

## **II-63 - AVALIAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DE MÉTODOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE MINERAÇÃO COM POTENCIAL DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA E INVESTIGAÇÃO DE POTENCIAIS FRAGILIDADES**

**Bruna Bastos N. Henrique<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental e Sanitarista pelo Centro Universitário UNA. Especialista em Mineração e Meio Ambiente pela Faculdade Única de Ipatinga. Mestranda em Meio Ambiente no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH/UFGM). Analista Ambiental Pleno na Arcadis.

**Eduardo Coutinho de Paula<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Químico pela Escola de Engenharia Mauá (EEM). Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH/UFGM). Professor na Escola de Engenharia da UFGM, no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) e docente permanente no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Manoel Eustáquio, 95, Casa – Santa Amélia – Belo Horizonte - MG - CEP: 31555-140 - Brasil - Tel: +55(31)99941-4897 - e-mail: [brunabastoos@hotmail.com](mailto:brunabastoos@hotmail.com)

### **RESUMO**

O desenvolvimento econômico de um país depende, em grande parte, de atividades industriais e de extração mineral. A mineração atua na fabricação de insumos para diversos fins, porém, como a maioria das atividades, causa impactos adversos ao meio ambiente, alterando o equilíbrio de biomas e ecossistemas. Um dos principais impactos advindo da mineração é a poluição das águas, podendo ser citado o fenômeno da Drenagem Ácida de Mina (DAM) como um dos maiores passivos ambientais provenientes das atividades de extração mineral. A DAM é formada, principalmente, a partir da lixiviação de metais em regiões de mineração de metais sulfetados, ricos em pirita. A ciência e o mercado oferecem três tipos principais de tratamento/remediação para a drenagem ácida: métodos passivos, ativos e biológicos, sendo que cada um oferece vantagens e desvantagens. O presente trabalho contou com uma seleção de estudos relativos aos métodos de tratamento de DAM, que posteriormente foram divididos em três séries temporais (décadas), para possibilitar a avaliação de quais alternativas foram pesquisadas desde o início da abordagem dessa temática, até próximo dos dias atuais. Além disso, foram identificados alguns aspectos importantes referentes aos principais critérios a serem considerados quando da escolha da metodologia de tratamento do efluente abordado, como o tipo de efluente e o tempo ao qual este será exposto ao tratamento. Foram identificadas, ainda, as principais vantagens e desvantagens de cada método. Por fim, foram apontadas lacunas nas pesquisas selecionadas, a exemplo da falta de caracterização dos efluentes estudados, da baixa aplicação de estudos em escala piloto e a baixa exploração de medidas de controle de geração de DAM ao invés de alternativas de mitigação. O estudo concluiu que não há caminho certo para a escolha, mas foi percebido que os métodos passivo e biológico obtêm certas vantagens diante dos tratamentos ativos, que demandam manutenção recorrente, além de favorecer a geração de subprodutos, como o lodo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Drenagem ácida de mina, Efluente de mineração, Minério sulfetado, Métodos de tratamento.

### **INTRODUÇÃO**

A mineração tornou-se fundamental para o desenvolvimento econômico de um país. As atividades minerárias auxiliam na produção de diversas fontes e bens de consumo, atuando na fabricação de insumos para inúmeros fins. Paralelamente, de acordo com Vieira (2011), os impactos da mineração podem atingir grandes proporções, em função da sua capacidade de modificar o ambiente em que se insere e da larga escala espacial utilizada para a implantação de ativos, incluindo estruturas e equipamentos operacionais, assim alterando o equilíbrio de biomas e ecossistemas.

Quanto à geração de impactos socioambientais, este tipo de atividade indica alto potencial de poluição de cursos d'água. Neste mesmo contexto, quanto à possibilidade de contaminação das águas, os empreendimentos minerários oferecem, ainda, o potencial de lixiviação de metais e drenagem ácida, proveniente de estruturas como, sem se limitar a, pilhas de estéril e barragens de rejeito (MILANEZ, 2017).

