

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

PRISCILA SANCHES RODRIGUES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA REMOÇÃO DE MANGANESE EM
DRENAGEM DE MINA**

São Paulo
2024

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA REMOÇÃO DE MANGANÊS EM
DRENAGEM DE MINA**

Versão corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*.

Orientadora: Professora Carolina Afonso Pinto

São Paulo
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação

Rodrigues, Priscila Sanches

Análise comparativa de métodos para remoção de manganês em drenagem de mina / P. S. Rodrigues -- São Paulo, 2024.

38 p.

Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Drenagem em minas 2.Manganês 3.Calha de calcário 4.Wetlands construídos 5.Precipitação química I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

RESUMO

RODRIGUES, Priscila Sanches. Análise Comparativa de Métodos para Remoção de Manganês Em Drenagem de Mina. 2024. 38 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

A mineração representa uma importante atividade econômica no Brasil. A extração e o processamento de minérios geram resíduos sólidos, e sua disposição em pilhas e barragens pode resultar na geração de drenagem ácida e na lixiviação de metais como o manganês. A degradação ambiental causada pela drenagem contaminada não tratada pode afetar corpos hídricos, o solo e aquíferos, causando impactos duradouros, inclusive após o fechamento da mina e o encerramento da atividade de extração e processamento de minérios. A DAM, quando não tratada e contida, é um grave problema ambiental. Este trabalho visou apresentar e comparar quatro tecnologias de tratamento passivas e ativas (calhas de calcário, *wetlands*, precipitação química e filtração adsorptiva), visando a remoção de manganês e o atendimento da legislação vigente para lançamento de efluentes em corpo hídrico. Por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, foram identificados e analisados estudos para o tratamento de DAM e remoção de manganês, seguindo um protocolo de buscas pré-determinado, com critérios definidos de inclusão e exclusão, com o objetivo de sintetizar as informações relevantes disponíveis sobre o tema. A partir das análises de refinamento dos resultados por palavras-chave, título e resumo/abstract, foram selecionados 5 estudos que foram comparados e avaliados neste levantamento bibliográfico. Com exceção à calha de calcário, todos os estudos apontaram que os métodos de tratamento apresentaram eficiência na remoção de manganês a níveis que garantiram o atendimento da legislação. Todos os estudos avaliados consideraram a escala de bancada, sendo os experimentos desenvolvidos em laboratório, indicando que há potencial para o estudo da escalabilidade dos tratamentos avaliados. Foi possível identificar que o tratamento de drenagem ácida para remoção de manganês tem sido tópico frequente de diversos estudos no Brasil, devido à preocupação com o tema, porém foram encontradas lacunas de conhecimento que destacam a importância contínua de pesquisas adicionais.

Palavras-chave: DRENAGEM EM MINAS. MANGANÊS. CALHA DE CALCÁRIO. WETLANDS CONSTRUÍDOS. PRECIPITAÇÃO QUÍMICA.

ABSTRACT

RODRIGUES, Priscila Sanches. Comparative Analysis of Methods for Manganese Removal in Mine Drainage. 2024. 38 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Mining represents an important economic activity in Brazil. The extraction and processing of ores generate solid waste, and their disposal in piles and dams can result in the generation of acid drainage and the leaching of metals such as manganese. Environmental degradation caused by untreated contaminated drainage can affect water bodies, soil and aquifers, causing lasting impacts, including after the closure of the mine and the end of mineral extraction and processing activities. Acid mine drainage (AMD), when not treated and contained, is a serious environmental problem. This work aimed to present and compare four passive and active treatment technologies (open limestone channels, constructed wetlands, chemical precipitation, and adsorptive filtration), aiming to remove manganese and comply with current legislation for the discharge of effluents into water bodies. Through a systematic bibliographic review, studies for the treatment of AMD and manganese removal were identified and analysed, following a pre-determined search protocol, with defined inclusion and exclusion criteria, with the aim of synthesizing the relevant information available on the theme. From the analysis of refining the results by keywords, title and summary/abstract, 5 studies were selected that were compared and evaluated in this bibliographic survey. Except for the open limestone channels, all studies showed that the treatment methods were efficient in removing manganese at levels that ensured compliance with legislation. All studies evaluated considered the bench scale, with the experiments carried out in the laboratory, indicating that there is potential for studying the scalability of the evaluated treatments. It was possible to identify that acid drainage treatment to remove manganese has been a frequent topic of several studies in Brazil, due to concern about the topic, however knowledge gaps were found that highlight the continued importance of additional research.

Keywords: DRAINAGE IN MINES. MANGANESE. OPEN LIMESTONE CHANNELS. BUILT WETLANDS. CHEMICAL PRECIPITATION.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	JUSTIFICATIVA.....	3
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4.1	Drenagem Ácida de Minas.....	4
4.2	Tecnologias aplicadas ao tratamento de DAM	8
5	METODOLOGIA	12
5.1	Questão de pesquisa.....	12
5.2	Pesquisa e revisão bibliográfica.....	13
5.2.1	Palavras-Chave de Busca	13
5.2.2	Critérios de Inclusão e Exclusão.....	13
5.2.3	Mecanismos de Busca	14
5.3	Síntese das informações.....	14
6	RESULTADOS E DISCUSÕES.....	15
6.1	Primeira etapa do levantamento bibliográfico	15
6.2	Refinamento dos resultados	16
6.3	Síntese das informações dos estudos selecionados	21
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a atividade de mineração está ligada ao desenvolvimento social e econômico, principalmente devido a contribuição na geração de empregos diretos e indiretos, sendo esta, uma importante atividade industrial no país (REZENDE, 2016). Por outro lado, a exploração de recursos minerais também gera diversos impactos socioambientais negativos, que vão desde o uso intensivo de recursos hídricos e energéticos para a extração, beneficiamento e transporte dos minérios, desmatamento das áreas do entorno da mina, remoção de solo fértil para extração mineral, poluição atmosférica, contaminação do solo, até a poluição de águas superficiais e subterrâneas, dentre muitos outros (MILANEZ, 2017). Os impactos nas águas subterrâneas e superficiais podem acontecer durante as várias fases de implantação de um empreendimento de mineração, desde o início das operações até após o fechamento da mina.

Em se tratando de águas subterrâneas, o avanço de cavas de minas subterrâneas e a céu aberto exige o rebaixamento do lençol freático por meio de bombeamento para permitir acesso ao minério. Este rebaixamento pode acarretar a redução do volume de água disponível em poços da região, além de afetar também os fluxos subterrâneos que alimentam corpos d'água superficiais. Após o encerramento das operações da mina, o bombeamento para rebaixamento usualmente é encerrado, resultando no contato da água com as paredes expostas da cava, em túneis e em fraturas de rochas, onde pode haver lixiviação de poluentes e carreamento para corpos hídricos próximos, além da contaminação de aquíferos (ELAW, 2010). Quanto à poluição de águas superficiais, pode-se citar o aumento de sólidos suspensos e turbidez nos corpos hídricos do entorno de minas, devido ao carreamento de sólidos causado pelo remanejamento de rochas para extração mineral e das constantes movimentações de terra (BONUMÁ; GASTALDINI; PAIVA, 2008).

Durante a fase de operação de um empreendimento de mineração para produção de substâncias metálicas, há a extração de minérios seguida pelo seu beneficiamento, que consiste em um conjunto de etapas com o objetivo de aumentar a concentração de minerais da rocha extraída. Ao mesmo tempo em que ocorre a extração, há a produção de estéril: um material que apresenta pouco ou nenhum valor econômico. Este material não passa por beneficiamento, e é depositado em pilhas. As operações de beneficiamento produzem um volume considerável de resíduos sólidos de fina granulometria. Estes resíduos sólidos, chamados de rejeitos, assim como o estéril, possuem baixo ou nenhum valor econômico, sendo usualmente depositados em barragens ou bacias para sua contenção. A percolação de água pluvial tanto nas barragens de rejeito, quanto nas pilhas de estéril, quando na presença de minerais de sulfeto e oxigênio, pode

resultar em um dos principais agentes para a degradação da qualidade de águas superficiais e subterrâneas, a DAM - drenagem ácida de mina (DO VALE, 2014). Essa drenagem (DAM) consiste em uma solução aquosa que apresenta pH baixo e concentrações elevadas de diversos metais, dentre eles o manganês. A DAM pode ser formada através da lixiviação de minerais presentes não só no estéril ou no rejeito, mas também em paredes de cava, galerias de minas subterrâneas e pilhas de estoque de minério (CAMPANER; LUIZ-SILVA, 2009).

O manganês é um elemento químico que pertence ao grupo dos metais de transição e é identificado pelo símbolo Mn na tabela periódica. Este elemento é o 12º mais abundante na crosta terrestre. No Brasil, este minério é extraído principalmente nos estados do Pará, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. O manganês atualmente é o quarto metal mais utilizado no mundo, sendo amplamente utilizado para a produção de ligas metálicas desde meados do século XIX no setor siderúrgico. Este composto também é empregado na fabricação de pilhas e baterias, fertilizantes e pigmentos (AFONSO, 2020). Além de sua importância econômica, o manganês desempenha um papel importante no ponto de vista biológico, pois participa de diversos processos metabólicos. No entanto, a exposição excessiva ao manganês pode ser tóxica e levar a problemas de saúde, incluindo danos pulmonares e neurológicos (QUEIROZ et al., 2021).

