



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

---

---

**Matheus da Silva Becker**

**USO DE CANAIS ABERTOS DE CALCÁRIO PARA O  
TRATAMENTO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS: UMA  
REVISÃO DA LITERATURA**

Porto Alegre  
Abril 2023

**MATHEUS DA SILVA BECKER**

USO DE CANAIS ABERTOS DE CALCÁRIO PARA O TRATAMENTO DE  
DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

TRABALHO DE CONCLUSÃO  
APRESENTADO AO CURSO DE  
ENGENHARIA AMBIENTAL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
DO SUL COMO PARTE DOS REQUISITOS  
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Ivo André Homrich Schneider

Porto Alegre

Abril 2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Becker, Matheus da Silva  
USO DE CANAIS ABERTOS DE CALCÁRIO PARA O TRATAMENTO  
DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS: UMA REVISÃO DA LITERATURA  
/ Matheus da Silva Becker. -- 2023.  
49 f.  
Orientador: Ivo André Homrich Schneider.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia  
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. drenagem ácida de minas. 2. tratamento passivo.  
3. Canais abertos de calcário. I. Schneider, Ivo André  
Homrich, orient. II. Título.

MATHEUS DA SILVA BECKER

USO DE CANAIS ABERTOS DE CALCÁRIO PARA O TRATAMENTO DE  
DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido em 04/04/2023 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider – Orientador

.....  
Dra. Jéssica Weiler

.....  
Prof. Dr. André Camargo de Azevedo

Conceito:

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais que desde sempre apoiaram meus estudos, dando toda a base que eu precisei ao longo dos meus estudos, sempre me motivando e mostrando a importância do estudo em minha vida. Ao meu irmão pelo apoio e incentivo a me matricular no curso. A Bruna Mileski, minha noiva, por todo o seu suporte, incentivo, carinho e paciência, principalmente na reta final do curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider por me proporcionar um grande conhecimento desde a primeira disciplina do curso.

A PRAE por garantir o estudo de todos os alunos de baixa renda na Universidade.

A UFRGS por ter a oportunidade de estudar em uma das mais renomadas instituições de ensino da América Latina. E a todos que fazem parte da comunidade acadêmica que fizeram parte da minha trajetória de alguma forma.

A banca examinadora por aceitarem o convite para analisarem este trabalho.

## RESUMO

A drenagem ácida de minas (DAM) é um dos principais problemas decorrentes da mineração. Isso ocorre quando a disposição dos rejeitos, ou até mesmo dos estéreis, se dá de forma inadequada, permitindo que ocorra a oxidação de minerais sulfetados, como a pirita ( $\text{FeS}_2$ ). Esse mineral, na presença de água e ar, sofre uma série de reações, contaminando recursos hídricos com concentrações elevadas de metais e gerando um efluente ácido. No município Charqueadas/RS, em uma área conhecida como Capão da Roça, há a geração de DAM. Devido ao longo tempo e baixa concentrações de metais, avalia-se a possibilidade de implementar um sistema passivo para o tratamento. Diante disso, foi realizada uma revisão bibliográfica quantitativa e qualitativa a fim de verificar novas tendências e aplicações de sistemas passivos no tratamento de DAM sendo que, no presente caso, optou-se de forma específica pelos sistemas de canais abertos de calcário (CAC). A pesquisa foi realizada em banco de dados renomados, como o Periódicos CAPES, Science Direct, Scielo e Science, com o algoritmo “*Acid mine Drainage AND Passive Treatment AND Open Limestone Channel*” para a obtenção de estudos científicos sobre o tema e verificação da eficácia do tratamento. A pesquisa resultou em um número elevado de publicações e, a fim de refinar os resultados, foram adotados critérios de seleção, como o período de publicação dos estudos a partir de 2000, remoção das duplicatas, análise de título, resumo e a análise completa do artigo para a seleção apenas de estudos que contenham resultados qualitativos do sistema CAC. Obtiveram-se estudos de ótima qualidade que permitiram uma análise crítica sobre sua eficiência. Foram selecionados 8 estudos para análise completa. Observou-se que a produção de estudos científicos na área mantém uma média linear de publicações anuais. Dos estudos selecionados, a Espanha foi o país que mais apresentou artigos, com duas publicações. Em 7 publicações os autores relatam a elevação no pH do efluente e uma taxa de remoção do ferro e alumínio de 99%. A maioria dos sistemas foi ineficiente para a remoção de manganês. Com os resultados é possível inferir que os canais abertos de calcário são uma ótima opção para o tratamento de drenagem ácidas de minas, porém, para o caso do Capão da Roça, devido ao declive natural da região, esse sistema pode não ser eficiente.

**Palavras-chave:** Drenagem ácida de minas, tratamento passivo, canais abertos de calcário

## ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is one of the main problems resulting from mining. This occurs when the disposal of tailings, or even waste rock, is done improperly, allowing sulfide minerals such as pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) to oxidize. In the presence of water and air, this mineral undergoes a series of reactions, contaminating water resources with high concentrations of metals and generating acidic effluent. In the municipality of Charqueadas/RS, in an area known as Capão da Roça, AMD is generated. Due to the long time and low concentrations of metals, the possibility of implementing a passive treatment system is being evaluated. Therefore, a quantitative and qualitative literature review was carried out to verify new trends and applications of passive systems in AMD treatment. Specifically, open limestone channel (OLC) systems were chosen for the present case. The research was conducted in renowned databases, such as CAPES Periodicals, Science Direct, Scielo, and Science, using the algorithm "Acid mine Drainage AND Passive Treatment AND Open Limestone Channel" to obtain scientific studies on the topic and verify the effectiveness of the treatment. The research resulted in a high number of publications, and selection criteria were adopted to refine the results, such as the publication period of studies from 2000, removal of duplicates, analysis of title, abstract, and complete analysis of the article to select only studies containing qualitative results of the OLC system. High-quality studies were obtained that allowed for critical analysis of their efficiency. Eight studies were selected for a complete analysis. It was observed that the production of scientific studies in the area maintains a linear average of annual publications. Spain was the country with the most articles, with two publications. In seven publications, the authors reported an increase in effluent pH and a removal rate of iron and aluminum of 99%. Most systems were inefficient for manganese removal. The results suggest that open limestone channels are an excellent option for treating AMD, but for the Capão da Roça case, due to the natural slope of the region, this system may not be efficient.

**Keywords: Acid mine drainage, passive treatment, open limestone channel**

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Drenagem ácida de uma mina onde o ferro sofreu o processo de oxidação, evidenciado pela coloração alaranjada. ....	17
<b>Figura 2</b> - Principais efeitos da Drenagem Ácida de Minas. ....	18
<b>Figura 3</b> - Subdivisão dos processos de remediação conforme atividade biológica. ....	19
<b>Figura 4</b> - Corte transversal simplificado de um dreno de calcário anóxico. ....	22
<b>Figura 5</b> - Representação de um corte transversal de canais abertos de calcário. ....	23
<b>Figura 6</b> - Exemplo de canal aberto de calcário. ....	23
<b>Figura 7</b> - Representação de um corte transversal de um sistema SSPA. ....	24
<b>Figura 8</b> - Corte transversal simplificado de uma wetland aeróbica. ....	25
<b>Figura 9</b> - Corte transversal simplificado de uma wetland anaeróbica. ....	27
<b>Figura 10</b> - Gráfico de publicações por ano. ....	32
<b>Figura 11</b> - Localização da área de estudo ....	40
<b>Figura 12</b> – Imagem obtida através de MDE da área de estudo. ....	41
<b>Figura 13</b> - Cortes de perfil adotados. ....	42
<b>Figura 14</b> - Perfil topográfico da área de estudo. ....	42
<b>Figura 15</b> - Imagem do angulo de visão do terreno. ....	43
<b>Figura 16</b> - Representação do angulo de visão do terreno. ....	43

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

<b>Tabela 1</b> - Resultado das combinações com palavras-chave.....	30
<b>Tabela 2</b> - Artigos selecionados após aplicações dos requisitos estipulados. ....	31
<b>Tabela 3</b> - Países de origem dos estudos.....	32
<b>Tabela 4</b> – Revistas científicas as quais publicaram os artigos .....	33
<b>Tabela 5</b> - Dados relativos ao sistema de teste nos estudos selecionados. ....	34
<b>Tabela 6</b> - Especificações dos sistemas de teste. ....	35
<b>Tabela 7</b> - Croqui dos sistemas de teste.....	35
<b>Tabela 8</b> - pH pré-tratamento e pós-tratamento.....	37
<b>Tabela 9</b> - Eficiência dos sistemas na remoção de Fe.....	38
<b>Tabela 10</b> - Eficiência dos sistemas na remoção de Mn.....	38
<b>Tabela 11</b> - Eficiência dos sistemas na remoção de Al.....	39

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1</b> - oxidação da pirita e liberação de ferro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) e hidrogênio ( $\text{H}^+$ ).....	15
<b>Equação 2</b> - oxidação formando ferro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ).....	15
<b>Equação 3</b> - o $\text{Fe}^{+3}$ é hidrolisado (reage com $\text{H}_2\text{O}$ ) para formar hidróxido férrico ( $\text{FeOOH}$ ).....	16
<b>Equação 4</b> – Oxidação do Ferro ferroso.....	25
<b>Equação 5</b> - Hidrólise do Ferro férrico.....	25
<b>Equação 6</b> – Redução do sulfato com a ação de bactérias redutoras.....	26
<b>Equação 7</b> – ação do bicarbonato gerando neutralização do $\text{H}^+$ .....	26

## **LISTA DE SIGLAS**

CAC – Canais abertos de Calcário

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

DAC - Drenos anóxicos de calcário

DAM – Drenagem ácida de minas

PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

SSPA – Sistemas Sucessivos de Produção de Alcalinidade

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SIG – Sistema de Informação Geográfica

MDE – Modelo Digital de Elevação

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS GERAL</b> .....	<b>14</b>
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1. DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS .....	15
<b>3.2. EFEITOS DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS</b> .....	<b>16</b>
3.3. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO .....	18
3.1.1 <i>Tratamento Ativo</i> .....	19
3.1.1.1 <i>Produtos Químicos Alcalinos</i> .....	19
3.1.1.2 <i>Adsorção</i> .....	20
3.1.1.3 <i>Troca Iônica</i> .....	20
3.1.1.4 <i>Separação por membrana</i> .....	20
3.1.2 <i>Tratamentos Passivo</i> .....	21
3.1.2.1 <i>Drenos Anóxico de Calcário</i> .....	21
3.1.2.2 <i>Canais aberto de calcário (CAC)</i> .....	22
3.1.2.3 <i>Sistema sucessivos de produção de alcalinidade (SSPA)</i> .....	23
3.1.2.4 <i>Wetlands aeróbica</i> .....	24
3.1.2.5 <i>Wetlands anaeróbica</i> .....	25
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
4.1. FERRAMENTAS .....	27
4.1.1 <i>Periódicos CAPES</i> .....	27
4.1.2 <i>Google Scholar</i> .....	27
4.1.3 <i>ScienceDirect</i> .....	28
4.1.4 <i>Scielo</i> .....	28
4.1.5 <i>Science.Gov</i> .....	28
4.1.6 <i>Mendeley Reference Manager</i> .....	28
4.1.7 <i>Topodata</i> .....	28
4.1.8 <i>Google Street View</i> .....	29
4.1.9 <i>Quantum GIS – QGIS</i> .....	29
4.2. MÉTODOS .....	29
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>30</b>
5.1. RESULTADOS QUANTITATIVOS .....	30
5.2. RESULTADOS OBTIDOS NOS ESTUDOS .....	33
5.3. RESULTADOS DA ANÁLISE GEOESPACIAL .....	40
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>44</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>46</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas ambientais originado pela atividade de mineração é a drenagem ácida de minas (DAM), que é uma solução ácida gerada a partir da oxidação de minerais sulfetados (principalmente pela presença de pirita -  $\text{FeS}_2$ ). A drenagem ácida afeta a qualidade de água e é caracterizada por apresentar valores de pH muito baixos e podendo ter altas concentrações de metais.

