



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS
ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS**

JOANA D'ARC DA SILVA NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CAPTADAS
EM POÇOS TUBULARES NOS MUNICÍPIOS DO CARIRI OCIDENTAL PARAIBANO
E DO AGRESTE PERNAMBUCANO**

**SUMÉ – PB
2024**

JOANA D'ARC DA SILVA NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CAPTADAS
EM POÇOS TUBULARES NOS MUNICÍPIOS DO CARIRI OCIDENTAL PARAIBANO
E DO AGRESTE PERNAMBUCANO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

Orientadora: Professora Dra. Ilza Maria do Nascimento Brasileiro

**SUMÉ – PB
2024**



N244c Nascimento, Joana d'Arc da Silva.

Caracterização físico-química das águas subterrâneas captadas em poços tubulares nos municípios do Cariri Ocidental Paraibano e do Agreste Pernambucano. / Joana d'arc da Silva Nascimento. - 2024.

72 f.

Orientadora: Profa. Dra. Ilza Maria do Nascimento Brasileiro.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

1. Águas subterrâneas - caracterização. 2. Poços tubulares. 3. Caracterização físico-química - água. 4. Água de poços - caracterização. 5. Recursos hídricos. 6. Hidrologia. 7. Qualidade da água. 8. Salinidade da água. 9. Cariri Paraibano - poços tubulares. 10. Agreste de Pernambuco - poços tubulares. 11. Águas subterrâneas. 12. Sumé - PB - poços tubulares. 13. Brejo da Madre de Deus - PE - poços tubulares. I. Brasileiro, Ilza Maria do Nascimento. II. Título.

CDU: 556(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

JOANA D'ARC DA SILVA NASCIMENTO

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS CAPTADAS
EM POÇOS TUBULARES NOS MUNICÍPIOS DO CARIRI OCIDENTAL PARAIBANO
E DO AGRESTE PERNAMBUCANO.**

**Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos
do Centro de Desenvolvimento Sustentável
do Semiárido da Universidade Federal de
Campina Grande, como requisito para
obtenção do título de Bacharela em
Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.**

BANCA EXAMINADORA:

**Professora Dra. Ilza Maria do Nascimento Brasileiro.
Orientadora – UATEC/CDSA/UFCG**

**Professor Dr. Aldre Jorge Morais Barros.
Examinador I – UAEB/CDSA/UFCG**

**Professor Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes.
Examinador II – UAEB/CDSA/UFCG**

SUMÉ – PB

2024

Aos meus amados avós, Maria do Carmo e José Marinho (*in memoriam*), cuja dedicação e amor incondicional marcaram nossa infância. Embora ausentes fisicamente, sinto que, onde quer que estejam, continuam a nos proteger.

À minha mãe, Josenilda Santos, que, mesmo diante das inúmeras dificuldades, foi uma guia inabalável na minha formação. Seu exemplo de resiliência e seus ensinamentos sobre dignidade e integridade forjaram os valores que sustentam a essência do meu ser.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus por toda a sabedoria e fortalecimento que recebi ao longo da minha trajetória acadêmica e pessoal, reconheço as inúmeras bênçãos que me foram concedidas. Sempre senti em meu interior a certeza de que eu poderia enfrentar qualquer obstáculo, pois contava com a força divina.

À minha mãe, Josenilda Santos, mulher guerreira, dotada de uma força admirável. Sou profundamente grata por todo esforço e encorajamento constante ao longo de minha trajetória;

Ao meu pai, Antônio Gomes, por seu esforço incansável que possibilitou meu progresso até este ponto e por acreditar em minha capacidade;

Ao meu irmão Lázaro Santos, que, mesmo a vários quilômetros de distância, sempre esteve ao meu lado, me apoiando;

Às minhas irmãs Antônia Clara, Débora Carmem e Ohana Clarice, que são o combustível para o meu progresso. Em especial, à minha irmã Débora, nunca me esquecerei daquele dia, durante o período de ensino remoto devido à pandemia, em que ela ateou fogo em um pneu enquanto eu apresentava um seminário.

