

TÍTULO: MODELAGEM NUMÉRICA GEOQUÍMICA APLICADA AO GERENCIAMENTO DE EFLUENTES DE MINA E ESTIMATIVA DE COLMATAÇÃO DE DRENOS

ALBUQUERQUE, R.C.¹, ABREU, C.B.¹, LANGE, L.L.¹, WERLE, M.¹, COSTA, E.¹

¹Water Services and Technologies, Rua Bernardo Figueiredo, 33, Belo Horizonte, Brasil.
e-mail: rafael.albuquerque@waterservicestech.com

RESUMO

Efluentes gerados na indústria da mineração tem o potencial de possuir elevadas concentrações químicas e, por consequência, poluir drenagens superficiais naturais e água subterrânea. No Brasil, o gerenciamento e tratamento de efluentes provenientes da mineração por si só é um desafio. Somado a isso, com a Resolução ANM 13/2019, diversos empreendimento minerários estão passando pelo processo de descomissionamento de barragens, adicionando ainda mais complexidade no gerenciamento de efluentes. Neste contexto, se faz necessário o conhecimento e estimativa da carga química dos efluentes oriundos da mineração. A carga química é dependente da vazão e da concentração. A vazão pode ser estimada por modelagem numérica hidrológica, hidrogeológica e balanço hídrico operacional. A concentração é dependente da geologia da área, processo de beneficiamento na usina metalúrgica e dinâmica de fluxo nas estruturas (barragens e pilhas). A concentração pode ser estimada através de ensaios laboratoriais e modelagem numérica geoquímica. O objetivo deste trabalho é abordar aspectos do gerenciamento de efluentes gerados na mineração, com enfoque em modelagem numérica e estimação de potencial de colmatação química de drenos. Além disso, serão apresentados e discutidos aspectos considerados chaves para predição e estimação da concentração e vazão dos efluentes.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem de mina; modelagem numérica; gerenciamento de efluentes

ABSTRACT

Effluents generated in mining industry have the potential to have high chemical concentrations and consequently pollute natural surface drainages and groundwater. In Brazil, the management and treatment of mining effluents is a challenge. In addition, with ANM 13/2019 Resolution, several mining enterprises are going through the process of decommissioning dams, adding further complexity to effluent management. In this context, it is necessary to know and estimate the chemical load of mining effluents. The chemical load depends on flow rate and concentration. The flow rate can be estimated by hydrological and hydrogeological numerical modelling and operational water balance. The concentration is dependent on the geological context, the beneficiation process in the metallurgical plant and the flow dynamics in the structures (dams and piles). The concentration can be estimated through laboratory tests and numerical modelling. The objective of this work is to address aspects of the effluents management generated in the mining, focused on numerical modelling, and drain clogging estimation. In addition, key aspects of the predicting and estimating effluent concentration and flow rate will be presented and discussed.

Albuquerque, R.C.; Abreu, C.B.; Lange, L.L.; Werle, M.; Costa, E.

KEYWORDS: Mining drainage; numerical modelling; effluents management

1 INTRODUÇÃO

A indústria da mineração gera uma grande quantidade e variedade de efluentes. Esses efluentes podem ter elevadas concentrações químicas e, por consequência, apresentar potencial de contaminar as drenagens superficiais naturais e aquíferos do entorno do empreendimento. Para citar um exemplo, no Canadá, a drenagem ácida de mina (DAM) foi considerada o maior tipo de passivo ambiental do país. Dentre o conjunto de soluções levantadas naquele país visando a contenção dos passivos associados à DAM, inclui-se a realização de estudos visando estimar o pH e a composição química futura das drenagens e efluentes de mineração. Isto permite que as mineradoras ajam de forma proativa. Medidas de controle e tratamento podem ser estabelecidas com base em estimativas futuras e, em alguns casos, serem implantadas antes do efluente começar a ser gerado (MEND, 2000).

No Brasil, a indústria da mineração é bem desenvolvida em todas as regiões do país. Entretanto, o gerenciamento de efluentes ainda é um desafio. Somado a isso, a Resolução ANM nº 13/2019 prevê a descaracterização de barragens alteadas pelo método a montante ou por método declarado desconhecido até o final de 2027. Com o processo de descomissionamento das barragens, surge a necessidade de novas estruturas para deposição de rejeito, como por exemplo, o empilhamento de estruturas compartilhadas de estéril e rejeito (PDER). Isto implica em dois desafios importantes no gerenciamento de efluentes: 1) conduzir o gerenciamento de efluentes e contaminação em barragens em processo de descomissionamento; 2) estimar a qualidade dos efluentes a serem gerados nas novas estruturas. Além disso, dada a preocupação em relação à segurança geotécnica das novas estruturas, uma questão levantada é quanto ao potencial de colmatação química em drenos das novas estruturas.