Devido à alta capacidade de lixiviação dos elementos presentes no minério e nas demais áreas da mina, a DAM representa um grave problema ambiental com impactos imediatos e de longa duração no meio ambiente. A degradação ambiental causada pela drenagem contaminada não tratada pode afetar corpos hídricos e o solo, causando impactos duradouros inclusive após o fechamento da mina, devido às características estacionárias das pilhas de estéril e das barragens de rejeitos. A contaminação no solo ocorre de forma localizada, nas regiões próximas a fonte de drenagem ácida na mina, porém, a água contaminada pode percorrer longas distâncias e impactar tanto o ecossistema aquático quanto atividades humanas, tornando a água imprópria para consumo devido às concentrações de metais dissolvidos.

Tendo em vista as características tão danosas da drenagem contaminada de mina, o presente trabalho visou estudar algumas das técnicas de controle e tratamento atualmente empregadas no país para remoção de metais da DAM, com foco na remoção de manganês, garantindo níveis aceitáveis para seu lançamento de acordo com a legislação ambiental vigente.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral analisar as técnicas atualmente empregadas para o tratamento de drenagens contaminadas com manganês, produzidas em áreas de mineração.

Os objetivos específicos incluíram:

- Elaborar uma revisão da literatura disponível sobre geração de drenagem contaminada em áreas de mineração;
- Desenvolver um panorama das técnicas atualmente utilizadas para o tratamento e suas escalas de aplicabilidade;
- Desenvolver uma avaliação crítica das vantagens e desvantagens de cada técnica de tratamento;
- Realizar uma comparação entre as diferentes técnicas de tratamento.

3 JUSTIFICATIVA

A mineração representa uma importante atividade econômica no Brasil. A extração e o processamento de minérios geram resíduos sólidos, e sua disposição em pilhas e barragens pode resultar na geração de drenagem ácida e na lixiviação de metais como o manganês.

A degradação ambiental causada pela drenagem contaminada não tratada pode afetar corpos hídricos, o solo e aquíferos, causando impactos duradouros, inclusive após o fechamento da mina e o encerramento da atividade de extração e processamento de minérios. A DAM, quando não tratada e contida, é um grave problema ambiental com impactos imediatos e de longa duração no meio ambiente.

Com isso, este trabalho visou apresentar e comparar técnicas de tratamento atualmente empregadas para o tratamento de drenagem ácida contaminada com manganês, visando o atendimento da legislação vigente para lançamento de efluentes em corpo hídrico.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Drenagem Ácida de Minas

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2022), substâncias da classe dos metais (alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco) representaram 89% da produção mineral brasileira no ano de 2021. As operações de lavra e processamento destes minerais resulta na produção de uma quantidade significativa de resíduos sólidos conhecidos como estéreis e rejeitos.

Borma e Soares (2002) descrevem estéreis como materiais de camadas de cobertura, camadas intermediárias, ou que circundam o mineral de interesse, que são extraídos durante o processo de lavra. Como estes não apresentam valor comercial, são dispostos em pilhas. Devido à granulometria variada, alta porosidade e ausência de compactação do estéril, há facilidade da penetração de oxigênio e águas pluviais nessas pilhas. A Figura 1 exibe uma fotografia de uma pilha de estéril, onde é possível visualizar as várias camadas de material empilhado.

Figura 1 – Foto de uma Pilha de estéril



Fonte: Geoestrutural (2024).

Borma e Soares também descrevem que os rejeitos são resíduos resultantes da mineração que possuem granulometria mais uniforme e geralmente de menor dimensão que os estéreis, sendo dispostos em áreas confinadas, como barragens ou bacias, com estruturas de contenção. Neste caso também há interação do rejeito com águas pluviais nas barragens. No caso de haver a presença de minerais de sulfeto nestes resíduos sólidos, o contato com água

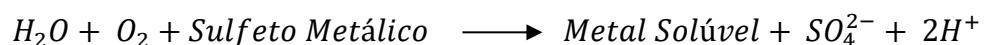
pluvial e oxigênio pode resultar na geração de drenagem ácida de minas (DAM). A Figura 2 exibe uma barragem de rejeitos.

Figura 2 – Foto de uma Barragem de Rejeitos



Fonte: Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2021).

Trindade, Soares e Rizzo (2004) citam que, de forma genérica, a geração de DAM pode ser representada por:

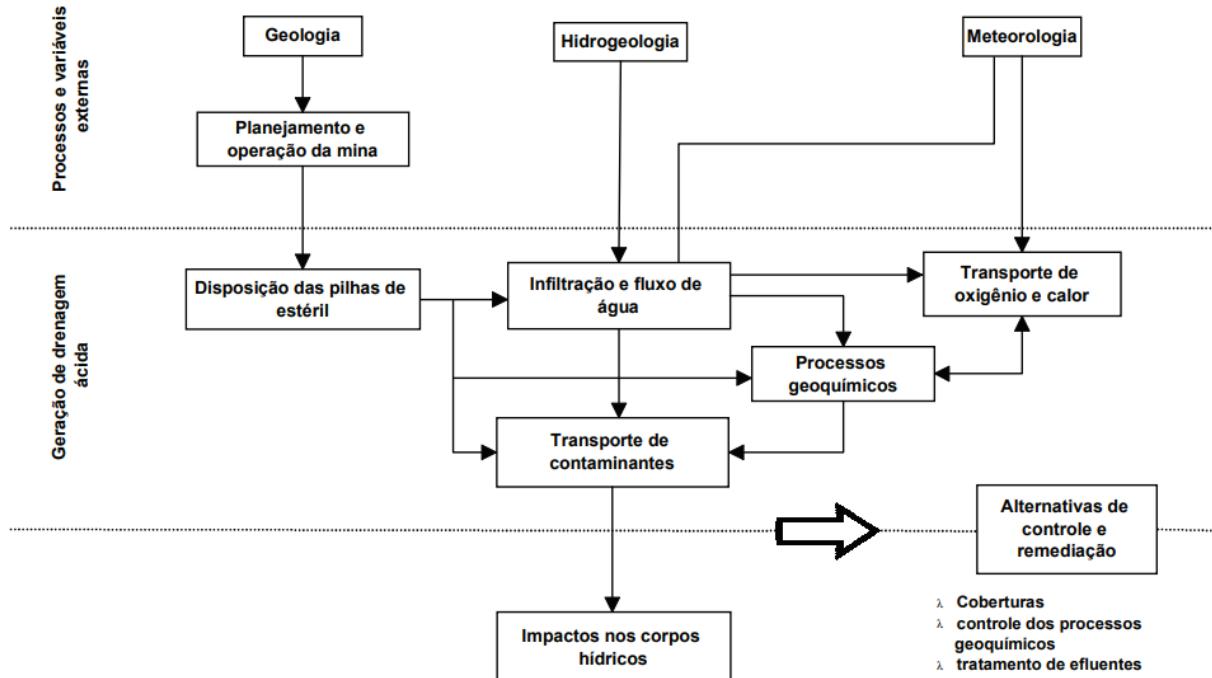


Hutchinson e Ellison (1992) definem que, além da presença de água, oxigênio e sulfeto, são necessárias três condições, simultaneamente, para a ocorrência de DAM:

- O resíduo sólido apresenta teores de sulfetos em quantidade suficiente para geração de ácido em volume e velocidade maiores do que o meio naturalmente consegue neutralizar;
- As propriedades físicas dos resíduos permitem a infiltração de água e oxigênio em quantidade suficiente para promover a ocorrência de reações químicas e biológicas;
- O clima é úmido o bastante para que a água da chuva se infiltre e percole através do resíduo e as condições do meio físico resultam no transporte de drenagem ácida para meio ambiente.

A Figura 3 apresenta um diagrama que resume as condições e as interações necessárias para geração de drenagem ácida na mineração.

Figura 3 – Processos associados à geração de drenagens ácidas



Fonte: Borma e Soares (2002).

Tem-se, portanto, que a DAM é gerada quando há condições geológicas, hidrogeológicas e meteorológicas específicas. No Brasil, a ocorrência de drenagem ácida tem sido relatada principalmente nas operações de extração de ouro, carvão, cobre, zinco e urânio (BORMA; SOARES, 2002).

Na drenagem ácida, é comum a presença de ácido sulfúrico, altos teores de metais dissolvidos, como ferro e manganês, além de pHs inferiores à 3,5. Porém, devido às condições específicas para formação de DAM, os aspectos químicos desta drenagem gerada também são particulares, variando de acordo com as características do depósito mineral que a originou e a região natural da qual essa se insere, podendo haver grande variação de concentração e espécies de contaminantes encontrados (MELLO; DUARTE; LADEIRA, 2014).