De maneira geral, a disponibilização de metais em altas concentrações favorece sua lixiviação. No caso de metais-traço, transferidos do resíduo para as águas subterrâneas e superficiais, a lixiviação poderá ser influenciada pelo pH e pelas características e propriedades do solo. Outras variáveis podem favorecer o processo de lixiviação, como a quantidade e a natureza da matéria orgânica e o potencial de oxirredução (CAMPOS, 2010). A mineração de metais sulfetados como ouro, cobre, níquel, carvão, chumbo, zinco e prata, está fortemente correlacionada à geração de drenagem ácida de mina (DAM), que ocorre mediante a exposição do material retirado do interior da terra à água e ao oxigênio atmosféricos (ANA e IBRAM, 2006).

Segundo Johnson e Hallberg (2005), algumas medidas podem ser aplicadas para inibir a formação da DAM, que são conhecidas como “controle de migração”, e são divididas entre tratamentos ativos e passivos. Os processos ativos funcionam a partir da neutralização e precipitação de metais pela aplicação de produtos alcalinos, enquanto os processos passivos criam ambientes de alagamento construídos em larga escala, a partir de materiais naturais.

Existem também os tratamentos biológicos, que, de acordo com Barros *et al.* (2012), obtém vantagem em função dos demais tipos de tratamento, pois apresentam bom custo-benefício. Sua viabilidade gira em torno da oxidação da matéria orgânica por bactérias redutoras de sulfato (YABUKI *et al.*, 2020), sendo essa uma das possibilidades de utilização do tratamento biológico.

As pesquisas científicas mais antigas encontradas para a temática dos tratamentos de DAM foram elaboradas no ano de 1969 e envolviam variações de métodos passivos a partir da neutralização da acidez. Entre as décadas de 1980 e 1990 começaram a surgir publicações voltadas para o tratamento biológico e ativo, surgindo ainda a combinação entre métodos passivos e biológicos. Como exemplo dessa união, Hammack, Edenborn e Dvorak (1994) desenvolveram em escala de laboratório um sistema de tratamento utilizando calcário e sulfeto biogênico em um reator e um biorreator, respectivamente, precedidos de uma etapa de adição de calcário para aumentar a alcalinidade do efluente.

O primeiro estudo identificado que efetivamente envolvia minas abandonadas e respectiva DAM remanescente foi realizado por Christensen, Laake e Lien (1996), também em escala da bancada. Essa pesquisa avaliou a atuação de bactérias redutoras de sulfato em cilindros compostos por um leito de areia e uma camada de brita. É muito importante que a temática de minas abandonadas e paralisadas seja levantada, visto que, conforme explorado por Matsumoto, Shimada e Sasaoka (2016), a principal fonte de contaminação proveniente da DAM é correlacionada às minas abandonadas.

Nos anos 2000, houve um aumento no número de pesquisas voltadas para os tratamentos biológicos. Em segundo lugar, estiveram os tratamentos passivos, e uma menor abrangência aos tratamentos ativos foi identificada. Nos anos seguintes, até 2023, o cenário não foi muito diferente, sendo mais comum a utilização de métodos biológicos e passivos. Essa realidade deve-se, principalmente, aos altos custos operacionais agregados aos métodos ativos.

## OBJETIVOS

Diante das problemáticas levantadas, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar comparativamente métodos de tratamento de efluentes de drenagem de mineração de metais sulfetados, estabelecendo, por meio de revisão de literatura, quais são os principais métodos e os mais aplicáveis às atividades minerárias e quais as principais vantagens e desvantagens de cada um, visando a redução de passivos ambientais a longo prazo.

Objetiva-se, ainda, identificar possíveis lacunas e/ou fragilidades nos estudos relacionados ao tratamento da DAM e quais são as principais características que devem ser avaliadas para determinar a escolha de um método.

## METODOLOGIA

Foram selecionados setenta e quatro artigos científicos para apreciação, em função de quais métodos de tratamento associado à DAM foram e vem sendo aplicados no contexto nacional e internacional, para balizar o presente estudo, e, a partir disso, aprofundar e implementar os objetivos principais deste em função daqueles métodos mais utilizados. Tais estudos serviram como base para discussão e detalhamento da temática a qual se propõe este estudo.