Para um tratamento e gerenciamento efetivo de efluentes, é necessário conhecer as vazões e concentrações deles. A combinação dessas duas variáveis resulta na carga química liberada no meio ambiente através do efluente, que, a depender da sua característica, os custos do tratamento podem variar em diversas ordens de magnitude (Wolkersdorfer, 2022). As vazões podem ser alteradas com o tempo em função de aspectos como variações temporais nas taxas de bombeamento para deságue de mina, sazonalidade climática, mudanças operacionais nas plantas metalúrgicas, e outras alterações operacionais. As vazões futuras dos efluentes podem ser estimadas, a depender da natureza do efluente, por meio de estudos e modelagem numérica hidrológica ou hidrogeológica, ou por meio de avaliações do balanço hídrico. Já as concentrações dependem da geologia local, processos que ocorrem na usina metalúrgica e dinâmica de fluxo nas estruturas (barragens e pilhas). A estimativa das concentrações químicas de efluentes na mineração pode ser dada através de ensaios laboratoriais e modelagem numérica geoquímica (MEND, 2000).

O presente trabalho tem como objetivo abordar aspectos do gerenciamento de efluentes na mineração, com enfoque em modelagem numérica hidrogeoquímica preditiva e estimativa do potencial de colmatação química de drenos. Além disso, serão apresentados e discutidos aspectos considerados chaves para predição e estimativa da concentração e vazão dos efluentes. Através do entendimento destes aspectos e da modelagem numérica, é possível se ter um melhor entendimento e direcionamento a respeito do gerenciamento de efluentes na mineração.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para realização de um modelo numérico geoquímico diagnóstico e preditivo da composição de efluentes de pilhas e barragens, é necessário o entendimento de diversas informações prévias a respeito da estrutura. São levados em consideração aspectos como:

- Contextualização geológica;
- Mineralogia e caracterização do material;
- Rota de beneficiamento;
- Projeto da estrutura (pilha ou barragem);
- Seleção das amostras;
- Dados hidroquímicos;
- Resultados de ensaios ambientais;

Após análise dessas informações e elaboração de um modelo conceitual adequado para os propósitos da avaliação em curso, utilizamos estas para entrada no modelo numérico. A metodologia utilizada para a modelagem numérica hidrogeoquímica de drenagem de mina envolve o equilíbrio termodinâmico e cinética de reações. Um dos principais *software* utilizados no mundo que engloba esses dois aspectos é o PHREEQC. O software PHREEQC (versão 3; Parkhurst e Appelo, 2013) é um programa de computador desenvolvido para simular reações químicas e processos de transporte da fase aquosa, em experimentos de laboratório, processos industriais ou no meio ambiente. O programa é baseado na química do equilíbrio de soluções aquosas interagindo com minerais, gases, soluções sólidas, trocadores iônicos e superfícies de sorção, o que representa a sigla original — pH-Redox-Equilibrium-Chemical.

Para a simulação de pilhas e barragens, utiliza-se a cinética de reações, equilíbrio químico, transporte 1D e misturas de águas (quando aplicável). Além disso, são aplicados conceitos a respeito da saturação e difusão de gases nas estruturas. Esses são aspectos importantes a serem considerados, uma vez que atuam diretamente nas condições redox e estabilização química da estrutura.

A modelagem numérica geoquímica inicia-se com a calibração do modelo, em que são simuladas variáveis como grau de saturação, pressão parcial de gases e parâmetros de cinética de reação. O objetivo da calibração é verificar se o modelo apresentado superestima ou subestima as taxas das reações simuladas. Feito isso, o modelo calibrado pode ser utilizado para simulações de diferentes cenários assumindo diferentes premissas. O resultado dessas simulações, em conjunto com resultados de ensaios laboratoriais, deve ser aproveitado como premissas para nortear a decisão da estratégia de gerenciamento e tratamento de efluente.

Além desse aspecto, os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com o PHREEQC podem ser utilizados, mediante cálculos adicionais, para estimar o potencial de colmatagem química de drenos de fundo dessas estruturas. Essa estimativa é calculada a partir do número de mols de íons liberados na solução a partir das reações químicas simuladas. A depender das condições redox na saída do dreno de fundo, pode ocorrer precipitação de minerais que poderão ou não causar colmatagem dos drenos ao longo do tempo.