No município de Charqueadas, no estado do Rio Grande do Sul, mais especificadamente em uma área conhecida como Capão da Roça, há geração de DAM. Este local, durante anos, foi usado como depósito de rejeitos de carvão beneficiado até o encerramento das atividades da empresa responsável. Porém, ainda sob as intempéries, continuou causando a drenagem ácida. Hoje, o local está sob administração da empresa COPELMI, responsável pelo monitoramento e tratamento da DAM na área. Segundo Da Silva et al. (2021) os valores de pH eram da ordem 2,3 a 2,7 e atualmente já estão próximo a 4,0 e desta forma pode-se utilizar de métodos passivos para o tratamento da drenagem ácida. As atuais características da DAM também abrem a possibilidade que o tratamento do efluente possa ser efetivo empregando-se métodos passivos, que envolveriam menor controle operacional (DA SILVA et al., 2021).

Diante do problema exposto, identificou-se a necessidade de compreender o método de tratamento passivo usando canais de calcário abertos, comparando este com os demais tratamentos passivos, por meio de uma pesquisa sistêmica, analisando artigos científicos que foram publicados no período de 2000 em diante. Para a pesquisa foram utilizadas as seguintes palavras chaves: “acid mine drainage”, “limestone drains”, “passive treatment” e “open limestone channel”, e foram escolhidas como base de dados as plataformas Google Scholar, ScienceDirect, Periódicos CAPES, Scielo e Science.gov.

## 2. OBJETIVOS GERAL

Analisar quantitativamente e qualitativamente as pesquisas desenvolvidas pela comunidade científica a respeito do tema tratamento passivo de drenagem ácida em canais abertos de calcário.

### 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- Determinar as melhores condições para o uso de tratamento passivo, com canais abertos de calcário, da drenagem ácida de minas (DAM);
- Avaliar a eficiência do uso canais abertos de calcário no tratamento da DAM e caracterizar o efluente tratado comparando os parâmetros físico-químicos com a legislação atual;
- Apresentar e discutir os resultados obtidos nos estudos onde essa técnica foi empregada;
- Comparar os resultados obtidos com outros tipos de tratamentos passivos mencionados na literatura consultada.
- Avaliar se canais abertos de calcário seriam uma boa possibilidade para o Capão da Roça.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS

A drenagem ácida de minas (DAM) é um dos principais problemas ambientais enfrentados pelo setor de mineração (De Mello et al., 2014), podendo contaminar recursos hídricos (Zipper; Skousen; Jage, 2018). De acordo com DENICOLA E STAPLETON (2002); EVANS et al. (2015); HOGSDEN E HARDING (2012); SOUCEK et al. (2001); apud SKOUSEN; ZIEMKIEWICZ; MCDONALD (2019), “a DAM pode causar impactos bióticos em organismos aquáticos por meio da toxicidade direta, alteração de habitat por precipitados metálicos, alterações na coloração da água e interrupção no ciclo de nutrientes, sendo inadequada para o uso doméstico, agrícola ou industrial”.

Segundo Zipper; Skousen; Jage (2018), a drenagem ácida pode ter um impacto dramático na qualidade da água devido a grandes quantidades de H<sup>+</sup> que são liberados, deixando o pH da água muito baixo, chegando a valores menores que 3,0. Complementam ainda que a acidez extrema mobiliza metais que são liberados dos minerais. Esse fenômeno ocorre porque vários metais, incluindo Al, Mn, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn, tornam-se mais solúveis em água à medida que o pH se torna mais ácido.

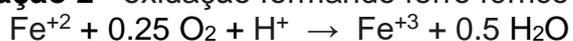
Conforme De Mello et al. (2014) e Alcolea et al. (2012), a drenagem ácida de minas é um processo que se inicia quando minerais sulfetados são dispostos na superfície terrestre e sofrem oxidação por meio de uma reação com água e oxigênio atmosféricos.

O mineral principal e o mais comum responsável pela geração da DAM é a pirita (FeS<sub>2</sub>) (ZIPPER; SKOUSEN; JAGE, 2018; DE MELLO et al., 2014). Para Zipper; Skousen; Jage (2018) a formação da DAM através da pirita pode ser representada conforme as seguintes equações:

**Equação 1** - oxidação da pirita e liberação de ferro ferroso (Fe<sup>+2</sup>), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) e hidrogênio (H<sup>+</sup>).



**Equação 2** - oxidação formando ferro férrico (Fe<sup>+3</sup>).



**Equação 3** - o  $\text{Fe}^{+3}$  é hidrolisado (reage com  $\text{H}_2\text{O}$ ) para formar hidróxido férrico ( $\text{FeOOH}$ ).



O processo é iniciado com a oxidação da pirita e liberação de ferro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) (equação 1). O processo de oxidação do enxofre é acelerado pela presença das bactérias *Thiooxidans* e *Ferroxidans*. O ferro ferroso sofre oxidação formando ferro férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) (equação 2). Finalmente, o  $\text{Fe}^{+3}$  é hidrolisado (reage com  $\text{H}_2\text{O}$ ) para formar hidróxido férrico ( $\text{FeOOH}$ ), um precipitado insolúvel de cor laranja, e libera acidez adicional (equação 3). A taxa de formação de  $\text{FeOOH}$  é dependente do pH; ocorre rapidamente quando o  $\text{pH} > 4$  (ZIPPER; SKOUSEN; JAGE, 2018, p. 2)

Segundo Silva et al. (2021), esse tipo de reação envolvendo pirita ( $\text{FeS}_2$ ) é comum em áreas de mineração de carvão, uma vez que esse mineral é encontrado em jazidas de carvão. Os minerais responsáveis pela DAM estão presentes em sua maioria em minérios de carvão ou minérios de níquel, chumbo, zinco, cobre, urânio, ouro e prata (DE MELLO et al., 2014). Entretanto, a DAM pode ocorrer em qualquer operação que movimente grandes quantidades de terra e rochas que tenham minerais sulfetados, como exemplo, construções de estradas, túneis, barragens etc. (SKOUSEN; ZIEMKIEWICZ; MCDONALD, 2019; DE MELLO et al., 2014).

### 3.2. EFEITOS DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS

Conforme Girdhar e Mohan (2018), as águas ácidas são preocupantes em relação aos sistemas biológicos, a pesca, bem-estar e economias próximas, sendo a eliminação de muitas espécies aquáticas o impacto mais evidente. Os efeitos da contaminação em riachos e lagos podem ser observados pelas suas alterações visuais de coloração laranja ou amarela de sedimentos de riachos, pela toxicidade e precipitação de metais que impactam a biota, tornando o uso das águas impróprias para qualquer fim (DENICOLA E STAPLETON, 2002; EVANS et al., 2015; HOGSDEN E HARDING, 2012; SOUCEK et al., 2001; apud SKOUSEN; ZIEMKIEWICZ; MCDONALD, 2019; JOSHUA, CHUKWUNONSO E FELICITAS, 2021).

**Figura 1** - Drenagem ácida de uma mina onde o ferro sofreu o processo de oxidação, evidenciado pela coloração alaranjada.



Fonte: Zipper, Skousen e Jage (2018, p. 1)

Gao et al. (2019) afirmam que a abundância de metais presentes na DAM pode encontrar meios para a contaminação do solo. A infiltração ácida contendo metais junto com as águas superficiais pode promover a poluição das águas subterrâneas (GIRDHAR e MOHAN, 2018).

Na ocorrência de escoamento, a DAM pode contaminar cursos d'água levando a morte peixes e crustáceos, e danificar permanentemente ecossistemas (KAUR et al., 2018). Para Girdhar e Mohan (2018), a DAM pode causar efeitos adversos à vida aquática quando os animais recebem corpos desse efluente. Afirmam ainda que pode ocorrer asfixia nos peixes devido a exposição a metais e aos íons  $H^+$ .

Para Gray (1997) a DAM tem efeitos variados que fazem a estrutura ecológica colapsar rapidamente e separa em quatro categorias: química, física, biológica e ecológica, conforme a Figura 2.

**Figura 2 - Principais efeitos da Drenagem Ácida de Minas.**



**Fonte:** Adaptado de Gray (1997, p. 2)

### 3.3. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO

A remediação de ambientes contaminados por DAM pode ser feita através de dois tipos de sistemas: sistemas ativos e sistemas passivos (KAUR et al., 2018; JOHNSON e HALLBERG, 2005; De MELLO, DUARTE e LADEIRA, 2014; SKOUSEN, ZIEMKIEWICZ, MCDONALD, 2019; KEFENI, MSAGATI E MAMBA, 2017). Para Johnson e Hallberg (2005), uma divisão mais útil é realizada distinguindo-se processos de remediação que depende de atividades biológicas e atividades que não dependem, conforme figura 3 abaixo.

**Figura 3** - Subdivisão dos processos de remediação conforme atividade biológica.



**Fonte:** Adaptado de Johnson e Hallberg (2005, p. 6)

### 3.1.1 Tratamento Ativo

Os métodos de tratamento ativos incluem a aplicação de produtos químicos alcalinos (KEFENI, MSAGATI E MAMBA, 2017; JOHNSON E HALLBERG, 2005), adsorção (FU E WANG, 2011), troca iônica (GAIKWAD, SAPKAL, R.S. E SAPKAL V.S., 2010) e separação por membrana (JOSHUA ET AL., 2021).

#### 3.1.1.1 Produtos Químicos Alcalinos

Segundo Kefeni et al. (2017) e Johnson e Hallberg (2005), o tratamento químico com adição de um material alcalino é um dos tratamentos ativos mais usados. Johnson e Hallberg (2005) pontuam ainda que a adição de químicos alcalinos

aumentará o pH da DAM e acelerará a taxa de oxidação química do ferro ferroso e irá causar a precipitação de metais presentes na solução como hidróxidos e carbonatos. Kefeni et al. (2017) apontam que os produtos químicos alcalinos mais usados para neutralização da DAM incluem calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), carbonato de sódio ( $\text{NaCO}_3$ ), soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ), hidróxido de amônia ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), hidróxido de magnésio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) e óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ).

#### 3.1.1.2 Adsorção

A adsorção envolve a transferência de partículas de solutos da fase aquosa para as superfícies sólidas dos adsorventes, sendo os metais os principais alvos dessa técnica (JOSHUA, 2021). Costuma-se classificar os adsorventes em categorias como orgânico, argila, carvão ativado, zeólitos, cinzas volantes, entre outros (IGHALO et al., 2020). Para Furlan (2008) a adsorção é o contato de um sólido e um fluido que resulta em uma transferência de massa da fase líquida ou gasosa para a superfície do sólido e a eficiência da adsorção dependerá de variáveis como o pH, a temperatura, polaridade da substância, pressão e área superficial.

#### 3.1.1.3 Troca Iônica

Esta técnica consiste na remoção de íons dissolvidos não desejados na água e águas residuais que são trocados por outros íons com uma quantidade equivalente de espécies iônicas que apresentam um menor potencial de perigo, presentes em uma matriz sólida insolúvel (HABASHI, 1993). Uma reação de troca iônica pode ser definida como uma troca reversível de íons entre a fase sólida e a fase líquida (RIANI, 2008).

#### 3.1.1.4 Separação por membrana

Os processos de separação por membranas são operações que utilizam membranas na divisão de misturas, soluções e suspensões compreendendo espécies de tamanho e natureza química divergentes, tendo como principal objetivo a

separação, a concentração e a purificação de um ou mais componentes em uma solução (BALDASSO, 2008).

Para Joshua et al. (2021), o desempenho de uma membrana na separação física é definido em termos de dois fatores: o fluxo, que é a taxa de permeação, ou seja, a taxa que passa pela membrana por unidade de área da membrana por unidade de tempo; e a seletividade, que é a fração de soluto que fica retida na membrana. Os autores ainda pontuam que os tipos de técnicas mais conhecidas e aplicadas são a de nanofiltração, osmose reversa e os sistemas híbridos.

### 3.1.2 Tratamentos Passivo

Os sistemas de tratamento passivo para drenagem ácida têm como objetivo renovar e melhorar a qualidade das águas que passam por eles (ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018), adicionando alcalinidade à DAM (JOHNSON E HALLBERG, 2005). Esses sistemas dependem de processos bioquímicos, geoquímicos e físicos que ocorrem naturalmente (GIDHAR E MOHAN, 2018). Esses sistemas são modelados a partir de banhados construídos (“wetlands”), atividades naturais e alguns outros procedimentos de caráter específico. (ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018; GIDHAR E MOHAN, 2018).

