

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

KAMILA VIANA PRESTES

**ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA LOCALIDADE
RINCÃO DOS BITENCOURT NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL, RS**

Caçapava do Sul

2025

KAMILA VIANA PRESTES

**ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA LOCALIDADE
RINCÃO DOS BITENCOURT 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.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen.

Coorientadora: Profa. Dra. Mayara Bitencourt Leão.

**Caçapava do Sul
2025**

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) .

P936e Prestes, Kamila Viana

ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA LOCALIDADE
RINCÃO DOS BITENCOURT NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL, RS /
Kamila Viana Prestes.

88 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2025.

"Orientação: Marco Antonio Fontoura Hansen".

1. Análise físico-químicas. 2. Análise bacteriológica. 3.
Aquífero fissural. 4. Hidrogeologia. I. Título.

KAMILA VIANA PRESTES

**ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA LOCALIDADE
RINCÃO DOS BITENCOURT 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: 10 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Giuseppe Betino De Toni
UNIPAMPA

Dr. Lenon Melo Ilha
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO FONTOURA HANSEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 18/12/2025, às 22:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GIUSEPPE BETINO DE TONI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2025, às 12:07, 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, informando o código verificador **1933570** e o código CRC **4B081B1C**.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por colocar ao meu lado pessoas que contribuíram para a minha trajetória acadêmica, oferecendo apoio, força e direcionamento nos momentos desafiadores. Aos meus pais, minha irmã e familiares, que são a minha base e sempre me apoiaram e incentivaram a seguir meus sonhos.

Expresso minha gratidão a todos que estiveram presentes ao longo do desenvolvimento deste trabalho, em especial à Emilly Carneiro, Jaqueline Difante, João Victor Nascimento, João Marcos e Guilherme Rangel, que estiveram ao meu lado durante todo o processo, sempre atenciosos, acolhedores e oferecendo suporte nos momentos mais difíceis. Ao Giuseppe de Toni, que acolheu minha ideia no primeiro momento e me estimulou a seguir com a pesquisa na área da hidrogeologia, e a Mariah Rocha, que se disponibilizou a ouvir minhas ideias iniciais e contribuiu de forma significativa para o direcionamento e a definição dos objetivos deste estudo.

Agradeço também à equipe do NUDE, que prestou suporte durante toda a minha graduação e, especialmente, nesta etapa final, ao Lenon Ilha que contribuiu para o adequado andamento das saídas de campo e das análises realizadas, e à Ângela Fleck, pelo auxílio nas análises de turbidez. Cada gesto de apoio teve grande importância ao longo do meu percurso acadêmico.

Manifesto minha gratidão aos laboratórios Grupo de Química Ambiental e Materiais e Laboratório de Análises e Caracterização Tecnológica, bem como aos demais setores que disponibilizaram infraestrutura, equipamentos e suporte técnico indispensáveis à realização das atividades práticas e das análises que compõem este estudo.

Meu agradecimento especial ao Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen e à Profa. Dra. Mayara Bitencourt Leão, pelo acolhimento, dedicação e comprometimento na orientação, sempre com disponibilidade, paciência e atenção. A contribuição de ambos foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta jornada, deixo registrado o meu sincero agradecimento.

Dedico este trabalho aos meus pais, Etelvina e Valdimar, à minha irmã Karine, e a meus familiares e amigos, pelo apoio constante e por sempre me incentivarem a percorrer meus sonhos.

RESUMO

A água subterrânea constitui recurso essencial para o abastecimento humano, sobretudo em regiões sujeitas a estiagens e a limitações na rede pública, como ocorre em Caçapava do Sul, RS. Na localidade Rincão dos Bitencourt, inserida no aquífero fissural associado ao Complexo Granítico Caçapava do Sul, parcela significativa da população depende de poços e nascentes, muitas vezes sem outorga ou acompanhamento técnico. Este estudo teve como objetivo caracterizar os poços existentes e avaliar a qualidade da água subterrânea consumida na região, mediante a integração de dados espaciais processados no *software* QGIS 3.40, observações de campo e análises físico-químicas e microbiológicas realizadas conforme legislação vigente. Os resultados permitiram identificar a relação entre o contexto geológico-estrutural, o relevo e a dinâmica de captação. Constatou-se que os poços A, B e D apresentam níveis d'água rasos, enquanto o Poço C intercepta fraturas profundas, o que indica maior tempo de residência e maior grau de mineralização. Os sistemas de fraturas NW–SE e NNE–SSW demonstraram forte controle sobre a circulação da água subterrânea. Do ponto de vista físico-químico, a maioria dos parâmetros manteve-se dentro dos limites de potabilidade. Entretanto, a análise microbiológica revelou o principal fator restritivo ao consumo, com recorrência de coliformes totais e presença de *Escherichia coli* em todos os poços no inverno, indicando vulnerabilidade sanitária e contaminação fecal recente. Os resultados evidenciam a heterogeneidade característica de aquíferos fissurais e demonstram que, embora a qualidade físico-química seja predominantemente satisfatória, as condições microbiológicas tornam a água imprópria para consumo sem tratamento prévio. O estudo reforça a necessidade de adoção de medidas de proteção das captações, melhorias estruturais e implementação de processos adequados de desinfecção, fornecendo subsídios para a gestão segura e sustentável da água subterrânea na região.

Palavras-chave: análise físico-químicas; análise bacteriológica; aquífero fissural; hidrogeologia.

ABSTRACT

Groundwater is an essential resource for human supply, especially in regions affected by droughts and limitations in the public water supply system, as observed in Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil. In the Rincão dos Bitencourt locality, which is situated within a fractured aquifer associated with the Caçapava do Sul Granitic Complex, a significant portion of the population relies on wells and springs, often without water-use permits or technical monitoring. This study aimed to characterize the existing wells and evaluate the quality of groundwater consumed in the region through the integration of spatial data processed in QGIS 3.40, field observations, and physicochemical and microbiological analyses conducted in accordance with current legislation. The results allowed the identification of relationships among the geological-structural context, relief, and water abstraction dynamics. Wells A, B, and D were found to have shallow water levels, whereas Well C intercepts deep fractures, indicating a longer groundwater residence time and a higher degree of mineralization. The NW–SE and NNE–SSW fracture systems exerted strong control over groundwater circulation. From a physicochemical standpoint, most parameters remained within drinking water standards. However, microbiological analyses revealed the main restrictive factor for consumption, with the recurrent presence of total coliforms and the detection of *Escherichia coli* in all wells during winter, indicating sanitary vulnerability and recent fecal contamination. The results highlight the inherent heterogeneity of fractured aquifers and demonstrate that, although physicochemical water quality is predominantly satisfactory, microbiological conditions render the water unsuitable for human consumption without prior treatment. This study reinforces the need for protective measures at water abstraction sites, structural improvements, and the implementation of appropriate disinfection processes, providing essential support for the safe and sustainable management of groundwater resources in the region.

Keywords: physicochemical analyses; bacteriological analysis; fractured aquifer; hydrogeology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	23
Figura 2 - Mapa geológico simplificado das unidades geotectônicas do Escudo-Sul-Riograndense.....	25
Figura 3 - Mapa geológico Caçapava do Sul.....	27
Figura 4 - Representação esquemática do ciclo hidrológico.....	29
Figura 5 - Sistema Aquíferos do estado do Rio Grande do Sul.....	30
Figura 6 - Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo.....	34
Figura 7 - Uso da água subterrânea no país.....	38
Figura 8 - Fluxograma das atividades realizadas.....	46
Figura 9 - Quadro com fatores de conversão.....	54
Figura 10 - Precipitação correspondentes aos períodos de campanhas de campo realizadas ao longo do ano.....	58
Figura 11 - Modelo Digital de Elevação com as curvas de nível da área de estudo.....	60
Figura 12 - Mapa de declividade da área de estudo.....	61
Figura 13 - Mapa de lineamentos e diagrama de roseta do tipo frequência sobre imagem de radar ALOS PALSAR da área de estudo. *n= 46.....	62
Figura 14 - Poços onde foram realizadas as coletas para análise hidrogeoquímicas: A) Cacimba A; B) Cacimba B; C) Poço C; D) Cacimba D.....	63
Figura 15 - Solo saturado e presença de lâmina d'água superficial características de nascente, solo saturado.....	64
Figura 16 - Temperaturas médias obtidas por poços durante as estações de verão, outono, inverno e primavera.....	65
Figura 17 - Valores do parâmetro cor dos poços durante as estações do verão e outono.....	67
Figura 18 - pH obtidos por poços durante as quatro estações.....	69
Figura 19 - Condutividade elétrica obtida por poços durante as estações de verão, outono, inverno e primavera.....	70
Figura 20 - Turbidez obtida por poços durante as estações do verão, outono e primavera.....	72
Figura 21 - Amônia obtida por poços durante as estações de outono,	

inverno e primavera.....	74
Figura 22 - Alcalinidade obtida por poços durante as quatro estações.....	75
Figura 23 - Dureza obtida por poços durante as estações do verão, outono, inverno e primavera.....	77
Figura 24 - STD obtida por poços durante as quatro estações.....	78

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Coordenadas dos poços de coleta.....	23
Tabela 2 - As nações com as maiores extrações anuais estimadas de águas subterrâneas para todos os usos - Mundial - 2010.....	36
Tabela 3 - Direção de iluminação e os respectivos azimute utilizados no mapa de lineamentos.....	49
Tabela 4 - As campanhas de amostragem da água foram relacionadas com as estações do ano.....	50
Tabela 5 - Temperatura da água (°C) dos poços nas estações do ano.....	65
Tabela 6 - Parâmetro cor (uH) da água dos poços nas estações do ano.....	66
Tabela 7 - Parâmetro PH da água dos poços nas estações do ano.....	68
Tabela 8 - Parâmetro de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) da água dos poços nas estações do ano.....	69
Tabela 9 - Parâmetro de turbidez (uT) da água dos poços nas estações do ano.....	71
Tabela 10 - Parâmetro cloreto (mg/L) da água dos poços nas estações do ano.....	72
Tabela 11 - Parâmetro ferro (mg/L) na água dos poços nas estações do ano.....	73
Tabela 12 - Parâmetro amônia (mg/L) na água dos poços nas estações do ano.....	73
Tabela 13 - Parâmetro alcalinidade (mg/L CaCO_3) na água dos poços nas estações do ano.....	75
Tabela 14 - Parâmetro dureza (mg/L CaCO_3) da água dos poços nas estações do ano.....	76
Tabela 15 - Parâmetro de sólidos totais dissolvidos (mg/L) na água dos poços nas estações do ano.....	77
Tabela 16 - Resultado de coliformes totais na água dos poços nas estações do ano.....	79
Tabela 17 - Resultado de Escherichia Coli na água dos poços nas estações do ano.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Ca²⁺ – Íons Cálcio

CDF – Cinturão Dom Feliciano

CE – Condutividade elétrica

CGCS – Complexo Granítico Caçapava do Sul

CO₃²⁻ – Carbonatos

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento

CPRM – Serviço Geológico do Brasil (SGB) (antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DRHS – Departamento de Gestão de Recursos Hídricos e Saneamento

E – Leste

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESrg – Escudo Sul-Rio-Grandense

Fe²⁺ – Íons Ferro (dissolvido)

Fe³⁺ – Íon Ferro (insolúvel)

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde

Ga – Giga ano

HCO₃⁻ – Bicarbonatos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Km – Quilômetros

Km² – Quilômetro quadrado

Km³ – Quilômetro cúbico

Ma – Milhões de anos

Mg²⁺ – Íons Magnésio

MDE – Modelo Digital de Elevação

mg/L – Miligramas por litro

m³/h – Metros cúbicos por hora

m³/s – Metros cúbicos por segundo

mL – Mililitros

Mn²⁺ – Íons Manganês

Mm³ – Milhões de metros cúbicos
N – Norte
NE–SW – Nordeste – Sudoeste
NH₄Cl – Cloreto de amônio
NH₄OH – Hidróxido de amônio
NNE–SSW – Norte-Nordeste a Sul-Sudoeste
NNW–SSE – Norte-Noroeste a Sul-Sudeste
NW–SE – Noroeste – Sudeste
OH⁻ – Hidróxidos
pH – Potencial Hidrogeniônico
RIMAS – Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas
SDT – Sólidos Dissolvidos Totais
SIG – Sistema de Informação Geográfica
Sr²⁺ – Íons Estrôncio
TSG – Terreno São Gabriel
U-Pb – Urânio-Chumbo
µm – Micrômetro
µS/cm – Microsiemens por centímetro
UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNT – Unidades Nefelométricas de Turbidez
VMP – Valor Máximo Permitido
WHO – World Health Organization
ZCCS – Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul
ZCI – Zona de Cisalhamento Ibaré

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....	21
2.1 Objetivo Geral.....	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
2.3 Justificativa.....	21
3 ÁREA DE ESTUDO.....	23
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
4.1 Contexto Geológico Regional.....	24
4.2 Contexto Geológico Local.....	26
4.3 Ciclo Hidrológico.....	28
4.4 Contexto Hidrogeológico.....	30
4.4.1 Aquíferos.....	31
4.4.2 Água Subterrânea.....	33
4.4.3 Importância da Água Subterrânea no Brasil.....	35
4.5 Qualidade da Água Subterrânea.....	39
4.5.1. Temperatura.....	41
4.5.2. Potencial Hidrogeniônico (pH).....	41
4.5.3. Cor.....	42
4.5.4. Turbidez.....	42
4.5.5. Alcalinidade.....	42
4.5.6. Dureza.....	43
4.5.7. Condutividade elétrica.....	43
4.5.8. Sólidos Dissolvidos Totais.....	43
4.5.9. Amônia.....	44
4.5.10 Ferro.....	44
4.5.11 Cloreto.....	44
4.5.12 Coliformes termotolerantes e Escherichia coli.....	45
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
5.1 Revisão Bibliográfica.....	47
5.2 Processamento de dados espaciais.....	47
5.2.1 Modelo digital de elevação.....	47
5.2.2 Mapa de Curvas de Nível.....	47

5.2.3	Mapa de declividade.....	48
5.2.4	Mapa de lineamentos.....	48
5.3	Dados de precipitação.....	49
5.4	Trabalho De Campo.....	49
5.4.1	Caracterização área de estudo.....	50
5.4.2	Campanhas de amostragem.....	50
5.5	Análise da Qualidade da Água.....	51
5.5.1	pH.....	52
5.5.2	Temperatura.....	52
5.5.3	Cor.....	52
5.5.4	Turbidez.....	53
5.5.5	Condutividade elétrica.....	53
5.5.6	Sólidos dissolvidos totais.....	53
5.5.7	Alcalinidade total.....	54
5.5.8	Dureza.....	55
5.5.9	Ferro.....	55
5.5.10	Amônia.....	56
5.5.11	Cloretos.....	56
5.5.12	Análises microbiológicas.....	56
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
6.1	Condições pluviométricas durante as campanhas de campo.....	57
6.2	Modelo Digital de Elevação (MDE).....	58
6.3	Declividade da área de estudo.....	59
6.4	Lineamentos da área de estudo.....	61
6.5	Análise de campo.....	62
6.6	Análises físico-químicos.....	64
6.6.1	Temperatura.....	64
6.6.2	Cor.....	66
6.6.3	pH.....	68
6.6.4	Condutividade elétrica.....	69
6.6.5	Turbidez.....	71
6.6.6	Cloreto.....	72
6.6.7	Ferro.....	73
6.6.8	Amônia.....	73

6.6.9 Alcalinidade.....	74
6.6.10 Dureza total.....	76
6.6.11 Sólidos totais dissolvidos.....	77
6.7 Análise bacteriológica.....	79
CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

Desde o princípio a água é de grande importância para humanidade e manutenção dos ecossistemas terrestres, sendo um recurso estratégico fundamental para o desenvolvimento e a qualidade de vida, proporcionando, em escala global, condições de sobrevivência no planeta (Feitosa et al., 2008). Sua importância está além da simples necessidade de hidratação, sendo essencial para a agricultura, a indústria e a geração de energia, além de ser fundamental na regulação do clima. O filósofo grego Tales de Mileto, conforme observou Aristóteles, afirmou que a água está presente em tudo o que cresce, em tudo que é natural. Para Tales, a água é o princípio, ou seja, tudo é água (Filho, 2006).

Contudo, diversas ações antrópicas têm comprometido os ciclos naturais desse recurso. O despejo inadequado de resíduos industriais, o uso intensivo de pesticidas na agricultura e o lançamento de esgotos sem tratamento interferem diretamente na qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos. O desmatamento, por sua vez, intensifica processos erosivos e de sedimentação, reduzindo o volume de água disponível em rios, lagos e reservatórios. Além disso, essas ações impactam os ciclos biogeoquímicos, alteram a dinâmica dos ecossistemas e favorecem o transporte de substâncias tóxicas para os sistemas aquáticos, comprometendo a qualidade da água (Tundisi, 2014).

Diante desse contexto, a utilização da água subterrânea é uma alternativa para suprir as necessidades de comunidades onde a disponibilidade de água superficial se tornou limitada, muitas vezes, sendo a única fonte de água potável disponível em áreas rurais ou periféricas sem acesso à rede pública de abastecimento. Além dessa situação a perfuração de poços privados surge como resposta à ineficiência ou à intermitência do fornecimento público (Hirata et al., 2019).

Em escala global, a água subterrânea representa uma fonte fundamental para o abastecimento humano, agrícola, industrial e urbano, sendo utilizada sob as mais diversas condições climáticas (Todd et al., 2005). Esta, apresenta-se como um recurso confiável, com qualidade físico-química, em geral, melhor e menor vulnerabilidade às secas. Apesar de sua relevância, esse recurso ainda é subestimado e, frequentemente, mal gerido, o que contribui para sua degradação e exploração excessiva (UNESCO, 2022). O uso intensivo e desregulado pode levar a problemas ambientais graves, como o rebaixamento do nível freático, subsidência

do solo, intrusão salina em áreas costeiras e contaminações químicas e bacteriológicas de difícil remediação (Llamas e Custodio, 2002; Todd, 2005).

A água subterrânea representa 97% das águas doces líquidas do planeta o que torna os aquíferos o maior reservatório de água potável da humanidade (Hirata et al., 2019). Sua extração é realizada através da perfuração de poços rasos ou profundos, dependendo da profundidade dos aquíferos. A gestão dos recursos subterrâneos, no entanto, enfrenta desafios significativos, especialmente devido à sua natureza invisível, o que dificulta a percepção pública sobre sua importância e compromete ações voltadas à sua proteção. Como destacado por Hirata et al. (2019), "longe dos olhos, longe do coração".

O aproveitamento racional da água subterrânea, elemento-chave para o desenvolvimento, enfrenta pelo menos três desafios relacionados à necessidade de conhecimentos: (i) exploração, avaliação e exploração hidrogeológica; (ii) proteção e conservação das reservas; e (iii) corolário dos dois primeiros, associado ao planejamento e gestão adequados, com base em dados confiáveis e uso sustentável (Feitosa et al., 2008). Para tanto, são indispensáveis estudos hidrogeológicos específicos, que forneçam informações sobre as características locais dos aquíferos, suas funções e uso, como suas interações com as águas superficiais, os ecossistemas e o meio ambiente, possibilitando intervenções planejadas e sustentáveis (Margat e Van der Gun, 2013). Essa necessidade é reforçada por Hirata et al. (2019), ao advertir que, uma vez contaminados, os aquíferos apresentam uma capacidade extremamente limitada de autodepuração, tornando essencial a adoção de medidas preventivas e uma gestão rigorosa.

A importância de uma gestão eficiente desse recurso torna-se ainda mais evidente em regiões rurais ou sujeitas a estiagens frequentes, como ocorre em diversas localidades do Rio Grande do Sul. Em Caçapava do Sul, a relação histórica com os mananciais subterrâneos é marcada pela utilização de fontes naturais desde as primeiras ocupações do território, destacando-se a Fonte do Mato e a Fonte do Conselheiro, que desempenharam papel fundamental nesse processo, ambas de importância histórica e social (Ilha et al., 2023).

Atualmente, a zona rural ainda depende de poços e nascentes para seu abastecimento. Segundo dados do censo IBGE (2022) compilados pelo Instituto Água e Saneamento, cerca de 25.873 habitantes (79,96%) do município são atendidos pela rede geral de distribuição, enquanto 1.408 pessoas (4,35%) utilizam

poços profundos ou artesianos, 628 (1,94%) dependem de poços rasos, freáticos ou cacimbas, e outras 29 (0,09%) recorrem a fontes alternativas como minas, nascentes, carro-pipa, água da chuva ou de corpos hídricos superficiais.

A ausência de outorga em muitos desses poços, dificulta o conhecimento quanto às características dos aquíferos e parâmetros da água, além de que, embora exista o monitoramento por meio da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) da CPRM, que acompanha variações de nível em poços distribuídos pelo estado do Rio Grande do Sul, grande parte desse acompanhamento concentra-se em aquíferos porosos, deixando parcialmente negligenciados os aquíferos fraturados, igualmente importantes para o abastecimento local (DRHS, 2022).

Diante desse cenário, e reconhecendo a importância dos poços e nascentes para a zona rural, esta pesquisa tem como objetivo uma melhor compreensão dos poços já perfurados e análise da qualidade de suas águas na região Rincão dos Bitencourt, município de Caçapava do Sul - RS, com intuito de aprimorar o conhecimento técnico e disponibilizar à comunidade informações sobre alguns parâmetros da água subterrânea em uso.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

2.1 Objetivo Geral

Estudar os poços de água localizados no aquífero fissural da região Rincão dos Bitencourt, em Caçapava do Sul, RS, integrando dados de sensoriamento remoto aplicado ao geoprocessamento, observações de campo e análises físico-químicas e bacteriológicas da água subterrânea, a fim de compreender sua dinâmica hidrogeológica e as condições de qualidade da água para consumo humano.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Utilizar técnicas de geoprocessamento para elaboração dos mapas de declividade, curvas de nível e lineamentos, visando identificar e mapear o relevo e feições estruturais que possam influenciar o fluxo subterrâneo do aquífero fissural.
- b) Interpretar as análises físico-químicas e bacteriológicas da água dos poços, com o intuito de determinar os parâmetros de potabilidade da água subterrânea.