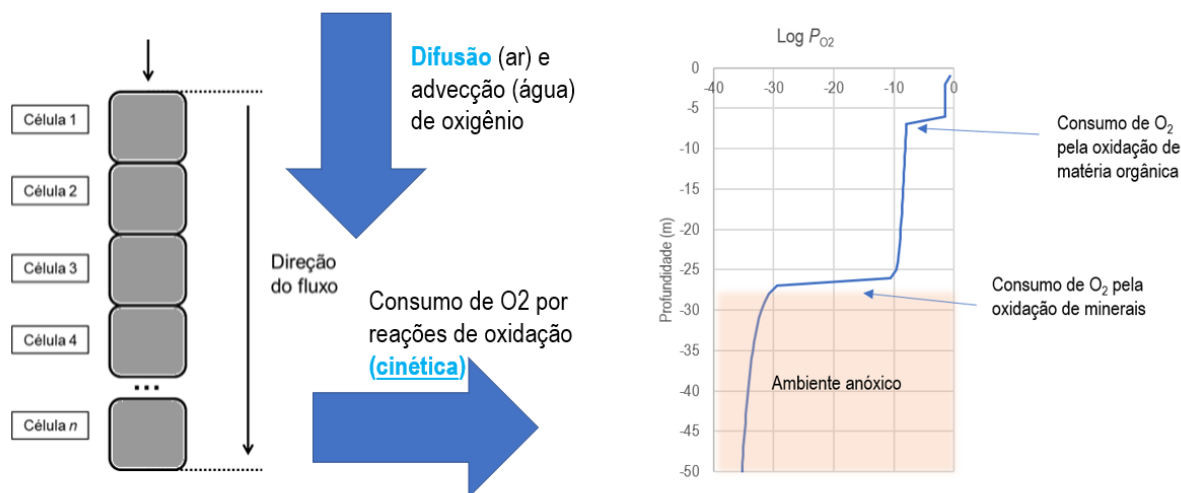
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 APLICABILIDADE DA MODELAGEM NUMÉRICA HIDROGEOQUÍMICA

A modelagem numérica hidrogeoquímica é uma ferramenta poderosa na avaliação da concentração dos efluentes gerados na mineração. Os ensaios ambientais realizados em laboratório, como por exemplo, ensaios estáticos e cinéticos e pelo método LEAF, que compreende as EPA 1313 (pH), 1314 (L/S), 1315 (transporte de massa – resíduo disposto a seco), 1316 (taxa diluição – sólidos em uma barragem) fornecem resultados de reações das amostras de rejeito e/ou estéril em diferentes cenários, simulando o comportamento destas em condições ambientais distintas. Entretanto, cada um destes ensaios possui sua limitação, pois não é possível considerar todos os aspectos ambientais em um único ensaio como evaporação, fator de escala na cinética de reações, pressão parcial dos gases, saturação do meio, condições redox, tempo de residência da água no meio, mescla com outras água e variações do nível d'água na estrutura (Maest e Nordstrom, 2017). Assim os resultados destes ensaios devem ser utilizados acoplados e com avaliação crítica de qual cenário foi simulado, por exemplo, em ensaios cinéticos se realizados em células úmidas a simulação tem mais afinidade com as amostras dispostas em lagos de barragens de rejeito, se foi realizado um teste de funil está mais associada a disposição com insaturação, como nas PDERs.

Os modelos numéricos podem incorporar todos esses aspectos os quais não são possíveis de serem simulados em laboratório. Um aspecto que vem se mostrando importante nos modelos é a questão da pressão parcial dos gases O_2 e CO_2 . Valores de pressão parcial de O_2 estão diretamente ligadas às condições redox da pilha ou barragem, controlando a oxidação de minerais sulfetados ou causando desestabilização em ambiente redutor de minerais considerados estáveis em condições atmosféricas. A pressão parcial de CO_2 varia sazonalmente, sendo controlada por fatores como umidade, porosidade, saturação do solo, quantidade de matéria orgânica no solo e respiração de micro-organismos. Mudanças na pressão parcial de CO_2 controlam principalmente a dissolução e precipitação de carbonatos e consequentemente no pH (Appelo e Postma, 2005). Entretanto, apesar de tal importância, esses parâmetros são difíceis de serem estimados. Dessa forma, foi desenvolvido um modelo de difusão de gases a partir de uma pilha real, com a finalidade de se ter uma melhor estimativa desses valores e aplicá-los aos modelos. O modelo de difusão de O_2 é mostrado na **Figura 1**.