As tecnologias passivas incluem wetlands aeróbica e anaeróbica, drenos de calcário anóxicos, wetlands de fluxo vertical, canais abertos de calcário e leitos de lixiviação alcalinos (SKOUSEN, ZIEMKIEWICZ, MCDONALD, 2018).

#### 3.1.2.1 Drenos Anóxico de Calcário

Os drenos anóxicos de calcário (DAC) são trincheiras cheias de calcário através das quais a água ácida é direcionada para que o calcário possa produzir alcalinidade e neutralizar a DAM (ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018; TRINDADE E SOARES, 2004)

Os DAC são cobertos geralmente com argila ou solo compactado para evitar o que a DAM entre em contato com o oxigênio. Na sequência, o efluente é mantido em uma lagoa de decantação para permitir a precipitação dos metais e fazer algum ajuste do pH, se ainda necessário, antes de ser lançado em cursos d’água (ZIPPER,

SKOUSEN E JAGE, 2018). Segundo Trindade e Soares (2004), além de não permitir a formação do íon férrico, o ambiente fechado e isolado do DAC promove um aumento da pressão parcial de CO<sub>2</sub> e a consequente produção de alcalinidade.

Os drenos anóxicos de calcário podem ser uma alternativa mais econômica do que os sistemas de wetlands, no entanto, não são capazes de tratar todas as águas de DAM, cuja concentrações de metais são altas, o que acaba recobrando o calcário e/ou obstruindo os poros do sistema e prejudicando assim a sua função (ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018).

**Figura 4** - Corte transversal simplificado de um dreno de calcário anóxico.



Fonte: Adaptado de Zipper, Skousen e Jage (2018, p. 6)

### 3.1.2.2 Canais aberto de calcário (CAC)

Para Zipper, Skousen e Jage (2018) bem como Ferreira e Soares (2004), os canais abertos de calcário (CAC) são um sistema semelhante ao de drenos de calcário com a diferença da DAM ser transportada em canais abertos

Os CAC são mais eficazes quando colocados em declives superiores a 20% ou quando há altas vazões, pois a ação da água em movimento e das partículas suspensas agem no sentido de impedir a adsorção do hidróxidos de ferro no entorno das partículas do calcário (ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018).

Segundo Skousen, Sextone e Ziemkiewicz (2000), os canais abertos de calcário não são confiáveis para tratar a DAM como uma etapa única de tratamento por mais que seja eficaz. Segundo Fripp et al. (2000), o CAC deve ser implementado quando o ferro dissolvido está na forma reduzida, quando a concentração de OD seja

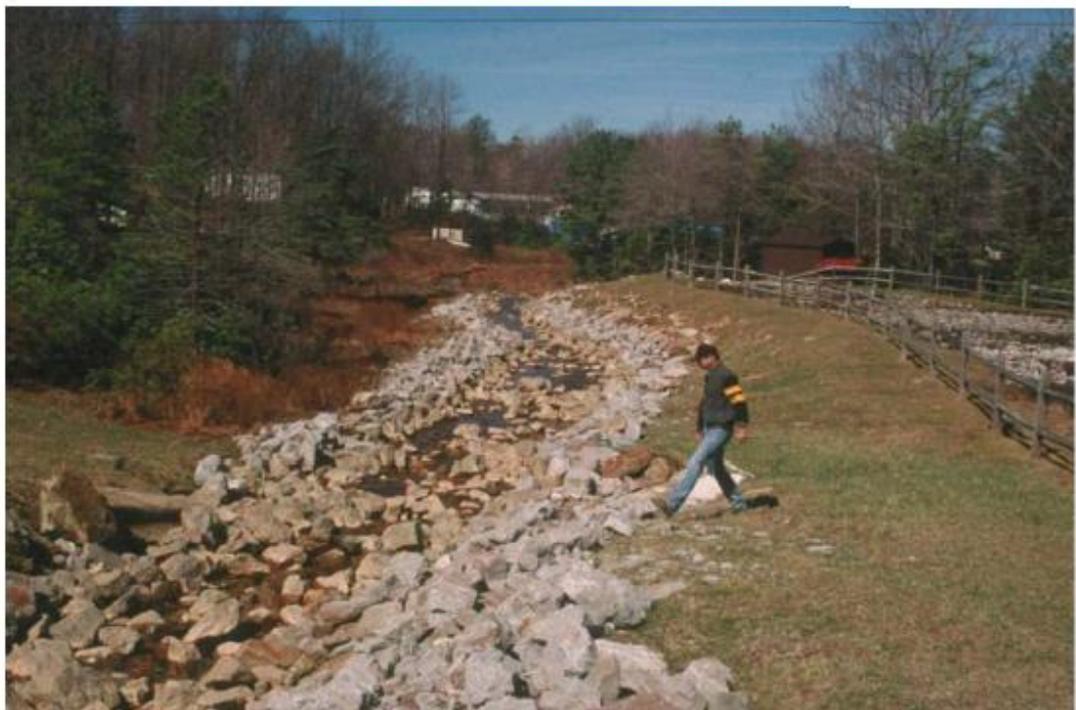
maior que 5,0 mg/L e quando o somatório dos íons metálicos esteja em concentrações menores que 25 mg/L.

**Figura 5** - Representação de um corte transversal de canais abertos de calcário.



**Fonte:** ei.lehigh.edu

**Figura 6** - Exemplo de canal aberto de calcário.



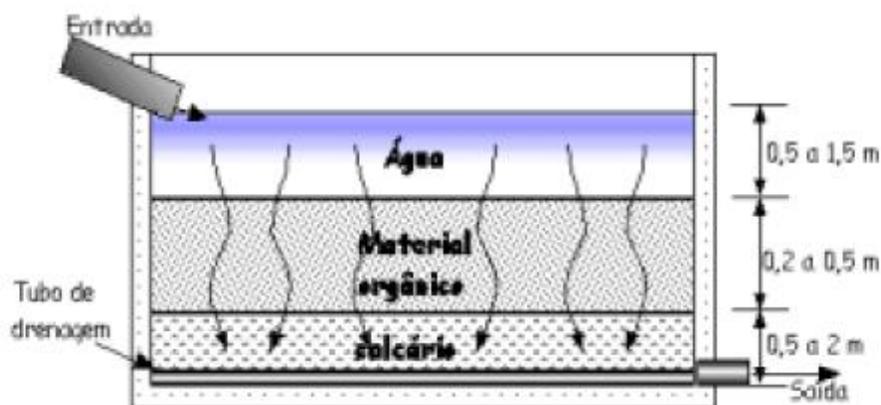
**Fonte:** Skousen et al (2005)

### 3.1.2.3 Sistema sucessivos de produção de alcalinidade (SSPA)

Esses sistemas utilizam a alcalinidade produzida em áreas alagadas anaeróbicas e em DAC para remover metais da drenagem ácida de minas, produzindo mais alcalinidade do que aqueles dois sistemas atuando separadamente (TRINDADE

E SOARES, 2004). Ainda, conforme os autores, os mecanismos de neutralização incluem várias reações químicas e bioquímicas que removem o ferro e outros metais e aumentam a alcalinidade da solução, não importando se a DAM tenha sido oxigenada ou não, ou se ainda o íon ferroso tenha sido oxidado a férrico.

**Figura 7** - Representação de um corte transversal de um sistema SSPA.



Fonte: Trindade e Soares (2004)

#### 3.1.2.4 Wetlands aeróbica

As wetlands aeróbicas são o tipo mais simples de sistema de tratamento passivo (ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018).

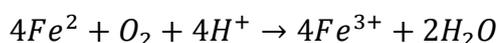
As wetlands aeróbicas são utilizadas para o tratamento de águas ligeiramente ácidas, pois possui uma capacidade de neutralização baixa com concentrações elevadas de Fe (GIDHAR E MOHAN, 2018; ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018).

O objetivo dessas estruturas é permitir a dissolução de ar para que a água que escoar entre a vegetação tenha condições de promover a oxidação do Fe dissolvido e fornecer tempo de residência suficiente para a precipitação dos óxidos e hidróxidos de ferro (GIDHAR E MOHAN, 2018; ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018).

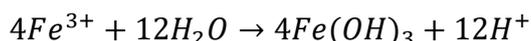
As wetlands aeróbicas geralmente são compostas por um córrego superficial, raso, com vegetação no fundo, podendo ainda ser planejada em um arranjo com uma pequena bacia de sedimentação sem plantas funcionando como um pré-tratamento (GIDHAR E MOHAN, 2018). O calcário pode ser usado para facilitar a neutralização neste caso (SKOUSEN, ZIEMKIEWICZ, MCDONALD, 2018).

Para Johnson e Hallberg (2005), wetlands são geralmente construídas para tratar águas alcalinas através da oxidação do ferro ferroso e após a hidrólise do ferro férrico, conforme equações a seguir.

**Equação 4 – Oxidação do Ferro ferroso**



**Equação 5 - Hidrólise do Ferro férrico**



Para manter as condições oxidantes, as zonas úmidas aeróbicas são sistemas relativamente rasos que operam por fluxo superficial (JOHNSON E HALLBERG, 2005). As vegetações são plantadas para fins estéticos, mas também para regularizar o fluxo de água e filtrar os precipitados férricos acumulados (JOHNSON E HALLBERG, 2005).

As wetlands podem ser usadas para remediação de DAM, realizando o tratamento físico e biológico simultâneo, com o uso de plantas e a comunidade microbiana (ABDULLAH et al., 2020).

**Figura 8** - Corte transversal simplificado de uma wetland aeróbica.



**Fonte:** Adaptado de Zipper, Skousen e Jage (2018, p. 3)

### 3.1.2.5 Wetlands anaeróbica

As wetlands anaeróbicas são relativamente profundas, com mais de 30 cm, compostas de substratos de solo, turfa, compostos de cogumelos, serragem, palha/estrupe, fardos de feno ou outros materiais orgânicos à base de carbono que podem ainda ser misturados com calcário (SKOUSEN, ZIEMKIEWICZ, MCDONALD, 2018; ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018).

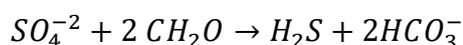
A escolha de materiais orgânicos volumosos utilizados varia de acordo com a disponibilidade local, bem como usa eficácia comprovada, embora geralmente os compostos seja preparado misturando materiais relativamente biodegradáveis, como esterço de vaca ou composto de cogumelo, com materiais mais recalcitrantes como a turfa ou serragem (Johnson e Hallberg, 2005).

A água passa através da espessa camada de subsuperfície orgânica e torna-se anaeróbica devido à alta demanda bioquímica (SKOUSEN, ZIEMKIEWICZ, MCDONALD, 2018). Wetlands anaeróbicas estimulam a oxidação e hidrólise de metais em camadas superficiais que consomem oxigênio (GIDHAR E MOHAN, 2018).

A falta de oxigênio promove a redução do sulfato a sulfetos por via bactéria, que então formam precipitados metálicos insolúveis (SKOUSEN, ZIEMKIEWICZ, MCDONALD, 2018). O processo produz alcalinidade, levando à precipitação de metais também como oxi-hidróxidos (NECULITA EL AL., 2007). Como as wetlands anaeróbicas produzem alcalinidade, seu uso pode ser estendido para DAM em condições mais severas, com baixo pH, alto Fe, alto oxigênio dissolvido (GIDHAR E MOHAN, 2018) e Al, porém esses sistemas geralmente requerem grandes áreas de superfície e longos tempos de retenção (ZIPPER, SKOUSEN E JAGE, 2018).

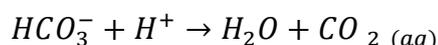
Zipper, Skousen e Jage (2018) afirmam que sob condições anóxicas ocorre a redução de sulfato através de bactérias redutoras que utilizam o oxigênio que entra como componente do sulfato, transformando o S associado em gás sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) conforme equação a seguir.

