

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CURSO DE GEOLOGIA**

**AYRTON CARLOS MENDES**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO SOBRE AS  
DRENAGENS DA REGIÃO DAS CAIEIRAS NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA  
DO SUL - RS**

**Caçapava do Sul  
2024**

**AYRTON CARLOS MENDES**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO SOBRE AS  
DRENAGENS DA REGIÃO DAS CAIEIRAS NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA  
DO SUL - RS**

**Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado ao Curso de Geologia da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do  
Título de Bacharel em Geologia.**

**Orientadora: Jessica Weiler**

**Coorientador: Guilherme P. Casa Nova**

**Caçapava do Sul  
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

C538a Carlos Mendes, Ayrton

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO SOBRE AS  
DRENAGENS DA REGIÃO DAS CAIEIRAS NO MUNICIPIO DE CAÇAPAVA DO  
SUL - RS / Ayrton Carlos Mendes.

57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade  
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2024.

"Orientação: Jessica Weiler".

1. Drenagem neutra de mina. 2. Calcário. 3. Drenagem  
alcalina. 4. Mármore. 5. Caçapava do Sul. I. Título.

**Ayrton Carlos Mendes**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MINERAÇÃO DE  
CALCÁRIO SOBRE AS DRENAGENS DA REGIÃO  
DAS CAIEIRAS NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO  
SUL - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Geologia da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 09 de dezembro de 2024

Banca examinadora:

---

Profa. Dra. Jessica Weiler  
Orientadora  
Universidade Federal do Pampa

---

Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas  
Universidade Federal do Pampa

---

Prof. Msc. Luiz Delfino Teixeira Labarnaz  
Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **LUIZ DELFINO TEIXEIRA ALBARNAZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2024, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JESSICA WEILER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/12/2024, às 15:39, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 09/12/2024, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1616161** e o código CRC **49920149**.

## **AGRADECIMENTOS**

Meu primeiro agradecimento vai para minha irmã Soraia, a pessoa de maior luz na minha vida.

Quero agradecer também à família linda que construí: Juliana e meu pequeno, Ravi. Eles chegaram durante este período caótico da graduação e me ensinaram o verdadeiro significado de responsabilidade e amor. Além claro, da nossa cachorrinha Maya.

Sou grato também aos meus pais, Adilto e Joana, que, mesmo com minha saída repentina em busca deste sonho, nunca deixaram de me apoiar.

Agradeço à professora Jéssica por aceitar a orientação e ao técnico Guilherme, coorientador, pela ajuda imensurável.

Sou grato aos amigos de curso que levarei para sempre comigo — Will, Guto, Gabi, Nonato, Bruno, Anna, Nãna e Roberto — pelos melhores churrascos e risadas. Também agradeço aos amigos da minha cidade natal, Felipe, Júlio e Erick, por todo o apoio e parceria desde a nossa infância.

Minha gratidão vai à Universidade Federal do Pampa, que é gratuita e de extrema qualidade, assim como a todos os funcionários que a fazem funcionar. E principalmente aos professores da Geologia que sempre foram pacientes e solícitos.

Agradeço ao Gelson e ao Norton da empresa Inducal, que cedeu material e aceitou que fizesse as coletas na mina, tornando esse trabalho possível.

## RESUMO

Este estudo analisa os impactos da mineração de calcário sobre a qualidade da água na região das Caieiras, em Caçapava do Sul, considerando diferentes contextos geológicos e antrópicos. Foram investigados quatro pontos de amostragem: dois próximos à frente de lavra, um a jusante da Cascata do Salso e outro a montante, utilizado como controle. Os resultados revelam que os pontos próximos à cava apresentaram valores elevados de condutividade elétrica, dureza e alcalinidade, indicando a influência direta das atividades mineradoras, especialmente no ponto 2, onde a exposição do mármore e a retirada da cobertura vegetal acentuaram as alterações químicas. O ponto 3, localizado fora da área de influência direta, apresentou valores intermediários, sugerindo a diluição dos impactos. Por outro lado, o ponto 4 demonstrou características de água natural, com baixa dureza, alcalinidade e condutividade, reforçando sua utilização como controle. As análises indicam que a mineração contribui significativamente para o aumento da concentração de íons dissolvidos e minerais nas áreas próximas, enquanto pontos mais distantes mostram menor interferência, graças à diluição e à ausência de atividades diretas. Esses resultados destacam a necessidade de estratégias de manejo ambiental que minimizem os impactos das atividades mineradoras e garantam a preservação dos recursos hídricos na região. O estudo reforça a importância de monitorar continuamente a qualidade da água e de considerar fatores como composição mineral do solo, topografia e condições climáticas, que também influenciam as características químicas das drenagens.

Palavras-Chave: Drenagem neutra de mina; Calcário; Drenagem alcalina; Mármore; Caçapava do Sul.

## **ABSTRACT**

This study analyzes the impacts of limestone mining on water quality in the Caieiras region, Caçapava do Sul, considering different geological and anthropogenic contexts. Four sampling points were investigated: two near the mining front, one downstream from the Cascata do Salso, and another upstream, used as a control. The results reveal that points close to the mining pit showed elevated values of electrical conductivity, hardness, and alkalinity, indicating the direct influence of mining activities, especially at point 2, where the exposure of marble and the removal of vegetation intensified chemical alterations. Point 3, located outside the direct area of influence, presented intermediate values, suggesting the dilution of impacts. Conversely, point 4 exhibited characteristics of natural water, with low hardness, alkalinity, and conductivity, reinforcing its use as a control. The analyses indicate that mining significantly contributes to the increase in dissolved ions and minerals in nearby areas, while more distant points show reduced interference due to dilution and the absence of direct activities. These results highlight the need for environmental management strategies to minimize the impacts of mining activities and ensure the preservation of the region's water resources. The study emphasizes the importance of continuous water quality monitoring and considering factors such as soil mineral composition, topography, and climatic conditions, which also influence the chemical characteristics of the water bodies.

**Keywords:** Neutral mine drainage; Limestone; Alkaline drainage; calcareous.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa geológico do município de Caçapava do Sul .....	16
Figura 2- Faixa de pH e características de drenagem de minas .....	25
Figura 3- Mapa de localização das Caieiras .....	27
Figura 4- Aparelho peagômetro .....	29
Figura 5- Aparelho condutivímetro .....	30
Figura 6- Fluxograma da análise de alcalinidade.....	31
Figura 7- Análise de alcalinidade por titulometria .....	31
Figura 8- Análise de dureza por titulometria .....	33
Figura 9- Centro da cava ativa (P1).....	37
Figura 10- Ponto de coleta (P2).....	38
Figura 11- Jusante da Cascata do Salso (P3) .....	39
Figura 12- Cascata do Salso (P4) .....	39
Figura 13 Distribuição dos valores de pH.....	44
Figura 14- Valores de Condutividade elétrica .....	45
Figura 15- Distribuição dos valores de alcalinidade .....	47
Figura 16- Distribuição dos valores de Dureza .....	48
Figura 17- Distribuição do teor de cálcio .....	50
Figura 18- Distribuição do teor de magnésio .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tabela de r, classificação de valores de correlação.....	35
Tabela 2- Tabela com as coordenadas dos pontos amostrados e cedidos.....	40
Tabela 3- Matriz de correlação para as amostras coletadas .....	41
Tabela 4- Matriz de correlação para as amostras cedidas .....	42
Tabela 5- Valores de pH.....	43
Tabela 6- Valores de condutividade elétrica.....	45
Tabela 7- Valores de alcalinidade .....	46
Tabela 8- Valores de Dureza .....	48
Tabela 9- Valores de Cálcio .....	49
Tabela 10- Valores de magnésio.....	51
Tabela 11- Valores típicos das águas superficiais no Rio Grande do Sul e em Caçapava do Sul .....	54

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	13
2.1 Objetivo Geral .....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	14
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
4.1 Contexto geológico de Caçapava do Sul .....	15
4.1.1 Complexo Metamórfico Passo Feio .....	17
4.1.2 Complexo Granítico Caçapava do Sul.....	18
4.2 Hidrogeologia e geoquímica .....	18
4.3 Influência da geologia nos parâmetros de qualidade dos recursos hídricos ...	19
4.4 Parâmetros químicos de qualidade da água relevantes ao estudo .....	20
4.5 Origem do calcário e do mármore .....	22
4.6 Mineração do calcário e impactos ambientais.....	23
4.7 Drenagens de mina e drenagem básica de mina.....	24
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	26
5.1 Localização da área de estudo .....	26
5.2 Campanha de amostragem .....	28
5.3 Determinação de pH .....	28
5.4 Condutividade Elétrica.....	29
5.5 Alcalinidade .....	30
5.6 Dureza.....	32
5.7 Cálcio.....	34
5.8 Magnésio .....	34
5.9 Análise de dados .....	35
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	37
6.1 Descrição dos pontos de amostragem.....	37
6.2 pH.....	43
6.3 Condutividade elétrica .....	44
6.4 Alcalinidade .....	46
6.5 Dureza.....	47
6.6 Cálcio.....	49
6.7 Magnésio .....	50
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	55
REFERÊNCIAS .....	56

## 1 INTRODUÇÃO

As águas naturais apresentam diferentes composições e origens, resultantes da diversidade dos sistemas hidrológicos, que podem ser alimentados por chuvas, sistemas hidrogeológicos, entre outros. Por se tratar de um sistema aberto, a água incorpora diversos componentes químicos. A qualidade da água é definida por condições naturais e por interferências humanas (Von Sperling, 2014).

Em condições naturais, a água pode ser alterada pelo escoamento superficial, percolação da água no solo ou dissolução de minerais de rochas, resultando em carreamento de partículas e íons dissolvidos. A interferência humana decorre do uso e ocupação do solo, por exemplo pelo lançamento de efluentes domésticos, atividades industriais e uso de defensivos agrícolas (Von Sperling, 2014). É importante que se conheça as condições naturais para melhor entender o que é natural e o que é decorrente das atividades humanas na área de interesse de um estudo (Rodrigues e Nalini, 2009).

A atividade de mineração é um exemplo de atividade que pode impactar os corpos hídricos na área onde está inserida. À medida que a mineração avança, vários tipos de resíduos – gasosos, sólidos e líquidos – são liberados no ambiente. Esses resíduos podem interagir quimicamente com o ar, a água e o solo, apresentando um impacto potencialmente maior do que os processos naturais (Sánchez, 2007; Kopezinski, 2000).

Alguns efluentes e drenagens provenientes de minas podem ser ácidas ou básicas e gerar um passivo ambiental significativo, mas isso depende do tipo de rocha que está sendo prospectada. Drenagens básicas estão associadas a rochas com alto teor de cálcio, como mármore ou calcários, enquanto drenagens ácidas estão relacionadas a minerais sulfetados (Nordstrom et al., 2015).

A drenagem ácida de mina (DAM) é um dos problemas ambientais mais persistentes e difíceis de mitigar na indústria da mineração (Becker et al, 2023). Esse fenômeno ocorre quando minerais sulfetados, como a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), presentes nas rochas expostas e nos rejeitos de mineração, reagem com o oxigênio e a água, resultando na formação de ácido sulfúrico e metais dissolvidos. Esse processo químico provoca uma drástica redução do pH da água, frequentemente atingindo

valores entre 1,5 e 2,0, e elevadas concentrações de sulfato e metais dissolvidos, como alumínio, cobre, ferro, magnésio e zinco (Kefeni, 2017).

A drenagem básica ocorre quando a água interage com rochas que contêm altos níveis de minerais alcalinos, como calcários e mármore. Esses minerais, ricos em cálcio e outros componentes básicos, neutralizam a acidez da água, resultando em um pH mais elevado. A água resultante, portanto, é menos ácida e pode até ser alcalina. Esse tipo de drenagem é caracterizada pela presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos que contribuem para um ambiente aquático menos corrosivo e menos prejudicial à flora e fauna. No contexto da mineração, drenagens básicas podem ajudar a neutralizar os efeitos das drenagens ácidas, mas ainda podem mobilizar certos metais pesados, dependendo da geologia local e dos tipos de rochas presentes (Schmidt et al., 2015).

A resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece que para a proteção da vida aquática o pH deve estar entre 6 e 9. Assim, tanto a drenagem ácida como a drenagem básica contaminam corpos d'água adjacentes e solos, causando sérios impactos ambientais. A acidificação ou alcalinização de rios e solos pode levar à morte de organismos aquáticos, degradar a qualidade da água e afetar negativamente a biodiversidade aquática. A presença de metais pesados em altas concentrações representa um risco significativo para o meio ambiente e para a saúde humana, tornando as águas impróprias para uso por longos períodos.

Enquanto a geração de drenagens ácidas na mineração é amplamente estudada, as drenagens neutras e alcalinas têm sido menos investigadas, embora também seja possível observar os efeitos dessas drenagens, que podem surgir em áreas de exploração de calcário, por exemplo.