2.3 Justificativa

No município de Caçapava do Sul, a zona urbana, mesmo provida de rede de distribuição, ainda faz uso de poços comunitários e poços residenciais particulares, enquanto a maior parte da zona rural depende predominantemente de poços e nascentes para seu abastecimento. Soma-se a isso o fato de que, durante períodos de estiagem, até mesmo a população urbana recorre a poços como fonte alternativa de água, aumentando a pressão sobre o aquífero local. Entretanto, grande parte dos poços existentes na região não possui outorga e, conseqüentemente, carece de informações técnicas quanto à sua capacidade produtiva, características hidrogeológicas e, principalmente, quanto à qualidade da água utilizada para consumo humano.

Nesse contexto, a realização de análises físico-químicas torna-se fundamental para a avaliação das condições de potabilidade da água subterrânea e para a identificação de possíveis riscos à saúde da população usuária desses sistemas de

captação, uma vez que permitem compreender a composição hidrogeoquímica da água, sua relação com o meio geológico e possíveis alterações decorrentes de processos naturais ou de influências antrópicas.

Por sua vez, as análises bacteriológicas são indispensáveis para avaliar a segurança sanitária da água subterrânea, especialmente em áreas rurais onde as captações frequentemente apresentam proteção inadequada e estão próximas a fontes potenciais de contaminação, como fossas sépticas, criação de animais e uso do solo agrícola. A detecção de coliformes totais e de *Escherichia coli* permite identificar contaminação de origem fecal recente e avaliar a vulnerabilidade dos poços às condições superficiais.

Dessa forma, a integração das análises físico-químicas e bacteriológicas com dados de campo e de geoprocessamento possibilita uma avaliação mais completa do sistema aquífero da localidade Rincão dos Bitencourt, contribuindo para o diagnóstico da qualidade da água subterrânea em uso, para a identificação de fragilidades nas captações existentes e para adoção de medidas de proteção e gestão adequadas, visando o uso seguro e sustentável desse recurso hídrico.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (figura 1) está localizada no município de Caçapava do Sul, situado na porção centro-sul do estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 260 km da capital Porto Alegre. Mais especificamente, a área de interesse está inserida na localidade denominada Rincão dos Bitencourt, zona rural do município.

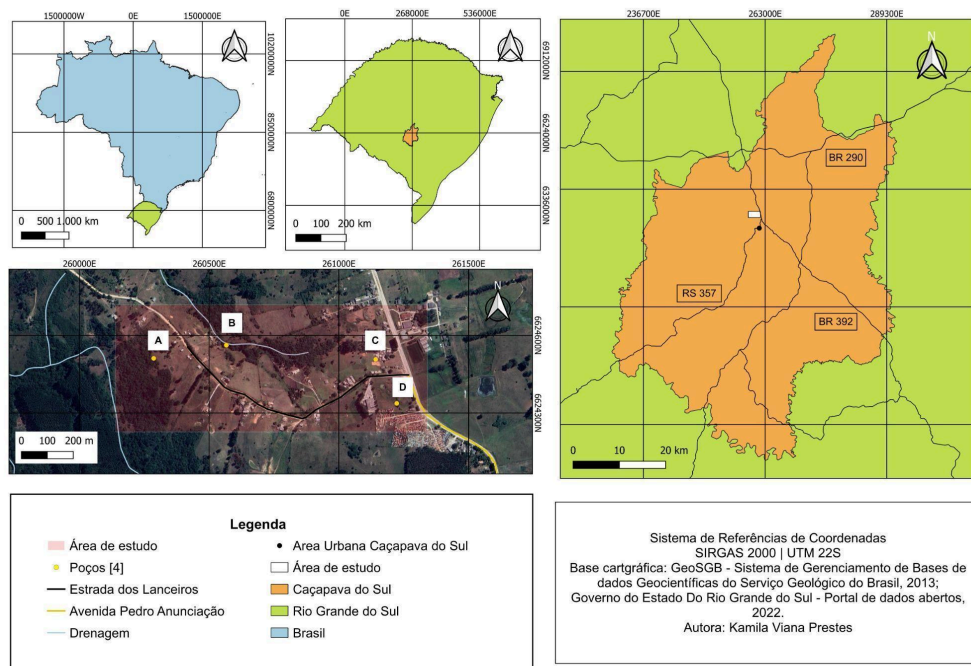
O acesso principal ocorre a partir do perímetro urbano pela Avenida Pedro Anunciação, que dá acesso aos poços C e D e a partir dessa mesma avenida, seguindo por uma estrada vicinal com direção leste-oeste, denominada Estrada dos Lanceiros, é possível acessar os poços A e B. As coordenadas dos poços de coleta se encontram na tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas dos poços de coleta.

Pontos	COORDENADA (X)	COORDENADA (Y)
A	260286	6624511
B	260566	6624560
C	261142	6624507
D	261223	6624337

Fonte: A autora, 2025.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: A autora, 2025.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

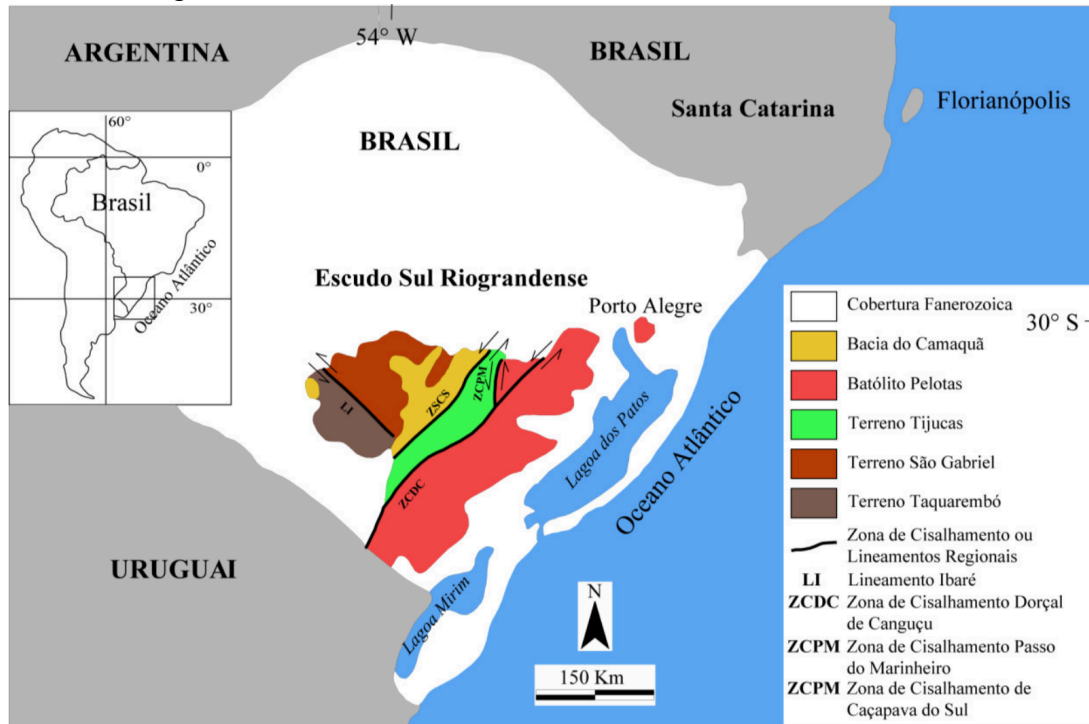
4.1 Contexto Geológico Regional

A região de Caçapava do Sul, situada no Escudo Sul-rio-grandense (ESrg), está inserida no domínio do Terreno São Gabriel (TSG), unidade geotectônica que compõe o Cinturão Dom Feliciano (CDF). O ESrg constitui uma importante unidade geológica, resultante dos processos de geração e deformação de crosta continental, tendo a maior parte de sua evolução atribuída aos ciclos orogênicos, Transamazônico (2,26 Ga - 2,00 Ga) e Brasileiro (900 Ma - 535 Ma). É formado, a oeste, por uma unidade paleoproterozoica, Terreno Nico Pérez, também denominado Terreno Taquarembó na porção brasileira e pelo CDF, de idade neoproterozoica, a leste (Hartmann et al., 2007; Koester et al., 2021).

O CDF, formado ao longo de 450 Ma, é uma faixa móvel marginal ao Cráton do Rio de La Plata, é um orógeno orientado segundo a direção NE-SW que se estende por mais de 1.200 km, desde o sul do Uruguai até o estado de Santa Catarina, no Brasil, compreendendo quase toda a área de afloramento do ESrg. Esse evento envolveu a amalgamação dos blocos cratônicos pertencentes à plataforma sul-americana, como os crátons Luíz Alves e Rio de la Plata, e do sudoeste africano, representado pelos crátons do Congo e Kalahari, resultando na formação do Gondwana Ocidental (Fragoso Cesar, 1980; Oyhantçabal et al., 2011; Philipp et al., 2016; Cruz et al., 2022).

Esta unidade é caracterizada por complexos metamórficos-migmatítico-graníticos organizados em três faixas paralelas, denominadas por Fragoso Cesar (1980) como Zona Central, Flanco Ocidental e Flanco Oriental. A concordância regional entre essas faixas é evidenciada por estruturas que variam desde espessas zonas de cataclasitos e milonitos até pequenas falhas, bem como pela disposição dos corpos granitóides, pelos eixos de dobras envolvendo litologias distintas, que vão de filitos a migmatitos, e pelo alinhamento de minerais filiformes e placóides. Os limites entre essas faixas são marcados por fraturas profundas com rejeitos significativos, tanto horizontais quanto verticais, responsáveis pela justaposição destas unidades (Fragoso Cesar, 1980). No Rio Grande do Sul o CDF é constituído pelo Terreno São Gabriel, Terreno Tijucas, Batólito Pelotas e pela Bacia do Camaquã, como ilustrado na figura 2 (Bicca, 2013).

Figura 2 - Mapa geológico simplificado das unidades geotectônicas do Escudo-Sul-Riograndense.



Fonte: Bicca, 2013.

O TSG localiza-se na porção ocidental do CDF e apresenta forma alongada com direção N20°–30°E, abrangendo uma área de aproximadamente 110 km por 60 km. É recoberta, a oeste e ao norte, por unidades fanerozóicas da Bacia do Paraná, sendo limitada ao sul pela Zona de Cisalhamento Ibaré (ZCI) e a leste pela Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul (ZCCS), ilustrado na figura 3 (Philipp et al., 2016). É constituído por remanescentes de complexos ofiolíticos e por dois arcos magmáticos de idade neoproterozoica. O arco mais antigo corresponde a um arco intraoceânico, denominado Passinho, enquanto o mais recente representa um arco de margem continental ativa, conhecido como arco de São Gabriel. Essas unidades são recobertas por sequências sedimentares e vulcânicas atribuídas à Associação Camaquã, do Ediacarano, e intrudidas por corpos graníticos relacionados à Orogenia Dom Feliciano. O TSG pode ser subdividido em quatro associações principais, complexos metassedimentares, Prisma de Acreção Palma, rochas relacionadas a arcos magmáticos, e rochas vulcanossedimentares da Bacia Camaquã, juntamente com os plutonitos associados. Segundo os autores, dados isotópicos recentes sugerem que a evolução do TSG ocorreu entre 890 e 540 Ma, sendo marcada por três eventos orogênicos, o evento Passinho (890–850 Ma), o

evento São Gabriel (770–680 Ma), e o evento Dom Feliciano (650–540 Ma) (Philipp et al., 2018).

4.2 Contexto Geológico Local

Dentro desse contexto regional situa-se a área de estudo no Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS), conhecido também como batólito Caçapava, exposto na parte leste do TSG (Saalman et al., 2005).

O CGCS com 600 Ma (Babinski et al., 1996), porém dados mais recentes (Leite et al., 1998; Remus et al., 2000; Hoerle et al., 2023; Madruga et al., 2024), definem um intervalo de 580-560 Ma para o magmatismo deste complexo utilizando estimativas geocronológicas U-Pb em Zircão. O CGCS é composto essencialmente por rochas graníticas de afinidade cálcio-alcálica e caráter predominantemente sin-tectônico (Sartori et al., 1985). É uma intrusão diapírica ocorrida nos estágios tardios da Orogênese Brasileira, período marcado pelo desenvolvimento de bacias ensiálicas e zonas de cisalhamento com magmatismo granítico associado. Possui aproximadamente 250 km² de extensão aflorantes (Nardi et al., 1989) com cerca de 25 km de extensão na direção norte-sul e aproximadamente 10 km na direção leste-oeste, apresentando forma elíptica em planta, conforme mostrado na figura 3 (Bittencourt 1983; Sartori et al., 1985).

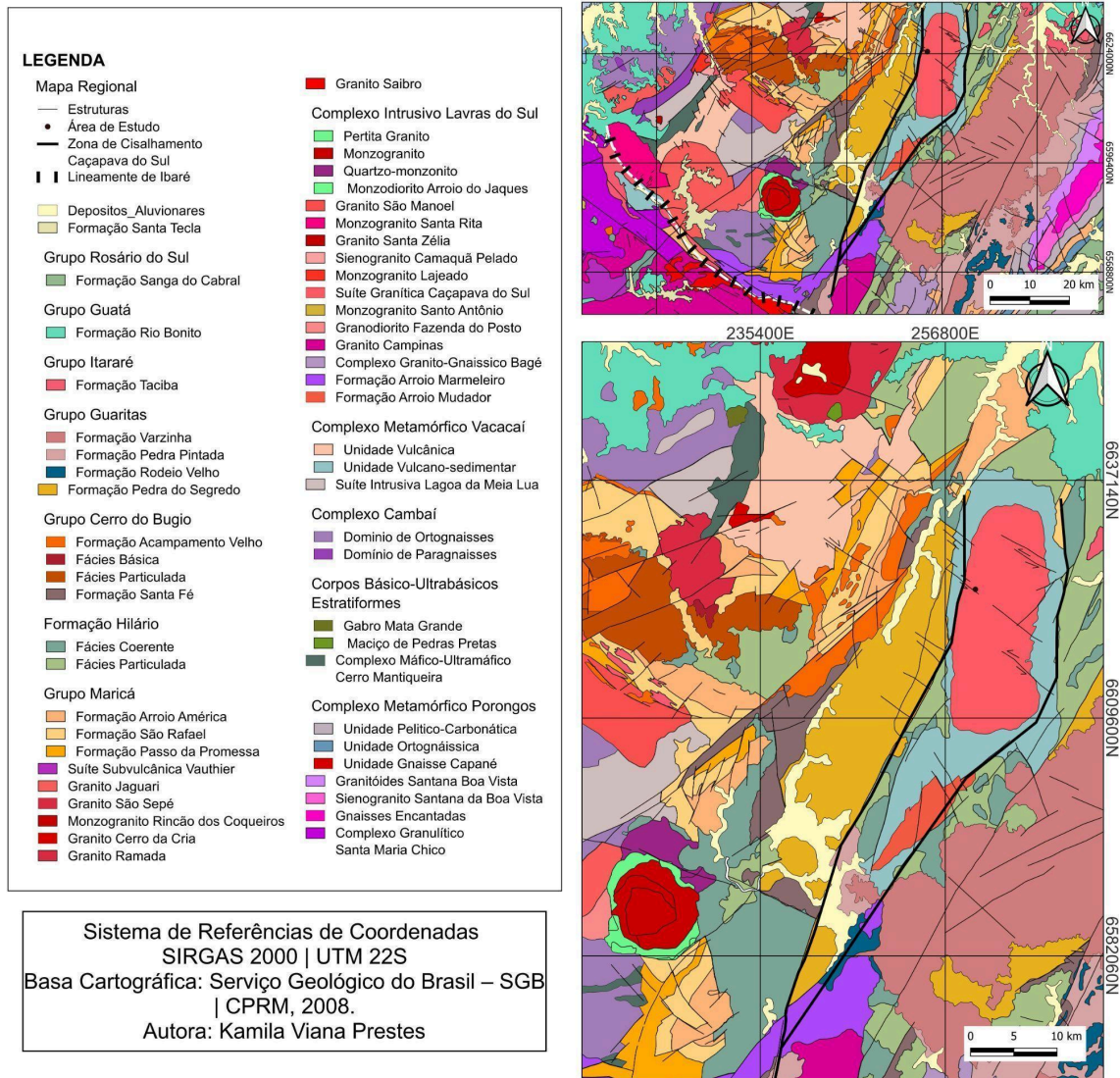
Sua gênese está associada a processos de fusão parcial de material crustal ou assimilação e diferenciação de magmas basálticos mantélicos, características típicas de magmatismo gerado em arcos maduros ou pós-colisional (Nardi et al., 1989).

O CGCS é composto por uma variedade de rochas graníticas, com granulação média a fina, organizadas de forma complexa, cuja variação composicional abrange leucogranitos, sienogranitos, monzogranitos e granodioritos, devido a essa característica é designado o termo Complexo Granítico Caçapava do Sul para esta unidade (Sartori et al., 1985; Nardi et al., 1989).

Esse complexo intrusivo é formado por três fácies principais, biotita-granitóides, predominam nas porções sul, sudoeste e oeste e possuem coloração cinza, embora róseas quando intemperizadas, apresentando teores altos de biotita e alanita como acessório característico. Leucogranitóides, predominantes na porção norte-nordeste, apresentam coloração rósea e baixo teor de minerais máficos, contendo, localmente granada e/ou moscovita. E granitóides transicionais, que ocorrem na porção central

e leste, apresentando características intermediárias entre as duas fácies (Bittencourt, 1983; Nardi et al., 1989).

Figura 3 - Mapa geológico Caçapava do Sul.



Fonte: A autora, 2025.

O batólito Caçapava intrude os metassedimentos do Complexo Metamórfico Passo Feio (figura 3), que apresentam orientação predominante na direção norte-sul e estão organizados regionalmente numa estrutura antiformal de duplo caimento, tendo o corpo granítico ocupando a posição de núcleo (Sartori et al., 1985; Chemale Jr. et al., 1994). A intrusão deste granito resultou na formação de um domo, arqueando radialmente os metamorfitos encaixantes, caracterizando um processo de intrusão forçada em que o magma ascende através de rochas encaixantes já relativamente rígidas no momento da intrusão (Bittencourt, 1983). Nas zonas

marginais o corpo granítico desenvolveu um padrão característico de falhas e fraturas, o que evidencia este estilo de deformação, que está diretamente relacionado ao caráter intrusivo do plutão, que forçou seu caminho através da crosta (Sartori et al., 1985).

Os metamorfitos ao redor do batólito registram evidências de duas fases de metamorfismo regional, associadas às fácies anfíbolito e xisto verde, além de uma terceira fase de deformação de caráter estritamente mecânico. Nesse contexto, o granito, ou parte dele, teria participado da segunda fase metamórfico-deformacional, atuando como um corpo metagranítico que serviu de anteparo rígido durante a terceira fase de deformação das rochas encaixantes (Bittencourt 1983; Sartori et al., 1985).

4.3 Ciclo Hidrológico

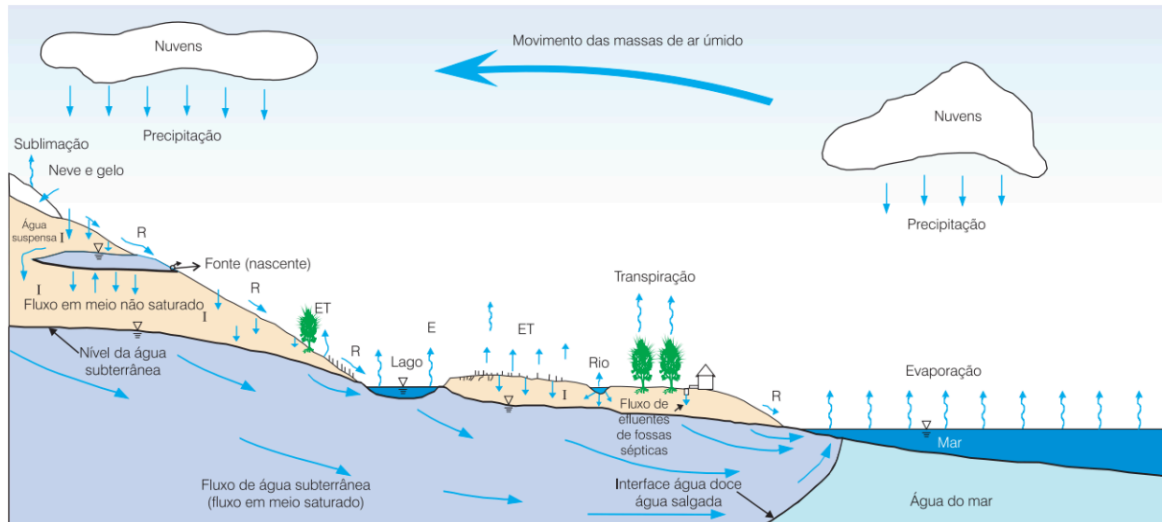
Estima-se que 97,5% da água no planeta corresponde a água salgada, sendo os outros 2,5% água doce, desse percentual de água doce, 69% encontram-se nas geleiras, 30% armazenadas em aquíferos, e apenas 1% corresponde a água superficial e atmosférica (ANA, 2025). Assim, embora a maior parte da hidrosfera seja composta por água, a quantidade disponível e apropriada para consumo, a água doce, é limitada.

