIRA, R. M. R. Sobre (vivências): modos de vida, trabalho e institucionalização dos pescadores artesanais do São Francisco (1960–2014). Doutorado. Uberlândia, 2014.

RIBEIRO, Elizêne Veloso et al. Metais pesados e qualidade da água do Rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora-MG: índice de contaminação. Geonomos, 2012.

RIBEIRO, Elizêne Veloso et al. Análise têmporo-espacial do uso do solo e sua influência na qualidade da água no segmento do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora-MG. XVIII Simpósio Nacional de Recursos Hídricos, 2009.

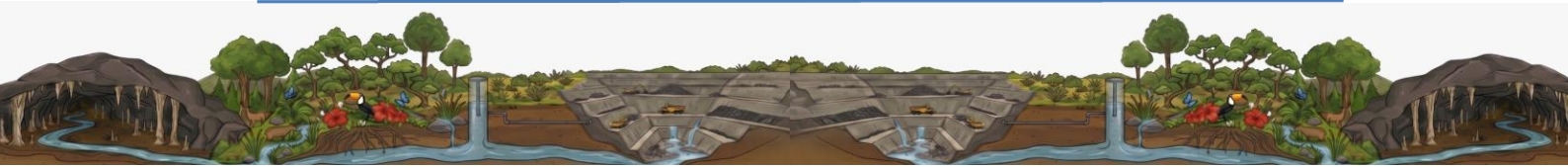


---

SERRA, Jane Piton; OLIVEIRA, T. A. Impactos ambientais decorrentes da construção de barragens de usinas hidrelétricas: reflexões e desdobramentos físico-naturais. In: Ciências Ambientais: diagnósticos ambientais. Ribeirão Preto, p. 64–83, 2020.

TRINDADE, Wallace Magalhães. Concentração e distribuição de metais pesados em sedimentos do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora/MG: fatores naturais e antrópicos. 2010. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ZHOURI, Andrea. Os vazanteiros do Rio São Francisco: natureza, território e conflito social. 2005. Dissertação (Mestrado em Antropologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.



# Avaliação Conceitual e Numérica De Confinamento Hidráulico Para Lago de Cava

<sup>1</sup>Lílian Trindade Hubner, <sup>2</sup>Felipe André Ferreira Costa, <sup>3</sup>Isabella Brito Andrade, <sup>4</sup>Leonardo Machado, <sup>5</sup>Andreia Lais Pereira Resende, <sup>6</sup>Debora Maria Diniz Barbosa, <sup>7</sup>Anne Carneiro Brumatti, <sup>8</sup>Adrieli Thalia Pereira

<sup>1</sup>WSP Brasil. Autor correspondente: [lilian.hubner@wsp.com](mailto:lilian.hubner@wsp.com)

## Introdução

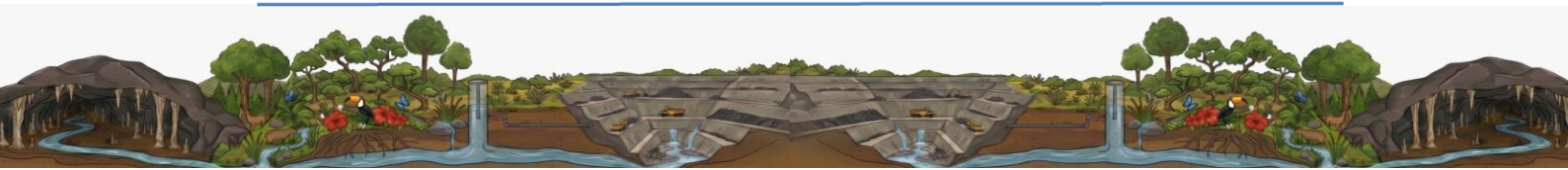
O fechamento de minas a céu aberto leva, de forma natural, à recuperação do nível d'água subterrânea após a interrupção do rebaixamento, resultando no enchimento progressivo das cavas e na formação de lagos de cava (*pit lakes*). Esses sistemas apresentam comportamento hidrológico e hidrogeológico dinâmico, controlado pelo balanço hídrico, pelas interações com os aquíferos adjacentes e pelas características geométricas da cava. A compreensão desses processos é essencial para prever níveis máximos de enchimento, avaliar a estabilidade hidráulica e mitigar riscos de extravasamento superficial para o meio ambiente.

Em cenários de fechamento com ou sem disposição de rejeitos em cava, e especialmente quando a qualidade da água do lago pode representar risco ambiental segundo as normativas vigentes, a avaliação do confinamento hidráulico superficial e subterrâneo torna-se um elemento central da segurança ambiental. A capacidade da cava em conter fluxos superficiais e subterrâneos, mantendo-se como zona preferencial de descarga e evitando a migração de água potencialmente impactada para o meio externo, é determinante para o desempenho do sistema no pós-fechamento. Nesse contexto, a análise integrada dos processos hidrológicos, hidrogeológicos e geoquímicos associados aos lagos de cava fornece subsídios fundamentais para avaliações de risco e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão ambiental.

**Palavras-chave:** Fechamento de Mina; Pit Lake; Conectividade Hidráulica; Modelagem Conceitual; Modelagem Numérica.

## Metodologia

Foi realizada uma análise da conectividade hidráulica da cava com o entorno por meio de avaliação analítica (Dupuit, 1863; Freeze e Cherry, 1979) e numérica, utilizando modelo hidrogeológico em FEFLOW, consideraram-se as possíveis vias de interação do lago de cava com o meio externo: (i) fluxo subterrâneo, a partir da relação entre níveis hidráulicos, estruturas geológicas e condições de confinamento; e (ii) fluxo superficial, associado ao potencial de extravasamento na cota crítica da cava. Elementos-chave como nível de base regional, cotas de nascentes, divisor hidrogeológico, estruturas preferenciais de fluxo e cota de extravasão foram analisados para definir faixas de risco em função do nível do lago. A avaliação também incluiu tempo de trânsito das águas subterrâneas, magnitude de fluxo, processos de atenuação, modelagem hidrogeoquímica e modelagem numérica. Em modelo hidrogeológico de fluxo testou-se quantitativamente as condições de confinamento e os níveis de risco definidos conceitualmente, simulando cenários com diferentes cotas do lago e variações em parâmetros hidrodinâmicos.



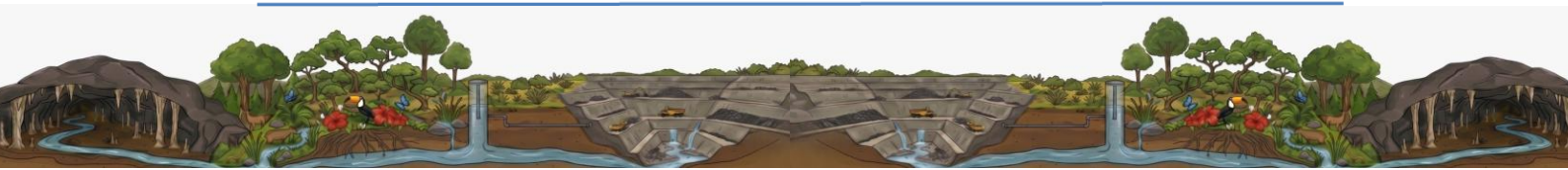
## Resultados

A classificação do risco de conectividade hidráulica foi realizada de forma conceitual, com base na elevação do nível do lago em relação a cotas hidrogeológicas de referência, integrando o potencial de fluxo subterrâneo e superficial. Foram definidos cinco níveis de risco: (i) muito baixo/inexistente, quando o nível do lago está abaixo do nível de base regional, sem potencial de descarga subterrânea e superficial; (ii) baixo, entre o nível de base e a cota da nascente, mantendo-se o confinamento hidráulico raso e ausência de fluxo superficial; (iii) intermediário, entre a nascente e o divisor hidrogeológico, com aumento da incerteza quanto à manutenção do confinamento, visto que a definição do divisor é uma componente dinâmica e depende, além das unidades hidrogeológicas, da variação sazonal da recarga na área; (iv) alto, acima do divisor hidrogeológico e abaixo da borda livre, indicando provável contribuição subterrânea, mas ainda sem contribuição superficial direta; e (v) muito alto, acima da borda livre, com possibilidade de extravasamento e contribuição superficial direta. Os níveis foram definidos a partir da relação entre a carga hidráulica do lago e os principais elementos de controle do sistema, permitindo avaliar progressivamente o risco de migração para a bacia adjacente.

Com o objetivo de validar e refinar o modelo conceitual, foi desenvolvido um modelo numérico hidrogeológico, permitindo a avaliação quantitativa das condições de confinamento hidráulico e dos níveis de risco previamente estabelecidos. Foram simulados cenários preditivos considerando diferentes cotas do lago, variações nos principais parâmetros hidrodinâmicos e condições críticas associadas a estruturas preferenciais de fluxo. Os resultados indicam que, para os níveis de enchimento mais prováveis, limitados pela cota de extravasão, o sistema permanece hidráulicamente estável, com preservação do divisor de águas subterrâneo, baixos gradientes de fluxo e ausência de conexão com a drenagem a jusante, corroborando os níveis de risco classificados como baixos a intermediários. Apenas em cenários extremos e pouco prováveis observou-se a ruptura do confinamento hidráulico, reforçando a consistência das faixas de risco definidas e a confiabilidade da análise conceitual.

O estudo indica, portanto, que, para o caso avaliado, o principal fator de risco associado à cava está relacionado ao potencial de extravasamento do lago, e não à conectividade hidráulica subterrânea. Dessa forma, o controle do nível do lago foi avaliado de forma integrada a estudos de trânsito de cheias e à definição da borda livre do lago de cava. Essa abordagem permitiu estabelecer cotas operacionais compatíveis com eventos hidrológicos extremos, assegurando a prevenção de contribuições superficiais para o meio ambiente.

A seguir é apresentado a Figura 1, que mostra a Classificação do risco por faixas de nível do lago.



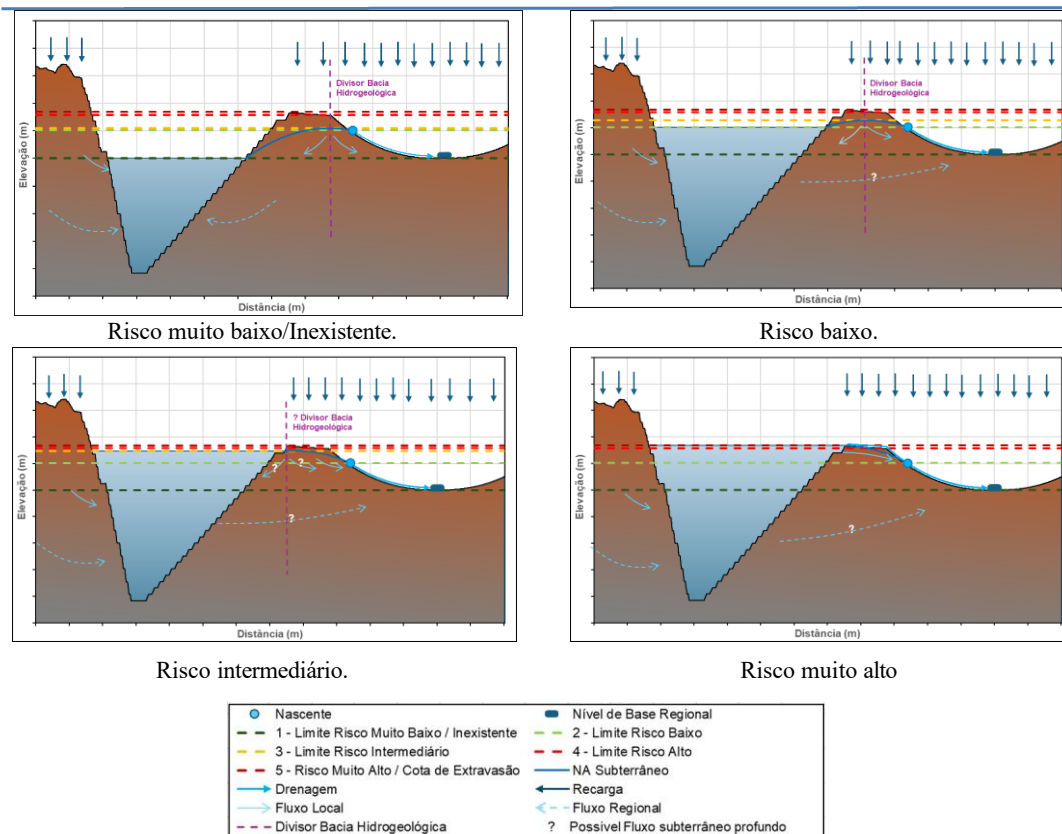


Figura 1 - Classificação conceitual do risco por faixas de nível do lago

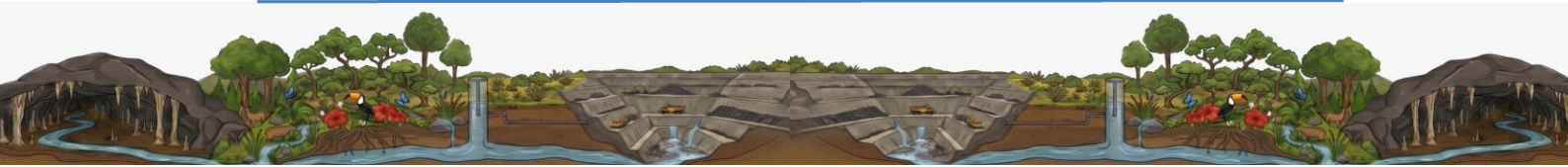
## Conclusão

Os resultados demonstram que a avaliação integrada de lagos de cava no fechamento de mina é essencial para compreender o comportamento do sistema e apoiar decisões técnicas seguras. A combinação entre um modelo conceitual robusto e a modelagem numérica permitiu organizar os principais processos envolvidos, reduzir incertezas e avaliar, de forma confiável, as condições de confinamento hidráulico e estabilidade do lago sob diferentes cenários. De forma consolidada, o estudo indica que, sob condições operacionais realistas e com a adoção de controles adequados, o sistema tende a permanecer estável, com manutenção do confinamento hidráulico e mitigação de riscos ambientais. Esses resultados reforçam a importância de abordagens preditivas, integradas e orientadas por risco como base para uma gestão responsável e segura no período pós-fechamento de minas.

## Referência Bibliográfica

DUPUIT, J. (1863). *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. Dunod, Paris.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.



# Controle Hidrológico na Interação Água–Sedimento: Evidências Geoquímicas no Rio Piauí (Araçuaí, MG)

Lilyan de Almeida Cunha<sup>1</sup>, Julielem Caroline Souza<sup>2</sup>, Hernando Baggio Filho<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, [lilyan.cunha@ufvjm.edu.br](mailto:lilyan.cunha@ufvjm.edu.br)

## Resumo

A interação entre sedimentos de fundo e águas superficiais desempenha papel fundamental na dinâmica geoquímica de sistemas fluviais. Este estudo avaliou a relação entre sedimentos e água no rio Piauí (MG), considerando períodos sazonais distintos influenciados por variabilidade climática de grande escala. Foram analisados dados de 13 pontos amostrais por período, aplicando-se a correlação de Pearson entre os teores geoquímicos dos sedimentos e as concentrações químicas da água, associada aos parâmetros físico-químicos (pH, OD e CE). O Li apresentou forte correlação, sugerindo controle por dissolução mineral, enquanto Fe e Mn refletiram influência de condições redox. Zn, Pb e Cu apresentaram comportamento dependente do pH e de processos de adsorção. Observou-se comportamento hidrológico inverso, com maior vazão no período seco e menor no úmido. Em condições de menor vazão, houve maior tempo de residência da água e intensificação das interações geoquímicas, enquanto, na maior vazão, predominaram processos físicos. Assim, sob influência de anomalias hidrológicas, a vazão se destacou como o principal fator de controle da interação água–sedimento.

**Palavras-chave:** Água; Sedimentos; Rio Piauí; Geoquímica; Parâmetros físico-químicos.

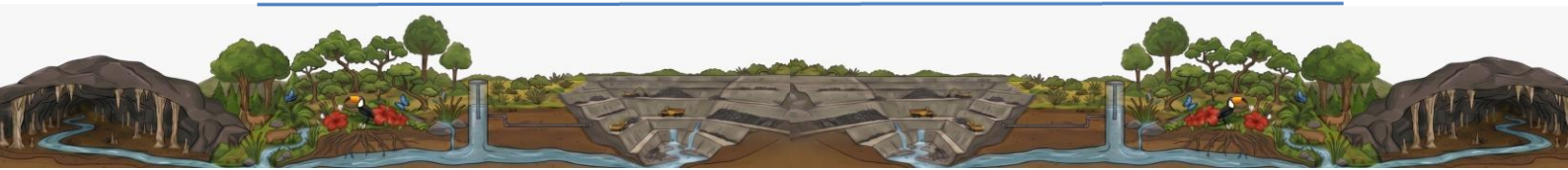
## Introdução

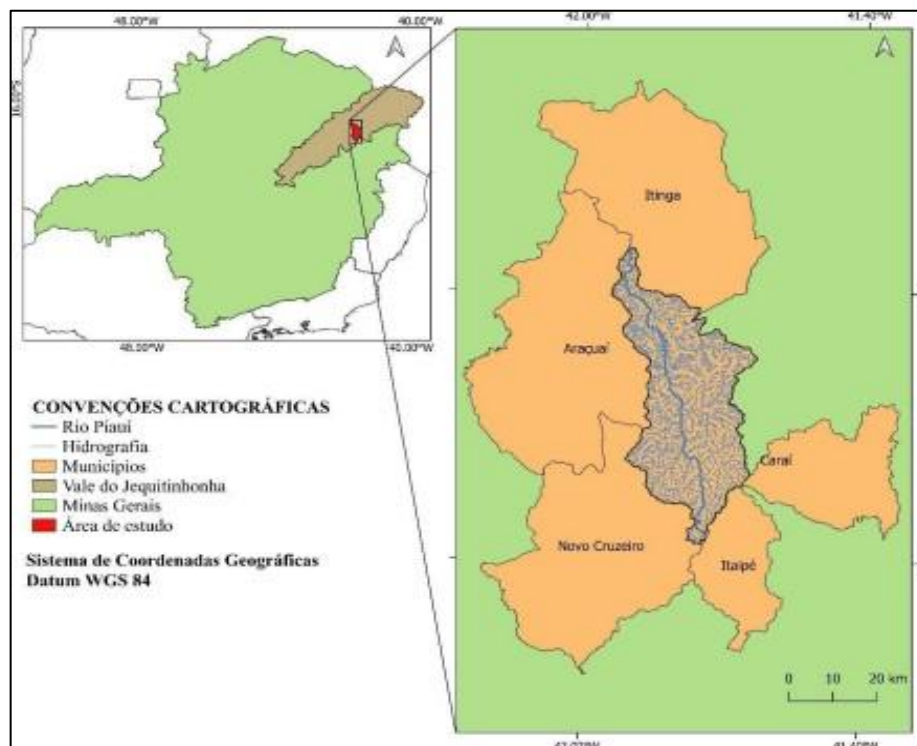
A interação entre sedimentos de fundo e a coluna d'água desempenha papel fundamental na dinâmica geoquímica de sistemas fluviais. Essa interação reflete o controle litológico e processos como dissolução, adsorção e reações redox, que regulam a mobilidade dos elementos (Förstner; Wittmann, 1981). A intensidade desses processos é fortemente condicionada pela dinâmica hidrológica, como por exemplo a vazão, que controla a energia do sistema, o transporte de partículas e o tempo de residência da água (Baggio, 2008).

A sazonalidade climática é amplamente utilizada como base interpretativa da dinâmica de sistemas fluviais. No entanto, respostas hidrológicas podem divergir desse padrão em função de forçantes climáticas de larga escala, que induzem anomalias na precipitação e, conseqüentemente, na descarga fluvial (Dongen *et al.*, 2022). Essas anomalias resultam em padrões de vazão não diretamente associados à sazonalidade típica, promovendo alterações significativas na dinâmica hidrogeoquímica dos sistemas aquáticos. Nesse contexto, este estudo avaliou a interação entre sedimentos de fundo e a composição química da água no rio Piauí (Minas Gerais), com ênfase no comportamento da dinâmica hídrica, em especial, da vazão.

## Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região nordeste do estado de Minas Gerais, como mostra a Figura 1. O rio Piauí possui aproximadamente 110 km de extensão e integra a bacia do rio Jequitinhonha. Geologicamente, a região insere-se no Orógeno Araçuaí, sendo composta majoritariamente por rochas graníticas, xistos e pegmatitos LCT. A bacia apresenta importância regional para abastecimento hídrico e atividades agropecuárias e minerárias.





**Figura 1-** Mapa de localização da área de estudo. **Fonte:** ANA e IBGE, 2026. Adaptado pelos autores.

## Metodologia

A realização do estudo envolveu três etapas (planejamento de pesquisa, trabalhos de campo e análises laboratoriais). Por período climático, seco em 2022 e úmido em 2023, foram selecionados 13 pontos de amostragem de sedimentos de fundo e 13 pontos de coleta de água ao longo da drenagem principal do rio Piauí.

As análises dos parâmetros físico-químicos pH, OD e CE foram realizadas *in situ* a partir da sonda multiparâmetro. Para análises geoquímicas dos sedimentos realizaram-se a técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva e AAS para o elemento lítio. As análises químicas da água foram realizadas com o auxílio do ICP-OES.

Para a análise integrada água-sedimento, os teores químicos da água e sedimentos foram tratados quanto aos valores abaixo do limite de detecção por substituição por LD/2. A relação entre as matrizes foi avaliada por meio da correlação de Pearson ( $r$ ), aplicada separadamente para os períodos seco e úmido.

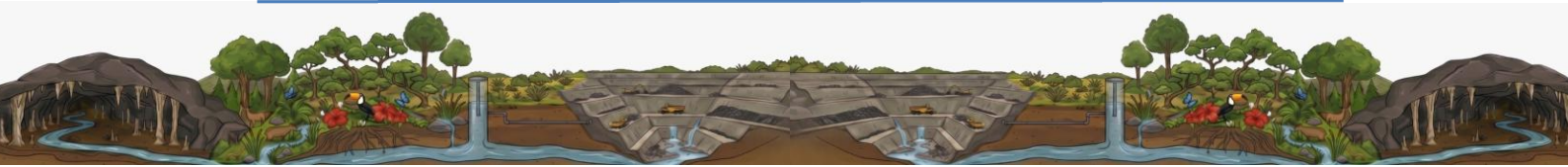
## Resultados e Discussão

Para a interpretação dos resultados observou-se, inicialmente, o comportamento hidrológico atípico na área de estudo, no qual o período seco apresentou maior vazão ( $0,90 \text{ m}^3/\text{s}$ ), enquanto o período úmido registrou menor vazão ( $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ ), esse fato deu-se devido a forçantes climáticas extremas associadas a eventos ENSO. Essa inversão controlou diretamente a dinâmica dos processos geoquímicos, condicionando a relação entre água e sedimento.

A correlação entre água e sedimento de fundo ocorreu de forma seletiva, restrita apenas aos elementos comuns (Zn, Pb, Mn, Li, Fe, Cu, Cr, Ba e Al). Essa correlação evidenciou que processos físico-químicos controlam a mobilidade e a retenção dos elementos no sistema.

O Li destacou-se por apresentar forte correlação, especialmente no período de menor vazão, indicando comportamento conservativo e associação direta com a dissolução mineral, o que sugere uma conexão geoquímica consistente entre sedimento e água. Em contraste, o Al apresentou correlação negativa, refletindo sua baixa mobilidade e forte associação com a fase sólida, caracterizada pelo controle litológico. Os elementos como Fe e Mn mostraram comportamento dependente das condições redox, com maior mobilidade do Mn no período de menor vazão, associada à redução do oxigênio dissolvido.

Os metais traço Zn, Pb, Cu, Cr e Ba apresentaram comportamento variável, indicando controle por múltiplos fatores, especialmente pH e processos de adsorção. Valores mais baixos de pH favoreceram a



mobilização desses elementos, enquanto condições mais alcalinas promoveram sua retenção nos sedimentos. Cr e Ba, por sua vez, sugeriram controle adicional relacionado à mineralogia e à disponibilidade de fases portadoras.

Os parâmetros físico-químicos corroboram essa interpretação. A variação do pH atua diretamente na solubilidade dos metais, enquanto o oxigênio dissolvido regula processos redox, sobretudo para Fe e Mn. A condutividade elétrica, mais elevada no período de menor vazão, indicou maior concentração de espécies dissolvidas, associada ao aumento do tempo de residência da água e intensificação das interações geoquímicas.

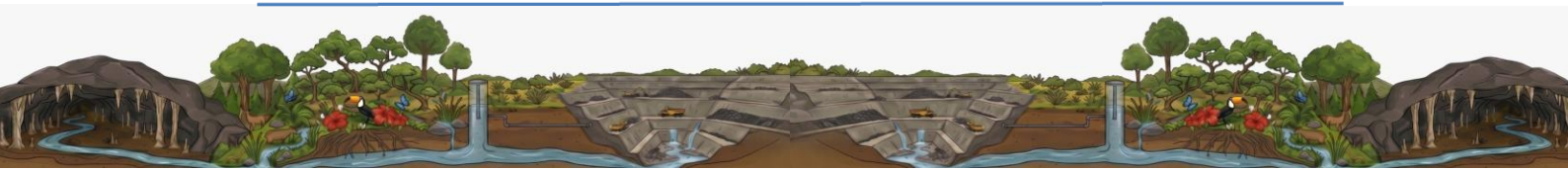
Na condição de maior vazão, observada no período seco, predominaram processos físicos, como transporte e ressuspensão de sedimentos, reduzindo a estabilidade das associações entre água-sedimento. Entretanto, no período úmido, caracterizado por menor vazão, houve o favorecimento de processos químicos, como dissolução, adsorção e reações redox, resultando em correlações mais expressivas. Portanto, pode-se observar que a interação água-sedimento no rio Piauí é fundamentalmente controlada pela dinâmica hidrológica, na qual a vazão regula o balanço entre processos físicos e químicos. Esse comportamento evidencia que a variabilidade do sistema não pode ser explicada apenas pela sazonalidade climática, mas sim pela resposta hidrodinâmica da bacia às forçantes climáticas regionais.

### Considerações Finais

Os resultados evidenciam que a interação água-sedimento no rio Piauí é controlada por processos geoquímicos distintos, com destaque para o Li como indicador de conexão entre as matrizes (água-sedimento) e Fe e Mn associados a condições redox. O comportamento hidrológico inverso reforça que a sazonalidade isoladamente não explica a dinâmica do sistema. A vazão atua como principal fator de controle, regulando o balanço entre processos físicos e químicos e influenciando a mobilidade dos elementos.

### Referências

- BAGGIO, H. **Contribuições Naturais e Antropogênicas para a Concentração e Distribuição de Metais Pesados em Água Superficial e Sedimento de Corrente na Bacia do Rio Formoso, Município de Buritizeiro, MG.** 2008. 210 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Belo Horizonte, 2008.
- DONGEN, R.; SCHERLER, D.; WENDI, D.; DEAL, E.; MAO, L.; MARWAN, N.; MEIER, C.
- I. El Niño Southern Oscillation (ENSO)-induced hydrological anomalies in central Chile. *EGUsphere*, 2022.
- FÖRSTNER, U.; WITTMANN, G. T. W. *Metal Pollution in the Aquatic Environment.* Berlin: Springer, 1981.



# Hidrogeoquímica das Águas em Sistema Cárstico Protegido: Bacia do Rio Peruaçu, Norte de Minas Gerais.

Bárbara Thaíssa da Silva Barros<sup>1</sup>, Lilyan de Almeida Cunha<sup>2</sup>, Hernando Baggio Filho<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Autor correspondente:  
[barbara.barros@ufvjm.edu.br](mailto:barbara.barros@ufvjm.edu.br)

## Resumo

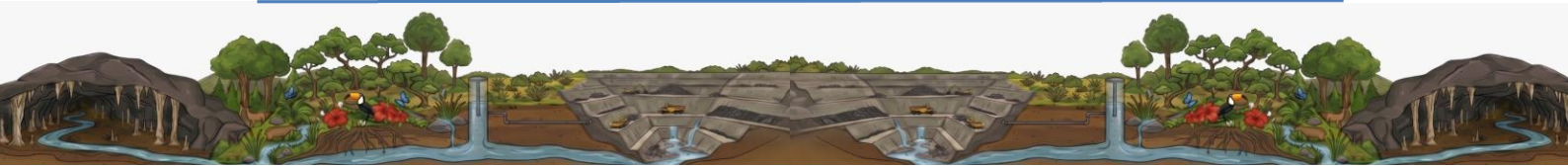
A caracterização hidrogeoquímica de sistemas cársticos é fundamental para compreender a dinâmica hídrica e os processos geoquímicos que controlam a composição das águas superficiais e subterrâneas. A bacia hidrográfica do rio Peruaçu, localizada no norte do estado de Minas Gerais, integra um importante sistema hidrogeológico desenvolvido em rochas carbonáticas do Grupo Bambuí e abriga relevantes unidades de conservação e sistemas cársticos de grande relevância nacional. Neste contexto, a pesquisa teve como objetivo avaliar a composição hidrogeoquímica das águas superficiais e subterrâneas da bacia do rio Peruaçu por meio da análise de parâmetros físico-químicos e geoquímicos. Foram realizadas duas campanhas de campo (estação seca e estação úmida), totalizando quinze pontos de amostragem por período. Os parâmetros físico-químicos foram determinados *in situ* utilizando sonda multiparâmetro. As análises químicas foram realizadas com auxílio da Espectrometria por Emissão Atômica com Fonte de Plasma (ICP-OES). Os resultados indicaram que a composição hidrogeoquímica das águas é fortemente controlada pela geologia regional, principalmente pela dissolução de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, observando-se as concentrações elevadas de cálcio e magnésio e nos valores de condutividade elétrica obtidos em diferentes pontos da bacia. A pesquisa ressaltou a importância do monitoramento hidrogeoquímico contínuo das águas em ambientes cársticos inseridos em unidades de conservação.

**Palavras-chave:** hidrogeoquímica; carste; Grupo Bambuí; recursos hídricos; Peruaçu.

## Introdução

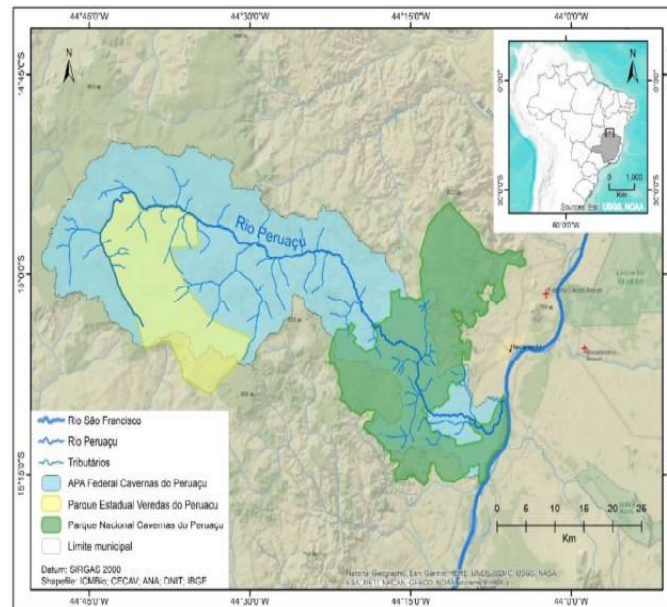
A avaliação hidrogeoquímica de sistemas hídricos constitui uma ferramenta fundamental para compreender os processos naturais que controlam a composição química das águas e identificar possíveis alterações ambientais. Em regiões cársticas, a interação entre água e rochas carbonáticas exerce forte influência na evolução química das águas superficiais e subterrâneas, uma vez que processos de dissolução mineral condicionam a composição iônica desses sistemas (Ford; Williams, 2007). Nesse contexto, águas associadas a rochas carbonáticas tendem a apresentar elevadas concentrações de íons cálcio e magnésio, refletindo processos de dissolução.

A bacia hidrográfica do rio Peruaçu constitui um importante sistema hidrogeológico associado ao carste desenvolvido nas rochas carbonáticas. A região abriga importantes unidades de conservação e um expressivo patrimônio espeleológico, o que reforça sua relevância ambiental e científica. Diante do exposto, o estudo desenvolvido teve como objetivo avaliar a composição hidrogeoquímica das águas superficiais e subterrâneas da bacia do rio Peruaçu, para compreender as influências naturais e antrópicas no sistema hídrico da região cárstica.



## Área de Estudo

A área da bacia hidrográfica do rio Peruaçu é afluente da margem esquerda do rio São Francisco e localiza-se no norte do estado de Minas Gerais. A bacia encontra-se inserida na área de proteção ambiental federal do Peruaçu, na qual tem-se outras importantes unidades de conservação, o Parque Nacional Cavernas do Peruaçu e o Parque Estadual Veredas do Peruaçu como apresentado na (Figura 1).



**Figura 1:** Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Peruaçu. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

O rio Peruaçu é uma drenagem perene, no qual, sua nascente encontra-se localizada nos planaltos desenvolvidos sobre os pacotes sedimentares que englobam os arenitos, siltitos e concreções látero-manganesíferas, de idade Cretácea, da Formação Urucuaia, percorrendo em seu médio curso sobre as rochas carbonáticas e pelíticas, de idade Proterozóica, do Grupo Bambuí. Em seu baixo curso, localizado na depressão do rio São Francisco estão as coberturas inconsolidadas, de idade Cenozóica (IBAMA, 2005).