Na região das Caieiras, localizada na BR 392, no município de Caçapava do Sul, conhecida pelas mineradoras de calcário, torna-se evidente que as áreas ao redor desses empreendimentos sofrem alterações significativas, tanto na paisagem como no solo, no ar e na água devido aos processos industriais aplicados.

Dentro desse contexto, este trabalho pretende estudar a correlação entre os aspectos geológicos *in situ* da região e a influência da mineração de calcário na qualidade da água em arroios próximos à área em estudo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é investigar a correlação entre os aspectos geológicos e a influência da extração de calcário nos recursos hídricos na área das caieiras no município de Caçapava do Sul - RS.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar como a presença de calcário dolomítico e a sua exploração influenciam quimicamente nas águas das drenagens em diferentes pontos da área de estudo;
- Investigar os processos geológicos naturais e antrópicos que contribuem para a alcalinidade das drenagens, com ênfase na influência específica da formação do calcário;
- Analisar as variações na alcalinidade das drenagens em relação às diferentes características das formações do calcário encontradas na região;
- Correlacionar como os processos naturais e antrópicos afetam as características da drenagem, alterando parâmetros como pH, alcalinidade e dureza.

### 3 JUSTIFICATIVA

Este estudo é importante pelo fato de se buscar correlacionar informações sobre o assunto, devido à carência de pesquisas que levam em consideração a alcalinidade das drenagens em áreas afetadas pela mineração de calcário, correlacionando com as informações sobre os afloramentos naturais de mármore e áreas neutras sem influência geológica alcalinizante a fim de elucidar o grau de alterações nos recursos hídricos existentes na área de estudo.

Estudos sobre o impacto da mineração de calcário já foram realizados em diversas cavas e mineradoras nas Caieiras, como os de Schroeder (2018) e Schmidt (2015), indicando que, apesar de haver alterações em alguns parâmetros com caráter básico compatível com o tipo de mineração ali executada, os teores obtidos em laboratório correspondem às especificações limites de órgãos ambientais, como CONSEMA e CONAMA.

No entanto, também é importante avaliar e comparar as drenagens sujeitas a contaminantes diretos de processos mineiros com aquelas que compartilham seu espaço de forma natural com o calcário ainda não movimentado.

A mineração de calcário, predominante na região das Caieiras em Caçapava do Sul, provoca significativas alterações ambientais, particularmente na qualidade das águas. Analisando e comparando as características químicas das drenagens nessas três situações (Drenagens sem a presença do mármore, drenagens com mármore presente de forma não mobilizada e drenagens com lavra do mármore), o trabalho visa preencher uma lacuna no conhecimento e fornecer dados fundamentais para a gestão ambiental e a formulação de estratégias de mitigação, possibilitando compreender os impactos específicos da mineração de calcário, almejando promover práticas sustentáveis, beneficiando o meio ambiente e as comunidades locais.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

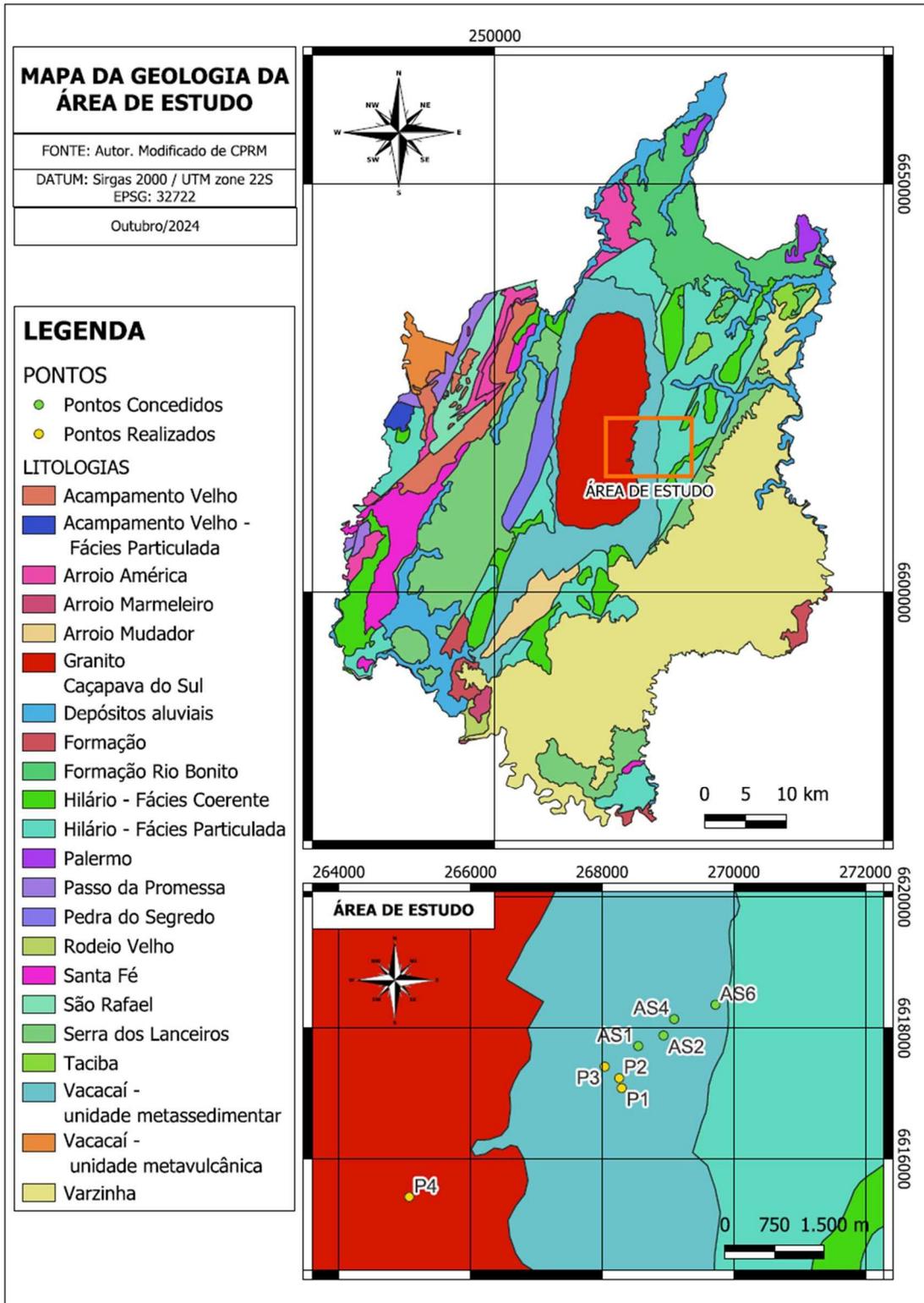
### 4.1 Contexto geológico de Caçapava do Sul

De acordo com Almeida et al. (1976), o município de Caçapava do Sul está localizado geologicamente no Bloco São Gabriel, que faz parte do Escudo Sul-Riograndense. Essa região registra uma diversidade de processos magmáticos, metamórficos, sedimentares e metalogenéticos, com idades que remontam ao Paleoproterozóico (aproximadamente 2,5 a 1,6 Ga).

Hartmann et al. (2007) define que o Escudo Sul-Rio-Grandense pode ser subdividido em quatro terrenos geológicos distintos, cada um com características particulares:

- a. **Terreno Taquarembó:** Composto por um complexo granulítico paleoproterozóico que sofreu retrabalhamento parcial no Neoproterozóico.
- b. **Terreno São Gabriel:** Apresenta unidades formadas predominantemente por acreção juvenil, além de rochas derivadas de material mantélico neoproterozóico.
- c. **Terreno Tijucas:** Constituído por rochas granito-gnáissicas e anfibolíticas de idade paleoproterozóica, além de rochas supracrustais e plutônicas associadas a vulcanismo cálcio-alcálico. Inclui também rochas metassedimentares que foram deformadas em condições de ambiente rúptil-dúctil.
- d. **Batólito Pelotas:** Caracterizado por suítes e complexos graníticos de idade brasiliana, com presença de septos do embasamento subjacente.

Figura 1- Mapa geológico do município de Caçapava do Sul.



Fonte: Autor. Modificado de CPRM.

Inserido no Terreno São Gabriel, Chemale Jr. (2000) utiliza o termo **Super Complexo Vacacaí** para englobar diversas unidades de rochas vulcano-sedimentares que foram deformadas e metamorizadas. Essas unidades incluem o Complexo Metamórfico Passo Feio, o Complexo Bossoroca/Palma e o Complexo Ibaré, as quais passaram por intrusões graníticas. O Super complexo Vacacaí é constituído por uma ampla variedade litológica, incluindo rochas máfico-ultramáficas que vão de composição básica a ácida, intercaladas com sequências epiclásticas. Entre seus principais constituintes, destacam-se os metabasaltos, frequentemente associados a lentes de mármore, metachert, metapelitos e formações ferríferas bandadas (BIFs). Como pode-se observar na figura 1.

#### **4.1.1 Complexo Metamórfico Passo Feio**

É no Complexo Metamórfico Passo Feio que se encontram as mineradoras de calcário situadas na área de estudo deste trabalho conforme figura 1.

O Complexo Metamórfico Passo Feio é uma importante unidade geológica que consiste em uma sequência vulcano-sedimentar metamorizada, com uma grande variedade de litologias. Entre as rochas presentes, destacam-se os mármores e as rochas calcissilicáticas, que formam parte significativa da porção sedimentar da formação. Essas rochas carbonáticas, que incluem principalmente mármores, são intercaladas com quartzitos, xistos pelíticos, filitos, xistos grafiticos e metaconglomerados, compondo uma sequência complexa e diversificada. As rochas sedimentares, principalmente a parte arenosa-pelítica-carbonática, podem ter sido depositadas por correntes de turbidez, como sugerido pela presença de cascalhos e blocos de quartzo e rochas calcissilicáticas em camadas de metarritmitos. O Complexo Metamórfico Passo Feio foi submetida a um metamorfismo regional que varia entre as fácies de xisto verde e anfibolito, com dois eventos metamórficos principais registrados na área. Além disso, a unidade sofreu deformações associadas ao Sistema de Falhas Irapuã, um sistema de falhas transcorrentes que foi ativo durante a Orogenia Dom Feliciano, influenciando a sua estrutura. O Granito Caçapava também teve influência na metamorfose local, promovendo recristalizações nas rochas em seus contatos (Remus et al., 2000).

#### **4.1.2 Complexo Granítico Caçapava do Sul**

De acordo com Bitencourt (1983), o Complexo Granítico de Caçapava do Sul é uma formação intrusiva com aproximadamente 250 km<sup>2</sup>, composta por três principais fácies que podem ser identificadas tanto petrograficamente quanto geoquimicamente: biotita-granitóides, leucogranitóides e granitóides transicionais. Os biotita-granitóides são rochas de coloração cinza, caracterizadas por altos teores de biotita e pela presença de allanita como mineral acessório. Estas fácies estão predominantemente localizadas nas porções sul, sudoeste e oeste do corpo granítico. Os leucogranitóides, por sua vez, possuem uma coloração rosada e contêm granada e/ou muscovita, ocorrendo principalmente na porção norte do complexo. Já os granitóides transicionais apresentam características intermediárias entre as duas fácies anteriores, localizando-se na região central do corpo granítico. Além disso, nas bordas do complexo, observa-se uma foliação gerada pelo alinhamento de minerais máficos e pelo estiramento de cristais de quartzo e feldspato, conferindo uma textura orientada à rocha.

#### **4.2 Hidrogeologia e geoquímica**

Segundo Guedes (2012), a sedimentação, no contexto geoquímico do intemperismo, envolve a deposição de partículas e materiais dissolvidos decompostos por intemperismo químico, físico e biológico, inserindo essas partículas e elementos no ciclo hidrogeológico. O intemperismo químico altera a composição dos minerais por reações químicas, o intemperismo físico fragmenta mecanicamente as rochas, e o intemperismo biológico envolve a ação de organismos vivos na decomposição das rochas. Essas partículas e materiais dissolvidos são transportados por agentes como água, vento ou gelo e depositados em novos locais, formando sedimentos que podem se compactar e litificar ao longo do tempo, resultando em rochas sedimentares.

A geoquímica associada ao meio ambiente estuda a distribuição e o comportamento de elementos químicos na Terra e como eles interagem com os sistemas ambientais. Esta ciência é fundamental para entender os processos naturais e antropogênicos que afetam a qualidade do solo, da água e do ar, e para desenvolver estratégias de mitigação de impactos ambientais.

Um aspecto importante da geoquímica ambiental é a contaminação do solo e da água. Isso envolve o estudo das fontes de contaminação, como metais pesados, pesticidas e produtos químicos industriais, bem como a avaliação dos processos de transporte e transformação de contaminantes no solo e na água. A análise dos ciclos biogeoquímicos de elementos essenciais como carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre também é crucial, assim como a investigação de como as atividades humanas alteram esses ciclos naturais.