A água do planeta está em constante movimento e o seu volume permanece praticamente inalterado ao longo do tempo, variando apenas quanto à distribuição regional e estado físico. Esse equilíbrio é mantido pelo ciclo hidrológico (figura 4), que regula a circulação da água entre os diferentes compartimentos da Terra (Ribeiro et al., 2017; Iritani e Ezaki., 2012). O ciclo é regido por processos de precipitação, evaporação, evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração, elementos essenciais para o balanço hídrico.

No processo de precipitação, a água retorna à superfície terrestre, seja em estado líquido ou sólido. Na evaporação e evapotranspiração, a água precipitada na superfície terrestre sofre mudança de estado físico, passando do líquido para o vapor, devido a ação da radiação solar, retornando assim à atmosfera. No escoamento superficial, a água precipitada escoar sobre a superfície terrestre por ação da gravidade, fluindo das regiões mais elevadas para as mais baixas. E na

infiltração, a água penetra nas camadas do solo, movendo-se verticalmente através dos espaços vazios, como poros e fissuras, contribuindo para a recarga de lençóis freáticos e aquíferos.

Figura 4 - Representação esquemática do ciclo hidrológico.



Fonte: CPRM/SGB (2008, p. 53).

No escoamento superficial, a água precipitada escoar sobre a superfície terrestre por ação da gravidade, fluindo das regiões mais elevadas para as mais baixas. E na infiltração, a água penetra nas camadas do solo, movendo-se verticalmente através dos espaços vazios, como poros e fissuras, contribuindo para a recarga de lençóis freáticos e aquíferos. De modo geral, a água no estado líquido é encontrada nos lagos, rios e oceanos. Devido a incidência da radiação solar, a água evapora, e o vapor formado sobe para a atmosfera dando origem às nuvens. Posteriormente, esse vapor se condensa, e retorna à superfície terrestre em forma de chuva, neve ou orvalho. Trata-se de um processo contínuo de renovação da água, essencial para a manutenção da vida no planeta (Ribeiro, 2017; Iritani; Ezaki., 2012).

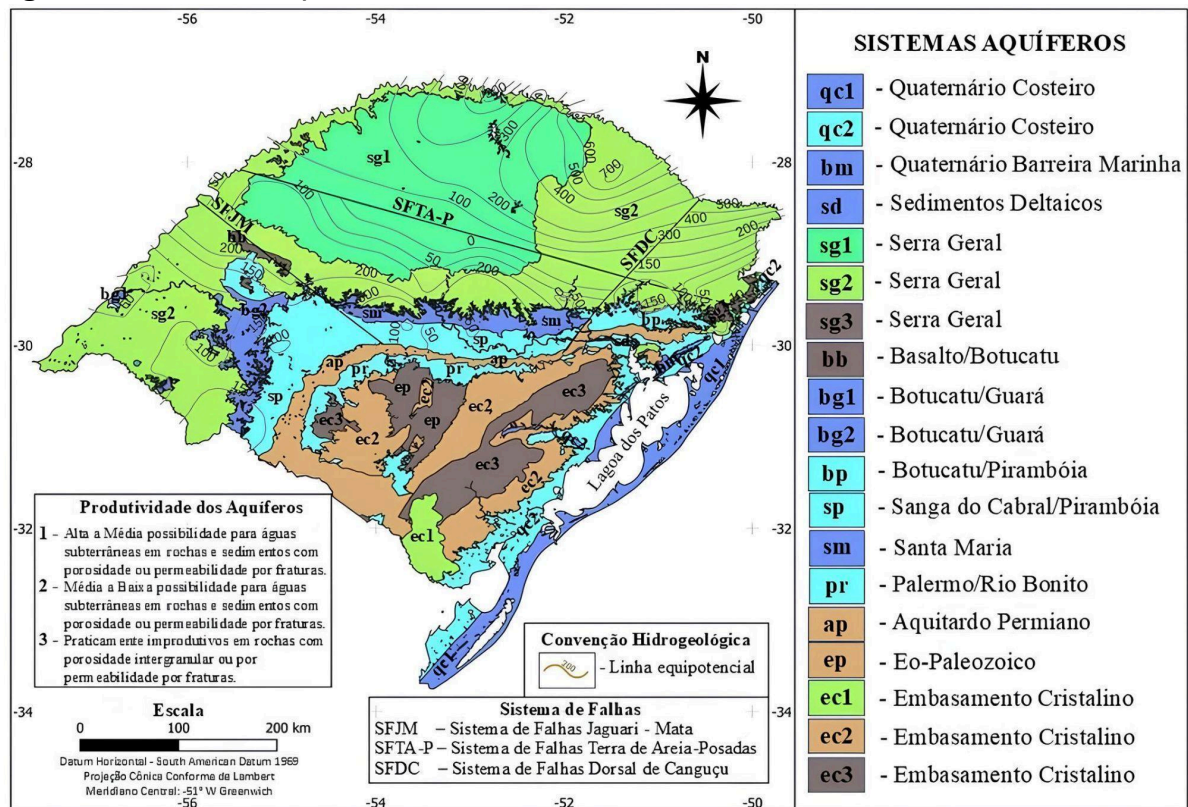
De acordo com Filho (2008) o funcionamento do ciclo hidrológico é condicionado por diversos fatores.

No solo e subsolo, pela ação da gravidade, bem como pelo tipo e densidade da cobertura vegetal e, na atmosfera e superfícies líquidas (rios, lagos, mares e oceanos), pelos elementos e fatores climáticos, como por exemplo, temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar (função do déficit de pressão de vapor), insolação (função da radiação solar), que são os responsáveis pelos processos de circulação da água dos oceanos para a atmosfera, em uma dada latitude terrestre (Filho, 2008, p.53).

4.4 Contexto Hidrogeológico

A região de Caçapava do Sul, conforme o mapa dos Sistema Aquíferos do Rio Grande do Sul, está inserida no Embasamento Cristalino (figura 5), conforme classificação modificada por Hansen et al. (2025), sendo a produtividade dos aquíferos caracterizados por capacidade média a baixa, com porosidade e permeabilidade regidas por fraturas.

Figura 5 - Sistema Aquíferos do estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Hansen et al., 2025.

Compreendem terrenos formados por rochas graníticas, gnássicas, andesitos, xistos, filitos e calcários metamorfizados associadas aos eventos orogênicos do Ciclo Brasileiro. Esses eventos, foram responsáveis pela geração de estruturas geológicas complexas, como fraturas, falhas e zonas de cisalhamento, que conferem ao substrato características do armazenamento e circulação de água subterrânea (Machado e Freitas, 2005). Nesse contexto, de acordo com o IBGE (2009), a área é classificada como aquífero fissural.

Os aquíferos fissurais são caracterizados por porosidade secundária, pois sua capacidade de armazenamento e escoamento de água subterrânea não está

relacionada a porosidade original da rocha (porosidade primária), mas sim a descontinuidades estruturais, como fraturas, falhas e zonas de cisalhamento, constituindo os principais condutos e reservatórios do sistema aquífero (Filho, 2008).

Esse tipo de aquífero apresenta elevada heterogeneidade e forte anisotropia, características diretamente relacionadas à natureza e à disposição das fraturas e falhas no maciço rochoso. Essa heterogeneidade decorre da distribuição irregular dessas descontinuidades, que faz com que, em certas zonas onde não há ocorrência de fraturas, a porosidade seja praticamente nula, enquanto em áreas com maior concentração de fraturamento os valores de porosidade podem se elevar consideravelmente. Já a anisotropia é resultante da orientação preferencial dessas estruturas, que condiciona o fluxo subterrâneo (Costa, 2008).

Assim, entende-se que esse tipo de sistema aquífero apresenta grande variabilidade espacial em termos de armazenamento e vazão e sua produtividade hídrica é condicionada à densidade, continuidade e conectividade dessas estruturas. (Custódio e Llamas, 1983; Gaspar et al., 2009; Margat e Van der Gun, 2013).

4.4.1 Aquíferos

Um aquífero é uma formação geológica com adequada permeabilidade e porosidade interconectadas, capaz de armazenar e conduzir água subterrânea em volumes significativos, sob gradientes hidráulicos naturais (Cleary, 1989; Iritani e Ezaki., 2012). Segundo ANA (2022), as formações geológicas são classificadas, de acordo com sua capacidade de armazenar e transmitir água subterrânea, em três categorias principais:

- Aquitardo, formação geológica semipermeável que pode conter água, porém a transmissão é lenta;
- Aquicludo, tem capacidade de armazenar, mas não de transmitir água.
- Aquífero, formação geológica constituída por rochas ou sedimentos capazes de armazenar e conduzir água em quantidade suficiente que possibilita sua extração através de técnicas convencionais e economicamente viáveis (e.g. Iritani e Ezaki., 2012; ANA, 2022).

Ainda de acordo com a resolução nº 202, de 28 de junho de 2018 Art. 2º, aquífero é um “corpo hidrogeológico, formação geológica com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras, ou espaços resultantes

da dissolução e carreamento de materiais rochosos” (CNRH, 2018).

Os aquícludes e aquíardos estão frequentemente associados aos aquíferos por delimitarem seu topo e/ou base. No entanto, devido à sua baixa ou nula capacidade de transmitir água, são consideradas formações impermeáveis ou semipermeáveis (Manziona, 2015; ANA, 2022).

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com a porosidade da rocha armazenadora em (Iritani e Ezaki., 2012; Manziona, 2015; ANA, 2022): Verificar que tem trabalho mais antigo.

- Granular, quando são compostos por rochas sedimentares (sedimentitos) e sedimentos não consolidados constituídos por grãos minerais, onde a água se armazena e percola através dos poros;
- Fissural, composto por rochas cristalinas, metamórficas e ígneas intrusivas, que apresentam elevada anisotropia e heterogeneidade, e baixa permeabilidade primária, assim a água subterrânea é armazenada e circula predominantemente por meio das fraturas e falhas existentes nas rochas, caracterizando uma porosidade secundária responsável pelo armazenamento e transmissão do fluxo hídrico. Quanto maior for a quantidade de fraturas interconectadas na rocha e preenchidas com água, maior será o potencial do aquífero em fornecer esse recurso;
- Cárstico, quando formado por rochas carbonáticas que passam por um lento processo de dissolução ao entrarem em contato com águas levemente ácidas que se infiltram pelas fraturas presentes na rocha. À medida que a dissolução dessas estruturas avança, formam-se cavidades que podem evoluir para galerias, dando origem aos rios subterrâneos e cavernas.

Considerando as características hidráulicas e a pressão a que estão submetidos, os aquíferos podem ser classificados em livres e confinados. Os aquíferos livres, também denominados freáticos, são unidades geológicas superficiais totalmente expostas, permitindo que a recarga ocorra diretamente em toda a sua extensão. Devido estarem próximos à superfície, a superfície freática desses sistemas está submetida apenas à pressão atmosférica. Apresentam elevada permeabilidade em sua porção superior, e podem ser classificados como drenantes, quando sua base é constituída por material semi-impermeável, ou não-drenantes, quando a base é impermeável. Já os aquíferos confinados são aqueles que se encontram sobrepostas por camadas impermeáveis, e a recarga

dessas formações ocorrem unicamente nas áreas em que o aquífero aflora à superfície, permitindo a infiltração da água da chuva. Nessas zonas, o nível hidrostático encontra-se sob pressão, o que pode resultar em artesianismo nos poços perfurados para captação de suas águas (Manziona, 2015).

4.4.2 Água Subterrânea

Define-se como água subterrânea aquela que ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático, presente nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e nas formações geológicas profundas totalmente saturadas (Filho, 2008, p.53).

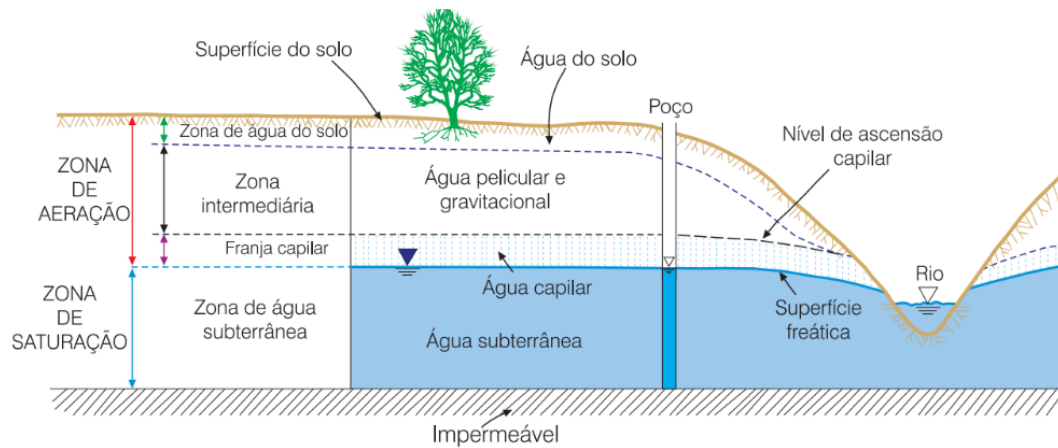
A água subterrânea é um componente essencial do ciclo hidrológico, pois escoar lentamente no interior de um aquífero, desde a zona de recarga até a zona de descarga, onde emergem e alimentam corpos hídricos superficiais (Hirata et al., 2019). A recarga depende de um conjunto complexo de processos naturais, cuja magnitude e periodicidade são determinadas principalmente pela cobertura vegetal, topografia, características do solo, geologia e condições climáticas, podendo ainda ser afetadas pelas atividades de extração da água subterrânea (Alley et al., 2002; Gleeson et al., 2020). A infiltração da água no sistema aquífero estabelece um gradiente hidráulico que, por ação da gravidade, conduz o fluxo subterrâneo em direção a regiões topograficamente mais baixas, onde a água subterrânea é descarregada por diferentes processos, como a descarga submarina em áreas costeiras, o fluxo de base que alimenta corpos d'água superficiais, a evapotranspiração em zonas de praia ou através de vegetação com raízes profundas que alcançam o lençol freático, além da descarga direta por meio de nascentes (Gleeson et al., 2020).

O processo de infiltração, componente do ciclo hidrológico, é fundamental para a formação das águas subterrâneas, pois permite sua acumulação e armazenamento ao longo de milhares de anos, permitindo a recarga de aquíferos, nascentes e corpos d'água (Filho et al., 2008). Nesse contexto, a presença da cobertura vegetal desempenha papel determinante ao favorecer a captação e a redistribuição das águas pluviais entre os diferentes compartimentos do sistema, além de auxiliar na regulação do fluxo hídrico no solo e no abastecimento das reservas subterrâneas (Arcova et al., 2003; Tonello et al., 2018).

Ao infiltrar-se no solo, a água subterrânea percorre trajetórias preferenciais

verticais até alcançar duas zonas horizontais, a zona não saturada e a zona saturada (Figura 6). A zona de aeração ou zona não saturada, está localizada entre a superfície do terreno e o nível freático, e os poros estão parcialmente preenchidos por gases e líquidos. A zona saturada, localiza-se abaixo da superfície freática e todos os poros estão preenchidos por água. Embora toda água abaixo da superfície terrestre seja considerada subterrânea, na hidrogeologia, a água subterrânea é apenas aquela que circula na zona saturada (Filho et al., 2008; Iritani e Ezaki., 2012).

Figura 6 - Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo.



Fonte: Companhia de pesquisa de recursos minerais/Serviço geológico do Brasil - CPRM/SGB (2008, p. 53).

A quantidade de água que uma rocha pode armazenar está diretamente relacionada à sua porosidade, definida como a proporção entre o volume de poros e o volume total da rocha. Em geral, depósitos inconsolidados, como cascalho, areia, silte e argila, incluindo os solos, apresentam maior porosidade do que as rochas consolidadas como arenito, calcário, folhelho ou rochas fraturadas. Além disso, materiais bem selecionados, com grãos de tamanho uniforme, tendem a ter poros mais interconectados, favorecendo maior armazenamento do que em materiais com grande variação, nos quais as partículas menores se acomodam entre os grãos maiores (Iritani e Ezaki., 2012).

A permeabilidade é o parâmetro que rege o fluxo da água subterrânea, ou seja, a facilidade com que a água se desloca através da rocha e está diretamente relacionada ao tamanho e volume dos poros interconectados, bem como à forma, distribuição e variação granulométrica dos grãos. Quanto mais homogêneos o

tamanho e a distribuição dos grãos, maior a interconexão entre poros e, conseqüentemente, a capacidade do aquífero de transmitir água (Iritani e Ezaki., 2012).

Assim, o fluxo de água subterrânea ocorre através dos espaços vazios, chamados de poros, presentes entre os grãos que compõem os solos e as rochas sedimentares. Em rochas que possuem baixa porosidade intergranular, a água ocorre em fraturas, que são zonas de ruptura formadas em decorrência dos movimentos da crosta terrestre (Iritani e Ezaki., 2012).

4.4.3 Importância da Água Subterrânea no Brasil

As águas subterrâneas são fundamentais para a manutenção da vida, não apenas por abastecerem áreas urbanas e rurais, ou por servirem como recurso para diversas atividades econômicas, mas também por sustentarem vários sistemas aquáticos como rios, lagos, mangues e pântanos. Sem a água subterrânea, as florestas em regiões de clima seco ou tropical não se manteriam, os ambientes aquáticos deixariam de existir ou de desempenhar as suas funções ambientais (Hirata et al., 2019). Esse recurso hídrico é de grande relevância para a sociedade, podendo gerar importantes benefícios sociais, econômicos e ambientais, inclusive no contexto da adaptação às mudanças climáticas (UNESCO, 2022).

Além disso, a água subterrânea desempenha um papel fundamental no abastecimento populacional, industrial e na irrigação em diversos países. Estima-se que no ano de 2010, a captação anual no mundo foi acima de 1 bilhão de metros cúbicos. Na América, os Estados Unidos e o México, destacam-se como grandes consumidores de água subterrânea. Contudo, esse recurso também exerce papel relevante no abastecimento público de países como Belize, Costa Rica, Equador, Venezuela, Bolívia, Peru e Uruguai. No norte da África, países como Argélia, Chade, Egito, Líbia, Marrocos e Sudão utilizam a água subterrânea tanto para o abastecimento público quanto para irrigação. Na Austrália, esse recurso constitui a principal fonte hídrica para os diversos usos, além do abastecimento público. Na Europa, em torno de 75% da população é abastecida pela água subterrânea. Na Dinamarca e Áustria o abastecimento de água é garantido quase exclusivamente, por esse recurso. As águas subterrâneas também representam uma importante fonte de abastecimento público e irrigação na Alemanha, França, Itália e Espanha.

Na Ásia, concentra-se o maior número de consumidores em termos de volume de água subterrânea, com destaque para a Índia, China, Paquistão, Irã, Bangladesh, Arábia Saudita, Indonésia, Turquia, Japão e Tailândia (Hirata et al., 2019), conforme demonstrado na tabela 2.

De acordo com o relatório da UNESCO (2022), as águas subterrâneas correspondem a aproximadamente metade do volume de água captada para abastecimento doméstico em todo o mundo e cerca de 25% da água utilizada na irrigação, atendendo globalmente a 38% das áreas irrigadas. A extração global de água doce proveniente de rios, riachos, lagos, aquíferos e reservatórios artificiais aumentou significativamente ao longo do último século, passando de cerca de 600 km³ por ano em 1.900 para aproximadamente 3.880 km³ por ano em 2017. Estima-se que o volume total de água doce líquida subterrânea esteja entre 11 e 16 milhões de km³ (Barcala, 2023).

No Brasil, em 2015, apenas poços legalizados extraíam cerca de 6.620 Mm³/ano, porém, considerando que esses poços são a minoria, estima-se que o Brasil extraia, em média, 17.580 Mm³/ano, o que o posiciona como um dos consumidores significativos de águas subterrâneas no contexto mundial (Hirata et al., 2019).

Tabela 2 - As nações com as maiores extrações anuais estimadas de águas subterrâneas para todos os usos - Mundial - 2010.

País	Extração de água subterrânea			
	Vazão anual estimada em 2010 (Mm ³ /ano)	Uso na irrigação (%)	Uso doméstico e urbano (%)	Uso industrial (%)
Índia	251.000	89	9	2
China	111.950	54	20	26
Estados Unidos	111.700	71	23	6
Paquistão	64.820	94	6	0
Irã	63.400	87	11	2
Bangladesh	30.210	86	13	1
México	29.450	72	22	6
Arábia Saudita	24.240	92	5	3
Brasil	17.580	24 (*)	66 (*)	10
Indonésia	14.930	2	93	5
Turquia	13.220	60	32	8
Rússia	11.620	3	79	18
Síria	11.290	90	5	5

Japão	10.940	23	29	48
Tailândia	10.740	14	60	26
Itália	10.400	67	23	10

(*) agricultura e pecuária (**) inclui uma parcela do abastecimento rural doméstico, saneamento em indústrias, e serviços urbanos. Mm³ = milhões de metros cúbicos.

Fonte: Hirata et al. (2019, p. 47).

Segundo dados da ANA (2021) cerca de 43% do total de sedes urbanas, são abastecidas exclusivamente por mananciais superficiais, 40% por mananciais subterrâneos, e cerca de 3% por abastecimento misto com predominância subterrânea.

A chuva é a principal responsável pela recarga das águas subterrâneas no país. Aproximadamente 24% da vazão média anual dos rios brasileiros, estimada em 179.433 m³/s, e cerca de 49% das vazões mínimas (com 95% de permanência) são provenientes das águas subterrâneas. Esses dados evidenciam a relevância das águas subterrâneas para a manutenção do fluxo dos rios, especialmente em épocas de menor disponibilidade hídrica (EMBRAPA, 2021).