As Figura 4 e Figura 5, exibidas na página a seguir, contém exemplos de drenagem ácida. Na primeira figura, é possível visualizar a solução aquosa alaranjada percorrendo superficialmente o solo. Já na segunda figura, a DAM há atingiu o corpo hídrico superficial causando alteração em sua coloração.

Figura 4 – Drenagem ácida



Fonte: Ecodebate (2020).

Figura 5 – Drenagem ácida contaminando um corpo hídrico superficial



Fonte: Hidroplan (2022).

O manganês (Mn) é o 12º elemento mais abundante na superfície da terra, com alta ocorrência natural, podendo ser encontrado em diversos estados de oxidação: sua forma mais comum, Mn⁺², um elemento solúvel, e Mn⁺⁴, insolúvel quando oxidado. O manganês ocorre naturalmente em solos e sedimentos, no entanto, atividades de mineração têm aumentado a presença deste metal no solo e águas superficiais (LEÃO et al., 2019). No organismo humano, pesquisas recentes indicam que altas concentrações de manganês podem comprometer o sistema nervoso central, causando doenças neurodegenerativas, como Parkinson e Alzheimer (QUEIROZ et al., 2021). A drenagem ácida de mina pode produzir efluentes ricos em manganês, usualmente com a presença também de ferro.

No Brasil, o limite de manganês presente em corpos hídricos de classe 2 (águas que podem ser utilizadas para abastecimento humano) é estabelecido pela Resolução CONAMA n°357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. A concentração máxima estipulada por esta legislação é de 0,1 mg/L de manganês total em águas doces de classe 2. Para águas subterrâneas, a presença de manganês acima de 400 µg/L é considerada acima do valor de investigação, sendo este calculado com base no risco à saúde humana, de acordo com a Resolução CONAMA n°420/2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Em se tratando de lançamento de efluentes contendo manganês, a Resolução CONAMA n°430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, define que o padrão para lançamento de efluentes em corpo hídrico superficial deve conter no máximo 1 mg/L de manganês dissolvido (CONAMA, 2005, 2009 e 2011).

No caso de DAM contaminada com manganês, para garantir o atendimento da legislação brasileira vigente, é necessário o tratamento até o valor máximo permitido de 1 mg/L de Mn dissolvido antes de seu lançamento em corpo hídrico superficial. De acordo com a Resolução CONAMA n°430/2011, também é necessária a adequação do pH para a faixa de 5,0 a 9,0.

4.2 Tecnologias aplicadas ao tratamento de DAM

Os métodos utilizados para o tratamento de DAM envolvem a neutralização da acidez e a precipitação e imobilização dos contaminantes dissolvidos. Os sistemas de tratamento podem ser passivos ou ativos. São definidos como tratamentos ativos aqueles que fazem uso de energia mecânica para a mistura do efluente com reagentes neutralizantes. Os sistemas passivos

consistem na passagem do efluente em dispositivos estacionários (como canais e drenos) com agentes neutralizantes que promovem o tratamento (BORMA; SOARES, 2002). Um exemplo de forma ativa de tratamento é uma estação de tratamento de efluentes com bombeamentos e tanques dotados de agitadores. Exemplos da forma passiva de tratamento incluem drenos de calcário e áreas alagadas construídas.

No presente trabalho, propôs-se a avaliação e comparação de quatro técnicas de tratamento de DAM para remoção de manganês:

- Leitos de calcário (tratamento passivo);
- *Wetlands* construídos (tratamento passivo);
- Precipitação química (tratamento ativo);
- Filtração adsorptiva (tratamento ativo).

Leitos de calcário, também conhecidos como canais abertos de calcário, são canais de drenagem revestidos com uma camada de pedra calcária. A interação do efluente com pH ácido e o calcário promove a redução da acidez e consequente neutralização do mesmo. Além da neutralização da DAM, as calhas de calcário podem promover a precipitação de metais presentes no efluente na forma de hidróxidos insolúveis (MELLO; DUARTE; LADEIRA, 2014). A Figura 6 contém um exemplo de canal aberto de calcário, onde é exibida a canalização construída, revestida de pedras calcárias.

Figura 6 – Canal aberto de calcário



Fonte: Mine Closure (2014).

Wetlands construídos podem ser do tipo aeróbios (que promovem a oxidação, hidrólise e precipitação dos metais) ou anaeróbios (que promovem a redução de sulfatos, precipitação de sulfetos metálicos) (TRINDADE; SOARES, 2004). No caso das *wetlands* aeróbios, tem-se o plantio superficial de vegetação sobre sedimentos impermeáveis. Já as *wetlands* do tipo anaeróbias, o plantio é feito em profundidade, em solos permeáveis. Mello, Duarte e Ladeira (2014) citam que em ambos os tipos de *wetlands* construídos para o tratamento de DAM, há a retirada de metais pesados pelas macrófitas e tamponamento da acidez. A Figura 7 exibe uma foto de um sistema de *wetlands* para tratamento passivo de drenagem superficial e dreno de fundo de pilha de estéril.

Figura 7 – *Wetland* construído

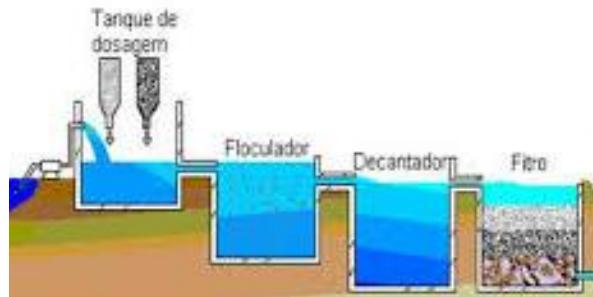


Fonte: Wetlands Construídos (2023).

A precipitação química é um método de tratamento ativo que consiste na adição de reagentes oxidantes para a precipitação de metais presentes na drenagem ácida. Santos (2010) cita o uso de permanganato de potássio e peróxido de hidrogênio para esta finalidade. Queiroz (2013) cita ainda a possibilidade do uso de oxigênio, ozônio e hipoclorito de sódio para oxidação de manganês. A Figura 8 exibe um desenho esquemático de um tratamento por

precipitação química, com as etapas de dosagem de químicos, floculação e decantação, seguida de filtração.

Figura 8 – Esquemático de um tratamento por precipitação química



Fonte: Pelissari (2006).

A adsorção consiste na transferência de massa da fase líquida para a superfície da fase sólida. Para o tratamento da DAM contaminada com manganês, podem ser utilizados neste processo carvão ativado e zeólitas, como indicam os estudos de Trindade, Soares e Rizzo (2004) e de Lima (2019). A Figura 9 contém uma fotografia de um sistema de filtração por zeólitas, exibindo dois vasos pressurizados em fibra de vidro.

Figura 9 – Sistema de filtração por zeólitas



Fonte: CEA do Brasil (2023).

Os quatro métodos de tratamento exibidos acima serão comparados no presente trabalho com base nos critérios que serão apresentados na seção Metodologia, de forma a avaliar suas aplicações, as diferentes escalas de aplicabilidade envolvidas, as eficiências atingidas, áreas requeridas para implantação do tratamento, e seus custos em geral.

5 METODOLOGIA

No presente trabalho, desenvolveu-se uma análise da literatura de forma a avaliar e comparar os quatro métodos de tratamento de drenagem ácida citados na seção 4.2. Por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, foram identificados e analisados estudos para o tratamento de DAM e remoção de manganês, seguindo um protocolo de buscas pré-determinado, com critérios definidos de inclusão e exclusão, com o objetivo de sintetizar as informações relevantes disponíveis sobre o tema, além de resumir e sintetizar o conhecimento existente de forma sistemática e transparente.

O processo de uma revisão bibliográfica sistemática usualmente envolve as seguintes etapas:

- Formulação da pergunta de pesquisa;
- Busca sistemática e abrangente por estudos relevantes em diferentes bases de dados;
- Triagem dos estudos com base em critérios pré-estabelecidos e extração de dados;
- Síntese das informações encontradas nos estudos selecionados.

A revisão bibliográfica sistemática permitirá uma análise abrangente e imparcial da literatura existente sobre as quatro técnicas de tratamento de DAM e remoção de manganês selecionadas neste estudo, fornecendo uma visão geral dos estudos disponíveis, identificando tendências e possíveis lacunas de conhecimento na área.

5.1 Questão de pesquisa

De forma abrangente, a questão de pesquisa nessa revisão bibliográfica sistemática busca compreender qual das técnicas avaliadas para tratamento para remoção de manganês em drenagem ácida de mina apresenta o melhor custo-benefício. O objetivo deste estudo foi investigar as diferentes aplicações de cada técnica, suas diferentes escalas de aplicabilidade e eficiências atingidas, dentre outros pontos, de forma a fornecer uma síntese dos principais achados.

5.2 Pesquisa e revisão bibliográfica

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica seguindo os critérios definidos nos itens a seguir.