Figura 1 Modelo de difusão de O₂ simulado a partir de uma pilha real.



Fonte: autores

Nesta figura, está exemplificado o modelo de transporte 1D no PHREEQC. O modelo de coluna 1D simula a pilha em questão, em que a célula 1 representa a camada mais superficial da pilha e as seguintes células representam a pilha em profundidade na direção do fluxo da água. O tamanho de cada célula no modelo é ajustado através do grau de saturação do meio, porosidade, velocidade do fluxo, tempo de residência da água no meio e altura real da pilha. Para o modelo de difusão de O₂ foi considerado a entrada desse gás a partir da difusão do ar e advecção da água.

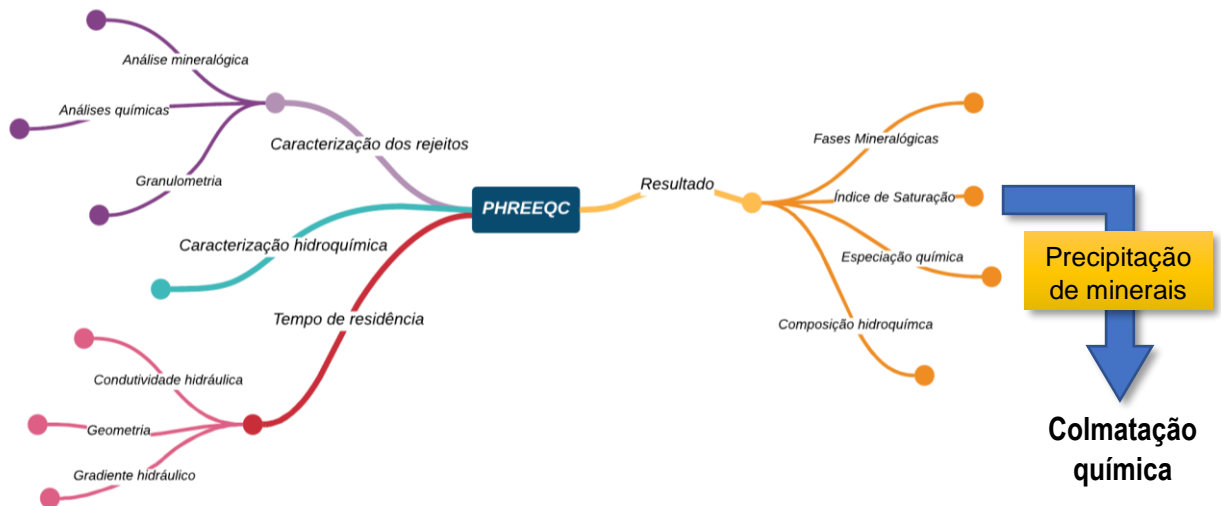
Para calcular até que profundidade o O₂ se difunde na pilha insaturada e estimar seu perfil de variação, foi desenvolvido um modelo de difusão no qual a geometria inserida corresponde apenas à nove células referentes à zona não saturada de uma pilha com profundidade de 50m. A mineralogia inserida nessa simulação foi simplificada, de modo que na primeira célula foi inserida a camada de solo com matéria orgânica e nas demais células apenas as concentrações e parâmetros utilizados para cinéticas de reação de sulfetos e carbonatos, visto que são os principais fatores de reguladores do O₂ na pilha. Como resultado do modelo de difusão, foi possível estimar o consumo do oxigênio pela primeira camada representada pela matéria orgânica, que cai de $p=10^{-0,68}$ (valores típicos de pressão atmosférica) para $p=10^{-1,53}$. Após este consumo, o O₂ diminui gradativamente à medida que vai sendo consumido pelos minerais sulfetados. Quando o O₂ atinge o nível saturado dentro da estrutura, ocorre uma brusca redução nos valores de P_{O₂}, visto que a difusão de gases em meio saturado é cerca de 4 ordens de magnitude menor que no ar. Esta baixa difusão dos gases no meio saturado estabelece um ambiente anóxico na base da estrutura simulada.

A partir da aplicação de todas essas variáveis no modelo, é possível se ter uma estimativa da composição do efluente que sai da estrutura. Assumindo algumas premissas, é possível modelar cenários futuros, estimando a composição química do efluente ao longo dos anos. Uma vez ao sair da estrutura, a solução encontra novas condições de pressão de gases. Essas novas condições podem acarretar na precipitação de novas fases minerais. Através do modelo numérico, é possível se estimar a quantidade desses minerais que podem vir a precipitar e causar colmatação

química dos drenos. Para o cálculo de colmatção são consideradas a geometria, porosidade e vazão do dreno.