A busca por artigos foi realizada por meio de busca sistêmica no Portal de Periódicos Capes, a partir das palavras-chave em português: “tratamento drenagem ácida”, e em inglês “*acid mine drainage treatments*”. Dos setenta e quatro artigos levantados, oito foram pesquisados em escala nacional e sessenta e seis em escala internacional. Quanto às datas de publicação, a seleção se limitou ao período entre 1990 e 2010, uma vez que, para algumas análises, os estudos escolhidos foram separados em grupos temporais (décadas).

Foram utilizados alguns critérios para a seleção e/ou exclusão das pesquisas científicas para se obter a lista de estudos utilizados neste trabalho. Os requisitos mínimos adotados são listados abaixo:

- Tipo de minério extraído;
- Tipo de tecnologia de tratamento (passiva, ativa ou biológica);
- Descrição dos métodos adotados;
- Principais contaminantes presentes no efluente estudado.

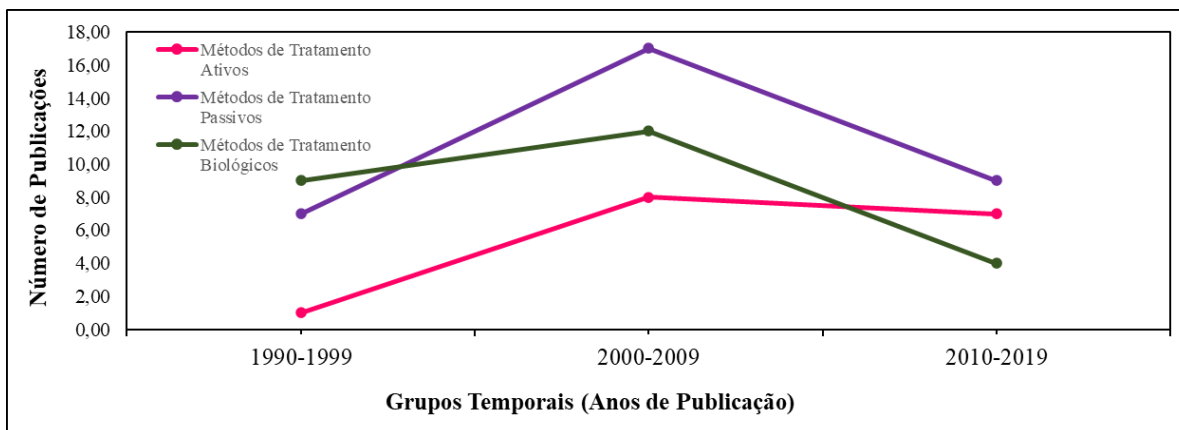
Após a etapa de escolha dos artigos, foi elaborado um gráfico com o intuito de agrupar em décadas (de 1990 a 2020) os estudos selecionados e fazer algumas associações, como a evolução do número de trabalhos nessa temática ao longo do tempo, além da relação grupo temporal x tipos de tratamento, a fim de se acompanhar a evolução da ciência na temática do tratamento de DAM. Um segundo gráfico foi desenhado para compreender a prevalência da escalada dos métodos adotados (bancada, piloto ou real).

De posse dos gráficos mencionados, foi realizada uma segunda análise, focada na identificação das razões pelas quais algum método prevalece como sendo a principal escolha ao longo do tempo em que foi analisado. Além disso, foram avaliadas algumas lacunas presentes nas pesquisas utilizadas como base no presente estudo. Outra análise foi realizada com base no segundo gráfico, relacionado às escalas de aplicação das pesquisas selecionadas.