A remediação de áreas contaminadas é outra área importante, onde se desenvolvem técnicas para a recuperação de solos e águas contaminadas, como fitorremediação, biorremediação e uso de materiais adsorventes, além de monitorar e avaliar a eficácia das estratégias de remediação. A avaliação de impactos ambientais de atividades mineradoras, industriais e agrícolas sobre o ambiente também é uma preocupação central, junto com o desenvolvimento de modelos para prever a dispersão de contaminantes e seus efeitos a longo prazo.

Por fim, a promoção de práticas de gestão sustentável de recursos naturais é essencial, minimizando a contaminação e a degradação ambiental. A implementação de políticas e regulamentações baseadas em estudos geoquímicos é fundamental para proteger o meio ambiente.

#### **4.3 Influência da geologia nos parâmetros de qualidade dos recursos hídricos**

As influências geológicas nos parâmetros da água são significativas e variadas, afetando a qualidade e a composição química da água (DREVER, 1988).

A hidrogeoquímica é uma ciência focada na origem dos elementos presentes na água, que estão inseridos no ciclo hidrogeológico. A composição química da água depende de fatores atmosféricos e está estreitamente associada a reações biogeoquímicas em contato com o corpo d'água, especialmente em zonas saturadas de elementos lixiviados. Os principais formadores de rochas incluem silicatos, carbonatos, sulfatos e cloretos (IBRAM/ANA, 2006).

Em resumo, os parâmetros da água são fortemente influenciados pelas características geológicas da área, incluindo os diferentes tipos de rochas, minerais presentes, processos de intemperismo, e atividades geológicas, biológicas e antrópicas, como a mineração (Mestrinho, 2006).

#### 4.4 Parâmetros químicos de qualidade da água relevantes ao estudo

Considerando a finalidade deste trabalho, os parâmetros de qualidade da água a serem descritos são: pH, alcalinidade, dureza e metais.

Segundo Von Sperling (2014) um dos parâmetros mais importantes é o pH (potencial hidrogeniônico). Ele é uma medida que indica o grau de acidez ou alcalinidade de uma solução aquosa, sendo extremamente importante para diversos processos e investigações que envolvem a água. Ele é calculado como o logaritmo negativo da concentração de íons de hidrogênio ( $H^+$ ) na solução, usando a fórmula apresentada pela Equação 1.

$$pH = -\log[H^+] \quad \text{Equação 1}$$

A escala de pH varia de 0 a 14:

- Um pH de 7 é considerado neutro, como a água pura.
- Valores abaixo de 7 indicam uma solução ácida, com maior concentração de íons  $H^+$ .
- Valores acima de 7 indicam uma solução básica (ou alcalina), com menor concentração de íons  $H^+$ .

O pH é um parâmetro essencial em diversas áreas, como química, biologia, medicina e engenharia ambiental, porque a acidez ou alcalinidade de uma solução pode influenciar reações químicas, processos biológicos e a saúde de organismos vivos.

A alcalinidade refere-se à quantidade de íons que podem reagir com íons de hidrogênio ( $H^+$ ) até alcançar uma solução neutra. Em outras palavras, mede a capacidade da solução de neutralizar a acidez. Essa capacidade é gerada principalmente pela presença de íons hidróxido ( $OH^-$ ), carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $HCO_3^-$ ). A alcalinidade é um parâmetro crucial para prever o poder tampão do meio, que é a capacidade de resistir a mudanças bruscas de pH, além de prever a ocorrência de corrosão ou incrustação e as variações de pH em determinados processos.

A análise da alcalinidade é realizada por titulação com ácido, onde se calcula a quantidade necessária para neutralizar os íons presentes que contribuem para a

alcalinidade. O resultado é expresso em miligramas de equivalente de carbonato de cálcio por litro de solução (mg/L CaCO<sub>3</sub>), Von Sperling (2014).

A dureza da água expressa a quantidade de cátions bivalentes presentes na amostra, principalmente íons de cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>). Esses cátions podem causar diversos problemas, como sabor desagradável, redução na formação de espuma de sabões e detergentes, e incrustações em instalações devido à precipitação desses elementos na forma de carbonatos.

Os níveis de dureza da água são classificados da seguinte forma:

- Menos de 50 mg/L de CaCO<sub>3</sub>: Água mole
- Entre 50 e 150 mg/L de CaCO<sub>3</sub>: Água com dureza moderada
- Entre 150 e 300 mg/L de CaCO<sub>3</sub>: Água dura
- Mais de 300 mg/L de CaCO<sub>3</sub>: Água muito dura

A análise da dureza da água é geralmente realizada por titulação com EDTA, que complexa os íons de cálcio e magnésio. O ponto final da titulação é detectado usando um indicador que muda de cor quando todos os íons metálicos são complexados. A dureza da água é um parâmetro importante para avaliar a qualidade da água em sistemas de abastecimento, processos industriais e aquários, pois influencia diretamente a eficiência de produtos de limpeza, a saúde de organismos aquáticos e a formação de incrustações em tubulações e equipamentos, Von Sperling (2014).

Metais são componentes naturais encontrados em corpos d'água devido à geologia local, mas a sua presença pode ser significativamente aumentada por meio de lançamentos de efluentes, especialmente aqueles de origem industrial e mineradora. Isso pode resultar em concentrações elevadas de metais considerados tóxicos e bioacumuláveis na cadeia alimentar. Entre os metais de maior preocupação estão arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, níquel e prata.

A quantificação desses metais é realizada em unidades de mg/L ou µg/L por meio de diferentes métodos analíticos, cada um com seus próprios padrões e normas específicas. Os métodos mais comuns incluem: Espectroscopia de absorção atômica (AAS), Espectroscopia de emissão atômica (AES), Espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e Espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) para análise multielementar.

Essas técnicas analíticas permitem a detecção precisa e sensível dos metais em diversas matrizes ambientais, como água, solo e sedimentos. A monitorização constante desses metais é essencial para avaliar o impacto ambiental das atividades humanas e para implementar medidas adequadas de controle e mitigação, visando proteger a saúde pública e a integridade dos ecossistemas aquáticos, Von Sperling (2014).

#### 4.5 Origem do calcário e do mármore

Segundo Sampaio e Almeida (2008), a formação de calcários ocorre principalmente em ambientes onde há deposição de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), geralmente associada à precipitação química ou biológica. Esses depósitos são comuns em regiões onde águas ricas em íons bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) reagem com íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), formando  $\text{CaCO}_3$  sólido.

Os processos de formação de calcários podem ser divididos em dois tipos principais:

a) **Precipitação Química:** Acontece quando as condições físico-químicas da água favorecem a precipitação do carbonato de cálcio. Isso pode ocorrer devido ao aumento de pH, diminuição de  $\text{CO}_2$  dissolvido, ou aumento da temperatura, levando à formação de depósitos de calcário em cavernas, estalactites e estalagmites.

b) **Precipitação Biológica:** Envolve a formação de calcários através de atividades biológicas, como no caso de recifes de coral. Organismos como corais e moluscos marinhos secretam carbonato de cálcio como parte do seu esqueleto ou estruturas, que se acumulam ao longo do tempo formando rochas calcárias.

A presença de calcários é importante tanto do ponto de vista geológico quanto econômico. Geologicamente, eles são indicativos de antigos ambientes marinhos e podem conter vestígios de fósseis marinhos. Economicamente, os calcários são amplamente utilizados como matéria-prima na produção de cimento, construção civil, fabricação de cal, e como corretivo de solo na agricultura (Sampaio e Almeida, 2008).

O mármore, por sua vez, é uma rocha metamórfica que resulta do calcário submetido a altas temperaturas e pressões, eliminando fósseis e criando uma textura densa e cristalina. Com cores variadas e veios distintos, o mármore é amplamente

utilizado na construção e decoração devido à sua estética e durabilidade (Parahyba,2009).

#### **4.6 Mineração do calcário e impactos ambientais**

A mineração é essencial para a economia global, fornecendo materiais vitais para diversas indústrias (Sánchez, 2007; Kopezinski, 2000). O calcário, em particular, destaca-se por sua importância. Ele é fundamental na produção de cimento, indispensável para a construção civil e infraestrutura. Além disso, o calcário é utilizado na fabricação de vidro, aço, papel e na correção do solo na agricultura. A extração de calcário gera empregos, impulsiona economias locais e contribui para o desenvolvimento sustentável, desde que realizada com práticas ambientais responsáveis (Barreto, 2001). Sua versatilidade e abundância fazem do calcário um recurso mineral crucial para o progresso econômico e tecnológico.

Schroeder (2018) diz que, apesar de todos os benefícios que a mineração traz, quando se olha do ponto de vista social, existe uma preocupação significativa da sociedade em relação à questão ambiental devido à característica predatória da atividade de mineração. Como os minerais são recursos não renováveis, as empresas enfrentam grandes desafios para harmonizar a mineração com o controle ambiental. Na Bacia Hidrográfica da região de Caçapava do Sul, as atividades mineradoras, que extraem rochas calcárias do solo, são fontes importantes de impacto ambiental.

No entanto, apesar de todos os benefícios do calcário e de seus subprodutos, sua extração causa inúmeros impactos negativos ao meio ambiente. A mineração de calcário pode destruir afloramentos naturais e a vegetação característica, resultando em perda de habitats, erosão do solo e poluição das águas. Esses impactos comprometem a biodiversidade local e a qualidade de vida das comunidades próximas. Portanto, é crucial que as empresas de mineração adotem práticas sustentáveis e tecnologias de mitigação para minimizar os danos ambientais e promover a recuperação das áreas afetadas.

Tanto na extração quanto no beneficiamento de calcário, não há uso de água. No entanto, o potencial impacto aos corpos d'água pode ocorrer devido à movimentação de minérios e materiais estéreis, gerando preocupação sobre o impacto ambiental nestes locais (Schroeder, 2018).

#### **4.7 Drenagens de mina e drenagem básica de mina**

Como discutido anteriormente, a interação entre o material derivado da mina e as drenagens pode resultar em diferentes tipos de drenagem. Quando essa interação resulta em um corpo d'água com pH menor que 3,0, temos a drenagem ácida de mina (DAM). Esta condição é altamente corrosiva e pode mobilizar uma grande quantidade de metais pesados, causando impactos ambientais significativos.

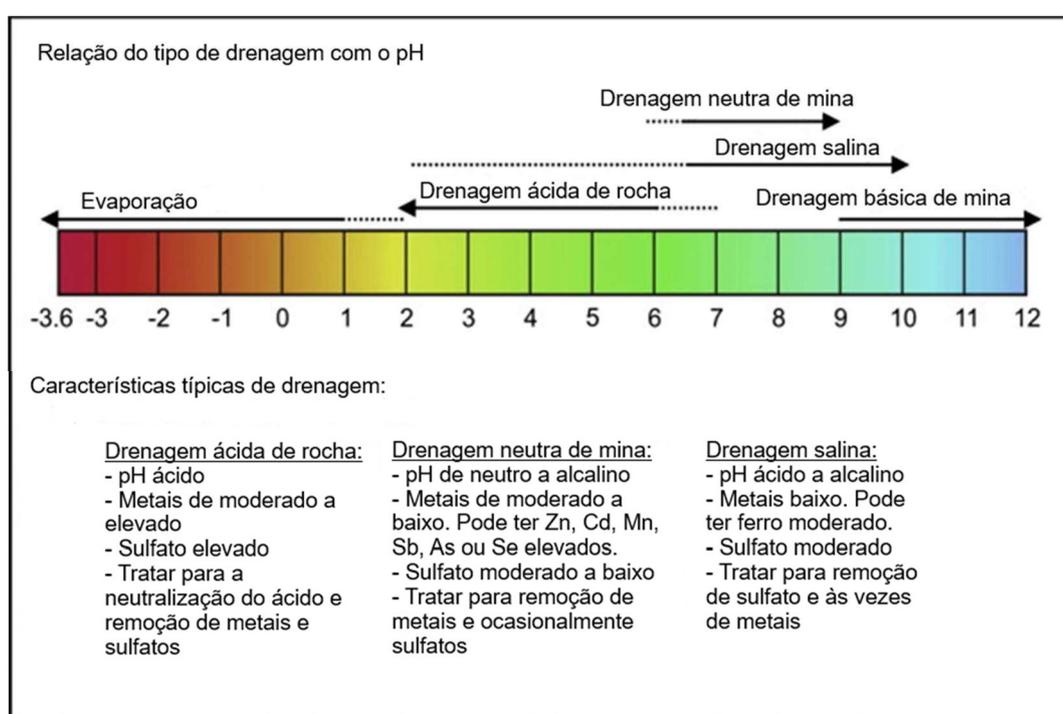
Pereira (2014) diz que, por outro lado, se a interação aumentar o pH para uma faixa entre 4,5 e 8,5, forma-se a drenagem neutra de mina (DNM). A DNM pode ser gerada propositalmente para neutralizar drenagens ácidas, utilizando materiais alcalinos como o calcário, que possui a capacidade de neutralizar os resíduos minerais. Isso ocorre também quando a capacidade de neutralização derivada de carbonatos é suficiente para manter condições de pH neutro. Esse tipo de drenagem é comum em locais onde a capacidade de neutralização ácida associada ao conteúdo de minerais carbonáticos é maior que o potencial de geração de ácido associado ao conteúdo de sulfetos (Nordstrom et al., 2015)

Apesar do pH neutro, as DNM naturais ainda podem apresentar concentrações elevadas de metais e metalóides que permanecem solúveis nessa faixa de pH. Esses contaminantes podem causar sérios problemas ambientais, como a contaminação de corpos d'água e solos, além de afetar negativamente a biota local.