A Fig. 2 a seguir mostra o fluxograma dos aspectos considerados para a realização da modelagem numérica e estimativa de colmatção química dos drenos.

Figura 2 Fluxograma dos passos da modelagem numérica.

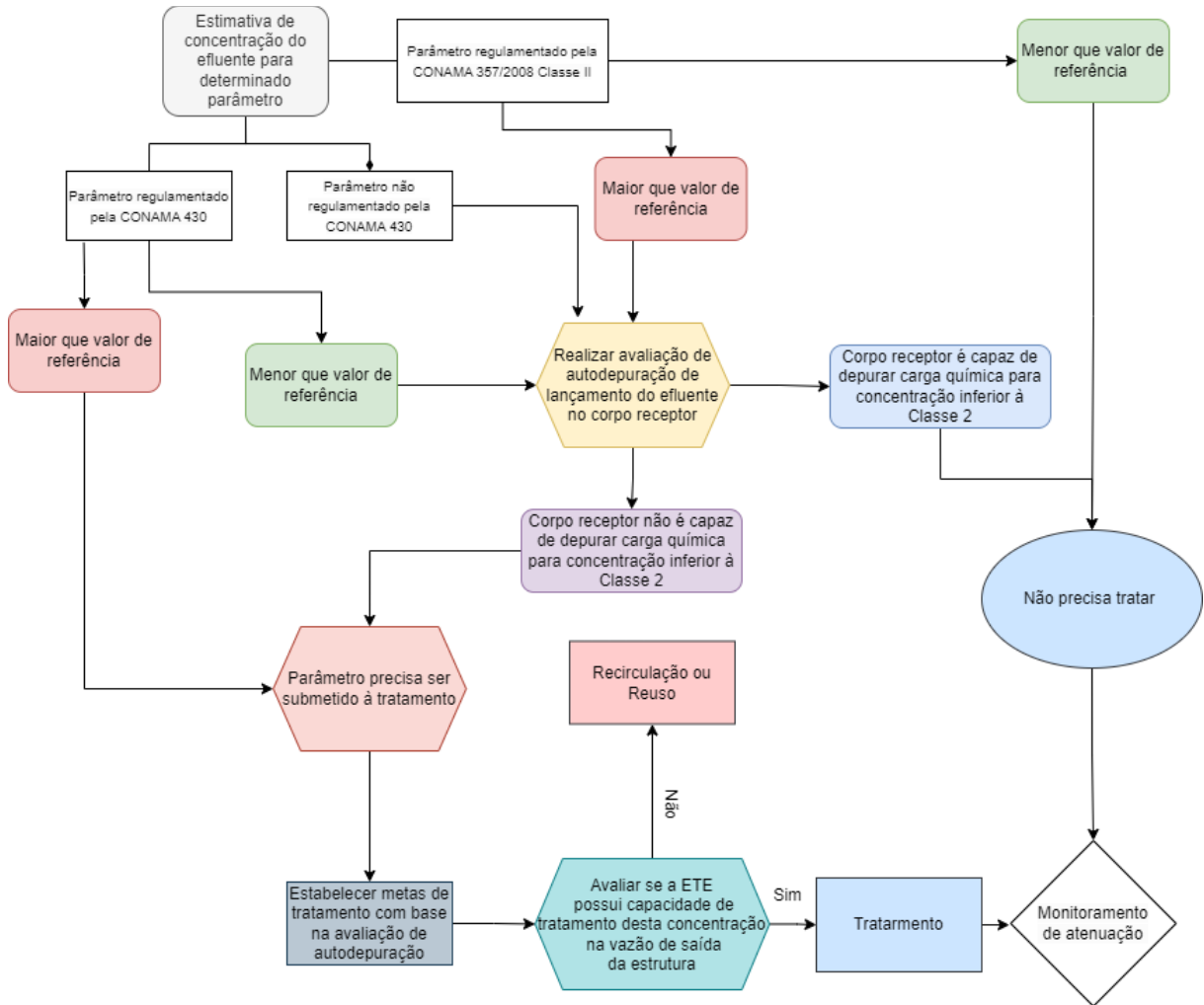


Fonte: autores

O excesso de efluente no processo industrial também é um dos grandes problemas em mineração. O efluente gerado pelo processo geralmente é lançado na barragem de rejeitos, o que muitas vezes reduz a capacidade de armazenamento da barragem e, por consequência, da própria mina. Este problema é intensificado com a Resolução ANM nº 13/2019 e a necessidade de descomissionamento das barragens, uma vez que sem a barragem esses efluentes precisam ser direcionados para drenagens superficiais e para tal precisam ter qualidade compatível com as regulamentações nacionais e estaduais. O atendimento dos valores normativos pode ocorrer de três formas: 1) inerente ao processo, ou seja, não há geração concentrações acima dos valores regulamentados para nenhum parâmetro, 2) o corpo de água superficial de destino tem capacidade de autodepurar as concentrações mais elevadas, 3) há necessidade de tratamento de efluente através de uma estação (ETE).

O resultado do modelo geoquímico pode ser utilizado para o manejo destes efluentes, visto que uma vez conhecida a vazão (oriunda de estudos de balanço hídrico) e a concentração, produto da modelagem, é possível traçar a melhor estratégia para lançamento e tratamento do efluente. A Figura 3 mostra o fluxograma simplificado da estratégia de manejo de efluentes uma vez que a concentração do parâmetro é conhecida.

Figura 3 Fluxograma de estratégia para manejo de efluentes após modelagem da concentração do parâmetro de interesse



Fonte: autores

3.2 LIMITAÇÕES DA MODELAGEM NUMÉRICA HIDROGEOQUÍMICA

Apesar de incorporar diversos aspectos os quais não são possíveis de simular em laboratório, a modelagem numérica hidrogeoquímica também possui limitações (Merkel e Planer-Friedrich, 2017). Apesar dos modelos numéricos buscarem representar sistemas complexos e heterogêneos, algum grau de simplificação é inevitável. Além disso, os bancos de dados termodinâmicos e cinéticos consideram em suas reações fases mineralógicas puras, o que dificilmente ocorre na natureza. Outro fator limitante relevante nos modelos é referente a qualidade e densidade dos dados de entrada e coletados em campo. Muitas vezes as informações geológicas, mineralógicas e a respeito da estrutura são limitadas, adicionando um grau de incerteza para o modelo.