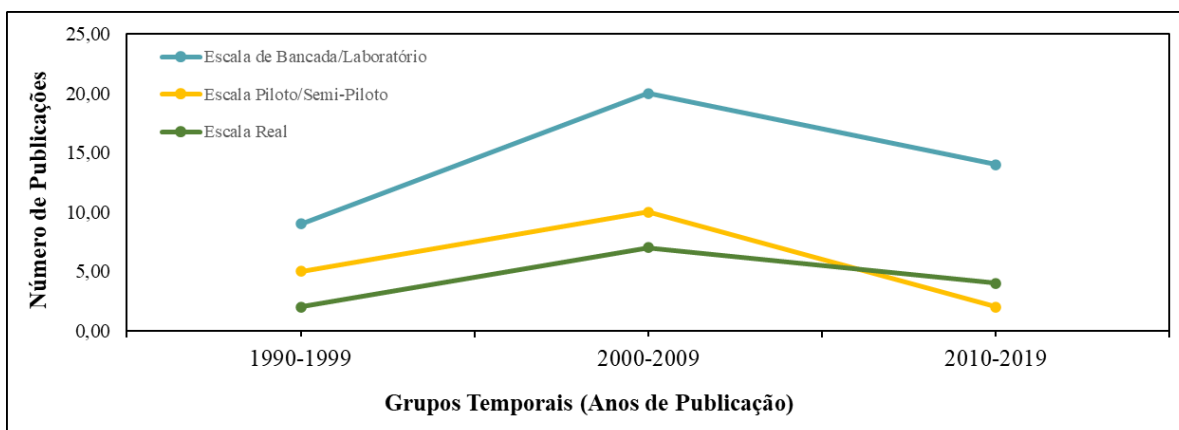
Todas as análises e avaliações levantadas permitiram que fosse realizada uma interpretação crítica de lacunas e ajudaram a formular diretrizes para a escolha de métodos de tratamento em escala real, num contexto também de minas abandonadas e paralisadas, buscando evitar que a DAM se torne um passivo ambiental sem solução por longos anos.

## RESULTADOS

A Figura 1 ilustra a quantidade de estudos realizados para cada tipo de tratamento de DAM (ativo, passivo e biológico), distribuídos em função dos grupos temporais que foram divididos (1990 – 1999, 2000 – 2009, 2010 – 2019), enquanto a Figura 2 representa a escala dos estudos selecionados (real, bancada/laboratório, piloto/semi-piloto) em função dos grupos temporais adotados.



**Figura 1: Relação entre os artigos selecionados por tipo de tratamento e os grupos temporais dos anos de publicação.**



**Figura 2: Relação entre os artigos selecionados por escala de aplicação do estudo e os grupos temporais dos anos de publicação.**

A avaliação dos estudos e dos gráficos permite a interpretação de quais métodos de tratamento de DAM foram mais empregados no período entre 1990 e 2019. Os tratamentos biológicos sobressaíram em relação aos demais no primeiro grupo (1990 - 1999), seguido dos métodos passivos. Os métodos ativos foram os menos utilizados nos dois primeiros grupos temporais (1990 -1999 e 2000 – 2009), superando os métodos biológicos no último grupo (2010 – 2019). Um ponto em comum observado tanto para os tratamentos biológicos, quanto para os passivos e ativos, é o fato de que a maior parte foi aplicada em escala de bancada/laboratório em todos os grupos temporais. A aplicação de métodos em escala piloto ou real foi crescente no segundo grupo temporal (2000 – 2009), reduzindo novamente no grupo seguinte (2010 – 2019).

A utilização de processos biológicos tem como princípio aproveitar a capacidade que os microrganismos possuem de imobilizar (precipitar) sulfetos metálicos e produzir alcalinidade, processo o qual reverte as reações responsáveis pela gênese da DAM. Desta maneira, torna-se possível a remoção de metais e sulfato e o respectivo aumento de pH, atingindo a neutralidade ou até a alcalinidade do efluente a partir da utilização de apenas um reator com bactérias redutoras de sulfato (BRS), que irão reduzir o sulfato a sulfeto de hidrogênio e a respectiva produção de precipitados estáveis (JOHNSON; HALLBERG; 2005; BEKMEZCI *et al.*, 2011; UCAR *et al.*, 2011). Apesar de processos biológicos de tratamento de DAM demandarem escala espacial (estação de tratamento), os estudos abordados garantem alto custo-benefício para essa metodologia.

Os métodos de tratamento ativos de DAM foram os menos presentes no conjunto de publicações selecionadas com base nos critérios prévios. Os métodos ativos são bastante difundidos e consistem na adição de reagentes químicos-neutralizantes (cal, carbonato de cálcio, hidróxido de sódio, dentre outros). Eles oferecem alto potencial de

remediação, no entanto, fornecem alto custo operacional e maior demanda por manutenção, além da geração de subprodutos (lodo) (JOHNSON; HALLBERG 2005). Tais fatores podem ter contribuído para a menor utilização de métodos ativos ao longo do período analisado. Além disso, na perspectiva de minas abandonadas e paralisadas, que são as grandes geradoras de DAM como passivo ambiental, os métodos ativos podem não ser interessantes, devido à alta necessidade de manutenção e do apoio de mão-de-obra constante.