À minha tia Jaqueline Santos e meus tios Josemarivaldo Santos e Paulo Júnior, sou imensamente grata pelo carinho e pelo apoio que sempre demonstraram a cada uma das minhas conquistas;

Às minhas primas Lucinalva Souza, Jardi Alexia, Jamyli Santos e Nívia Souza e ao meu primo Rogério Gomes por toda torcida;

Como costume afirmar, minha família, embora não demonstre afeto da maneira convencional, expressa seu carinho por meio de pequenos gestos significativos.

Ao meu amigo Valdineli Oliveira, minha amiga Nerivalda Marinho e sua família, por todo o carinho e entusiasmo que sempre dedicaram a cada uma das minhas conquistas.

Às minhas sisters house Sumé, Raphaelle Nobre e Kiara Gomes, as quais tive o privilégio de compartilhar todos os momentos durante a graduação, vivendo juntas uma gama de emoções. Vocês me mostraram que são amigas tanto nos momentos de alegria quanto nas dificuldades, e o respeito mútuo foi a base de nossa convivência harmoniosa. Sou muito grata a Deus por ter colocado pessoas tão especiais em meu caminho. Quero também mencionar Jacilda, mãe da Kiara, que sempre demonstrou carinho e cuidado por nós, nossa reciprocidade é igualmente sincera.

Às minhas amigas de graduação, Damares Rodrigues, Joycy Samira, Larisse Fernandes, Valdisa Gabriela e meu amigo Vinicius Azrael, com quem compartilhei emoções pré e pós-prova, além dos conhecimentos e momentos de descontração.

Ao Prof. Dr. Bruno Nunes, meu primeiro orientador, pela oportunidade de trabalhar em seu projeto de pesquisa, ensinamentos enriquecedores, paciência e compreensão.

À minha orientadora, Profa. Dra. Ilza Brasileiro, pela sua constante disposição e valiosas contribuições para o desenvolvimento deste projeto, além da oportunidade de fazer parte do seu grupo de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Aldre Jorge, que foi meu orientador de estágio supervisionado, pelas valiosas oportunidades, ensinamentos prestados e pela disposição.

Ao Prof. Dr. Robson Fernandes, pelos ensinamentos prestados e pela oportunidade de ser monitora da disciplina de Administração e Empreendedorismo.

Às técnicas Agnis, Danielle e Morgana, por todo suporte durante a realização das análises no laboratório.

Aos meus professores da graduação, Alecksandra Vieira, Aldinete Barreto, Ana Mary, Ana Verônica, Fabiana Pimentel, Franklin Nóbrega, Glauciane Coelho, Janduy Guerra, Jean Queiroz, Mérgia Ribeiro e Morgana Canuto, pelas valiosas contribuições em minha formação.

Aos colaboradores que contribuem para o bom funcionamento do CDSA, em especial ao bibliotecário Johnny e aos porteiros Andersom e Novinha, pela constante atenciosidade e gentileza.

À minha amiga Dra. Virgínia Albuquerque, uma profissional e ser humano admirável, com quem tive o privilégio de trabalhar na Estação Experimental de Tratamento Biológico Sanitário (EXTRABES). Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Valderi Leite e o Prof. Dr. Wilton Lopes, pela oportunidade de estagiar na EXTRABES e pelos ensinamentos prestados.

Aos proprietários dos poços que gentilmente disponibilizaram a água para o desenvolvimento do presente trabalho.

Expresso minha sincera gratidão!