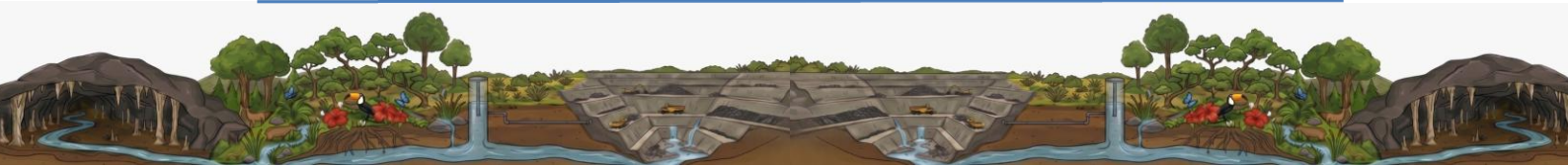
## Metodologia

Foram realizadas duas campanhas de campo em diferentes períodos climáticos (estação seca e estação úmida), totalizando quinze pontos de amostragem. Coletou-se o volume de 500 ml de água superficial e subterrânea em frascos de polietileno em cada ponto. As amostras que dependeram de análises em laboratório, foram acidificadas com ácido nítrico até  $\text{pH} < 2,0$  (1,0 ml  $\text{HN03}$ ) e foram transportadas em caixas térmicas a  $4^{\circ}\text{C}$ . Os parâmetros físico-químicos foram determinados *in situ* utilizando-se uma sonda multiparâmetro Hanna HI 9829, destacando-se temperatura, potencial hidrogeniônico, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez e sólidos dissolvidos totais. As análises químicas dos elementos Al, Ba, Ca, Co, Cd, Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Ti e Zn foram realizadas utilizando-se o ICP-OES.

## Resultados e Discussões

Os resultados obtidos referentes aos parâmetros físico-químicos analisados apresentaram variações associadas às características naturais da bacia e à sazonalidade climática. O pH manteve-se próximo à neutralidade, compatível com ambientes influenciados por rochas carbonáticas. A condutividade elétrica e os sólidos dissolvidos totais refletiram a presença de íons provenientes da dissolução, enquanto a turbidez apresentou variações relacionadas ao transporte de sedimentos, especialmente durante o período úmido.

A partir dos dados obtidos das análises geoquímicas, tem-se que os resultados indicaram que a



composição química das águas superficiais e subterrâneas da bacia do rio Peruaçu é fortemente controlada pelas características litológicas da região. Os maiores teores de Ca e Mg refletiram a influência da dissolução das rochas calcárias e dolomíticas presentes no sistema cárstico, evidenciando a interação entre água e rocha ao longo do sistema hidrológico. As variações observadas nas campanhas de campo indicaram influência da sazonalidade climática. Na estação seca ocorreu maior concentração dos elementos devido à menor diluição hídrica, enquanto na estação úmida os processos de lixiviação e o aumento da vazão contribuíram para a redução dessas concentrações.

Os elementos Al, Fe, Mn e Mg apresentaram variações espaciais associadas principalmente aos processos de intemperismo das unidades litológicas da bacia e à mobilização de material particulado nos cursos d'água. Os metais traço analisados, por sua vez, como Cd, Co, Pb, Cr, Cu e Ni, apresentaram concentrações muito baixas ou abaixo dos limites de detecção analítica nas amostras coletadas, indicando baixa interferência de fontes contaminantes externas no sistema hidrogeoquímico. Ainda, o Ba, Zn e Ti apresentaram variações pontuais nas concentrações, possivelmente associadas tanto à contribuição natural das unidades litológicas quanto aos produtos oriundos do uso e ocupação do solo na bacia.

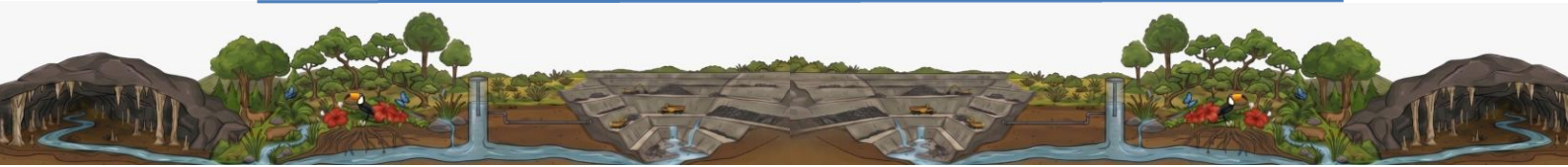
De modo geral, os resultados evidenciam que a hidrogeoquímica das águas da bacia do rio Peruaçu é predominantemente condicionada pelos processos naturais de intemperismo e dissolução mineral, associados à geologia carbonática regional e às variações sazonais do regime hidrológico.

### Considerações Finais

A avaliação hidrogeoquímica das águas da bacia do rio Peruaçu permitiu identificar que a composição das águas subterrânea e superficial é fortemente influenciada pela dissolução de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, refletida principalmente nas concentrações elevadas de cálcio e magnésio e nos valores de condutividade elétrica. Diante do exposto, os resultados evidenciam a importância da geologia regional na evolução hidrogeoquímica das águas da bacia do rio Peruaçu e reforçam a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade da água em ambientes cársticos, especialmente em regiões inseridas em unidades de conservação.

### Referências

- FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
- IBAMA (2005). Encarte 1 -Contextualização da Unidade de Conservação. In: IBAMA. Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. CSD-GEOKLOCK. Brasília, DF.



# Isótopos Estáveis ( $^{18}\text{O}$ e $^2\text{H}$ ) Para Suporte do Mapeamento de Vulnerabilidade Aquífera em Sete Lagoas/MG

Lucas D. C. de Paula<sup>1</sup>, João H. M. Viana<sup>2</sup>, Ricardo G. Passos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Autor correspondente: lucas.paula@cdtn.br

## Resumo

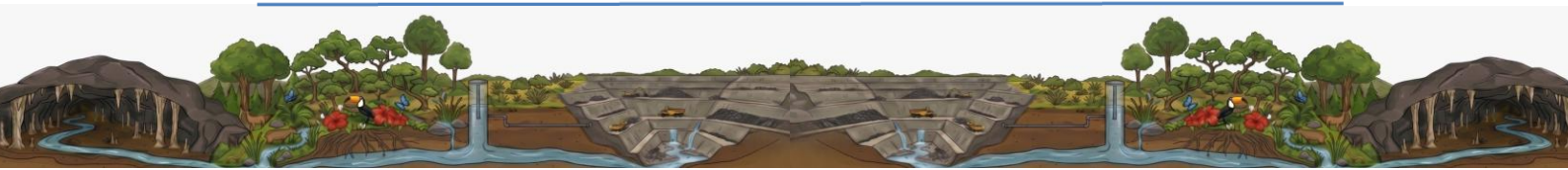
Na hidrogeologia e no estudo do ciclo hidrológico, os isótopos ambientais mais abundantes e monitorados são o deutério ( $^2\text{H}$  ou D) e o oxigênio-18 ( $^{18}\text{O}$ ). Devido à diferença de massa, as ligações químicas que envolvem isótopos mais leves são mais fracas e se rompem com maior facilidade. Essa característica os torna excelentes rastreadores da água, pois mudanças de fase (como evaporação, condensação e derretimento) causam o fracionamento isotópico, processo que pode ocorrer em equilíbrio termodinâmico ou de forma cinética. Como os sistemas físicos tendem ao estado de energia mínima, os isótopos mais pesados ( $^{18}\text{O}$  e D) concentram-se nas fases em que suas ligações são mais fortes, ou seja, no estado líquido ou sólido, em detrimento do estado gasoso (GAT, 1996; CLARK; FRITZ, 1997; GASTMANS *et al.*, 2021).

Como resultado dessa dinâmica, a água adquire assinaturas isotópicas que revelam sua origem e trajetória. Durante a evaporação, o vapor gerado torna-se empobrecido em isótopos pesados, enquanto a água residual exposta a esse processo (em lagos, solos ou plantas) apresenta enriquecimento isotópico. Na precipitação, essas concentrações variam em função de fatores como a altitude, a latitude, a temperatura da massa de ar e a distância da costa. Analiticamente, a composição isotópica de uma amostra é expressa pela notação delta ( $\delta$ ) em partes por mil (‰), que consiste na comparação da amostra com o referencial internacional VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) (GAT, 1996; CLARK; FRITZ, 1997; GASTMANS *et al.*, 2021).

Em escala global, as águas meteóricas apresentam uma correlação linear em sua composição isotópica, conhecida como Linha Meteórica Global da Água (GMWL). Essa reta atua como referência mundial, a partir da qual derivam as Linhas Meteóricas Locais (LMWL), condicionadas por parâmetros climáticos e geográficos regionais. A comparação gráfica das assinaturas isotópicas da água subterrânea com as linhas meteóricas e as águas superficiais permite determinar a proveniência da recarga aquífera (GAT, 1996; GALVÃO *et al.*, 2017; GASTMANS *et al.*, 2021). Além disso, os isótopos estáveis  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  apresentam comportamento conservativo, ou seja, não sofrem alterações significativas por meio de reações químicas no ambiente geológico. Consequentemente, caso a água subterrânea tenha passado por evaporação prévia ou se misturado a corpos hídricos superficiais (que possuem forte assinatura de evaporação), seus valores isotópicos não apenas revelarão esse processo, mas também permitirão a quantificação matemática das proporções de mistura (GAT, 1996; CLARK; FRITZ, 1997; ALVES; GALVÃO; ARANHA, 2020; GASTMANS *et al.*, 2021).

O presente estudo analisou isótopos de  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  em amostras obtidas no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS) da Embrapa, localizado em Sete Lagoas, Minas Gerais. O centro abriga atividades agrícolas experimentais e localiza-se em uma região cárstica potencialmente vulnerável, o que configura um cenário adequado à investigação de impactos ambientais. Hidrograficamente, a área encontra-se totalmente na sub-bacia do rio Jequitibá (pertencente ao médio curso da bacia do rio das Velhas, bacia hidrográfica do rio São Francisco) e é drenada por dois cursos d'água perenes: o córrego Matadouro, que cruza a porção noroeste, e o córrego Marinheiro, na porção sudoeste.

Em termos geológicos, o CNPMS está situado no Cráton do São Francisco, onde se depositaram os sedimentos argilo-carbonáticos das formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, que compõem o Grupo Bambuí (RIBEIRO *et al.*, 2003). Essas unidades sedimentares assentam-se sobre as rochas do embasamento do Complexo Belo Horizonte, constituído predominantemente por gnaisses associados a zonas graníticas e migmatíticas. A Formação Sete Lagoas abrange o Membro Pedro Leopoldo (calcários finos, dolomitos, margas e pelitos com macroestruturas de dissolução) e, no topo, o Membro Lagoa



Santa (calcários escuros de granulação média com feições de dissolução em grutas e cavernas, indicando a presença de paleocondutos) (GALVÃO *et al.*, 2015). Já a Formação Serra de Santa Helena é composta por ardósias, mármore, siltitos, argilitos e veios de quartzo. Sobrepondo-se a essas sequências consolidadas, ocorrem depósitos cenozoicos inconsolidados, formados por sedimentos areno-argilosos com níveis de cascalho, materiais argilo-arenosos semiconsolidados e areias finas a grossas (TULLER *et al.*, 2010; GALVÃO *et al.*, 2017).

Com o objetivo de estabelecer um quadro analítico mais robusto e temporalmente abrangente para a área do CNPMS, as amostras inéditas obtidas ao longo de 2024 e 2025 foram integradas aos dados de Pimenta (2016) e de Linhares (2017). Assim, foram utilizadas 38 amostras de água subterrânea, 23 de água superficial e 50 de precipitação. As campanhas de amostragem abrangeram tanto a estação seca quanto a chuvosa, visando capturar a sazonalidade do sistema. Na região de Sete Lagoas, o período chuvoso estende-se de outubro a março e concentra cerca de 89% da precipitação anual (GALVÃO *et al.*, 2017). Desse volume, os meses de outubro, novembro e dezembro configuram o principal período de recarga aquífera local, conforme demonstrado pelo balanço hídrico elaborado por Pessoa (1996).

Para a interpretação isotópica, a Linha Meteorica Local (LMWL) foi definida pela equação  $\delta^2\text{H} = 8,21 \delta^{18}\text{O} + 13,59$ , com base em dados de precipitação da estação GNIP/CDTN de Belo Horizonte. Essa adoção justifica-se pela proximidade geográfica e pelas similaridades climáticas e altimétricas com Sete Lagoas. Como referência global, utilizou-se a equação clássica de Craig (1961) para a Linha Meteorica Global (GMWL):  $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ .

No diagrama bivariado, as águas subterrâneas apresentam distribuição dispersa, o que permite sua divisão em grupos. O primeiro conjunto (PC-01, PC-17, PC-18, PT-03 e PT-04) plota-se sobre ou muito próximo da LMWL e da GMWL, sugerindo recarga direta pela precipitação local. Segundo Clark e Fritz (1997), esse agrupamento pode indicar um período restrito de recarga. Para avaliar essa hipótese, calculou-se a média anual ponderada de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  da precipitação, considerada uma estimativa robusta da recarga moderna (GALVÃO, 2018). O valor médio encontrado é muito semelhante ao obtido por Galvão (2018) para Sete Lagoas e posiciona-se próximo a esse primeiro grupo de águas subterrâneas, corroborando a origem meteorica local.

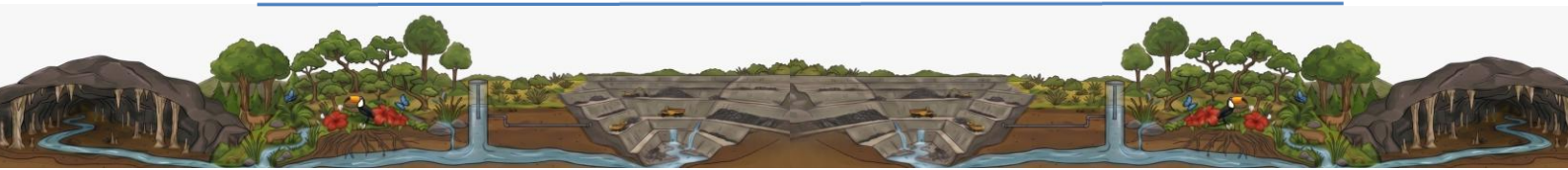
Por outro lado, um segundo grupo de águas subterrâneas (PT-01, PT-02, PC-05, PC-12 e PC-13) desvia-se das retas meteoricas, exibindo assinaturas típicas de evaporação e de mistura. Essas amostras posicionam-se próximas às águas superficiais das lagoas (SUP-02 a SUP-06). Destaca-se a lagoa SUP-01, que apresenta os maiores valores isotópicos do conjunto de dados, situando-se significativamente abaixo das LMWL e GMWL. Esse posicionamento indica elevada exposição à evaporação, o que reflete um intenso fracionamento.

Em síntese, as assinaturas isotópicas revelam que o sistema aquífero local é recarregado tanto pela infiltração direta das precipitações modernas quanto pela recarga indireta decorrente da mistura com águas superficiais previamente evaporadas (lagoas). Considerando as atividades agrícolas desenvolvidas na área do CNPMS, essa dinâmica hidrogeológica deve ser levada em conta devido ao alto risco de rápida propagação de contaminantes da superfície para as águas subterrâneas, o que demanda estratégias rigorosas de proteção e de manejo integrado do solo.

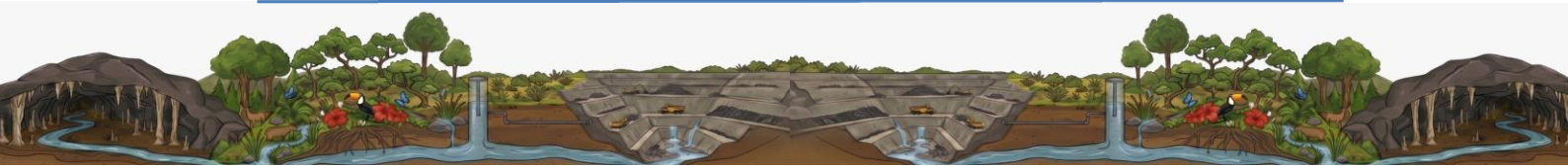
**Palavras-chave:** isótopos estáveis; vulnerabilidade hídrica; águas subterrâneas; hidrogeologia cárstica; recarga aquífera

### Referências Bibliográficas

- ALVES, M.; GALVÃO, P.; ARANHA, P. Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake. *Journal of Hydrology*, v. 593, p. 125830, 2020.
- CLARK, I. D.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- Craig, H. (1961) Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- GALVÃO, P., HALIHAN, T. & HIRATA, R. (2015). "Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil". *Hydrogeol J*, 23, pp. 1499–1513.



- GALVÃO, P.; HIRATA, R.; HALIHAN, T.; TERADA, R. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 159, 2017.
- GALVÃO, Paulo et al. Estudo de isótopos estáveis para confirmar interconexões entre lagoas e águas subterrâneas, Sete Lagoas/MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20., 2018. Anais, 2018.
- GASTMANS, D.; GARPELLI, L. N.; SANTOS, V. dos; LIMA, C. de; QUAGGIO, C. S.; SANTAROSA, L. V.; KIRCHHEIM, R. E. Contribuição dos isótopos estáveis da água (H e O) no conhecimento dos aquíferos brasileiros: estado da arte e perspectivas futuras. **Derbyana**, São Paulo, v. 42, e734, 2021.
- GAT, J. R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 24, p. 225-262, 1996.
- LINHARES, G. M. G. (2017). *Modelagem conceitual de fluxo dos sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do ribeirão Jequitibá, Sete Lagoas/MG, através da utilização de técnicas isotópicas*. Dissertação de Mestrado. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte.
- RIBEIRO J.H., TULLER M.P., DANDERFER FILHO A. (2003). *Mapeamento geológico da região de Sete lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais (escala 1:50.000)*. CPRM, Belo Horizonte, 54 pp.
- PESSOA, P. F. P. (1996). *Caracterização hidrogeológica da região de Sete Lagoas*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PIMENTA, Rafael Colombo. Utilização de traçadores em estudos hidrogeológicos. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2016.
- TULLER M. P., RIBEIRO J. H., SIGNORELLI N., FÉBOLI W. L., PINHO J. M. M. (2010). *Projeto Sete Lagoas-Abaeté, estado de Minas Gerais, Brasil. Mapa geológico, escala 1: 100,000*. CPRM, Belo Horizonte, 160pp.



# Pesquisa Hidrogeológica Aplicada Para Desenvolvimento e Lavra da Mina Subterrânea de Vazante

Lucas Santos<sup>1</sup>, Edmar Araújo<sup>2</sup>, Luciano Correia<sup>3</sup>, Romero Gontijo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Nexa Recursos Minerais. Autor correspondente: [lucas.santos.ls1@nexaresources.com](mailto:lucas.santos.ls1@nexaresources.com)

## Introdução

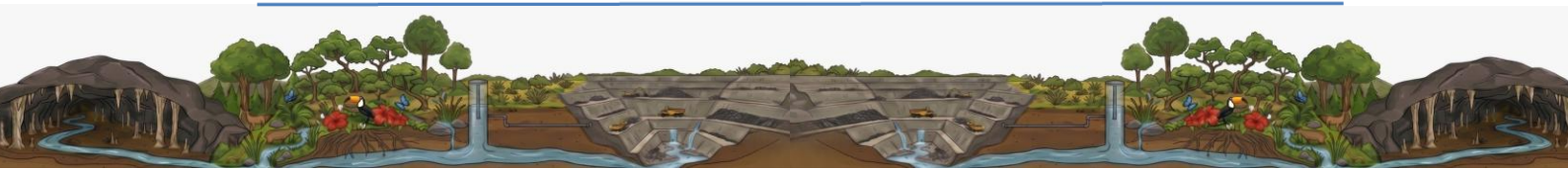
A água é um recurso estratégico e essencial para a indústria da mineração. A viabilidade técnica e econômica dessa atividade depende diretamente da gestão adequada dos recursos hídricos, o que exige um conhecimento aprofundado do contexto hidrológico e hidrogeológico, tanto em escala local quanto regional. Um exemplo de tal complexidade pode ser observado na Mina Subterrânea de Vazante, localizada no município de Vazante, Minas Gerais, pertencente à Nexa Resources. Em operação desde 1989, o que implicou na necessidade de rebaixamento do nível da água subterrânea para possibilitar a drenagem das frentes de lavra. Esta operação subterrânea apresenta elevada complexidade hidrogeológica devido à presença de galerias desenvolvidas em rochas carbonáticas do Grupo Vazante, que exibem um elevado grau de carstificação e comportam um sistema aquífero altamente heterogêneo (FRASA., 1991; BITTENCOURT., 2008).

A mina subterrânea de Vazante está situada próximo ao rio Santa Catarina, localizado em uma bacia sedimentar dolomítica com feições cársticas bem desenvolvidas. Para manter o rebaixamento necessário do nível d'água subterrânea, a mina precisa bombear em média 11.000m<sup>3</sup>/h de água anualmente, alcançando profundidades de cerca de 500 metros.

Diante deste cenário, torna-se indispensável a aplicação de métodos investigativos voltados para a identificação de novas feições cársticas ou possíveis zonas de elevado fraturamento. Essas investigações são cruciais para viabilização do processo de lavra do minério, além de atuar na prevenção de riscos elevados como; inundação da mina por novas surgências de água, inundação da mina por transbordo do rio Santa Catarina, carreamento de fluxos de lama, formação de abatimentos de solo ou trincas e recalques em superfície e alteração do regime hídrico superficial. Nesse sentido, o presente resumo tem como objetivo elucidar os referidos métodos de investigação hidrogeológica aplicados para viabilização da lavra subterrânea na mina de Vazante.

## Desenvolvimento

Devido à forte anisotropia do meio rochoso em que está inserida a mina de zinco em Vazante, não é possível conhecer as características do maciço sem a realização de estudos prévios. O faseamento da pesquisa do maciço divide-se em três fases principais: longo, médio e curto prazo. A Figura 1 apresenta um fluxograma ilustrativo e simplificado de todo o processo de pesquisa.



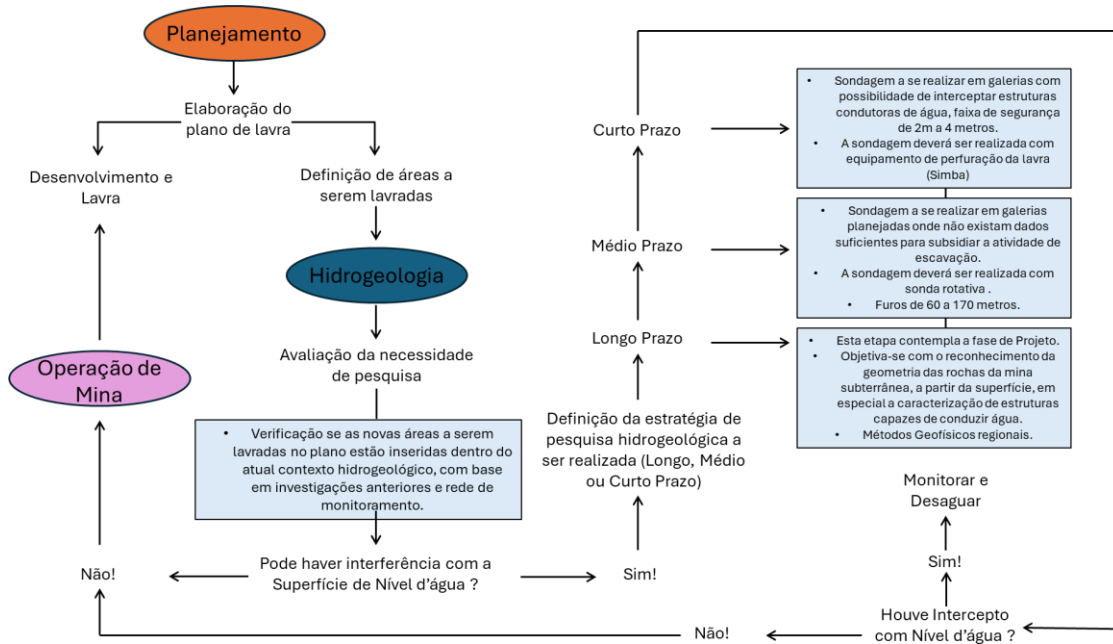


Figura 1: Esquema ilustrativo sobre a lógica empregada para a aplicação da Pesquisa Hidrogeológica na Mina De Vazante.

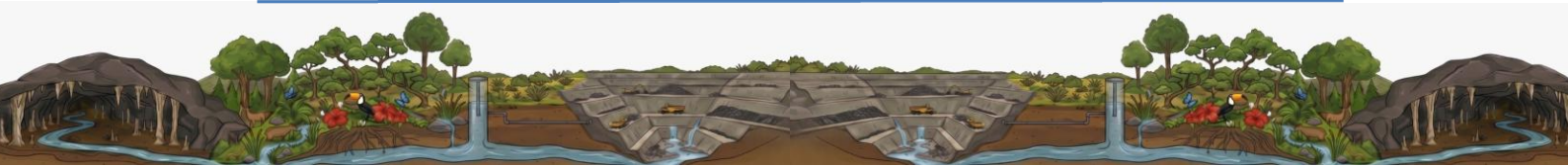
Para sondagem de longo prazo, utilizam-se métodos geofísicos como o caminhamento elétrico e a gravimetria terrestre para reconhecer a geometria das rochas subterrâneas e caracterizar estruturas que possam conduzir água, essencial para a instalação de estruturas como raízes, cavas e rampas de acesso. A sondagem de médio prazo é realizada com furos de sonda rotativa diamantada para subsidiar atividades de escavação, caracterizando estruturas portadoras e condutoras de água, e monitorando interceptações de água pelo fluxo e pressão. A sondagem de curto prazo, feita com equipamentos de perfuração de lavra/desenvolvimento de mina, foca no reconhecimento detalhado de estruturas condutoras de água em galerias, subsidiando decisões sobre ações a serem tomadas. Para a caracterização dos testemunhos obtidos em campanhas de médio prazo, pode ser resumido nas seguintes etapas fundamentais: A primeira etapa envolve a preparação e delimitação de intervalos. Nessa fase, o profissional deve utilizar o boletim de sondagem preenchido pelos sondadores para correlacionar intervalos de perda de circulação ou interceptos de água com o testemunho recuperado. Devem ser delimitados intervalos com características geológicas e hidrogeológicas homogêneas, como cor, textura, mineralogia e grau de alteração, seguindo as normas de descrição geológica da unidade.

A segunda etapa é a avaliação de parâmetros hidrogeológicos, que se concentra em três pilares principais: grau de fraturamento, intensidade de dissolução (carstificação) e recuperação. O grau de fraturamento envolve a estimativa quali-quantitativa do espaçamento entre fraturas naturais, desconsiderando rupturas provocadas pela sondagem, variando de "Traços" (20-100 cm) a "Intenso" (< 2 cm). A intensidade de dissolução avalia a magnitude da dissolução química nas fraturas, classificada em níveis como incipiente, leve, moderado ou intenso. A recuperação calcula o percentual de amostra recuperada em relação a uma manobra padrão de 100 cm, sendo que baixas recuperações indicam estruturas portadoras de água ou zonas de alteração avançada.

A terceira etapa envolve a classificação final e o prognóstico. Após a análise, cada intervalo recebe uma codificação que combina a magnitude da surgência estimada e a presença de carstificação. As categorias de surgência variam de escoamento (vazão significativa), gotejamento a seca.

A quarta etapa é a aplicação dos resultados na segurança operacional. Intervalos classificados como zonas críticas com potencial de escoamento e carstificação devem ser interpretados e modelados em software 3D. Esses modelos são inseridos nas plantas topográficas da mina para alertar os demais setores técnicos operacionais da mina sobre eventuais riscos hidrogeológicos indicados pelos dados de sondagem. Quando a frente de lavra se aproxima de uma zona mapeada como crítica, o acompanhamento deve ser intensificado para confirmar a viabilidade e segurança da operação.

Paralelamente, são conduzidos mapeamentos estruturais detalhados que fornecem informações adicionais sobre as características geomecânicas e os padrões de fraturamento das rochas. Esses mapeamentos



permitem a identificação de zonas preferenciais de percolação de água que quando combinados com os dados de sondagens permitem identificar o comportamento hidrogeológico do maciço, contribuindo para uma melhor previsão dos fluxos de água subterrânea e potenciais pontos de infiltração. A partir desses dados, é possível planejar intervenções mais precisas e eficientes, tais como a definição de trajetórias de galerias evitando zonas de alto risco de interceptação de feições portadoras de água e a implementação de sistemas de drenagem adequados. A combinação dessas práticas assegura um controle mais robusto sobre os desafios hidrogeológicos e estruturais da mina, otimizando a viabilidade e a segurança das operações subterrâneas na Mina de Vazante.

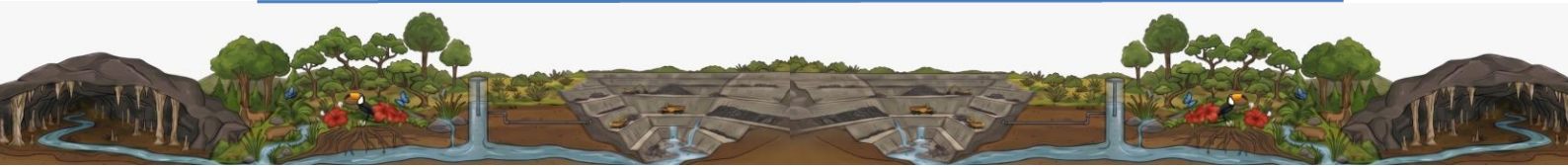
## Conclusões

A pesquisa hidrogeológica da Mina de Vazante exige etapas de investigação em longo, médio e curto prazo para compreender um maciço altamente anisotrópico. A integração de métodos geofísicos, sondagens e mapeamentos estruturais permite identificar fraturas, zonas carstificadas e áreas críticas de surgência. A classificação desses intervalos, aliada à modelagem 3D, orienta o planejamento das escavações e as medidas de segurança. Assim, o processo garante maior previsibilidade dos fluxos de água e reforça a segurança e eficiência das operações subterrâneas.

## Referências

BITTENCOURT, C.; DE BESSA, V.; ARAUJO, E.E. The Vazante underground mine, Brazil – An example of controlled water table drawdown in karstic áreas. In: MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST, 11., 2008, Tallahassee. Full Paper... Tallahassee, 2008

FRASA INGENIEROS CONSULTORES. Estudio Hidrogeologico-Minero en la Mina Subterrânea de Morro da Usina, Vazante, Minas Gerais. Vazante: Votorantim Metais, 1991. 159 p. (Relatório Interno).



# Monitoramento da Qualidade da Água e Subsídio à Gestão Pública: Análise do Vigiagua, 2025

Luciene Zagalo de Oliveira<sup>1</sup>, Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais; Superintendência de Vigilância em Saúde. Autor correspondente:  
[zagalo@ufmg.br](mailto:zagalo@ufmg.br).

## Introdução

A gestão sustentável da água depende do monitoramento contínuo de sua quantidade e qualidade, porém a escassez de dados tem limitado a efetividade da gestão integrada, contribuindo para a degradação hídrica global. Em geral, os países priorizam a disponibilidade em detrimento da qualidade (CHAPMAN; GORDON; SULLIVAN, 2024).

A produção de dados é essencial para identificar fragilidades, orientar decisões e promover intervenções eficazes. No Brasil, o aprimoramento do Vigiagua é fundamental para garantir água de qualidade, reforçando seu papel na saúde pública e no direito humano à água (MANZATTO et al., 2023).

O Programa de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano - Vigiagua, como estratégia do Ministério da Saúde, atua de forma descentralizada no SUS no monitoramento da qualidade da água. Nesse sentido, a sistematização de informações sobre amostras, análises e conformidade com a Portaria GM/MS nº 888/2021 é essencial para construir uma base diagnóstica, permitindo avaliar avanços, identificar vulnerabilidades e fortalecer a gestão e as políticas públicas (Ministério da Saúde (2026)).

**Palavras-chave:** monitoramento, vigilância da qualidade da água, regionalização, gestão, tomada de decisão

## Material e Métodos

Trata-se de estudo descritivo, de abordagem quantitativa, baseado na análise de dados secundários de acesso público provenientes do Vigiagua, disponibilizados pelo Ministério da Saúde (por meio da plataforma oficial do governo federal, disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/seidigi/demas/situacao-de-saude/vigiagua> (acesso em 18/03/2026)). Os dados, referentes ao ano de 2025, foram obtidos na plataforma oficial do governo federal, organizados em planilha eletrônica no Microsoft Excel e analisados por estatística descritiva.

Foram considerados os parâmetros coliformes totais/*Escherichia coli*, cloro residual livre e turbidez. A unidade de análise compreendeu as cinco macrorregiões brasileiras. Avaliaram-se os indicadores de cobertura de vigilância, número de amostras analisadas e proporções de conformidade, não conformidade e resultados inconclusivos, por meio de frequências absolutas e relativas.

## Resultados e Discussão

A vigilância da qualidade da água para consumo humano é uma estratégia central de saúde pública no Brasil, realizada por meio do Vigiagua, vinculado ao Ministério da Saúde. A disponibilização de dados abertos permite monitorar as ações e avaliar o cumprimento de diretrizes, como cobertura das análises e conformidade com os padrões de potabilidade.

Neste estudo, foram utilizados dados secundários de 2025 provenientes de bases públicas, possibilitando analisar a distribuição regional das ações, o desempenho das amostragens e a conformidade dos resultados. A Tabela 1 sintetiza esses parâmetros, incluindo cobertura, quantitativo de amostras e classificação dos resultados.