A respeito dos tratamentos passivos, é perceptível que a utilização desta metodologia foi bem desenvolvida ao longo do período delimitado, por ser uma aplicação há muito consolidada. Os estudos mais antigos avaliados na presente pesquisa corroboram com esta informação, visto que no primeiro grupo temporal (1990 – 1999) os métodos de tratamento passivos estiveram à frente dos demais. De acordo com o que discutem Johnson e Hallberg (2005), o objetivo de sistemas de tratamento passivo é inserir agentes alcalinos no meio, por onde o efluente irá fluir (calhas de calcário e cascalho). A vantagem de utilizá-lo é a baixa necessidade de manutenção. Tais aplicações possuem a limitação de não se adequarem a todos os tipos de efluente de DAM, e eles podem demandar a utilização de outros métodos para redução das concentrações de oxigênio dissolvido do efluente. No entanto, é comum que estes sistemas precedam estações de tratamento convencionais, por exemplo, a fim de adicionar alcalinidade ao efluente.

Considerando a coleção de publicações avaliadas, observou-se que poucos abrangem a problemática já mencionada no presente estudo: qual a efetividade destes tratamentos a longo prazo? Respondendo a este questionamento, foi identificado que dos setenta e quatro artigos levantados, apenas nove ofereceram tratativas para longos períodos dessas metodologias. O estudo mais antigo, elaborado por Sobolewski (1996) retratou baixa efetividade ao tratamento de longo prazo. Dos dez estudos mencionados, somente dois abrangeram minas abandonadas e/ou paralisadas, como foi o caso de Hamilton *et al.* (1999) e Groudev *et al.* (2008), ambos com abordagem de utilização de sistemas de tratamento passivos. Os estudos mencionados, aplicados em minas paralisadas/abandonadas, foram projetos de pesquisa com maior duração de tempo, sendo 11 e 10 anos, respectivamente. Com isso, cria-se outro questionamento: quanto tempo é necessário para que a remoção de DAM seja concluída em uma determinada área?

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS:**

Diante do que foi anteriormente avaliado, é possível constatar dois pontos principais a serem avaliados para determinar qual tipo de tratamento será mais efetivo:

- Escala temporal em que o método será aplicado;
- O tipo de efluente (caracterização físico-química).

A delimitação da escala temporal será de extrema importância para selecionar um tratamento de DAM, visto que é necessário o entendimento de por quanto tempo o método irá perdurar: apenas ao longo da operação da mina, ou será mantido após o fechamento?

Para isso, recursos técnicos podem ser aplicados, como a modelagem geoquímica. De acordo com Klunk *et al.* (2015), é uma ferramenta que visa simplificar as reações diagenéticas existentes em ambientes deposicionais, considerando as características estratigráficas e petrográficas da área. Tal modelagem irá prever o comportamento de um determinado contaminante na área de estudo ao longo do tempo, assim facilitando o entendimento das melhores técnicas para tratamento do lixiviado. Tabelin *et al.* (2019) desenvolveram um estudo de modelagem de transporte reativo, que objetivou obter a previsão da formação de DAM a partir da migração de metais pesados em uma barragem de rejeitos de uma mina fechada, localizada em Hokkaido, no Japão. A referida mina possuía tratamento para neutralização desde 1970, e o estudo revelou que a DAM e a liberação de metais pesados poderiam persistir no local mesmo após mais de 40 anos de exposição, em função da presença de pirita e metais pesados em quantidades relevantes no rejeito disposto na barragem.

Em realidades próximas à mencionada, é necessária a identificação do melhor tratamento, caso a caso. Métodos de tratamentos ativos e biológico requerem maior atuação humana, visto que o primeiro necessita de manutenção constante tanto em função da aplicação dos insumos, quanto em relação à geração de subprodutos, conforme discutido anteriormente. Neste sentido, a escolha de uma dessas alternativas será limitada em função de perdurar somente ao longo da operação da mina. Para isso, é necessária a implementação de uma modelagem geoquímica e, como medida complementar, a utilização de recursos extras, como a opção de controle de origem (prevenção) da geração de DAM, para que os contaminantes cessem suas influências na qualidade de águas subterrâneas e superficiais antes do fim das atividades da mina.