Tudo posso naquele que me fortalece

Filipenses 4:13

RESUMO

A água, recurso natural essencial à vida humana, é um direito fundamental. Além de sua função vital, desempenha um papel central tanto como recurso ambiental quanto como insumo indispensável para diversas atividades econômicas. Em áreas periféricas urbanas e em zonas rurais desprovidas de redes públicas de abastecimento, as águas subterrâneas constituem frequentemente a principal, ou até mesmo a única, fonte disponível de água. No semiárido cristalino do Nordeste brasileiro, apesar das baixas vazões e da elevada salinidade dos poços, essas águas continuam a ser de grande relevância. Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi caracterizar, com base em parâmetros físico-químicos, a qualidade da água dos poços tubulares localizados nas regiões do Cariri Ocidental paraibano e Agreste pernambucano. Com isso, foram selecionados quatro poços situados na zona rural de Brejo da Madre de Deus - PE, cinco poços do bairro Frei Damião em Sumé - PB, e o único poço que abastece a população do distrito de Sucuru - PB. As análises realizadas incluíram medições de pH, sólidos totais dissolvidos (STD), condutividade elétrica (CE), cloretos, sódio, potássio e dureza total, com o intuito de avaliar a variação espaço-temporal, verificar a potabilidade da água conforme as normativas estabelecidas pelas Portaria nº 2.914/2011 e nº 888/2021 do Ministério da Saúde e pela Resolução CONAMA nº 375/2005 e comparar a qualidade da água bruta com a água dessalinizada, disponibilizada à comunidade de Sucuru. Os resultados evidenciaram que os poços de Brejo da Madre de Deus - PE apresentaram valores de salinidade superiores aos demais pontos avaliados, incluindo os de Sumé e do distrito de Sucuru, caracterizando-se como uma água mais salobra. No entanto, foi identificado que um dos pontos de Sumé apresentou concentrações de CE, STD, cloretos e dureza total semelhantes aos poços de Brejo da madre de Deus. Em relação à conformidade com as normas de potabilidade, verificou-se que apenas um dos poços de Sumé apresentou tendência a se aproximar do valor máximo permitido, contudo, ainda assim, foi classificado como não conforme, devido às elevadas concentrações de STD e ao valor expressivo de CE. No que se refere à comparação entre a água bruta e a tratada por dessalinização por membranas, observou-se uma eficiência significativa, com uma redução de aproximadamente 90% dos minerais, resultando em uma água tratada que atende plenamente às exigências normativas do Ministério da Saúde e do CONAMA.

Palavras – chave: Qualidade da água; Normativas; Poços tubulares; Salinidade.

ABSTRACT

Water, an essential natural resource for human life, is a fundamental right. Beyond its vital role, it plays a central part as both an environmental resource and an indispensable input for various economic activities. In urban peripheral areas and rural zones lacking public water supply networks, groundwater often constitutes the main, or even the only, available water source. In the crystalline semi-arid region of Northeast Brazil, despite the low yields and high salinity of the wells, this water remains of great relevance. In this context, the aim of this study was to characterize the water quality of tubular wells located in the regions of Cariri Ocidental in Paraíba and Agreste in Pernambuco, based on physicochemical parameters. Four wells located in the rural zone of Brejo da Madre de Deus - PE, five wells in the Frei Damião neighborhood in Sumé - PB, and the only well that supplies the population of the Sucuru district - PB were selected. The analyses conducted included measurements of pH, total dissolved solids (TDS), electrical conductivity (EC), chlorides, sodium, potassium, and total hardness, with the purpose of evaluating the spatial-temporal variation, verifying the water's potability according to the standards established by Ministry of Health Ordinances No. 2,914/2011 and No. 888/2021, and by CONAMA Resolution No. 375/2005, and comparing the raw water quality with the desalinated water made available to the Sucuru community. The results showed that the wells in Brejo da Madre de Deus - PE had higher salinity levels compared to the other points evaluated, including those in Sumé and the Sucuru district, characterizing it as more brackish water. However, it was identified that one of the points in Sumé presented concentrations of EC, TDS, chlorides, and total hardness similar to the wells in Brejo da Madre de Deus. Regarding compliance with potability standards, it was found that only one well in Sumé showed a tendency to approach the maximum permissible value, but it was still classified as non-compliant due to the high concentrations of TDS and the significant EC value. Concerning the comparison between raw water and water treated by membrane desalination, a significant efficiency was observed, with approximately 90% of the minerals being reduced, resulting in treated water that fully complies with the normative requirements of the Ministry of Health and CONAMA.