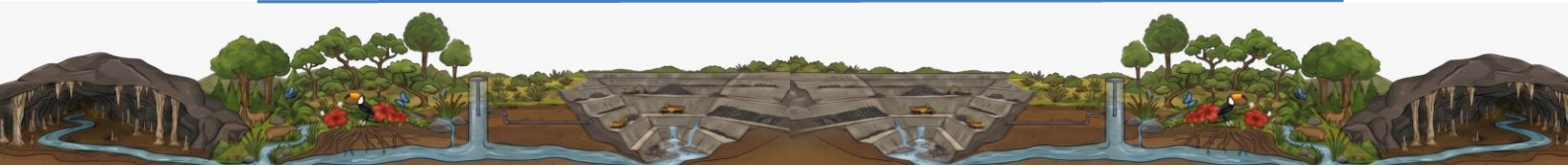


Tabela 1 – Cobertura de vigilância e parâmetros de qualidade da água para consumo humano avaliados no âmbito da vigilância, segundo região geográfica do Brasil, 2025.

<b>Coliformes totais/<i>E. coli</i></b>					
<b>Região</b>	<b>cobertura de Vigilância</b>	<b>Amostras analisadas</b>	<b>amostras dentro do padrão</b>	<b>amostras fora do padrão</b>	<b>inclusivas</b>
<b>Norte</b>	88,39%	55.700	36.196 (64,8%)	15.284 (27,4%)	4.385(7,8%)
<b>Nordeste</b>	83,87%	199.099	148.673 (74,7%)	40.735 (20,5%)	9.691(4,9%)
<b>Centro-Oeste</b>	71,46%	42.190	36.234 (85,9%)	5.236 (12,4%)	720(1,7%)
<b>Sudeste</b>	74,86%	171.576	159.101 (88,6%)	14.510 (8,1%)	5.965(3,3%)
<b>Sul</b>	97,75%	139.282	97.770 (70,2%)	15.481 (11,1%)	26.031 (18,7%)
<b>Cloro residual livre</b>					
<b>Norte</b>	51,80%	32.860	19.342 (58,9%)	13.335 (40,6%)	183 (0,6%)
<b>Nordeste</b>	77,04%	182.331	141.342 (77,5%)	39.296 (21,6%)	1.693 (0,9%)
<b>Centro-Oeste</b>	83,57%	49.295	41.957 (85,1%)	7.164 (14,5%)	174 (0,4%)
<b>Sudeste</b>	63,91%	151.478	137.776 (91,0%)	13.318 (8,8%)	384 (0,3%)
<b>Sul</b>	84,93%	120.756	106.001 (87,8%)	12.338 (10,2%)	2.417 (2,0%)
<b>Turbidez</b>					
<b>Norte</b>	89,37%	56.332	49.910 (88,6%)	2.403 (4,3%)	4.019 (7,1%)
<b>Nordeste</b>	83,84%	197.225	170.385 (86,4%)	17.747 (9,0%)	9.093 (4,6%)
<b>Centro-Oeste</b>	84,19%	49.616	47.101 (94,9%)	1.968 (4,0%)	547 (1,1%)
<b>Sudeste</b>	55,56%	133.191	124.147 (93,2%)	5.091 (3,8%)	3.953 (3,0%)
<b>Sul</b>	108,01%	152.281	124.017 (81,4%)	2.803 (1,8%)	25.461 (16,7%)

Os dados de 2025 do Vigiagua evidenciam diferenças regionais tanto na cobertura de vigilância quanto na qualidade da água para consumo humano. A Região Sul apresentou as maiores coberturas, com destaque para turbidez (108,01%) e coliformes (97,75%), enquanto as menores coberturas foram observadas no Sudeste para turbidez (55,56%) e no Norte para cloro residual livre (51,80%).

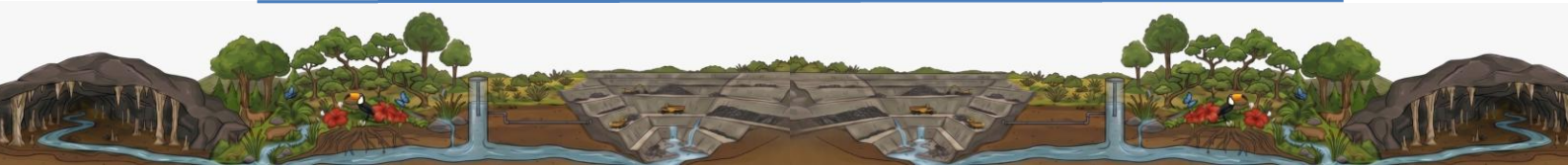
Em relação à qualidade, a Região Norte apresentou menor desempenho, com elevados percentuais de não conformidade para coliformes totais/*E. coli* (27,4%) e cloro residual livre (40,6%). O Nordeste apresentou situação intermediária, com cobertura adequada, porém ainda com percentuais relevantes de inadequação. O Centro-Oeste destacou-se positivamente, com bons níveis de cobertura e alta conformidade em todos os parâmetros. O Sudeste apresentou os melhores resultados de qualidade, apesar de limitações na cobertura em alguns parâmetros. Já a Região Sul, embora com alta cobertura, apresentou fragilidades na qualidade microbiológica e elevados percentuais de resultados inconclusivos.

Esses achados demonstram que a análise integrada da cobertura de vigilância e da conformidade dos parâmetros é essencial para identificar fragilidades, orientar intervenções e subsidiar a gestão da qualidade da água, reforçando o papel do Vigiagua na tomada de decisão em saúde pública.

Diante do alcance das ações do Vigiagua, afirmam Oliveira Júnior et al. (2019), que se torna imprescindível que as informações produzidas por esse programa sejam utilizadas de maneira sistemática no acompanhamento dos indicadores relacionados à água potável no Brasil.

## Conclusão

Os resultados evidenciam heterogeneidades regionais na cobertura da vigilância e na conformidade dos parâmetros de qualidade da água no Brasil. A sistematização desses dados é essencial para subsidiar a tomada de decisão, orientar políticas públicas e qualificar a gestão. O fortalecimento da vigilância e do monitoramento



contínuo constitui estratégia central para a identificação de fragilidades, a priorização de intervenções e a garantia da qualidade da água e da proteção da saúde da população. Dessa forma, a leitura qualificada desses dados se torna essencial para orientar decisões, fortalecer a gestão e assegurar que a água fornecida à população atenda aos padrões de potabilidade e proteção à saúde.

### Referências Bibliográficas

BRASIL. Ministério da Saúde. **Vigiagua: situação de saúde**. Disponível em:

<https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/seidigi/demas/situacao-de-saude/vigiagua>. Acesso em: 18 mar. 2026.

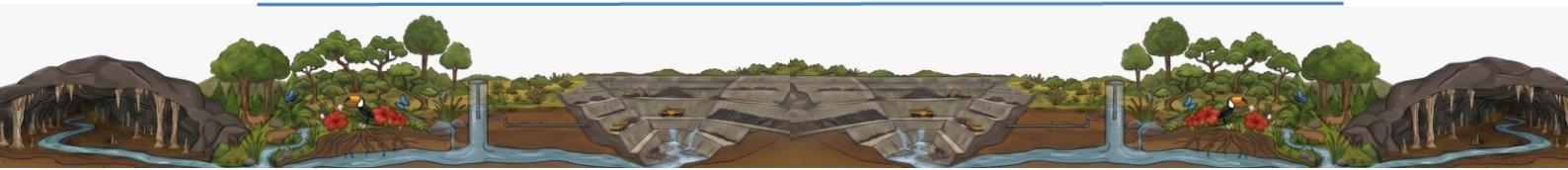
CHAPMAN, D. V.; GORDON, C.; SULLIVAN, T. **Editorial: Water quality monitoring and sustainable use of ambient freshwaters**. *Frontiers in Water*, v. 6, p. 1450912, 08 jul. 2024.

DOI: 10.3389/frwa.2024.1450912.

MANZATTO, C. M.; SANTOS, K. A.; SILVA, P. M.; OLIVEIRA FILHO, P. C.; MARTINS, K.

G. **Águas de fontes alternativas de abastecimento no Paraná: potabilidade e mapeamento de grupos vulneráveis**. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, Uberaba, v. 8, n. 2, p. 122–131, 2023. DOI: 10.18554/rbcti.v8i2.7043.

OLIVEIRA JÚNIOR, A.; MAGALHÃES, T. B.; MATA, R. N.; SANTOS, F. S. G.; OLIVEIRA, D. C.; CARVALHO, J. L. B.; ARAÚJO, W. N. **Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua): características, evolução e aplicabilidade**. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, Brasília, v. 28, n. 1, 2019. DOI: 10.5123/s1679-49742019000100024.



# Levantamento de Valores da Geodiversidade Associados ao Aquífero Cauê: Uma Revisão

Luiza Rodrigues Amaral<sup>1</sup>, Tainá Francielle dos Santos Guerhardt<sup>2</sup>, Carmélia Kerolly Ramos de Oliveira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [luizarodriguesamaral@gmail.com](mailto:luizarodriguesamaral@gmail.com).

## Resumo

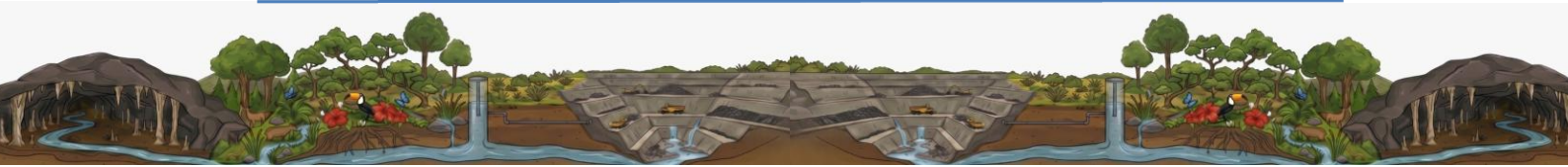
O geopatrimônio se refere aos elementos naturais abióticos que possuem valor patrimonial, seja por sua relevância científica, educativa, cultural, funcional ou paisagística (BRILHA et al., 2018; RUCHKYS, 2007). Dentro da temática da geodiversidade os sistemas fluviais são elementos de suma importância que compreendem os cursos d'água, os processos, a dinâmica fluvial e o entorno (SCHUMM, 1977). Os elementos da geodiversidade fluvial e os valores relacionados aos sistemas fluviais controlam os processos (geomorfológicos e geológicos) que ocorrem nas encostas, e no leito dos rios (erosão, transporte e sedimentação), a dinâmica hidrogeológica e os movimentos das águas (OLIVEIRA, 2020). Nesse contexto, o aquífero Cauê no quadrilátero ferrífero se destaca como um elemento da geodiversidade de extrema importância (MOURÃO, 2007; RUCHKYS, 2007), pois possui valores científico, funcional, didático, econômico, além de inúmeros serviços ecossistêmicos. O trabalho objetivou-se a elencar os valores da geodiversidade associados a esse aquífero a partir de pesquisas consolidadas para subsidiar preliminarmente seu enquadramento como geopatrimônio hidrogeológico. Para atingir o objetivo proposto a metodologia adotada foi a revisão bibliográfica, o levantamento de diferentes temáticas relacionadas ao aquífero Cauê possibilitou apontar de modo preliminar os valores da geodiversidade associados.

O levantamento dos trabalhos foi feito em buscas gerais por meios digitais como o Google Acadêmico, além de busca de produções acadêmicas sobre o tema nos últimos dez anos no site do Sistema de Bibliotecas da UFMG. Entre os trabalhos avaliados, destaca-se Figueiredo (2021), apontando a importância do aquífero para o abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, sendo fundamental para a segurança hídrica, nesse trabalho identifica-se o valor funcional do aquífero, bem como valor científico e serviços ecossistêmicos de provisão, regulação e suporte. Para Mourão (2007), a relevância do Aquífero Cauê como geopatrimônio reside em sua estrutura litoestratigráfica única. A autora destaca que os itabiritos do Grupo Itabira atuam como "caixas d'água" geológicas de alta produtividade, essenciais para o fluxo dos rios regionais e para a manutenção dos campos rupestres ferruginosos. Cientificamente, o sistema funciona como um testemunho da evolução crustal, onde Alkmim e Marshak (1998) destacam que sua complexidade tectônica oferece dados cruciais sobre as deformações do Pré-Cambriano. Nesse trabalho os valores são científicos, econômico, funcional e didático, pois é possível entender e avaliar a geologia local e suas dinâmicas.

Nos demais trabalhos avaliados, os maiores valores da geodiversidade que podem ser identificados são também os valores científico, seguido do funcional, abordando análises sobre as características hidrogeológicas do aquífero e seu potencial para armazenamento de água (ZUPO, 2024; ANDRADE, 2023; MAGALHÃES, 2023). Os trabalhos avaliados são importantes, mas mostram a necessidade de mais dados e pesquisas específicas em geodiversidade hídrica.

O levantamento realizado aponta também pontos sensíveis sobre a gestão deste patrimônio. O aquífero Cauê enfrenta um paradoxo econômico entre a mineração imediata e o valor indireto da segurança hídrica e geoeducação. Nesse contexto, Ruchkys (2007) defende que a geoconservação deve ser integrada ao ordenamento territorial, visto que a descaracterização da Formação Cauê acarreta perdas patrimoniais e funcionais irreversíveis para o território mineiro.

Para além dos valores elencados anteriormente, Castro e Ruchkys (2017) ressaltam que o quadrilátero ferrífero possui bons pontos didáticos para aulas de campo desde o nível básico até a graduação. Sugere-se para futuras investigações a aplicação do protocolo de Santos (2017) *in situ* para análise do possível valor



educacional da área do aquífero.

A utilização de mecanismos para avaliação desse potencial é importante para subsidiar diagnósticos para futura categorização deste como geopatrimônio. A patrimonialização desse recurso constituiria uma estratégia que pode auxiliar a gestão e proteção do aquífero, contribuindo para assegurar que esse bem seja transmitido às gerações futuras.

**Palavras-chave:** Geopatrimônio fluvial; Quadrilátero Ferrífero; Sistemas fluviais; Patrimonialização; Água subterrânea.

### Referências Bibliográficas

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** *Precambrian Research*, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998.

ANDRADE, Isabella Brito. **Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco oeste do Sinclinal Moeda: passado, presente e futuro do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais, Brasil.** 2023. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

BRILHA, J.; GRAY, M.; PEREIRA, D.I. & PEREIRA, P. **Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature.** *Environmental Science & Policy*, v. 86, p. 19-28. 2018.

Castro P.T.A., Ruchkys Ú., Paula S.F. 2017. **O patrimônio geológico e o potencial educativo do Geopark Quadrilátero Ferrífero para o ensino de ciências e geografia.** *Terræ*,14(1-2).

DO AMARAL FIGUEIREDO, Múcio. **Mineração e Crise Hídrica em Minas Gerais: Quadrilátero Ferrífero/Quadrilátero Aquífero.** *Caderno de Geografia*, v. 31, n. 1, p. 116-116, 2021.

DOS SANTOS, Darcy. **Geodiversidade do Parque Nacional da Serra do Gandarela: análise do potencial de uso didático, com ênfase no Patrimônio Espeleológico.** 173 f. Dissertação (Mestrado em análise e modelagem de sistemas ambientais) Universidade Federal de Minas Gerais. 2017. GRAY, M. **Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature.** Londres: John Wiley e Sons Ltd, 2004.

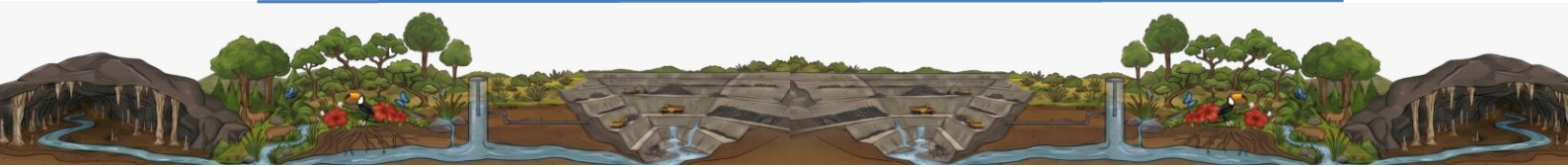
MAGALHÃES, Celina Cenni de Castro. **Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero–MG): caracterização, impactos e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê.** 2023. 76 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

LOURAÇO, Maria Antonieta Alcantara. **Caracterização hidrogeológica do aquífero cauê, quadrilátero ferrífero, MG: Subsídios para a gestão dos recursos hídricos no quadrilátero ferrífero.** 2007.

OLIVEIRA, C. K. R. **Avaliação Integrada dos Sistemas Fluviais: subsídio para reconhecimento e classificação do geopatrimônio fluvial.** 2020. 310 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

SCHUMM, S. A. **The fluvial system.** Caldwell: The Blackburn Press, 1977.

ZUPO, Alice. **Aplicação e adaptações de métodos de vulnerabilidade intrínseca em climas tropicais-Quadrilátero Ferrífero.** 2024. 102 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.



# Hydrogeo Tools: Redefinindo a Hidrogeologia Com Inteligência Digital

Pedro Henrique O. S. Leite<sup>1</sup>, Arthur Santos<sup>2</sup>, Leonardo Machado<sup>3</sup>, Felipe Costa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [pedro.leite@wsp.com](mailto:pedro.leite@wsp.com)

## Resumo

As análises hidrogeológicas modernas envolvem, de forma crescente, grandes volumes de dados provenientes de diferentes fontes, como séries temporais de instrumentação, dados climáticos, informações espaciais, modelos conceituais e numéricos, além de parâmetros hidrogeológicos obtidos em campo e em laboratório. Essa diversidade de dados aumenta significativamente a complexidade das análises e impõe desafios relacionados ao tempo de processamento, à reprodutibilidade dos resultados e à padronização metodológica entre diferentes estudos e equipes técnicas.

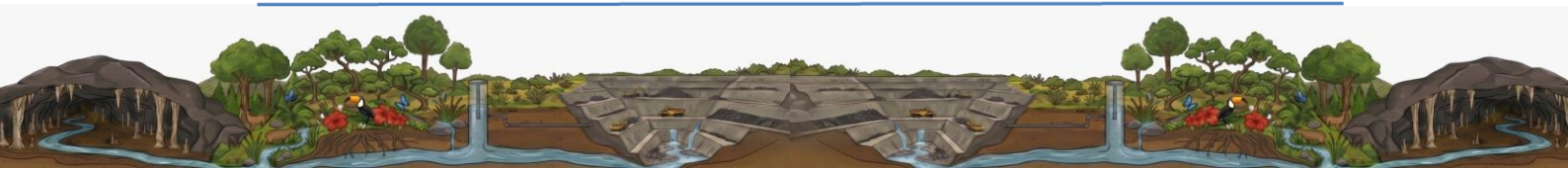
Nesse contexto, observa-se um gap crescente entre a necessidade de utilização de programação e ferramentas computacionais avançadas e o nível de familiaridade dos profissionais da hidrogeologia com essas tecnologias. Embora linguagens como R e Python possibilitem análises mais rápidas, robustas e automatizadas, sua adoção ainda é limitada por barreiras técnicas, curva de aprendizado acentuada e dificuldade de integração dessas rotinas ao fluxo de trabalho cotidiano. Como consequência, muitas análises permanecem dependentes de processos manuais, planilhas não padronizadas e métodos pouco reprodutíveis, aumentando o risco de erros operacionais e inconsistências nos resultados.

O aplicativo HydroGeo Tools foi desenvolvido com o objetivo de reduzir esse gap, promovendo a democratização do uso de ferramentas computacionais avançadas na hidrogeologia, sem exigir conhecimento aprofundado em programação por parte do usuário final. A proposta central do aplicativo é consolidar rotinas computacionais previamente desenvolvidas, testadas e validadas em diferentes projetos hidrogeológicos em um ambiente único, padronizado e de fácil acesso, permitindo que análises complexas sejam executadas de forma rápida, consistente e rastreável. A aplicação foi desenvolvida majoritariamente nas linguagens R e Python, utilizando o framework Shiny, que possibilita a construção de aplicações web interativas com arquitetura modular. Essa abordagem permite que cada funcionalidade opere de forma independente, sendo acionada apenas quando necessária, o que otimiza o desempenho computacional e facilita a manutenção e a expansão contínua da ferramenta.

O HydroGeo Tools está estruturado em módulos temáticos que cobrem diferentes etapas das análises hidrogeológicas. O módulo de Modelo Numérico contempla ferramentas voltadas à calibração de modelos em regime permanente e transiente, permitindo a avaliação sistemática do ajuste entre dados observados e simulados, além de fornecer suporte à análise de sensibilidade e avaliação de parâmetros hidráulicos. Essas rotinas contribuem diretamente para a padronização do processo de calibração, frequentemente conduzido de forma subjetiva ou manual em muitos estudos.

O módulo de Modelo Conceitual reúne um conjunto de ferramentas voltadas à interpretação e análise integrada do sistema hidrogeológico. Entre as funcionalidades disponíveis estão análises de baseflow, aplicação do método Water Table Fluctuation, delimitação de bacias hidrográficas, interpretação de testes de poço do tipo slug test e cálculo de volumes associados a cavas ou estruturas escavadas. Adicionalmente, esse módulo incorpora uma ferramenta baseada em técnicas de machine learning para análise de correlação entre séries temporais de instrumentação hidrogeológica, dados de precipitação e variáveis relacionadas ao comportamento de barragens. Esse recurso permite identificar padrões, respostas do sistema e possíveis relações de causa e efeito que seriam de difícil percepção por meio de análises tradicionais.

O aplicativo também dispõe de um conjunto de ferramentas auxiliares, voltadas ao suporte estatístico e à visualização de dados. Entre elas destacam-se analisadores automáticos de tendências estatísticas, aplicáveis a séries temporais hidrogeológicas, e geradores de gráficos padronizados, que facilitam a comunicação dos resultados e reduzem o tempo gasto na elaboração manual de figuras. O backend dessas ferramentas é



sustentado por códigos robustos que utilizam técnicas avançadas de estatística, machine learning e geoprocessamento, garantindo confiabilidade e consistência nos resultados obtidos.

Um dos principais benefícios do HydroGeo Tools é o ganho significativo de tempo nas análises, associado à redução de erros manuais e à padronização dos procedimentos técnicos. Ao encapsular rotinas complexas em uma interface gráfica interativa, o aplicativo possibilita que profissionais com pouca ou nenhuma experiência em programação realizem análises avançadas de forma intuitiva, sem abrir mão do rigor técnico. Além disso, a padronização dos fluxos de análise contribui para maior reprodutibilidade dos estudos e facilita a revisão técnica e auditoria dos resultados.

Por fim, a arquitetura modular do HydroGeo Tools permite a incorporação contínua de novas funcionalidades, acompanhando a evolução das demandas do setor hidrogeológico. Dessa forma, a aplicação se apresenta como uma solução escalável e flexível, capaz de apoiar tanto atividades acadêmicas quanto aplicações práticas em projetos de engenharia, mineração e gestão de recursos hídricos, contribuindo para a modernização e qualificação das análises hidrogeológicas.

**Palavras-chave:** hidrogeologia, programação, ciência de dados, machine learning, aplicativo.

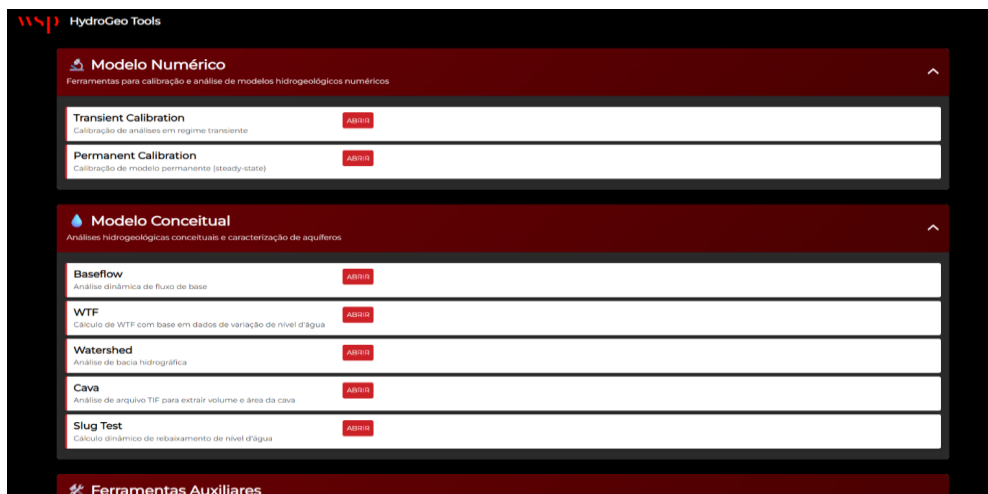


Figura 1 - Página inicial para navegar entre os módulos.

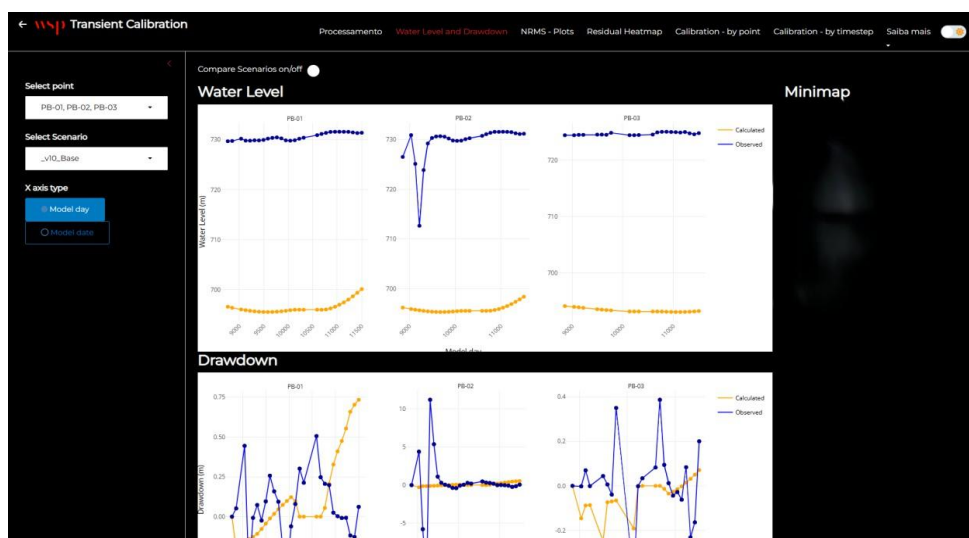
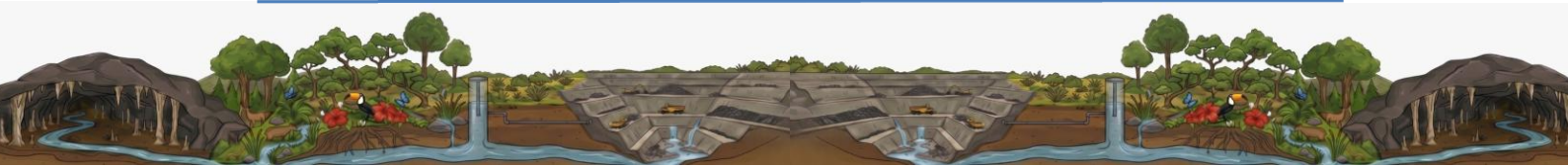


Figura 2 - Módulo de calibração em transiente



# Uso do Sentinel-2 e Aprendizado de Máquina para Estimativa de Turbidez no Reservatório de Ibirité

<sup>1</sup>Rafael Sales de Castro, <sup>2</sup>Caio César de Sousa Mello, <sup>3</sup>Camila Costa de Amorim Amaral

Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [rafaelsales.ufmg.ea@gmail.com](mailto:rafaelsales.ufmg.ea@gmail.com)<sup>1</sup>

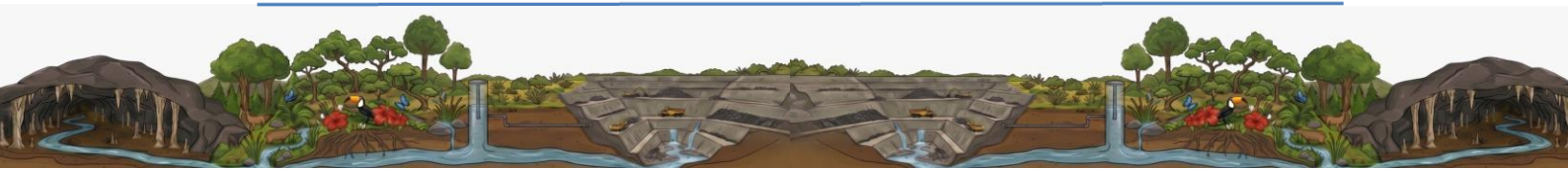
## Introdução

Reservatórios urbanos estão sujeitos à degradação da qualidade da água em função de atividades antrópicas, como lançamento de efluentes e escoamento superficial, comprometendo suas funções ambientais (Bashir *et al.*, 2020). Nesse contexto, o monitoramento sistemático é essencial para a gestão desses sistemas. O monitoramento convencional da qualidade da água, baseado em coletas de campo e análises laboratoriais, apresenta limitações relacionadas a custos, logística e baixa resolução espaço-temporal (Giardino *et al.*, 2014). Como alternativa, o sensoriamento remoto permite ampliar a cobertura espacial e temporal das análises. A dinâmica de eutrofização apresentada por reservatórios urbanos resulta em um ambiente opticamente complexo, sendo um desafio para a estimativa da qualidade da água de maneira remota baseada puramente em dados de reflectância e índices empíricos. Dessa forma, a utilização de modelos de aprendizado de máquina surge como alternativa para superar esse desafio, sendo capazes de capturar relações não lineares complexas entre variáveis (Mello *et al.*, 2026). Nesse contexto, este trabalho propõe a utilização de imagens do satélite Sentinel-2 associadas a técnicas de aprendizado de máquina para a estimativa da turbidez em um reservatório urbano eutrofizado.

**Palavras-chave:** Aprendizado de Máquina; Sensoriamento Remoto; Reservatórios Urbanos; Turbidez; Modelagem.

## Metodologia

O local de estudo situa-se no Reservatório de Ibirité (MG), localizado na região metropolitana de Belo Horizonte, caracterizado como um sistema urbano eutrófico, com elevada variabilidade espaço-temporal da qualidade da água e com o espelho d'água parcialmente coberto por plantas aquáticas flutuantes (macrófitas) (Janke *et al.*, 2011). Os dados utilizados neste estudo consistem em coletas mensais realizadas entre agosto de 2024 e outubro de 2025, coincidentes com a passagem do satélite Sentinel-2 (resolução espacial de 10m/píxel). A seleção de imagens contou com filtragem de cenas com baixa cobertura de nuvens e mínima interferência de macrófitas no espelho d'água. A triagem dos pontos foi realizada por meio do índice NDWI e análise da assinatura espectral, de modo a garantir a representatividade exclusiva da água (Figura 1).



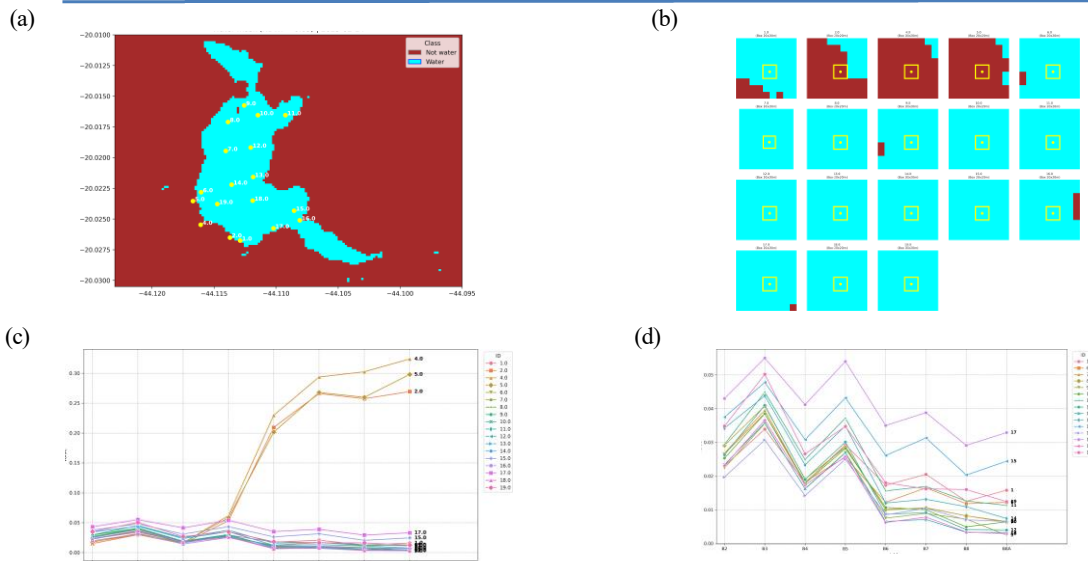


Figura 1. Exemplo de fluxo de triagem e exclusão de pontos com interferência: (a) máscara de NDWI; (b) zoom em caixas de 20×20 ao redor dos pontos; assinatura espectral antes (c) e após (d) exclusões.

Para a modelagem, foram utilizados índices espectrais como parâmetros de entrada (MCI, NDCI, NDRE, SABI, NDVI, NDTI e CVI), em substituição às bandas brutas, visando reduzir efeitos de retroespalhamento e realçar o sinal associado aos constituintes opticamente ativos. Foram avaliados nove algoritmos de regressão (Linear, SVR, KNN, Random Forest, Cubist, Ridge, CatBoost, Gradient Boosting e XGBoost), utilizando validação cruzada do tipo k-fold ( $k = 5$ ) para evitar colinearidade e *overfitting*.

## Resultados e Discussão

Do conjunto inicial de 254 amostras, o processo de filtragem resultou em 86 dados válidos, mantendo apenas pontos com assinatura espectral representativa da água (Figura 1). Essa redução evidencia a influência de interferências ópticas, como macrófitas e efeitos atmosféricos, sobre os dados de sensoriamento remoto. Os resultados de desempenho dos modelos testados estão apresentados na Figura 2.