Ainda, temos a drenagem básica de mina, quando há geração de uma drenagem com pH acima de 9,0. As circunstâncias que podem levar a essas composições de água incluem rocha de baixa permeabilidade com feldspatos abundantes que reagem em um sistema fechado, trocando prótons por álcalis e removendo bicarbonato através da precipitação de calcita, evolução das águas subterrâneas para um tipo de bicarbonato de sódio por meio de troca iônica, redução de sulfato e oxidação de carbono orgânico, dissolução de margas alteradas que continham cal (Nordstrom et al., 2015).

A figura 2 apresenta uma classificação com faixas típicas de pH e as principais características associadas a cada tipo de drenagem de mina que pode ser gerada. Por meio dessa figura, o autor ilustra o que se espera para cada tipo de drenagem alterada de mina. Por exemplo, em drenagens neutras de mina, é previsto um pH neutro, presença de uma variedade de metais como Zn e Cd, baixa sulfetação, e a recomendação de tratamento foca no controle de metais e sulfatos.

**Figura 2-** Faixa de pH e características de drenagem de minas



Fonte: Modificado de Nordstrom et al., 2015.

## 5 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se na coleta de amostras pelo autor e dados fornecidos pela empresa, contendo informações sobre os valores dos parâmetros: pH, condutividade elétrica, alcalinidade, dureza, cálcio e magnésio, bem como informações de trabalhos realizados na área das caieiras e de análises em amostras de água a fim de comparações.

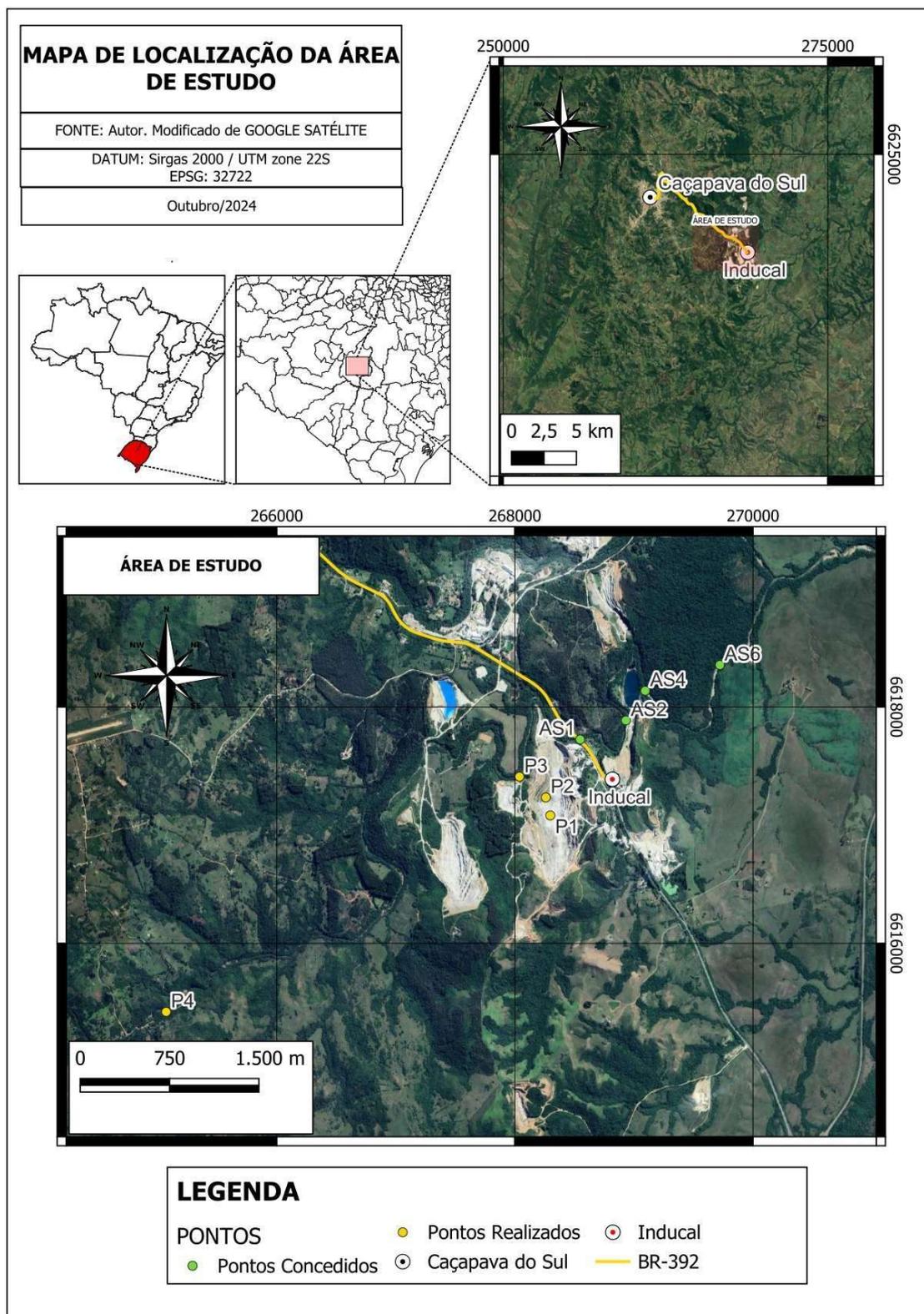
As análises das amostras de água foram realizadas nos laboratórios do Centro de Ciências e Tecnologia Ambiental (CCTA) e no Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios - LATRAM - da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Caçapava do Sul - RS.

A partir dos resultados foram realizadas análises estatísticas utilizando-se métodos estatísticos e tabelas para teste de hipóteses com os dados e foram estatísticas descritivas para calcular as médias, desvios padrões e as correlações.

### 5.1 Localização da área de estudo

A área de estudo (figura 3) está localizada na parte central do estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul. A mineração de calcário ocorre na região das Caieiras, situada próximo à BR-392, a aproximadamente 10 km do centro da cidade, no sentido sudeste. Esta área está a 259 km da capital Porto Alegre e é acessível pela BR-290, estando próxima ao cruzamento das rodovias RS-153 e BR-392. A região é historicamente conhecida como uma grande produtora de calcário. A Figura X apresenta o mapa da região e localização da área de estudo.

Figura 3- Mapa de localização das Caieiras



Fonte: Autor. Modificado de Google Satélite.

## 5.2 Campanha de amostragem

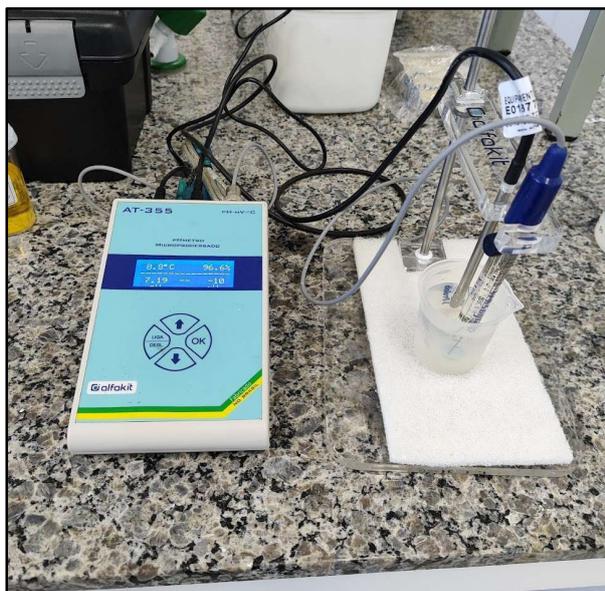
A campanha de amostragem teve alvos bem definidos: coletar amostras na frente de lavra, em um ponto com mármore *in situ*, em drenagens localizadas dentro do perímetro da mineração e em um ponto de controle a montante. Simultaneamente, a empresa, atendendo à solicitação, disponibilizou alguns pontos próximos à área que fazem parte da coleta semestral de análise para os órgãos competentes. Os dados fornecidos pela empresa são sazonais e correspondem aos anos de 2023 e 2024, com coletas e análises realizadas semestralmente, nos meses de fevereiro e agosto. Porém, não foi nos fornecido a metodologia das análises das amostras cedidas.

As amostras foram coletadas e armazenadas em recipientes apropriados e higienizados, em seguida condicionados em isopor com gelo para melhor conservação e, finalmente, as análises em laboratório ocorreram no mesmo dia da coleta para resultados mais confiáveis.

## 5.3 Determinação de pH

O pH é uma medida que expressa a concentração de íons hidrogênio em uma solução ou na água, influenciada pela presença de dióxido de carbono dissolvido e pela alcalinidade. Ele regula o equilíbrio químico entre a água e as rochas, além de controlar a mobilidade dos íons nas águas subterrâneas. A classificação da água como ácida ou básica depende do equilíbrio entre os íons hidrogênio e hidróxido. A escala de pH varia de 1 a 14, sendo que valores abaixo de 7 indicam acidez, próximo a 7 indicam neutralidade, e acima de 7 indicam alcalinidade.

As medições de pH foram realizadas utilizando o peagâmetro (Figura 4) de bancada, modelo AT-355, marca Alfakit. A leitura do pH é influenciada pela temperatura, sendo necessário o uso da compensação automática de temperatura, recurso disponibilizado pelo próprio dispositivo para garantir a exatidão das medições.

**Figura 4 - Aparelho peagômetro**

Fonte: Autor.

#### **5.4 Condutividade Elétrica**

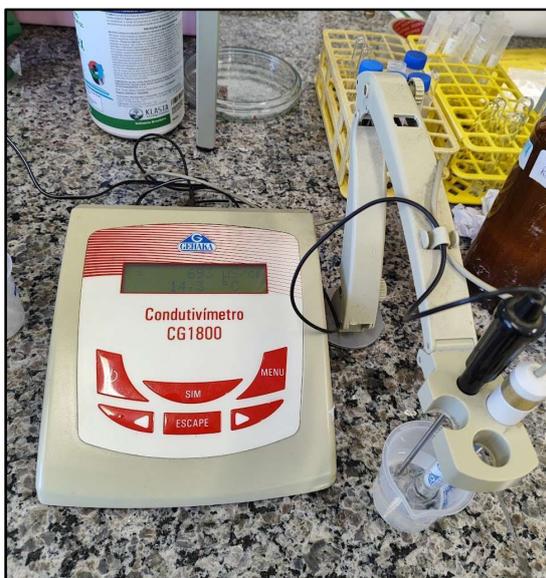
A condutividade elétrica (CE) é medida para estimar o total de íons presentes na amostra. Os sais dissolvidos e ionizados na água permitem a condução de corrente elétrica. A CE é influenciada principalmente pela quantidade de íons dissolvidos, pela mobilidade desses íons e pela temperatura da água.

De acordo com o Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAs (BRASIL, 2014), às águas naturais geralmente apresentam valores de condutividade elétrica que variam entre 10 e 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No entanto, em ambientes poluídos, esses valores podem ser significativamente mais elevados, atingindo até 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A condutividade elétrica da água está diretamente relacionada à presença de íons dissolvidos, como sais e minerais, que aumentam sua capacidade de conduzir corrente elétrica.

Em águas não impactadas por atividades antrópicas, como aquelas que fluem por áreas preservadas ou menos urbanizadas, a condutividade tende a ser baixa, refletindo a menor concentração de sólidos dissolvidos. Em contrapartida, em ambientes poluídos, especialmente próximos a áreas industriais, agrícolas ou urbanas, a condutividade pode aumentar devido ao lançamento de efluentes, fertilizantes, produtos químicos ou esgoto, que adicionam íons e compostos à água, elevando consideravelmente esse parâmetro.

As medições de condutividade elétrica foram realizadas através de um condutivímetro, modelo CG 1800, marca GEHAKA, o qual fornece a leitura da condutividade expressa em  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no momento da medição conforme figura 5.

**Figura 5-** Aparelho condutivímetro.



Fonte: Autor.