Keywords: Water quality; Regulations; Tubular wells; Salinity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da dureza da água _____	30
Tabela 2 – Valor máximo permitido (VPM) para os parâmetros analisados neste estudo, conforme as normativas vigentes _____	31
Tabela 3 – Caracterização técnica dos pontos de coleta de água dos poços tubulares da zona rural de Brejo da Madre de Deus – PE, Sumé – PB e distrito Sucuru – PB _____	36
Tabela 4 – Frequência da coleta das amostras _____	40
Tabela 5 – Materiais necessários para o procedimento de caracterização físico-química _____	41
Tabela 6 – Diluições requeridas das amostras para a leitura do parâmetro sódio no fotômetro de chama _____	44
Tabela 7 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro pH _____	48
Tabela 8 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro CE _____	50
Tabela 9 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro de STD _____	53
Tabela 10 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro cloretos _____	55
Tabela 11 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro sódio _____	57
Tabela 12 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro potássio _____	59
Tabela 13 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro da dureza total _____	61
Tabela 14 – Resultado da qualidade da água dos poços localizados na zona rural de Brejo da Madre de Deus, Pernambuco, e no Distrito Sucuru, pertencente ao município de Serra Branca, Paraíba _____	62
Tabela 15 – Resultado da qualidade da água dos poços localizados no bairro Frei Damião, pertencente ao município de Sumé, Paraíba _____	64
Tabela 16 – Comparativo dos resultados obtidos nas amostras sem tratamento e com tratamento, como também, avaliação da conformidade da água tratada com a legislação _____	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Constituintes e processo do ciclo hidrológico _____	21
Figura 2 – Representação geográfica da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe _____	24
Figura 3 – Representação geográfica da bacia hidrográfica do Rio Paraíba _____	25
Figura 4 – Representação territorial do Estado de Pernambuco, evidenciando a localização geográfica do município de Brejo da Madre de Deus, localizado na região do Agreste pernambucano _____	33
Figura 5 – Representação territorial do Estado da Paraíba, evidenciando a localização geográfica do município de Sumé, localizado na região do Cariri Ocidental paraibano _____	34
Figura 6 – Representação territorial do Estado da Paraíba, evidenciando a localização geográfica do distrito de Sucuru pertencente ao município de Serra Branca, localizado na região do Cariri Ocidental paraibano _____	35
Figura 7 – Localização dos poços tubulares na zona rural de Brejo da Madre de Deus – PE _____	37
Figura 8 – Localização dos poços tubulares no bairro Frei Damião, Sumé _____	38
Figura 9 – Localização do poço tubular no distrito Sucuru, Serra Branca – PB _____	39

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** - Variação espaço – temporal do pH em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano _____ 47
- Gráfico 2** - Variação espaço – temporal da CE em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano _____ 49
- Gráfico 3** - Variação espaço – temporal dos STD em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano _____ 52
- Gráfico 4** - Variação espaço – temporal dos Cloretos em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano _____ 54
- Gráfico 5** - Variação espaço – temporal da concentração de sódio em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano _____ 56
- Gráfico 6** - Variação espaço – temporal da concentração de potássio em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano _____ 58
- Gráfico 7** - Variação espaço – temporal do nível de dureza em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano _____ 60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas

ANA – Agência Nacional das Águas

APAC – Agência Pernambucana de Água e Clima

CDSA – Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido

CE – Condutividade elétrica

CV – Coeficiente de variação

COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil

DesvPad – Desvio padrão

EDTA - Ácido Etilenodiamino Tetra-Acético

Prof.(m) – Profundidade em metros

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Km – Quilômetro

km² - Quilômetros quadrados

L – Litro (s)

LAFHID – Laboratório de Fenômenos de Transporte, Hidráulica, Hidrologia, Irrigação e Drenagem