O Brasil abriga um dos maiores reservatórios de água doce do mundo, o Sistema Aquífero Guarani, com 1,2 milhão de km² (Silva, 2012). Além dele, destaca-se o Aquífero Alter do Chão, considerado o principal reservatório de águas subterrâneas da Bacia do Amazonas e uma das unidades aquíferas mais relevantes do país, caracterizado como um aquífero poroso de alta produtividade, com vazões que frequentemente ultrapassam 50 m³/h (Gonçales, 2015).

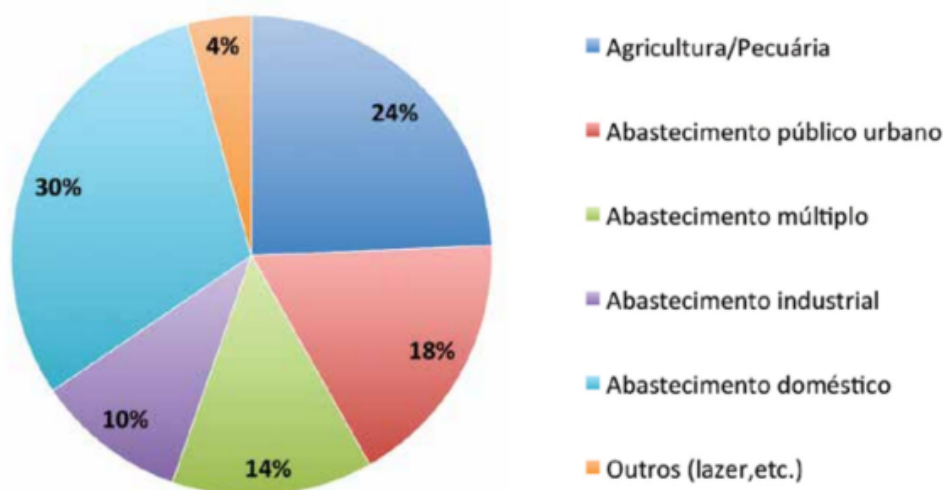
Cerca de 95% do território brasileiro têm condições hidrogeológicas favoráveis para armazenamento de água subterrânea. Como consequência, o país possui uma rede fluvial perene, com uma descarga média anual de aproximadamente 6.220 km³, o que posiciona o Brasil como a nação com a maior disponibilidade de água doce do planeta (Rebouças, 1998).

Apesar do Brasil concentrar umas das maiores reservas de água doce do mundo, a distribuição dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos são desiguais. No que tange às águas superficiais, cerca de 70% encontram-se na Bacia Amazônica, região com menor índice populacional do país, em contrapartida, o nordeste, região mais árida do Brasil com cerca de 30% da população brasileira, dispõe apenas de 5% da água doce, e as regiões Sul e Sudeste, com cerca de 60% da população, contam com somente 12,5% desse recurso (Augusto, 2012). No que se refere às águas subterrâneas, as áreas como o Sul do país, onde se localiza o

Aquífero Guarani, possui grande disponibilidade de água, enquanto outras regiões, como o Nordeste, aquíferos das rochas cristalinas apresentam uma baixa oferta (Tundisi, 2014).

O volume de água bombeada no Brasil (figura 7) é utilizado para suprir as necessidades de inúmeras atividades econômicas pelo país, sendo o seu uso distribuído entre atendimento doméstico (30%), setor agropecuário (24%), abastecimento público urbano (18%) e abastecimento múltiplo (14%), cujo destino é em grande parte diversificado para a prestação de serviços urbanos (Hirata et al., 2019).

Figura 7 - Uso da água subterrânea no país.



Fonte: As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. Hirata Ricardo et al., 2019.

Alguns estados brasileiros apresentam maior dependência das águas subterrâneas, como São Paulo, Piauí, Ceará, Rio Grande do Sul, Bahia e Paraná. Já para uso rural o principal estado é Minas Gerais, seguido de São Paulo, Bahia, Tocantins e Rio Grande do Sul (Hirata et al., 2019).

A água subterrânea desempenha um papel fundamental diante das mudanças climáticas. Durante os períodos de estiagem, os rios, pântanos, mangues e lagos não recebem águas das chuvas, e são sustentados pelo fluxo de base, descarga de água oriunda dos aquíferos (Hirata et al., 2019). No entanto, quando há alguma interferência de natureza climática, geológica ou antrópica, essa descarga não ocorre e o corpo superficial seca. A perenidade desses corpos superficiais além de contribuir para o fluxo de água em si, proporcionam a manutenção da vida aquática

e vegetação de margem, ajudam no transporte de sedimentos ao longo de seus canais e promovem a diluição de esgotos e resíduos lançados imprópriamente no seu curso (Hirata et al., 2019).

As estiagens e secas registradas em diversas regiões do Brasil têm comprometido a oferta de água destinada ao abastecimento urbano. Cerca de 78,5% dos municípios, na região Nordeste, decretaram situação de emergência entre 2003 e 2016. Na região semiárida, caracterizada por elevado risco hídrico, sobretudo nos estados do Nordeste Setentrional: Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, as recargas foram tão reduzidas que dentre seus reservatórios de abastecimento, muitos chegaram a secar. Mesmo a bacia do São Francisco, que é regulada por grandes reservatórios de acumulação, enfrentou níveis críticos de disponibilidade hídrica, colocando em risco operacional diversas captações voltadas ao abastecimento público. No Rio Grande do Sul, também se observou nos últimos anos um agravamento dos períodos de estiagem, destacando eventos em 2019/2020 e 2021/2022. Segundo dados do Relatório de Segurança Hídrica do Estado, aproximadamente 300 municípios gaúchos decretaram situação de emergência apenas no ano de 2022 devido à escassez hídrica (DRH, 2022), afetando não apenas o abastecimento superficial, mas também a disponibilidade de água subterrânea, essencial sobretudo em áreas rurais e em municípios dependentes de aquíferos.

4.5 Qualidade da Água Subterrânea

O conhecimento sobre a qualidade da água subterrânea é fundamental para avaliar sua potabilidade e adequação a diferentes usos, especialmente para o consumo humano. Essa avaliação é realizada por meio das análises de parâmetros físicos, químicos, biológicos e bacteriológicos, cujos critérios de qualidade são definidos pelos limites aceitáveis de concentração dos parâmetros de qualidade específicos, que variam conforme a finalidade do uso da água (Funasa, 2013; Paim, 2018). A qualidade da água é influenciada por fatores naturais como o regime de precipitação, o escoamento superficial, as características geológicas, a cobertura vegetal, e por fatores antrópicos, como por exemplo o lançamento de efluentes de fontes pontuais e difusas, além das práticas de manejo do solo e do uso da terra (ANA, 2018).

Em terrenos compostos por rochas cristalinas, como é o caso da área de estudo, a água subterrânea tende a apresentar boa qualidade, pois os minerais silicáticos que predominam nessas rochas possuem baixa solubilidade. Contudo, ao longo do tempo, o intemperismo desses minerais pode provocar alterações na qualidade da água armazenada, tais modificações tornam-se ainda menos previsíveis, em razão da heterogeneidade e anisotropia que caracterizam esse tipo de meio aquífero (Neves et al., 2024).

Propriedades físicas de um aquífero quanto ao tipo e a espessura da rocha, sedimentos e localização, influenciam significativamente se contaminantes da superfície do solo conseguem atingir o lençol freático. Os aquíferos livres, por estarem mais próximos da superfície e não contarem com camadas confinantes, apresentam maior suscetibilidade à infiltração de contaminantes, do que os aquíferos confinados (Manziona, 2015). Um aquífero, após ser contaminado, pode levar séculos ou mais tempo para se recuperar naturalmente, uma vez que os processos de autodepuração por meio do fluxo subterrâneo ocorrem de forma extremamente lenta (Cleary, 1989).

No Brasil, o controle da qualidade da água destinada ao consumo humano é regulamentado pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece os padrões de potabilidade e os procedimentos de vigilância sanitária. Além disso, a Resolução CONAMA nº 396/2008 define as diretrizes para a classificação e o enquadramento das águas subterrâneas, segundo seus usos predominantes.

De acordo com o capítulo VI - Art. 42 da Portaria GM/MS nº 888/2021,

§ 2º Sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água para consumo humano, supridos por manancial subterrâneo devem realizar análise dos parâmetros Turbidez, Cor Verdadeira, pH, Fósforo Total, Nitrogênio Amônia Total, condutividade elétrica e dos parâmetros inorgânicos, orgânicos e agrotóxicos, exigidos no anexo da Portaria GM/MS nº 888/2021.

Já no capítulo III - Art. 12 da resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008 determina,

Parágrafo único. Dentre os parâmetros selecionados, deverão ser considerados, no mínimo, Sólidos Totais Dissolvidos, nitrato e coliformes termotolerantes.

Art. 13. Os órgãos competentes deverão monitorar os parâmetros necessários ao acompanhamento da condição de qualidade da água subterrânea, com base naqueles selecionados, conforme o artigo 12, bem como pH, turbidez, condutividade elétrica e medição de nível de água.

Embora as legislações estabeleçam um conjunto de parâmetros para a

avaliação da qualidade da água subterrânea destinada ao consumo humano, nem todos puderam ser analisados neste estudo devido às limitações operacionais do laboratório. Dessa forma, foram selecionados os parâmetros de maior relevância para a caracterização hidroquímica de aquíferos fissurais e para a identificação de possíveis contaminações de origem natural ou antrópica. Os parâmetros analisados são apresentados e discutidos a seguir.

4.5.1. Temperatura

A temperatura é um parâmetro físico que influencia diretamente a solubilidade dos gases, a densidade da água e o metabolismo dos micro-organismos, afetando, por exemplo, a velocidade de degradação da matéria orgânica. Em águas subterrâneas, seu comportamento é relativamente estável, uma vez que sofre pouca influência das condições atmosféricas. Assim, a variação térmica está mais relacionada à profundidade de captação, sendo comum observar um gradiente geotérmico aproximado de 1 °C a cada 30 metros de profundidade em aquíferos mais profundos (Manzione, 2015).

4.5.2. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH expressa o grau de acidez ou alcalinidade da água, é uma forma de medir a concentração de íons hidrônio (H_3O^+) dissolvidos em solução, sendo apresentado em escala logarítmica. Essa escala varia de 0 a 14, valores inferiores a 7 indicam condições ácidas, valores acima de 7 representam condições alcalinas e valores próximos de 7 caracterizam pH neutro.

O pH exerce influência direta sobre diversas reações químicas e controla a forma como muitos poluentes se comportam na água. Em valores mais baixos, pode ocorrer maior decomposição de compostos potencialmente tóxicos, enquanto valores elevados favorecem a formação de amônia. No contexto das águas subterrâneas, o pH é determinado principalmente pela presença de dióxido de carbono dissolvido e pela alcalinidade do meio, situando-se geralmente entre 5,5 e 8,5 (Manzione, 2015).

4.5.3. Cor

A cor da água está geralmente relacionada à presença de partículas coloidais muito finas, predominantemente orgânicas, associadas ao carbono orgânico dissolvido. Em águas subterrâneas, a coloração costuma ser atribuída à presença de ferro e manganês. Esses compostos orgânicos têm origem, sobretudo, na decomposição de material vegetal e na atividade microbiana do solo, embora fontes antrópicas, como efluentes domésticos e industriais ou a lixiviação de áreas urbanas e agrícolas, também possam intensificá-la. Em regiões com vegetação densa e solos menos erodíveis, é comum que os corpos d'água apresentem coloração naturalmente mais escura. Valores elevados de cor podem dificultar a manutenção do cloro residual e favorecer a formação de subprodutos da desinfecção, além de alterar o sabor e o odor da água, interferir na remoção de ferro e manganês e criar condições favoráveis ao crescimento de microrganismos nas redes de distribuição (Libânio, 2010).

4.5.4. Turbidez

Relaciona-se à presença de partículas em suspensão na água como silte, argila, colóides e matéria orgânica. Os colóides, em particular, são responsáveis pela dispersão e desvio da luz, o que reduz a transparência da água e interfere na penetração da radiação solar na coluna d'água, impactando diretamente nos processos biológicos do mesmo. A turbidez pode ter origem natural, como resultado do carregamento de partículas de argila, silte, areia, fragmentos de rocha e óxidos metálicos do solo, pela ação da precipitação pluviométrica, ou ser causada por fontes antrópicas, como o lançamento de efluentes domésticos e industriais (Manziona, 2015).

4.5.5. Alcalinidade

A alcalinidade representa a capacidade da água de neutralizar ácidos, atuando como um sistema tampão que reduz variações bruscas de pH. É determinada principalmente pelas concentrações de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-). Valores mais elevados de alcalinidade podem refletir a contribuição de compostos liberados durante a decomposição da matéria orgânica presente no

ambiente aquático, bem como o lançamento de efluentes industriais. Do ponto de vista operacional, a alcalinidade é essencial para garantir a estabilidade do pH e a eficiência de processos de tratamento, como a coagulação, que depende de adequada capacidade tampão (Libânio, 2010; Funasa,2014).

4.5.6. Dureza

A dureza da água corresponde frequentemente à soma das concentrações de íons cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) e, em menor escala, ferro (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}), estrôncio (Sr^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) presentes na água. Sua origem pode ser de fonte natural, resultante da dissolução de minerais presentes em rochas ricas em cálcio e magnésio, ou decorrer de origem antrópica, como o lançamento de efluentes industriais. A dureza da água é expressa em mg/L de carbonato de cálcio (CaCO_3) e é classificada como mole (< 50 mg/L de CaCO_3), moderada (50–150 mg/L de CaCO_3), dura (150–300 mg/L de CaCO_3) ou muito dura (> 300 mg/L de CaCO_3). Águas com maior dureza tendem a apresentar menor formação de espuma, o que aumenta o consumo de sabões e xampus, além de favorecer processos de incrustação em tubulações de água quente, caldeiras e aquecedores, em razão da precipitação dos cátions em temperaturas elevadas (Libânio, 2010; Funasa,2014).

4.5.7. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica expressa a capacidade da água de conduzir corrente elétrica, sendo diretamente influenciada pela concentração de íons dissolvidos no meio. Embora não faça parte dos parâmetros estabelecidos no padrão de potabilidade, constitui um importante indicador da possível presença de efluentes, por estar diretamente relacionada à quantidade de sólidos dissolvidos totais (SDT). Em condições naturais, a condutividade elétrica costuma ser inferior a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, podendo atingir valores próximos de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em corpos d'água expostos a cargas significativas de efluentes domésticos ou industriais (Libânio, 2010; Funasa, 2014).

4.5.8. Sólidos Dissolvidos Totais

Os sólidos presentes na água são distribuídos em sólidos totais em suspensão

(sedimentáveis/não sedimentáveis) e sólidos totais dissolvidos (voláteis/fixos). Os sólidos em suspensão são formados por partículas que podem ser retidas por processos de filtração. Já os sólidos dissolvidos são compostos por partículas com diâmetro inferior a 10^{-3} μm , que permanecem em solução mesmo após a filtração (Ministério da Saúde, 2006). A introdução de sólidos na água pode ocorrer de maneira natural, por meio de processos erosivos, presença de organismos e acúmulo de detritos orgânicos, ou de forma antrópica, decorrente do descarte inadequado de resíduos sólidos e do lançamento de esgotos (Manziona, 2015).

4.5.9. Amônia

A presença de amônia na água é frequentemente associada à possível contaminação por esgotos, resíduos animais ou atividade bacteriana. Embora não represente risco imediato à saúde, sua ocorrência pode prejudicar a eficiência da desinfecção, favorecer a formação de nitrito nos sistemas de distribuição, comprometer o desempenho de filtros utilizados na remoção de manganês e ocasionar problemas de sabor e odor (WHO, 2022).

4.5.10 Ferro

Por ser um dos elementos mais abundantes na natureza, o ferro é comumente encontrado tanto em águas superficiais quanto subterrâneas, ocorrendo nas formas insolúvel (Fe^{3+}) e dissolvida (Fe^{2+}). A forma dissolvida é particularmente frequente em águas subterrâneas de poços artesianos e nas camadas profundas de lagos e reservatórios, ambientes onde predominam baixas concentrações de oxigênio dissolvido (Libânio, 2010; Funasa, 2014). O ferro não apresenta inconvenientes de natureza sanitária, sendo seus efeitos predominantemente de ordem econômica e operacional, uma vez que, ao oxidar, forma precipitados que podem conferir coloração e gosto à água, além de ocasionar manchas e incrustações em tubulações e equipamentos (Heller e Pádua, 2010).

4.5.11 Cloreto

Quando presentes em concentrações elevadas, os cloretos podem indicar contaminação por esgotos domésticos e, em águas destinadas ao consumo humano, provocar alterações perceptíveis de gosto, conferindo sabor salgado à água e podendo gerar efeitos laxativos. Os cloretos podem advir de diferentes origens, dissolução natural de minerais, da influência de águas de origem marinha ou do aporte de efluentes domésticos e industriais (Ferreira e Pádua, 2010; Funasa, 2014).

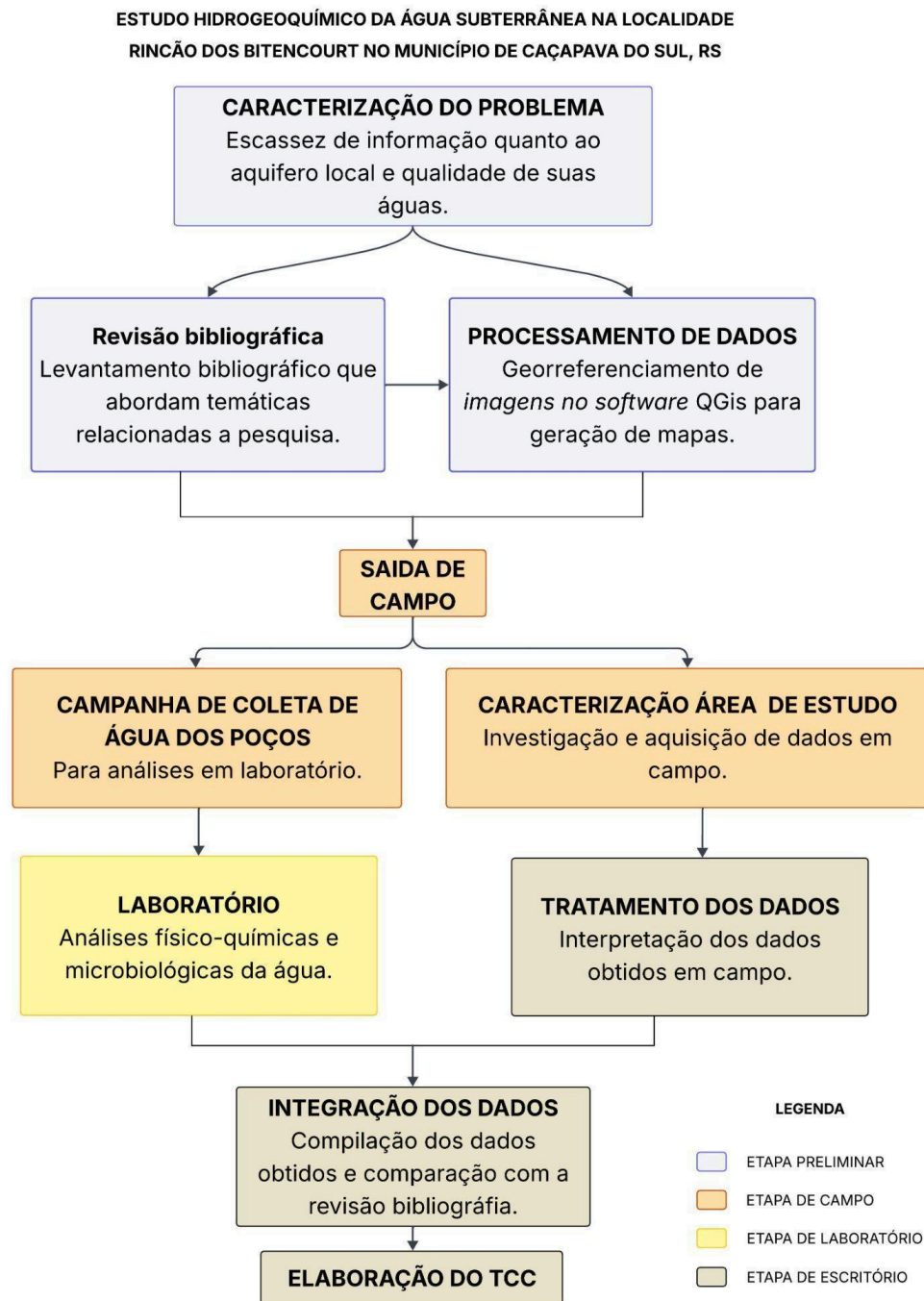
4.5.12 Coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*

As bactérias coliformes são associadas ao intestino de humanos e animais de sangue quente, e podem indicar a entrada de material fecal no sistema hídrico. Como muitas doenças de veiculação hídrica são transmitidas pelo contato com água contaminada por fezes, a detecção dessas bactérias sinaliza possíveis falhas na proteção do manancial (Funasa, 2014). Contudo, os coliformes totais não devem ser utilizados como indicadores de contaminação fecal isolados, especialmente na avaliação da qualidade da água de poços e nascentes. Nesse contexto, a *Escherichia coli* é o parâmetro mais adequado, pois é a bactéria do grupo coliforme claramente associada à origem fecal humana ou animal, pois trata-se do indicador mais específico de contaminação fecal recente, sendo também associado à possível presença de microrganismos patogênicos (Funasa, 2013; Ministério da Saúde, 2024).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma a seguir ilustra as etapas metodológicas adotadas nesta pesquisa para o estudo hidrogeoquímico da região Rincão dos Bitencourt, desde a caracterização do problema até a elaboração do texto final (Figura 8).

Figura 8 - Fluxograma das atividades realizadas.