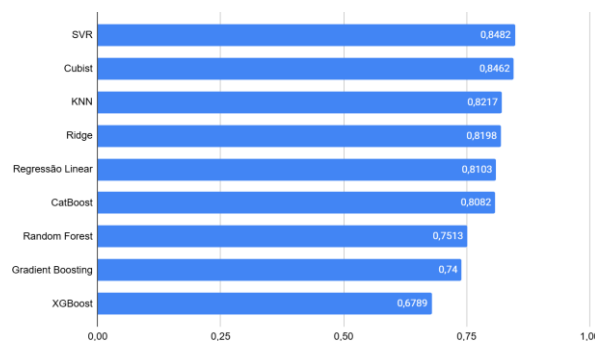


Figura 2. Comparação de performance dos modelos pós-validação cruzada (modelo  $\times R^2$ ).

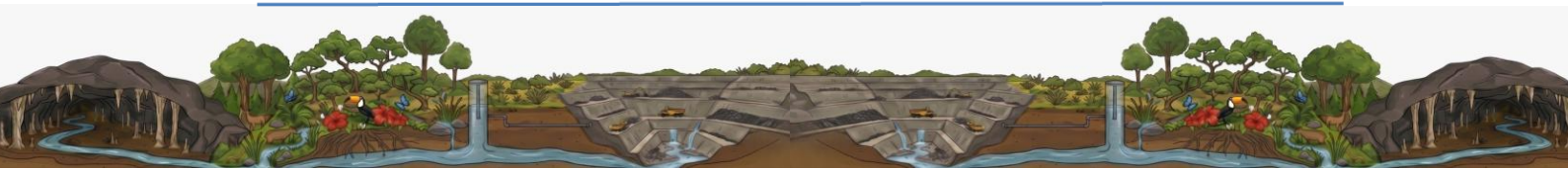
O modelo com melhor desempenho (SVR) apresentou  $R^2$  de 0,85 e RMSE de 1,67 NTU, indicando boa capacidade preditiva, mesmo em um ambiente opticamente complexo. Resultados semelhantes foram observados para o modelo Cubist (RMSE = 1,67 NTU), enquanto modelos como KNN e regressão linear apresentaram erros ligeiramente superiores (RMSE  $\approx$  1,79 e 1,86 NTU, respectivamente). A regressão linear também apresentou desempenho consistente ( $R^2 = 0,8103$ ), indicando que parte da relação entre os índices espectrais e a turbidez pode ser descrita por aproximações lineares. O melhor desempenho dos modelos baseados em índices pode ser atribuído à sua capacidade de reduzir efeitos de iluminância e realçar relações espectrais associadas a constituintes opticamente ativos, como sedimentos em suspensão, comportamento consistente com aplicações de sensoriamento remoto em qualidade da água (Pahlevan *et al.*, 2017).

## Considerações Finais

Os resultados indicam que a utilização de imagens do satélite Sentinel-2, associadas ao algoritmo SVR, apresenta bom desempenho na estimativa da turbidez no Reservatório de Ibirité, com resultados consistentes mesmo em um ambiente opticamente complexo. Como perspectivas futuras, destaca-se a inclusão de outros parâmetros de qualidade da água e a adaptação da metodologia para séries temporais com dados de diferentes sensores, como os satélites Landsat, permitindo a análise da evolução histórica do reservatório. Adicionalmente, prevê-se a realização de análises complementares, como avaliação de correlação entre variáveis e interpretação do modelo por meio de técnicas como SHAP, visando aprofundar a compreensão das relações entre os índices espectrais e a turbidez estimada. Por fim, ressalta-se que o sensoriamento remoto não substitui o monitoramento convencional, mas atua como ferramenta complementar, ampliando a cobertura espacial e temporal das análises e contribuindo para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos.

## Referências

- BASHIR, I. *et al.* **Concerns and threats of contamination on aquatic ecosystems.** Bioremediation and Biotechnology, v. 1, n. 1, p. 1–26, 27 jan. 2020
- GIARDINO, C. *et al.* **Optical remote sensing of lakes: an overview on Lake Maggiore.** Journal of Limnology 73 (s1), 201–214.
- JANKE, H. *et al.* **Assessment of the acute toxicity of eutrophic sediments after the addition of calcium nitrate (Ibirité reservoir, Minas Gerais-SE Brazil): initial laboratory experiments.** Brazilian Journal of Biology, v. 71, n. 4, p. 903–914, 1 nov. 2011.
- MELLO, C. C. S. *et al.* **High-resolution UAV-based multispectral imagery and machine learning modeling for water quality monitoring in eutrophic and oligotrophic reservoirs in Brazil.** Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. 41, p. 101907, jan. 2026.
- PAHLEVAN, N. *et al.* **Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations.** Remote Sensing of Environment, v. 201, p. 47–56, nov. 2017.



# Métodos e Critérios Para Seleção de Áreas Para Soluções Baseadas na Natureza em Drenagem Urbana: Uma Revisão Sistemática

Ronaldo Adriano Alves <sup>1</sup>, Anderson Paulo Rudke <sup>2</sup>, Yula Fernanda Brasil Santos<sup>3</sup>, Kalebe de Paula Souza Cruz <sup>4</sup>, Mauricio Moreira dos Santos <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Londrina (UEL). Autor correspondente: [ronaldo.adriano@uel.br](mailto:ronaldo.adriano@uel.br)

## Introdução

O aumento da frequência e intensidade de eventos hidrometeorológicos extremos, associado às mudanças climáticas e à crescente urbanização, tem intensificado os problemas de drenagem urbana, especialmente em cidades caracterizadas por elevados níveis de impermeabilização do solo (Alves et al., 2024; Vasantha Kumar; Ghanshyam Singh, 2022). Nesse contexto, as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) têm emergido como estratégias promissoras para complementar ou substituir infraestruturas convencionais, promovendo a redução do escoamento superficial, a melhoria da qualidade da água e o aumento da resiliência urbana.

Nos últimos anos, observa-se um crescimento significativo de estudos que buscam identificar áreas adequadas para a implementação de SBN, utilizando abordagens baseadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e métodos de Análise Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) (Asare; Atun; Pfeffer, 2024; Mahat et al., 2024; Mao et al., 2024; Ommer et al., 2024). Essas metodologias permitem integrar variáveis físico-ambientais, socioeconômicas e técnicas, subsidiando processos de planejamento urbano mais eficientes e fundamentados.

Diante desse cenário, esta revisão sistemática tem como objetivo identificar e analisar os principais critérios e métodos utilizados na literatura para o mapeamento de áreas aptas à implementação de SBN voltadas ao manejo de águas pluviais. Além disso, busca identificar as técnicas de SBN que têm sido mais utilizadas ao longo das últimas décadas. Desse modo, busca-se contribuindo para a identificação de lacunas de pesquisa e para o aprimoramento de estratégias de pesquisas sobre o tema.

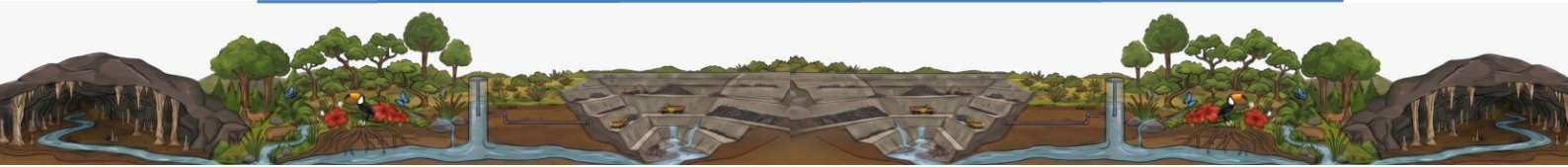
**Palavras-chave:** Soluções Baseadas na Natureza; drenagem urbana; análise multicritério; sistemas de informação geográfica.

## Metodologia

As buscas bibliográficas foram realizadas nas bases de dados Scopus e Web of Science, sendo os registros posteriormente extraídos e organizados com o auxílio do software estatístico R. Essas plataformas foram selecionadas devido à sua ampla cobertura multidisciplinar, bem como à possibilidade de realização de buscas estruturadas em campos específicos, como título, resumo e palavras-chave, além da indexação padronizada de termos atribuídos a cada referência.

A estratégia de busca foi definida a partir da combinação de descritores relacionados às SBN, drenagem urbana, análise espacial e métodos de tomada de decisão, utilizando operadores booleanos. A string de busca aplicada foi a seguinte:

*("nature-based solution\*" OR NBS OR "green infrastructure" OR "blue-green infrastructure" OR SuDS OR WSUD OR LID OR BMP OR "sponge city") AND (stormwater OR "urban drainage" OR "urban runoff" OR "pluvial flood\*" OR "urban flood\*" OR flooding OR waterlogging) AND ("site selection" OR suitability OR "suitability map\*" OR "aptitude map\*" OR priorit\* OR "spatial planning") AND ("geographic information system\*" OR "spatial analys\*" OR "multi- criteria" OR MCDA OR MCDM OR AHP OR ANP OR "weighted overlay").*



Foram aplicados filtros para restringir os resultados ao período de 2010 a 2025, considerando exclusivamente artigos publicados em periódicos científicos revisados por pares. As etapas do processo de identificação, triagem e seleção dos estudos estão detalhadas na Figura 1.

No processo de seleção dos artigos, foram incluídos aqueles com abordagem e aplicação de SBN para manejo de águas pluviais com uso de técnicas de análise espacial e/ou métodos multicritério, sendo excluídos trabalhos fora desse escopo temático. Após o processo de filtragem e seleção, 59 artigos foram selecionados e analisados integralmente para a extração sistemática dos dados. Foram extraídas informações como autores, ano de publicação, país, área de estudos, tipos de SBN, métodos de análise e critérios utilizados. Os dados obtidos foram organizados em uma base tabular estruturada, a qual serviu de suporte para as análises subsequentes. O tratamento dos dados e produção das figuras foram realizados no software RStudio, garantindo reprodutibilidade e padronização dos resultados.

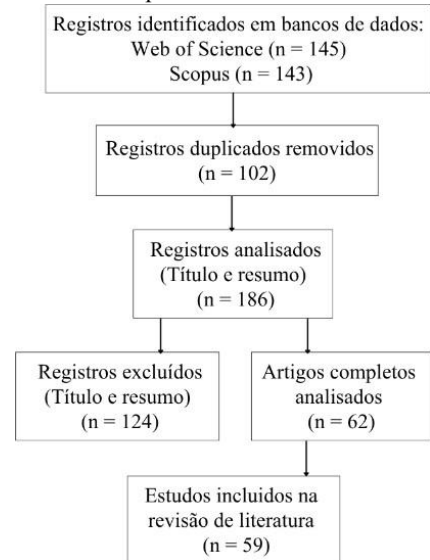
### Resultados

A aplicação da estratégia de busca resultou na identificação de 288 registros nas bases Scopus e Web of Science, dos quais, após a remoção de duplicatas e aplicação dos critérios de elegibilidade, 59 artigos foram selecionados para análise final. Verificou-se o predomínio de abordagens baseadas em análise multicritério (MCDA/MCDM), com destaque para o uso

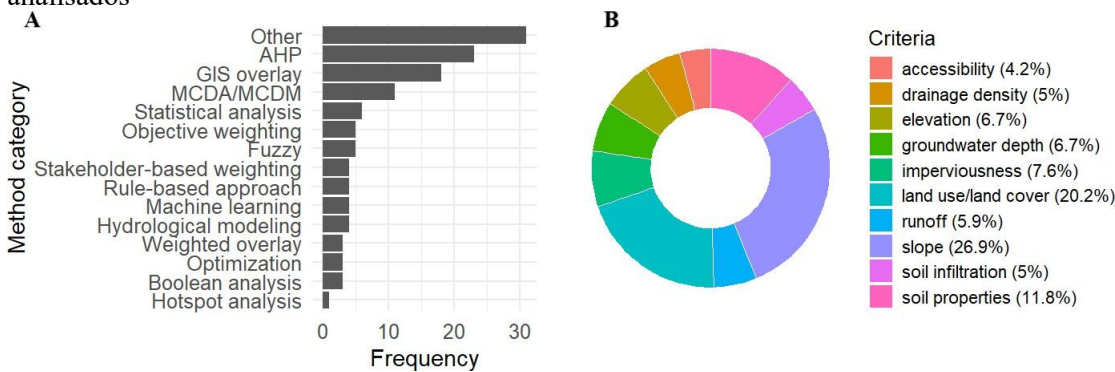
do método AHP (Analytic Hierarchy Process), frequentemente combinado a técnicas de ponderação e análise espacial. Além disso, foram identificadas abordagens complementares, como métodos estatísticos (e.g., PCA), algoritmos de otimização e técnicas de aprendizado de máquina, ainda que em menor frequência (Fig. 2A).

Os critérios mais utilizados nos processos de seleção envolveram variáveis biofísicas (uso e cobertura do solo, declividade, tipo de solo) e, em menor medida, fatores socioeconômicos e de infraestrutura (Fig. 2B).

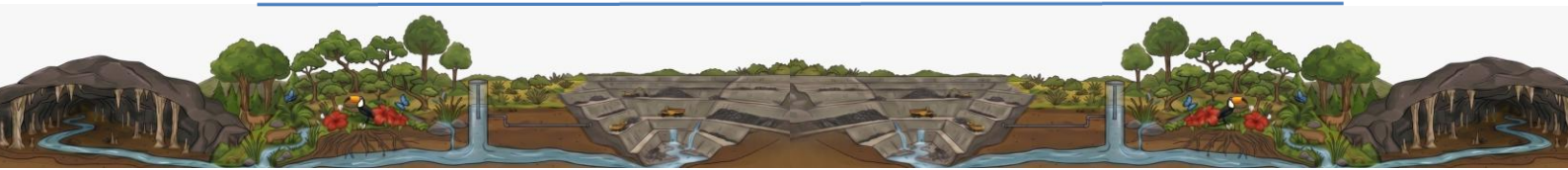
**Fig. 1-** Fluxograma do processo de seleção dos estudos para a revisão de literatura



**Fig. 2 -** Frequência dos métodos de tomada de decisão e distribuição dos critérios utilizados nos estudos analisados

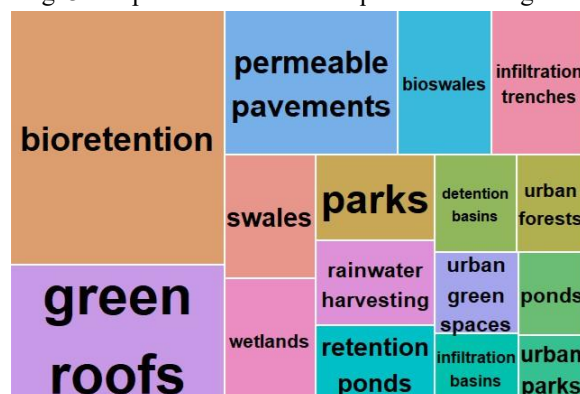


Com base na figura, observa-se que os métodos mais utilizados se concentram em abordagens multicritério, com destaque para técnicas como AHP, MCDA/MCDM e análises baseadas em SIG, evidenciando a forte integração entre análise espacial e suporte à tomada de decisão. De modo geral, os resultados indicam uma predominância dessas abordagens na seleção de áreas para implementação de SBN, reforçando seu papel central em estudos dessa natureza.



Além disso, nota-se uma concentração em critérios físico-ambientais mais tradicionais, como declividade, uso e cobertura do solo e propriedades do solo, os quais orientam a escolha de soluções de drenagem sustentável. Em relação aos tipos de SBN, as soluções mais recorrentes foram ranqueadas. Respectivamente, as mais utilizadas e avaliadas foram: (1º) sistemas de biorretenção (jardins de chuva); (2º) Telhado verde, (3º) pavimentos permeáveis e (4º) valas de biorretenção (bioswales) (Fig. 3), evidenciando uma clara predominância de estratégias voltadas à infiltração, retenção e controle do escoamento superficial em ambientes urbanos.

Fig. 3 – Tipos de SBN mais frequentes nos artigos



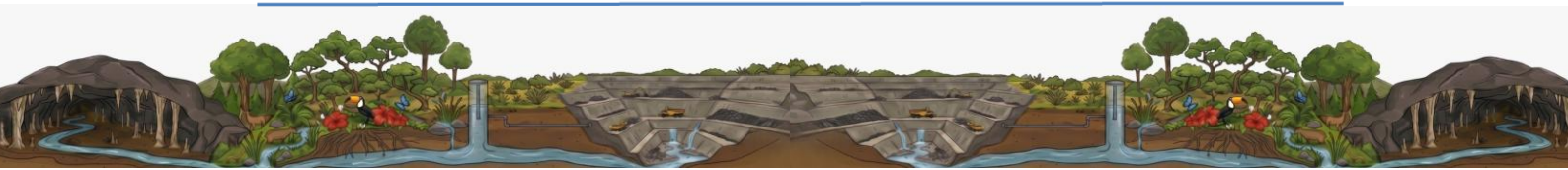
### Considerações Finais

As evidências levantadas nesta revisão sistemática demonstram que a seleção de áreas para implementação de Soluções Baseadas na Natureza tem sido majoritariamente orientada por abordagens multicritério integradas a análises espaciais, com forte ênfase em variáveis físico-ambientais. Embora essas metodologias tenham se mostrado eficazes para o suporte à tomada de decisão, observa-se uma ainda limitada incorporação de fatores socioeconômicos e institucionais.

Além disso, a predominância de soluções voltadas à infiltração e retenção de águas pluviais indica uma concentração em estratégias já consolidadas. Nesse sentido, o estudo evidencia a necessidade de avanços metodológicos que promovam abordagens mais integradas e multidimensionais, contribuindo para o planejamento urbano sustentável e o fortalecimento da resiliência frente aos desafios hidrometeorológicos.

### Referencias

- ALVES, Ronaldo Adriano *et al.* Flood vulnerability mapping in an urban area with high levels of impermeable coverage in southern Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 24, n. 3, p. 96, 8 set. 2024.
- ASARE, Prince; ATUN, Funda; PFEFFER, Karin. Spatial Multi-Criteria Analysis for Discovering Nature-Based Solutions Location for Urban Flood Mitigation in Accra. **Applied Spatial Analysis and Policy**, v. 17, n. 1, p. 207–239, 16 mar. 2024.
- MAHAT, Anish *et al.* Optimizing placement of bioretention systems in the US Puget Sound region. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 60, n. 5, p. 913– 927, 20 out. 2024.
- MAO, Yuyang *et al.* Scenario-Based Green Infrastructure Installations for Building Urban Stormwater Resilience—A Case Study of Fengxi New City, China. **Sustainability**, v. 16, n. 10, p. 3990, 10 maio 2024.
- OMMER, Joy *et al.* The Impact of Spatial Resolutions on Nature-Based Solution Suitability Mapping for Europe. **Applied Sciences**, v. 14, n. 11, p. 4608, 27 maio 2024.
- VASANTHA KUMAR, S.; GHANSHYAM SINGH, S. A systematic approach for effective storm water management at building level during extreme rainfall events—a case study. **Urban Water Journal**, 2022.



# Da Heterogeneidade Metodológica à Sistematização: O Projeto Espeleometria Digital no Licenciamento Ambiental Espeleológico

Icaro Assis<sup>1</sup>, Otávio Leite<sup>1</sup>, Bernardo Oliveira<sup>1</sup>, Vitor Ortega<sup>1</sup>, Thiago Lima<sup>3</sup>, Gustavo Freitas<sup>2</sup>, Mario Campos<sup>1</sup>, Hector Azpuru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Autor correspondente: icaroassis@ufmg.br

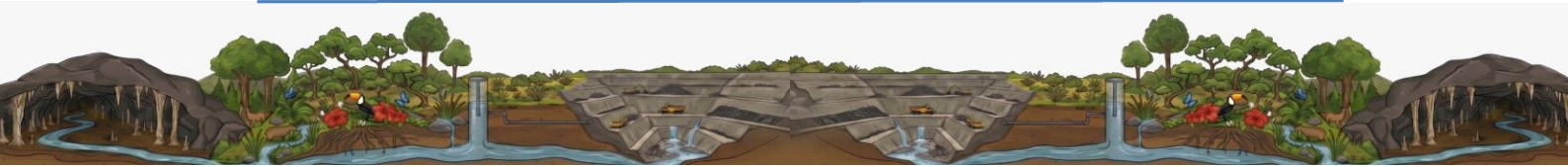
## Resumo

No Brasil, a proteção das cavernas integra o campo do licenciamento ambiental, e a Instrução Normativa nº 2, de 30 de agosto de 2017, define a metodologia de classificação do grau de relevância dessas cavidades, incluindo atributos como dimensões notáveis em extensão, desnível, área ou volume. Nesse contexto, a espeleometria e a espeleotopografia assumem papel estratégico, pois subsidiam estudos de impacto, monitoramento e tomada de decisão técnica. O presente artigo apresenta o projeto Espeleometria Digital: Metodologias de Espeleometria Utilizando Nuvens de Pontos em 3D, desenvolvido como uma resposta técnico-científica aos desafios atuais do licenciamento ambiental aplicado ao patrimônio espeleológico. O projeto parte do diagnóstico de que os métodos convencionais permanecem relevantes, porém apresentam limitações associadas ao nível de detalhe, à reprodutibilidade, à rastreabilidade e à integração com fluxos digitais, ao mesmo tempo em que a adoção de técnicas baseadas em nuvens de pontos 3D ainda ocorre de forma heterogênea. A partir da revisão crítica da bibliografia atual, a principal contribuição do projeto reside na aplicação de novas tecnologias de aquisição de dados e na estruturação de um fluxo metodológico voltado à sistematização, comparabilidade e validação de produtos espeleométricos digitais. A metodologia se organiza em etapas de coleta de dados, delimitação manual, alinhamento, registro, filtragem, subamostragem, seleção de entradas, georreferenciamento e cálculo de métricas como volume, projeção horizontal, desnível e área em planta. Os resultados parciais indicam que o projeto constitui uma base promissora para aproximar inovação técnica, padronização procedimental e discussão regulatória no âmbito da espeleologia aplicada ao licenciamento ambiental.

**Palavras-chave:** espeleometria digital; licenciamento ambiental; nuvens de pontos 3D; patrimônio espeleológico; padronização metodológica.

## Introdução

A proteção de cavernas no Brasil está diretamente vinculada ao licenciamento ambiental, especialmente após a redefinição do marco regulatório promovida pelo Decreto nº 6.640/2008 e pela Instrução Normativa MMA nº 2/2017, que consolidou a metodologia de classificação do grau de relevância e incluiu, entre os atributos de relevância máxima, as dimensões notáveis em extensão, desnível, área ou volume. Nesse contexto, a espeleometria e a espeleotopografia assumem papel técnico central, pois subsidiam a caracterização morfológica das cavidades e a elaboração dos estudos exigidos no processo de licenciamento ambiental (BRASIL, 2008, 2017; CRUZ; PILÓ, 2019). No campo aplicado, o mapeamento de cavernas no Brasil foi historicamente construído a partir de procedimentos convencionais baseados em trena, bússola e clinômetro, com forte dependência da padronização das equipes e do controle de precisão em campo. Esse repertório segue relevante, mas a literatura recente mostra que o setor convive com crescente incorporação de sensores integrados, fotogrametria digital e sistemas de varredura 3D. Esse cenário reforça a necessidade de sistematização metodológica, comparabilidade entre produtos e melhor rastreabilidade dos dados gerados (FERNANDES et al., 2023). É nesse ponto que a espeleometria digital ganha relevância como fronteira entre



técnica, padronização e regulação. A literatura demonstra que abordagens baseadas em escaneamento com sensores LiDAR ampliam significativamente as possibilidades de registro tridimensional, georreferenciamento e extração de métricas e morfologias. Ao mesmo tempo, a adoção dessas técnicas requer a adoção de critérios metodológicos claros para sua incorporação em procedimentos de licenciamento (ALESSANDRI et al., 2022; ZLOT; BOSSE, 2014).

## **Materiais e Métodos**

O presente artigo foi estruturado como uma síntese técnico-bibliográfica orientada por um problema aplicado: a dificuldade de converter avanços recentes em processamento tridimensional em produtos espeleométricos consistentes e fundamentados em contexto regulatório. Para isso, são articulados três eixos: o enquadramento normativo do licenciamento de cavidades, o repertório metodológico consolidado da espeleotopografia convencional e a literatura recente sobre documentação digital de cavernas. Essa análise detalhada posiciona o projeto como inovação instrumental e como uma proposta de sistematização metodológica voltada ao uso de nuvens de pontos 3D na espeleometria. Nesse sentido, a metodologia em desenvolvimento se organiza em etapas de coleta de dados, delimitação manual, alinhamento e registro, filtragem, subamostragem, seleção de entradas, georreferenciamento e cálculo de métricas como volume, projeção horizontal, desnível e área em planta.

## **Resultados e Discussão**

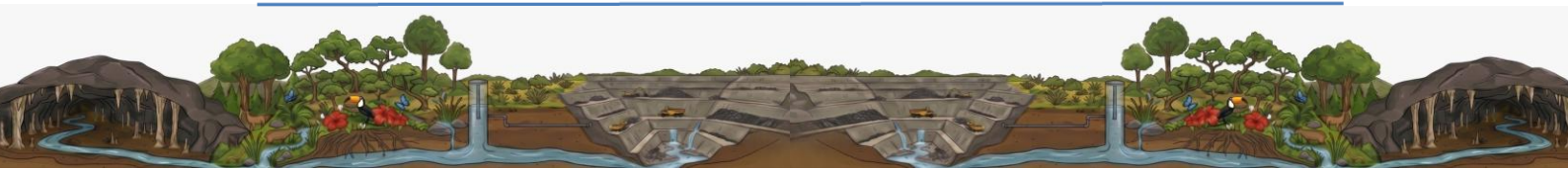
A revisão da literatura indica que o principal benefício da espeleometria digital se encontra no aumento de detalhamento morfométrico e na possibilidade de produzir modelos reprodutíveis, auditáveis e comparáveis ao longo do tempo. Em contraste com os métodos tradicionais, cuja qualidade depende mais intensamente das decisões em campo, fluxos digitais permitem reavaliar o mesmo conjunto de dados para geração de plantas, perfis, seções e métricas volumétricas com maior rastreabilidade. Essa mudança é particularmente relevante em contextos de licenciamento, nos quais extensão, área, desnível e volume são parâmetros que estão diretamente relacionados à classificação de relevância. Ao mesmo tempo, a literatura não sustenta a ideia de substituição simples ou universal dos métodos convencionais por um único método digital. Trabalhos recentes mostram que fotogrametria, LiDAR terrestre, sistemas que utilizam SLAM<sup>1</sup> e sensores móveis apresentam ganhos importantes de rapidez, densidade geométrica e integração espacial, mas também trazem limitações próprias relacionadas a custo, logística, oclusões, ou processamento dos dados. Assim, o avanço mais consistente está na construção de protocolos metodológicos consistentes para a aquisição, seleção, tratamento e validação dos dados, de acordo com o contexto da cavidade e o objetivo do estudo (ALESSANDRI et al., 2022; ZLOT; BOSSE, 2014). Nessa perspectiva, o projeto propõe abordar uma lacuna concreta do setor: a incorporação de dados digitais tridimensionais a fluxos de trabalho que, embora já adotados por parte das consultorias e das pesquisas aplicadas, ainda carecem de maior padronização técnico-procedimental. O problema central deixa de ser apenas “medir cavernas” e passa a ser “medir de modo consistente, reprodutível, comparável e legislativamente defensável”, o que aproxima o debate tecnológico da pauta de padronização metodológica no licenciamento ambiental.

## **Considerações Finais**

O enquadramento bibliográfico mais robusto deste trabalho é da espeleometria digital como resposta técnico-científica a uma demanda prática do licenciamento ambiental brasileiro. A base bibliográfica aponta que os métodos digitais já demonstram potencial para ampliar a precisão, o detalhamento e a rastreabilidade, mas sua consolidação em contexto regulatório depende de critérios metodológicos claros, de comparações consistentes e de amadurecimento procedimental. Assim, o presente projeto apresenta uma proposta situada na intersecção entre inovação técnica, padronização metodológica e demanda regulatória.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Vale S.A. e à equipe do projeto "Espeleometria Digital" pela construção coletiva das atividades de pesquisa e discussão técnica que fundamentam este artigo. Registram agradecimento aos



professores Héctor Azpúrua, Erickson R. Nascimento, Douglas G. Macharet, Luiz Chaimowicz, Mario F. M. Campos, Anísio Braga, Carmela Braga e Gustavo M. Freitas, bem como aos bolsistas Bernardo Venâncio Cunha Oliveira, Isaac Reyes, Murilo Paulo, João Braga, Yan Figueiras, Otávio Almeida Leite, Matheus B. Oliveira, Icaro Assis e Vitor Ortega, cuja atuação é fundamental para a condução das atividades do projeto.

### Referências Bibliográficas

ALESSANDRI, Luca et al. A flexible and swift approach for 3D image-based survey in a cave. *Applied Geomatics*, v. 14, p. 5-19, 2022. DOI: 10.1007/s12518-020-00309-4.

BRASIL. Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5º-A e 5º-B ao Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. *Diário Oficial da União: Brasília, DF*, 10 nov. 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 2, de 30 de agosto de 2017. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, conforme previsto no art. 5º do Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. *Diário Oficial da União: Brasília, DF*, 1 set. 2017.

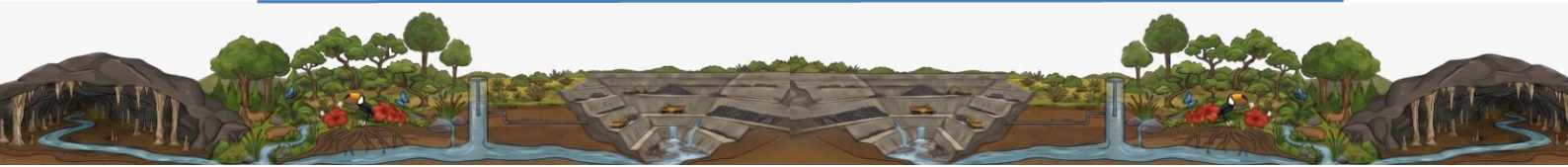
CRUZ, Jocy Brandão; PILÓ, Luís Beethoven (org.). *Espeleologia e licenciamento ambiental*. Brasília: ICMBio, 2019. 262 p. ISBN 978-65-5024-005-9.

FERNANDES, Adam Barros et al. Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 3, e2315, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i3.2315.

ZLOT, Robert; BOSSE, Michael. Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 76, n. 3, p. 191-206, 2014. DOI: 10.4311/2012EX0287.

---

<sup>1</sup> SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), introduzido em 1995 por Hugh Durrant-Whyte, foi desenvolvido para resolver o problema de um robô construir um mapa de um ambiente desconhecido enquanto navegava nele.



# Evolução Normativa e Instrumentos de Gestão Para Segurança de Barragens de Mineração no Brasil

Bárbara Alves Bastos <sup>1</sup>, Alana Luiza Gonçalves Ferreira <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Autor correspondente:  
[Barbaraalves34@gmail.com](mailto:Barbaraalves34@gmail.com)

## Resumo

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) representa o principal instrumento normativo brasileiro voltado à prevenção, ao controle e à mitigação de riscos associados a barragens utilizadas para a acumulação de água, rejeitos e resíduos industriais. Instituída inicialmente pela Lei nº 12.334/2010 e posteriormente revisada e fortalecida pela Lei nº 14.066/2020, a PNSB consolidou um marco regulatório que busca garantir a integridade estrutural dessas obras, proteger vidas humanas, preservar o meio ambiente e reduzir potenciais danos socioeconômicos decorrentes de falhas ou rupturas. A legislação estabelece critérios técnicos claros para a classificação das barragens quanto à categoria de risco, ao dano potencial associado e ao volume armazenado, orientando a aplicação proporcional de exigências de controle, monitoramento e fiscalização.

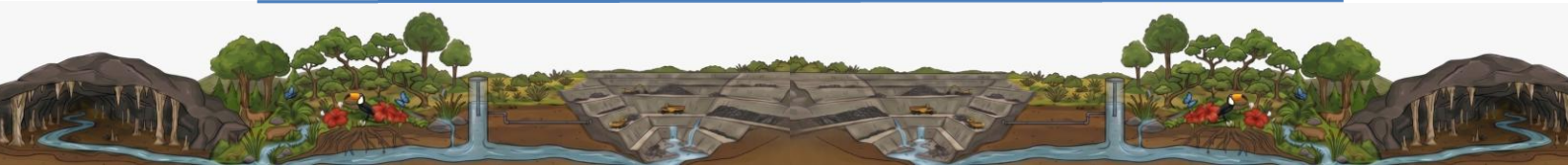
Nesse contexto, a política introduz e consolida instrumentos essenciais para a gestão da segurança de barragens, com destaque para o Plano de Segurança da Barragem (PSB). Esse plano configura-se como um documento técnico estruturado, que reúne diretrizes, procedimentos e registros destinados a assegurar o acompanhamento sistemático do desempenho da estrutura ao longo de seu ciclo de vida. O PSB abrange, entre outros aspectos, a realização de inspeções de rotina e especiais, a execução de revisões periódicas de segurança, o controle de instrumentos de monitoramento, o registro de anomalias e a adoção de medidas corretivas e preventivas. Trata-se, portanto, de um instrumento central para a gestão integrada de riscos, permitindo a identificação antecipada de condições que possam comprometer a estabilidade da barragem.

O PSB é organizado em volumes específicos, cada um voltado a um componente distinto da segurança, sendo o Volume V do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) um dos mais relevantes sob a ótica da proteção da vida humana. O PAEBM tem como finalidade principal orientar a atuação do empreendedor e das autoridades competentes em situações de emergência, definidas como eventos capazes de comprometer a segurança da barragem e gerar consequências imediatas ou iminentes para as áreas a jusante. Esse plano estabelece cenários de emergência, fluxos de comunicação interna e externa, responsabilidades institucionais, procedimentos de acionamento de alertas e estratégias de autoproteção da população potencialmente afetada.