LAQUA – Laboratório de Qualidade de Água

LASOL – Laboratório de Química e Fertilidade do Solo

mg L⁻¹ – Miligrama (s) por litro

µS cm⁻¹ – Microsiemens por centímetro

PB - Paraíba

PE – Pernambuco

pH – Potencial hidrogeniônico

SE – Sergipe

STD – Sólidos totais dissolvidos

VPM – Valor máximo permitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 REFERÊNCIAL TEÓRICO	20
3.1 HIDROLOGIA	20
3.1.1 Água	20
3.1.2 Ciclo Hidrológico	21
3.1.3 Sistemas de Bacias Hidrográficas	22
3.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO NORDESTE BRASILEIRO	25
3.3 PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA	26
3.3.1 Parâmetros Físicos	26
3.3.1.1 Condutividade elétrica	26
3.3.1.2 Sólidos totais dissolvidos	27
3.3.2 Parâmetros Químicos	27
3.3.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH)	27
3.3.2.2 Íon cloreto (Cl ⁻)	27
3.3.2.3 Íon sódio (Na ⁺)	28
3.3.2.4 Íon potássio (K ⁺)	29
3.3.2.5 Dureza total	29
3.4 DIRETRIZES PARA ÁGUA POTÁVEL	30
4 METODOLOGIA	32
4.1 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS	32
4.1.1 Brejo Da Madre De Deus – PE	32
4.1.2 Sumé – PB	33
4.1.3 Serra Branca – PB	34
4.2 PONTOS DE COLETA	35
4.2.1 Sítio Cacimba de Pedro de Cima	37
4.2.2 Bairro Frei Damião	38
4.2.1 Distrito de Sucuru	39
4.3 COLETA E ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS	40

4.4 DETERMINAÇÃO FÍSICO – QUÍMICAS DAS ÁGUAS DE POÇOS TUBULARES	41
4.4.1 pH, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos	42
4.4.2 Dureza total	42
4.4.3 Íons cloretos	43
4.4.4 Íons sódio e potássio	43
4.4.5 Avaliação dos dados	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 VARIAÇÃO ESPAÇO – TEMPORAL DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	46
5.1.1 pH	46
5.1.2 Condutividade elétrica	48
5.1.3 Sólidos totais dissolvidos	50
5.1.4 Íons Cloretos	53
5.1.5 Íon sódio	55
5.1.6 Íon potássio	57
5.1.7 Dureza Total	59
5.2 ANÁLISE DA CONFORMIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COM AS NORMAS VIGENTES PARA POTABILIDADE	61
5.3 IMPACTO DO TRATAMENTO NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	65
6 CONCLUSÃO	67
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

A água, enquanto recurso natural multifacetado e essencial para a existência humana, configura-se como um direito fundamental. Além de sua relevância como elemento vital, desempenha um papel central como recurso ambiental e insumo indispensável para processos produtivos que sustentam a economia (ANA b, 2022). Entretanto, apesar de aproximadamente dois terços da superfície terrestre estarem cobertos por água, apenas uma fração limitada dessa água é doce. Dentre os recursos hídricos acessíveis para consumo humano, cerca de 96% provêm de depósitos subterrâneos (Ministério do Meio Ambiente, 2007).

No Brasil, a água subterrânea é o recurso mais intensivamente extraído do subsolo, com estimativas indicando que 52% dos municípios são integralmente ou parcialmente abastecidos por esse recurso. A extração ocorre por meio de poços tubulares/artesianos e nascentes, sendo que os poços tubulares são responsáveis pela maior parte do volume de água subterrânea extraído. Em regiões periféricas urbanas e zonas rurais desprovidas de redes públicas de abastecimento e/ou afetadas por secas severas, as águas subterrâneas frequentemente constituem a principal, e muitas vezes única, fonte de água disponível para as comunidades (Hirata *et al.*, 2019).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017), entre os anos de 2013 e 2017, 2.706 municípios brasileiros foram afetados por episódios de seca, distribuídos por todas as regiões do país. O Nordeste, reconhecido por sua vulnerabilidade, apresentou a maior proporção de municípios impactados. Para mitigar os danos ocasionados pela seca, as principais medidas adotadas incluíram a construção de poços e a distribuição de água por carros-pipa nas localidades afetadas.