## 5.5 Alcalinidade

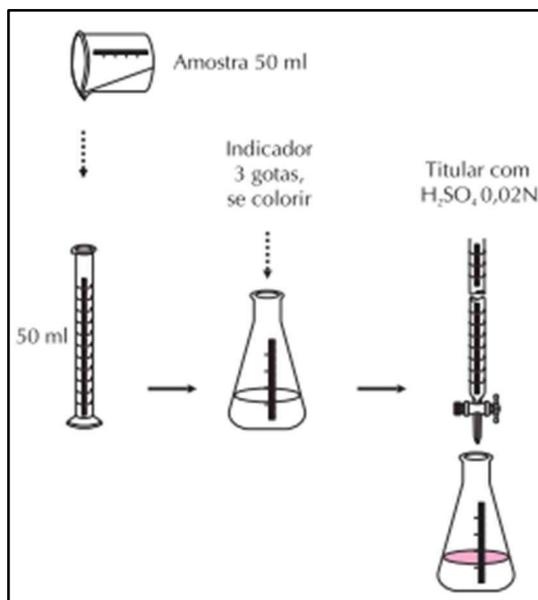
A alcalinidade total é definida como a capacidade da água de neutralizar ácidos, resultante principalmente da presença de carbonatos e bicarbonatos, e, em menor grau, de íons hidróxidos, silicatos, boratos, fosfatos e amônia (BRASIL, 2014).

Ela reflete a influência de todos os íons presentes na água e é expressa em  $\text{mg}/\text{L}$  de  $\text{CaCO}_3$ . As águas que percolam rochas calcárias, como as analisadas neste estudo, costumam apresentar alta alcalinidade devido ao elevado teor de cálcio e magnésio, o que resulta na liberação de íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ).

A determinação da alcalinidade foi realizada por meio de titulação com ácido sulfúrico 0,02N. O procedimento (figura 6) envolve colocar 50 mL da amostra em um frasco Erlenmeyer, adicionar 3 gotas de mistura Indicadora de verde de bromocresol/vermelho de metila, fazendo com que a solução adquira uma coloração azul. Em seguida, a amostra é titulada com solução de ácido sulfúrico 0,02  $\text{mol}/\text{L}$  até que a cor mude de azul para amarela conforme figura 7. O volume total de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  utilizado é então registrado e calculado pela fórmula:

$$\text{mg/L de CaCO}_3 = V \times 20$$

equação 2

**Figura 6-** Fluxograma da análise de alcalinidade

Fonte: Manual Prático de Análise de Água, p.45

**Figura 7-** Análise de alcalinidade por titulometria

Fonte: Autor.

## 5.6 Dureza

A dureza da água refere-se à quantidade de cátions multivalentes presentes em solução, sendo os mais comuns os íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ). A origem dessa dureza pode ser natural, como resultado da dissolução de rochas calcárias, que são ricas nesses minerais, ou pode ser causada por atividades humanas, como o descarte de efluentes industriais. A dureza é geralmente expressa em miligramas por litro (mg/L) de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) equivalente (BRASIL, 2014).

A classificação dos níveis de dureza da água segue a escala abaixo:

- Menos de 50 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ : Água suave
- Entre 50 e 150 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ : Água de dureza moderada
- Entre 150 e 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ : Água dura
- Acima de 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ : Água muito dura

O método utilizado para determinar a dureza total da água é a titulação com EDTA, que é o mais comumente empregado para essa finalidade. Esse método se baseia na reação do ácido etilenodiaminotetracético dissódico (EDTA). Para realizar a titulação, deve-se pipetar 50mL da amostra em um frasco Erlenmeyer de 250 mL. Em seguida, adiciona-se 2mL de uma solução tampão pH10, seguidos de 5 gotas do indicador negro de eriocromo T. A titulação, apresentada na figura 8, deve ser feita imediatamente com uma solução padronizada de EDTA 0,01 Mol/L, até que a cor mude de rosa para azul. Para os cálculos, é importante registrar o volume de EDTA utilizado na titulação (Garcez, 2004) e expressar os resultados conforme a fórmula abaixo:

$$\text{mg/L } \text{CaCO}_3 = \frac{\text{ml de EDTA} \times 1000 \times \text{Fator de correção EDTA}}{\text{ml de amostra}} \quad \text{equação (3)}$$

**Figura 8-** Análise de dureza por titulometria



Fonte: Autor.

## 5.7 Cálcio

O cálcio é um dos elementos mais abundantes nas águas naturais e desempenha um papel crucial na dureza da água. A atividade de mineração pode ser um fator significativo nas alterações de sua composição química, especialmente em áreas onde há extração de metadolomitos. Durante o processo de mineração, esses minerais liberam carbonato de cálcio e magnésio no ambiente, elevando a dureza e contribuindo para a alcalinização das águas, ou seja, tornando o pH mais básico. Indicando que esse processo de liberação de carbonatos é uma provável causa das mudanças na qualidade da água em regiões afetadas pela mineração (Fritzsons et al. 2009).

O método utilizado para a determinação de cálcio é a titulação, cuja abordagem é semelhante àquela empregada para obter a dureza, mas utilizando o indicador murexida. Para a realização do procedimento, deve-se pipetar 100 mL da amostra em um frasco Erlenmeyer de 250 mL. O pH é ajustado com a adição de 1 a 2 mL de NaOH 1 molar e adicionado cristais de murexida, cuidando para que a cor não fique muito rosa. A solução é então titulada com EDTA 0,01 Mol/L até que ocorra uma mudança de coloração do rosa para o violeta. Neste ponto, deve-se registrar a quantidade de EDTA utilizada. Com esses dados, é possível realizar os cálculos necessários para determinar a concentração de cálcio presente na água (Garcez, 2004). A concentração de cálcio pode então ser obtida através da fórmula:

$$mg/L \text{ Ca} = \frac{vol. EDTA \times 0,01 \text{ mol/L EDTA}}{vol. amostra} \times 40.000 \quad \text{equação 4}$$

## 5.8 Magnésio

A determinação de magnésio é obtida através da subtração do número de mols encontrado na dureza total e a quantidade em mols de cálcio, podendo ser calculado da seguinte forma:

$$mg/L \text{ Mg} = \frac{n^\circ \text{ de mols dureza} - n^\circ \text{ de mols Ca}}{vol. amostra} \times 24.000 \quad \text{equação 5}$$

## 5.9 Análise de dados

Para a análise dos dados utilizo-se planilha eletrônica, reunindo as estatísticas de correlação, cálculo de médias e desvios padrões.

A matriz de correlação (tabela 2 e «) é uma ferramenta estatística fundamental que permite analisar a relação entre duas ou mais variáveis, sendo representada em forma de tabela, onde cada célula contém o coeficiente de correlação que quantifica a força e a direção da associação linear entre países de variáveis (Mórtti e Bussab, 2024).

Em estatística, cada variável é listada em linhas e colunas e os coeficientes de correlação entre cada par de variáveis são preenchidos nas células correspondentes. O coeficiente de correlação pode variar de -1 a 1:

- 1 indica uma correlação positiva perfeita (as variáveis aumentam juntas);
- -1 indica uma correlação negativa perfeita (uma variável aumenta enquanto a outra diminui);
- 0 indica que não há correlação entre as variáveis.

Os valores de uma matriz de correlação (tabela 1) podem ser classificados em diferentes categorias, que indicam a força da relação entre as variáveis. Abaixo, estão as classificações comuns para o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ):

**Tabela 1-** Tabela de  $r$ , classificação de valores de correlação.

Intervalo de $r$	Classificação
$r = 0$	Nula
$0 < r \leq 0,3$	Fraca

$0,3 < r \leq 0,6$	Moderada
$0,6 < r \leq 0,9$	Forte
$0,9 < r < 1$	Muito Forte
$r = 1$	Perfeita

Fonte: Moicetti e Bussab. Estatística básica, vol. 10, 2024.

Na interpretação da matriz de correlação (Moicetti e Bussab, 2024) a partir dos valores de intervalos  $r$  podemos avaliar as seguintes correlações:

- Correlação Nula: Não há relação linear entre as variáveis.
- Correlação Fraca: Existe uma relação positiva ou negativa, mas é pouco significativa.
- Correlação Moderada: A relação é mais evidente, mas ainda não é forte.
- Correlação Forte: Há uma relação clara e consistente entre as variáveis.
- Correlação Muito Forte: As variáveis estão altamente correlacionadas, quase sempre se movendo juntas.
- Correlação Perfeita: As variáveis se movem juntas em uma proporção exata.

Essas classificações ajudam a interpretar a força das relações lineares entre variáveis em análises estatísticas e são amplamente utilizadas em diversas áreas de pesquisa conforme tabela 3 e 4.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A campanha de amostragem teve alvos bem definidos: coletar amostras na frente de lavra, em um ponto com mármore *in situ*, em drenagens localizadas dentro do perímetro da mineração e em um ponto de controle a montante. Simultaneamente, a empresa, atendendo à solicitação, disponibilizou alguns pontos próximos à área que fazem parte da coleta semestral de análise para os órgãos competentes. Os dados fornecidos pela empresa são sazonais e correspondem aos anos de 2023 e 2024, com coletas e análises realizadas semestralmente, nos meses de fevereiro e agosto.

Como o objetivo deste estudo é identificar as influências do mármore *in situ* em comparação à mineração, e não monitorar a emissão de poluentes ao longo do tempo, analisou-se as amostras coletadas em conjunto com as amostras cedidas referente a agosto de 2023, pois ambas são de períodos sazonais próximos.

### 6.1 Descrição dos pontos de amostragem

O ponto 1 (P1) foi considerado o primeiro ponto, localizado no centro da cava ativa. Esse ponto recebe a contribuição das águas que percolam a cava em exploração. A água não é corrente, porém bombeada quando há necessidade. A figura 9 ilustra o ponto de coleta P1, com destaque à formação de mármore que é extraído na atividade de mineração.

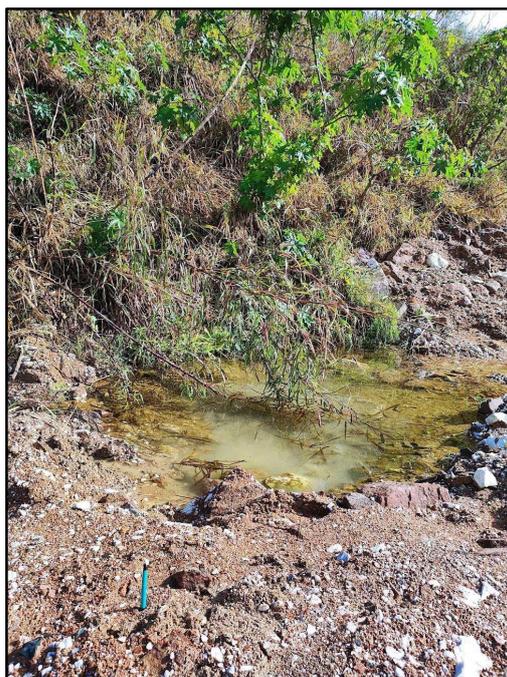
**Figura 9-** Centro da cava ativa (P1)



Fonte: Autor, 2024.

O ponto 2 (P2) está situado às margens da cava, há a presença de mármore *in situ* e, como a rocha está fraturada, esse ponto também recebe contribuição de água que percola as fraturas adjacentes (figura 10). Neste ponto a água é empoçada, e tem baixa vazão por um pequeno canal ao lado no sentido do centro da cava.

**Figura 10-** Ponto de coleta (P2)



Fonte: Autor, 2024.

O ponto 3 (P3) se refere à coleta a jusante da Cascata do Salso, no arroio do Salso. O local é próximo do ponto de emissão da água bombeada da cava ativa (ponto 1). Neste ponto a água é corrente, e a largura do corpo d'água relativamente grande. A figura 11 mostra o ponto P3.

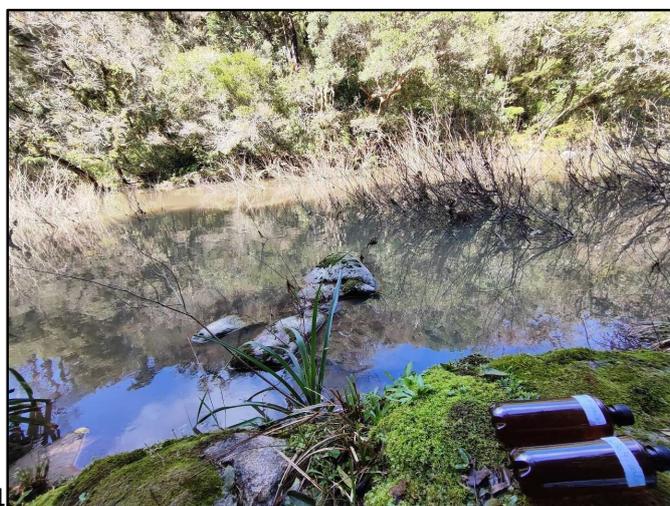
**Figura 11-** Jusante da Cascata do Salso (P3)



Fonte: Autor, 2024.