Após avaliação da permanência de contaminantes na área em questão, o entendimento do tipo de efluente, que será determinado mediante monitoramento contínuo de variáveis físico-químicas da drenagem proveniente de estruturas com potencial de lixiviação de metais e drenagem ácida, irá proporcionar a escolha de qual caminho deverá ser seguido.

É importante salientar que não há regra, e que a escolha também irá depender de fatores externos, como o relevo, o clima, o tipo de minério, as características físico-químicas do efluente e da área, disponibilidade espacial para implantação, e, o fator mais importante do ponto de vista das empresas de mineração: o custo operacional e de manutenção.

## CONCLUSÕES

Muito se diz a respeito da DAM, seus impactos e consequências para o meio ambiente, e em relação aos tratamentos mais utilizados para mitigar estes danos. No entanto, para a maioria das metodologias, conforme estudos prévios identificados, os testes são realizados em escala de bancada e/ou piloto, limitando-se muitas vezes a simular sinteticamente o efluente em laboratório. Essa é uma das principais, senão a maior fragilidade identificada a partir do presente estudo, visando aplicações reais e de efetividade comprovada na mitigação da DAM enquanto passivo ambiental.

Ao longo da presente revisão de literatura, outra fragilidade observada nos estudos prévios foi que, poucos deles estiveram voltados para a identificação e delimitação dos principais poluentes que necessitam de neutralização. É amplamente mencionada a presença de sulfato e de metais como ferro e manganês, mas cada estudo indica um *rol* de parâmetros específico, sem relacionar com estudos e metodologias já consolidadas. Essa lacuna identificada influenciará negativamente na hora de delimitação dos métodos de tratamento.

Foi possível identificar que não há caminho certo em relação à determinação das rotas de tratamento. Existem diversos fatores que irão trilhar o melhor curso a ser seguido em relação à remediação a ser escolhida, tais como o tipo de efluente, o tempo em que se intende utilizar o tratamento (se há visão de curto ou longo prazo), e, o fator mais impactante: o custo-benefício.

Os métodos de tratamento biológicos, envolvendo reatores anaeróbios com bactérias redutoras de sulfato tem se mostrado promissores. É uma boa opção para as mineradoras, visto que poderá ser implementado em conjunto com outros processos já utilizados em escala real em estações de tratamento de efluentes comumente presentes em áreas de mineração.

Muitos estudos apresentam foco maior no controle de migração, e não na prevenção. Esse fato apresenta-se como mais uma lacuna a ser preenchida, visto que a aplicação de medidas de prevenção, em conjunto com as mitigadoras, poderá evitar que os contaminantes continuem ativos na área mesmo muitos anos após o fechamento da mina, portanto reduzindo impactos negativos da DAM sob os recursos hídricos, subterrâneos e superficiais.