Além disso, o PAEBM promove a articulação entre o empreendedor, os órgãos de proteção e defesa civil e as comunidades localizadas na Zona de Autossalvamento (ZAS) e na Zona de Segurança Secundária (ZSS), assegurando que as ações previstas sejam conhecidas, testadas e continuamente atualizadas. A efetividade desse instrumento depende não apenas de sua elaboração formal, mas também da realização periódica de treinamentos, simulados e campanhas de conscientização, que contribuem para fortalecer a capacidade de resposta em situações críticas e reduzir o tempo de reação diante de eventos adversos.

No âmbito da regulamentação infralegal, a Agência Nacional de Mineração (ANM) desempenha papel fundamental na operacionalização da PNSB. Por meio da Resolução nº 95/2022, bem como de atualizações posteriores, a ANM consolidou diretrizes técnicas que definem o conteúdo mínimo obrigatório do PSB e do PAEBM, as responsabilidades dos profissionais legalmente habilitados e a periodicidade de elaboração, revisão e atualização desses documentos. A norma busca assegurar padronização, consistência técnica e aderência às melhores práticas de gestão de riscos no setor mineral.

Um dos avanços mais relevantes introduzidos pela regulamentação da ANM é a exigência da Avaliação de Conformidade e Operacionalidade (ACO), auditoria anual conduzida por equipe técnica independente do empreendedor. A ACO tem como objetivo avaliar não apenas a conformidade documental dos planos, mas



também sua efetiva operacionalização. Entre os aspectos verificados destacam-se a qualidade e atualização dos mapas de inundação, o funcionamento dos sistemas de alerta e alarme sonoro, a realização de simulados de emergência, a integração com os planos municipais de proteção e defesa civil e a capacitação das equipes envolvidas.

A ACO é formalizada por meio de dois documentos distintos e complementares: o Relatório de Conformidade e Operacionalidade (RCO), que apresenta a análise técnica detalhada e os achados da auditoria, e a Declaração de Conformidade e Operacionalidade (DCO), na qual o empreendedor atesta o atendimento às exigências legais e regulamentares. Esse instrumento tornou-se elemento central do sistema de controle regulatório, contribuindo para o fortalecimento da transparência, da rastreabilidade das informações e da qualidade técnico-operacional da gestão de barragens.

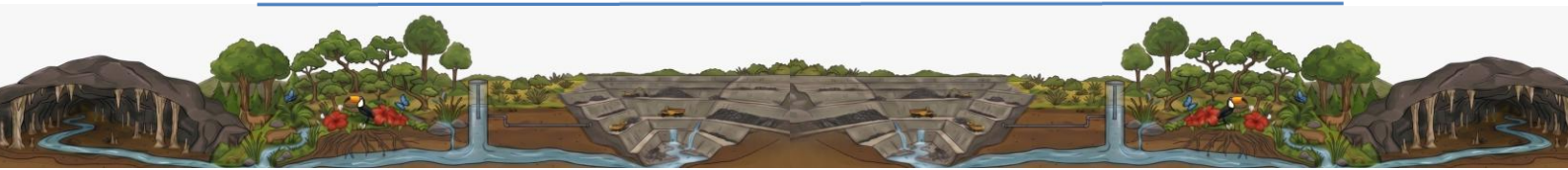
O processo de evolução normativa da segurança de barragens no Brasil foi intensificado a partir dos rompimentos ocorridos em Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, cujos impactos socioambientais e econômicos evidenciaram fragilidades estruturais, institucionais e organizacionais no setor. Esses eventos catalisaram mudanças significativas no marco regulatório, resultando em medidas mais restritivas, como a proibição do método construtivo a montante para barragens de mineração, a obrigatoriedade de descaracterização de estruturas existentes construídas com essa técnica e o fortalecimento das sanções administrativas, civis e penais aplicáveis aos responsáveis.

Paralelamente, houve ampliação das exigências relacionadas ao monitoramento geotécnico, à fiscalização e à integração de informações técnicas aos sistemas da ANM, reforçando uma abordagem preventiva baseada em evidências, indicadores de desempenho e gestão contínua do risco. Essas transformações refletem uma mudança de paradigma, que desloca o foco da atuação reativa para uma gestão prospectiva da segurança, orientada pela identificação antecipada de ameaças e pela implementação de medidas de controle proporcionais ao nível de risco.

Nesse contexto, a consolidação de uma cultura organizacional voltada à gestão de riscos emerge como elemento essencial para a efetividade da PNSB. Tal cultura pressupõe o engajamento articulado dos empreendedores, dos órgãos reguladores e das comunidades potencialmente afetadas, reconhecendo a participação social como componente estratégico da segurança. A transparência das informações, o diálogo permanente com a população e a incorporação das percepções e experiências locais fortalecem a legitimidade dos instrumentos de gestão e ampliam a resiliência dos territórios expostos.

Os avanços observados no cenário brasileiro também aproximam o país de referenciais internacionais, como o Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), que estabelece princípios e requisitos globais para a governança, o planejamento e a operação segura de estruturas de disposição de rejeitos. A convergência entre a legislação nacional e esses padrões internacionais contribui para o fortalecimento da governança corporativa, para a melhoria contínua dos processos e para a redução de riscos sistêmicos associados à atividade minerária. A atuação técnica no setor evidencia, assim, uma evolução gradual rumo a um modelo de gestão mais robusto, integrado e orientado à proteção da vida, do meio ambiente e da sustentabilidade socioambiental.

**Palavras-chave:** Gestão de Riscos; Segurança de Barragens; Regulação; PAEBM; ACO.



# Sobre Infiltração de Água em Cavidades Ferríferas: Exemplo na Cavidade CPMT\_0016

Georgete Dutra <sup>1</sup>, Fernando Frigo <sup>2</sup>, Barbara Colen <sup>3</sup>, Vinícius Brito <sup>4</sup>, Any Souza <sup>5</sup>, Iuri Brandi <sup>6</sup>

<sup>1</sup> VALE, <sup>3</sup> SPELAYON CONSULTORIA. Autor correspondente: [georgete.dutra@vale.com](mailto:georgete.dutra@vale.com)

## Resumo Expandido

Estudos de monitoramento e observações de campo realizados ao longo dos anos em cavidades ferríferas (DUTRA et al, 2013; DUTRA, 2017; DUTRA et al., 2024) permitiram registrar diversos comportamentos hidrológicos associados à infiltração, percolação e armazenamento de água na canga e no itabirito. As características estruturais e sedimentares desses materiais influenciam diretamente a entrada de água nas cavidades e a dinâmica hídrica interna.

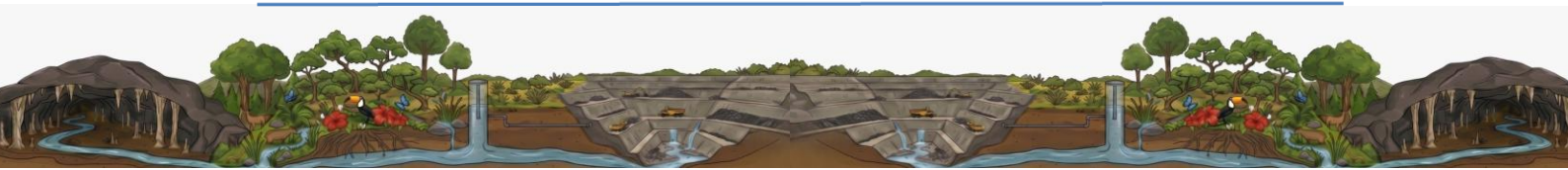
## Metodologia

Foram monitoradas cavidades em diversas localidades no estado do Pará e em Minas Gerais. O monitoramento consistiu em instalação de pluviógrafo externo e interno (o interno utilizado como medidor de vazão de infiltração), monitoramento climático (temperatura e umidade), plotagem em mapa, estimativa de vazão e caracterização dos aportes hídricos externos e internos (DUTRA, 2017).

## Exemplo Cavidade CPMT\_0016

A cavidade está situada em média vertente de uma encosta inclinada sendo a entrada caracterizada por uma quebra no relevo com cerca de 0,5 m de desnível. Apresenta projeção horizontal de 53,3 m, área de 157 m<sup>2</sup>, volume aproximado de 216 m<sup>3</sup>. A entrada possui dimensões reduzidas, aproximadamente 0,4 m, conduzindo a um salão inicial de maior amplitude, o qual se bifurca em dois condutos principais com desenvolvimento ascendente.

O itabirito aparece nas paredes e porções distais da cavidade e a canga predomina no teto e nas proximidades da entrada. Externamente à cavidade observa-se canga detrítica, que ocorre ora estruturada, ora intercalada a afloramentos de itabirito, evidenciando uma relação geomorfológica e litológica direta entre os materiais. O itabirito mostra-se semifriável e intensamente intemperizado, com coloração marrom-avermelhada. A canga é constituída por fragmentos mal selecionados de hematita e itabirito com ampla variação granulométrica, incluindo matacões, seixos e grânulos, e formas angulosas a subangulosas. Esses clastos encontram-se inseridos em matriz laterítica, característica típica de cangas formadas por processos residuais e coluvionares. Ressalte-se que a deposição das cangas sobre a rocha subjacente (hematítico, itabirito, rochas básicas, entre outras) ocorreu em tempos geologicamente recentes. Enquanto as formações ferríferas possuem idades entre aproximadamente 2.700 Ma e 2.400 Ma, as cangas apresentam idades muito mais jovens, variando de cerca de 70 Ma, 50 Ma até atualmente, podendo incluir depósitos recentes, resultantes de um processo contínuo de retrabalhamento superficial (VASCONCELOS et al., 2013).



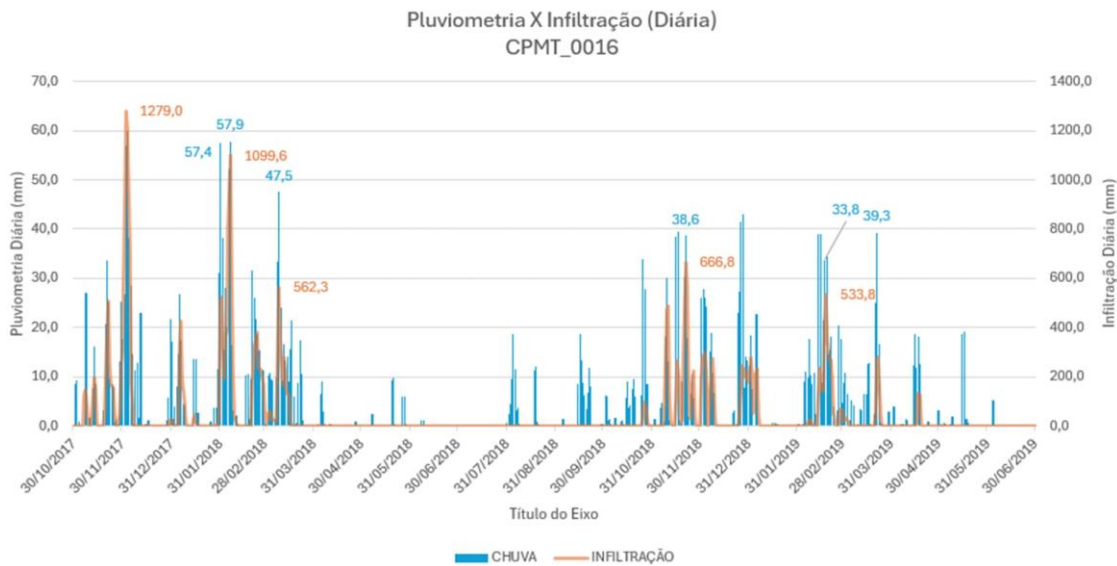


Figura 1: Dados de pluviometria x infiltração.

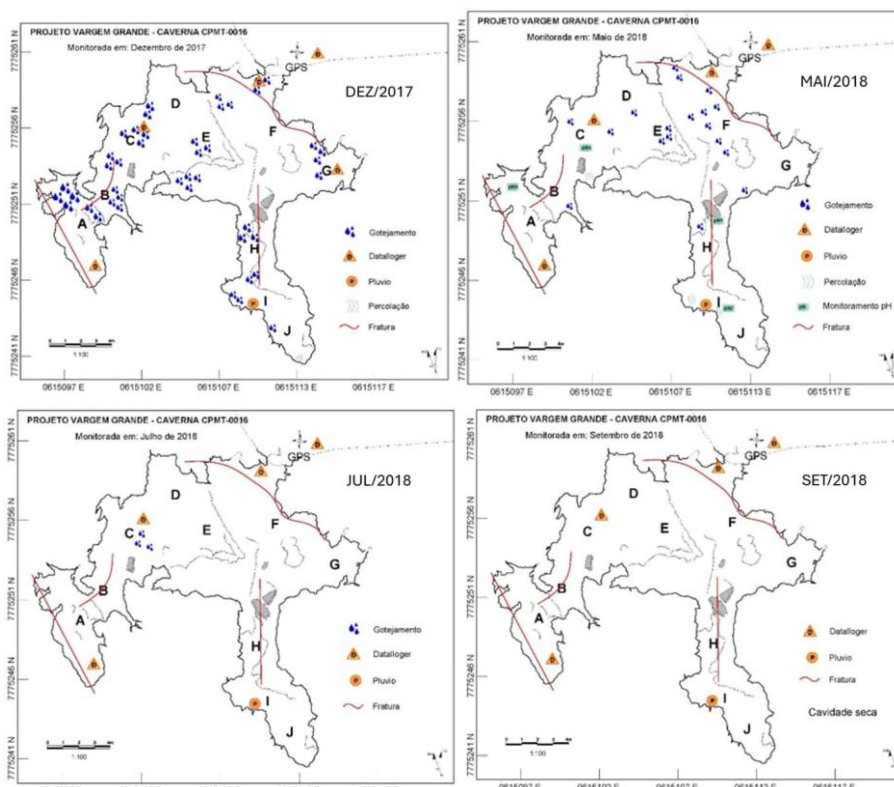
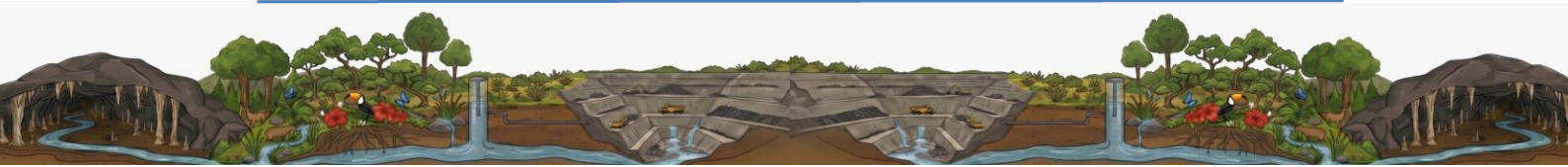


Figura 2: Mapas evidenciando a variação sazonal do gotejamento (infiltração).

Complementarmente, foram realizadas visitas mensais à cavidade para a identificação e o mapeamento dos pontos ativos de gotejamento – Figura 2. Em cada visita, registrou-se a taxa de gotejamento por meio da contagem do número de gotas por minuto em cada ponto observado, permitindo acompanhar a variação temporal da infiltração e sua relação com os eventos pluviométricos externos.

### Conclusões

No caso da CPMT\_0016 as cangas mostram infiltração e percolação de águas mais rápidas se comparadas com as cangas com presença de argila ou outros sedimentos devido à predominância de fragmentos



ferríferos. O levantamento das discontinuidades internas da cavidade revelou fraturas e planos estruturais

diretamente associados à infiltração da água. O próprio gotejamento – em linha – revela a presença de discontinuidades, tipo por exemplo, fraturas. A presença de discontinuidades e construções biológicas favorecem a infiltração/percolação.

A cavidade CPMT\_0016, assim como as demais cavidades monitoradas, apresenta variação sazonal bem definida. Na Figura 1 observa-se que, após eventos pluviométricos, a água atinge o interior da cavidade com um curto atraso temporal, associado ao tempo de concentração necessário para que ocorra a acumulação superficial e o conseqüente início do escoamento e da percolação. Esse comportamento é característico de sistemas nos quais a recarga depende tanto da estrutura do meio físico quanto do estado de saturação antecedente.

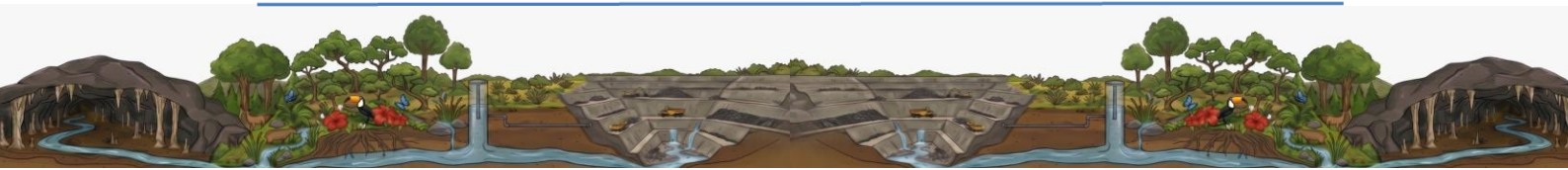
Ainda analisando o gráfico da Figura 1, durante o período seco, parte das precipitações iniciais não contribui para a infiltração no interior da cavidade. Isso ocorre porque, sob condições de baixa umidade, é necessário um volume mínimo de chuva para promover a saturação inicial do solo e dos materiais inconsolidados. Somente após essa fase é que o escoamento superficial e a percolação vertical se estabelecem de forma efetiva. Dessa forma, eventos de chuva de pequena duração ou alta intensidade podem resultar predominantemente em escoamento superficial, sem geração de gotejamentos internos.

No período chuvoso, os gotejamentos tornam-se mais frequentes e intensos devido ao aumento do grau de saturação do solo e da diminuição da capacidade de retenção da água pela vegetação e pelos interstícios da rocha alterada (DUNNE, 1990). Uma vez saturado o meio superficial, a água excedente infiltra-se com maior rapidez e alcança as fraturas, poros e discontinuidades que conectam o ambiente externo ao interior da cavidade. Mesmo em áreas dominadas por afloramentos de canga e hematita — litologias geralmente associadas a baixa permeabilidade matricial — a infiltração ocorre de forma significativa, provavelmente favorecida pela presença de discontinuidades estruturais e porosidade secundária.

É importante destacar que o volume de água disponível externamente na área de contribuição hidrológica é substancialmente maior do que o volume efetivamente infiltrado e registrado no interior da cavidade. Assim, a água somente alcança o sistema subterrâneo após a saturação dos solos e o início do escoamento superficial direcionado para zonas preferenciais (descontinuidades). Esse comportamento evidencia que a dinâmica hídrica na CPMT\_0016 depende de uma combinação de fatores, incluindo intensidade e duração das chuvas, estado hídrico antecedente, características estruturais e sedimentares do material, tipo de vegetação que compõe o entorno da cavidade.

## Bibliografia

- DUNNE, T. Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. In: Groundwater Geomorphology. Geological. Soc. Am. Spec. Pap. 252, 1-28,1990.
- DUTRA, G.M.2013. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. In: RASTEIRO, M.A.; MORATO, L. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32, 2013. Barreiras. Anais... Campinas: SBE, 2013. p.415-426.
- DUTRA, G.M. Análise de susceptibilidade de duas cavidades em litologia de ferro na Serra do Gandarela, MG. Estudo de caso: AP\_0009 e AP\_0038. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- DUTRA, G.M. et al. 2024. Cavidades associadas a fluxos hipodérmicos. In: 51 CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 2024, poster. Anais... Belo Horizonte, MG: CBG, 2024.
- Tema 02 Recursos hídricos e geociências ambientais. ID 1872. p.125. Resumos.
- VASCONCELOS P. M., HEIM J. A., FARLEY K. A., MONTEIRO H. S. and WALTENBERG K. (2013) 40Ar/39Ar and (U-Th)/He - 4He/3He geochronology of landscape evolution and channel irondeposit genesis at LynnPeak, Western, Australia. Geochim. Cosmochim. Acta 117, 283–312.



# Radônio Como Recurso Para Investigação de Mudanças Climáticas e o Degelo da Camada Ativa na Recarga de Lagos Antárticos

Ana Clara Mariante Ferreira <sup>1</sup>, Ricardo Gomes Passos <sup>1</sup>, Caio Augusto Reis Macedo <sup>1</sup>, Júlia Severo <sup>1</sup>, Stela Dalva Santos Cota <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Autor correspondente: [anaclara.ferreira@cdtn.br](mailto:anaclara.ferreira@cdtn.br)

## Resumo

A Antártica tem sido submetida a transformações físicas e biogeoquímicas abruptas, impulsionadas pelo aquecimento de origem antropogênica. Esse cenário de instabilidade potencializa a ultrapassagem de limiares críticos, que desencadeiam retroalimentações climáticas e processos de degradação ambiental irreversíveis (ABRAM et al., 2025; DAVIES et al., 2026). Evidências indicam que a Península Antártica já superou em 1,5 °C os níveis térmicos pré- industriais, resultando em anomalias históricas, como o recuo sem precedentes do limite mediano do gelo marinho registrado em 2023 (ABRAM et al., 2025; DAVIES et al., 2026).

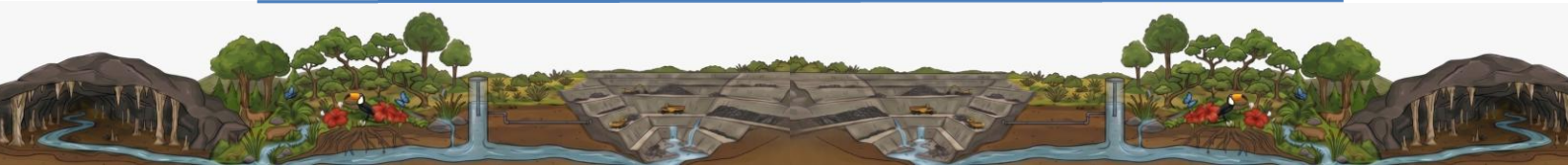
Essas alterações na temperatura refletem-se na hidrodinâmica oceânica e terrestre. O aporte massivo de água doce tem induzido reduções significativas na volumetria da Água de Fundo no Mar de Weddell, com projeções de declínio de 40% na Circulação de Revolvimento Antártica até 2050 (ABRAM et al., 2025). Simultaneamente, o derretimento acelerado do Manto de Gelo da Antártica Ocidental, ao carrear alta carga de intemperismo, compromete a capacidade oceânica de sequestro de carbono (STRUVE et al., 2026). Além dos impactos de escala global, os efeitos observados já acarretam prejuízos no ecossistema antártico, evidenciados por um declínio de 18% na produtividade de fitoplânctons nos últimos 26 anos e por falhas reprodutivas em massa nas colônias de pinguins-imperador (ABRAM et al., 2025). Nesse contexto, a caracterização da hidrologia subglacial e sua conectividade com sistemas superficiais e costeiros é fundamental para avaliar o balanço hídrico e o aporte de nutrientes aos ecossistemas (RICHARDSON et al., 2025; ZHOU et al., 2024).

Apesar de sua relevância, a quantificação dos fluxos subglaciais ainda é limitada por restrições logísticas e tecnológicas de acesso *in situ*, o que gera uma lacuna no entendimento das interações entre as dinâmicas subterrâneas e o degelo sazonal (RICHARDSON et al., 2025; ZHOU et al., 2024). Para superar essa barreira, o uso de traçadores ambientais oferece uma abordagem robusta e não invasiva. O radônio-222 (<sup>222</sup>Rn), um gás nobre radioativo, destaca-se pela sensibilidade em identificar o contato da água com a matriz rochosa (SCHUBERT et al., 2020).

Diferente das águas de degelo superficial, que apresentam concentrações mais baixas de <sup>222</sup>Rn, as águas subterrâneas são enriquecidas em até cinco ordens de grandeza devido ao decaimento do rádio-226 no aquífero (SCHUBERT et al., 2020). Tal contraste permite quantificar, a contribuição subterrânea em bacias dominadas pela criosfera e monitorar a reconfiguração das vias de drenagem frente ao recuo glacial (WAN et al., 2019; KIES et al., 2015).

O presente estudo investiga a aplicabilidade do <sup>222</sup>Rn no entorno da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), na Ilha Rei George. A área abriga os Lagos Norte e Sul, responsáveis pelo abastecimento humano da estação, além de sistemas efêmeros como o Córrego do Refúgio 1 e o Córrego Norte. Para elucidar os processos de fluxo no ambiente periglacial, foram instalados 14 poços de monitoramento (até 3,0 m de profundidade) visando a caracterização da camada ativa e sua interação com corpos hídricos superficiais.

As campanhas de amostragem ocorreram no verão austral de 2025-2026, abrangendo poços, cursos d'água, perfis de profundidade nos lagos e a interface costeira. No total, 166 amostras foram analisadas por meio de detectores semicondutores de barreira sólida (RAD7/RAD8). A análise da distribuição de <sup>222</sup>Rn revelou um gradiente entre os diferentes compartimentos da Península Keller. A água marinha apresentou as menores atividades, reflexo da intensa diluição oceânica e da rápida evasão atmosférica. Em contrapartida, a água subterrânea da camada ativa consolidou-se como o *end-member* do sistema, apresentando concentrações até três ordens de grandeza superiores às dos corpos superficiais. Esse contraste acentuado ratifica a



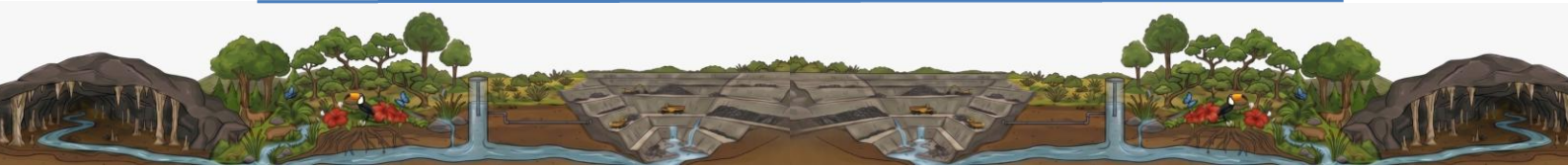
sensibilidade do radônio-222 como traçador da conectividade hidrológica em ambientes periglaciais, onde o fluxo de base atua como o principal vetor de transporte do gás para lagos e córregos.

O levantamento sistemático nas margens lacustres permitiu identificar zonas de descarga preferencial. No Lago Norte, anomalias de radônio, acompanhadas por variações em parâmetros físico-químicos (condutividade elétrica e pH), sugerem a existência de fluxos subsuperficiais canalizados por sedimentos de maior permeabilidade, influenciados por geleiras a montante. No Lago Sul, a morfologia irregular demonstrou correlação direta com o afloramento de águas subterrâneas. A presença de picos de concentração nessas feições sugere que a erosão remontante, integrada aos fluxos efêmeros de degelo, é potencializada pela descarga contínua de água da camada ativa, que utiliza essas zonas como exutórios naturais para o sistema de drenagem.

As investigações em profundidade revelaram gradientes verticais de radônio influenciados pela cobertura de gelo. Durante o estágio inicial do degelo, a camada de gelo superficial atua como uma barreira física, inibindo a degaseificação e favorecendo o aprisionamento do  $^{222}\text{Rn}$  nas porções superiores da coluna d'água. Simultaneamente, o incremento das concentrações em direção ao fundo sugere o aporte por emanação difusiva dos sedimentos do assoalho, enquanto as anomalias registradas em camadas intermediárias indicam a injeção lateral de plumas de água enriquecida em radônio. A evolução temporal com um salto expressivo nas concentrações totais do sistema, observada em um intervalo de tempo de poucos dias, ilustra a ocorrência de pulsos de degelo. Esse comportamento demonstra a alta dinamicidade da camada ativa e a sensibilidade do traçador às variações climáticas sazonais.

Em um cenário de retrocesso glacial acelerado e aumento das temperaturas médias, a expansão do solo descongelado amplia a zona de interação entre a água e o sedimento, resultando na emanação e no transporte de radônio para os sistemas hídricos superficiais. Aliada às outras análises, a aplicação dessa metodologia auxilia na compreensão do aprofundamento da camada ativa e da consequente intensificação da circulação subsuperficial induzida pelo aquecimento.

**Palavras-chave:** Radônio-222; Camada Ativa; Conectividade Hidrológica; Ambiente Periglacial; Mudanças Climáticas.



## Modelagem da Relação Entre Ondas de Calor e Material Particulado Atmosférico em Belo Horizonte

Larissa Lorryne Ferreira Martins<sup>1</sup>, Ana Elis Moraes de Almeida<sup>2</sup>, Marina Muniz de Queiroz<sup>3</sup>, Artur Assrey Diniz<sup>4</sup>, Jaielle Rodrigues Nascimento<sup>5</sup>, Fernanda Ribeiro Menezes<sup>6</sup>, Silvia Maria A. C. Oliveira<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [larissaferreira\\_martins@hotmail.com](mailto:larissaferreira_martins@hotmail.com)

Materiais particulados atmosféricos consistem em partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar, cujos diâmetros aerodinâmicos são  $\leq 10\mu\text{m}$  (PM10) e  $\leq 2,5\mu\text{m}$  (PM2,5), provenientes de fontes antrópicas, como veículos automotores, atividades industriais e queimadas, ou formadas secundariamente na atmosfera por reações químicas. A exposição a esses poluentes está associada a efeitos adversos à saúde humana, especialmente nos sistemas respiratório e cardiovascular. Além disso, materiais particulados afetam o meio ambiente, reduzindo a visibilidade, comprometendo o crescimento vegetal e a produtividade agrícola, bem como alterando as propriedades de solos e corpos hídricos, com consequências para a biodiversidade.

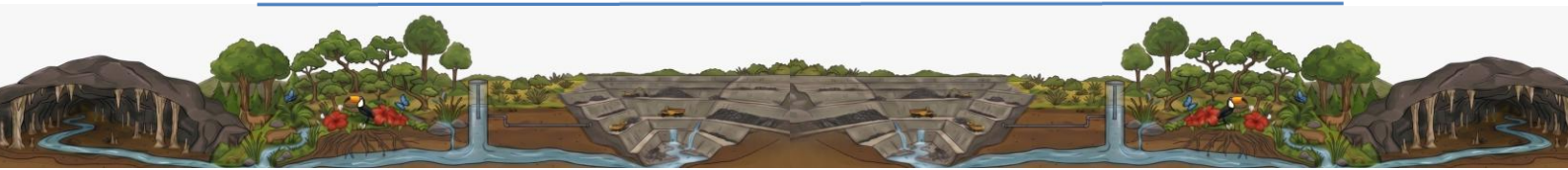
Estudos indicam que a exposição combinada ao calor extremo e à poluição atmosférica aumenta as taxas de internação por doenças respiratórias e circulatórias (Xu et al., 2023) e, em áreas urbanas, o efeito de ilha de calor intensifica esses impactos (Wang et al., 2021). No Brasil, o aumento de internações por infarto do miocárdio, acidente vascular cerebral isquêmico e doença pulmonar obstrutiva crônica, observado em Bauru, foi associado a eventos de calor extremo (Sarra e Mülfarth, 2021) e em Belo Horizonte, observou-se o aumento das internações por doenças respiratórias em crianças menores de cinco anos (PBH, 2021).

Neste contexto, o presente estudo analisou dados secundários do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) para investigar a relação entre ondas de calor e concentrações de material particulado atmosférico em Belo Horizonte, no período de janeiro de 2019 a outubro de 2024.

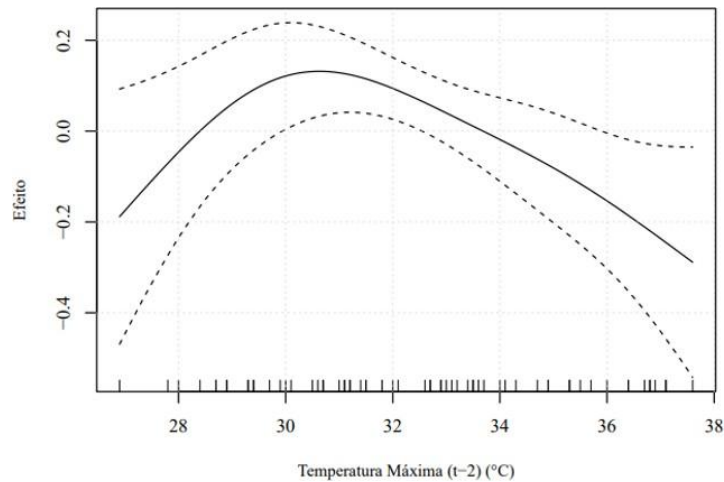
As ondas de calor foram definidas com base em critério climatológico, considerando períodos de pelo menos três dias consecutivos em que a temperatura máxima diária excedeu em pelo menos 5 °C a normal climatológica mensal. Conforme este critério, foram identificados 16 períodos de ondas de calor, totalizando 69 dias. A duração média das ondas de calor foi de 4,3 dias, com variação entre 3 e 11 dias. A distribuição sazonal indicou maior ocorrência nos meses de setembro e novembro.

Foram ajustados modelos aditivos generalizados mistos (GAMM) para PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub> (valores médios) e considerando lags de 0-3 dias para temperatura e poluentes. A adequação dos modelos foi verificada pela análise de resíduos e gráficos de diagnóstico.