O ponto 4 (P4) está localizado na Cascata do Salso. Por não haver contato com as rochas de interesse para esse trabalho, esse local refere-se ao ponto de controle, por estar localizado fora da litologia alvo deste estudo. Além disso, sua posição a montante do sistema fluvial o torna relevante, para avaliar possíveis impacto posterior pelas atividades de mineração. Assim como no ponto 3 a água no ponto 4 é corrente, como mostra a figura 12.

**Figura 12-** Cascata do Salso (P4)



4

Fonte: Autor, 2024.

A tabela 2 apresenta as coordenadas dos pontos cedidos e os pontos coletados, respectivamente.

**Tabela 2-** Tabela com as coordenadas dos pontos amostrados e cedidos

<b>Pontos de coleta</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
P1	268298	6617083
P2	268260	6617235
P3	268039	6617411
P4	265071	6615421
AS1	268548	6617726
AS2	268932	6617887
AS4	269095	6618138
AS6	269722	6618356

Fonte: Autor

**Tabela 3-** Matriz de correlação para as amostras coletadas.

	<i>pH</i>	<i>Condutividade</i>	<i>Alcalinidade</i>	<i>Dureza</i>	<i>Cálcio</i>	<i>Magnésio</i>
<i>pH</i>	1,00					
<i>Condutividade</i>	0,695	1,00				
<i>Alcalinidade</i>	0,672	0,9995	1,00			
<i>Dureza</i>	0,730	0,9987	0,9966	1,00		
<i>Cálcio</i>	0,872	0,9428	0,9333	0,9574	1,00	
<i>Magnésio</i>	-0,589	0,0604	0,0864	0,0143	-0,2749	1,00

Fonte: Autor.

**Tabela 4-** Matriz de correlação para as amostras cedidas.

	<i>pH</i>	<i>Condutividade</i>	<i>Alcalinidade</i>	<i>Dureza</i>	<i>Cálcio</i>	<i>Magnésio</i>
<i>pH</i>	1,00					
<i>Condutividade</i>	0,0767	1,00				
<i>Alcalinidade</i>	0,0141	0,9979	1,00			
<i>Dureza</i>	0,0455	0,9993	0,9995	1,00		
<i>Cálcio</i>	0,1967	0,9818	0,9704	0,9748	1,00	
<i>Magnésio</i>	-0,0782	0,9788	0,9881	0,9854	0,9227	1,00

Fonte: Autor.

## 6.2 pH

Os valores de pH obtidos (tabela 5) em laboratório e cedidos pela empresa, ficaram todos ao redor de 7, como apresentado na Tabela 5. Isso indica que, independente da área, próximo ou não da atividade de mineração, com as amostras e procedimentos deste estudo, os valores de pH natural das águas não foram afetados.

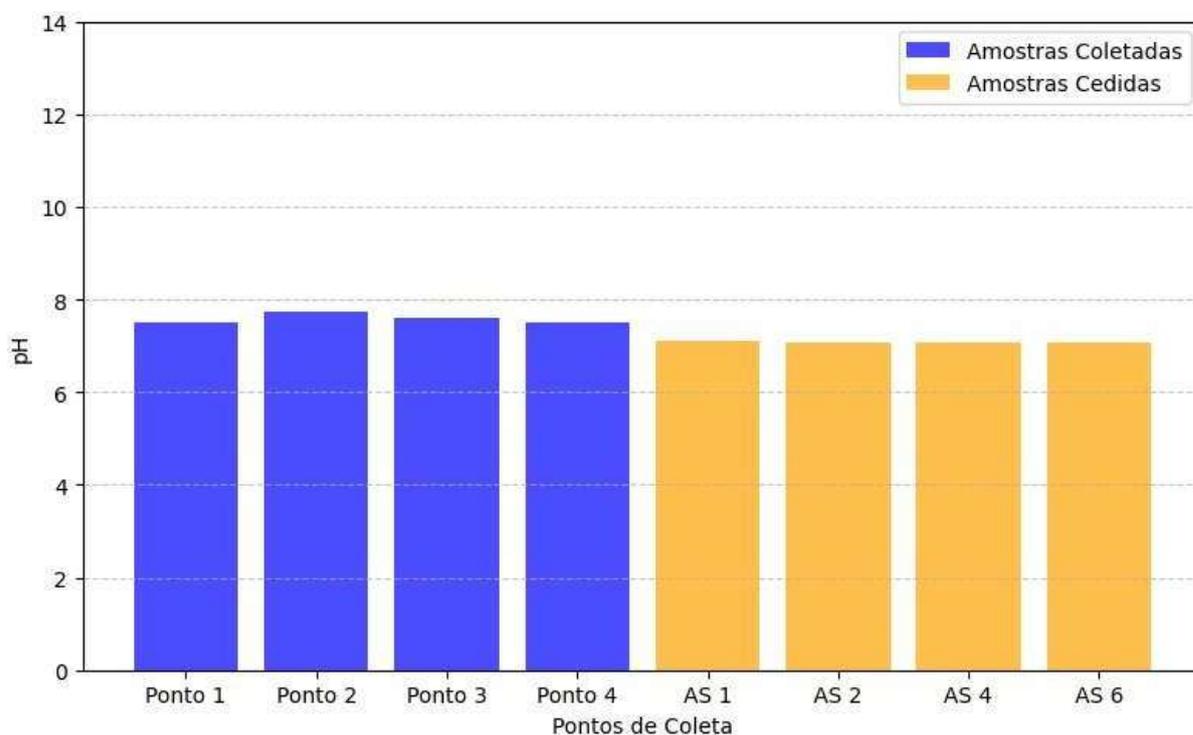
A análise da matriz de correlação (tabela 3 e 4) das amostras coletadas indica que, neste estudo, o pH apresenta uma correlação moderada e positiva com as variáveis condutividade e alcalinidade. Em relação à dureza e ao cálcio, a correlação é fortemente positiva, enquanto com o magnésio, a correlação é moderada e negativa. Por outro lado, a matriz de correlação das amostras cedidas mostra que o pH não tem quase nenhuma correlação com as variáveis disponíveis, somente com o cálcio há uma correlação fraca e positiva.

O gráfico com todos os valores de pH, apresentado na Figura 13 mostra que as medidas ficaram de fato bem comportadas, sem grandes alterações.

**Tabela 5-** Valores de pH

<b>Pontos de coleta</b>	<b>pH</b>
P1	7,50
P2	7,75
P3	7,60
P4	7,51
AS1	7,10
AS2	7,08
AS4	7,08
AS6	7,06
Valor médio	7,30 (±) 0,28

Fonte: Autor

**Figura 13** Distribuição dos valores de pH

Fonte: Autor

### 6.3 Condutividade elétrica

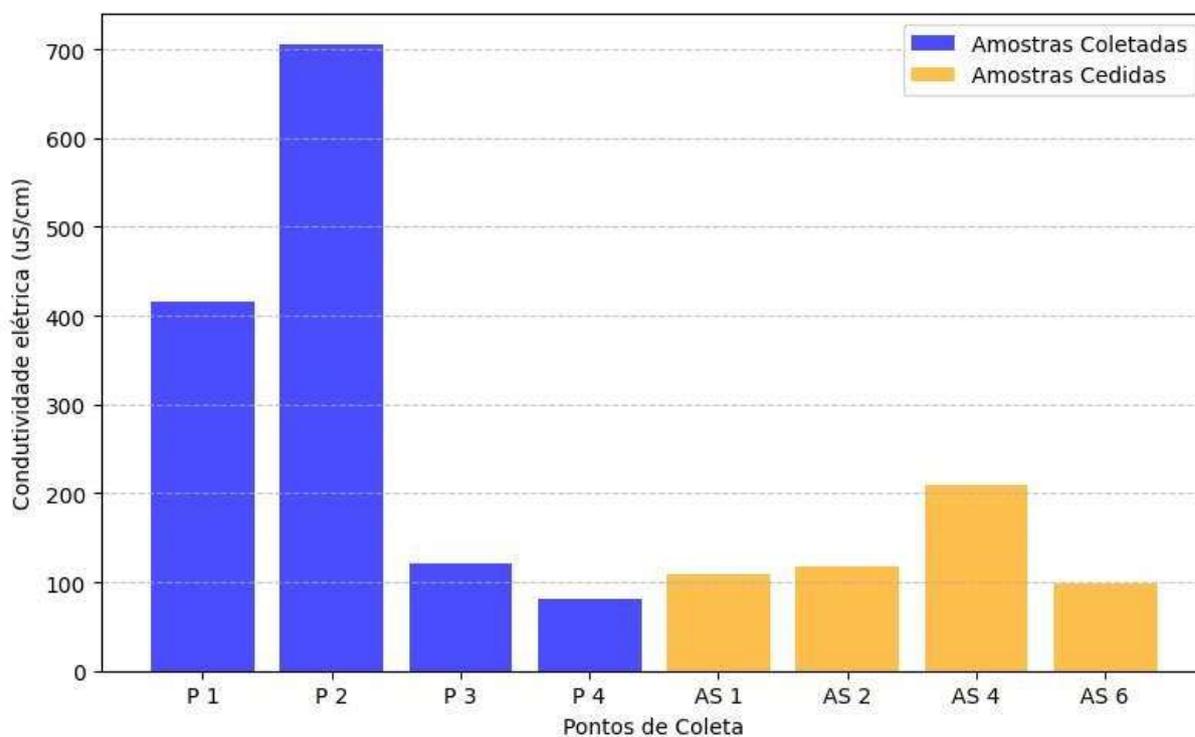
A análise da matriz de correlação (tabela 3 e 4) das amostras coletadas para a condutividade elétrica revela uma forte correlação positiva com a alcalinidade, dureza e cálcio, enquanto com o magnésio não há correlação significativa. Ao examinar a matriz de correlação das amostras cedidas, observa-se que a condutividade apresenta uma correlação forte e positiva com todas as outras variáveis exceto pH.

A Tabela 6 e a Figura 14 apresentam os valores de condutividade com as amostras de condutividade elétrica evidencia que os pontos mais afetados são aqueles diretamente relacionados ou muito próximos à área de lavra, como nos pontos 1 e 2.

**Tabela 6-** Valores de condutividade elétrica

Pontos de coleta	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S/cm}$ )
P1	415,5
P2	705
P3	121,8
P4	81,6
AS1	108,71
AS2	118,18
AS4	208,6
AS6	99,21
Valor médio	119,99 ( $\pm$ ) 219,90

Fonte: Autor

**Figura 14-** Valores de Condutividade elétrica

Fonte: Autor

## 6.4 Alcalinidade

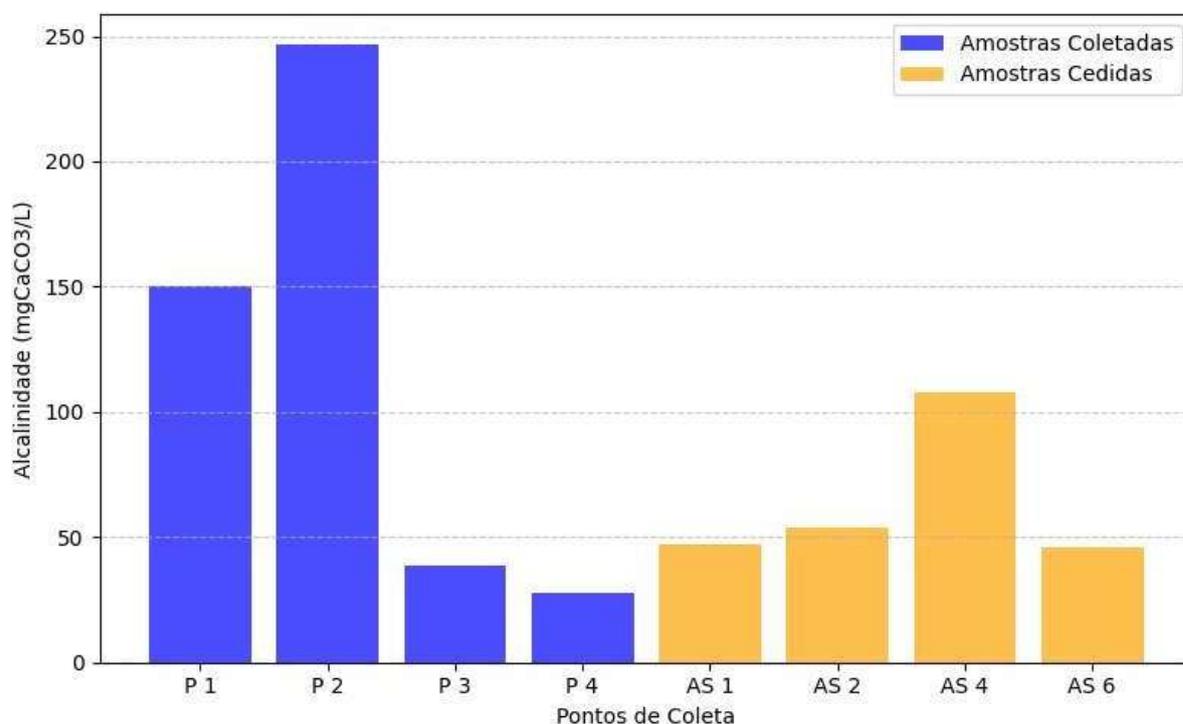
A análise da matriz de correlação da alcalinidade (tabela 3 e 4) mostra uma forte correlação positiva com a condutividade elétrica, dureza e cálcio, enquanto com o magnésio não se observa correlação significativa. Em relação à matriz de correlação das amostras cedidas, a alcalinidade apresenta uma forte correlação positiva com todas as outras variáveis exceto pH.