5.2.1 *Palavras-Chave de Busca*

Foram definidos 4 grupos de palavras-chave, um para cada técnica de tratamento analisada, a partir das quais será realizada a pesquisa bibliográfica deste presente trabalho. A pesquisa consistirá na busca por artigos científicos em ferramentas de busca especializadas, encontrados pela combinação das palavras-chave definidas, exibidas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Palavras-chave de busca

Grupos	Palavras-chave no título ou resumo
Grupo 1 – Leitos de calcário	Tratamento passivo, drenagem ácida de mina, DAM, manganês, calcário, brita calcária, calha de calcário, canal aberto de calcário
Grupo 2 - Wetlands	Tratamento passivo, drenagem ácida de mina, DAM, manganês, wetlands, macrófitas, áreas alagadas, bioassorção, fitoremediação
Grupo 3 – Precipitação química	Tratamento ativo, drenagem ácida de mina, DAM, manganês, neutralização, precipitação, oxidação
Grupo 4 – Filtração adsortiva	Tratamento ativo, drenagem ácida de mina, DAM, manganês, zeólicas, adsorção, filtração

5.2.2 *Critérios de Inclusão e Exclusão*

Foram incluídos nesta revisão, resultados da pesquisa:

- Estudos completos publicados em revistas ou conferências;
- Estudos teóricos e práticos relacionados a área da mineração e tratamento de drenagem ácida;
- Estudos publicados no período de 2013 a 2023;
- Estudos na língua portuguesa;
- Estudos de métodos de tratamento de DAM aplicados em território brasileiro.

Foram excluídos desta revisão resultados da pesquisa que:

- Estudos que não estejam claramente relacionados à área de mineração ou a remoção de manganês;
- Estudos que não são relacionados diretamente à questão de pesquisa;
- Artigos duplicados encontrados em mais de uma fonte de pesquisa;
- Mesmo estudo publicado em diferentes fontes;
- Estudo publicado antes do período especificado;
- Tutoriais, relatórios técnicos, teses, dissertações e relatórios de workshops que sejam incompletos;
- Estudos não disponíveis para *download* ou de acesso restrito nos mecanismos de busca definidos.

5.2.3 Mecanismos de Busca

- Bases de dados acadêmicas, como Google Acadêmico, Periódicos CAPES e SciELO, que sintetizam conteúdo de teses, dissertações, atas de conferências e eventos, dentre outros materiais acadêmicos relevantes.

5.3 Síntese das informações

Os estudos e artigos encontrados durante a revisão bibliográfica foram avaliados, e suas principais informações relevantes quanto à questão de pesquisa foram sintetizadas e organizadas em forma de uma tabela comparativa, com o objetivo de fornecer uma visão geral dos estudos incluídos, conforme capítulo a seguir.

6 RESULTADOS E DISCUSÕES

6.1 Primeira etapa do levantamento bibliográfico

Na primeira etapa do levantamento bibliográfico, foram utilizadas combinações das palavras-chave exibidas na Tabela 5.1 de forma a filtrar os estudos disponíveis em cada uma das plataformas de pesquisa, para selecionar e filtrar os estudos a serem incluídos na revisão.

A Tabela 6.1 exibe o número de estudos encontrados a partir de cada combinação de palavras-chave, por banco de dados consultados.

Tabela 6.1 – Número de estudos encontrados com cada combinação de palavras-chave utilizadas

Grupo de pesquisa	Palavra-chave	Google Acadêmico	Periódicos CAPES	SciELO
Geral	Drenagem ácida	2.130	140	35
	drenagem ácida; manganês	877	9	1
Grupo 1 - Leitos de calcário	drenagem ácida; manganês; calcário	292	0	0
	drenagem ácida; manganês; calcário; tratamento passivo	41	0	0
	drenagem ácida; manganês; tratamento passivo; calha de calcário	0	0	0
	drenagem ácida; manganês; canal aberto de calcário	3	0	0
	drenagem ácida; manganês; wetlands	106	0	0
Grupo 2 - Wetlands	drenagem ácida; manganês; bioassorção; wetlands	20	0	0
	drenagem ácida; manganês; bioassorção; fitoremedeiação; wetlands	7	0	0
	drenagem ácida; manganês; tratamento passivo; wetlands	25	0	0
	drenagem ácida; manganês; tratamento passivo; wetlands; macrófitas	6	0	0
	drenagem ácida; manganês; precipitação	634	1	0
Grupo 3 – Precipitação química	drenagem ácida; manganês; precipitação; oxidação	526	0	0
	drenagem ácida; manganês; precipitação; oxidação; neutralização	242	0	0

Grupo de pesquisa	Palavra-chave	Google Acadêmico	Periódicos CAPES	SciELO
	drenagem ácida; manganês; precipitação; oxidação; neutralização, tratamento ativo	48	0	0
Grupo 4 – Filtração adsorptiva	drenagem ácida; manganês; filtração	309	0	0
	drenagem ácida; manganês; filtração; zeólitas	73	0	0
	drenagem ácida; manganês; filtração; zeólitas; tratamento ativo	10	0	0

A partir dos resultados obtidos na primeira etapa do levantamento bibliográfico, pode-se perceber que dentre as três ferramentas de pesquisa, o Google acadêmico foi a que mais apresentou resultados sobre o tema em geral da pesquisa (drenagem ácida), e também do tema específico (tratamento de manganês). No Google Acadêmico, os termos foram pesquisados com a adição de aspas para busca exata dos termos de interesse. Sem adição de aspas, esta ferramenta de busca procura pelas palavras individualmente, e pode retornar altas quantidades de resultados que não necessariamente estão relacionados ao tema de pesquisa.

Dentre os 140 resultados encontrados no Portal de Periódicos da CAPES sobre drenagem ácida, apenas 9 tem como tópico o manganês. No caso dos resultados encontrados para o portal SciELO, apenas 35 tratam sobre DAM, e destes há um único resultado com a palavra-chave manganês. Pode-se inferir inicialmente por estes resultados que o Google Acadêmico tem acesso a uma variedade maior de artigos, livros e trabalhos que os demais portais. Também pode-se inferir que, dentre os estudos disponibilizados por meio do Periódicos da CAPES e o portal SciELO, estes não abordam as técnicas de tratamento que são o foco do presente estudo.

6.2 Refinamento dos resultados

Devido a grande quantidade de estudos obtidos através do Google Acadêmico, optou-se por avaliar preliminarmente os resultados pelos Títulos dos trabalhos. A combinação de palavras-chave que resultou em títulos considerados mais aderentes ao tema desta pesquisa são exibidas em verde na Tabela 6.1. Para cada grupo de palavras-chave em verde da Tabela 6.1, foram avaliados os Títulos dos 15 resultados mais relevantes (de acordo com os critérios do Google Scholar de exibição de resultados), de forma a selecionar os estudos que tratam especificamente da remoção de manganês utilizando as quatro tecnologias de tratamento escolhidas (calhas de calcário, *wetlands*, precipitação química e filtração adsorptiva).

A Tabela 6.2 exibe os títulos dos resultados mais relevantes da primeira etapa do levantamento bibliográfico e a avaliação preliminar de acordo com a aderência quanto ao tema desta pesquisa. Com isso, são exibidos em verde os títulos considerados aderentes ao tema do presente trabalho.

Tabela 6.2 – Refinamento dos resultados considerando os Títulos dos artigos

Grupo de pesquisa	Nº	Título	Avaliação Preliminar
Grupo 1 - Leitos de calcário (palavras-chave: drenagem ácida; manganês; canal aberto de calcário)	1	<i>Proposta de um sistema passivo para o tratamento da drenagem ácida de mina gerada no depósito de rejeitos de Capão da Roça, Charqueadas/RS, Copelmi mineração Ltda</i>	Aderente ao tema
	2	<i>Uso de canais abertos de calcário para o tratamento de drenagem ácida de minas: uma revisão da literatura</i>	Aderente ao tema
	3	<i>Microalgas na remediação de drenagem ácida de minas: potenciais e processos integrados</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
Grupo 2 – Wetlands (palavras-chave: drenagem ácida; manganês; tratamento passivo; wetlands; macrófitas)	1	<i>Wetland de fluxo vertical com diferentes tipos de meio suporte para o tratamento da drenagem ácida de mina</i>	Aderente ao tema
	2	<i>Absorção de metais pesados por macrófitas em unidades Wetlands</i>	Aderente ao tema
	3	<i>Fitorremediação de efluentes da exploração do carvão: pode a macrófita <i>Eleocharis acutangula</i> (RoxbScult) (Cyperaceae) ser considerada uma espécie hiperacumuladora de metais pesados?</i>	Aderente ao tema
	4	<i>Avaliação da eficiência de projetos de reabilitação ambiental de áreas mineiras abandonadas: o caso da área mineira de Covas</i>	Não aderente por não ter foco no tratamento de manganês
	5	<i>Avaliação da eficiência química e ecotoxicológica da utilização de fitorremediação no tratamento de efluentes da Mina Neves Corvo</i>	Não aderente por não ter foco no tratamento de manganês
	6	<i>Hidroquímica e qualidade da água em sistemas afetados por contaminação mineira-propostas de medidas de monitorização e remediação ambiental</i>	Não aderente por não ter foco no tratamento de manganês