**Equação 6 – Redução do sulfato com a ação de bactérias redutoras**

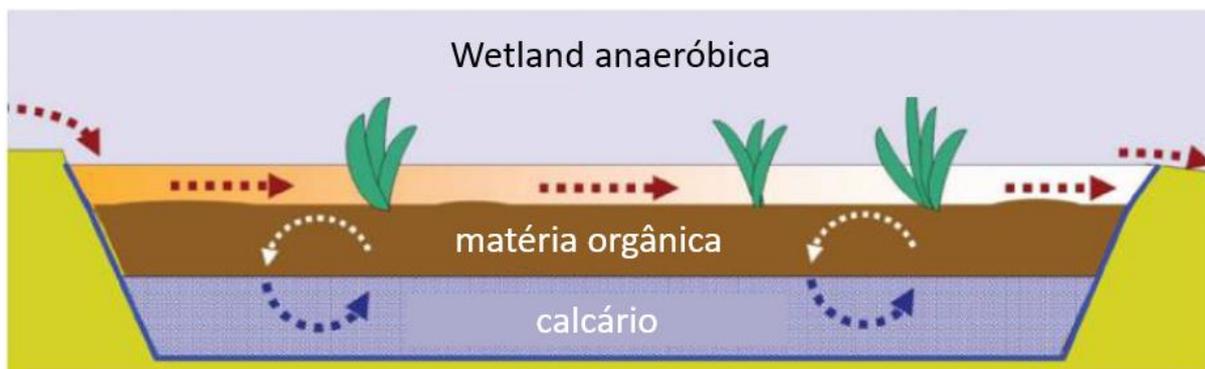


O bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) é uma fonte de alcalinidade e pode neutralizar H<sup>+</sup> e/ou elevar o pH para aumentar a precipitação de metais solúveis em ácido (Zipper, Skousen e Jage, 2018).

**Equação 7 – ação do bicarbonato gerando neutralização do H<sup>+</sup>**



**Figura 9** - Corte transversal simplificado de uma wetland anaeróbica.



**Fonte:** Adaptado de Zipper, Skousen e Jage (2018, p. 5)

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. FERRAMENTAS

#### 4.1.1 Periódicos CAPES

O Portal de Periódicos CAPES é uma biblioteca virtual que reúne e disponibiliza a instituições de ensino e pesquisa no Brasil um acervo internacional de pesquisas científicas. Essa biblioteca contém um acervo de mais de 45 mil títulos completos, além de livros, normas técnicas, estatísticas, conteúdo audiovisual, entre outros (PUC-SP, 2022).

#### 4.1.2 Google Scholar

O Google Scholar ou Google Acadêmico é uma ferramenta da empresa Google que dispõem de um enorme acervo acadêmico, sendo possível pesquisar TCC, artigos científicos, monografias, teses etc. Funciona através de buscas pelo termo desejado em diferentes portais de ciência para retornar um maior número de trabalhos para uma determinada palavra-chave (Google, 2023).

#### 4.1.3 ScienceDirect

ScienceDirect é a base de dados de texto completo e revisado por pares da Elsevier, com aproximadamente 26.000 livros e mais de 2.200 periódicos com uma ferramenta que possibilita a busca com uma combinação de palavras-chave (ScienceDirect – Guia de referência CAPES).

#### 4.1.4 Scielo

O Scielo é uma sigla para Electronic Library Online, é o maior portal eletrônico cooperativo de periódicos científicos da América Latina (Mettzer, 2023).

#### 4.1.5 Science.Gov

O Science.gov é um portal da web e uma ferramenta de busca a partir da integração de várias agências e órgãos dos Estados Unidos, com acesso gratuito a mais de 200 milhões de estudos científicos (Dotlib, 2023).

#### 4.1.6 Mendeley Reference Manager

Mendeley é um gerenciador de referências que reúne a bibliografia coletada para estudo em uma biblioteca que realiza a gestão das citações e gera automaticamente a lista de referências do documento final (Biblioteca FURG – Tutorial Mendeley, 2022).

#### 4.1.7 Topodata

O topodata é um importante banco de dados geomorfométricos do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, que oferece o modelo digital de elevação (MDE) e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM.

#### 4.1.8 Google Street View

O Google street View é uma ferramenta que reúne bilhões de imagens panorâmicas para oferecer uma representação virtual dos arredores de uma localização no Google Maps (Site Google – Street View, 2023)

#### 4.1.9 Quantum GIS – QGIS

O Quantum GIS (QGIS) é um programa de código aberto e gratuito que serve para processar dados geoespaciais (UNIFAP, 2017).

### 4.2. MÉTODOS

Esta revisão bibliográfica iniciou-se pela identificação do problema e definição da pergunta principal, determinando assim os termos de busca de estudos para a base teórica. Também foram definidos nessa etapa quais bancos de dados usar como fonte de estudos científicos.

Em uma segunda etapa, foi realizada a seleção dos artigos com base na relevância do estudo baseado em menções, no título, na leitura do resumo e, por fim, pela leitura completa do artigo. Essa etapa teve como objetivo eliminar os resultados que de certa forma não respondiam à pergunta principal deste trabalho. Os artigos que, após essa análise criteriosa, foram selecionados passaram para a análise bibliométrica.

A pergunta principal foi escolhida com base no objetivo geral que é a obtenção de dados sobre o tratamento de drenagem ácida de minas (DAM) de forma passiva, com o uso de canais abertos de calcário. Dessa forma, os estudos analisados deveriam responder a seguinte pergunta: *quais são os estudos científicos que explicam e mostram resultados sobre o tema “tratamento passivo de drenagem ácida de minas com o uso de canais abertos de calcário” e comparam a outros sistemas?*

Dada a pergunta principal, partiu-se para a definição dos termos da pesquisa. Foram selecionadas as palavras chaves no idioma inglês, devido a relevância internacional dos estudos científicos. As palavras chaves selecionadas foram as seguintes: “acid mine drainage”, “open limestone channel” e “passive treatment”.

Por fim, foi realizada uma análise por meio de ferramentas SIG, utilizando o programa QGIS para o tratamento de MDE da região para a obtenção da declividade do terreno na área de estudo, juntamente com o modelo em 3D da área de estudo e o perfil topográfico da área. O MDE da região foi obtido no banco de dados do Topodata disponibilizado pelo INPE.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. RESULTADOS QUANTITATIVOS

Através da metodologia aplicada, visando a revisão sistemática, foi possível alcançar um número de artigos satisfatório para as questões levantadas por esse trabalho. No período de 2000 a 2023, há um grande volume de artigos científicos produzidos sobre o tema “drenagem ácida de minas”, porém ainda sem passar pelos filtros aplicados neste trabalho.

Na sequência, aplicaram-se as combinações de palavras-chave. Conforme Tabela 1, pode-se ver a quantidade de estudos relacionados à “acid mine drainage”, “acid mine drainage AND passive treatment” e “acid mine drainage AND open limestone channel” O operador AND foi utilizado para que as combinações tenham obrigatoriamente ambas as palavras-chave como resultado da pesquisa, não contemplando estudos que tivessem apenas um dos termos.

**Tabela 1** - Resultado das combinações com palavras-chave.

Palavras-chave/combinções	Nº de artigos resultantes				
	Periódicos CAPES	Google Scholar	ScienceDirect	SciELO	Science.gov
Acid mine drainage	13.002	32.800	16.800	133	937
Acid mine drainage <b>AND</b> Passive treatment	700	20.100	2.470	11	498
Acid mine drainage <b>AND</b> Open limestone channel	26	17.900	1.055	0	587

**Fonte:** autoria própria

A pesquisa utilizando apenas “acid mine drainage AND Passive treatment” retornou muitos resultados mesmo com a definição do período de publicação dos

estudos, de 2000 a 2023, o que acabou impossibilitando que o método de avaliação primária fosse a leitura do título. Desse modo, optou-se por limitar os artigos com as palavras-chave “Acid mine drainage AND Open limestone channel”. Após essa etapa, foi aplicado os outros filtros, de leitura do título e resumo, onde os artigos deveriam ter obrigatoriamente resultados de experimentos com o método de canais abertos de calcário o que resultou na tabela 2.

**Tabela 2** - Artigos selecionados após aplicações dos requisitos estipulados.

Artigo	Nome do artigo	Autores	Ano	Nº de citações
1	Effectiveness of an open limestone channel in treating acid sulfate soil drainage.	Ros Green, T. et al.	2008	8
2	A comparative study of anoxic limestone drains and open limestone channel for acidic raw water treatment.	Kusin, Faradiella Mohd et al.	2013	5
3	Neutralization and uptake of pollutant cations from acid mine drainage (AMD) using limestones and zeolites in a pilot-scale passive treatment system.	Silva, Daniela et al	2021	3
4	Heavy metal removal of intermittent acid mine drainage with an open limestone channel.	Alcolea, A., et al.	2012	43
5	Using pilot trials to test geochemical treatment of acid mine drainage on Stockton Plateau.	Trumm, D., et al.	2008	8
6	Performance of an open limestone channel for treating a stream affected by acid rock drainage (León, Spain).	Esther Santofimia & Enrique López-Pamo	2016	6
7	Abandoned mine drainage in the Swatara Creek Basin, Southern Anthracite Coalfield, Pennsylvania, USA: 2. Performance of Treatment Systems.	Cravotta III, Charles A.	2010	23
8	Treatment of acidic water from Bekok River using open limestone channel	Aris, A. et al.	2007	2

**Fonte:** autoria própria

Conforme mostrado na tabela 2, foram selecionadas 8 publicações que se enquadraram nos requisitos estipulados, que foram o período de publicação, a leitura do título e resumo, que respondem à questão principal deste estudo, *quais são os estudos científicos que explicam e mostram resultados sobre o tema “tratamento passivo de drenagem ácida de minas com o uso de canais abertos de calcário”*.

Para a análise bibliográfica, inicialmente foi realizada um estudo temporal das publicações dos artigos, para compreender o quanto esse assunto vem sendo abordado, conforme os requisitos impostos nesses estudo. Diante disso, através de um gráfico representado na figura 10, pode-se observar que há uma distribuição temporal que varia pouco, oscilando entre 1 e 2 publicações por ano e bem espaçadas no período determinado de 2000 a 2023, o que garante uma boa representatividade na questão de evolução das tecnologias dos sistemas de tratamento da DAM e o que nos indica que não é uma prática tão usada como alternativa de tratamento passivo.

**Figura 10** - Gráfico de publicações por ano.



**Fonte:** autoria própria

O país que mais apresentou estudos envolvendo a DAM foi a Espanha e a Malásia com 2 publicações cada, conforme pode ser observado na tabela 3.

**Tabela 3** - Países de origem dos estudos.

Artigo	País de origem	Artigo	País de origem
1	Austrália	5	Novo Zelândia
2	Malásia	6	Espanha
3	Brasil	7	Estados Unidos
4	Espanha	8	Malásia

**Fonte:** autoria própria

Na tabela 4 abaixo é possível observar as revistas científicas que publicaram os artigos mencionados nessa revisão bibliográfica.

**Tabela 4** – Revistas científicas as quais publicaram os artigos

<b>Artigo</b>	<b>Revista</b>
1	Water, Air, & Soil Pollution
2	Water Science and Technology
3	Minerals Engineering
4	Minerals Engineering
5	New Zealand Journal of Geology and Geophysics
6	Environmental Science and Pollution Research
7	Mine Water and the Environment
8	Water Supply

**Fonte:** autoria própria

## 5.2. RESULTADOS OBTIDOS NOS ESTUDOS

Apesar do número de estudos científicos analisados por esse trabalho não ser elevado em termos quantitativos, o retorno em termos qualitativos foi satisfatório. Os artigos foram de grande relevância para o estudo, possibilitando uma comparação entre os estudos selecionados e a compreensão dos resultados obtidos nos estudos científicos, de modo a entender os motivos que levaram os autores a escolherem os CAC ou não, como alternativa de tratamento.

A análise dos dados começou com a determinação da escala utilizada nos testes, juntamente com os parâmetros analisados para determinar a eficiência dos sistemas de tratamento e a identificação de outros sistemas usados como uma alternativa aos CAC. Os dados dessa análise primária podem ser observados na tabela 5.