Na seleção de estudos que compõem o presente trabalho, foi identificada prevalência de métodos de tratamento passivos e biológicos nos dois primeiros grupos temporais (1990 – 1999 e 2000 – 2009). No entanto, em se tratando de métodos a longo prazo, foi observada preferência por opções passivas, em vistas à menor necessidade de manutenção e de força humana. As alternativas biológicas e passivas mostraram-se interessantes, principalmente por poderem ser utilizadas em conjunto. Os métodos ativos são menos escolhidos por demandarem maior força humana para aplicação constante de insumos, maior necessidade de manutenção e, ainda, gera grande volume de lodo, que exige disposição correta, não sendo esta uma boa alternativa visando a longa permanência da DAM em minas de metais sulfetados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS; IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. 2006. A Gestão dos Recursos Hídricos e a Mineração. Brasília, DF. 2006.
2. BARROS C. A.; RODRIGUES, J. C.; BRITTO, G. M.; CUNHA, C. D.; RIZZO, A. C.; SOARES, P. S. M. Métodos para Tratamento Biológico de Drenagem Ácida de Mina-DAM. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, 39p. (Série Tecnologia Ambiental, 65), 2012.
3. BEKMEZCI, O. K., UCAR, D., KAKSONEN, A. H., & SAHINKAYA, E. (2011). Sulfidogenic biotreatment of synthetic acid mine drainage and sulfide oxidation in anaerobic baffled reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 189(3), 670–676, mai. 2011.
4. CAMPOS, M. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. *Ambiência*, Guarapuava (PR), v.6 n.3 p.547 – 565, set./dez. 2010.
5. CHRISTENSEN, B.; LAAKE, M.; LIEN, T. Treatment of acid mine water by sulfate-reducing bacteria; results from a bench scale experiment. *Water Research*, Volume 30, Issue 7, 1996, Pages 1617-1624.
6. GROUDEV, S.; GEORGIEV, P.; SPASOVA, I.; NICOLOVA, M. Bioremediation of acid mine drainage in a uranium deposit. *Hydrometallurgy*, volume 94, issues 1-4, november 2008, pages 93-99.
7. HAMILTON, Q. U. I.; LAMB, H.; HALLETT, C.; PROCTOR, J. Passive Treatment Systems for the Remediation of Acid Mine Drainage at Wheal Jane, Cornwall. *Water Environmental Journal*. Volume 13, 1 april 1999.
8. HAMMACK, R. W.; EDENBORN, H. M.; DVORAK, D. H. Treatment of water from an open-pit copper mine using biogenic sulfide and limestone: A feasibility study. *Water Research*, Volume 28, Issue 11, 1994, Pages 2321-2329.
9. JOHNSON, D. B.; HALLBERG, K. B. Acid Mine Drainage Remediation Options: A Review. *Science of the Total Environment*, v. 338, issues 1-2, pag. 2-14, feb. 2005.
10. KLUNK, M. A.; DAMIANI, L.; FELLER, G.; CONCEIÇÃO, R.; ABEL, M.; DE ROS, L. (2015) Geochemical modeling of diagenetic reactions in Snorre Field reservoir sandstones: a comparative study of computer codes. *Brazilian Journal of Geology*, n 45, ago. 2015.
11. MATSUMOTO, S.; SHIMADA, H.; SASAOKA, T. The Key Factor of Acid Mine Drainage (AMD) in the History of the Contribution of Mining Industry to the Prosperity of the United States and South Africa: A Review. *Natural Resources*, 7, 445-460 (2016).
12. MILANEZ, B. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. *Repositório do Conhecimento do IPEA (RCIPEA)*, boletim regional, urbano e ambiental, Brasília, n 16, p. 95 - 103, jan. - jun. 2017.
13. SABOLEWSKI, A. Metal species indicate the potential of constructed wetlands for long-term treatment of metal mine drainage. *Ecological Engineering*, Volume 6, Issue 4, 1996, Pages 259-271.
14. TABELIN, C.; SASAKI, A.; IGARASHI, T.; TOMIYAMA, S.; VILLACORTE-TABELIN, M.; ITO, M.; HIROYOSHI, N. Prediction of acid mine drainage formation and zinc migration in the tailings dam of a closed mine, and possible countermeasures. *MATEC Web Conf.* v. 268, 06003 (2019). Trabalho apresentado no 25º Simpósio Regional de Engenharia Química (RSCE 2018), Makati City, Philippines.
15. UCAR, D.; BEKMEZCI O. Z.; KAKSONEN, A. H., & SAHINKAYA, E. (2011). Sequential precipitation of Cu and Fe using a three-stage sulfidogenic fluidized-bed reactor system. *Minerals Engineering*, 24(11), 1100 – 1105, set. 2011.
16. VIEIRA, E. A. A (in)sustentabilidade da indústria da mineração no Brasil. *Estação Científica (UNIFAP)*, Macapá, v. 1, n. 2, p. 01-15, 2011.
17. YABUKI L. N. M.; NOGUEIRA, E. W.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z.; MENEGÁRIO, A. A.; GARCIA, M. L. Monitoramento e Remoção de Metais em um Reator Anaeróbio Aplicado ao Tratamento de Drenagem Ácida de Mina. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 14(4), p. 389-401, out. 2020.