Grupo de pesquisa	Nº	Título	Avaliação Preliminar
Grupo 3 – Precipitação química (palavras-chave: drenagem ácida; manganês; precipitação; oxidação; neutralização, tratamento ativo)	1	<i>Tratamento de drenagem ácida de minas por neutralização/precipitação-efeito do pH, agente neutralizante e tratamento complementar por biossorção</i>	Aderente ao tema
	2	<i>Remoção de metais da drenagem ácida de minas por precipitação química e por troca iônica com zeólita NaP1</i>	Aderente ao tema
	3	<i>Avaliação da eficiência de barreiras geoquímicas utilizando HDL no tratamento de drenagem ácida de mina sintética</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	4	<i>Proposta de um sistema passivo para o tratamento da drenagem ácida de mina gerada no depósito de rejeitos de Capão da Roça, Charqueadas/RS, Copelmi mineração Ltda</i>	Já avaliado no Grupo 1
	5	<i>Wetland de fluxo vertical com diferentes tipos de meio suporte para o tratamento da drenagem ácida de mina</i>	Já avaliado no Grupo 2
	6	<i>Balanço de massa e de energia do tratamento de drenagem ácida de mineração da Mina São Geraldo, Siderópolis, SC</i>	Não aderente por não ter foco no tratamento de manganês
	7	<i>Produção De Pigmentos (Goetita, Hematitae Magnetita) Por Precipitação Seletiva Do Ferro Presente Em Drenagem Ácida De Minas Da Mineração De Carvão</i>	Não aderente por não ter foco no tratamento de manganês
	8	<i>Processo oxidativo avançado com ozônio de efluentes contaminados por manganês e outros metais pesados originados na drenagem ácida em mina de urânio</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	9	<i>Tratamento oxidativo em águas residuais da mineração de urânio com oxidação avançada de ozônio</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	10	<i>Estudo do potencial das conchas de moluscos para o tratamento da drenagem ácida de mineração de carvão</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	11	<i>Tratamento de Água Subterrânea Contaminada Proveniente dum Aterro de Deposição de Cinzas de Carvão</i>	Não aderente por não ser aplicado em território brasileiro
	12	<i>Uso de canais abertos de calcário para o tratamento de drenagem ácida de minas: uma revisão da literatura</i>	Já avaliado no Grupo 1
	13	<i>Microalgas na remediação de drenagem ácida de minas: potenciais e processos integrados</i>	Já avaliado no Grupo 1
	14	<i>Recuperação ambiental de ecossistemas aquáticos em regiões estuarinas: estudos aplicados para o tratamento e disposição de sedimentos contaminados pela drenagem ácida de mina na bacia hidrográfica do Rio Urussanga/SC</i>	Não aderente por não ter foco no tratamento de manganês
	15	<i>Estudo preliminar do uso de um processo eletroquímico para o tratamento de água contaminada por drenagem ácida de mina de carvão</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo

Grupo de pesquisa	Nº	Título	Avaliação Preliminar
Grupo 4 – Filtração adsorptiva (palavras-chave: drenagem ácida; manganês; filtração; zeólitas; tratamento ativo)	1	<i>Remoção de metais da drenagem ácida de minas por precipitação química e por troca iônica com zeólita NaP1</i>	Já avaliado no Grupo 3
	2	<i>Avaliação da eficiência de barreiras geoquímicas utilizando HDL no tratamento de drenagem ácida de mina sintética</i>	Já avaliado no Grupo 3
	3	<i>Estudo preliminar do uso de um processo eletroquímico para o tratamento de água contaminada por drenagem ácida de mina de carvão</i>	Já avaliado no Grupo 3
	4	<i>Utilização de geopolímero à base de cinza da casca de arroz e resíduo cerâmico para redução da acidez, remoção de Fe e Mn e da toxicidade em drenagem ácida de mina</i>	Aderente ao tema
	5	<i>Avaliação do potencial de geração de bioeletricidade e redução do sulfato com o uso de células combustíveis microbianas (CCM) alimentadas com drenagem ácida de mina (DAM)</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	6	<i>Potencial do reator anaeróbio de leito fixo-estruturado e fluxo descendente para o tratamento de drenagem ácida de minas em co-digestão com vinhaça</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	7	<i>Imobilização física de resíduo proveniente do tratamento de águas ácidas de uma instalação de mineração de urânio</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	8	<i>Separação via flotação por ar dissolvido de microalgas (<i>Scenedesmus sp.</i>) cultivadas em uma água residuária da mineração de carvão</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	9	<i>Óxidos de metais de transição aplicados como catalisadores da ozonização de efluente simulado de refinaria de petróleo</i>	Não aderente por abordar de uma técnica de tratamento diferente das técnicas foco deste estudo
	10	<i>Uso de biocarvão de casca de eucalipto e de bagaço de cana na Remediação de drenagem ácida de mina: simulação de barreira Reativa em escala de laboratório</i>	Aderente ao tema

Com a análise dos títulos, dos 37 artigos e trabalhos levantados na primeira etapa do levantamento bibliográfico, apenas 9 foram considerados aderentes ao tema da pesquisa (exibidos em verde na Tabela 6.2), considerando o manganês e as técnicas de tratamento.

Estes 9 estudos foram avaliados considerando seus Resumos/Abstracts de forma a selecionar finalmente os que foram incluídos na etapa de síntese de informações da presente revisão bibliográfica. A Tabela 6.3 exibe o refinamento considerando a avaliação dos Resumos/Abstracts.

Tabela 6.3 – Refinamento dos resultados considerando os Resumos/Abstracts

Grupo de pesquisa	Nº	Título	Avaliação Final
Grupo 1 - Leitos de calcário (palavras-chave: drenagem ácida; manganês; canal aberto de calcário)	1	<i>Proposta de um sistema passivo para o tratamento da drenagem ácida de mina gerada no depósito de rejeitos de Capão da Roça, Charqueadas/RS, Copelmi mineração Ltda</i>	Incluído na etapa de síntese de informações
	2	<i>Uso de canais abertos de calcário para o tratamento de drenagem ácida de minas: uma revisão da literatura</i>	Não incluído por avaliar estudos que são aplicados em territórios não brasileiros
Grupo 2 – Wetlands (palavras-chave: drenagem ácida; manganês; tratamento passivo; wetlands; macrófitas)	1	<i>Wetland de fluxo vertical com diferentes tipos de meio suporte para o tratamento da drenagem ácida de mina</i>	Incluído na etapa de síntese de informações
	2	<i>Absorção de metais pesados por macrófitas em unidades Wetlands</i>	Não incluído por focar na absorção de metais nas macrófitas, e não na qualidade do efluente tratado
	3	<i>Fitorremediação de efluentes da exploração do carvão: pode a macrófita Eleocharis acutangula (Roxb Scult) (Cyperaceae) ser considerada uma espécie hiperacumuladora de metais pesados?</i>	Não incluído por não ter como foco específico a remoção de manganês
Grupo 3 – Precipitação química (palavras-chave: drenagem ácida; manganês; precipitação; oxidação; neutralização, tratamento ativo)	1	<i>Tratamento de drenagem ácida de minas por neutralização/precipitação-efeito do pH, agente neutralizante e tratamento complementar por biossorção</i>	Incluído na etapa de síntese de informações
	2	<i>Remoção de metais da drenagem ácida de minas por precipitação química e por troca iônica com zeólita NaP1</i>	Incluído na etapa de síntese de informações
Grupo 4 – Filtração adsorptiva (palavras-chave: drenagem ácida; manganês; filtração; zeólitas; tratamento ativo)	4	<i>Utilização de geopolímero à base de cinza da casca de arroz e resíduo cerâmico para redução da acidez, remoção de Fe e Mn e da toxicidade em drenagem ácida de mina</i>	Incluído na etapa de síntese de informações
	10	<i>Uso de biocarvão de casca de eucalipto e de bagaço de cana na Remediação de drenagem ácida de mina: simulação de barreira Reativa em escala de laboratório</i>	Não incluído por não ter como foco específico a remoção de manganês

6.3 Síntese das informações dos estudos selecionados

A partir das análises de refinamento dos resultados por palavra-chave, Título e Resumo/Abstract, foram obtidos um total de 5 estudos que serão comparados e avaliados nesta revisão bibliográfica sistemática. Estes são exibidos na Tabela 6.4 com um pequeno resumo dos principais pontos abordados em cada um deles.