Fonte: A autora, 2025.

5.1 Revisão Bibliográfica

A fim de atender aos objetivos específicos, foi realizado um levantamento bibliográfico com a consulta a artigos científicos, teses, livros e publicações técnicas para uma melhor compreensão sobre os aspectos geológicos e hidrogeológicos que caracterizam a área de estudo. Esta revisão foi fundamental também para definir as abordagens metodológicas adotadas neste trabalho, como o uso de dados de sensoriamento remoto para a análise estrutural de lineamentos e apoio às observações de campo, além da aplicação de análises físico-químicas e bacteriológicas da água subterrânea.

5.2 Processamento de dados espaciais

5.2.1 Modelo digital de elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) constituiu a base para a geração dos mapas de declividade e curvas de nível. No software QGIS 3.40, foi inserido o polígono delimitador da área de estudo, utilizado como área de recorte para a obtenção do MDE, o qual foi adquirido por meio do complemento OpenTopography DEM *Downloader*, que permite o download direto de modelos de elevação para o ambiente SIG. Foram adquiridos dados do Copérnicos Global DSM com resolução espacial de 30 m, mediante autenticação via *API key* vinculada a cadastro na plataforma OpenTopography.

Após a aquisição, o MDE foi reprojetoado para o sistema de referência SIRGAS 2000 / UTM Zona 22S (EPSG: 31982), assegurando compatibilidade espacial com a base cartográfica regional do Rio Grande do Sul. Em seguida, os dados foram recortados conforme o limite da área de estudo para a derivação posterior dos mapas temáticos.

5.2.2 Mapa de Curvas de Nível

O mapa de curvas de nível foi produzido a partir do MDE, utilizando as ferramentas de processamento do software QGIS 3.40. Para gerar as curvas, utilizou-se a ferramenta disponível no menu raster - *extraction* - contorno, onde o MDE foi selecionado como raster e estabelecida a equidistância de 10 metros para a

geração das curvas. Após a geração da camada vetorial, foram ajustados às curvas de nível mestra e intermediária, bem como a simbologia e o rótulo das altitudes para facilitar a interpretação das formas do relevo.

5.2.3 Mapa de declividade

O mapa de declividade foi gerado a partir do Modelo Digital de Elevação, utilizando as ferramentas de análise raster do software QGIS 3.40. O processamento foi realizado por meio do menu raster - *analysis* - declividade, no qual o MDE foi definido como camada de entrada e, em seguida, executado. Após a geração do raster, foi ajustado o tipo de renderização para banda simples falsa cor, permitindo diferenciar setores de relevo suave, moderado e acentuado. Essa classificação contribui para distinguir setores favoráveis à infiltração da água no solo, assim como áreas onde o escoamento superficial tende a se concentrar.

5.2.4 Mapa de lineamentos

O mapa de lineamentos foi elaborado a partir da interpretação visual de imagens de radar ALOS PALSAR. Para realçar feições associadas a fraturas, juntas e possíveis zonas de fraqueza do embasamento, foram geradas imagens de relevo sombreado (*hillshade*) com diferentes azimutes de iluminação. O processamento foi realizado por meio da ferramenta de sombreado do QGIS, produzindo cinco composições com azimutes de 0°, 45°, 90°, 270° e 315° (tabela 3), todas com altitude solar de 45° e fator Z igual a 1. A utilização de múltiplos azimutes permitiu evidenciar estruturas que se tornam mais ou menos visíveis conforme a direção da iluminação simulada.

A interpretação dos lineamentos foi realizada manualmente, em escala de observação de 1:90000, para melhor visualização regional das feições estruturais, considerando continuidade, alinhamento e expressão topográfica das feições observadas. A área total analisada corresponde a aproximadamente 150,54 km². Cada linha interpretada foi vetorizada, compondo uma camada vetorial destinada ao conjunto de lineamentos da área de estudo. Ao todo, foram vetorizados 46 lineamentos estruturais, os quais constituíram a base de dados utilizada para a elaboração de um diagrama de roseta do tipo frequência, no qual as direções

estruturais são representadas com base no número de ocorrências de lineamentos em cada intervalo direcional. A partir desse conjunto, foi possível analisar as direções predominantes das estruturas identificadas na área de estudo.

Tabela 3 - Direção de iluminação e os respectivos azimute utilizados no mapa de lineamentos.

Direção de iluminação	Azimute
Norte (N)	0°
Nordeste (NE)	45°
Leste (E)	90°
Oeste (W)	270°
Noroeste (NW)	315°

Fonte: A autora, 2025.

5.3 Dados de precipitação

Com o objetivo de avaliar a influência das condições climáticas sobre o comportamento hidrogeológico e os resultados das análises físico-químicas da água subterrânea, foram utilizados dados de precipitação anterior aos períodos de coleta de amostras e caracterização de campo. Os dados pluviométricos foram obtidos a partir do *site* Meteostat, que fornece estimativas de precipitação com resolução temporal horária.

Para cada campanha de campo, foram considerados os registros de precipitação acumulada nos dias anteriores e nos dias das atividades de coleta, de modo a permitir a análise da resposta do nível freático e das características da água subterrânea frente a eventos de chuva e períodos de estiagem.

Os dados pluviométricos foram organizados e representados graficamente, possibilitando a visualização da distribuição temporal e da intensidade das chuvas durante os períodos analisados.

5.4 Trabalho De Campo

Nessa etapa foi realizado estudo de campo para reconhecimento da área e

campanhas de amostragem da água dos poços.

5.4.1 Caracterização área de estudo

A caracterização da área de estudo foi realizada por meio de atividades de campo voltadas à observação direta do ambiente físico e das condições dos pontos de captação de água subterrânea. Essa etapa teve como objetivo registrar características do relevo, da vegetação, da ocupação do entorno e, especialmente, das estruturas dos poços, de modo a identificar elementos que pudessem influenciar o comportamento do nível freático. As visitas ocorreram simultaneamente às campanhas de coleta de água, sendo efetuadas medições da profundidade dos poços e observações do nível da água, além de anotações e registros fotográficos sobre o estado de conservação e o contexto físico de cada ponto de captação.

5.4.2 Campanhas de amostragem

Foram realizadas campanhas de amostragem de água em quatro poços distribuídos na área de estudo, em diferentes estações do ano (verão, outono, inverno e primavera), de acordo com a tabela 4, a fim de identificar possíveis variações sazonais nos parâmetros de qualidade da água. As amostras foram coletadas conforme os protocolos da Funasa (2013).

Para coleta de análises físico-químicas, foram utilizados frascos de vidro limpos, secos, devidamente vedados e identificados. Antes da coleta, os frascos foram enxaguados duas a três vezes com a própria água a ser coletada, completando-se posteriormente o volume da amostra. Já para análises bacteriológicas, os frascos utilizados foram de plástico esterilizado, não tóxico, com tampa à prova de vazamento.

Tabela 4 - As campanhas de amostragem da água foram relacionadas com as estações do ano.

Número da coleta	Data da coleta	Estação do ano
1	10 de março de 2025	Verão
2	12 de maio de 2025	Outono
3	29 de julho de 2025	Inverno

Fonte: A autora, 2025.

5.5 Análise da Qualidade da Água

Para a análise da qualidade da água subterrânea, utilizou-se como referência o Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS (2014) tendo os métodos aprovados pelo *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Essas metodologias fornecem procedimentos práticos e operacionais amplamente reconhecidos para análises físico-químicas e microbiológicas em águas destinadas ao consumo humano, atendendo às exigências das legislações nacionais vigentes.

Além das metodologias laboratoriais, também foram realizadas determinações utilizando o kit colorimétrico ALFAKIT, amplamente empregado em análises de campo por sua praticidade, rapidez e confiabilidade. O ALFAKIT permite a determinação de parâmetros específicos da água por meio da adição de reagentes químicos que reagem com os constituintes presentes na amostra, resultando em variações de cor que são comparadas visualmente com uma cartela padrão para estimativa da concentração. Trata-se de um método semi-quantitativo validado para uso em monitoramento ambiental e controle de qualidade de água para consumo humano.

Com o objetivo de assegurar a confiabilidade analítica, foram analisadas três amostras de cada poço, permitindo verificar a repetibilidade dos procedimentos analíticos. A utilização combinada de diferentes mecanismos de análise também possibilitou avaliar a reprodutibilidade, avaliando a concordância entre metodologias distintas utilizadas para a determinação dos mesmos parâmetros. Com esses procedimentos, foi possível avaliar a incerteza das medições, entendida como a variação que pode ocorrer nos resultados devido às limitações naturais dos equipamentos, dos reagentes e das condições de análise. Essa avaliação garante que os valores obtidos reflitam de maneira confiável as características reais da água.

Foram realizadas as análises físico-químicas e bacteriológicas conforme descrito a seguir.

5.5.1 pH

A determinação do pH da água foi realizada utilizando tira universal de pH KASVI, kit colorimétrico ALFAKIT e medidor de pH, conhecido como potenciômetro, equipado com eletrodo específico. A medição do pH por meio de tira indicadora universal foi realizada imergindo-se a tira na amostra de água por alguns segundos. Após a retirada, a coloração desenvolvida foi comparada com a escala cromática presente na embalagem, permitindo a identificação do valor aproximado do pH.

A análise utilizando o kit ALFAKIT seguiu o procedimento recomendado pelo fabricante. Foi transferido para uma cubeta 5ml de amostra de água, em seguida, foi adicionado três gotas do reagente específico para o teste. Após homogeneização e aguardo de 10 minutos, o resultado foi obtido por comparação visual da coloração final apresentada com a escala padrão fornecida no kit, permitindo a estimativa do valor aproximado do pH.

A análise realizada com o medidor de pH exige o uso de soluções tampão com valores de pH conhecidos (normalmente pH 4,0; pH 7,0 e pH 10,0), utilizadas para a calibração do equipamento. Após a calibração, a amostra de água é colocada em um béquer limpo, no qual os eletrodos do medidor são mergulhados cuidadosamente. A leitura do pH é então realizada diretamente no visor do equipamento, quando estabilizada, garantindo-se que os eletrodos estejam devidamente imersos e em contato com a amostra. Entre as medições, o eletrodo deve ser enxaguado com água destilada e suavemente seco com papel para evitar contaminações cruzadas (Funasa, 2014).

5.5.2 Temperatura

Para a aferição da temperatura, foi utilizado termômetro manual e digital diretamente em campo, logo após a coleta, para evitar alterações por variação ambiental (Funasa, 2013).

5.5.3 Cor

Para a análise da cor, foi utilizado o aparelho portátil colorímetro AKSO, 0-500 PCU devidamente calibrado. Este aparelho tem como base o princípio da absorção de luz, onde o colorímetro mede a intensidade da cor com base na quantidade de

luz absorvida pela amostra em determinada faixa de comprimento de onda. O procedimento teve início com a adição de água destilada em um dos frascos do colorímetro, que foi utilizado como branco para o ajuste inicial do equipamento. No segundo frasco, foi adicionada a amostra de água a ser analisada. Após ambos os frascos estarem devidamente posicionados no equipamento e estabilizados, foi feita a leitura, diretamente no visor, da intensidade da cor registrada em unidades Hazen (uH), conforme a escala padrão APHA-Hazen.

5.5.4 Turbidez

A análise de turbidez foi realizada por meio de leitura direta em turbidímetro do tipo nefelométrico, com leituras expressas em UNT. As amostras foram acondicionadas em frascos de vidro âmbar e analisadas no mesmo dia da coleta. O aparelho utilizado foi o HACH 2100N *Turbidimeter*. O equipamento opera com uma fonte de luz que incide sobre a amostra e um detector fotoelétrico com um dispositivo para indicar a intensidade da luz espalhada em ângulo reto ao caminho da luz incidente. O método baseia-se na medição da intensidade de luz espalhada por partículas em suspensão presentes na amostra, sendo que quanto maior a dispersão da luz, maior a turbidez registrada (Funasa, 2014).

5.5.5 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi medida com dois condutivímetros do modelo GEHAKA - CG 1800, previamente calibrado com solução padrão. Foi transferido 50 mL da amostra para um béquer, e a sonda foi imersa completamente na solução. A leitura foi registrada após estabilização do valor e expressa em ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Entre as medições, a sonda deve ser enxaguada com água destilada e suavemente seca com papel para evitar contaminações cruzadas.

5.5.6 Sólidos dissolvidos totais

A quantificação dos SDT na água foi realizada de forma indireta, por meio do valor da CE, a qual expressa a capacidade da água em conduzir corrente elétrica em razão da presença de substâncias dissolvidas (Libânio, 2010). Assim, valores mais elevados de CE refletem maior mineralização e, conseqüentemente, maiores

concentrações de sólidos dissolvidos. De acordo com o manual do condutivímetro utilizado, GEHAKA (2010), foi estimado o valor de STD a partir da condutividade, com aplicação de um fator de conversão utilizando a fórmula, :

$$Fator\ STD = \frac{STD}{CE}$$

O manual apresenta ainda uma tabela de fatores de conversão, por meio da qual foi selecionado o valor 0,65, por se tratar de um coeficiente intermediário dentro da faixa recomendada e compatível com as águas analisadas (Figura 9).

Figura 9 - Quadro com fatores de conversão.

Condutividade μS à 25°C	STD KCl		STD NaCl		STD 442		STD Particular	
	ppm	Fator	ppm	Fator	ppm	Fator	ppm	Fator
23	11.60	0.5044	10.70	0.4652	14.74	0.6409		
84	42.40	0.5048	39.94	0.4755	55.13	0.6563		
447	225.6	0.5047	215.5	0.4822	300.0	0.6712		
1.413	744.7	0.5270	702.1	0.4969	1.000	0.7078		
1.500	757.1	0.5047	737.1	0.4914	1.050	0.7000		
2.070	1.045	0.5047	1.041	0.5030	1.500	0.7246		
2.764	1.382	0.5000	1.415	0.5119	2.063	0.7463		
8.974	5.102	0.5685	4.487	0.5000	7.608	0.8478		
12.800	7.447	0.5782	7.230	0.5613	11.367	0.8825		
15.000	8.759	0.5839	8.532	0.5688	13.455	0.8970		
80.000	52.168	0.6521	48.384	0.6048	79.688	0.9961		

Fonte: GEHAKA, 2010.

5.5.7 Alcalinidade total

A determinação da alcalinidade total foi realizada por meio do método titulométrico. Para a realização do ensaio, os materiais utilizados foram: pipeta volumétrica de 50 mL, frasco Erlenmeyer de 250 mL, bureta de 50 mL, béquer, solução de ácido sulfúrico 0,04 N, e mistura indicadora de verde de bromocresol/vermelho de metila. Inicialmente, foi medido 50 mL da amostra, e transferida para um frasco Erlenmeyer limpo. Em seguida, foi adicionado três gotas da solução indicadora, que confere à solução uma coloração azul-esverdeada. A titulação foi realizada com solução de ácido sulfúrico 0,04 N, sendo adicionado gota a gota, até a mudança de coloração da amostra para um tom róseo, indicando o ponto final da reação. Ao atingir esse ponto, foi registrado o volume total de ácido

sulfúrico utilizado na titulação (V), em mL, e posteriormente feito o cálculo da concentração de alcalinidade total, expressa em mg/L de carbonato de cálcio (CaCO_3), conforme a equação (Funasa, 2014):

$$\text{Alcalinidade total em mg/L de CaCO}_3 = \text{volume gasto de H}_2\text{SO}_4 \times 20.$$

5.5.8 Dureza

A determinação da dureza da água foi realizada por meio do método titulométrico, e os materiais utilizados foram: balança analítica, balão volumétrico de 100 mL e 250 mL, béquer, bureta de 50mL, erlenmeyer de 250 mL, garra e suporte universal, pipeta volumétrica de 1 mL, vidro de relógio, solução de EDTA 0,01 mol/L, NH_4OH (hidróxido de amônio) e cloreto de amônio (NH_4Cl) (Tampão) e indicador negro de eriocromo T. O procedimento teve início com a transferência de 30 mL da amostra de água para um erlenmeyer com capacidade de 125 mL. Em seguida, foi adicionado aproximadamente 1 mL da solução tampão de $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{NH}_4\text{OH}$, com o objetivo de ajustar o pH da amostra para 10. Após essa etapa, foi acrescentado duas gotas da solução indicadora de Negro de Eriocromo T. A titulação foi então realizada com a solução de EDTA 0,01 mol/L, até se observar uma mudança na coloração da amostra, indicando o ponto final da titulação. Esta alteração de cor, indica a passagem do complexo formado para seu estado livre, sinalizando o término da reação. Ao atingir o ponto final, foi registrado o volume de EDTA gasto na titulação (V), em mL, para o cálculo da dureza total da amostra, conforme a equação (Funasa, 2013):

$$\text{Dureza total em mg/L de CaCO}_3 = \left(\frac{\text{volume de EDTA gasto} \times 1000 \times Fc}{\text{volume de amostra (mL)}} \right)$$

5.5.9 Ferro

Para análise de ferro, foi utilizado o kit colorimétrico ALFAKIT, conforme instruções dos fabricantes. A amostra de água foi transferida para a cubeta até a marca de 5 mL, em seguida, foi adicionado duas gotas do reagente Tiofer, a cubeta foi então fechada e agitada, e aguardou-se por 10 minutos. Após esse período, foi feita a leitura visualmente, comparando a coloração da amostra com a cartela correspondente fornecida pelo kit (ALFAKIT).

5.5.10 Amônia

A quantificação da amônia na água foi realizada utilizando o kit colorimétrico ALFAKIT, conforme instruções dos fabricantes. A amostra de água foi transferida para a cubeta até a marca de 5 mL. Em seguida, foi adicionado três gotas dos reagentes 1, 2 e 3, fechando e agitando a cubeta após cada adição. Após a última adição, guardou-se por 10 minutos para o desenvolvimento da cor. Após esse período, a cubeta foi posicionada sobre a cartela colorimétrica para comparação visual da coloração da amostra com a cartela, assim determinando a concentração de amônia (ALFAKIT).

5.5.11 Cloretos

A concentração de cloretos na água foi determinada utilizando o kit colorimétrico ALFAKIT, seguindo os procedimentos recomendados pelo fabricante. Para a análise, uma alíquota da amostra foi transferida para a cubeta de 10 mL e, em seguida, foram adicionadas duas gotas do Reagente 1, homogeneizando-se a solução com movimentos circulares suaves, de modo a assegurar a completa dispersão do reagente na amostra. Posteriormente, a seringa graduada fornecida no kit foi preenchida com o Reagente 2, ajustando-se o êmbolo exatamente no zero da escala, conforme instrução do método. Com a seringa preparada, iniciou-se o gotejamento do Reagente 2 sobre a amostra, adicionando uma gota por vez e promovendo agitação após cada adição. O procedimento foi mantido até que fosse observada a mudança de coloração, passando de amarelo claro para amarelo-tijolo, ponto indicado pelo fabricante como o término da titulação. Ao final da titulação, a leitura da concentração de cloretos foi realizada diretamente na seringa, correspondendo ao volume de Reagente 2 consumido durante o processo. O valor lido na escala é expresso em mg L^{-1} de Cl^- , não sendo necessária fazer conversão.

5.5.12 Análises microbiológicas

O método utilizado foi o do substrato cromogênico definido como ONPG-MUG, reconhecido por sua praticidade e custo/benefício na detecção de coliformes totais e *Escherichia coli* em amostras de água. A análise foi realizada no mesmo dia da coleta. O procedimento consistiu na adição de 1 (um) frascote em cada frasco de

amostra de água coletado em campo. Os frascos foram então fechados e levemente agitados, garantindo a completa dissolução do reagente, e após incubados em estufa a 35 °C por um período de 24 horas. Após a incubação foi realizada a leitura visual dos resultados. Caso a amostra permaneça transparente o resultado é negativo, porém havendo desenvolvimento de coloração amarela, o resultado é positivo para Coliformes Totais e se a amostra se apresentar amarela e fluorescente com luz UV-365 nm, o resultado é positivo para *E. coli* (Funasa, 2014).

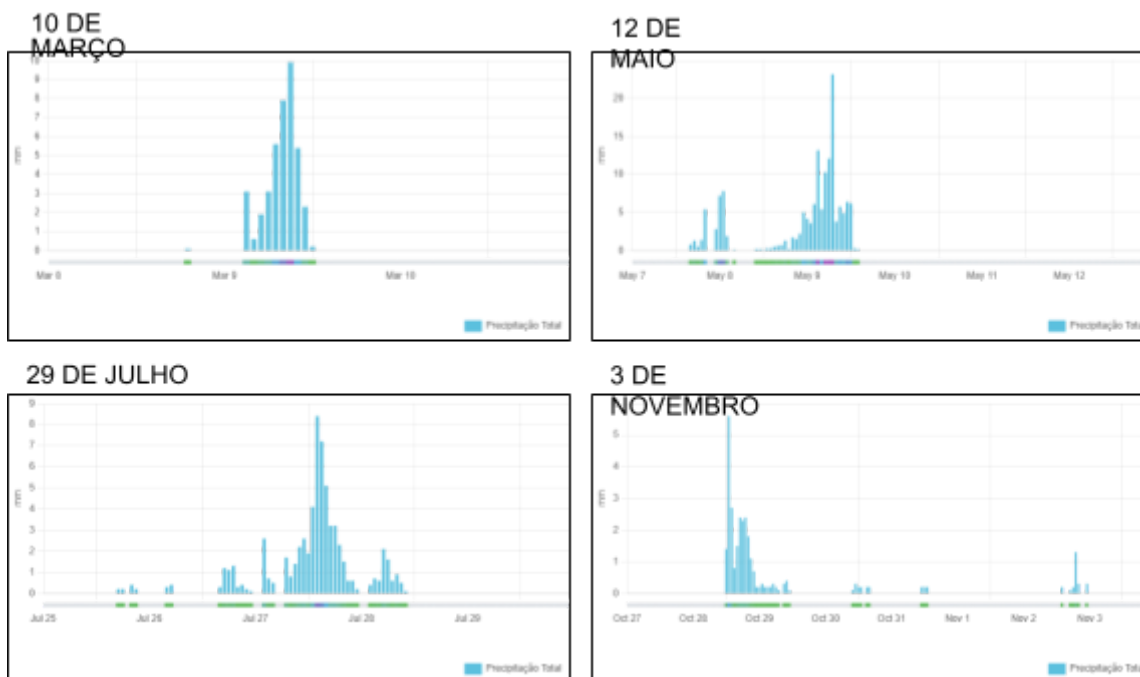
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Condições pluviométricas durante as campanhas de campo

Os dados pluviométricos referentes aos períodos de caracterização de campo e coleta de amostras foram analisados com o objetivo de contextualizar os resultados hidrogeológicos, físico-químicos e bacteriológicos obtidos nos poços monitorados. A precipitação constitui um dos principais fatores de controle do nível freático, da recarga do aquífero e da vulnerabilidade das captações rasas à contaminação superficial.