**Tabela 5** - Dados relativos ao sistema de teste analisado nos estudos selecionados.

Artigo	Sistema de teste	Campanha de monitoramento	Parâmetros analisados	Sistemas Comparados
1	Full Scale	número de campanhas não relatado em um período de 15 meses	pH, Na, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Mg, Ca, Fe, Mn, Al e K	CAC
2	Pilot Scale	não usou está sistemática	pH, Fe	CAC e DAC
3	Pilot Scale	não usou está sistemática	pH, Al, Fe, Mg	CAC
4	Full Scale	5 campanhas	pH, Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Pb	CAC
5	Pilot Scale	9 campanhas no período de 8 meses	pH, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Al, Fe, Mn, As, Zn, Ca	CAC, SSPA e DAC
6	Full Scale	5 campanhas	pH, Ca, Na, Mg, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Fe, Al, Zn, Ni, Co, Cu	CAC
7	Full Scale	8 campanhas ou mais no período de 3 anos	pH, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Fe, Mn, Mg, Al	CAC
8	Pilot Scale	não usou está sistemática	pH	CAC

**Fonte:** autoria própria

Conforme é possível observar na tabela 5, os sistemas de tratamento ficaram divididos em partes iguais entre “full scale” e “pilot scale”, tendo cada um, 4 sistemas desenvolvidos para os testes. No que diz respeito as campanhas de monitoramento, os estudos 2,3 e 8 usaram uma metodologia diferente dos demais, coletando em uma única oportunidade a quantidade de DAM suficiente para a realização dos testes. Isso significa que as amostras destes estudos possuem as mesmas características, sem qualquer fator que possa ter alterado sua concentração inicial. Para os parâmetros analisados, devido à grande variância entre eles, optou-se por analisar os dados de pH, Fe, Al e Mn para possibilitar a comparação entre os estudos.

Os canais abertos de calcário possuem diversas configurações e desse modo é importante destacar as especificações dos sistemas usados nos testes, inclusive a inclinação usada em cada estudo. Essas variações das especificações podem ser determinantes para a obtenção de resultados. Conforme Ziemkiewicz et al. (1997), os canais abertos de calcário devem apresentar inclinações superiores a 10% afim de diminuir a blindagem do calcário e comprimento razoável para permitir tempo de

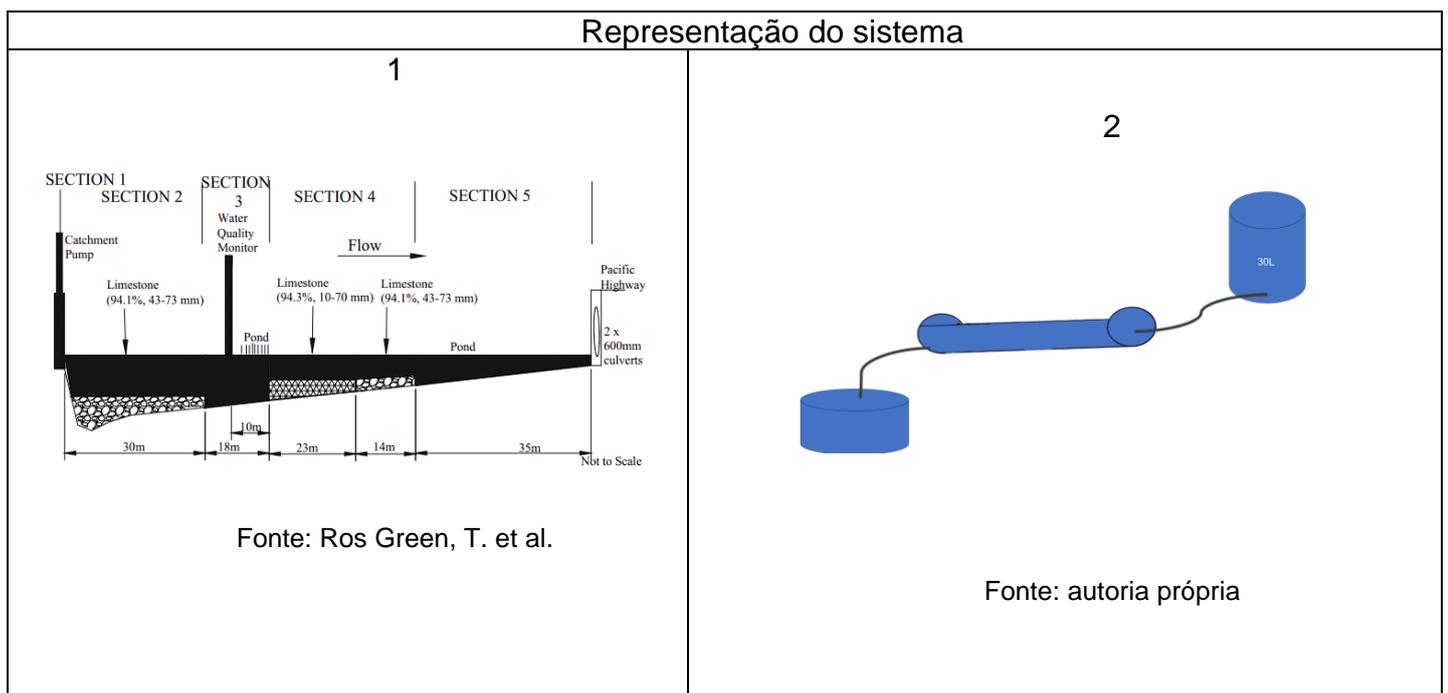
residência suficiente ao sistema. Na tabela 6 é possível observar as especificações usadas em cada estudo e na tabela 7 o croqui do sistema utilizado.

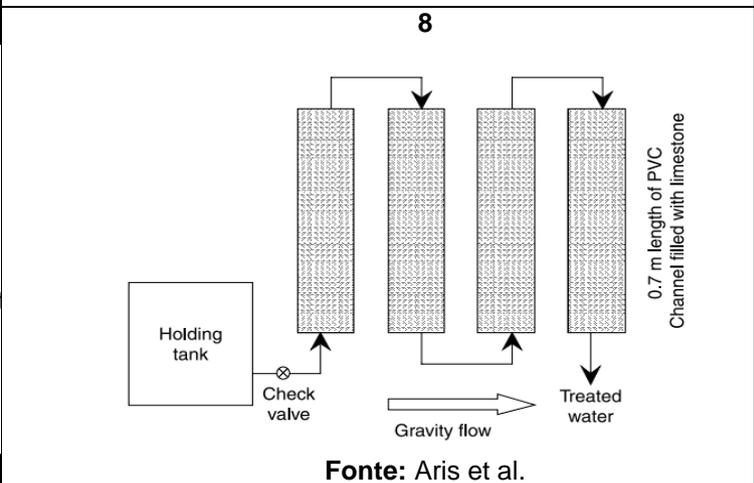
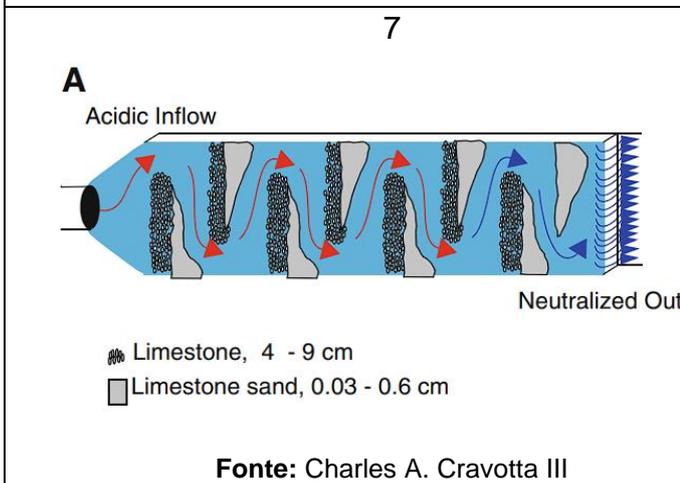
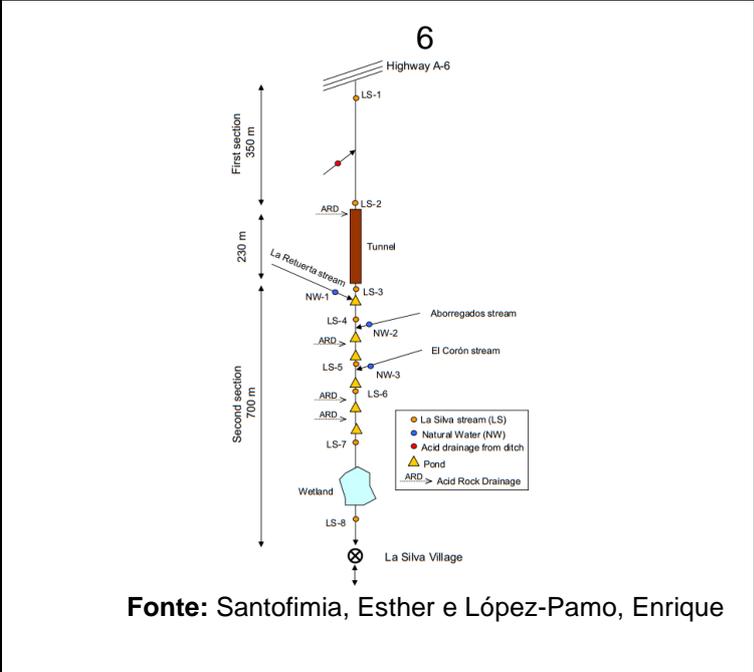
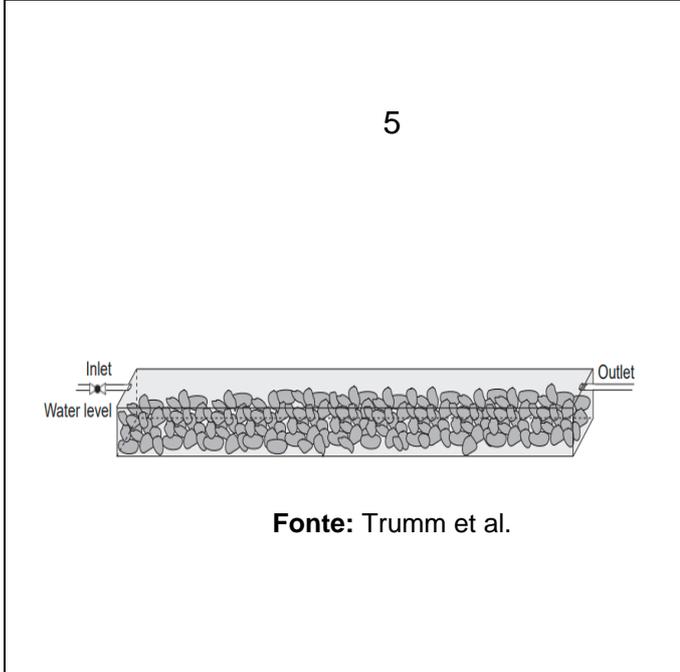
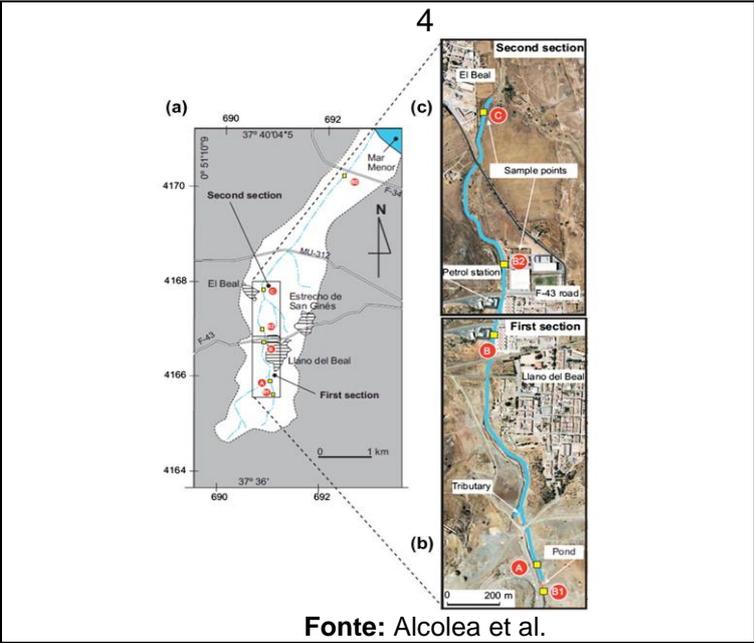
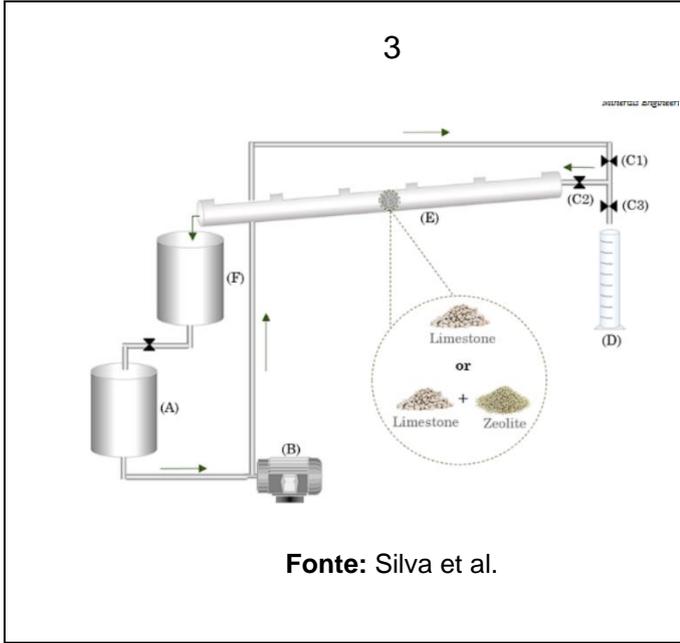
**Tabela 6** - Especificações dos sistemas de teste.