Tabela 6.4 – Lista de estudos selecionados

Nº	Título	Ano e Autor	Principais pontos abordados no estudo
1-1	<i>Proposta de um sistema passivo para o tratamento da drenagem ácida de mina gerada no depósito de rejeitos de Capão da Roça, Charqueadas/RS, Copelmi mineração Ltda</i>	SEGREDO, 2014	Dimensionamento conceitual de um sistema passivo de tratamento de DAM situado no município de Charqueadas composto por canal aberto de calcário, com base em dados de monitoramento do efluente gerado.
2-1	<i>Wetland de fluxo vertical com diferentes tipos de meio suporte para o tratamento da drenagem ácida de mina</i>	SILVA, 2023	Comparação da eficiência um sistema passivo de tratamento de DAM considerando três meios de suporte diferentes para o crescimento da macrófita <i>Typha angustifolia</i> (taboa).
3-1	<i>Tratamento de drenagem ácida de minas por neutralização/precipitação-efeito do pH, agente neutralizante e tratamento complementar por bioassorção</i>	SANTOS, 2020	Avaliação da eficiência de tratamento da DAM por neutralização/precipitação considerando diferentes valores de pH e agentes neutralizantes, seguida por etapa de polimento do efluente em lagoa de maturação com algas.
3-2	<i>Remoção de metais da drenagem ácida de minas por precipitação química e por troca iônica com zeólita NaP1</i>	HORN, 2015	Avaliação da eficiência de tratamento da DAM por neutralização/precipitação, seguida por etapa de polimento do efluente por troca iônica.
4-1	<i>Utilização de geopolímero à base de cinza da casca de arroz e resíduo cerâmico para redução da acidez, remoção de Fe e Mn e da toxicidade em drenagem ácida de mina</i>	DE BRIDA, 2022	Avaliação da eficiência de tratamento da DAM por meio da adsorção em geopolímero.

A partir da Tabela 6.4, percebeu-se que, para os grupos 2 (Wetlands), 3 (Precipitação química) e 4 (Filtração adsorptiva), os estudos selecionados envolveram experimentos em laboratório para a verificação da eficiência de remoção de metais e do aumento do pH. No caso do estudo avaliado no grupo 1 (calhas de calcário), há o dimensionamento teórico da unidade de tratamento, porém sem experimentos para verificar a eficiência do tratamento.

Os estudos 3-1 e 3-2, inicialmente categorizados no grupo 3, possuem etapas de polimento após a precipitação química por meio de bioassorção e troca iônica, respectivamente, sendo também pertinentes para os grupos 2 e 4.

Os estudos selecionados foram avaliados com relação às características do efluente bruto, configuração do sistema de tratamento e de suas escalas de aplicabilidade. A Tabela 6.5 exibe as informações coletadas de forma resumida.

Tabela 6.5 – Comparação dos efluentes brutos e dos sistemas de tratamento de cada estudo.

Nº	Características do Efluente Bruto	Configuração do sistema estudado	Escala de aplicabilidade
1-1	pH 2,3 Fe 302,7 mg/L Al 5,7 mg/L Cr 0,012 mg/L Zn 0,5 mg/L Mn 4,99 mg/L Sulfato 2.082 mg/L Ca 423 mg/L Mg 37 mg/L Dureza 956 mg CaCO ₃ /L Condutividade 2.975 µS/cm Dados do monitoramento do efluente real da mina na área de Capão da Roça (RS)	Canal aberto de calcário (dolomita) com 47 m de comprimento, 1 m de profundidade, largura de 2,5 m. Declividade de 10%. Tempo de detenção de 1h para a vazão de 1.000 L/min.	Estudo teórico de dimensionamento
2-1	Concentrações da Fase 1: pH 4,0 Cu 2 mg/L Zn 1 mg/L Mn 4,5 mg/L Fe 2 mg/L Sulfato 150 mg/L As fases 2, 3 e 4 consideraram, respectivamente, 2x, 3x e 4x as concentrações da fase 1. Efluente sintético de drenagem ácida de mina.	<i>Wetland</i> construído de fluxo vertical utilizando a macrófita <i>Thypha angustifolia</i> considerando três meios de suporte diferentes (brita calcária, resíduos da indústria de celulose e resíduo da construção civil), com aumento da concentração do efluente de alimentação.	Escala de laboratório
3-1	pH 2,33 Zn 62,65 mg/L Fe 611,38 mg/L Mn 37,98 mg/L Pb 0,41 mg/L Al 269,37 mg/L As 0,85 mg/L Sulfato 7.410 mg/L Condutividade 7.790 µS/cm Amostras de DAM coletadas no município de Figueira (PR)	Neutralização do efluente para precipitação dos metais em dois pH diferentes (7 e 8,7), utilizando NaOH e Ca(OH) ₂ , sedimentação por 1 h e filtração do clarificado. Polimento do clarificado com microalgas pelo período de contato de 10 dias, seguido por filtração.	Escala de laboratório

Nº	Características do Efluente Bruto	Configuração do sistema estudado	Escala de aplicabilidade
3-2	pH 2,0 Fe 1.476 mg/L Al 286 mg/L Mn 45,1 mg/L Zn 17,4 mg/L Sulfato 12.891 mg/L Condutividade 7.500 µS/cm Amostras de DAM coletadas no município de Forquilha (SC)	Neutralização do efluente para precipitação dos metais em uma larga faixa de pH (4 à 12), utilizando NaOH e Ca(OH) ₂ , sedimentação por 24h seguida por filtração do clarificado. Polimento do clarificado com zeólitas por 30 min em agitação, seguido separação por centrifugação por 5 min.	Escala de laboratório
4-1	pH 2,2 Fe 1.208 mg/L Mn 16,65 mg/L Amostras de DAM coletadas na região carbonífera do Sul de SC	Adsorção de metais através de dosagem de geopolímero à base de resíduo cerâmico e cinza da casca de arroz em diferentes concentrações, com agitação constante. Tempo de contato para adsorção variando de 14 min até 24 h. Separação para obtenção do efluente final por centrifugação.	Escala de laboratório

Dentre os estudos avaliados, considerando os grupos de técnicas de tratamento passivo (calha de calcário e *Wetlands*), verificou-se que as concentrações observadas de manganês no efluente bruto variam em torno de 4,5 e 4,99 mg/L. Já nos estudos que envolvem tratamento ativo (precipitação e adsorção), tem-se DAM brutas com concentrações expressivamente mais altas de Mn, variando de 16,65 até 45,1 mg/L. Este fator pode estar ligado à limitação dos tratamentos passivos quanto a sua eficiência observada em geral, por se tratar de medidas mais simples, de menor custo e menor controle operacional para o tratamento de DAM quando em comparação aos métodos ativos de tratamento.

O pH do efluente bruto variou entre 2,0 até 4,0, característico das drenagens ácidas. Além das altas concentrações de metais, muitos dos estudos também apresentaram valores elevados de Sulfato, e condutividade, indicando a presença alta de sólidos dissolvidos na DAM.

O estudo 1-1 teve cunho apenas teórico, não compreendendo também etapa de execução de experimentos em laboratório. Os demais estudos foram desenvolvidos em escala de bancada, utilizando DAM coletada ou efluente sintético imitando as características de DAM contidas em literatura. A maioria dos ensaios em escala de laboratório utilizou efluentes coletados da região Sul do país, devido à mineração predominantemente de carvão na região. Este tipo de mineração apresenta alta capacidade de geração de DAM.

Os tratamentos ativos dos estudos 3-1 e 3-2 utilizaram técnicas complementares para polimento visando a remoção de metais e atendimento à legislação vigente para lançamento de efluentes.

A Tabela 6.6 exibe uma comparação entre as características dos efluentes tratados considerando as configurações ótimas recomendadas pelos estudos avaliados, e a verificação do atendimento à legislação vigente para lançamento de efluentes em corpos hídricos (Resolução CONAMA nº 430/11). Também foi verificado se os autores forneceram estimativas de custos e de áreas requeridas para os tratamentos propostos.

Tabela 6.6 – Comparação dos efluentes tratados e dos custos dos sistemas de tratamento

Nº	Características do Efluente Tratado	Configuração ótima recomendada pelo estudo	Estimativa de custos e área de implantação
1-1	<p>Por se tratar de um dimensionamento teórico, não foram obtidos resultados de efluentes tratados.</p> <p>O estudo recomenda, porém, a instalação de tratamento complementar a calha de calcário, de forma a enquadrar o efluente final na legislação, com base em dados de literatura que apontam baixas eficiências para remoção de Fe e Mn para este tipo de tratamento.</p>	<p>Não há comparação entre diferentes configurações da calha calcária, porém o autor recomenda utilização de pedras calcárias com diâmetro médio de 10 cm para resistirem ao arraste causado pelo fluxo da água, e devido ao poder de dissolução e neutralização. Tempo de contato com o calcário de 1h.</p>	<p>O autor não apresenta os custos estimados para aquisição do material calcário (338,6 ton de dolomita), nem para a execução da obra (canal com 1m de profundidade, 2,5 m de largura e comprimento de 47m).</p> <p>O autor não apresenta estimativa de área de implantação requerida.</p>
2-1	<p>Considerando a configuração ótima, faixas de remoção de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 86% - 97% para Zn 77% - 97% para Fe 84% - 99% para Mn. <p>Enquadramento na legislação de lançamento de efluentes de 100% dos ensaios para o pH, 54,5% para cobre e 95,6% para manganês.</p>	<p>O <i>wetland</i> construído com resíduos da indústria de celulose apresentou maior eficiência na remoção do zinco, ferro e manganês em relação aos wetlands com brita calcária e com resíduos da construção civil para todas as fases do estudo.</p>	<p>O autor não apresenta os custos estimados para a montagem dos sistemas de tratamento.</p> <p>O autor não apresenta estimativa de área de implantação requerida.</p>