Em suma, tanto os ensaios laboratoriais quanto os modelos numéricos possuem limitações. No entanto, a aplicação conjunta dessas duas ferramentas permite ter uma estimativa dos efluentes gerados na mineração, permitindo um melhor gerenciamento e direcionamento para tratamento.

4 CONCLUSÕES

Efluentes gerados na mineração podem ser grandes agentes poluidores de águas naturais superficiais e aquíferos. Além disso, comparado com outros países, o gerenciamento de efluentes de mineração no Brasil ainda é um desafio. Isso implica muitas vezes em gastos elevados com tratamento e danos ao meio ambiente. Através da combinação de ensaios laboratoriais e modelagem numérica hidrogeoquímica é possível se estimar a composição dos efluentes e suas variações em cenários futuros. Para uma boa qualidade do modelo e predição das composições são necessárias o entendimento de diversos fatores, como evaporação, fator de escala na cinética de reações, pressão parcial dos gases, saturação do meio, condições redox, tempo de residência da água no meio, mescla com outras água e variações do nível d'água na estrutura. Desta forma, o direcionamento para tratamento e melhor gerenciamento dos efluentes gerados na mineração se tornam facilitados, tendo consequências positivas tanto econômicas quanto ambientais.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos os seguintes profissionais por contribuições relevantes a este trabalho: Layane Silva, Maria Luiza Ramos, Maria Isabel Teodoro, Vinicius Cordeiro, Ana Caroline Trindade, Ruberlan Silva, Lorena Guimarães, Rogério Kwitko.

REFERÊNCIAS

APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. **Geochemistry, Groundwater and Pollution**. 2. ed. Amsterdam: A.A. Balkema Publisher, 2005.

MAEST, A.S.; NORDSTROM, D.K. **A geochemical examination of humidity cell tests**. *Applied Geochemistry*, vol. 81, 109-131, 2017.

MEND Manual. **Volume 3 – Prediction. MEND 5.4.2c**, Canadá, 2000.

MERKEL, B.J.; PLANER-FRIEDRICH, B. **Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems**. Editado por Darrell Kirk Nordstrom. Berlim: Springer Nature, 2017.

WOLKERSDORFER, Christian. **Mine Water Treatment – Active and Passive Methods**. Berlim: Springer Nature, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-65770-6>