Artigo	Especificações do sistema (comprimento x largura)	Declividade do sistema (%)
1	120 m x (largura não informada)	Não informado
2	0,67 m x 0,2 m	1% - 2%
3	3 m x 0,15 m	10%
4	Trecho 1: 1986 m x 6 m Trecho 2: 1986 m x 12 m	4,6%
5	2,7 m x 0,5m	Não informado
6	1050 m x 2m 1050 m x 4 m	16%
7	Não informado	Não informado
8	0,7 m x 0,2 m	Não informado

**Fonte:** autoria própria

**Tabela 7** - Croqui dos sistemas de teste.





Fonte: autoria própria

Após a análise dos sistemas utilizados para os testes, partiu-se para o julgamento da eficiência dos sistemas em relação aos parâmetros selecionados: pH, Fe, Al e Mn. O aumento do pH foi o primeiro resultado comparado entre os estudos e conforme pode ser observado na tabela 8. O pH aumentou em 7 dos 8 artigos analisados, evidenciando que os CAC são uma alternativa para o aumento do pH.

A eficiência dos sistemas na elevação do pH mostrou resultados positivos para 7 dos 8 estudos analisados. A grande variação da eficiência do pH existente nos resultados tabelados abaixo deve-se principalmente ao tempo de residência de cada sistema, do tamanho das partículas de calcário e a quantidade utilizada. A taxa de aumento do pH depende do tamanho e da quantidade de calcário (em termos de massa) submersa na água (ARIS et al., 2007). Ainda, segundo Alcolea et al. (2012), a qualidade da água em relação ao pH tende a melhorar conforme aumenta a distância do tratamento.

O estudo 7 foi o único que se mostrou ineficiente porque o sistema acabou elevando o pH da DAM em apenas 0,5 unidades. Segundo Cravotta III, Charles A. (2010), esse resultado se dá devido a instalação de um dreno anóxico de calcário a montante do CAC, que produz água quase neutra antes de chegar no CAC baixando sua eficiência.

**Tabela 8** - pH pré-tratamento e pós-tratamento

<b>Artigo</b>	<b>pH pré-tratamento</b>	<b>pH pós-tratamento</b>
1	3,7 (menor registrado)	4,4 (menor registrado)
2	4,09 - Bekok Intake 3,27 - Sembrong Lagoon	7,22 - Bekok Intake 6,87 - Sembrong Lagoon
3	3,3	7,3
4	2,1 - 2,7	2,6 - 4,3
5	2,8 - 3,4	5,0 - 6,0
6	2,5 - 2,8	3,7 - 4,3
7	Sistema não eficiente	Sistema não eficiente
8	2,75	5,2

**Fonte:** autoria própria

Na análise dos íons de Fe, apresentada na tabela 9, em 6 dos 8 estudos houve a diminuição na concentração desse analito, tendo um estudo onde o Fe não foi analisado e apenas 1 sistema não foi considerado eficiente para o tratamento. Esses dados evidenciam que o sistema CAC é eficiente para a remoção de Fe (TRUMM et al., 2008 e SANTOFIMIA, E. e LÓPEZ-PAMO, E., 2016).

**Tabela 9** - Eficiência dos sistemas na remoção de Fe.

Artigo	Eficiência na remoção de Fe	Artigo	Eficiência na remoção de Fe
1	92%	5	95%
2	89% 84%	6	83% - 99,6% 97% - 99,6%
3	91%	7	Sistema não eficiente
4	99%	8	Parâmetro não analisado

**Fonte:** autoria própria

Segundo Alcolea, A. et al. (2012), o aumento no tempo de residência acabou diminuindo a concentração de todos os metais em seu estudo após a declividade ser alterada. Porém seu desempenho depende de uma faixa ideal de declividade, sendo acima de 12% o indicado, fazendo com que a velocidade do fluxo de água mantenha os metais precipitados em suspensão impedindo a deposição no calcário, deixando sua superfície do calcário livre para sua ação (SKOUSEN E ZIEMKIEWICZ, 2005).

Para o analito Manganês, conforme é mostrado na tabela 10, é possível observar que o sistema de CAC não foi eficiente em sua remoção. Isso porque o Mn não irá precipitar eficazmente até que o pH exceda 9. Quimicamente, o calcário poderá elevar o pH da água no máximo até aproximadamente 8,0 (ROS GREEN, T. et al., 2008 e SILVA, D. et al, 2021). Ainda, segundo Silva et al. (2021), pode ocorrer uma leve coprecipitação de íons Mn com Fe quando as concentrações de Fe são 4 vezes maiores que de Mn. Isso pode explicar o porquê há alguns resultados significantes de remoção de Mn nos estudos 1, 4 e 5.

**Tabela 10** - Eficiência dos sistemas na remoção de Mn.

Artigo	Eficiência na remoção de Mn
1	79%
2	Parâmetro não analisado
3	Sistema não eficiente
4	62,8%

Continua na próxima

Continuação da tabela

5	74%
6	Sistema não eficiente
7	Sistema não eficiente
8	Parâmetro não analisado

**Fonte:** autoria própria

O alumínio foi analisado por 5 dos 8 estudos analisados e conforme pode ser visto na tabela 11, podemos considerar que o sistema de CAC é eficiente para a remoção do Al. Segundo Ros Green, T. et al. (2008) e Trumm, D., et al. (2008) a maior diminuição na concentração de alumínio presente na drenagem ocorre quando o calcário ainda é fresco, sendo suficiente inicialmente, porém a remoção de Al se torna ineficaz no final do ensaio. O que torna o calcário ineficiente ao longo do tempo para a remoção do Al é o acúmulo de sedimento e precipitado sobre o calcário, que faz com que se forme a chamada “blindagem” do calcário (ZIEMKIEWICZ et al, 1997, ALCOLEA et al. 2012 e TRUMM et al 2008).

Conforme Aris et al. (2007) os sistemas constituídos com calcário de menor tamanho possuem maior eficácia.

**Tabela 11** - Eficiência dos sistemas na remoção de Al.

Artigo	Eficiência na remoção de Al
1	95%
2	Parâmetro não analisado
3	89%
4	90%
5	99%
6	43% – 60% 65% - 95%
7	Sistema não eficiente
8	Parâmetro não analisado

**Fonte:** autoria própria

O que torna o calcário ineficiente ao longo do tempo para a remoção do Al é o acúmulo de sedimento e precipitado sobre o calcário, que faz com que se forme a chamada “blindagem” do calcário (ZIEMKIEWICZ et al. 1997, ALCOLEA et al. 2012 E TRUMM et al., 2008). Conforme Aris et al. (2007), os sistemas constituídos com calcário de menor tamanho possuem maior eficácia.

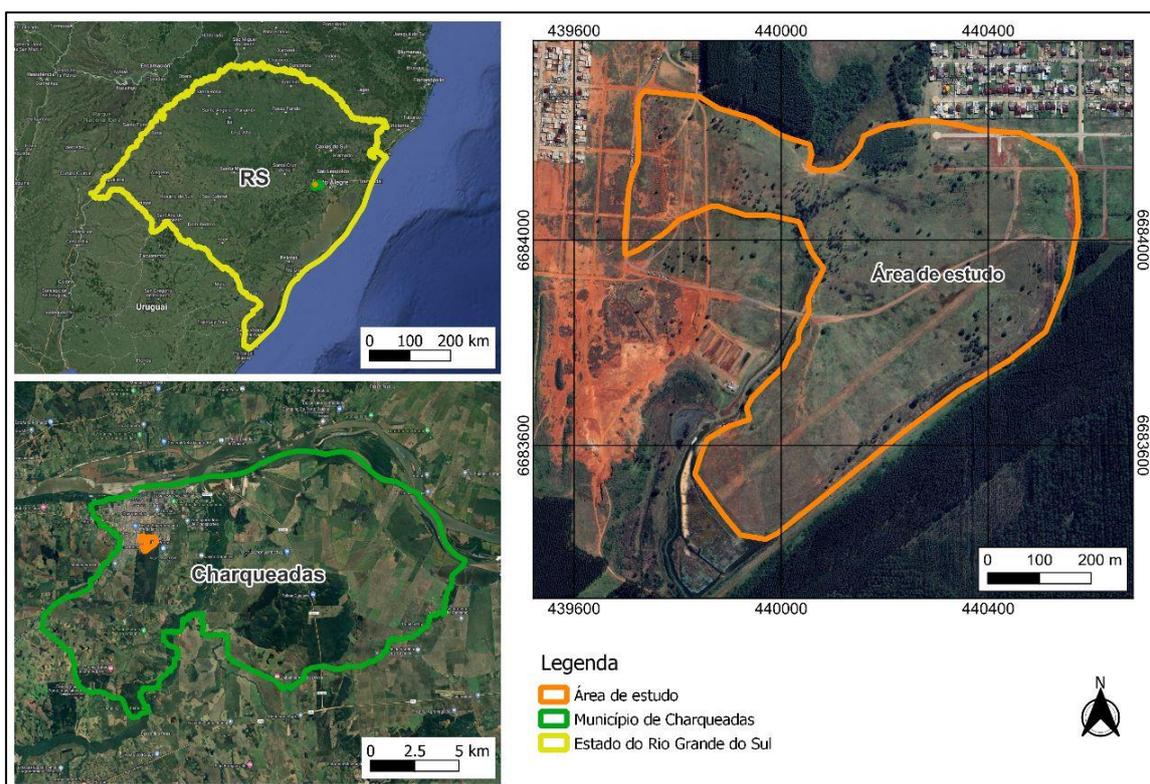
Os artigos que avaliaram a eficácia dos canais de calcário abertos e compararam com outros sistemas foram os artigos 2 e 5 (tabela 4). Para Kusin et al.

(2013) o CAC foi eficaz, no entanto o dreno de calcário anóxicos geraram uma elevação no pH maior e o CAC possui uma grande suscetibilidade a blindagem do calcário. Já para Trumm et al. (2008), os CAC não seriam uma alternativa apropriada para o tratamento devido ao impacto ambiental que poderia ser gerado ao construir um sistema de CAC com o comprimento adequado para obter um bom tempo de residência na área.

### 5.3. RESULTADOS DA ANÁLISE GEOESPACIAL

A área do Capão da Roça foi avaliada por meio de ferramentas SIG, com o uso do programa Quantum GIS - QGIS. A figura 11 apresenta a localização da área de estudo.