O modelo para PM<sub>10</sub> apresentou R<sup>2</sup> ajustado de 74%. Entre as variáveis de temperatura, apenas temperatura máxima com lag de 2 dias (Figura 1) apresentou efeito estatisticamente significativo ( $p = 0,013077$ ), sugerindo relação não-linear complexa entre a medida de dois dias atrás e as concentrações atuais de PM<sub>10</sub>. Essa defasagem temporal pode refletir o tempo para que processos físico-químicos afetados pelo calor, como a ressuspensão intensificada de poeira do solo em condições secas prolongadas ou a formação de material particulado secundário na atmosfera, se manifestem de forma mensurável nas concentrações médias de PM<sub>10</sub>.

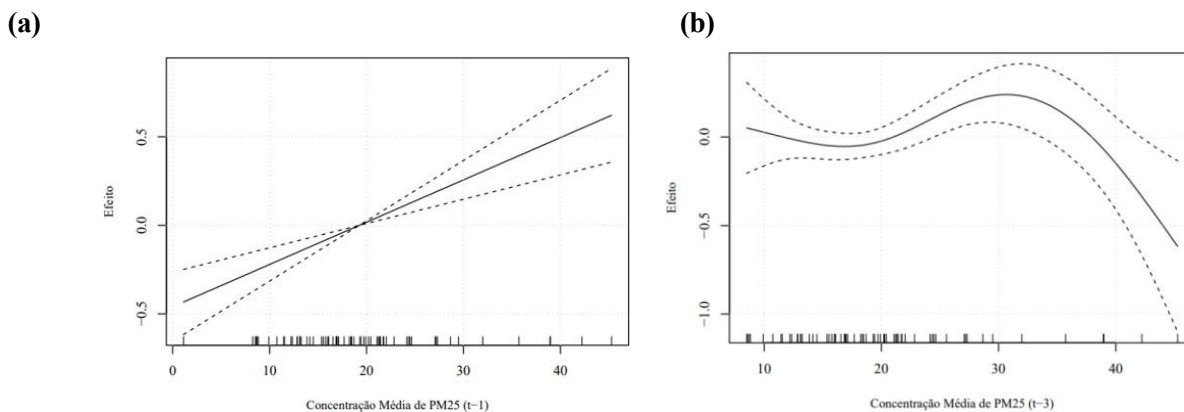


**Figura 1** - Efeitos parciais da temperatura para PM<sub>10</sub>



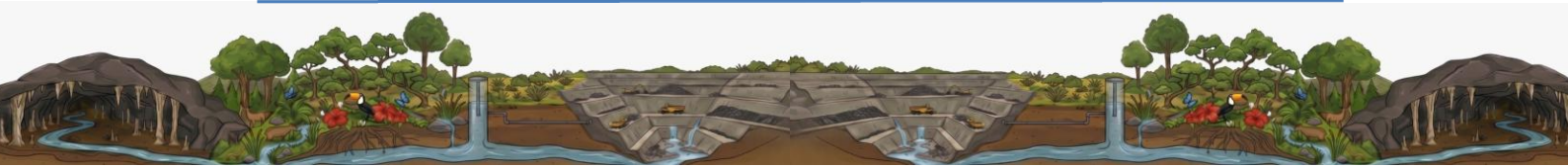
O modelo para PM<sub>2,5</sub> apresentou R<sup>2</sup> ajustado de 61,5%, sem efeitos significativos das variáveis de temperatura. Em contrapartida, as concentrações médias de PM<sub>2,5</sub> com defasagem de um dia ( $p = 0,000020$ ) e de três dias ( $p = 0,011097$ ) mostraram-se estatisticamente significativas, indicando forte persistência temporal desse poluente. Em centros urbanos, o PM<sub>2,5</sub> possui componente secundário, formado a partir de precursores gasosos por reações fotoquímicas favorecidas por temperaturas elevadas, processos que demandam tempo. A Figura 2 ilustra os efeitos parciais para (a) lag de um dia e (b) lag de três dias (lag 3).

**Figura 2** - Efeitos parciais da concentração para PM<sub>2,5</sub>



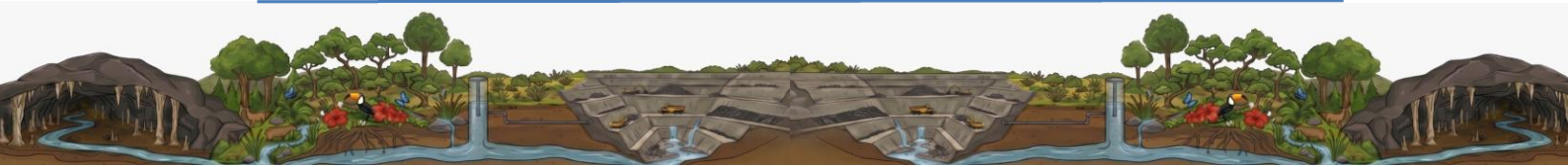
A presença de autocorrelação residual configura a principal limitação dos modelos desenvolvidos, indicando que a dependência temporal dos dados não foi totalmente capturada, violando um pressuposto dos modelos GAMM. Além disso, a forte influência dos lags dos poluentes dificulta a distinção entre efeito de temperatura e persistência das concentrações no tempo. Por fim, as relações não lineares identificadas, embora adequadas ao fenômeno avaliado, requerem uma avaliação cautelosa sobre o efeito causal e tornam a interpretação mais complexa. No que diz respeito aos impactos na qualidade do ar, as ondas de calor estiveram associadas a aumentos estatisticamente significativos nas concentrações dos poluentes analisados, com destaque para aumento de 116,38% no PM<sub>10</sub> e 83,6% no PM<sub>2,5</sub>. Estes achados revelam como eventos climáticos extremos comprometem a qualidade ambiental urbana, alinhando-se aos desafios do ODS11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e evidenciam a necessidade urgente de estratégias integradas de gestão urbana.

**Palavras-chave:** poluição atmosférica; mudanças climáticas; saúde pública; modelos aditivos generalizados mistos; eventos climáticos extremos.



### Referências Bibliográficas

- Xu, R. et al. Extreme temperature events, fine particulate matter, and myocardial infarction mortality. *Circulation*, v. 148, n. 4, p. 312-323, 2023.
- Belo Horizonte. Secretaria Municipal de Saúde. Vigilância em Saúde Ambiental Relacionada à Qualidade do Ar - VigiAr. Belo Horizonte: SMSA-PBH, 2021. Disponível em: [https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/saude/2021/boletim-vigilancia-em-saude-vigiar\\_23-11-2021.pdf](https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/saude/2021/boletim-vigilancia-em-saude-vigiar_23-11-2021.pdf). Acesso em: 3 dez. 2024.
- Wang, Y. et al. The relationship between urban heat island and air pollutants and them with influencing factors in the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, v. 129, p. 107976, 2021.
- Sarra, S. R. e Mülfarth, R. C. K. Os impactos da onda de calor de 2019 sobre a saúde da população na cidade de Bauru (Estado de São Paulo - Brasil). *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 6, p. 63941–63960, 2021.



# Análise dos Parâmetros de Qualidade da Água do Rio Doce Antes e Após Rompimento da Barragem De Fundão

Lais Melo Cardoso<sup>1</sup>, Artur Assrey Diniz<sup>2</sup>, Ana Elis Moraes de Almeida<sup>3</sup>, Marina Muniz de Queiroz<sup>4</sup>, Jaielle Rodrigues Nascimento<sup>5</sup>, Fernanda Ribeiro Menezes<sup>6</sup>, Silvia Maria A. C. Oliveira<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [laismelo021@gmail.com](mailto:laismelo021@gmail.com)

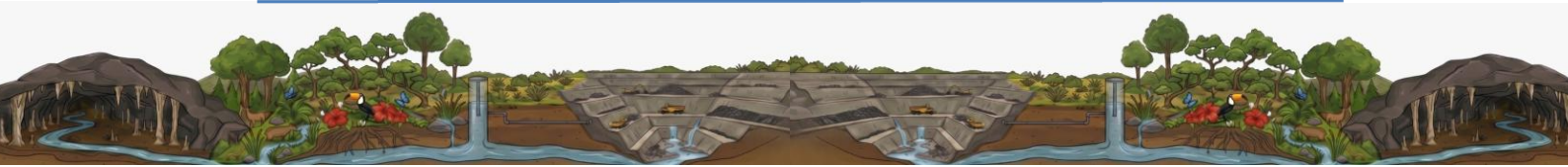
## Resumo

O rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 05 de novembro de 2015 no município de Mariana, Minas Gerais, configura-se como um dos mais graves desastres ambientais da história do Brasil (Gomes *et al.*, 2017). A estrutura, pertencente à mineradora Samarco, liberou aproximadamente 44 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no meio ambiente, afetando drasticamente a bacia do rio Doce e diversas comunidades ao longo de seu curso (Samarco, 2016). O monitoramento dos parâmetros de qualidade da água tem demonstrado a persistência desses impactos ao longo do tempo e em diferentes trechos dos cursos d'água afetados. Dada a mudança no cenário dessa região, este trabalho tem como objetivo avaliar parâmetros de qualidade da água no rio Doce por meio do percentual de atendimento aos limites preconizados pela legislação ambiental vigente para alguns parâmetros hídricos relevantes.

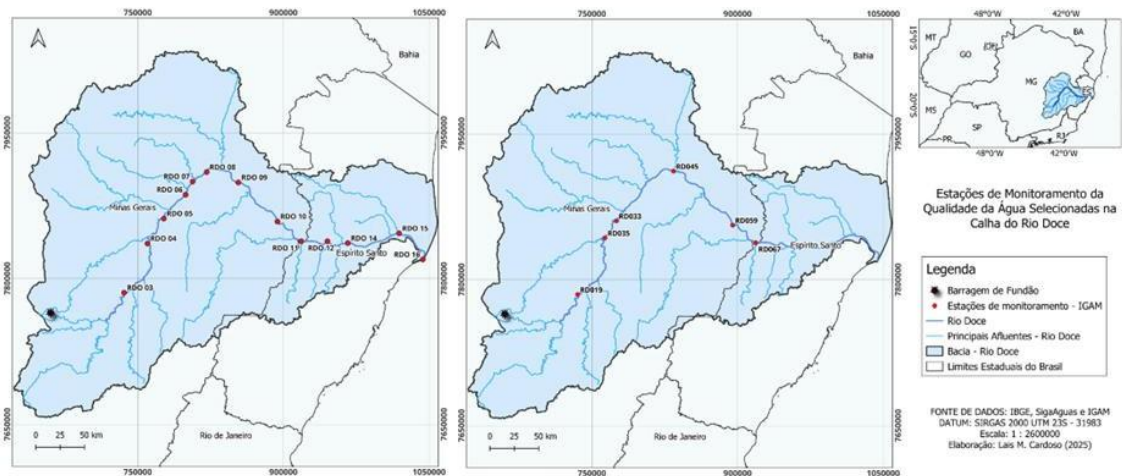
Os dados relativos ao período de 2012 a 2017 foram extraídos da base do Repositório Institucional do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), a partir da seção de Séries Históricas de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Estado de Minas Gerais. A partir de agosto de 2017, no entanto, o Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático (PMQQS) da bacia do rio Doce passou a disponibilizar uma base com maior quantidade de parâmetros e frequência de monitoramento. Assim, as análises do período de agosto de 2017 a dezembro de 2024 foram conduzidas a partir da base de dados do PMQQS. A Figura 1 apresenta a localização geográfica das estações operadas pelo IGAM analisadas no trabalho (RD019, RD035, RD033, RD045, RD059 e RD067) e outras treze no âmbito do PMQQS, sendo seis delas (RDO 03, RDO 04, RDO 05, RDO 08, RDO 10 e RDO 11) selecionadas para o estudo.

Foram avaliados sete parâmetros de qualidade da água: turbidez, sólidos suspensos totais (SST), cor verdadeira, ferro dissolvido, manganês total, *Escherichia coli* (*E. coli*) e fósforo total, com base no percentual de conformidade com os limites legais estabelecidos pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 08/2022 (Minas Gerais, 2022). Essa comparação, realizada ao longo de toda a extensão do rio Doce, permitiu avaliar a variação dos percentuais de atendimento antes, imediatamente após e no período mais recente pós rompimento.

Foram identificados baixos índices de atendimento para os parâmetros manganês total e *E. coli* tanto antes quanto após o rompimento da barragem (Tabela 1). Apesar das estações de monitoramento mais afetadas não apresentarem ocupação urbana expressiva em seu entorno, toda a bacia do rio Doce é marcada pela presença de atividades agropecuárias, sobretudo áreas de pastagem e agricultura, que contribuem significativamente para o aporte de contaminantes de origem difusa, como nutrientes e matéria orgânica, com reflexo direto na presença de *E. coli*.



**Figura 1** - Mapa de localização dos pontos de monitoramento do PMQQS e do IGAM.



**Fonte:** Adaptado de IGAM (2017) e Monitoramento Rio Doce (2025).

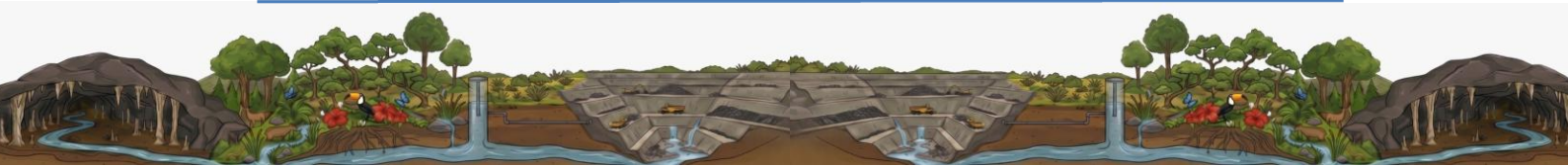
A deterioração expressiva da qualidade da água no período pós-rompimento é evidenciada pela redução acentuada na conformidade dos parâmetros turbidez, SST e fósforo total, refletindo os efeitos agudos do desastre sobre o rio Doce. Os primeiros estão relacionados ao aporte expressivo de sedimentos, materiais particulados e rejeitos provenientes da onda de lama que percorreu a calha do rio. Já a queda no atendimento à legislação do fósforo é associada à perturbação do leito e das margens que, junto ao carreamento de matéria orgânica e particulados finos, gerou um aumento da carga de nutrientes no sistema e, conseqüentemente, elevou as concentrações observadas.

**Tabela 1** - Percentual de atendimento aos padrões dos parâmetros pré-rompimento (2012 – outubro/2015) e pós- imediato ao rompimento (novembro/2015 - 2017), por estações do IGAM.

Parâmetro	RD019		RD035		RD033		RD045		RD059		RD067	
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
Turbidez	94%	30%	94%	25%	94%	35%	97%	70%	94%	65%	94%	70%
SST	91%	55%	89%	40%	86%	50%	97%	75%	100%	65%	100%	80%
Cor Verdadeira	100%	100%	100%	86%	88%	75%	88%	75%	88%	75%	94%	86%
Ferro Dissolvido	94%	93%	88%	93%	88%	86%	100%	80%	88%	93%	94%	87%
Manganês Total	63%	20%	63%	21%	56%	40%	88%	73%	100%	71%	100%	79%
Fósforo Total	94%	55%	88%	75%	88%	58%	94%	85%	94%	79%	97%	80%
<i>E. coli</i>	90%	58%	3%	5%	0%	0%	3%	5%	29%	55%	77%	30%

Obs.: ● ≤ 33% | 33% < ● < 66% | ● ≥ 66%.

Os dados do PMQQS (Tabela 2) sugerem uma recuperação gradual da qualidade da água ao longo do rio Doce, embora ainda abaixo dos níveis registrados antes do rompimento. A melhora é mais evidente nos parâmetros de turbidez, SST e fósforo total, que deixaram de figurar entre os mais críticos no período recente. O ferro dissolvido passa a ser o parâmetro a apresentar a maior redução no percentual de conformidade, sugerindo que, diferentemente de outros parâmetros mais associados aos impactos agudos do evento, ele reflete efeitos cumulativos e crônicos e caracteriza um impacto de natureza persistente e que se intensifica no médio e longo prazo. Além da questão da liberação de ferro, manganês total e *E. coli* voltam a fazer parte dos principais desafios à qualidade da água, assim como observado antes do rompimento.



**Tabela 2** - Percentual de atendimento aos padrões dos parâmetros, por estações do PMQQS (2017 – 2024).

Parâmetro	RDO 03	RDO 04	RDO 05	RDO 08	RDO 10	RDO 11
Turbidez	● 79%	● 72%	● 71%	● 77%	● 75%	● 85%
SST	● 84%	● 80%	● 73%	● 87%	● 82%	● 92%
Cor Verdadeira	● 71%	● 70%	● 73%	● 71%	● 66%	● 65%
Ferro Dissolvido	● 48%	● 63%	● 59%	● 51%	● 60%	● 65%
Manganês Total	● 58%	● 52%	● 49%	● 77%	● 74%	● 94%
Fósforo Total	● 91%	● 85%	● 85%	● 95%	● 88%	● 93%
<i>E. coli</i>	● 58%	● 76%	● 22%	● 33%	● 54%	● 54%

Obs.: ● ≤ 33% | 33% < ● < 66% | ● ≥ 66%.

Conclui-se que, para a efetiva recuperação e proteção da qualidade da água na bacia do rio Doce, torna-se indispensável a adoção de medidas integradas de gestão ambiental, alinhadas tanto ao controle dos impactos difusos quanto das fontes pontuais. Existe tanto a necessidade de fiscalização e controle das atividades minerárias, particularmente na porção oeste da bacia, onde ocorrem os maiores índices de não conformidade para metais, quanto o aperfeiçoamento dos sistemas de disposição de rejeitos de áreas urbanas, para redução das concentrações de *E. coli*, e da atividade agropecuária, relacionada a processos erosivos e ao aumento de cargas difusas de nutrientes, sólidos e contaminantes microbiológicos no rio. Por fim, destaca-se que, apesar da recuperação gradual observada em alguns parâmetros, os impactos de longo prazo persistem, sendo seus efeitos, muitas vezes cumulativos e ainda não totalmente conhecidos, um desafio contínuo à gestão ambiental da bacia.

**Palavras-chave:** violação de parâmetros; monitoramento ambiental; impactos ambientais.

### Referências Bibliográficas

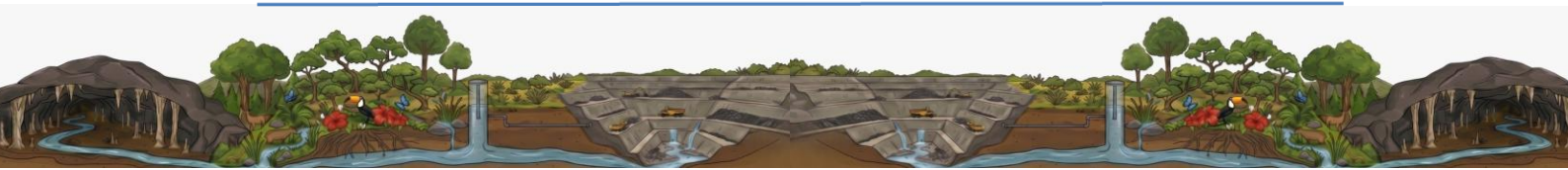
GOMES, Luiz Eduardo de Oliveira; CORREA, Lucas Barreto; SÁ, Fabian; NETO, Renato Rodrigues; BERNARDINO, Angelo Fraga. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, v. 120, n. 1–2, p. 28–36, jul. 2017.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Séries históricas de monitoramentos da qualidade das águas superficiais no Estado de Minas Gerais (2017). Belo Horizonte: IGAM, 2017. Disponível em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3077>. Acesso em: 22 maio 2025.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM); Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH). Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 08, de 21 de novembro de 2022. Estabelece diretrizes para o enquadramento das águas superficiais do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: COPAM/CERH, 2022

MONITORAMENTO RIO DOCE. Disponível em: <https://monitoramentoriodoce.org/>. Acesso em: 1 abr. 2025.

SAMARCO. Relatório Bienal 2015-2016. Samarco, 2016. Acesso em: 22 mar. 2026.



# Estimativa da Recarga de Aquíferos no Quadrilátero Ferrífero: Integrando Métodos Diretos e Sensoriamento Remoto

Breno Alexandre Pereira<sup>1</sup>; Rodrigo Sérgio de Paula<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LEHID/IGC/UFGM. Autor correspondente: [breno@igeohidrogeologia.com](mailto:breno@igeohidrogeologia.com);

## Introdução

A estimativa da recarga de aquíferos é um dos parâmetros mais relevantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente em regiões sob intensa pressão antrópica, como as áreas de mineração. Sua determinação, contudo, ainda apresenta elevada incerteza: os métodos disponíveis possuem limitações associadas à escala espacial, à disponibilidade de dados e à heterogeneidade hidrogeológica. Scanlon et al. (2002) destacam a importância de abordagens multi-método para aumentar a confiabilidade das estimativas, compensando as limitações individuais de cada técnica.

Os métodos de estimativa de recarga podem ser agrupados em: (i) diretos, que utilizam medições *in situ* — como traçadores com cloreto (Wood; Sanford, 1995) e o método Water Table Fluctuation (WTF) (Meinzer; Stearns, 1929); e (ii) indiretos, que aproximam a recarga por variáveis correlatas, como modelagem numérica ou sensoriamento remoto. Estes últimos são mais facilmente aplicáveis a grandes áreas e de menor custo relativo, embora com maiores incertezas (Barbosa et al., 2022; Wu et al., 2019).

O objetivo central desta pesquisa é calibrar métodos indiretos de sensoriamento remoto — GRACE e GLDAS

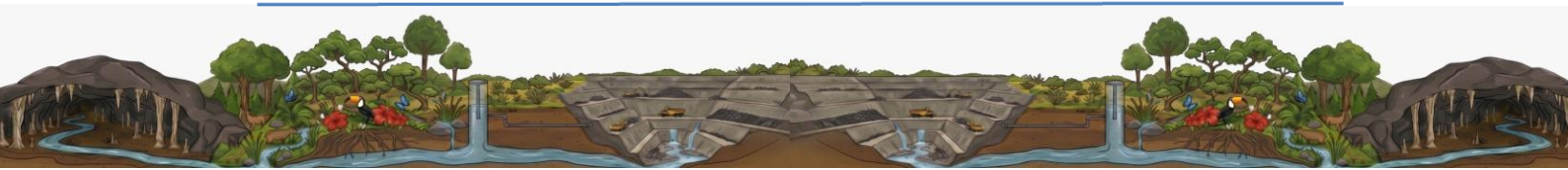
— com dados direto, como o WTF, buscando extrapolar estimativas pontuais de recarga para escala regional no Quadrilátero Ferrífero (QF). O estudo irá se concentrar no Homoclinal Serra do Curral e no Sinclinal Moeda, onde se dispõe de rico conjunto de dados hidrogeológicos (Figura 1).

O Quadrilátero Ferrífero (Dorr II, 1969) é uma província mineral do sudeste brasileiro, delimitada por grandes estruturas geológicas e composta por quatro grandes unidades litoestratigráficas: complexos metamórficos do Arqueano, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Supergrupo Estrada Real (Endo et al., 2019), além de rochas intrusivas e coberturas cenozóicas (Alkmim; Marshak, 1998). A Tabela 1 sintetiza as principais unidades hidrogeológicas da área, com valores de condutividade hidráulica e recarga compilados por Pereira (2024).

## Materiais e Métodos

O desenvolvimento metodológico estrutura-se em oito etapas:

- Etapa 1 – Revisão bibliográfica (estado da arte) sobre métodos de estimativa de recarga, com ênfase em áreas sob estresse hídrico e mineração;
- Etapa 2 – Compilação e tratamento de dados: pluviometria, nível d'água, vazões, topografia, climatologia, dados de satélite e geologia;
- Etapa 3 – Aplicação de métodos convencionais de recarga (Rorabaugh, WTF, filtro de Lyne e Hollick, isotopia, balanço de cloreto) no Homoclinal Serra do Curral e Sinclinal Moeda;
- Etapa 4 – Aplicação do GRACE e GLDAS para estimativa de recarga por sensoriamento remoto, com dados desde 2002;
- Etapa 5 – Validação estatística multivariada (t de Student, ANOVA, MANOVA) para seleção dos métodos mais representativos;
- Etapa 6 – Uso de Inteligência Artificial para otimização dos métodos de sensoriamento remoto;
- Etapa 7 – Avaliação dos efeitos das mudanças climáticas sobre as taxas de recarga nas últimas décadas;
- Etapa 8 – Extrapolação dos melhores métodos para múltiplos aquíferos do Quadrilátero Ferrífero.



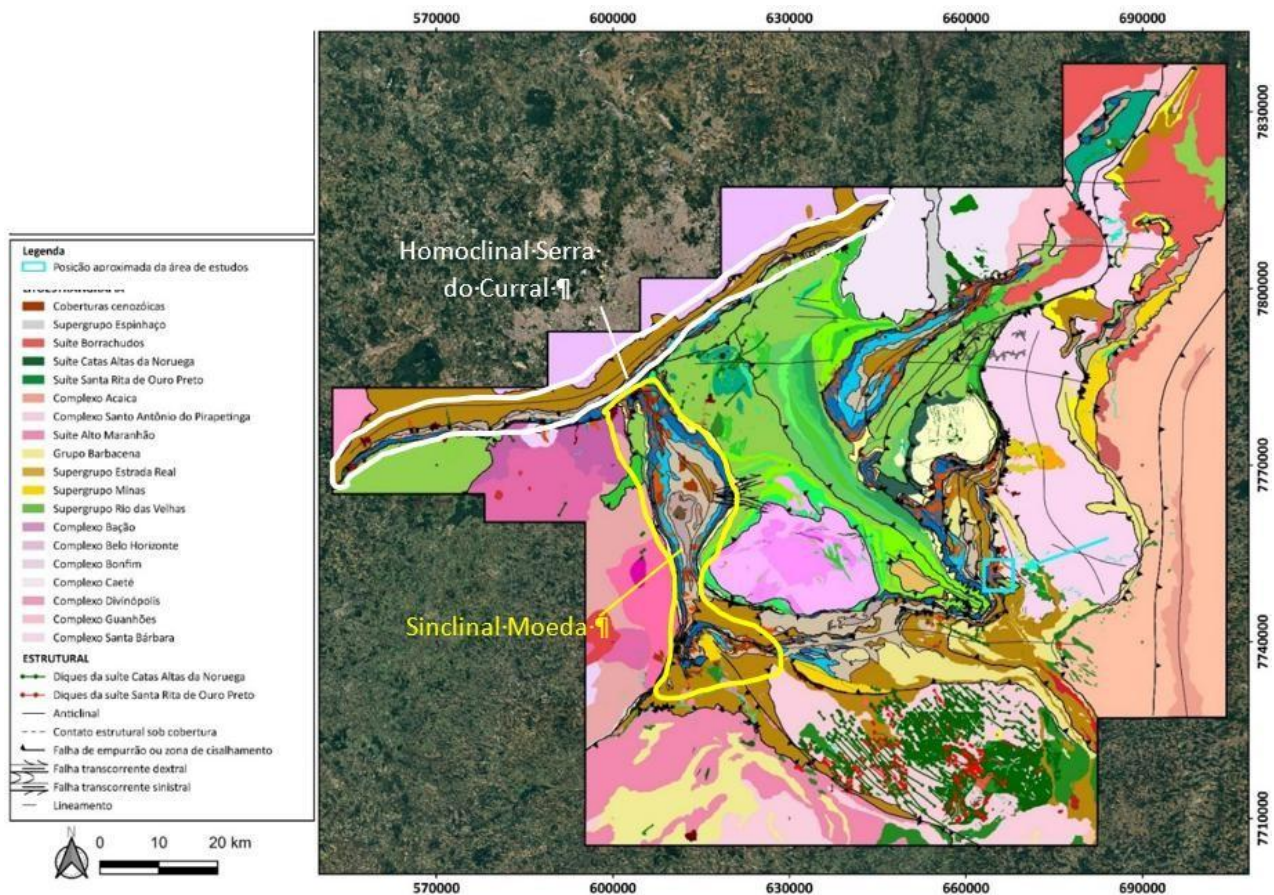
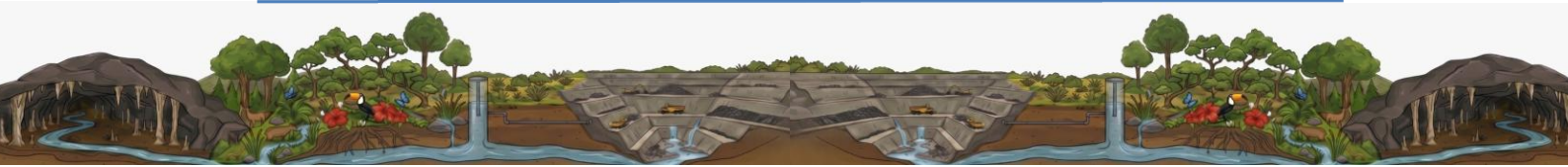


Figura 1: Mapa geológico e estrutural do Quadrilátero Ferrífero (Adaptado de Endo et al., 2019), com indicação do Homoclinal Serra do Curral e do Sinclinal Moeda.

Tabela 1: Principais unidades hidrogeológicas do Quadrilátero Ferrífero, parâmetros hidrodinâmicos e valores de recarga (Pereira, 2024).

Unidade hidrogeológica	Litoestratigrafia	K (m/d)		Porosidade (%)		Recarga (% da precipitação anual)		Características
		mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	
Aquífero Moeda(1)(2)(3)	quartzitos e quartzitos ferruginosos da Formação Moeda	0.0003	0.86	2.00	15.8	10	20	Esse aquífero possui características hidrodinâmicas variadas em função das suas propriedades físicas. Quando as rochas estão compactas e maciças apresentam apenas permeabilidade secundária (meio fraturado), com baixa porosidade. Neste caso a condutividade hidráulica estará diretamente relacionada ao grau de faturamento da rocha. Quando friáveis apresentam-se em geral com melhores características aquíferas, possuindo uma boa porosidade e permeabilidade primária de interstícios, e secundária, proveniente da alteração do quartzito.
Aquíclode Batata(2)(3)	filitos da Formação Batatal	0.00001	0.004	0.25	0.75	0	5.8	Caracterizados como aquíclodes ou aquíquardos, uma vez que, igualmente às rochas do Grupo Nova Lima, apresentam baixa transmissividade, fluxo e armazenamento de água restritos, representando também uma barreira para o fluxo d'água subterrânea.
Aquífero Cauê(1)(2)	hematitas da Formação Cauê	0.009	8.6	3.1	35.3	38.4	41	Trata-se da presença de itabiritos diversos (goethíticos, anfíbolíticos e carbonáticos) e corpos de hematitas, predominantemente da Formação Cauê. Tais litotipos ocorrem como rochas friáveis a compactas, constituindo um sistema aquífero misto, com dupla porosidade, granular e fissural. Em geral, e comparativamente às outras unidades, apresentam valores mais altos de porosidade efetiva, recarga e condutividade hidráulica.
Aquíquardo Gandarela(2)(3)	dolomitos e itabiritos dolomíticos da Formação Gandarela	0.00086	0.400	1.5	14.2	15	25	Possuem características hidrodinâmicas relacionadas ao seu grau de carstificação. De maneira geral no Quadrilátero Ferrífero são poucos os casos conhecidos onde os dolomitos desenvolveram carstificação. Por isso os dolomitos nesta região são classificados em geral como aquíclodes e/ou aquíquardos.

(1) (Mourão, 2007); (2) (Castro, 2020); (3) (Magalhães, 2023)



## Produtos Esperados

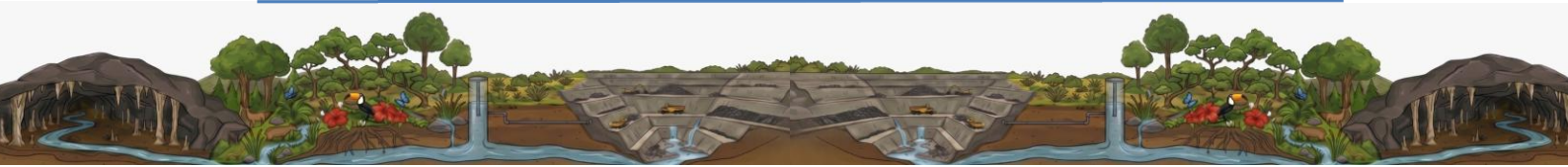
Ainda em fase inicial da definição do escopo, ao final da pesquisa, são esperados alguns resultados como:

- Método integrado para cálculo da taxa de recarga nas unidades hidrogeológicas do Quadrilátero Ferrífero, a partir da calibração de métodos indiretos com métodos diretos;
- Avaliação do potencial da Inteligência Artificial para otimizar estimativas de recarga por sensoriamento remoto;
- Análise dos efeitos das mudanças climáticas sobre as taxas de recarga, naturais e artificiais, nas últimas décadas.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto; GRACE; GLDAS; mudanças climáticas; hidrogeologia.

## Referências Bibliográficas

- BARBOSA, S. A. et al. Evaluating Groundwater Storage Change and Recharge Using GRACE Data: A Case Study of Aquifers in Niger, West Africa. *Remote Sensing*, v. 14, n. 7, p. 1532, 2022.
- CASTRO, P. T. A. Quadrilátero ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Belo Horizonte: 3i Editora, 2020.
- DORR II, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS Professional Paper 641-A, 1969.
- ENDO, I. et al. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil – Escala 1:150.000, 2019.
- LU, Z.; DANSKIN, W. R. InSAR analysis of natural recharge to define structure of a ground-water basin, San Bernardino, California. *Geophysical Research Letters*, v. 28, n. 13, p. 2661–2664, 2001.
- MAGALHÃES, C. C. C. Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda (QF-MG). Dissertação de mestrado – IGC/UFMG, 2023.
- MEINZER, O. E.; STEARNS, N. D. A study of ground water in the Pomperaug Basin, Connecticut. USGS Water Supply Paper 597-B, 1929.
- MOURÃO, M. A. A. Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese de Doutorado – UFMG, 2007.
- PEREIRA, B. A. Avaliação do Balanço Hídrico e Modelagem Numérica Hidrogeológica da Formação de Lago em Cava: O Caso da Mina de Águas Claras. Dissertação de mestrado – EE/UFMG, 2024.
- RORABAUGH, M. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow. USGS, Tacoma, 1964.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 18–39, 2002.
- WOOD, W. W.; SANFORD, W. E. Chemical and Isotopic Methods for Quantifying Ground-Water Recharge in a Regional, Semiarid Environment. *Groundwater*, v. 33, n. 3, p. 458–468, 1995.
- WU, Q. et al. Determining Regional-Scale Groundwater Recharge with GRACE and GLDAS. *Remote Sensing*, v. 11, n. 2, p. 154, 2019.