Nº	Características do Efluente Tratado	Configuração ótima recomendada pelo estudo	Estimativa de custos e área de implantação
3-1	<p>Após precipitação: pH 8,7 Zn 0,1 mg/L Fe 0,9 mg/L Mn 1,54 mg/L Pb 0,15 mg/L Al 0,08 mg/L As 0,3 mg/L Sulfato 2.727 mg/L Condutividade 5.280 µS/cm</p> <p>Após polimento: pH 5,55 Zn 0,06 mg/L Fe 0,08 mg/L Mn 0,46 mg/L Pb 0,06 mg/L Al 0,24 mg/L As 0,14 mg/L Sulfato 1.325 mg/L Condutividade 4.84 µS/cm</p> <p>Enquadramento na legislação de lançamento de efluentes para o pH e maioria dos metais considerando apenas a precipitação (exceto Mn e As), e considerando o polimento, (exceto As).</p>	<p>A neutralização do efluente utilizando Ca(OH)₂ no pH 8,7 apresentou os melhores resultados para remoção de metais, porém os níveis de Mn e As ainda se encontravam acima do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/11.</p> <p>A etapa adicional de polimento do clarificado com microalgas pelo período de contato de 10 dias contribuiu significativamente na remoção de Mn e As.</p>	<p>A autora não apresenta os custos estimados para a aquisição dos reagentes químicos utilizados ou para a execução da obra da lagoa de polimento do efluente.</p> <p>A autora não apresenta estimativa de área de implantação requerida.</p>
3-2	<p>Após precipitação: pH 6,0 Fe 2,9 mg/L Al 2,6 mg/L Mn 28,24 mg/L Zn 2,6 mg/L Sulfato 6.769 mg/L Condutividade 10.900 µS/cm</p> <p>Após polimento: pH 8,6 Fe < 1,5 mg/L Al < 1 mg/L Mn < 1 mg/L Zn < 0,3 mg/L Sulfato 6.671 mg/L Condutividade 10.600 µS/cm</p> <p>Enquadramento na legislação de lançamento de efluentes para o pH e maioria dos metais considerando apenas a precipitação (exceto Mn), e para todos os metais considerando o polimento.</p>	<p>A neutralização do efluente utilizando Ca(OH)₂ no pH 6,0 seguido da dosagem de 10 g/L de zeólita apresentou os melhores resultados.</p> <p>A etapa adicional de polimento do clarificado com zeólitas contribuiu significativamente na remoção de Mn.</p>	<p>O autor estima que o tratamento por precipitação/neutralização custe R\$ 20/m³ de efluente tratado e de troca iônica em torno de R\$ 40/m³.</p> <p>O autor não apresenta estimativa de área de implantação requerida.</p>

Nº	Características do Efluente Tratado	Configuração ótima recomendada pelo estudo	Estimativa de custos e área de implantação
4-1	<p>pH 9,0 Fe 15 mg/L Mn 0,16 mg/L</p> <p>Enquadramento na legislação de lançamento de efluentes para o pH e os metais analisados.</p>	<p>Dosagem ótima de 30 g/L de dosagem de geopolímero à base de resíduo cerâmico e cinza da casca de arroz.</p> <p>Não foi citado tempo ótimo de contato.</p>	<p>A autora não apresenta os custos estimados para a aquisição dos reagentes químicos utilizados.</p> <p>A autora não apresenta estimativa de área de implantação requerida.</p>

No estudo 1-1, mesmo que de forma teórica, o autor indica que a calha de calcário sozinha não será capaz de enquadrar o efluente final na legislação vigente para lançamento de efluentes. O motivo disso é a baixa eficiência para remoção de Mn e Fe, segundo a literatura disponível. Desta forma, tem-se que este sistema de tratamento pode ser mais adequado quando aplicado como uma etapa preliminar de tratamento utilizado principalmente para a correção do pH, precedendo outros tipos de tratamento. A execução de ensaios de bancada ou em escala piloto seriam requeridas para confirmação desta suposição.

O estudo 2-1 demonstrou que *wetlands* construídos são um sistema de tratamento passivo que apresenta eficiência na remoção de metais em geral e de Mn, e que promove adequação do pH do efluente final mesmo considerando variação nas concentrações de alimentação. Os diferentes meios de suporte utilizados podem contribuir para a eficiência do tratamento.

No estudo 3-1, devido a elevada concentração de Mn na DAM bruta (37,98 mg/L), apenas a neutralização do efluente não garantiu o atingimento dos limites de Mn para lançamento. A concentração após neutralização foi de 1,54 mg/L (próxima, porém ainda acima do limite de 1 mg/L). A etapa adicional de polimento do clarificado com microalgas pelo período de contato de 10 dias contribuiu significativamente na remoção de Mn, onde o autor cita que foi obtida uma concentração final de 0,46 mg/L.

Já no estudo 3-2, também foi observado que apenas a neutralização não garantiu atendimento da legislação. Houve uma redução de 45,1 mg/L para 28,24 mg/L de Mn. A etapa adicional de polimento por zeólitas foi essencial para atendimento da legislação.

Os estudos 3-1 e 3-2 indicam como configuração ótima a utilização do mesmo reagente ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para promoverem a neutralização e precipitação de metais, porém em faixas de pH diferentes e com tempos de sedimentação distintos. Enquanto o estudo 3-1 considerou o pH de 8,7 como ótimo, com um tempo de sedimentação de 1h, o estudo 3-2 considerou o pH de 6,0 e 24h de sedimentação. Além disso, havia diferença nas concentrações dos demais metais da DAM bruta entre os estudos. O pH apresenta grande influência na precipitação de metais, e as

interações entre os diferentes contaminantes da DAM também podem afetar o desempenho das técnicas de tratamento.

O estudo 3-2 foi o único dentre os estudos avaliados a apresentar custos estimados para o tratamento. O autor estima o custo da precipitação/neutralização de R\$ 20/m³ de efluente tratado. Para a troca iônica, este valor foi de R\$ 40/m³. Ambos os custos consideram condições de laboratório. Para o aumento de escala, outros custos podem estar envolvidos.

No estudo 4-1, apenas a etapa de adsorção possibilitou a redução da concentração de Mn de 16,65 mg/L para 0,16 mg/L no efluente final. O autor não especificou o tempo de contato ótimo para obtenção desta remoção.

Nenhum dos estudos avaliados apresentou considerações sobre a área requerida para implantação dos tratamentos propostos. Outro ponto pouco discutido nos estudos avaliados foi a disposição do lodo gerado após a precipitação, destinação final das macrófitas nas *wetlands*, ou da destinação das zeólitas e do geopolímero após adsorção/troca iônica.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou a tendência brasileira de sistemas de tratamento de drenagem ácida para remoção de manganês, considerando as técnicas passivas (leitos de calcário e *wetlands* construídos) e ativas (precipitação química e filtração adsortiva).

A revisão bibliográfica sistemática desenvolvida resultou inicialmente em números expressivos de estudos na plataforma Google Acadêmico, porém, após análise criteriosa, foram selecionados 5 estudos que apresentavam maior relevância para a questão de pesquisa estudada: qual método de tratamento para remoção de manganês em drenagem ácida de mina apresenta o maior custo-benefício. Em termos quantitativos, no início do refinamento dos resultados das buscas com as palavras-chave, havia um total de 37 estudos. A partir das análises de refinamento dos resultados por Título e Resumo/Abstract, foram obtidos um total de 5 estudos que foram comparados e avaliados nesta revisão bibliográfica sistemática.

Verificou-se que, dentre os estudos avaliados, leitos de calcário têm sido utilizados para a correção do pH da DAM, porém não apresentam eficiência significativa de remoção de Mn. Este sistema de tratamento pode ser mais adequado quando aplicado como uma etapa preliminar de tratamento utilizado principalmente para a correção do pH, precedendo outros tipos de tratamento. O estudo avaliado sobre este tema não apresentou ensaios de laboratório, portanto

a execução de ensaios de bancada ou em escala piloto seriam interessantes para avaliação da eficiência deste tratamento passivo.

As *wetlands* construídas utilizando a macrófita *Thypha angustifolia* apresentaram eficiência na remoção de variadas concentrações afluentes de Mn, garantindo o atendimento à legislação em 95,6% dos ensaios segundo o estudo avaliado. Com isso, a utilização desta técnica de tratamento passivo representa grande potencial para o tratamento de DAM, sendo interessante o desenvolvimento de estudos para seu uso em escala industrial.

No caso da precipitação/neutralização, apesar de sua eficiência observada para remoção de metais em geral, tem-se que apenas esta etapa de tratamento ativo não garantiu atendimento à legislação vigente em relação ao Mn. Nos dois estudos avaliados, a precipitação química foi seguida de polimento do efluente. A etapa de polimento mostrou-se essencial para o atendimento à legislação nos dois casos estudados. Em termos de custo, tratamentos ativos tendem a ser mais caros devido a necessidade de agitação, fornecimento de energia elétrica, e aquisição de químicos.