**Figura 11** - Localização da área de estudo

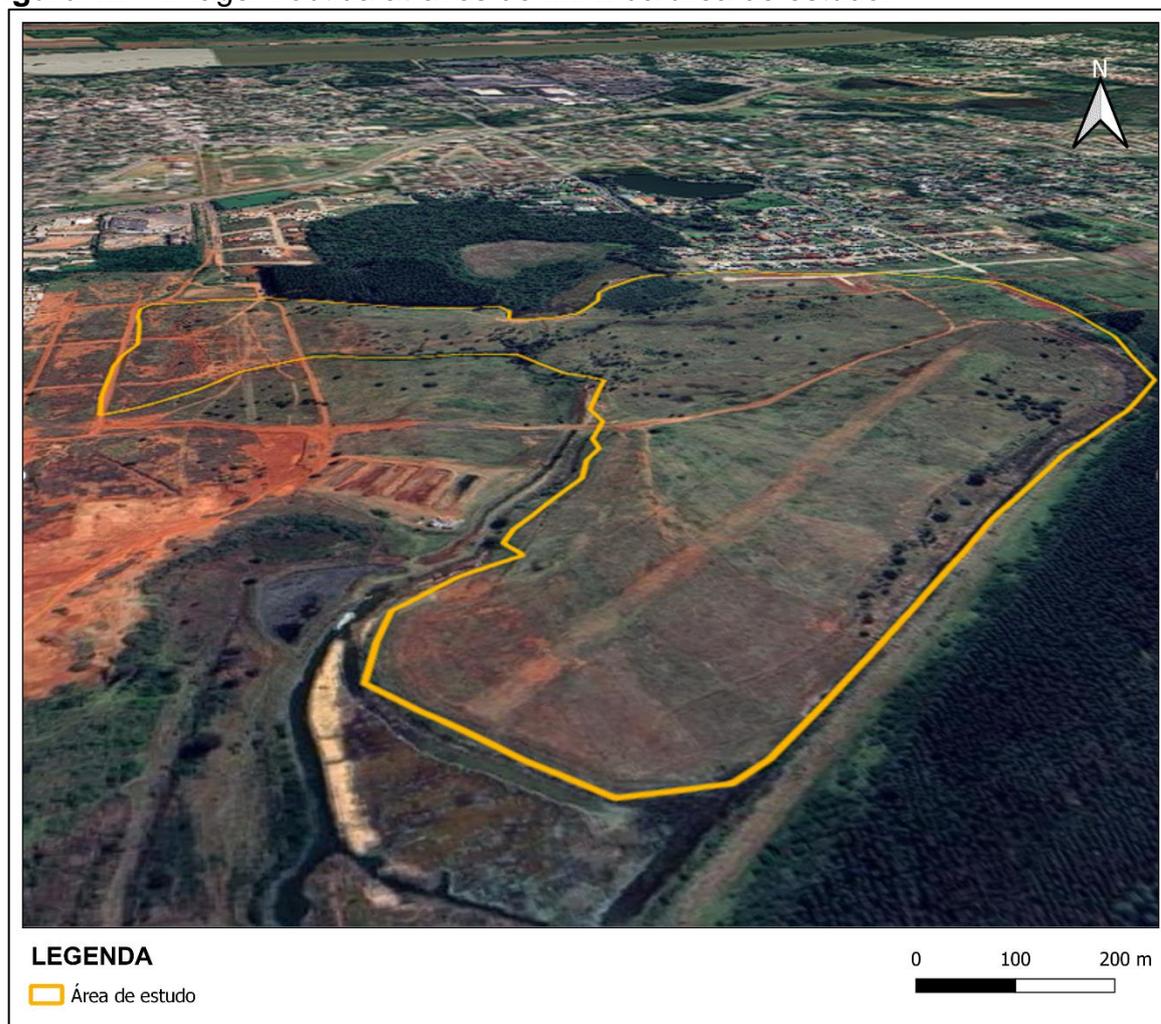


Fonte: autoria própria

Através do MDE da área, foi possível observar que o terreno não possui declividade natural para a implementação do sistema CAC. O MDE disponibilizado pelo Topodata – INPE deve ser julgado com ressalvas pois permite a visualização da

cota do terreno apenas a cada 30 metros. Dessa forma, é possível observar na figura 12, que o terreno onde se encontra a área de estudo, é regular sendo praticamente plano.

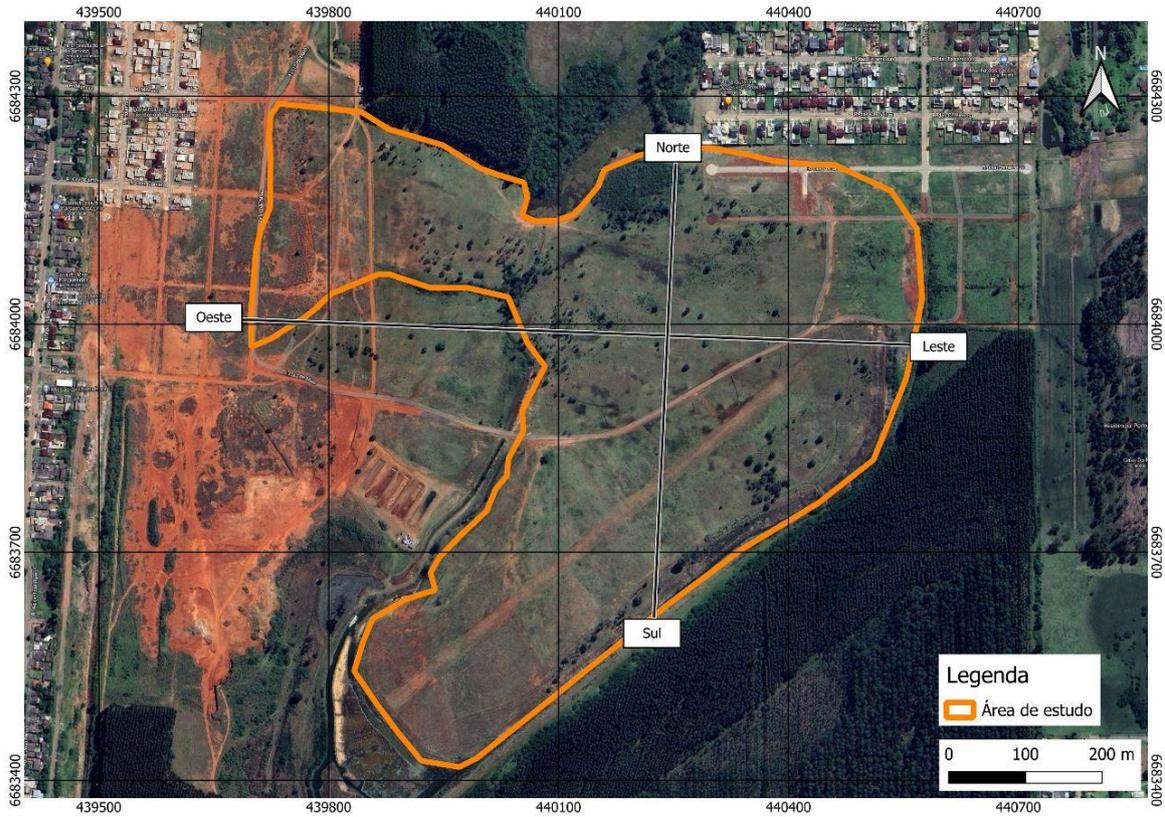
**Figura 12** – Imagem obtida através de MDE da área de estudo.



**Fonte:** autoria própria

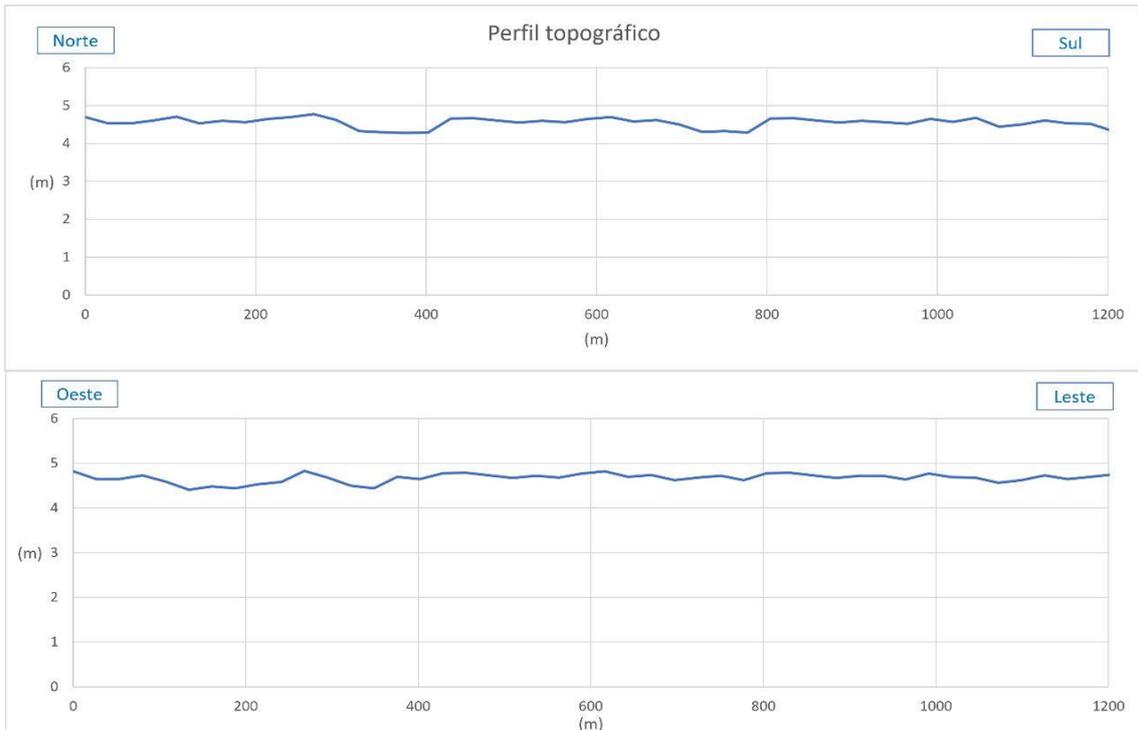
Para corroborar com os resultados do modelo em 3D, também houve a produção do perfil topográfico da região conforme os cortes de perfil apresentados na figura 13 e a seguir na figura 14 o perfil da topografia.

**Figura 13 - Cortes de perfil adotados.**



Fonte: autoria própria

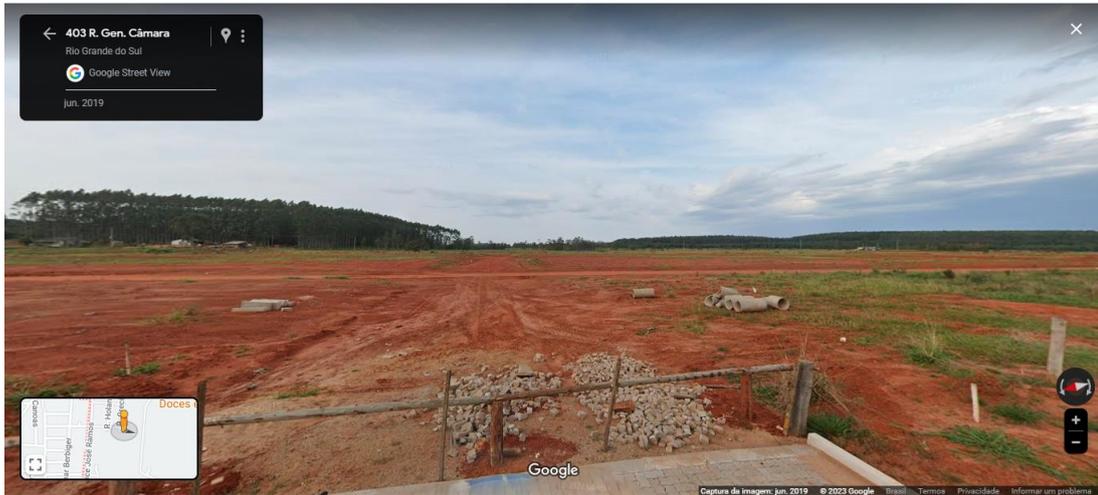
**Figura 14 - Perfil topográfico da área de estudo.**



Fonte: autoria própria

Para uma melhor visualização do terreno da área de estudo a figura 15, representa a imagem do local do ponto de vista do terreno, disponibilizada pelo Google Street View em conjunto com a figura 16 que representa o ângulo de visão da figura 15.