A figura 10 apresenta os gráficos de precipitação acumulada para os períodos correspondentes às campanhas de campo realizadas nas quatro estações, evidenciando variações sazonais significativas entre períodos de estiagem e eventos de chuva mais intensos. Observa-se que algumas campanhas foram realizadas após episódios de precipitação acumulada mais elevada, enquanto outras ocorreram em períodos de menor pluviosidade.

Figura 10 - Precipitação correspondentes aos períodos de campanhas de campo realizadas ao longo do ano.



Fonte: Meteosat, 2025.

Essas diferenças no regime de chuvas foram consideradas na interpretação dos níveis d'água observados em campo e dos resultados das análises físico-químicas e microbiológicas, uma vez que eventos de precipitação tendem a favorecer a recarga do aquífero, o aumento do nível freático e a mobilização de partículas finas e microrganismos para o interior das captações, especialmente em poços rasos e nascentes.

6.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O MDE com as curvas de níveis (figura 11) mostram a variação altimétrica da área de estudo, com cotas entre 330 m e 400 m, apresentando um relevo suavemente ondulado. As curvas de nível representam linhas de mesma altitude, quanto mais próximas entre si, maior é a inclinação da encosta.

Na localidade do Poço A, o terreno é mais baixo, com altitudes entre 330 e 340 m. Nesta região, as curvas formam relevo suavemente inclinado, onde a água superficial tende a se acumular e escoar. Assim, o Poço A está em uma área onde o fluxo de água do terreno tende a convergir, aumentando a recarga lateral.

O Poço B situa-se em cota intermediária, entre 340 e 350 m, em uma encosta

de declividade suave. Isso indica um equilíbrio entre infiltração e escoamento superficial, caracterizando uma zona transicional entre as áreas mais baixas e as mais elevadas do terreno.

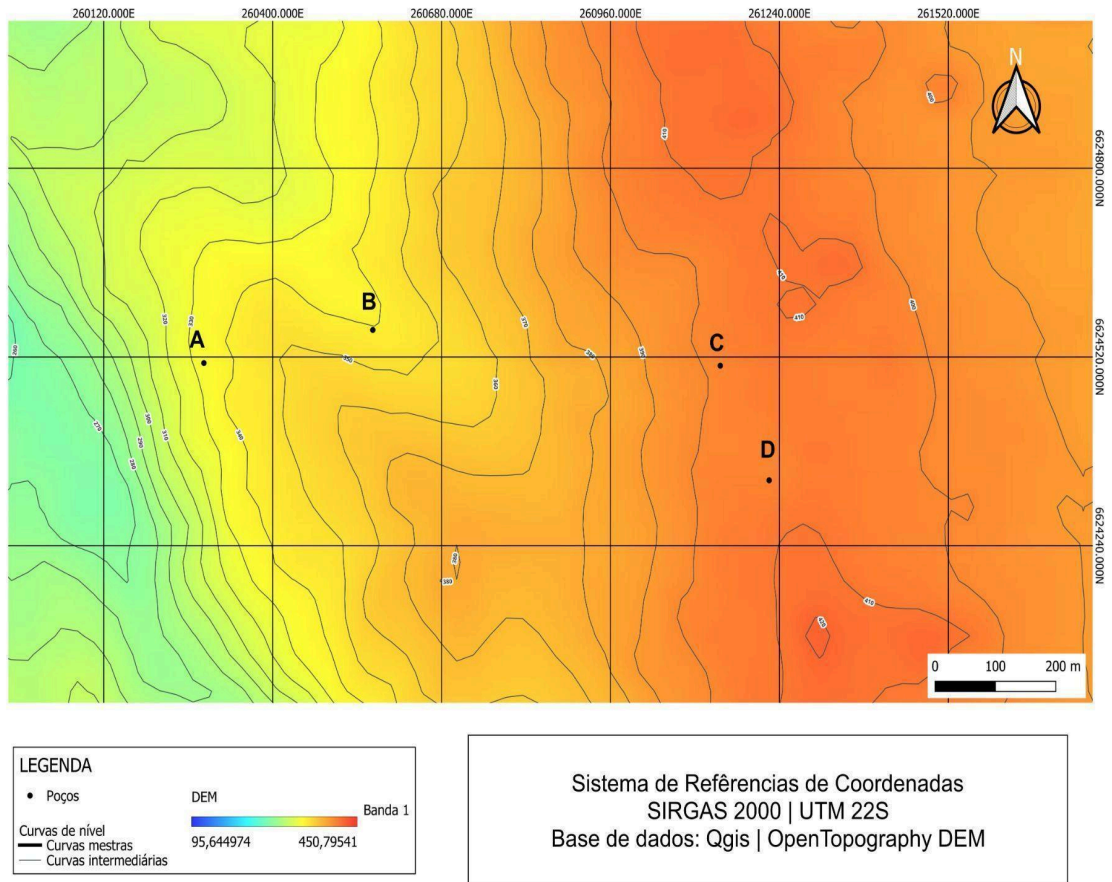
Já os poços C e D estão no setor mais elevado do mapa, com altitudes entre 400 e 410 m. Áreas mais altas tendem a atuar como zonas de recarga, pois a água tende a infiltrar, dependendo da presença de fraturas no aquífero. A distribuição relativamente regular das curvas de nível nessa região indica um relevo mais contínuo.

O gradiente topográfico da área é aproximadamente de Leste (mais alto) para Oeste (mais baixo). Esse padrão topográfico auxilia na compreensão do comportamento da água subterrânea, uma vez que o fluxo tende acompanhar o relevo, deslocando-se das partes mais altas para as mais baixas, influenciando na dinâmica hidrogeológica observada nos poços.

6.3 Declividade da área de estudo

O mapa de declividade (figura 12) indica o grau de inclinação do terreno, variando de superfícies quase planas até encostas acentuadas, com classes que se estendem de valores próximos a 0° até mais de 40°. As áreas em tons azulados correspondem a baixa declividade, enquanto as amareladas e avermelhadas indicam maiores inclinações.

Figura 11 - Modelo Digital de Elevação com as curvas de nível da área de estudo.



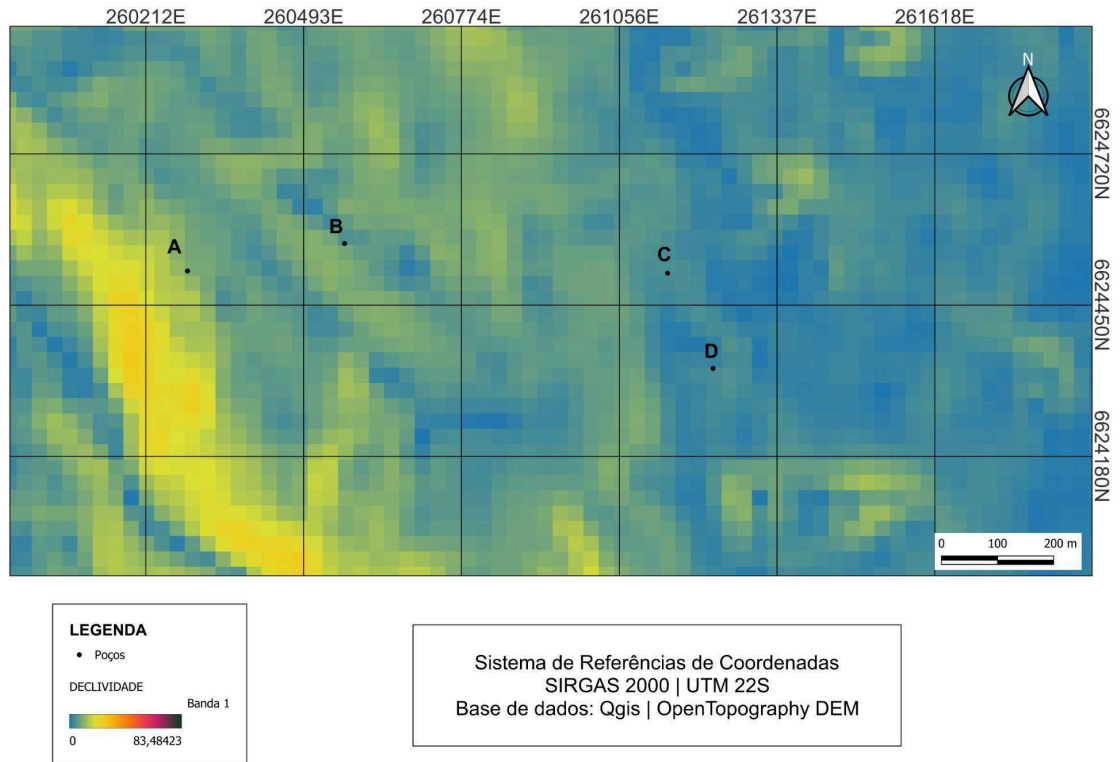
Fonte: A autora, 2025.

O Poço A encontra-se próximo a uma faixa de maior declive, associada a uma encosta que provavelmente faz parte de um vale raso, coerente com o padrão observado no MDE. Esse tipo de feição favorece o direcionamento do escoamento superficial em direção ao poço, contribuindo para que a região receba fluxo proveniente das áreas mais elevadas e, conseqüentemente, para a recarga local.

O Poço B está em área de declividade moderada sem grandes desníveis, favorecendo uma infiltração mais equilibrada e sem grandes concentrações de escoamento superficial.

Os poços C e D posicionam-se em setores nos quais a declividade varia de forma suave, associados a porções de relevo mais elevadas. Nessas áreas, a combinação entre topografia e presença de estruturas fraturadas tende a potencializar a recarga e a circulação de água no subsolo, aspecto importante para a produtividade de poços em aquíferos fissurais.

Figura 12 - Mapa de declividade da área de estudo.



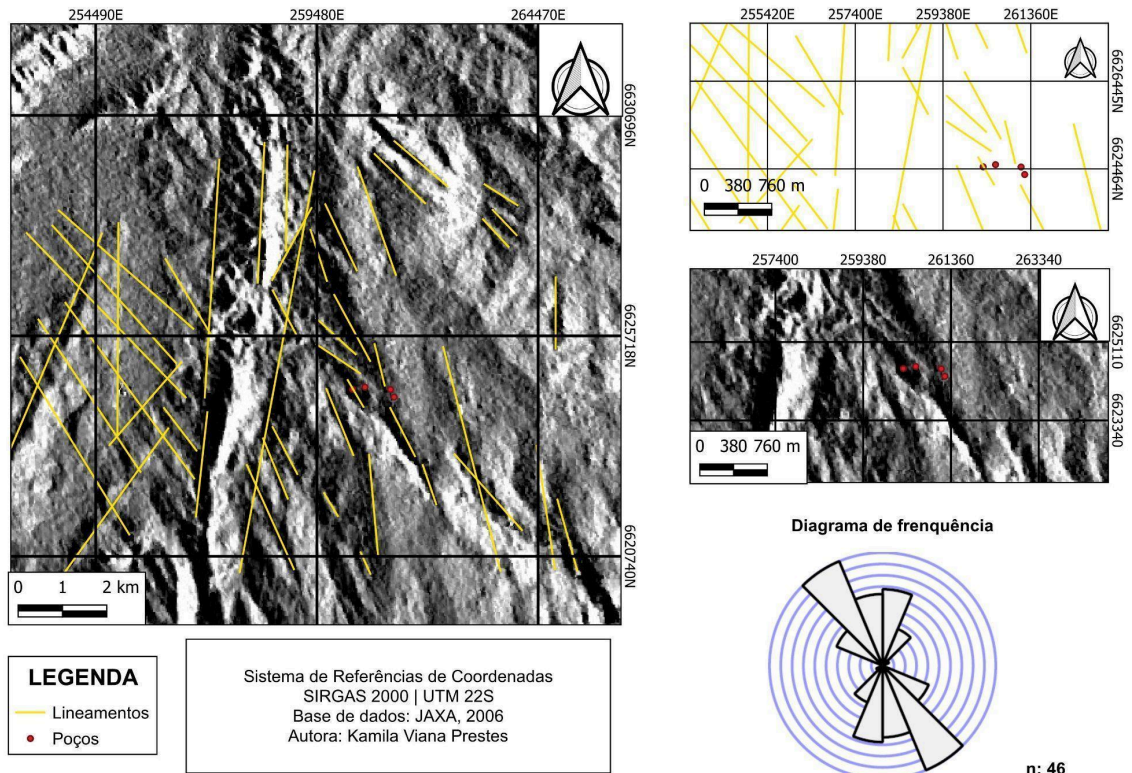
Fonte: A autora, 2025.

6.4 Lineamentos da área de estudo

A interpretação integrada do mapa de lineamentos extraídos da imagem ALOS PALSAR (2006) e do diagrama de roseta do tipo frequência (figura 13), elaborado a partir de 46 lineamentos estruturais identificados, permite caracterizar o arcabouço estrutural que condiciona a dinâmica hidrogeológica da área de estudo. A distribuição espacial dos lineamentos evidencia um setor com maior concentração de fraturas nas proximidades dos poços monitorados, indicando uma zona de maior heterogeneidade estrutural, de modo que a produtividade e o comportamento hidrogeológico dos poços podem estar fortemente condicionados por essas feições.

No diagrama de roseta identifica-se dois grupos principais de lineamentos, o primeiro, orientado na direção NW–SE, constitui o conjunto estrutural dominante, apresentando a maior densidade de lineamentos e outro na direção NNE–SSW, caracterizado como o segundo maior grupo dominante.

Figura 13 - Mapa de lineamentos e diagrama de roseta do tipo frequência sobre imagem de radar ALOS PALSAR da área de estudo. *n= 46.



*n: Número de medidas.
 Fonte: A autora, 2025.

6.5 Análise de campo

A análise de campo permitiu caracterizar em termos construtivos e hidrogeológicos os pontos de captação. O poço A (figura 14A) consiste em uma estrutura de alvenaria rasa, com profundidade aproximada de 0,70 m, enquanto o poço B (figura 14B) apresenta estrutura do tipo poço cavado, com profundidade de 0,76 m. Em ambos, a lâmina d'água encontrava-se pouco abaixo da boca, indicando que a superfície freática está muito próxima da superfície do terreno. Além disso, o nível d'água não se mantém constante ao longo do ano, apresentando variações sazonais associadas ao regime de chuvas e períodos de estiagem, o que reflete a forte influência das condições pluviométricas sobre a dinâmica do aquífero.

Considerando a posição topográfica em áreas de menor cota altimétrica e a forma construtiva dessas captações, compreende-se que a água aflora naturalmente nesses pontos, caracterizando pequenas nascentes.

Em contraste, o poço C (figura 14C) é um poço tubular profundo, revestido e equipado com bomba. Embora não tenham sido realizadas medições diretas de

profundidade em campo, informações fornecidas pelo morador indicam profundidade total aproximada de 65 m. Diante dessa característica, infere-se que esse poço capta água diretamente do aquífero fissural, associada a fraturas e descontinuidades no embasamento cristalino, com circulação em maior profundidade e menor influência direta do nível freático raso.

O Poço D (figura 14D) apresenta estrutura de alvenaria equipada com bomba, também com lâmina d'água posicionada próxima à superfície e nível d'água variando ao longo do ano conforme o período de precipitação. Diferentemente dos poços A e B, a área ao seu redor encontra-se permanentemente encharcada ao longo das quatro estações do ano, apresentando vegetação hidrófila bem desenvolvida e presença constante de lâmina d'água superficial (Figura 15), o que indica condições de saturação persistente do solo e elevada influência do nível freático próximo à superfície. Esse conjunto de características indica que o Poço D está inserido em uma zona de acúmulo de umidade, onde ocorre o afloramento natural da água, caracterizando a captação como uma nascente.

Figura 14 - Poços onde foram realizadas as coletas para análise hidrogeoquímicas: A) Cacimba A; B) Cacimba B; C) Poço C; D) Cacimba D.



Fonte: A autora, 2025.

Figura 15 - Solo saturado e presença de lâmina d'água superficial características de nascente, solo saturado.



Fonte: A autora, 2025.

6.6 Análises físico-químicas

A avaliação dos parâmetros físico-químicos permitiu identificar padrões sazonais associados tanto à dinâmica hidrogeológica do aquífero fissural quanto às características geológicas da área, dominada por rochas graníticas e fraturadas. As variações observadas refletem a influência da recarga, o tempo de residência da água, a interação água-rocha e as características morfológicas dos poços. A seguir são apresentados os principais resultados.

6.6.1 Temperatura

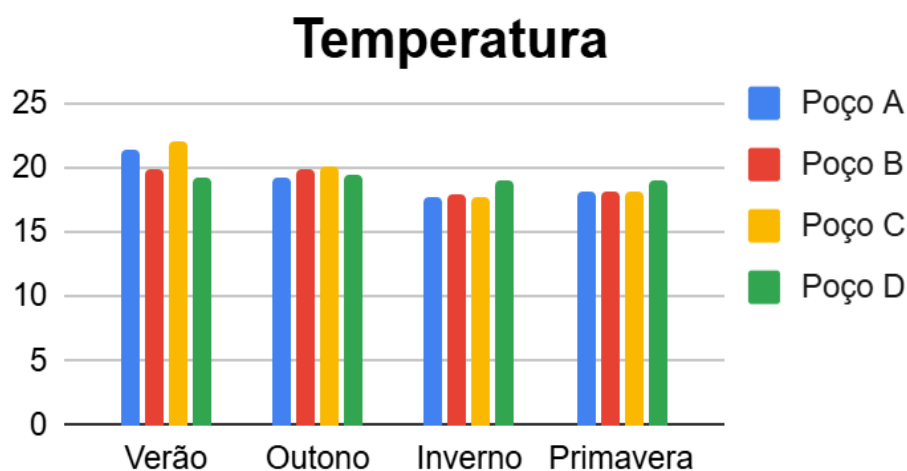
Para consumo direto, é recomendado que a água apresente temperatura acima de 5 °C, para evitar irritação da mucosa gástrica, e abaixo de 15 °C, para não se tornar desagradável ao paladar (Ferreira e Pádua, 2010). A tabela 5 apresenta dados das temperaturas médias obtidas por poços durante as estações de verão, outono, inverno e primavera.

Tabela 5 - Temperatura da água (°C) dos poços nas estações do ano.

Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	21,3	19,8	22,1	19,3
Outono	19,3	19,8	20,2	19,5
Inverno	17,8	18	17,8	19
Primavera	18,1	18,1	18,1	19

Fonte: A autora, 2025.

A temperatura da água apresentou variações sazonais discretas nos quatro poços monitorados, acompanhando as oscilações climáticas anuais, conforme ilustrado no gráfico da figura 16.

Figura 16 - Temperaturas médias obtidas por poços durante as estações de verão, outono, inverno e primavera.

Fonte: A autora, 2025.

No Poço A, a temperatura iniciou em 21,3 °C no verão, diminuindo no outono (19,3 °C) e atingindo o menor valor no inverno (17,8 °C), com leve aumento na primavera (18,1 °C).

O Poço B manteve valores relativamente estáveis ao longo do ano, com pequenas diferenças entre as estações. A temperatura variou de 19,8 °C no verão/outono para 18,0 °C no inverno com leve aumento na primavera (18,1 °C).

No Poço C, a temperatura apresentou os maiores valores em relação aos

outros poços no verão (22,1 °C), reduzindo no outono (20,2 °C) e atingindo o menor valor no inverno (17,8 °C), igual ao Poço A. Na primavera, o valor voltou a subir para 18,1 °C, indicando retomada gradual do aquecimento.

O Poço D registrou valor de 19,3 °C no verão, menor que A e C, 19,5 °C no outono e pequena redução no inverno (19 °C), permanecendo estável na primavera, sendo o poço com menor variação térmica anual.

De modo geral, todos os poços apresentaram redução da temperatura no inverno e aumento no verão e primavera, com diferenças mais acentuadas nos Poços A e C, enquanto B e D mantiveram maior estabilidade ao longo das estações. Esse parâmetro não possui valor máximo permitido (VMP) estabelecido nas normas de potabilidade, sendo utilizado apenas para caracterização física da água e avaliação de variações ambientais. A temperatura influencia indiretamente outros parâmetros, como a condutividade elétrica e as reações geoquímicas, podendo intensificar a dissolução mineral nos períodos mais quentes.

6.6.2 Cor

De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, o VMP para cor aparente em água destinada ao consumo humano é de 15 uH. A tabela 6 apresenta os valores obtidos nas diferentes estações.