O gráfico das amostras de alcalinidade da Figura 15 destaca que os pontos mais afetados são aqueles diretamente relacionados ou muito próximos à área de lavra, como nos pontos 1 e 2, conforme tabela 7.

**Tabela 7-** Valores de alcalinidade

<b>Pontos de coleta</b>	<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>/L)</b>
Ponto 1	150
Ponto 2	246,5
Ponto 3	38,5
Ponto 4	28
AS 1	46,99
AS 2	54,08
AS 4	107,94
AS 6	45,96
Valor médio	119,99 (±) 219,90

Fonte: Autor

**Figura 15-** Distribuição dos valores de alcalinidade.

Fonte: Autor

### 6.5 Dureza

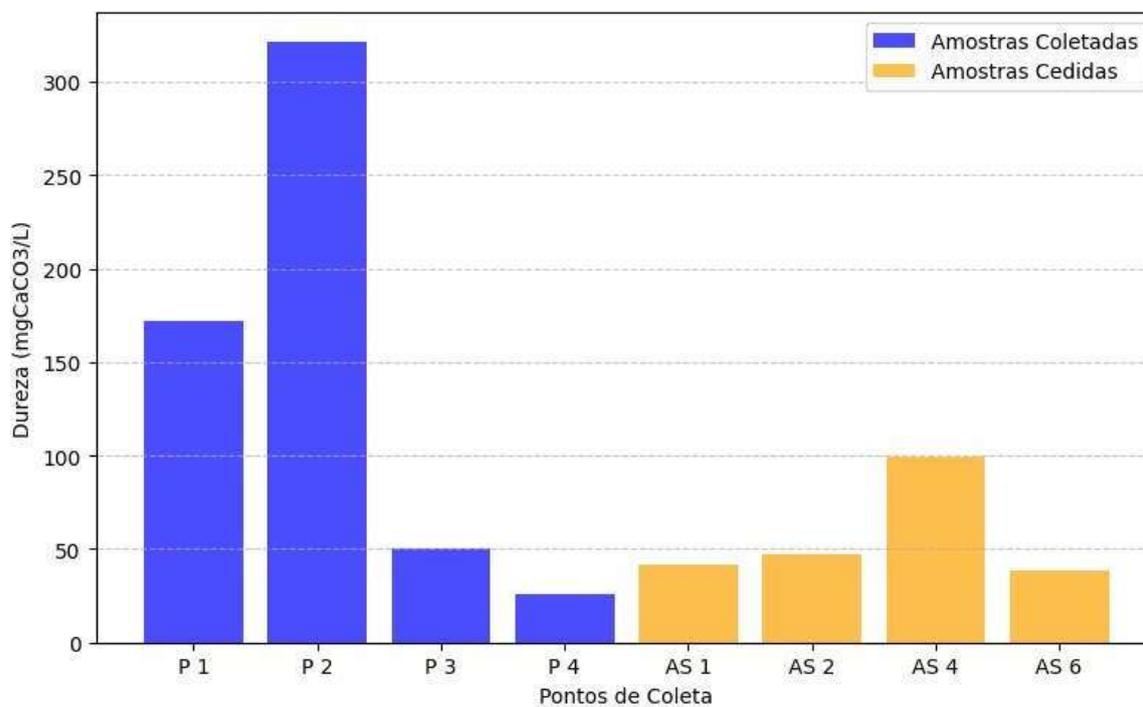
Ao analisar a matriz de correlação (tabela 3 e 4) da dureza para as amostras coletadas, observa-se uma forte correlação com a condutividade elétrica, alcalinidade e cálcio, e nenhuma correlação com o magnésio. Já na matriz de correlação das amostras cedidas, a dureza apresenta forte correlação positiva com todas as outras variáveis exceto pH.

Novamente, no gráfico de valores de dureza (figura 16), a variável exibe valores extremos quando associada aos pontos com a presença de mármore, seja in situ ou em processo de exploração, conforme tabela 8.

**Tabela 8-** Valores de Dureza

Pontos de coleta	Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)
P1	172
P2	321
P3	50
P4	26
AS1	41,54
AS2	47
AS4	99,15
AS6	38,38
Valor médio	48,5 (±) 101,43

Fonte: Autor

**Figura 16-** Distribuição dos valores de Dureza

Fonte: Autor

## 6.6 Cálcio

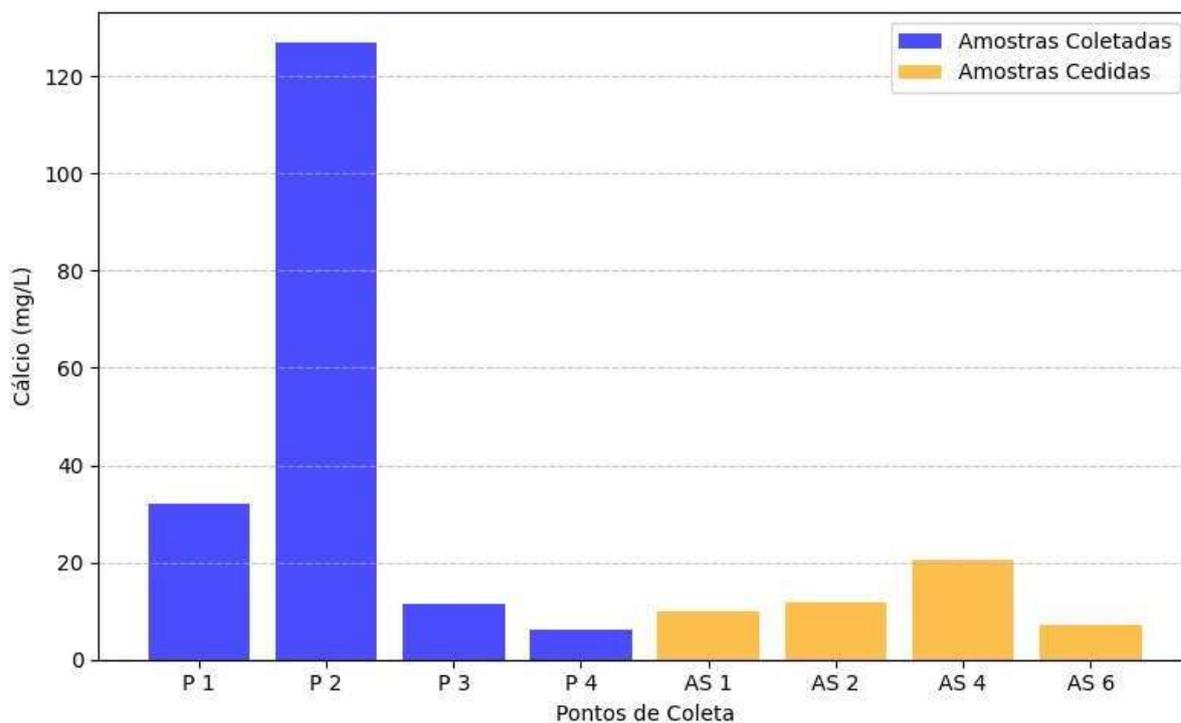
A matriz de correlação (tabela 3 e 4) de cálcio para as amostras coletadas apresenta uma forte correlação positiva com todas as outras variáveis, exceto com o magnésio, que apresenta uma fraca correlação negativa. Por outro lado, na matriz de correlação das amostras cedidas, o cálcio tem uma forte correlação positiva com todas as outras variáveis exceto pH.

Assim como nas variáveis anteriores, os valores de cálcio se destacam (figura 17) nos pontos que estão associados à área de mineração de calcário, porém o maior valor está no ponto 2, conforme tabela 9.

**Tabela 9-** Valores de Cálcio

<b>Pontos de coleta</b>	<b>Cálcio (mg/L)</b>
P1	32
P2	126,8
P3	11,6
P4	6
AS1	9,86
AS2	11,8
AS4	20,37
AS6	7,1
Valor médio	11,7 (±) 40,74

Fonte: Autor

**Figura 17-** Distribuição do teor de cálcio.

Fonte: Autor

### 6.7 Magnésio

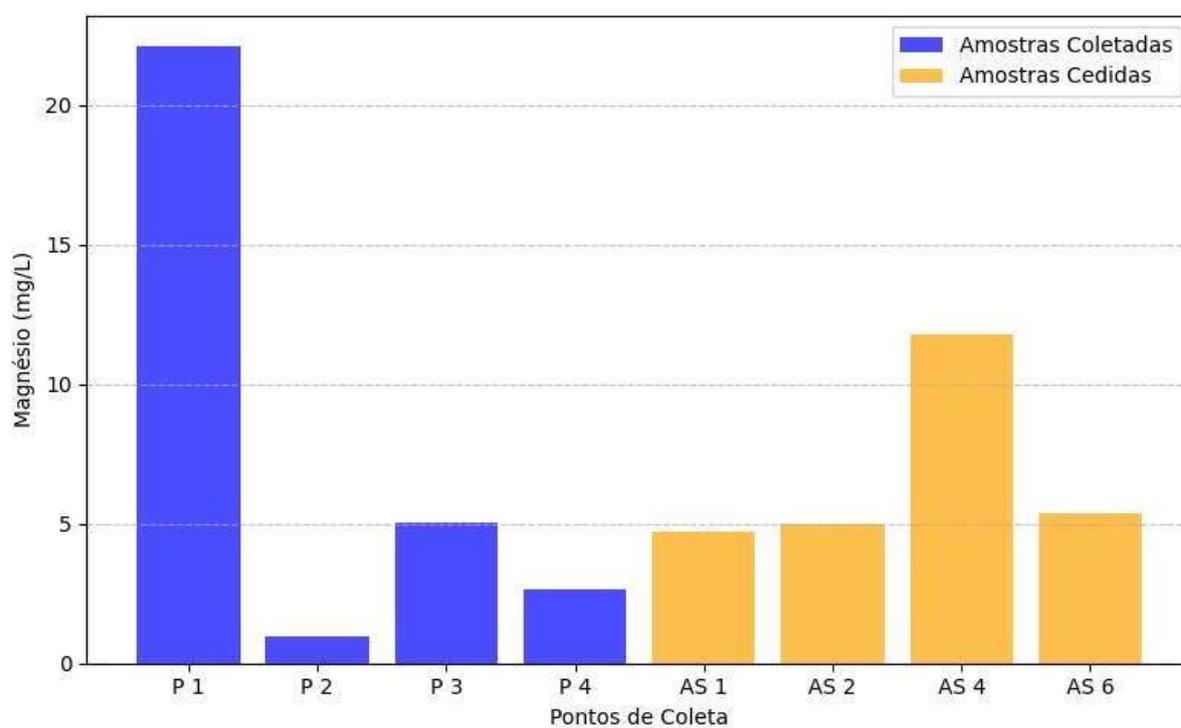
Ao analisar a matriz de correlação (tabela 3 e 4) das amostras coletadas, o magnésio não apresenta uma relação significativa com nenhuma outra variável. No entanto, na matriz das amostras cedidas, o magnésio mostra uma forte correlação positiva com todas as outras variáveis exceto pH.

O gráfico de magnésio (figura 18) é o que mais se desvia de um padrão. No ponto 1, das amostras coletadas, os teores são os mais altos, mas nos dados cedidos, a média dessa população de amostras é consideravelmente maior, conforme tabela 10.