**Figura 15** - Imagem do ângulo de visão do terreno.



Fonte: autoria própria

**Figura 16** - Representação do ângulo de visão do terreno



Fonte: autoria própria

## 6. CONCLUSÃO

Este presente estudo analisou a tendência mundial nas pesquisas para obtenção de sistemas de tratamento passivos eficientes para o controle da drenagem ácida de minas, com enfoque nos sistemas de canais abertos de calcário. Para a obtenção desses dados foram analisados 434 estudos científicos que foram publicados entre os anos de 2000 e 2023. Destes, 8 artigos foram selecionados e analisados.

Com a pesquisa foi possível apurar que os sistemas de canais abertos de calcários não são um foco de pesquisas mundiais nos últimos anos entre os sistemas passivos de tratamento de DAM.

De acordo com o banco de dados acadêmicos do Web of Science, os países que mais publicaram artigos sobre CAC foram, em ordem decrescente, Estados Unidos da América, Canadá, Reino Unido, Brasil e Austrália, porém em nossa análise tivemos a Espanha e a Malásia como os países que mais publicou, com dois artigos. Alcolea, A., et al. e Charles A. Cravotta III foram os autores mais citados.

Os resultados das pesquisas com as palavras-chave e operadores booleanos, mencionados na tabela 1, foram bastante expressivos, resultando em muitos resultados. Contudo, após análise criteriosa, a revisão da literatura mostrou que os estudos científicos que avaliam a eficiência do sistema de tratamento passivo denominado canais abertos de calcário são poucos comparados a outros sistemas passivos.

Em relação aos resultados qualitativos dos estudos científicos selecionados, 7 dos 8 analisados foram considerados eficientes, principalmente no aumento do pH e na remoção de Fe e Al da DAM, onde foi possível alcançar a eficiência de 99% em ambos os analitos. Os sistemas que apresentaram melhor desempenho foram aqueles em que o tempo de residência era considerado adequado, sendo esse o principal fator para sua eficácia. A fim de manter o sistema eficiente por longos períodos é imprescindível que haja uma Declividade no sistema para evitar a blindagem do calcário.

Para os artigos onde os autores compararam os CAC com outros meios de tratamento, apesar de optarem por outros sistemas, seus estudos obtiveram

resultados bons e essa opção se deu por motivos de aplicabilidade in situ dessa técnica.

Portanto, para o caso do Capão da Roça o sistema CAC pode não alcançar a eficiência mencionada nos artigos estudados nessa revisão devido a declividade natural do terreno ser baixa ou praticamente nula, o que poderia causar a blindagem do calcário. Para usar esse sistema no local, deverão ser implementadas obras de adequação para comportar o canal nos padrões constatados nesse estudo, o que poderá gerar mais impacto ao meio físico e biótico da área e tornando aplicação do CAC mais dispendioso.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCOLEA, A. *et al.* Heavy metal removal of intermittent acid mine drainage with an open limestone channel. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 86–98, 2012.

ARIS, Azmi *et al.* Treatment of acidic water from Bekok River using open limestone channel. **Water Science & Technology Water Supply**, [s. l.], v. 7, p. 65–71, 2007.

Biblioteca Central Irmão José Otão – PUCRS. 2020. Disponível em: <https://biblioteca.pucrs.br/apoio-a-pesquisa/bibliometria/scimago-journal-rank-sjr/>.  
Acessado em: março de 2023.

Biblioteca Central – FURG. Disponível em: [https://biblioteca.furg.br/images/Tutorial\\_Mendeley.pdf](https://biblioteca.furg.br/images/Tutorial_Mendeley.pdf)  
Acessado em: março de 2023.

CRAVOTTA, Charles A. Abandoned Mine Drainage in the Swatara Creek Basin, Southern Anthracite Coalfield, Pennsylvania, USA: 2. Performance of Treatment Systems. **Mine Water and the Environment**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 200–216, 2010.  
Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10230-010-0113-5>.

CRAVOTTA, Charles. Size and Performance of Anoxic Limestone Drains to Neutralize Acidic Mine Drainage. **Journal of environmental quality**, [s. l.], v. 32, p. 1277–1289, 2003.

DE MELLO, Jaime W V *et al.* **Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina**. Belo Horizonte - MG: [s. n.], 2014.

FERREIRA, Renata A *et al.* Assessing local acid mine drainage impacts on natural regeneration-revegetation of São Domingos mine (Portugal) using a mineralogical, biochemical and textural approach. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 755, p. 142825, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720363543>.

FORD, K L. Passive Treatment Systems for Acid Mine Drainage. *Em.*, 2003. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2003.

FU, Fenglian; WANG, Qi. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 92, n. 3, p. 407–418, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710004147>.

GAIKWAD, R., SAPKAL, R. and SAPKAL, V., "Removal of Copper Ions from Acid Mine Drainage Wastewater Using Ion Exchange Technique: Factorial Design Analysis," *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 2 No. 11, 2010, pp. 984-989. doi: [10.4236/jwarp.2010.211117](https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.211117).

GAO, Pin *et al.* Characterization of iron-metabolizing communities in soils contaminated by acid mine drainage from an abandoned coal mine in Southwest

China. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 26, n. 10, p. 9585–9598, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04336-6>.

GIRDHAR, Madhuri; MOHAN, Anand. **ACID MINE DRAINAGE: AN INTRODUCTION AND TREATMENT STRATEGIES Toxicity of Pesticides and Herbicides View project Medicinal Plants View project**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/334657525>.

GRAY, N F. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. **Environmental Geology**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 62–71, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s002540050133>.

GREEN, Ros *et al.* Effectiveness of an Open Limestone Channel in Treating Acid Sulfate Soil Drainage. **Water, Air, and Soil Pollution**, [s. l.], v. 191, n. 1, p. 293–304, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9625-z>.

IGHALO, Joshua O *et al.* A review of treatment technologies for the mitigation of the toxic environmental effects of acid mine drainage (AMD). **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 157, p. 37–58, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582021006042>.

Guia de Referência – CAPES. 2023. Disponível em: [https://www.periodicos.capes.gov.br/images/documents/ScienceDirect\\_Guia%20de%20refer%C3%Aancia%20r%C3%A1pida\\_28.07.2016\\_pdf.pdf](https://www.periodicos.capes.gov.br/images/documents/ScienceDirect_Guia%20de%20refer%C3%Aancia%20r%C3%A1pida_28.07.2016_pdf.pdf)  
Acessado em: março de 2023.

JOHNSON, D. Barrie; HALLBERG, Kevin B. Acid mine drainage remediation options: A review. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 338, n. 1-2 SPEC. ISS., p. 3–14, 2005.

KAUR, Gurkiran *et al.* Alternative neutralisation materials for acid mine drainage treatment. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 22, p. 46–58, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714417307651>.

KAUR, Harpreet; GIRDHAR, Madhuri; MOHAN, Dr. ACID MINE DRAINAGE: AN INTRODUCTION AND TREATMENT STRATEGIES. **Pollution Research**, [s. l.], v. 37, p. 83–91, 2018.

KEFENI, Kebede K; MSAGATI, Titus A M; MAMBA, Bhekie B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 151, p. 475–493, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617305164>.

KIRBY, Carl S; CRAVOTTA, Charles A. Net alkalinity and net acidity 1: Theoretical considerations. **Applied Geochemistry**, [s. l.], v. 20, n. 10, p. 1920–1940, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088329270500137X>.

KUSIN, Faradiella Mohd.; ARIS, Azmi Bin; MISBAH, Amiza Shayeeda Ahmad. A comparative study of anoxic limestone drain and open limestone channel for acidic raw water treatment. *Em: , 2013. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2013.*

MIGASZEWSKI, Zdzisław M; GAŁUSZKA, Agnieszka; DOŁĘGOWSKA, Sabina. Extreme enrichment of arsenic and rare earth elements in acid mine drainage: Case study of Wiśniówka mining area (south-central Poland). **Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)**, [s. l.], v. 244, p. 898—906, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.106>.

NAIDU, Gayathri *et al.* A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage. **Environmental pollution**, [s. l.], v. 247, p. 1110–1124, 2019a.

NAIDU, Gayathri *et al.* **A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019b.

Os 5 principais sites para encontrar artigos científicos. Dot.lib. 2020. Disponível em: <https://dotlib.com/blog/os-5-principais-sites-para-encontrar-artigos-cientificos>  
Acessado em: março de 2023.

ROSE, Arthur; LOURENSO, Fara. EVALUATION OF TWO OPEN LIMESTONE CHANNELS FOR TREATING ACID MINE DRAINAGE. **Journal American Society of Mining and Reclamation**, [s. l.], v. 2000, p. 236–247, 2000.

SANTOFIMIA, Esther; LÓPEZ-PAMO, Enrique. Performance of an open limestone channel for treating a stream affected by acid rock drainage (León, Spain). **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 23, n. 14, p. 14502–14517, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6562-z>.

SANTOMARTINO, Silvana; WEBB, John A. Estimating the longevity of limestone drains in treating acid mine drainage containing high concentrations of iron. **Applied Geochemistry**, [s. l.], v. 22, n. 11, p. 2344–2361, 2007a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292707001746>.

SANTOMARTINO, Silvana; WEBB, John A. Estimating the longevity of limestone drains in treating acid mine drainage containing high concentrations of iron. **Applied Geochemistry**, [s. l.], v. 22, n. 11, p. 2344–2361, 2007b.

SciELO: conheça a principal biblioteca digital da América Latina. Meltzer, 2021. Disponível em: <https://blog.meltzer.com/scielo-scientific-electronic-library-online/>  
Acessado em: março de 2023.

SILVA, Daniela Da *et al.* **AVALIAÇÃO TEMPORAL DA GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS EM UM DEPÓSITO SUPERFICIAL DE REJEITO DE CARVÃO – O CASO DO CAPÃO DA ROÇA – RS.** [S. l.: s. n.], 2021.

SILVA, Daniela Da; *et al.* **VI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL AVALIAÇÃO TEMPORAL DA GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS EM**

**UM DEPÓSITO SUPERFICIAL DE REJEITO DE CARVÃO-O CASO DO CAPÃO DA ROÇA-RS.** [S. l.: s. n.], 2021.

SILVA, Daniela; WEBER, Cristiano; OLIVEIRA, Cristiane. Neutralization and uptake of pollutant cations from acid mine drainage (DAM) using limestones and zeolites in a pilot-scale passive treatment system. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 170, p. 107000, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687521002296>.

SKOUSEN, Jeff; ZIEMKIEWICZ, Paul. Performance of 116 passive treatment systems for acid mine drainage. **22nd American Society of Mining and Reclamation Annual National Conference 2005**, [s. l.], v. 2, 2005.

SKOUSEN, Jeffrey G; ZIEMKIEWICZ, Paul F; MCDONALD, Louis M. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. **The Extractive Industries and Society**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 241–249, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214790X18302156>.

SKOUSEN, Jeffrey G.; ZIEMKIEWICZ, Paul F.; MCDONALD, Louis M. **Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019a.

SKOUSEN, Jeffrey G.; ZIEMKIEWICZ, Paul F.; MCDONALD, Louis M. **Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019b.

TRINDADE, Roberto. Tecnologia de sistemas passivos para o tratamento de drenagem ácida de minas. Rio de Janeiro CETEM/MCT 2004; 52p.

TRUMM, D *et al.* Using pilot trials to test geochemical treatment of acid mine drainage on Stockton Plateau. **New Zealand Journal of Geology and Geophysics**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 175–186, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00288300809509858>.

TRUMM, D; WATTS, M. Results of small-scale passive system trials to treat acid mine drainage, West Coast Region, South Island, New Zealand. **New Zealand Journal of Geology and Geophysics**, [s. l.], v. 53, n. 2–3, p. 227–237, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00288306.2010.509041>.

VIEIRA, Bárbara Franco *et al.* Biological treatment of mine drainage — scenario updated, perspectives, and recommendations for future works. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 69–76, 2021.

ZIPPER, C; SKOUSEN, J; JAGE, C. **Passive Treatment of Acid-Mine Drainage**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: [www.ext.vt.edu](http://www.ext.vt.edu).

ZIPPER, Carl; SKOUSEN, Jeff; JAGE, C. **Passive Treatment of Acid-Mine Drainage. Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils: Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation**, [s. l.], 2014.