# A Novel Underground Disposal Strategy For Uranium Tailings Using Cemented Paste Technology

Eduardo Cervi<sup>1</sup>, Gregorio Favarsani<sup>2</sup>, Gabriel Silveira<sup>3</sup>, Nathan Martins<sup>4</sup>, Felipe Costa<sup>5</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil. Corresponding Author: [eduardo.cervi@wsp.com](mailto:eduardo.cervi@wsp.com).

## Abstract

A proposed underground uranium mine in Canada adopted a novel tailings management strategy designed to improve the long-term geochemical stability of uranium tailings. Neutralized leach residue and process wastes are mixed with cement to produce cemented paste backfill (CPB) and cemented paste tailings (CPT) for disposal in mined-out stopes and a purpose-built underground tailings management facility (UGTMF). Predictive source terms were developed for environmental assessment and regulatory review, focusing on post-closure groundwater rebound. The derivation combined mechanistic modelling with a multi-year geochemical characterization program designed to reflect disposal conditions. Standard and modified kinetic tests were used to quantify advective and diffusive transport. The cemented materials were net neutralizing and generated alkaline porewater, reducing the mobility of uranium, radium, and other metals. Most readily soluble constituents were released during initial flushing, whereas long-term release was governed by slower mineral dissolution. Model results indicated acceptable long-term effects on downstream receptors over 10,000 years.

**Key Words:** source terms; uranium; tailings disposal; tailings management; paste backfill

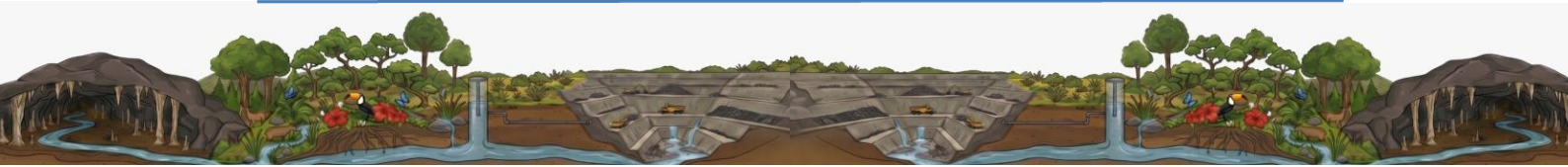
## Introduction

A proposed underground uranium mine in Canada adopted a first-of-its-kind tailings management strategy based on the underground disposal of cemented paste materials. Neutralized leach residue and selected process wastes are mixed with cement binders to produce CPB and CPT, which are placed in mined-out stopes and in a dedicated UGTMF. This approach was selected to improve long-term geochemical stability and reduce post-closure management requirements. Because this concept differs from conventional uranium tailings facilities, a site-specific approach was required to characterize ARD and M&RL risks and to derive defensible geochemical source terms for environmental assessment and permitting. This paper presents the source term derivation framework developed to support this novel underground tailings management approach.

## Source Term Derivation Approach

Source term derivation focused on the post-closure phase, when groundwater rebound is expected to inundate the paste materials and re-establish hydraulic connectivity with the surrounding rock mass. Under these conditions, constituent release is controlled mainly by advective transport through pore spaces and diffusive release from the cemented matrix.

A process-based conceptual model was developed to identify the dominant controls on solute release. During operations, limited bleed water is expected because of paste technology, and mine dewatering drives groundwater toward the workings. After closure, groundwater rebound creates the conditions for long-term constituent transport. Cement binders increase porewater pH and change the mobility of metals and radionuclides. Because the hydraulic conductivities of CPB and CPT are of similar order to those of the surrounding crystalline rock, the materials were conceptualized as porous media rather than impermeable barriers.



To reduce reliance on uncertain scale-up factors, the characterization program was designed to reflect disposal conditions more closely than conventional mine waste testing. Composite cemented materials were tested directly, reducing the need to extrapolate for particle size, solid-to-liquid ratio, and structure.

### Geochemical Characterization Program

The program included geochemical, mineralogical, radiological, and geotechnical testing on parent materials and composite CPB and CPT mixtures representing a range of binder and waste compositions. Static testing included acid-base accounting (ABA), near-total metals, mineralogy, and short-term leaching (Shake Flask Extraction). Geotechnical testing included porosity and hydraulic conductivity.

Advective release under saturated, confined, and low-oxygen post-closure conditions was evaluated using a modified triaxial permeability (MTP) test, which measured porewater chemistry as successive pore volumes were flushed through the material. Testing covered up to 30 pore volume replacements, representing approximately 10,000 years of groundwater flow through a UGTMF chamber. Diffusive release was evaluated using LEAF Method 1315, which provided constituent-specific diffusivity and mass flux estimates. Simulated porewater chemistry and diffusivity values were incorporated into the groundwater flow and solute transport model.

### Results and Discussion

Neutralized leach residue consisted mainly of muscovite and quartz, with lesser clinocllore, chamosite, and gypsum. On its own, the residue was potentially acid generating (PAG), with acid potential exceeding neutralization potential. However, the addition of cement binder substantially changed the behavior of the final paste products, and both CPB and CPT were classified as non-potentially acid generating (NPAG). The gypsum and ETP precipitates were dominated by calcium sulphate phases and contained leachable uranium, aluminum, molybdenum, sulphate, and radium-226. Once incorporated into cemented paste mixtures, however, their leaching behavior changed because of the alkaline cementitious matrix.

The composite CPB and CPT materials had low hydraulic conductivities, generally on the order of  $10^{-8}$  to  $10^{-10}$  m/s, with lower values associated with higher binder contents. Short-term leach testing showed alkaline conditions, generally between pH 9 and 12, and relatively low dissolved uranium concentrations. Sulphate remained the dominant dissolved constituent, while molybdenum, aluminum, radium-226, and lead-210 were also identified as relevant leachable constituents.

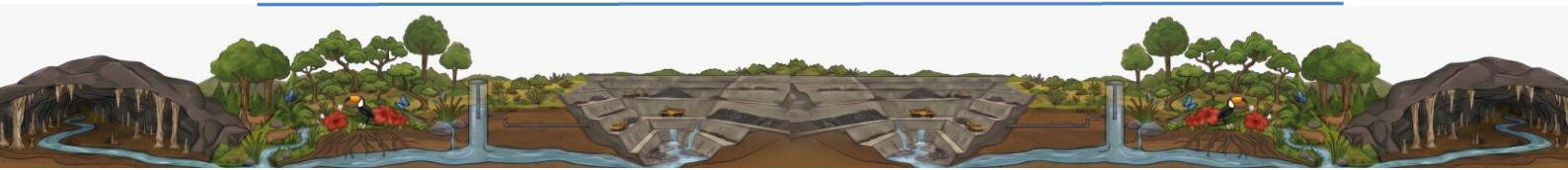
MTP tests showed that initial porewater was alkaline and remained circumneutral to alkaline during prolonged flushing. Most metals and radionuclides showed the highest concentrations in the first one to two pore volume replacements and declined substantially within the first five pore volumes. These results indicate that more than 90% of the readily soluble constituent mass is associated with the initial pore space and removed during early flushing. Long-term release is therefore controlled mainly by slower dissolution of residual primary and secondary minerals.

Diffusive leaching results showed the same trend, with the highest mass fluxes during the initial leaching period followed by declining release rates. Diffusive fluxes were generally higher for CPT than for CPB and higher for lower-binder mixtures, indicating that binder content is an important control on long-term mobility.

Overall, the results demonstrate several benefits of the underground cemented paste strategy. The binder converts potentially acid generating tailings into net neutralizing materials, generates alkaline porewater that reduces uranium and radionuclide solubility, and helps limit sulphide oxidation under underground conditions. In addition, the low permeability of both the host rock and paste materials restricts constituent migration to the surrounding groundwater system. The derived source terms were implemented in the groundwater and solute transport model and used in the broader environmental effects assessment. Model results indicated acceptable long-term effects on downstream receptors over a 10,000-year post-closure simulation period.

### Conclusions

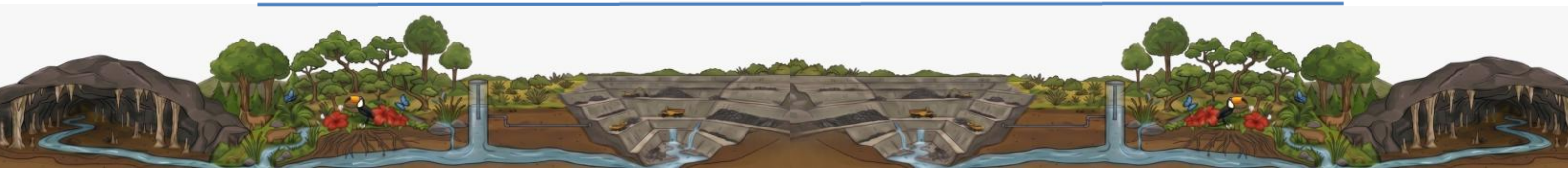
This study describes a source term derivation approach for a proposed underground uranium mine in Canada using cemented paste technology and underground disposal of tailings and process wastes. The approach was supported by a multi-year characterization program designed to represent post-closure disposal



conditions and directly measure the key advective and diffusive processes controlling constituent release. The results show that incorporation of neutralized leach residue and process wastes into cemented paste materials substantially improves geochemical performance by increasing alkalinity, eliminating acid generation potential, and limiting the mobility of uranium and other constituents of concern. Most readily soluble mass is released during initial flushing, whereas long-term release is controlled by slow mineral dissolution and diffusion. When incorporated into the groundwater transport model, the derived source terms predicted acceptable long-term effects on downstream receptors.

## References

- ASTM International (2014) ASTM D5084: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.
- INAP (2012) Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide.
- MEND (2009) Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials.
- USEPA (2017) Method 1315: Mass Transfer Rates of Constituents in Monolithic or Compacted Granular Materials Using a Semi-Dynamic Tank Leaching Procedure.



# Projeções Climáticas com Modelos de Fluxo de Águas Subterrâneas e Hidrológicas Integradas: Uma Revisão Sistemática

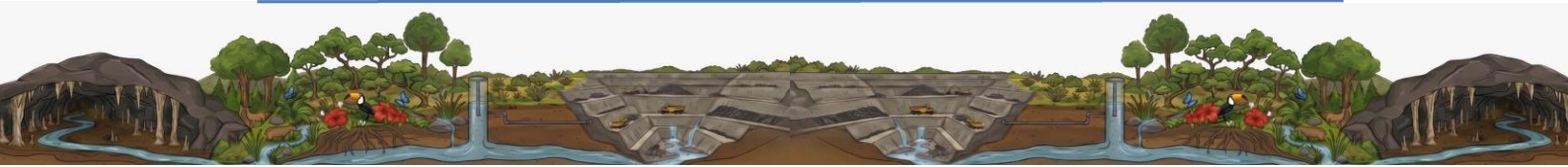
Estefânia Fernandes dos Santos<sup>1</sup> Mariângela Garcia Praça Leite<sup>2</sup> Luís Bacellar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Ouro Preto. Autor correspondente: [estefania.santos@ufop.edu.br](mailto:estefania.santos@ufop.edu.br)

## Resumo

Este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura, conforme as diretrizes PRISMA 2020, com o objetivo de sintetizar evidências científicas sobre a aplicação de modelos de fluxo de águas subterrâneas, com destaque para o MODFLOW e suas variantes, integrados a modelos hidrológicos, na projeção dos impactos das mudanças climáticas sobre a recarga de aquíferos, níveis freáticos e armazenamento subterrâneo em escala global. A análise abrangeu 156 estudos revisados por pares, publicados entre 2006 e 2025, identificados por meio de buscas em bases como SciSpace, Google Scholar, Spring Nature e MDPI Open Access Journals. Os resultados indicam ampla adoção do MODFLOW (incluindo MODFLOW-NWT e MODFLOW-6), frequentemente acoplado a modelos como SWAT, WEAP, MIKE SHE e HELP, sob cenários climáticos derivados dos conjuntos CMIP5 (RCP4.5 e RCP8.5) e CMIP6 (SSP1-2.6 e SSP5-8.5), com projeções até 2100. As principais conclusões indicam que as projeções de recarga aquífera apresentam variabilidade regional sistemática, com padrões consistentes conforme a zona climática: regiões áridas e semiáridas tendem a registrar reduções entre -10% e -70%, enquanto regiões temperadas e frias/úmidas mostram aumentos entre +5% e +50%, ao passo que regiões tropicais exibem elevada variabilidade associada a mudanças nos regimes de monções. Observa-se, ainda, uma intensificação generalizada da sazonalidade, com aumentos expressivos da recarga em períodos úmidos ou frios (+20% a +300%) e reduções acentuadas em períodos secos ou quentes (-40% a -100%), o que tende a agravar o estresse hídrico sazonal. Em aquíferos intensamente explorados, fatores antropogênicos, especialmente cenários de abstração, respondem por cerca de 40% a 50% da incerteza nas projeções de níveis freáticos, superando as incertezas climáticas e indicando que a gestão da demanda pode ser mais eficaz do que estratégias passivas de adaptação. Ademais, destaca-se a relevância da modelagem integrada, uma vez que ferramentas como SWAT-MODFLOW, MIKE SHE e WEAP-MODFLOW permitem capturar retroalimentações entre águas superficiais e subterrâneas, resultando em projeções mais realistas, sobretudo em sistemas com forte interação rio-aquífero. No que se refere às incertezas climáticas, a escolha do modelo climático global (GCM) representa a principal fonte de variabilidade (cerca de 20% a 35%), superando a contribuição de cenários de emissões (10% a 15%) e métodos de *downscaling* (10% a 20%), o que reforça a necessidade de abordagens baseadas em conjuntos multi-GCM. Em suma, a ampla dispersão dos resultados, incluindo projeções divergentes para regiões semelhantes, evidencia a importância da adoção de abordagens probabilísticas, com a comunicação dos resultados em termos de intervalos de incerteza, em vez de valores únicos.

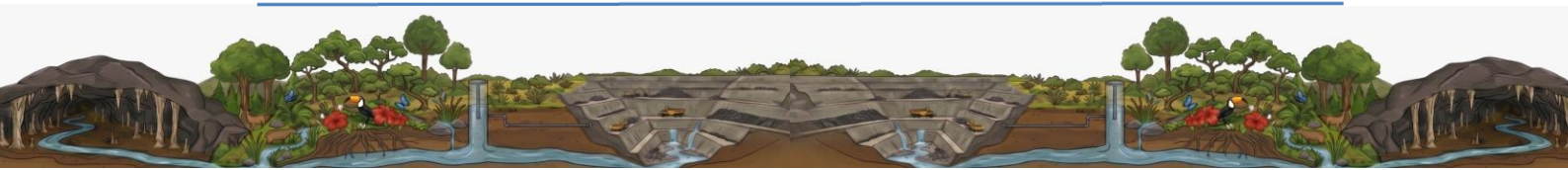
As lacunas identificadas nesta revisão evidenciam importantes direções para o avanço da pesquisa em recursos hídricos subterrâneos, especialmente no campo metodológico. Destaca-se a limitada representação de processos da zona não saturada em climas frios, incluindo congelamento-descongelamento, formação de permafrost e dinâmica da cobertura de neve, o que aponta para a necessidade de desenvolvimento de módulos específicos em ferramentas como o MODFLOW-6. Além disso, o acoplamento dinâmico bidirecional entre modelos, frequentemente realizado em escala mensal (como em WEAP-MODFLOW), pode negligenciar variações sub-mensais relevantes, reforçando a demanda por simulações em resolução diária ou subdiária. Outro desafio refere-se à integração de incertezas socioeconômicas, sobretudo na construção de cenários de demanda hídrica compatíveis com trajetórias climáticas (SSPs), o que requer maior articulação entre modelos hidrológicos, econômicos e de uso do solo. Soma-se a isso a necessidade de avançar na modelagem de eventos extremos, ainda pouco explorada frente ao predomínio de análises baseadas em médias, bem como no desenvolvimento de métricas padronizadas de vulnerabilidade e resiliência de aquíferos. Do ponto de vista



geográfico, observa-se a sub-representação de regiões altamente vulneráveis, como a África Subsaariana, Ásia Central e pequenas ilhas em desenvolvimento, além da escassez de estudos comparativos multi-regionais conduzidos sob metodologias consistentes. No que se refere aos processos hidrológicos e à interface com a sociedade, persistem lacunas relevantes relacionadas às interações entre águas subterrâneas e ecossistemas, especialmente no contexto de ecossistemas dependentes de águas subterrâneas (GDEs) e seus feedbacks com a vegetação e a evapotranspiração. Adicionalmente, a qualidade da água subterrânea permanece pouco investigada em comparação à quantidade, indicando a necessidade de estudos sobre processos como salinização e mobilização de contaminantes. Em regiões costeiras, torna-se crucial compreender as interações entre mudanças climáticas, elevação do nível do mar e intrusão salina em aquíferos.

Recomenda-se que a gestão de recursos hídricos adote uma abordagem adaptativa fundamentada em múltiplos cenários, incorporando conjuntos de Modelos Climáticos Globais (GCMs), diferentes trajetórias de emissões e projeções de demanda. Essa estratégia deve ser integrada à gestão da demanda hídrica, com ênfase na implementação de medidas do tipo no-regret, capazes de gerar benefícios independentemente do cenário climático futuro. Ademais, destaca-se a importância do monitoramento de longo prazo como instrumento essencial para validação de projeções e identificação de mudanças emergentes nos sistemas hidrológicos. Por fim, recomenda-se o investimento em técnicas de recarga artificial gerenciada (Managed Aquifer Recharge – MAR), como forma de ampliar a resiliência dos sistemas hídricos frente às incertezas climáticas e pressões antrópicas. A gestão sustentável de águas subterrâneas sob mudanças climáticas requer abordagem integrada que considere não apenas alterações na recarga natural, mas também cenários de demanda futura, mudanças no uso do solo, e capacidade adaptativa de sistemas socioecológicos. A modelagem integrada de águas subterrâneas e superficiais, combinada com quantificação rigorosa de incertezas e monitoramento de longo prazo, fornece base científica essencial para tomada de decisão adaptativa. Contudo, a tradução de projeções científicas em políticas efetivas requer co-produção de conhecimento com stakeholders e desenvolvimento de ferramentas de suporte à decisão acessíveis e transparentes.

**Palavras-chave:** MODFLOW; mudanças climáticas; recarga de aquíferos; modelagem hidrológica integrada; águas subterrâneas.



# Avaliação Hidrogeológica de Alternativas de Fechamento de Barragens: Integração Entre Modelagem 1D de Infiltração e Modelo Hidrogeológico Numérico

Adrieli Thalia Pereira<sup>1</sup>, Felipe Costa<sup>2</sup>, Isabella Andrade<sup>3</sup>, Leonardo Machado<sup>4</sup>, Debora Barbosa<sup>5</sup>, Lilian Hubner<sup>6</sup>, Anne Brumatti<sup>7</sup>, Andreia Resende<sup>8</sup>

<sup>1</sup> WSP. Autor correspondente: [adrieli.pereira@wsp.com](mailto:adrieli.pereira@wsp.com)

## Introdução

A avaliação do comportamento hidrogeológico de barragens de rejeitos constitui um dos principais desafios associados à estabilidade de longo prazo dessas estruturas e à mitigação de impactos ambientais. A dinâmica de fluxo subterrâneo nesses sistemas é controlada pela infiltração superficial, pela resposta hidráulica do rejeito e pela eficiência dos sistemas de drenagem interna, os quais determinam a magnitude das vazões percoladas e sua interação com o aquífero regional. Nesse contexto, modelos numéricos integrados têm se destacado como ferramenta robusta para analisar cenários de fechamento, permitindo quantificar o balanço hídrico e a evolução das condições hidráulicas ao longo do tempo (Freeze e Cherry, 1979).

Este trabalho apresenta a aplicação de um modelo hidrogeotécnico integrado, combinando cenários de infiltração em escala unidimensional e o modelo tridimensional de fluxo subterrâneo, com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes alternativas de cobertura no comportamento hidrogeológico de uma barragem de rejeitos no pós-fechamento. A abordagem adotada busca garantir coerência entre os processos superficiais e subsuperficiais, permitindo uma representação mais realista do sistema e maior confiabilidade nas previsões.

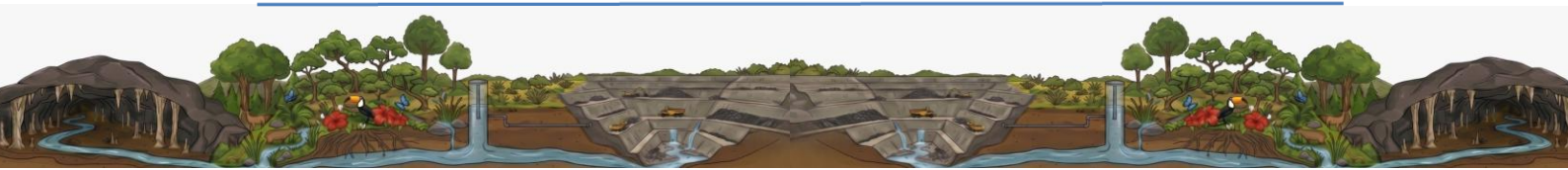
## Metodologia

A metodologia adotada buscou representar o modelo conceitual da barragem por meio da integração entre o modelo de infiltração e o modelo numérico, incorporando as principais características hidrogeológicas do sistema para reproduzir sua dinâmica de fluxo (Anderson e Woessner, 2015). O sistema foi representado assumindo rejeito saturado durante a operação, com tendência à dessaturação progressiva após o encerramento das atividades (Figura 1). Elementos como geomembrana, tapete drenante e filtro vertical foram explicitamente considerados na modelagem, dada sua influência na redistribuição do fluxo.

As simulações dos cenários de cobertura no modelo de infiltração resultaram em três níveis de infiltração, classificados como baixa (18 mm/ano), intermediária (132 mm/ano) e alta (331 mm/ano). A infiltração obtida para cada cenário foi traduzida como taxa de recarga do rejeito e incorporados como condições de contorno no modelo de fluxo, permitindo avaliar seu impacto direto nas vazões simuladas. Essa abordagem segue práticas consolidadas de acoplamento entre processos superficiais e subterrâneos em sistemas de cobertura de rejeitos (Benson et al., 2002).

Foram identificadas três componentes do fluxo interno da barragem (Figura 2): Profundo, referente à descarga para o aquífero; Intermediário, captado sistema de drenagem interna; e Superficial, presente na saturação do rejeito e que atua como descarga superficial, sendo direcionado ao lago. O fluxo superficial não é tratado neste trabalho por não integrar o escopo da hidrogeologia, que se dedica exclusivamente ao estudo do fluxo subterrâneo.

O modelo tridimensional foi calibrado para representar adequadamente a dinâmica hidráulica da barragem, permitindo analisar o balanço hídrico e a evolução temporal das vazões. A resposta do sistema foi avaliada ao longo da fase operacional e dos pós-fechamento, possibilitando verificar o efeito das diferentes condições de recarga impostas pelas alternativas de cobertura.



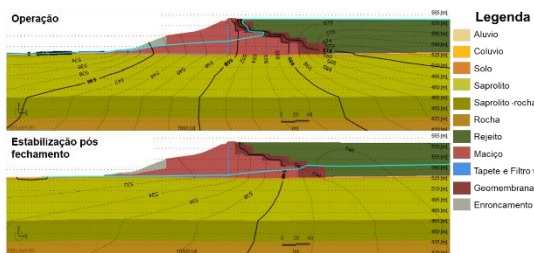


Figura 1: Representação da dinâmica hidrogeológica da barragem de rejeitos durante a operação e após o fechamento no modelo numérico de fluxo.

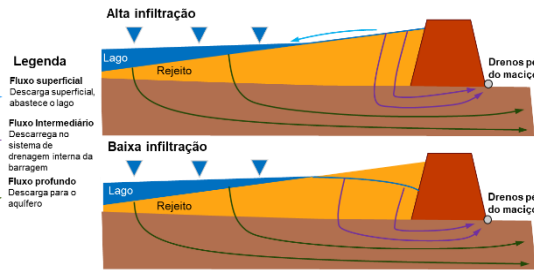


Figura 2: Esquemática da dinâmica de fluxo nos modelos conceituais de alta e baixa infiltração.

## Resultados e Discussão

Os resultados evidenciam que o comportamento hidrogeológico da barragem é sensível às condições de infiltração impostas na barragem durante a operação e no pós fechamento (Figura 3). Na fase operacional, observou-se aumento progressivo das vazões captadas pelos sistemas internos, associado à disposição de rejeito e à manutenção das condições de saturação. A partir de 2028, observa-se tendência de estabilização das vazões, indicando a convergência a um regime estacionário controlado pelas condições hidráulicas internas.

Após o fechamento, os cenários simulados apresentaram respostas distintas. No cenário de baixa infiltração, verifica-se uma redução expressiva das vazões tanto no fluxo profundo quanto no intermediário, com estabilização em até dois anos, e valores significativamente inferiores aos observados durante a operação. Esse comportamento está associado à dessaturação do rejeito, que reduz a conectividade hidráulica e limita a percolação. Tal resposta é consistente com a teoria de escoamento em meios porosos não confinados, na qual a diminuição da carga hidráulica leva à redução da transmissividade efetiva.

No cenário de infiltração intermediária, as vazões apresentam redução moderada, com rápida estabilização após a implantação da cobertura. Esse comportamento indica que o sistema responde de forma rápida às alterações de recarga, mantendo, entretanto, níveis de fluxo ainda relevantes.

No cenário de alta infiltração, as vazões permanecem próximas às observadas na fase operacional, evidenciando que a recarga elevada mantém o rejeito em condição de saturação, sustentando padrões de fluxo similares aos anteriores ao fechamento.

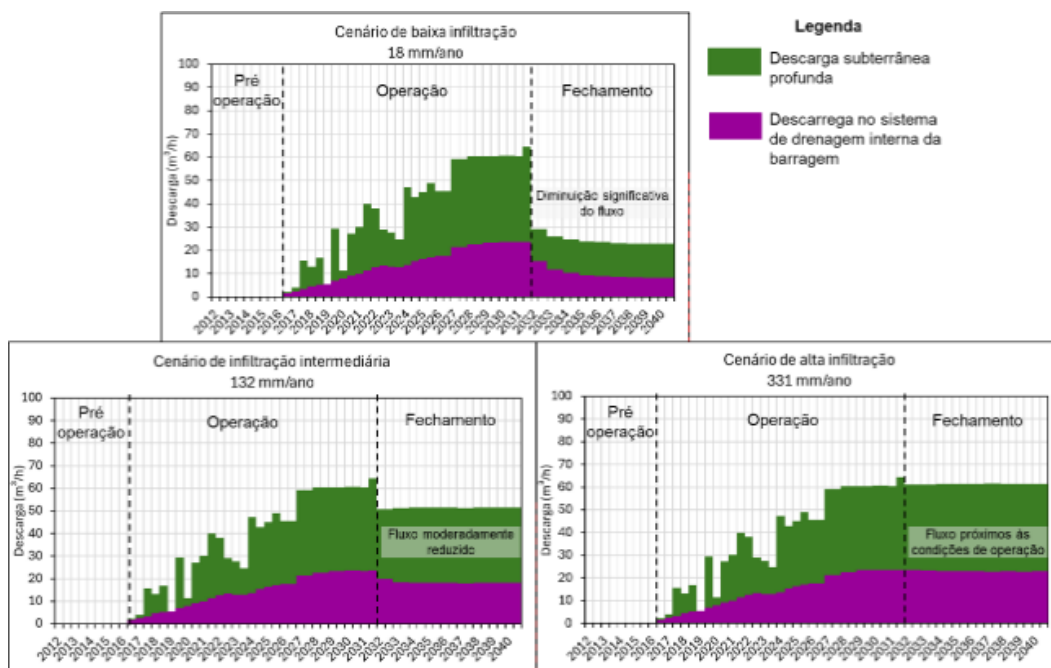
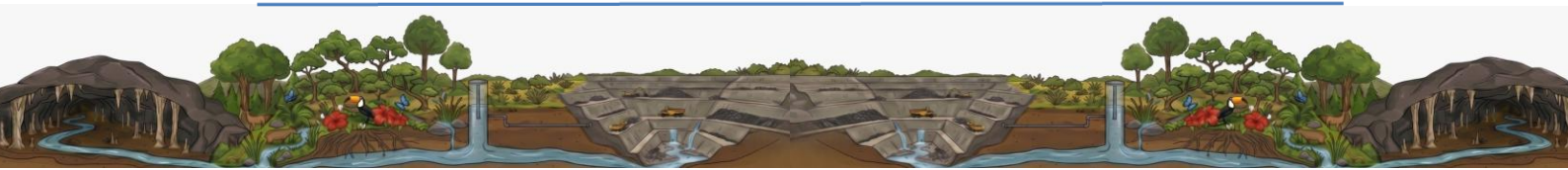


Figura 3: Gráficos de descarga profunda e intermediária do rejeito calculada pelo modelo ao longo da operação e fechamento dos cenários de infiltração.



A análise integrada dos resultados demonstra que a eficiência da cobertura está diretamente relacionada à sua capacidade de limitar a recarga superficial. Coberturas com baixa permeabilidade promovem a dessaturação do rejeito e reduzem significativamente as vazões percoladas, enquanto cenários com elevada infiltração mantêm condições hidráulicas desfavoráveis do ponto de vista ambiental. Adicionalmente, observa-se que a presença de barreiras de baixa permeabilidade, como geomembranas, influencia a redistribuição do fluxo, direcionando parte significativa da água para os sistemas de drenagem interna.

## Conclusões

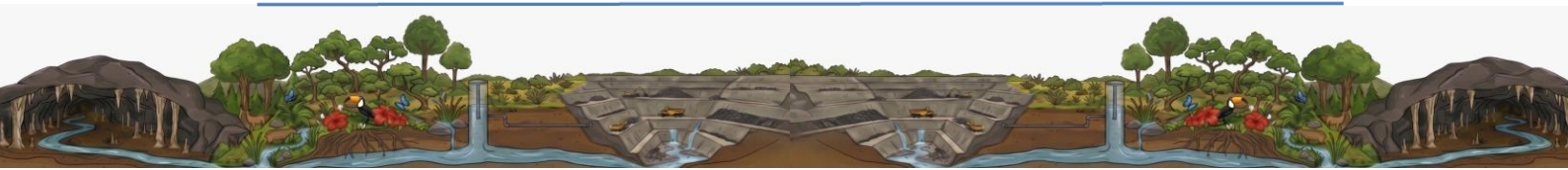
Os resultados obtidos demonstram que o comportamento hidrogeológico da barragem de rejeitos no pós-fechamento é fortemente controlado pelas condições de recarga superficial e pelas propriedades hidráulicas do rejeito. A modelagem integrada adotada permitiu representar de forma consistente e compatível com o modelo conceitual a interação entre processos de infiltração e fluxo subterrâneo, fornecendo uma base robusta para a avaliação de alternativas de cobertura.

De modo geral, verificou-se que coberturas com baixa infiltração são fundamentais para promover a dessaturação do rejeito e reduzir as vazões percoladas, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais. Por outro lado, os cenários com alta recarga mantêm condições semelhantes às da fase operacional, indicando maior potencial de interação com o meio externo. Esses resultados reforçam a importância do projeto adequado de coberturas como elemento-chave no fechamento de barragens de rejeitos.

**Palavras-chave:** hidrogeologia; modelagem numérica; barragem de rejeitos; modelo de infiltração; fechamento de barragem

## Referências

- ANDERSON, Mary P.; WOESSNER, William W.; HUNT, Randall J. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press, 2015.
- BENSON, Craig H. et al. Evaluation of final cover performance: field data from the alternative cover assessment program (ACAP). Proc. Waste Management, v. 2, p. 1-15, 2002.
- FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. Groundwater prentice-hall. Englewood Cliffs, NJ, v. 176, p. 161-177, 1979.



# How to Train Your Model: Machine Learning For Tailings Fingerprint and Remediation

Eduardo Cervi <sup>1</sup>, Gregorio Faversani <sup>2</sup>, Gabriel Silveira <sup>3</sup>, Nathan Martins <sup>4</sup>, Felipe Costa <sup>5</sup>, Pedro Leite <sup>6</sup>

<sup>1</sup> WSP Brasil, [eduardo.cervi@wsp.com](mailto:eduardo.cervi@wsp.com).

## Abstract

Identifying tailings in contaminated soil and sediment is essential for source delineation, risk assessment, and remediation planning in mining-affected watersheds. This study evaluated a machine learning-based geochemical fingerprinting workflow to distinguish tailings from unaffected soils and sediments in a mining-impacted watershed. Over five years, the study progressed from screening candidate fingerprinting techniques to testing end-member materials and synthetic mixtures, followed by validation on field samples. Chemical, physical, and mineralogical analyses were performed on end-member materials and laboratory mixtures, and the resulting dataset informed a Random Forest classifier for tailings identification. The machine learning model was calibrated with 337 samples using 76 physicochemical and mineralogical variables and applied to more than 1,500 field samples. The out-of-bag error was 0.16, and agreement with field-based interpretation was 90%. Performance was particularly strong for samples without visual evidence of tailings (97.5%). The results show that machine learning-based geochemical fingerprinting is a robust and scalable approach for tailings identification and can directly support effective mitigation and remediation planning.