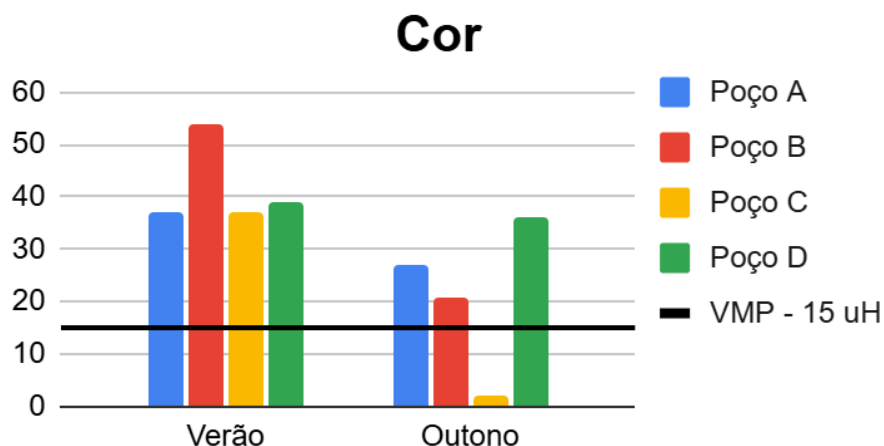
Tabela 6 - Parâmetro cor (uH) da água dos poços nas estações do ano.

Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	37	54	37	39
Outono	27	21	2	36
Inverno	NR	NR	NR	NR
Primavera	NR	NR	NR	NR

*NR: Não realizado. Fonte: A autora, 2025

Os valores de cor apresentaram grande variação entre poços e estações, conforme ilustrado no gráfico da figura 17.

Figura 17 - Valores do parâmetro cor dos poços durante as estações do verão e outono.



Fonte: A autora, 2025.

No verão, a cor alcançou valores expressivos em todos os poços, com Poço B (54 uH) apresentando o maior valor do grupo, seguido pelos Poços A e C (ambos com 37 uH) e pelo Poço D (39 uH). Todos esses valores ultrapassam o VMP estabelecido. No outono, os valores reduziram de forma geral, com maior queda no Poço C (2 uH), enquanto os Poços A (27 uH), B (21 uH) e D (36 uH) permaneceram acima do valor permitido.

Os valores acima do limite podem ser atribuídos à presença de matéria orgânica dissolvida proveniente do solo e do manto de intemperismo, transportada gradualmente para o aquífero por meio da circulação subterrânea. A expressiva variação observada no Poço C, embora seja uma captação profunda, pode ser explicada pela conectividade estrutural do aquífero, uma vez que fraturas podem conectar níveis profundos a zonas mais superficiais, permitindo a mistura de águas com características distintas ao longo do ciclo anual, assim pequenas mudanças na contribuição das fraturas dominantes são suficientes para alterar significativamente o valor de cor aparente.

A redução dos valores em todos os poços no outono indica um período de maior estabilidade hidrogeoquímica, associado à diminuição da atividade biológica no solo, e processos naturais de filtração, resultando em águas visualmente mais claras. Tais resultados não implicam necessariamente contaminação, mas comprometem o aspecto visual da água e a aceitabilidade dos consumidores.

Nas estações de inverno e primavera não foi possível realizar as análises por limitações técnicas, impossibilitando avaliar a evolução sazonal completa do

parâmetro.

6.6.3 pH

A Portaria GM/MS nº 888/2021, estabelece que o pH da água para consumo humano deve situar-se na faixa de 6,0 a 9,0. A tabela 7 apresenta os valores de pH obtidos ao longo das estações.

Tabela 7 - Parâmetro PH da água dos poços nas estações do ano.

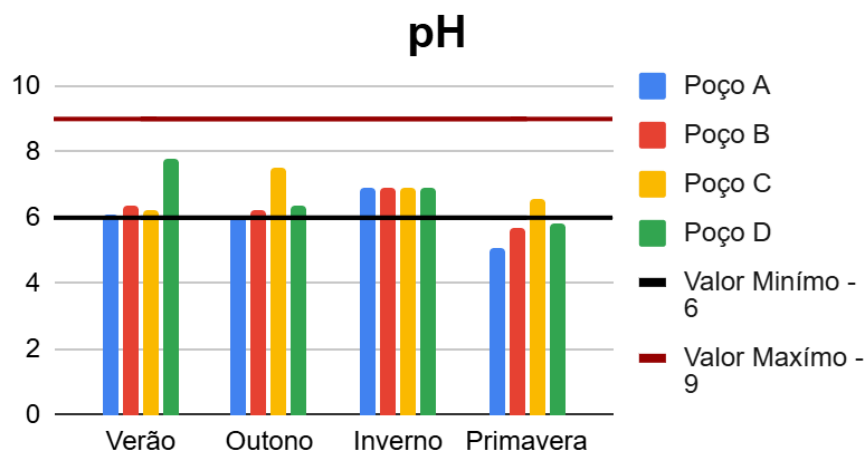
Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	6,1	6,4	6,2	7,8
Outono	6,0	6,2	7,5	6,4
Inverno	6,9	6,9	6,9	6,9
Primavera	5,1	5,7	6,6	5,8

Fonte: A autora, 2025

O pH apresentou variação entre poços e estações, mas permaneceu em maioria dentro da faixa recomendada pela legislação, exceto na primavera, quando os poços A, B e D registraram valores inferiores a 6,0 (Figura 18). Essa redução pode estar relacionada à influência da água meteórica, pois é naturalmente mais ácida devido ao CO₂ atmosférico. Como a coleta ocorreu durante período de chuva reforça essa interpretação, já que poços rasos respondem rapidamente à infiltração recente.

Os poços A, B e D indicaram menor capacidade tampão, evidenciada pela baixa alcalinidade nesse período, tornando-os mais sensíveis às variações sazonais. Por outro lado, o Poço C apresentou comportamento compatível com maior profundidade e maior tempo de residência da água, o que favorece processos de neutralização.

Figura 18 - pH obtidos por poços durante as quatro estações.



Fonte: A autora, 2025.

Assim, as oscilações de pH refletem uma combinação entre profundidade do poço, características das rochas, intensidade da recarga e capacidade tampão do meio.

6.6.4 Condutividade elétrica

A legislação vigente não estabelece VMP para esse parâmetro, sendo sua aplicação direcionada principalmente à caracterização hidrogeoquímica das águas. A tabela 8 apresenta os valores de condutividade elétrica obtidos nas diferentes estações do ano.

Tabela 8 - Parâmetro de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) da água dos poços nas estações do ano.

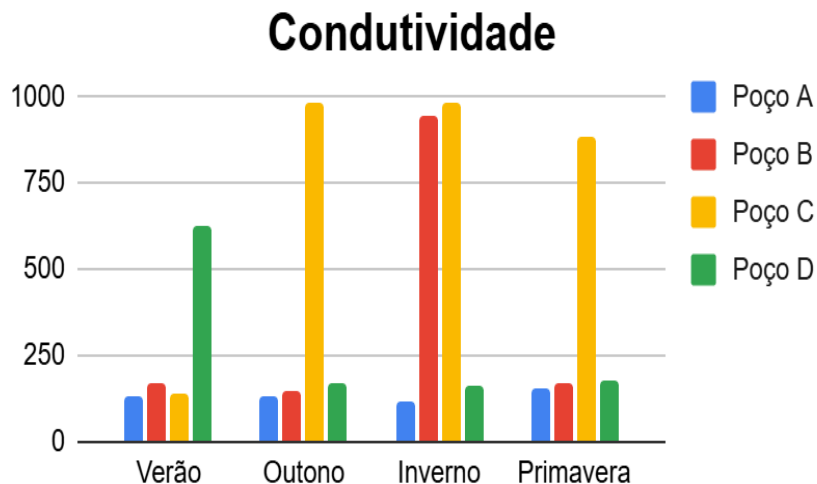
Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	132,3	168,2	135,4	626
Outono	132,4	147,4	980	171
Inverno	117,35	948,5	986	158,5
Primavera	153,2	170,8	882,3	177,9

Fonte: A autora, 2025

A condutividade elétrica apresentou variações marcantes entre os poços e ao

longo das estações, conforme ilustrado na figura 19.

Figura 19 - Condutividade elétrica obtida por poços durante as estações de verão, outono, inverno e primavera.



Fonte: A autora, 2025.

No verão, os valores oscilaram entre 132,3 e 626 $\mu\text{S/cm}$, sendo o maior registrado no poço D (626 $\mu\text{S/cm}$). No outono, observou-se um aumento expressivo no poço C (980 $\mu\text{S/cm}$), destacando-se como o maior valor da estação. No inverno, ocorreu uma elevação acentuada da condutividade no poço B (948,5 $\mu\text{S/cm}$) e no poço C (986 $\mu\text{S/cm}$). Na primavera, o poço C manteve-se com a condutividade elevada (882,3 $\mu\text{S/cm}$). De modo geral, o poço C apresentou os maiores valores anuais de condutividade, seguido pelo poço B no inverno. Em contraste, os poços A e D apresentaram menor amplitude de variação.

O valor registrado excepcionalmente baixo no Poço C durante o verão (135,4 $\mu\text{S/cm}$) não acompanha o padrão das demais estações, em que os valores são consistentemente altos, indicando que a leitura de verão provavelmente foi influenciada por falhas técnicas, não refletindo a real condutividade da água. Os valores elevados no outono, inverno e primavera (882–986 $\mu\text{S/cm}$), indicam forte mineralização decorrente da interação prolongada entre a água e o granito fraturado. Por outro lado, o aumento expressivo no Poço B durante o inverno pode refletir a recarga ocorrida nos dias anteriores, favorecendo a percolação da água através do solo e do manto de alteração, promovendo a mobilização de íons retidos e elevando a mineralização da água subterrânea, o que se reflete nos valores mais altos de condutividade elétrica.

Esses resultados evidenciam que, embora o comportamento sazonal seja semelhante, os mecanismos de controle da condutividade elétrica diferem conforme o tipo de captação, a posição topográfica e o contexto geológico.

6.6.5 Turbidez

A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece o VMP de 5 uT para águas destinadas ao consumo humano. É essencial que a turbidez se mantenha baixa para garantir a eficiência dos processos de desinfecção (Heller e Pádua, 2010). Na tabela 9, apresentam-se os resultados das análises realizadas para os poços nas quatro estações.

Tabela 9 - Parâmetro de turbidez (uT) da água dos poços nas estações do ano.

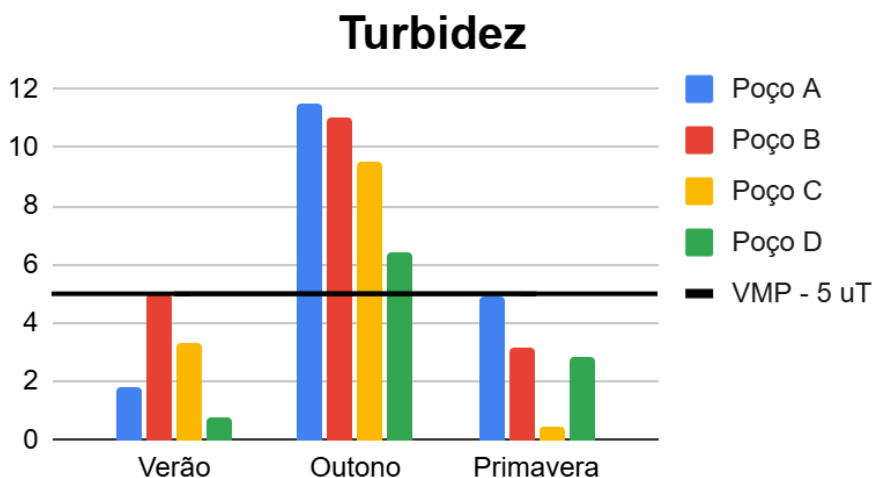
Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	1,8	4,97	3,32	0,81
Outono	11,5	11	9,54	6,38
Inverno	NR	NR	NR	NR
Primavera	4,91	3,13	0,457	2,84

*NR: Não realizado.

Fonte: A autora, 2025

No verão, os valores permaneceram abaixo do VMP, variando entre 0,81 e 4,97 uT. No outono, ocorreu um aumento acentuado da turbidez em todos os poços, com valores entre 6,38 e 11,5 uT, todos acima do VMP, podendo estar relacionado a presença de matéria orgânica e outras substâncias resultantes de processos de erosão ou despejos domésticos (FUNASA, 2013). No inverno, devido a questões técnicas, não houve registro de dados. E na primavera, os valores retornaram a níveis baixos, variando entre 0,457 e 4,91 uT, todos dentro do limite permitido, conforme ilustrado no gráfico da figura 20.

Figura 20 - Turbidez obtida por poços durante as estações do verão, outono e primavera.



Fonte: A autora, 2025.

6.6.6 Cloreto

A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece o VMP de 250 mg/L para águas destinadas ao consumo humano. A tabela 10 apresenta os resultados analisados para os quatro poços na primavera.

Tabela 10 - Parâmetro cloreto (mg/L) da água dos poços nas estações do ano.

Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	NR	NR	NR	NR
Outono	NR	NR	NR	NR
Inverno	NR	NR	NR	NR
Primavera	0,5	2,1	3,3	0,8

*NR: Não realizado.

Fonte: A autora, 2025

Os valores de cloretos foram registrados apenas na primavera, variando entre 0,5 e 3,3 mg/L, concentrações muito inferiores às do VMP (Figura 20). Esses níveis não representam risco sanitário nem implicações sensoriais, uma vez que permanecem dentro da faixa considerada segura para consumo humano.

6.6.7 Ferro

A legislação vigente estabelece um VMP de 0,3 mg/L de ferro na água para consumo humano. A tabela 11 apresenta os valores de ferro analisados para os poços ao longo das estações.

Tabela 11 - Parâmetro ferro (mg/L) na água dos poços nas estações do ano.

Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Outono	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Inverno	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Primavera	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

Fonte: A autora, 2025

Considerando o limite de detecção do método colorimétrico ALFAKIT, os resultados indicam que o ferro esteve ausente ou presente em concentrações inferiores à capacidade de detecção do método. Portanto, dentro dessa faixa, a água avaliada atende aos padrões de aceitação para consumo.

6.6.8 Amônia

A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece o VMP de 1,2 mg/L para amônia em águas destinadas ao consumo humano. Na tabela 12, estão apresentados os resultados obtidos para os poços monitorados nas diferentes estações.

Tabela 12 - Parâmetro amônia (mg/L) na água dos poços nas estações do ano.

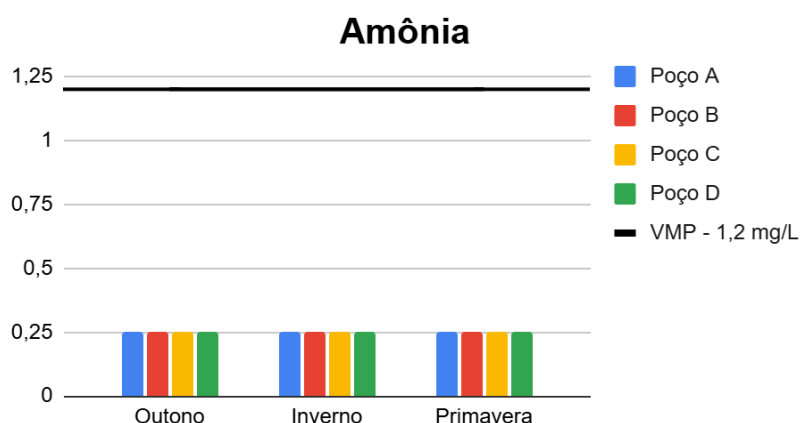
Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Outono	0,25	0,25	0,25	0,25

Inverno	0,25	0,25	0,25	0,25
Primavera	0,25	0,25	0,25	0,25

Fonte: A autora, 2025

Considerando o limite de detecção do método colorimétrico ALFAKIT, os resultados indicam que no verão a amônia esteve ausente ou presente em concentrações inferiores à capacidade de detecção do método, porém foi detectada em baixas concentrações nas demais estações, apresentando valores iguais entre os poços (Figura 21). Apesar disso, todos os valores permaneceram muito abaixo do limite de 1,2 mg/L estabelecido pela legislação, não indicando risco à potabilidade.

Figura 21 - Amônia obtida por poços durante as estações de outono, inverno e primavera.



Fonte: A autora, 2025.

A detecção de amônia em baixas concentrações podem estar associada à decomposição de matéria orgânica e à atividade microbológica, processos que liberam compostos que podem alcançar o aquífero durante a recarga.

6.6.9 Alcalinidade

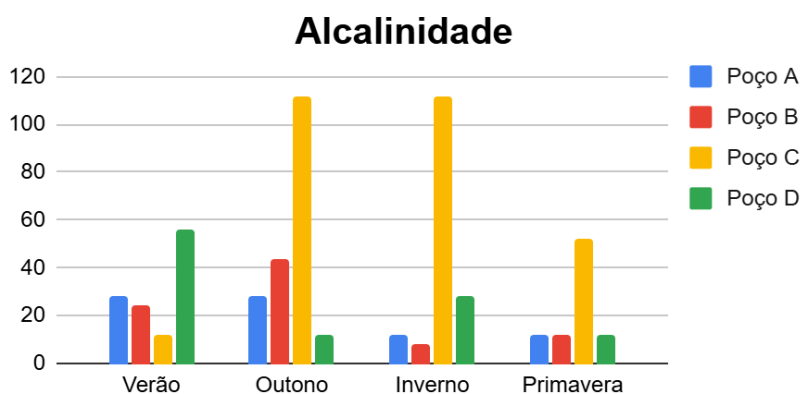
A legislação vigente não estabelece VMP para o parâmetro de alcalinidade. Na tabela 13, são apresentados os resultados obtidos para os poços monitorados nas diferentes estações.

Tabela 13 - Parâmetro alcalinidade (mg/L CaCO₃) na água dos poços nas estações do ano.

Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	28	24	12	56
Outono	28	44	112	12
Inverno	12	8	112	28
Primavera	12	12	52	12

Fonte: A autora, 2025

A alcalinidade apresentou grande variação entre poços e estações, especialmente nos Poços C e D, que registraram os valores mais altos (Figura 22).

Figura 22 - Alcalinidade obtida por poços durante as quatro estações.

Fonte: A autora, 2025

No verão, os valores variaram entre 12 e 56 mg/L, sendo o maior observado no Poço D (56 mg/L). No outono, houve aumento expressivo no Poço C (112 mg/L), enquanto os Poços A e B apresentaram variações moderadas (28 e 44 mg/L). No inverno, manteve-se elevada no Poço C (112 mg/L), e os demais poços apresentaram valores mais baixos. Na primavera, os valores variaram entre 12 e 52 mg/L, com destaque novamente para o Poço C (52 mg/L).

Embora não possua VMP definido pela legislação, a baixa alcalinidade reflete uma fraca capacidade tampão, tendo maior suscetibilidade da água a variações no pH. Assim, os valores baixos observados na maior parte do ciclo anual nos poços A, B e D, pode ser explicado a sua maior sensibilidade às oscilações de acidez. Já no

Poço C, observou-se alcalinidade elevada no outono e inverno, compatível com águas de maior interação água-rocha, com dissolução de minerais presentes no granito.

6.6.10 Dureza total

Para consumo humano, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece o VMP de 300 mg/L CaCO₃. Na tabela 14, estão os resultados obtidos para os poços monitorados nas quatro estações.

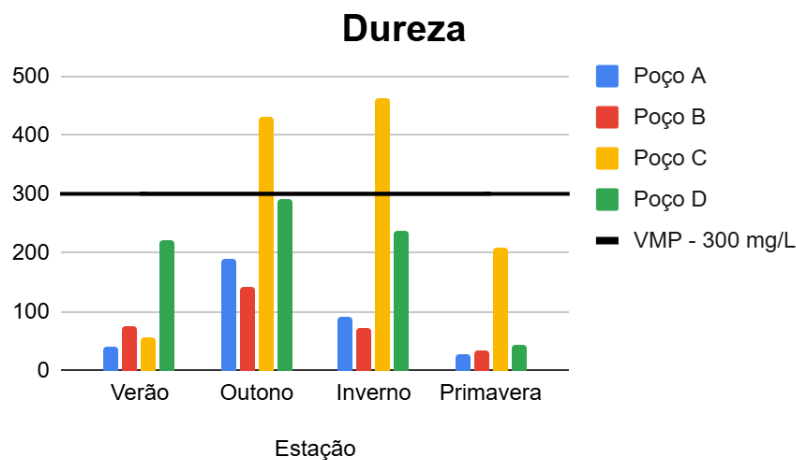
Tabela 14 - Parâmetro dureza (mg/L CaCO₃) da água dos poços nas estações do ano.

Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	40	76,7	56,7	220
Outono	190	143,3	430	290
Inverno	90	73,3	463,3	236,7
Primavera	26,7	33,3	210	43,3

Fonte: A autora, 2025

A dureza variou significativamente entre poços e estações, com destaque para os valores elevados no poço C que apresentou os maiores valores ao longo do monitoramento, atingindo 430 mg/L no outono e 463,3 mg/L no inverno, classificando-se como água muito dura e ultrapassando o limite de 300 mg/L previsto na legislação (Figura 23).

Figura 23 - Dureza obtida por poços durante as estações do verão, outono, inverno e primavera.



Fonte: A autora, 2025

Os valores mais elevados de dureza observados no poço C podem ser associados a processos naturais de dissolução de minerais silicáticos em fraturas graníticas, associados à interação prolongada de água-rocha.

6.6.11 Sólidos totais dissolvidos

A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece o VMP de 500 mg/L para sólidos totais dissolvidos, de modo que concentrações acima desse limite podem comprometer a potabilidade e a aceitabilidade da água. Na tabela 15, estão os resultados obtidos para os poços monitorados nas quatro estações.

Tabela 15 - Parâmetro de sólidos totais dissolvidos (mg/L) na água dos poços nas estações do ano.