**Tabela 10- Valores de magnésio**

Pontos de coleta	Magnésio (mg/L)
P1	22,08
P2	0,96
P3	5,04
P4	2,64
AS1	4,69
AS2	5
AS4	11,77
AS6	5,34
Valor médio	5,02 (±) 6,77

Fonte: Autor

**Figura 18- Distribuição do teor de magnésio**

Fonte: Autor

O ponto 1, que está correlacionado com a frente de lavra, apresentou valores de pH surpreendentemente estáveis, sendo classificado como neutro a levemente básico. Isso sugere que, apesar da proximidade com a área de extração de calcário, não houve impacto significativo sobre a alcalinidade da água. Por outro lado, o valor de condutividade elétrica de 415,50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , (com os parâmetros considerados normais variando de 10 a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) indica uma significativa alteração positiva, o que pode sinalizar a presença de íons dissolvidos, provavelmente oriundos de processos de lavagem e fragmentação das rochas locais. Esse aumento na condutividade elétrica é um indicativo importante de mudança na qualidade da água, pois está correlacionado à elevação dos sólidos dissolvidos totais, os quais podem interferir em diversos parâmetros ecológicos e de potabilidade. A alcalinidade da amostra, registrada dentro do limite de 500 mg/L para águas naturais, reforça a estabilidade do pH. A dureza da água neste ponto foi de 172 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , o que a caracteriza como moderadamente dura. Para fins comparativos, o limite recomendado para águas de abastecimento público é de 500 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , indicando que, apesar da dureza moderada, os valores estão dentro do aceitável para águas fluviais naturais (BRASIL, 2014).

O ponto 2 apresentou o maior valor de pH registrado de 7,60, classificando a água entre neutra ou levemente básica. Esse valor indica um ambiente com relativa estabilidade em termos de acidez. No entanto, a condutividade elétrica foi extremamente elevada, atingindo 705  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , o que sinaliza uma alta concentração de íons dissolvidos e indica um ambiente potencialmente poluído, possivelmente devido à influência de resíduos de mineração ou processos de lixiviação mineral. A alcalinidade, também a mais alta registrada entre os pontos, foi de 246,50 mg/L, permanecendo dentro do limite máximo de 500 mg/L para águas naturais. Esse valor indica um bom poder tamponante, o que contribui para a neutralização de ácidos e para a estabilidade do pH. A dureza da água no ponto 2 foi de 321 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , caracterizando-a como água muito dura, ainda que dentro dos limites de águas naturais, que é de 500 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . Esse nível elevado de dureza sugere uma grande concentração de minerais como cálcio e magnésio, frequentemente associados à atividade de mineração (BRASIL, 2014).

O ponto 3, localizado fora da área da cava, apresentou valores mais baixos para a maioria das propriedades analisadas, refletindo um ambiente com menor influência direta das atividades de mineração. A coleta ocorreu em um corpo d'água de médio porte a jusante da cascata do Salso, o local da coleta é próximo de onde é descartada a água bombeada diretamente da cava, conforme informado pelo responsável pela coleta. O pH neste ponto foi de 7,6, semelhante aos valores observados nos outros pontos, classificando a água como neutra a levemente básica. Esse valor sugere que, apesar do descarte, a influência sobre a acidez da água foi limitada, possivelmente devido à diluição proporcionada pelo corpo d'água. A condutividade elétrica foi registrada em 121,80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , um valor relativamente baixo em comparação com os pontos próximos à cava, mas ligeiramente acima do limite recomendado pelo "Manual de Controle de Qualidade da Água para Técnicos em ETAs," que define valores ideais entre 10 e 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esse leve aumento na condutividade sugere a presença de íons dissolvidos, mas em concentrações moderadas, que ainda podem estar dentro dos padrões aceitáveis para muitos usos. A alcalinidade registrada foi de 38,5 mg/L, indicando uma concentração baixa de compostos tamponantes e situando-se dentro dos limites naturais esperados para ambientes similares. Já a dureza foi de 50 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , caracterizando a água como mole. Essa característica indica baixas concentrações de minerais como cálcio e magnésio.

O ponto 4, localizado a montante dos demais pontos na cascata do Salso, foi utilizado como ponto de controle. Sendo menos exposto aos impactos diretos das atividades de mineração, ele serve como referência para comparar os efeitos da lavra nas características da água. Os valores de pH no ponto 4 foram neutros a levemente básicos, com uma medição laboratorial de 7,51, similar aos demais pontos e indicando um ambiente quimicamente estável em termos de acidez. A condutividade elétrica foi de 81,60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dentro do intervalo considerado normal segundo descrito anteriormente. Esse dado indica uma quantidade moderada de íons dissolvidos, característica esperada para um ambiente natural sem influência direta de descargas de mineração. A alcalinidade foi relativamente baixa, com um valor de 28 mg/L. Esse nível de alcalinidade é típico de águas com menor concentração de bicarbonatos e carbonatos, o que é comum em áreas mais preservadas. A dureza, medida em 26 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , classificou a água como mole, refletindo baixa presença de minerais

como cálcio e magnésio. Esses resultados corroboram o uso do ponto 4 como um controle adequado, pois demonstram condições de água natural com pouca interferência antrópica. A neutralidade do pH, condutividade elétrica dentro do esperado e baixa dureza e alcalinidade sugerem que, a montante da atividade de mineração, a qualidade da água permanece preservada, permitindo uma avaliação clara dos impactos nos outros pontos amostrados.

Em termos de comparação, o estudo de Souza et al., 2016, traz valores típicos de pH, alcalinidade e dureza para águas superficiais no estado do Rio Grande do Sul e para cidade de Caçapava do Sul (Tabela 11). Esses dados foram obtidos junto à CORSAN no período de 1996 a 2011. É possível observar que os dados de alcalinidade e dureza para Caçapava do Sul tendem a ser mais elevados que a faixa média do estado. Em relação aos dados obtidos neste trabalho, em relação aos quatro pontos amostrados, o pH tende a ser um pouco mais elevado que a média para o município. Da mesma forma, os demais parâmetros, principalmente para os pontos 1 e 2, os valores apresentam-se acima da faixa média tanto do município quanto do estado.

**Tabela 11-** Valores típicos das águas superficiais no Rio Grande do Sul e em Caçapava do Sul

Parâmetros	Rio Grande do Sul	Caçapava do Sul
pH	6,5-7,5	7,0
Dureza mg CaCO <sub>3</sub> /L	6,0-54,0	42,0-48,0
Alcalinidade mg CaCO <sub>3</sub> /L	18,0-72,0	54,0-60,0

Fonte: adaptado de Souza et al., 2016

## 7 CONCLUSÕES

A análise dos quatro pontos amostrados revela uma variação na qualidade da água relacionada à proximidade e à influência das atividades de mineração. Os pontos 1 e 2, situados próximos à frente de lavra, apresentaram aumentos significativos na condutividade elétrica, dureza e, em menor grau, na alcalinidade, refletindo uma maior carga de íons dissolvidos e minerais, provavelmente resultante dos processos de lavra. Esses valores indicam um impacto considerável na composição química da água, com potenciais implicações para a ecologia local e para o uso da água, especialmente no ponto 2, onde os valores se destacaram como os mais altos. Por outro lado, o ponto 3, localizado a jusante da Cascata do Salso mas, fora da área direta de influência da frente de lavra, apresentou valores mais moderados, sugerindo uma diluição dos impactos. Já o ponto 4, utilizado como controle a montante, apresentou características de água natural com condutividade, dureza e alcalinidade baixas, confirmando a menor interferência antrópica no sentido da mineração presente.

Esses resultados sugerem que a atividade de mineração contribui para a alteração da qualidade da água nas áreas próximas, enquanto pontos mais distantes e a montante apresentam menor influência, por provavelmente tratarem os efluentes de mineração, porém evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo para mitigar potenciais impactos ambientais. Então, podemos concluir que as alterações decorrentes da mineração não se restringem à frente de lavra. Mesmo no ponto 2, que está próximo à cava, a retirada da cobertura vegetal e a exposição do mármore contribuem para que esse ponto apresente os maiores valores de alteração. É importante considerar que ambos os processos podem contribuir para mudanças nas características químicas da água, especialmente em relação à concentração de íons e ao pH. Fatores como a composição mineral do solo, a topografia e as condições climáticas locais também desempenham um papel fundamental, tornando complexo o isolamento dos efeitos específicos da atividade mineradora em comparação aos processos naturais.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.B. **The Upper Precambrian of South America**. Boletim do Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 7: 45-80. 1976.

BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 215p

BECKER, M. S. **Uso de canais abertos de calcário para o tratamento de drenagem ácida de minas: uma revisão da literatura**. Porto Alegre - RS, 2023.

BITENCOURT, Maria de Fatima. **Geologia, petrologia e estrutura dos metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS**. 1983.

BORBA, A. W., SOUZA, L. F., MIZUSAKI, A. M. P., ALMEIDA, D. P., & STUMPF, P. P. **Inventário e avaliação quantitativa de geossítios: exemplo de aplicação ao patrimônio geológico do município de Caçapava do Sul (RS, Brasil)**. Pesquisas em Geociências, v. 40, n. 3, p. 275-294, 2013. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/77830>. Acessado em: 27 ago 2024.

BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. **Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional**.

BRASIL, Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**, Brasília: Funasa, 2014. 112 p, 2014.

CHEMALE JR., F. **Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense**, In HOLZ M. Geologia e Estratigrafia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Editora Gráfica da UFRGS. p 03-44. 2000.

DREVER, James I. et al. **The geochemistry of natural waters**. Englewood Cliffs: Prentice hall, 1988.

FRITZSONS, E. et al. **A influência das atividades mineradoras na alteração do pH e da alcalinidade em águas fluviais: o exemplo do rio Capivari, região do carste paranaense**. www.alice.cnptia.embrapa.br, 2009.

GARCEZ, L.N. **Manual de Procedimentos e Técnicas Laboratoriais Voltados para Análises de Águas e Esgotos Sanitários**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Laboratório de Saneamento. 2004.

GUEDES, J. de A.. **GEOQUÍMICA E MEIO AMBIENTE**. Revista Geotemas, Pau dos Ferros, v. 2, n. 1, 2012.

HARTMANN, L.A.; CHEMALE, Jr., F.; PHILIPP, R.P. 2007. **Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano**. In: Frantz, J.C., Ianuzzi, R. (eds.), 50 anos de Geologia no Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRGS-PETROBRÁS, p.97-123.

IBRAM/ANA. **A Gestão de Recursos Hídricos na Mineração**, Brasília, 2006. 334p.

KEFENI, K.K., MSAGATI, T.A.M., MAMBA, B.B., 2017. **Acid mine drainage: prevention, treatment option, and resource recovery: a review**. Journal of Cleaner Production 151, 475 - 493.

KOPEZINSKI, I. **Mineração x Meio Ambiente: Considerações Legais, Principais Impactos Ambientais e seus Processos Modificadores**, Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2000, 103 p.

MESTRINHO, S. S. P. **Aspectos da hidrogeoquímica voltados para Classificação das águas subterrâneas**. 8ª reunião GT CONAMA "Classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas". Natal-RN, julho. 2006.

MOREMIN, Pedro A., BUSSAB, Wilton O. **Estatística básica**. Editora Saraiva: 10ª edição. 2024.

NORDSTROM, D. K.; BLOWES, D. W.; PTACEK, C. J. **Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update**. Applied Geochemistry, v. 57, p. 3-16, 2015.

PARAHYBA, R. E. **Calcário agrícola**. DNPM - Departamento nacional de produção mineral. Fortaleza, 2009. 536 - 545 p.

REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A.; McNAUGHTON, N. J.; GROVES, D. I. & FLETCHER, I. R. 2000. **The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brazilian Cycle in southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 13, p. 191-216.

RODRIGUES, A.; Nalini, H. (2009). **Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais**. Rev. Escola de Minas, vol. 62, nº 2. Ouro Preto. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/ZRY3JsZPNCvbvxc9NvLXtGB/>. Acessado em: 27 ago 2024.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M.. Calcário e dolomito. In: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 363-387.

SÁNCHEZ, L. E. Mineração e meio ambiente. In: **Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p.196-213.

SCHMIDT, A. M.; GOMES, C. H.; CASA NOVA, G. P.; QUINTANILHA, J.; VIEIRA, L. Q.; MATHIAS, A. P. **Avaliação de Impacto Ambiental de Lavras de Calcário em Caçapava do Sul, RS**. Anais 15º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental, Bento Gonçalves, RS, 2015.

SCHMIDT, A. M.; SCHROEDER, J. K.; FLORES, B. A.; OLIVEIRA, B. C.; JAIME, D. M. (2017). **Estudo de Impacto Ambiental da Disposição de Rejeitos e Estéreis em Mineradora de Calcário**. Anais 2º Congresso de Engenharia Ambiental do Sul do Brasil. Lages, SC, Nov 2017.

SCHROEDER, Joseane Kolzer. **Avaliação da qualidade das águas e sedimentos oriundos da mineração de calcário**. 2018. 74 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Mineral) Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2018. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/handle/riu/3989>. Acesso em: 15 jul 2024.

SOUZA, Carine de F. et al. **Freshwater parameters in the state of Rio Grande do Sul, southern Brazil, and their influence on fish distribution and aquaculture**. *Neotropical Ichthyology*, v. 14, n. 03, p. e150163, 2016.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. - Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472 p.