Finalmente, tem-se que a adsorção em geopolímero também garantiu o atendimento à legislação segundo o estudo avaliado, sendo pertinente a avaliação futura do comportamento de outros materiais adsortivos visando encontrar o que apresente maior custo-benefício.

Todos os estudos avaliados consideraram a escala de bancada, sendo os experimentos desenvolvidos em laboratório. Há potencial para o estudo da escalabilidade dos tratamentos avaliados, envolvendo os desafios para implantação em escala industrial destes. Notou-se uma lacuna de conhecimento em relação à área requerida para implantação dos tratamentos, e também foram disponibilizadas poucas informações sobre os custos relacionados a operação e manutenção dos tratamentos. Pouco foi discutido sobre a geração de lodo pelos métodos de tratamento, e não havia informações disponíveis sobre a caracterização, tratamento e disposição destes resíduos.

Com a presente pesquisa, foi possível identificar que o tratamento de drenagem ácida para remoção de manganês tem sido tópico frequente de diversos estudos no Brasil, devido à preocupação com o tema, já que a degradação ambiental causada pela drenagem contaminada não tratada pode afetar corpos hídricos, o solo e aquíferos, causando impactos duradouros. Ao mesmo tempo, foram identificadas lacunas de conhecimento, que evidenciam a necessidade de futuras pesquisas na área. Essas lacunas de conhecimento destacam a importância contínua de pesquisas adicionais e o potencial para o desenvolvimento de tecnologias de tratamento mais modernas e eficientes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, J. C., 2020. **Manganês no brasil: descoberta, extração, consumo e comercialização numa perspectiva histórica.** Química Nova V. 42 1172-1183. Acesso em: 25/03/2024.
- BONUMÁ, N.B., GASTALDINI, M.D.C.C. e PAIVA, J.B.D., 2008. **Análise da carga difusa de poluição gerada por atividades de mineração.** RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 13(3), pp.105-115. Acesso em: 24/10/2023.
- BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. **Drenagem Ácida e Gestão de Resíduos Sólidos de Mineração.** Extração de Ouro: Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente - Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2002. cap. 10, p.253-276. Acesso em: 04/11/2023.
- CAMPANER, V. P.; LUIZ-SILVA, W. **Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil.** Química Nova, v. 32, n. 1, p. 146–152, 2009. Acesso em: 28/10/2023.
- CEA DO BRASIL. **Filtro De Zeólita Para Tratamento De Água,** 2023. Disponível em: <https://www.ceadobrasil.com.br/filtro-zeolita-tratamento-agua>. Acesso em: 12/03/2024
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, **Discussões sobre construção de barragem de rejeitos continuam em região baiana,** 2021. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/noticias/discussoes-sobre-construcao-de-barragem-de-rejeitos-continuam-em-regiao-baiana/>. Acesso em: 10/03/2024.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, **Resolução CONAMA nº357,** de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Acesso em: 11/11/2023.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, **Resolução CONAMA nº420,** de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Acesso em: 11/11/2023.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, **Resolução CONAMA nº430,** de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Acesso em: 11/11/2023.
- COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR, **Periódicos Capes,** 2023. Acesso em: 20/10/2023
- DE BRIDA, I. C. D., **Utilização de geopolímero à base de cinza da casca de arroz e resíduo cerâmico para redução da acidez, remoção de Fe e Mn e da toxicidade em drenagem ácida de mina.** Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, UFSC, 2022. Acesso em: 08/12/2023.

DO VALE, P. H. L. **Análise dos principais aspectos sobre drenagem ácida na mineração**, 2014. Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás. 2014. Acesso em: 24/10/2023.

ECODEBATE. **Águas Naturais Afetadas por Mineração**, 2020. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2020/11/03/aguas-naturais-afetadas-por-mineracao/>. Acesso em: 12/03/2024.

ELAW – ENVIRONMENTAL LAW ALLIANCE WORLDWIDE. **Guidebook for evaluating mining project EIAs**. Environmental Law Alliance Worldwide, 2010. Acesso em: 24/10/2023.

GEOESTRUTURAL CONSULTORIA E PROJETOS, **Pilhas de estéril**. 2024. Disponível em: <https://www.geoestrutural.com.br/servi%C3%A7os/pilhas-de-est%C3%A9ril>. Acesso em: 10/03/2024.

GOOGLE COMPANY, **Google Acadêmico**, 2023. Acesso em: 20/10/2023

HIDROPLAN. **Drenagem Ácida de Mina - características e impactos ambientais**, 2022. Disponível em: <https://www.hidroplan.com.br/site/blog-era-da-agua/52-drenagem-acida-de-mina-caracteristicas-e-impactos-ambientais>. Acesso em: 12/03/2024

HORN, M. B., **Remoção de metais da drenagem ácida de minas por precipitação química e por troca iônica com zeólita NaP1**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2015. Acesso em: 08/12/2023.

HUTCHINSON, I. P. G.; ELLISON, R. D. **Mine Waste Management**, Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 1992. Acesso em: 08/11/2023.

LEÃO, L. P., COSTA, R. D. V. F. D., LEITE, M. G. P., & NALINI JÚNIOR, H. A. **Mapeamento geoquímico do manganês e avaliação da qualidade de sedimentos fluviais e águas superficiais do Quadrilátero Ferrífero**, Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ. 2019. Acesso em: 11/11/2023.

LIMA, K. M. **Tratamento de drenagem ácida de mina com zeólita do tipo hidroxissodalita proveniente das cinzas de rejeito de carvão mineral**. Ciências Biológicas da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC. 2019. Acesso em: 12/11/2023.

MELLO, J. W. V.; DUARTE, A.; LADEIRA, A. C. Q. **Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina**. 2014. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, p. 24-29, 2018. Acesso em: 08/11/2023.

MILANEZ, B. **Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação**. Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA), v. 16, p. 93-101, 2017. Acesso em: 22/10/2023.

MINE CLOSURE. **Open limestone channel**, 2014. Disponível em:
<https://mineclosure.gtk.fi/open-limestone-channel/>. Acesso em: 12/03/2024

MME - Ministério de Minas e Energias. **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília, ANM, 2022. Acesso em: 04/11/2023.

PELISSARI, L. M. T. **Influência de parâmetros de projeto no desempenho do Floculador Tubular Helicoidal aplicado ao tratamento de água de abastecimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

PELISSARI, L. M. T. **Influência de parâmetros de projeto no desempenho do Floculador Tubular Helicoidal aplicado ao tratamento de água de abastecimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006. Acesso em: 12/03/2024

QUEIROZ, H. M. et al. **Manganese: The overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse**. Environment international, v. 146, p. 106284, 2021.

QUEIROZ, J. P. L. **Remoção de Manganês de Águas e Efluentes por Precipitação**. Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio. 2013. Acesso em: 12/11/2023.

REZENDE, V. L. **A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração**. Sociedade & Natureza, v. 28, n. 3, p. 375–384, set. 2016. Acesso em: 22/10/2023.

SANTOS, K. B. D., **Tratamento de drenagem ácida de minas por neutralização/precipitação-efeito do pH, agente neutralizante e tratamento complementar por bioassorção com microalgas**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2020. Acesso em: 08/12/2023.

SANTOS, L. F. **Tratamento de drenagem ácida de mina com alto teor de manganês**. Curso de Especialização em Tecnologia Ambiental, UFMG. 2010. Acesso em: 11/11/2023.

SCIENTIFIC ELECTRONIC LIBRARY ONLINE, **SciELO**, 2023. Acesso em: 20/10/2023

SEGREDO, A. E. A. E. **Proposta de um sistema passivo para o tratamento da drenagem ácida de mina gerada no depósito de rejeitos de Capão da Roça, Charqueadas/RS, Copelmi mineração Ltda**, Instituto De Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 2014. Acesso em: 08/12/2023.

SILVA, S. B. D. **Wetland de fluxo vertical com diferentes tipos de meio suporte para o tratamento da drenagem ácida de mina**, Instituto de Ciências Agrárias, UFU, 2023. Acesso em: 08/12/2023.

TRINDADE, R. B. E.; SOARES, P. S. M. **Tecnologia de sistemas passivos para o tratamento de drenagem ácida de minas**. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Série Tecnologia Ambiental. Rio de Janeiro. 2004. Acesso em: 12/11/2023

TRINDADE, R. B. E.; SOARES, P. S. M.; RIZZO, A. C. L. **Remoção de manganês residual contido em efluentes aquosos de mineração.** Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, v. 20, 2004. Acesso em: 04/11/2023.

WETLANDS CONSTRUÍDOS. **Wetlands construídos: tratamento passivo de águas de mineração usando Soluções Baseadas na Natureza,** 2023. Disponível em: <https://www.wetlands.com.br/post/wetlands-constru%C3%ADdos-tratamento-passivo-de-%C3%A1guas-de-minera%C3%A7%C3%A3o-usando-solu%C3%A7%C3%A7%C3%B5es-baseadas-na-natureza>. Acesso em: 12/03/2024