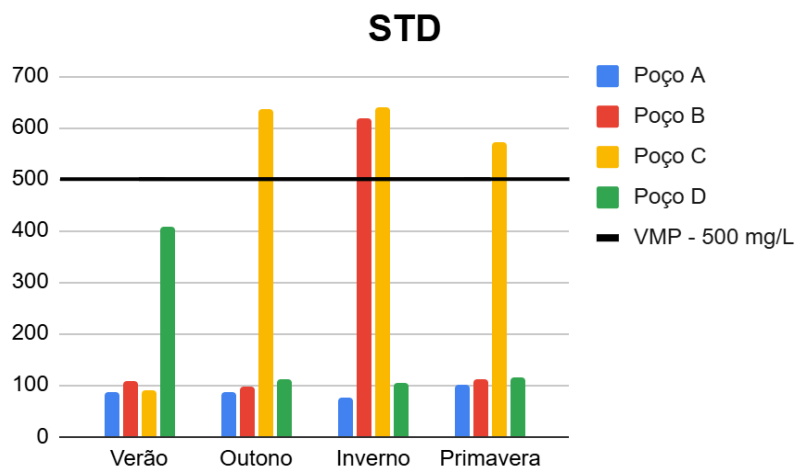
Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	85,99	109,33	88,01	406,90
Outono	86,06	95,81	637,00	111,15
Inverno	76,27	616,53	640,90	103,03
Primavera	99,58	111,02	573,50	115,64

Fonte: A autora, 2025

Os sólidos totais dissolvidos (STD) apresentaram variações entre poços e

estações, com a maioria dos valores dentro dos limites estabelecidos pela legislação, destacando-se, contudo, os valores elevados registrados no Poço C e Poço B que ultrapassaram o limite máximo permitido (Figura 24).

Figura 24 - STD obtida por poços durante as quatro estações.



Fonte: A autora, 2025

No verão, os valores variaram entre 85,99 e 406,90 mg/L, sendo o maior no Poço D. No outono, o Poço C apresentou aumento acentuado para 637 mg/L, enquanto os demais poços mantiveram valores entre 86,06 e 111,15 mg/L. No inverno, os poços registraram valores entre 76,27 e 640,90 mg/L. Na primavera, o Poço C manteve-se com valores altos (573,50 mg/L), enquanto os demais poços mantiveram valores moderados.

Em aquíferos fissurais desenvolvidos em rochas graníticas, como o da área de estudo, os STD refletem principalmente os processos de dissolução mineral ao longo das fraturas, intensificados pelo maior tempo de residência da água e pela interação prolongada de água-rocha. Poços que apresentaram valores baixos a moderados ao longo do ciclo anual indicam águas pouco mineralizadas, fortemente influenciadas pela recarga meteórica e por menor tempo de contato com a rocha. Em contrapartida, os valores mais elevados, como os observados no Poço C, estão associados a maior tempo de circulação da água no aquífero, favorecendo a dissolução de minerais presentes nas fraturas graníticas. Conforme destacado por Freeze e Cherry (1979), nas áreas de recarga a água subterrânea mais rasa tende a apresentar menores concentrações de sólidos dissolvidos quando comparada às águas de maior profundidade no mesmo aquífero ou àquelas das áreas de

descarga.

6.7 Análise bacteriológica

A legislação estabelece que a água potável deve estar isenta de micro-organismos patogênicos e livre de bactérias indicadoras de contaminação fecal. A tabela 16 apresenta os resultados referentes à presença de coliformes totais nas amostras analisadas ao longo das estações, enquanto a tabela 17 apresenta os resultados obtidos para *Escherichia coli*.

Tabela 16 - Resultado de coliformes totais na água dos poços nas estações do ano.

Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	NR	NR	NR	NR
Outono	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
Inverno	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
Primavera	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo

*NR: Não realizado.

As análises microbiológicas foram realizadas de forma qualitativa, com resultados expressos como presença (+) ou ausência (-)

Fonte: A autora, 2025.

Tabela 17 - Resultado de *Escherichia Coli* na água dos poços nas estações do ano.

Estação	Poço A	Poço B	Poço C	Poço D
Verão	NR	NR	NR	NR
Outono	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Inverno	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo
Primavera	NR	NR	NR	NR

*NR: Não realizado.

As análises microbiológicas foram realizadas de forma qualitativa, com resultados expressos como presença (+) ou ausência (-)

Fonte: A autora, 2025

Na estação do verão, houve ausência de dados para coliformes totais e *Escherichia coli*, assim como na primavera para *E. coli*, em função de limitações operacionais.

No outono, todos os poços apresentaram coliformes totais positivos, configurando contaminação por microrganismos de origem variadas e falhas na proteção sanitária da captação. Entretanto, nessa estação, *Escherichia coli* não foi detectada, ou seja, não havia evidência de contaminação fecal recente.

No inverno, além de apresentar positividade para coliformes totais, ocorreu a detecção de *Escherichia coli* em todos os poços, caracterizando contaminação fecal recente. A detecção simultânea em todos os poços sugere que fatores sazonais podem ter contribuído, como aumento da percolação de contaminantes durante períodos de maior umidade ou elevação do nível freático, favorecendo o contato com fontes superficiais de poluição.

Na primavera, embora não tenham sido obtidos dados para *E. coli*, todos os poços apresentaram novamente coliformes totais positivos. O que pode apontar que a contaminação não é pontual, mas estrutural, associada às características das captações e ao contexto hidrogeológico local.

A presença constante de coliformes totais e a ocorrência de *E. coli* no inverno violam os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS 888/2021, tornando a água imprópria para consumo humano sem tratamento prévio.

CONCLUSÕES

A integração dos dados geológicos, geomorfológicos, estruturais e hidroquímicos permitiu caracterizar o funcionamento do sistema aquífero na localidade Rincão dos Bitencourt, em Caçapava do Sul. Identificou-se que os poços A, B e D captam água em níveis rasos, associados ao freático superficial, enquanto o Poço C explora diretamente o aquífero fissural em maior profundidade.

A análise do relevo mostrou um gradiente topográfico que se desenvolve das áreas mais elevadas, onde se situam os poços C e D, em direção aos setores mais baixos, onde se localizam os poços A e B. O mapeamento estrutural evidenciou dois sistemas dominantes de fraturas, NW–SE e NNE–SSW, com elevada densidade de lineamentos na região central e no entorno das captações, destacando o papel dessas estruturas na circulação e no armazenamento da água subterrânea em meio cristalino fissural.

Os resultados físico-químicos demonstraram que a maior parte dos parâmetros avaliados se manteve dentro dos limites de potabilidade ao longo do período de monitoramento. As exceções incluem elevação pontual de cor e turbidez nos poços rasos, principalmente no verão e outono, e valores elevados de dureza e sólidos dissolvidos totais no Poço C, compatíveis com maior grau de mineralização decorrente da interação água–rocha em profundidade. Predominam águas de moderada a alta dureza, com episódios de valores muito elevados no Poço C, o que pode comprometer o uso e impactar sistemas hidráulicos.

O pH apresentou variações sazonais, com tendência à acidificação na primavera nos poços A, B e D, coerente com a baixa alcalinidade em parte das amostras. Os teores de cloreto, ferro e amônia permaneceram baixos, não configurando restrições químicas significativas.

A avaliação bacteriológica constituiu o principal fator limitante ao consumo das águas amostradas. A presença recorrente de coliformes totais e a detecção de *Escherichia coli* em todos os poços no inverno evidenciam vulnerabilidade sanitária e indicam contaminação fecal recente. Essas condições tornam a água imprópria para consumo sem tratamento, reforçando a necessidade de melhorias nas estruturas de proteção, vedação e desinfecção das captações.

O estudo confirmou a marcada heterogeneidade hidrogeológica típica de aquíferos fissurais, refletida tanto nos padrões de armazenamento e circulação

quanto nas características químicas e microbiológicas. Os resultados evidenciam a necessidade de manejo integrado, ações de proteção sanitária e práticas adequadas de tratamento para garantir o uso seguro da água subterrânea na localidade estudada.

REFERÊNCIAS

- AUGUSTO, Lia Giraldo da Silva; GURGEL, Idê Gomes Dantas; CÂMARA NETO, Henrique Fernandes; MELO, Carlos Henrique de; COSTA, André Monteiro. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1511–1522, jun. 2012.
- ALLEY, W. M.; HEALY, R. W.; LABAUGH, J. W.; REILLY, T. E. Flow and storage in groundwater systems. **Science**, v. 296, n. 5575, p. 1985–1990, 14 jun. 2002.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2018: Informe anual**. Brasília: ANA, 2018. 100 p. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/publicacoes/conjuntura-dos-recursos-hidricos> Acesso em: 29 jun. 2025.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas Água: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília, 2021.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Água no mundo**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>. Acesso em: 8 jun. 2025.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Governança das águas subterrâneas: desafios e caminhos** / Pilar Carolina Villar; Ricardo Hirata; José Luiz Albuquerque Filho; Ana Maciel de Carvalho. Brasília, DF: ANA, 2022.
- ANTUNES, I. M. H. R.; GONÇALVES, L. M. B. The “Sete Fontes” groundwater system (Braga, NW Portugal): historical milestones and urban assessment. **Sustainable Water Resources Management**, v. 5, p. 235–248, 2019.
- ARCOVA, Francisco Carlos Soriano; CICCIO, Valdir de; ROCHA, Paulo Augusto Bueno. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha–São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 2, p. 257–262, 2003.
- BABINSKI, M.; CHEMALE JUNIOR, F.; HARTMANN, L. A.; VAN SCHMUS, W. R.; SILVA, L. C. Juvenile accretion at 750–700 Ma in Southern Brazil. **Geology**, v. 24, n. 5, p. 439–442, 1996.
- BARCALA, Paulo. Águas subterrâneas: o essencial escondido. **Revista Velhas: Comitê da bacia Hidrográfica do Rio das Velhas**, 2023.
- BICCA, M. M. **Tectônica e proveniência do grupo Santa Bárbara, região de Minas do Camaquã - RS**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- BITENCOURT, Maria de Fátima Aparecida Saraiva. **Geologia, petrologia e**

estrutura dos metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008.** Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task. Acesso em: 29 de Junho de 2025.

BRASIL. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021.** Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562> Acesso em 29 de Junho de 2025.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água.** 4. ed. Brasília: FUNASA, 2013. 150 p.

CAPUCCI, Egmont; MARTINS, Aderson Marques; MANSUR, Kátia Leite; MONSORES, André Luiz Mussel. **Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas: orientação aos usuários.** Rio de Janeiro: DRM-RJ, SEMADS, SEINPE, PLANÁGUA SEMADS/GTZ Cooperação Técnica Brasil – Alemanha, 2001.

CESAR, Antonio Romalino S. Fragoso. **O Cráton do Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-Sul-Rio-Grandense.** Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, Balneário Camboriú. Santa Catarina. 1980, VOL. 5.

COSTA, Waldir Duarte. **Hidrogeologia dos meios fissurados.** In: FEITOSA, Fernando A. C., et. al. (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM - LABHID, 2008. p. 121–151.

Custodio, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrología Subterránea.** 3. ed. cor. Barcelona: Omega, S. A., 1983.

CHEMALE JR., F.; HARTMANN, L. A.; BABINSKI, M.; WILDNER, W.; VAN SCHMUS, W. R. **Evolução tectônica do Bloco São Gabriel, RS.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú. Boletim de Resumos Expandidos, v. 1, p. 232-233, 1994.

CLEARY, Robert W. **Águas subterrâneas.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989. Disponível em: <http://www.clean.com.br/cleary.pdf>. Acesso em: 29 de junho de 2025.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 202, de 28 de junho de 2018.** Disponível em <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=138308> Acesso em 29 de junho de 2025.

CRUZ, Rodrigo Fabiano e BASEI, Miguel Angelo Stipp e PHILIPP, Ruy Paulo. **New insights into the evolution of southern Dom Feliciano Belt through U-Pb and Lu-Hf isotopic data.** Anais Santiago: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2022. p. 68. Disponível em:

<https://ssagi.science/wp-content/uploads/2023/04/Libro-de-Resumenes-SSAGI-2022-VF.pdf>. Acesso em: 28 de junho de 2025.

DRHS. Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado do Rio Grande do Sul. 2022. Disponível em <https://www.sema.rs.gov.br/relatorio-rh>. Acesso em 01 de julho de 2025.

LOBATO, B (ed). **Recarga e sua importância para as águas subterrâneas e para a sustentabilidade da agricultura na região do Cerrado**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60455159/artigo---recarga-e-sua-importancia-para-as-aguas-subterraneas-e-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-na-regiao-do-cerrado>. Acesso em 04 de dezembro de 2025.

FEITOSA, Fernando A. C., et. al. (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM - LABHID, 2008.

FERREIRA, A. C.; DE Pádua, V. L. **Qualidade da água para consumo humano**. In: HELLER, Léo; DE Pádua, V. L. (Org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. v.1, 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010. p. 151 - 217.

FILHO, Roberto B. Os gregos e a água (breve apanhado). **Revista USP**, São Paulo, n. 70, p. 98–107, jun/ago. 2006.

FILHO, João M. **Ocorrência das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, Fernando A. C., et. al. (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM - LABHID, 2008. p. 53–75.

FREEZE, A.; CHERRY, J. **Evolução química das águas subterrâneas naturais**. In: FREEZE, A.; CHERRY, J. **Groundwater**. New Jersey: Englewood Cliffs, 1979. Versão digital. Disponível em: <https://fc79.gw-project.org/portugues/capitulo-7/>. Acesso em: 6 de dezembro de 2025.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual prático de análise de água**. 4. ed. Brasília: Funasa, 2013.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS**. 1. ed. Brasília: Funasa, 2014.

GASPAR, Luana Acário Braga; SANTOS, José Sérgio dos; PITOMBEIRA, Ernesto da Silva. **Modelagem de conectividade de fraturas em aquíferos fissurais**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. Campo Grande, 2009. p. 1-19. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/9215> Acesso em: 29 de junho de 2025.

GLEESON, Tom; CUTHBERT, Mark; FERGUSON, Grant; PERRONE, Debra. Global groundwater sustainability, resources and systems in the Anthropocene. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 48, p. 431–463, 2020.

GONÇALES, S. C. B.; MIRANDA, J. S. N. Caracterização da qualidade das águas

subterrâneas do aquífero Alter do Chão, estudos de caso das estações da rede de monitoramento de águas subterrâneas (RIMAS – CPRM) no município de Manaus-AM. *Águas Subterrâneas*, 2015. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28381>. Acesso em: 4 de dezembro 2025.

GRANZIERA, M. L. M.; GRANZIERA, B. M. Desafios na gestão das águas subterrâneas. *Águas Subterrâneas*, 2015. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28330>. Acesso em: 27 jun. 2025.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE, F.; PHILIPP, R. P. **Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano**. In: IANUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (org.). 50 anos de Geologia. Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade, CIGO e IG-UFRGS, 2007. v. 1, p. 97–123.

HELLER, Léo; Pádua, V. L. (Org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. v.1, 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (IGc/USP), 2019. DOI: 10.11606/9788563124074.

HOERLLE, G. S., et al. **Metasomatic reactions triggered by localized and dynamically evolving fluid flux record multistage intrusion history: An example from the syntectonic Caçapava do Sul Granitic Complex, Southern Brazil**. *Lithos*, v. 442–443, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107103>.

IAS. Instituto Água e Saneamento. **Municípios e Saneamento – Caçapava do Sul/RS**. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/rs/cacapava-do-sul>. Acesso em: 27 jun. 2025.

IBGE. Mapa hidrogeológico da região Sul. Disponível em https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_hidrogeologico_e_hidroquimico/mapas/regionais/sul_hidrogeologico.pdf Acesso em 01 de julho de 2025.

ILHA, L. M.; SILVA, F. O. e; SOARES, P. M.; YOUNG, J.; SERDOURA, F. M. As transformações históricas na relação entre as fontes de água e os sujeitos vinculados ao seu uso: um fenômeno social. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, v. 2, n. 6, p. 42–56, 2023.

IRITANI, Mara Akie; EZAKI, Sibebe. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 3. ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2012. 104 p. il. color. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br>. Acesso em: 29 de junho de 2025.

KOESTER, E., et.al. **A evolução crustal do Escudo Sul-Rio-Grandense sob a**

perspectiva dos sistemas isotópicos Sr-Nd. In: JELINEK, R. A.; SOMMER, C. A. **Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.**

Organização - Sociedade Brasileira de Geologia. 1. ed. Porto Alegre: Compasso Lugar Cultura, 2021. p. 13-27.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** 1. ed. rev. Campinas: Átomo, 2010.

LEITE, J. A. D., et.al. **SHRIMP U/Pb Zircon Geochronology of Neoproterozoic Juvenile and Crustal-Reworked Terranes in Southernmost Brazil.** *International Geology Review*, v. 40, n. 8, 1998. DOI:10.1080/00206819809465232.

LLAMAS, M.R.; Custodio, E. **Intensive use of groundwater: a new situation which demands proactive action.** 2002.

MACHADO, J. L. F.; DE FREITAS, M. A. Organização - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. **Mapa hidrogeológico do estado do rio grande do sul.** Escala 1:750.000. 2005.

MADRUGA, D. R., et.al. **Unraveling the polymetamorphism of calc-silicate rocks from 639 to 561 Ma in the Western Gondwana (Passo Feio Complex, Dom Feliciano Belt, South Brazil) based on U-Pb dating in titanite, apatite and zircon.** *Lithos*, v. 488-489, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107822>.

MARGAT, J.; VAN DER GUN, J. **Groundwater around the World: A Geographic Synopsis.** 2013.

MANZIONE, Rodrigo Lilla. **Águas subterrâneas: conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar.** Jundiaí: Paco Editorial, 2015. 388 p. ISBN 978-85-8148-786-1.

NARDI, Lauro Valentim Stoll; BITENCOURT, Maria de Fátima. **Geologia, petrologia e geoquímica do complexo granítico de Caçapava do Sul, RS.** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 19, n. 2, p. 153-169, junho 1989.

NEVES, Mirna Aparecida; OLIVEIRA, Matheus Serri Moulin de; BREDER, Flávia de Paula; CARNEIRO, Maria Tereza Weitzel Dias. Parâmetros de qualidade da água subterrânea em rochas cristalinas no sul do estado do Espírito Santo, sudeste do Brasil. *Derbyana*, São Paulo, v. 45, p. e812, 2024.

OYHANTÇABAL, Pedro; SIEGESMUND, Siegfried; WEMMER, Klaus; PASSCHIER, Cees W. The transpressional connection between Dom Feliciano and Kaoko Belts at 580–550 Ma. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, v. 100, n. 2, p. 379–390, 2011.

PAIM, Rosana Alves. **Avaliação da qualidade da água subterrânea de poços ponteira no município de Osório / RS.** 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JR, F. **Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: geological relationships and U-Pb geochronology**. Brazilian Journal of Geology, São Paulo, v. 46, p. 83–104, jun. 2016.

PHILIPP, Ruy Paulo; PIMENTEL, Márcio Martins; BASEI, Miguel Angelo Stipp. **The tectonic evolution of the São Gabriel Terrane, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil: the closure of the Charrúa Ocean. Geology of Southwest Gondwana**. Cham: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. p. 243–265.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha. Desenvolvimento das águas subterrâneas no Brasil. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 1998. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22322>. Acesso em: 28 jun. 2025.

REMUS, M. V. D., et. al. **The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasiliano Cycle in southern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 13. n. 3, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00017-1).

RIBEIRO, Luiz Gustavo Gonçalves; ROLIM, Neide Duarte. Planeta água de quem e para quem: uma análise da água doce como direito fundamental e sua valoração mercadológica. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 7, n. 1, p. 7–33, 2017.

RICE, E. W. et al. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.

RODRIGUES, L. N.; CAMBRAIA NETO, A. J. **Recarga e sua importância para as águas subterrâneas e para a sustentabilidade da agricultura na região do Cerrado**. Brasília: Embrapa Cerrados, 5 abr. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60455159/artigo---recarga-e-sua-importancia-para-as-aguas-subterraneas-e-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-na-regiao-do-cerrado> Acesso em: 27 jun. 2025

SAALMANN, K.; HARTMANN, L. A.; REMUS, M. V. D.; KOESTER, E.; CONCEIÇÃO, R. V. Sm–Nd isotope geochemistry of metamorphic volcano-sedimentary successions in the São Gabriel Block, southernmost Brazil: evidence for the existence of juvenile Neoproterozoic oceanic crust to the east of the Rio de la Plata craton. **Precambrian Research**, v. 136, p. 159–175, 2005.

SILVA, Carlos Henrique R. Tomé. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável no Brasil**. Brasília: Senado Federal, Consultoria Legislativa, Núcleo de Estudos e Pesquisas, 2012.

SARTORI, Pedro Luiz; KAWASHITA, Kato. **Petrologia e geocronologia do batólito granítico de Caçapava do Sul, RS**. Anais do II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Florianópolis, out. 1985.

TODD, D. K.; e MAYS, L. W. **Groundwater Hydrology**. 3rd ed. Hoboken, NJ: John

Wiley & Sons, 2005.

TONELLO, Kelly Cristina; DIAS, Herly Carlos Teixeira. Does exists some relationship between restoration and hydrology of forests ecosystems? **Agricultural Research & Technology**, v. 13, n. 4, 2018.

TUNDISI, J. G. **Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro**. Rio de Janeiro. Academia Brasileira de Ciências, 2014. ISBN: 978-85-85761-36-3

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2022: groundwater: making the invisible visible**. Paris: UNESCO, 2022. 225 p. ISBN 978-92-3-100507-7. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>. Acesso em: 27 jun. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Geneva: WHO, 2022. Disponível em: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/water-safety-and-quality/drinking-water-quality-guidelines>. Acesso em 05 de dezembro de 2025.