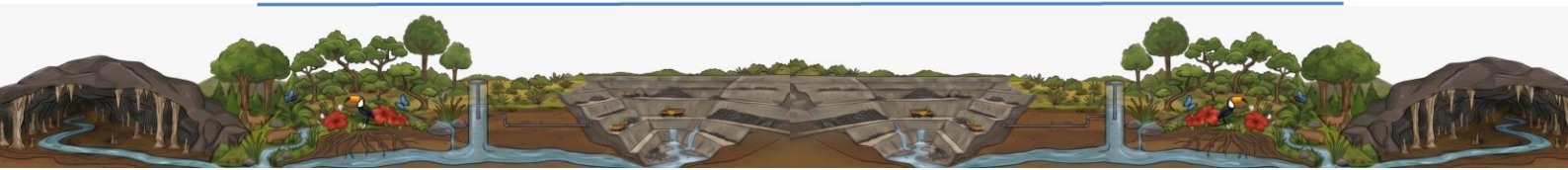
**Key Words:** fingerprinting; tailings remediation; machine learning; random forest; digital tools

## Introduction

Cleaning up contaminated soil, sediment, and water is a major global challenge. In mining-affected watersheds, this challenge is amplified by the wide spatial extent of contamination, sediment reworking, and overlap between mine-derived materials and natural geological background. The Brazilian dam failures at Fundão and Brumadinho illustrate the scale and persistence of tailings-related impacts on river systems, water quality, sediments, and ecological receptors (Carmo et al., 2017; Thompson et al., 2020).

Reliable tailings identification is therefore critical for delineating impacted areas and building effective remediation plans. In complex geological settings, visual inspection and single-parameter interpretation are often insufficient. More robust digital tools are needed to integrate large analytical datasets and reduce interpretation subjectivity. Machine learning has emerged as a powerful approach in environmental geochemistry because it can identify patterns in multivariate data and improve classification consistency (He et al., 2022). Among available algorithms, Random Forest is especially suitable for environmental classification because it handles nonlinear relationships, mixed predictor types, and high-dimensional datasets with limited distributional assumptions (Breiman, 2001).

This study evaluated a machine learning-based geochemical fingerprinting workflow to identify tailings in soil and sediment from a mining-impacted watershed and to support future mitigation and remediation planning through more reliable source discrimination.



## Material and Methods

The study was developed over five years in four phases. First, potential fingerprinting techniques were screened through literature review and secondary data assessment to identify methods capable of distinguishing tailings from natural geological background based on particle size, tracer elements, elemental ratios, isotopic signatures, mineralogical composition, and texture.

In Phase 1, a proof-of-concept study was performed using end-member materials. Tailings, unaffected soils, and unaffected fluvial sediments were collected and analyzed to define the geochemical and physical signatures of impacted and non-impacted materials. A total of 80 samples were analyzed using particle size analysis, elemental ratios, isotopic analysis, whole-rock X-ray fluorescence, elemental analysis, and automated mineralogy (TIMA/QEMSCAN).

In Phase 2, the selected techniques were tested on 144 synthetic mixtures prepared with 2%, 10%, 25%, and 50% tailings. Chemical, physical, and mineralogical analyses were performed on the <63  $\mu\text{m}$  and 63  $\mu\text{m}$  to 2 mm fractions. Additional measurements included low-frequency and frequency-dependent magnetic susceptibility, colorimetry following the Munsell system, and mineralogical characterization by TIMA/QEMSCAN, optical microscopy, SEM, and EDS.

In Phase 3, the fingerprinting techniques were applied to more than 1,500 real-world samples collected in the impacted watershed. In Phase 4, a Random Forest model was developed using 76 physicochemical and mineralogical variables to classify samples as either showing evidence of tailings or not. The model included 500 decision trees generated by bootstrap resampling, with random subsets of predictors tested at each split to improve robustness and reduce overfitting (Breiman, 2001). The model was calibrated using 337 samples representing tailings, unaffected materials, and synthetic mixtures. All available variables were retained in calibration. The final model was then applied to >1,500 field samples collected during fieldwork investigations.

## Results and Discussion

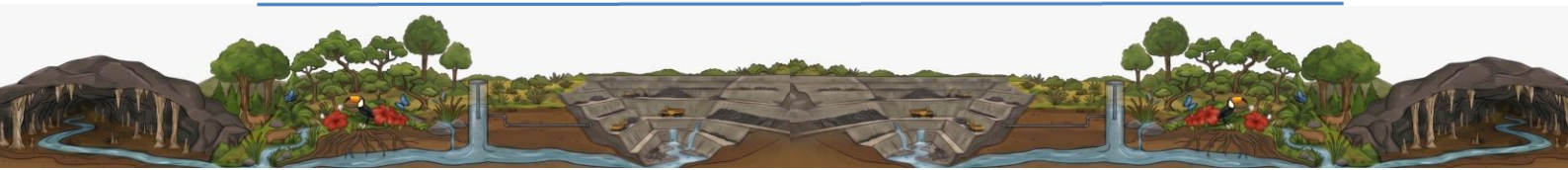
Tailings showed a reproducible multivariate signature relative to unaffected soils and sediments. The strongest discriminatory parameters were associated with iron (Fe) enrichment and related geochemical behavior. Variables such as  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ga}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ , and magnetic susceptibility were the most informative parameters. Particle-size data also differentiated materials. Tailings were consistently finer than unaffected soils and sediments. This contrast was strongest in the <63  $\mu\text{m}$  fraction, where several geochemical signals were more pronounced.

The Random Forest model showed strong performance. The out-of-bag error was 0.16. When applied to more than 1,500 field samples, the model reached approximately 90% agreement with field-based classification. Performance was particularly strong for samples without visual evidence of tailings, with agreement of 97.5%. This result is important for environmental management because it increases confidence in excluding non-impacted materials and helps focus remediation on priority areas.

The model also demonstrated the value of integrating multiple lines of evidence. Visual assessment is rapid but subjective. Individual geochemical plots are transparent but may be less effective where signatures overlap. The Random Forest classifier integrated chemical, physical, and mineralogical variables into a single robust decision framework.

## Conclusion

Machine learning-based geochemical fingerprinting proved to be an effective and robust approach for tailings identification in contaminated soil and sediment. The integration of chemical, physical, and mineralogical data into a Random Forest framework produced strong predictive performance and improved consistency in environmental interpretation.

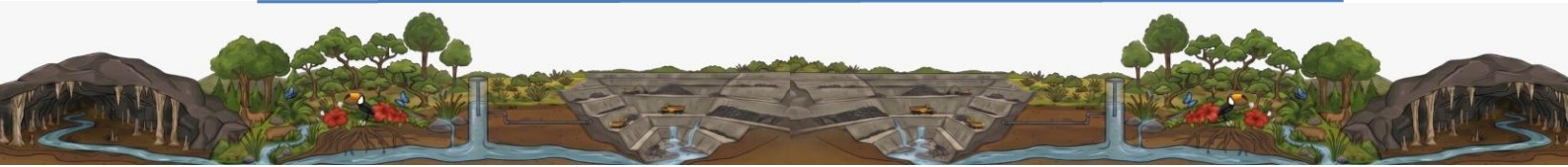


The method was especially effective for identifying samples without visual evidence of tailings, demonstrating strong potential for screening and delineation of contaminated areas. This is highly relevant for remediation planning, where effective management depends on accurate source identification and reliable separation of impacted and non-impacted materials.

The workflow is scalable and transferable to other contaminated watersheds and tailings-impacted settings. By combining robust analytical characterization with machine learning, it can support more defensible mitigation strategies, more efficient allocation of remediation efforts, and better long-term environmental outcomes.

## References

- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5–32.
- Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., Campos, I. C., Carmo, F. F., Silvino, G., Xavier de Castro, K. J. S., Mauro, M. L., Rodrigues, N., Miranda, M. P. S., & Pinto, C. E. F. (2017). Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(3), 145–151.
- He, Y., Zhou, Y., Wen, T., Zhang, S., Huang, F., Zou, X., Ma, X., & Zhu, Y. (2022). A review of machine learning in geochemistry and cosmochemistry: Method improvements and applications. *Applied Geochemistry*, 140, 105273.
- Thompson, F., de Oliveira, B. C. V., Cordeiro, M. C., Masi, B. P., Rangel, T. P., Paz, P., Freitas, T., Lopes, G., Silva, B. S., Cabral, A. S., & Thompson, C. C. (2020). Severe impacts of the Brumadinho dam failure on the water quality of the Paraopeba River. *Science of the Total Environment*, 705, 135914.



# Recuperação do Nível D'água em Minas Subterrâneas e o Impacto nas Estruturas de Disposição de Rejeitos

<sup>1</sup> Isabella Brito Andrade, <sup>2</sup>Felipe André Ferreira Costa, <sup>3</sup> Andreia Lais Pereira Resende, <sup>4</sup>Leonardo Machado, <sup>5</sup>Lilian Trindade Hubner, <sup>6</sup>Debora Maria Diniz Barbosa, <sup>7</sup>Anne Carneiro Brumatti, <sup>8</sup>Adrieli Thalia Pereira

<sup>1</sup> WSP Brasil. Autor correspondente: [isabella.andrade@wsp.com](mailto:isabella.andrade@wsp.com)

## Introdução

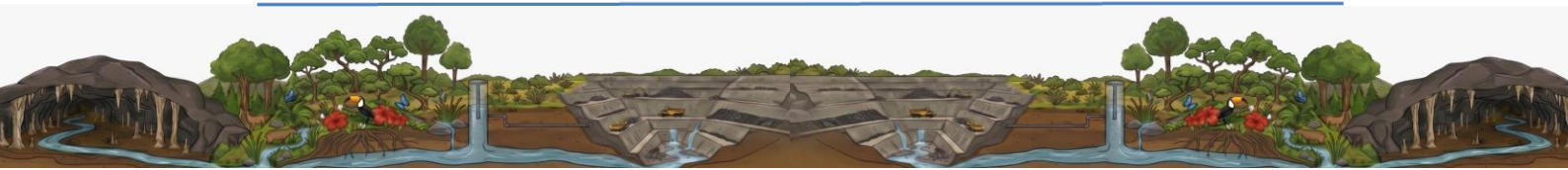
A modelagem hidrogeológica aplicada à previsão da recuperação do nível d'água em minas subterrâneas é uma ferramenta utilizada para compreender o comportamento piezométrico após o encerramento das atividades de bombeamento (Custodio & Llamas, 1976). A interrupção do rebaixamento do aquífero desencadeia um processo transitório de elevação do nível d'água, cuja dinâmica depende de fatores como heterogeneidade geológica, conectividade entre unidades aquíferas, recarga efetiva e características estruturais. O presente estudo apresenta uma abordagem integrada de modelagem conceitual e numérica voltada para estimar o tempo de recuperação e os padrões de fluxo associados ao processo de recuperação do nível d'água subterrâneo em meios hidrogeológicos complexos, que envolvem comportamento de nível d'água em estruturas de disposição de rejeito juntamente atividades de mina subterrânea.

## Métodos

O modelo conceitual foi elaborado a partir da integração de dados hidrogeológicos, hidrográficos, geológicos e estruturais disponíveis pela bibliografia (Dardenne, 2000, Fernandes, 2013), complementados por séries históricas de monitoramento (nível d'água, vazões bombeadas) e parâmetros hidráulicos obtidos por ensaios. Definiu-se as unidades hidrogeológicas, as condições de recarga e descarga e a hidrodinâmica do fluxo subterrâneo no modelo hidrogeológico conceitual. Elaborou-se o modelo geológico-geotécnico da área de estudo, incorporando as unidades hidrogeológicas, bem como as estruturas antrópicas – que compreende três barragens de rejeito e a geometria da mina subterrânea. A modelagem hidrogeológica numérica de fluxo foi desenvolvida no software Feflow 8.0 utilizando o método de elementos finitos, com calibração em regimes permanente e transiente. Foram simulados cenários de fechamento da mina subterrânea, através do desligamento do bombeamento, considerando diferentes condições de recarga e variações temporais da condutividade hidráulica.

## Resultados

Os resultados indicaram que, após o desligamento do sistema de bombeamento, o nível d'água tende a se recuperar rapidamente nos primeiros anos, seguido de uma fase de estabilização mais lenta à medida que o gradiente hidráulico se reduz. A modelagem identificou zonas preferenciais de ascensão de nível associadas às unidades mais permeáveis e às estruturas geológicas que facilitam o fluxo vertical e lateral. O tempo total de recuperação depende fortemente da capacidade de armazenamento das unidades e da conectividade entre aquífero raso e profundo. No cenário modelado, a recuperação completa variou entre 5 e 12 anos, com diferenças setoriais significativas. A Figura 1 apresenta graficamente essa relação.



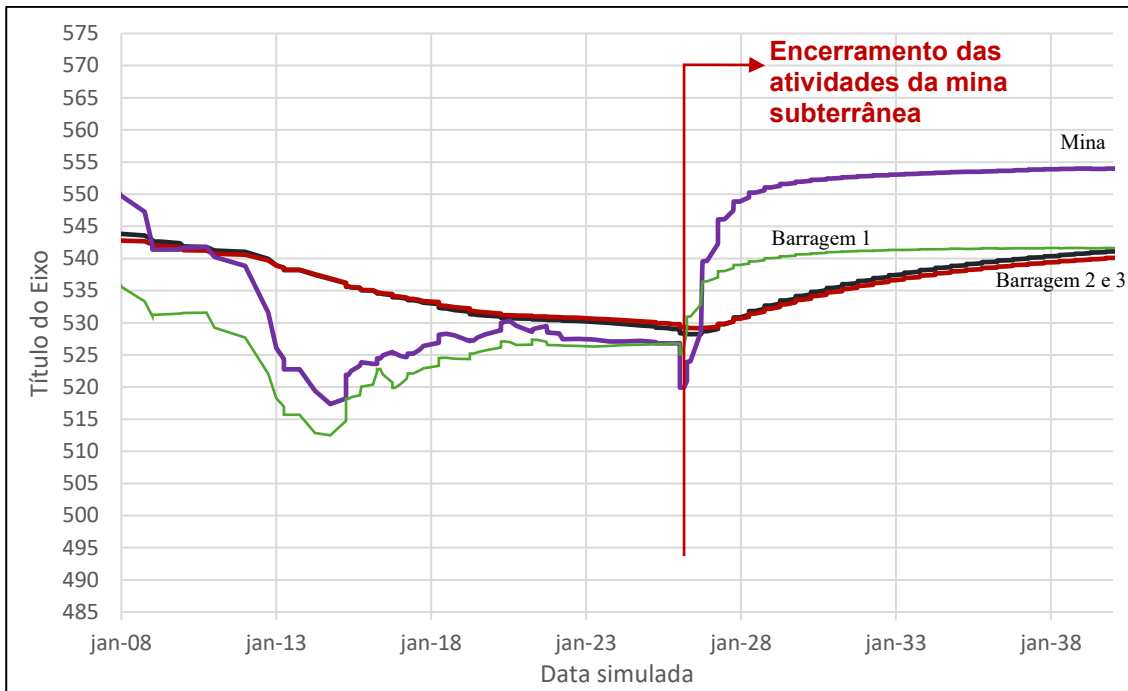


Figura 1. Recuperação simulada do nível d'água nas estruturas antrópicas

## Discussão

A análise reforça que a resposta hidrogeológica pós-bombeamento é controlada pela heterogeneidade do meio subterrâneo. Unidades de alteração tendem a responder mais rapidamente a recuperação do meio subterrâneo, enquanto rochas fraturadas profundas apresentam comportamento mais lento. A modelagem demonstrou que a recuperação do nível d'água pode resultar em alterações no padrão de fluxo regional, mudando zonas anteriormente influentes para regimes efluentes. A simulação também permitiu avaliar possíveis impactos nas estruturas devido ao aumento da carga hidráulica.

A Figura 2 mostra que, o fluxo subterrâneo das barragens mais próximas da mina subterrânea, que anteriormente era captado pela mina subterrânea, começa a abastecer o meio regional. Em detrimento, as barragens mais distantes não apresentam esse comportamento, apenas abastecimento o aquífero regional.

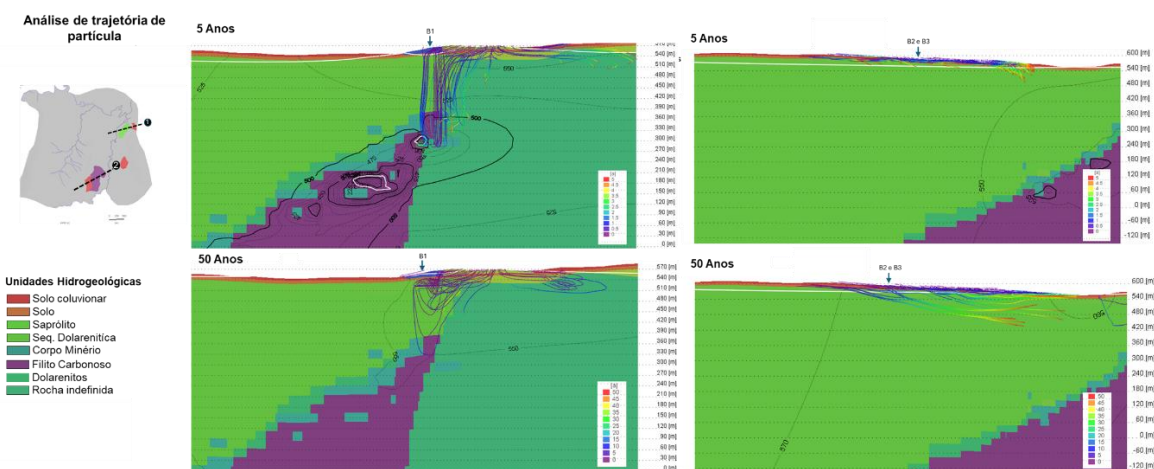
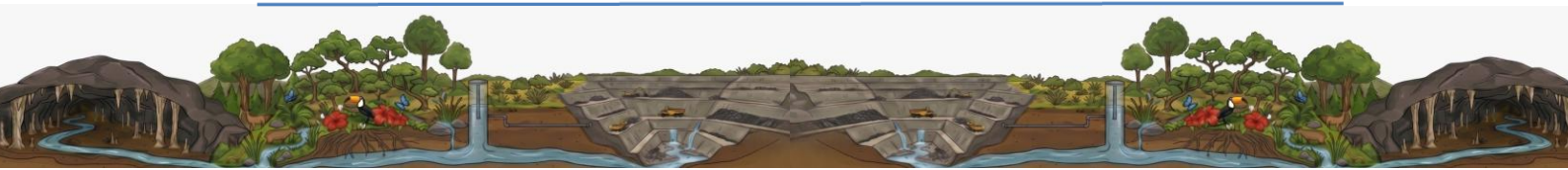


Figura 2. Projeção do fluxo subterrâneo durante e após o encerramento das atividades da mina subterrânea



## Conclusões

A modelagem hidrogeológica desenvolvida demonstrou-se uma ferramenta adequada para compreender a dinâmica de recuperação do nível d'água em ambientes subterrâneos após o desligamento do bombeamento, permitindo avaliar não apenas os tempos de restabelecimento piezométrico, mas também os efeitos indiretos sobre estruturas sensíveis à variação da carga hidráulica. Os resultados ressaltam que modelos tridimensionais bem calibrados, aliados a uma caracterização detalhada das unidades hidrogeológicas e das estruturas antrópicas, são essenciais para a previsão de cenários futuros em sistemas complexos.

O conjunto de simulações forneceu subsídios robustos para o planejamento de fechamento de mina, para a gestão de riscos hidrogeológicos e para a definição de estratégias eficientes de monitoramento pós-operacional, contribuindo para uma tomada de decisão mais segura e embasada em relação ao comportamento do aquífero e à estabilidade das estruturas associadas.

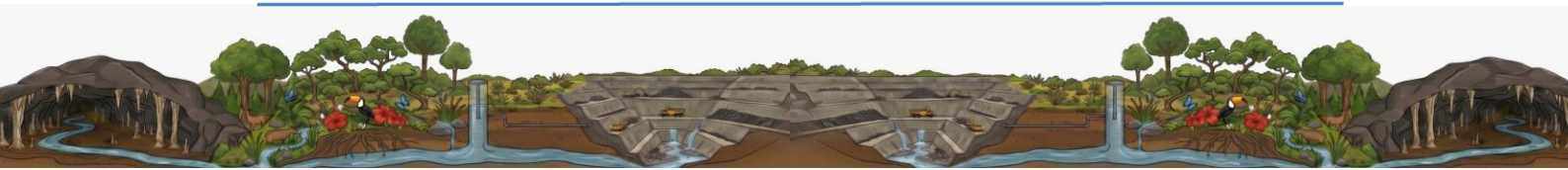
**Palavras-chave:** Recuperação Piezométrica; Modelagem Numérica; Mina Subterrânea; Hidrogeologia; Fluxo Subterrâneo.

## Referências

CUSTODIO, E., & LLAMAS, M. R. (1976). *HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA* (2 ed.). BARCELONA, ESPANHA: OMEGA.

DARDENNE M.A. The Brasília fold belt. In: Cordani, U.G., Milani, E. G., Thomaz Filho, A. e Campos, D.A. (eds.), *Tectonic evolution of South America*, p.231-263, 2000.

FERNANDES, A.F. Tectonoestratigrafia da Faixa Brasília Meridional e estudo de casos de possíveis rochas fonte de diamante, Coromandel-MG. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2013. 135p.



# Avaliação da Qualidade das Águas Superficiais do Lago Guaíba (RS) Antes e Após os Eventos Hidroclimáticos Extremos de 2024

Fernanda Ribeiro Menezes<sup>1,2</sup>, Ana Elis Moraes de Almeida<sup>1,3</sup>, Alice Cardoso Takahashi<sup>1,4</sup>, Nilson Coutinho Gomes Néto<sup>1,5</sup>, Artur Assreuy Diniz<sup>1,6</sup>, Marina Muniz de Queiroz<sup>1,7</sup>, Jaielle Rodrigues Nascimento<sup>1,8</sup>, Silvia Maria A. C. Oliveira<sup>1,9</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais. Autor correspondente: [fernandarmenezes@ufmg.br](mailto:fernandarmenezes@ufmg.br)

## Resumo

O presente trabalho objetivou avaliar os efeitos dos eventos hidroclimáticos extremos ocorridos em abril e maio de 2024, no estado do Rio Grande do Sul, sobre a qualidade das águas superficiais do Lago Guaíba. O Lago Guaíba está localizado na Região Metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, sendo o principal manancial de abastecimento da capital gaúcha. O Guaíba é estratégico para a região metropolitana, sendo essencial para o abastecimento de água, diluição de efluentes, navegação, pesca, turismo e lazer (Andrade et al., 2019). No entanto, a intensa urbanização de sua bacia hidrográfica contribui para o lançamento de poluentes, especialmente de origem doméstica, sendo a carga orgânica de esgotos a principal fonte de contaminação (Basso, 2012). Neste estudo, foram utilizados dados secundários da Rede Básica de Monitoramento da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler (FEPAM). As estações selecionadas foram: PG-81, PG-82, PG-83 e PG-88, conforme apresentado na Figura 1.

Os parâmetros de qualidade da água selecionados foram monitorados no período de junho de 2022 a maio de 2025, com coletas trimestrais, e dividido em pré-evento (junho/2022 a abril/2024; n = 470) e pós-evento (maio/2024 a maio/2025; n = 650). A homogeneidade espacial foi avaliada pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ( $\alpha = 5\%$ ). Para os parâmetros sem diferenças significativas entre as estações, a comparação entre os períodos ocorreu de maneira consolidada, ou seja, considerando os dados de todas as estações em conjunto. Já para os parâmetros com diferenças significativas entre as estações, as comparações entre os períodos foram conduzidas de maneira isolada, por estação.

A comparação entre os períodos pré e pós-evento hidroclimático no Lago Guaíba foi realizada com o teste de Mann-Whitney ( $\alpha = 5\%$ ). Houve diferenças significativas entre os períodos pré e pós-evento para os parâmetros cloreto total, clorofila a, cobre total, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), níquel total, Nitrogênio Kjeldahl Total (NTK) e salinidade. Cloreto total, clorofila a, DQO, níquel total e salinidade diminuíram após o evento, possivelmente devido à diluição causada pelas enchentes (Figura 2). Por outro lado, cobre total, DBO e NTK aumentaram, possivelmente em função da elevação dos limites de quantificação no período pós-evento. Na análise por estação, houve diferença significativa na transparência da água nas estações PG-81, PG-82 e PG-83, localizadas a montante do lago.

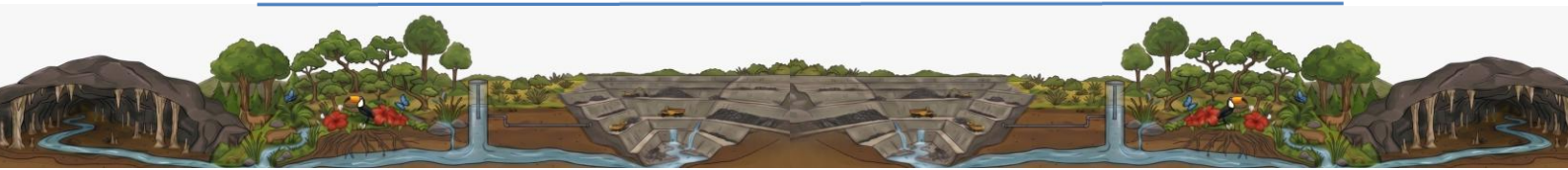


Figura 1 – Localização das estações de monitoramento no Lago Guaíba.

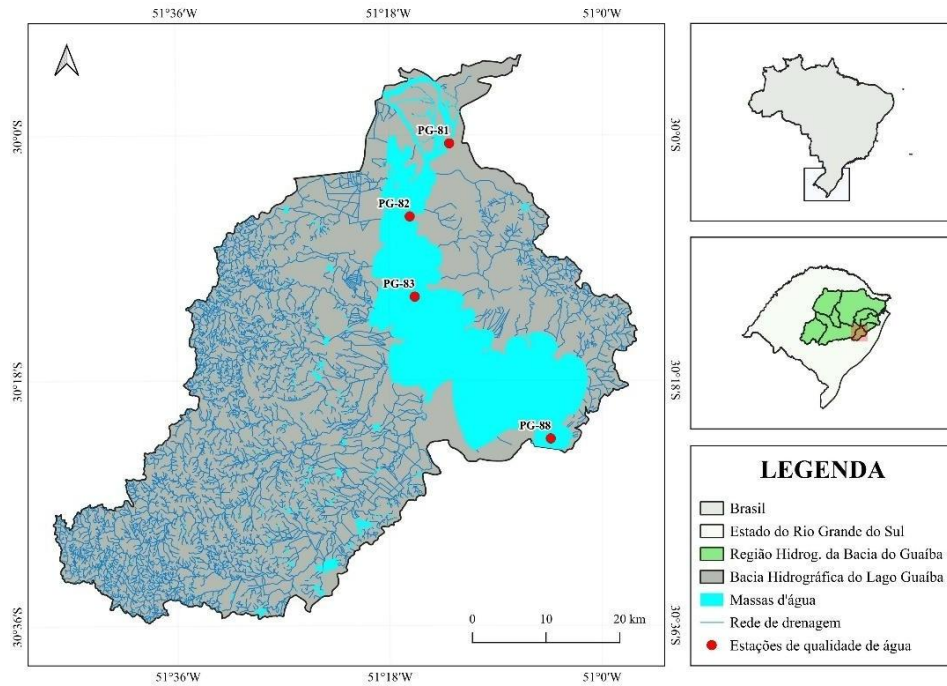
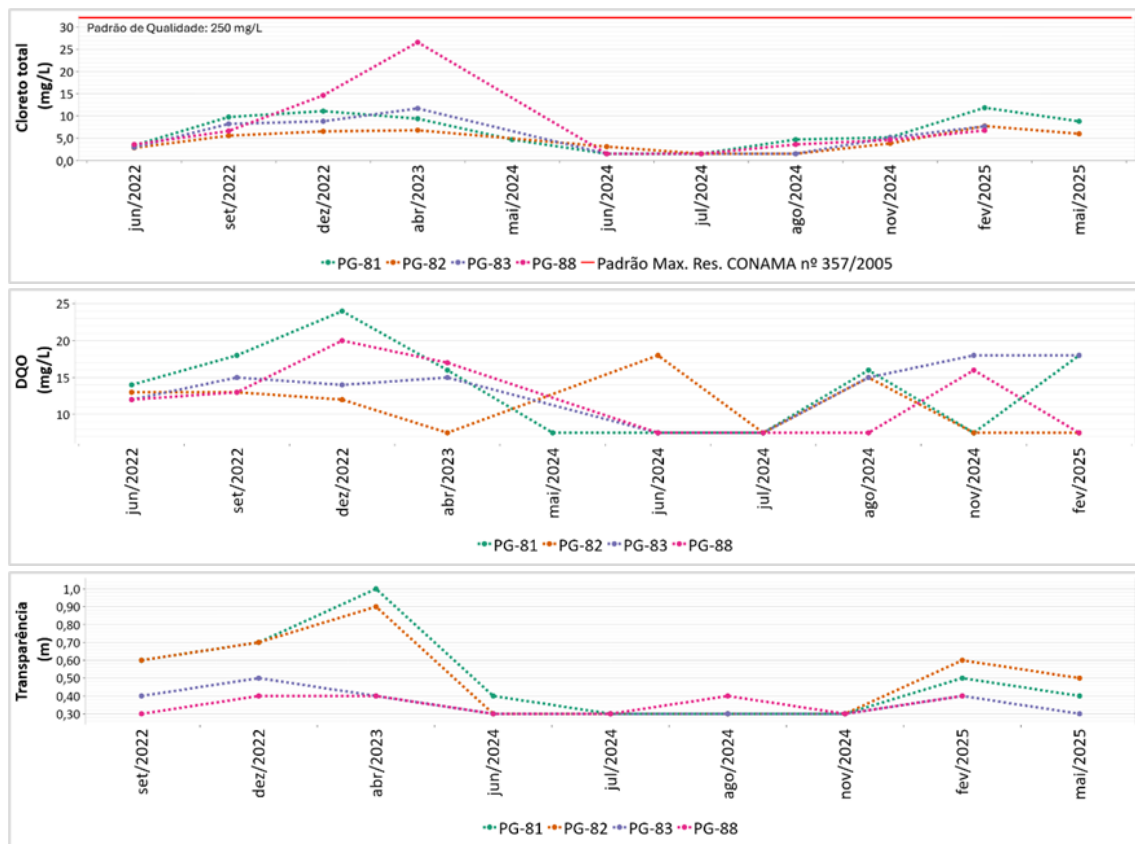
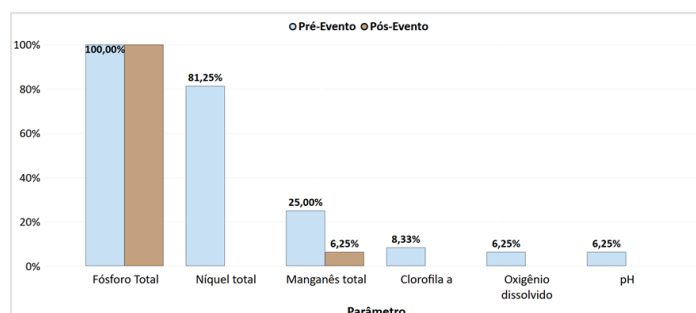


Figura 2 - Alguns dos parâmetros com diferença significativa entre os períodos pré e pós-eventos hidroclimáticos.



Os percentuais de não conformidade foram avaliados nos períodos pré e pós-evento, com base nos padrões de qualidade da Resolução CONAMA nº 357/2005 (águas doces Classe 2), como apresentado na Figura 3. O fósforo total apresentou 100% de não conformidade em ambos os períodos. Os demais parâmetros reduziram os percentuais de não conformidade em relação ao período pré-evento, com destaque para o níquel total e manganês total.

Figura 3 - Percentuais de Não Conformidades para os Períodos Pré e Pós-Eventos Hidroclimáticos.



Os resultados evidenciam a influência direta de eventos hidroclimáticos extremos sobre os parâmetros de qualidade da água no Lago Guaíba, sendo observada principalmente a redução das concentrações dos elementos avaliados, em função dos efeitos de diluição. Nesse contexto, ressalta-se a importância do monitoramento contínuo e da avaliação crítica de dados frente a eventos extremos para subsidiar políticas públicas de gestão hídrica.

**Palavras-chave:** Poluição; Eventos hidroclimáticos; Lago Guaíba; Teste de Kruskal-Wallis; Teste de Mann-Whitney.

## Referências

- ANDRADE, L. C. et al. Lago Guaíba: uma análise histórico-cultural da poluição hídrica em Porto Alegre, RS, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, p. 229-237, 2019.
- BASSO, L. A. Bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul: implicações ambientais. In: VERDUM, R.; BASSO, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. A. (orgs.). *Rio Grande do Sul: paisagens e territórios em transformação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012. p. 355.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Resolução 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. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.
- BUENO, L. M.; SANTANA, E. L.; MILANI, I. C. B. Condições hidroquímicas do Lago Guaíba e proposição de medidas de recuperação ambiental. In: *CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DAS ÁGUAS: inovações e avanços em pesquisa*. v. 2. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2023. p. 79-100.
- COLLISCHONN, W. et al. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 30, p. e1, 2025.
- CORTEZ, Á. V. Determinação de cloreto em águas por imagens digitais. 2018. 53 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos) – Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Itacoatiara, 2018.