No semiárido cristalino do Nordeste brasileiro, a baixa produtividade dos poços tubulares, caracterizada por reduzidas vazões e alta salinidade (Farias *et al.*, 2017), reflete as condições regionais de chuvas irregulares, concentradas no primeiro semestre, altas temperaturas e baixa umidade. Essas características, aliadas à geologia local, promovem a salinização das águas subterrâneas devido à dissolução mineral, à circulação limitada e à natureza das rochas predominantes (Lima *et al.*, 2020). Contudo, apesar dessas adversidades, as águas subterrâneas continuam a desempenhar um papel importante na segurança hídrica de grande parte da população.

Nesse contexto, na zona rural do município de Brejo da Madre de Deus, inserido no Agreste pernambucano, a escassez hídrica, agravada pela interrupção do abastecimento regular, submeteu

os moradores a dependerem de caminhões-pipa para ter acesso a água tratada fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). Diante desse cenário, habitantes do sítio Cacimba de Pedro de Cima optaram por perfurar poços tubulares como alternativa para suprir a demanda por água. Atualmente, a principal fonte hídrica da comunidade provém das águas subterrâneas captadas através de poços artesianos.

No entanto, a região está inserida em um embasamento cristalino, caracterizado por aquíferos fissurais, formados nas fissuras de rochas duras e fraturadas, o que acarreta baixa porosidade e permeabilidade. Esse embasamento, que abrange cerca de 85% do território pernambucano, é frequentemente associado à salinização das águas subterrâneas, comprometendo a qualidade hídrica disponível (Chaves *et al.*, 2022).

De modo semelhante, o território de Sumé – PB é predominantemente composto por rochas do embasamento cristalino (CPRM, 2000). Durante a severa seca ocorrida entre 2013 e 2017, alguns moradores do bairro Frei Damião recorreram aos poços tubulares como alternativa para suprir suas necessidades hídricas, e desde então, utilizam-na como principal fonte de abastecimento. Segundo o IBGE (2017), o Estado da Paraíba, entre 2013 e 2017, registrou uma das maiores proporções de impacto pela seca, atingindo 91,9% dos municípios do território paraibano.

Na mesma região, no Cariri Ocidental paraibano, a comunidade do distrito Sucuru é abastecida exclusivamente por água subterrânea, captada por poços tubulares, sendo esta a única fonte disponível até o momento.

Neste ensejo, observa-se que os recursos hídricos subterrâneos desempenham um papel crucial na segurança hídrica, apresentando-se como uma alternativa viável diante de falhas no abastecimento público, especialmente em períodos de estiagem. Além disso, por serem uma fonte autônoma de água, os poços subterrâneos oferecem uma solução de baixo custo a longo prazo, quando comparados aos valores cobrados pelos prestadores de serviços públicos. No entanto, a ausência frequente de monitoramento da qualidade dessas águas ressalta a relevância do presente estudo.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo caracterizar as fontes alternativas de abastecimento hídrico das comunidades de Cacimba de Pedro de Cima, em Brejo da Madre de Deus - PE, Frei Damião, em Sumé - PB, e o distrito de Sucuru, em Serra Branca - PB. A análise foca na qualidade das águas subterrâneas extraídas de poços tubulares, considerando sua importância para o suprimento hídrico dessas regiões, especialmente em cenários de escassez.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar, por meio de análises físico – químicas, as águas de poços tubulares do bairro Frei Damião, inserido no município de Sumé - PB, do distrito Sucuru, pertencente à cidade de Serra Branca - PB, ambos localizados no Cariri Ocidental paraibano, e da zona rural do município de Brejo da Madre de Deus - PE, situado no Agreste pernambucano.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Delimitar geograficamente as áreas de estudo;
- Avaliar os parâmetros físico – químicos, como: pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, cloretos, sódio, potássio e dureza total;
- Avaliar a variação espaço-temporal nos parâmetros físico-químicos das regiões específicas estudadas;
- Identificar disparidades potenciais nas características das águas de poços entre as diferentes localidades avaliadas;
- Analisar os resultados com as normativas vigentes estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e pelo Ministério da Saúde;
- Comparar a qualidade da água bruta e da água tratada disponibilizada à comunidade do distrito Sucuru.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 HIDROLOGIA

A hidrologia é o campo da ciência que explora as águas no sistema terrestre, abordando sua incidência, fluxo e distribuição, bem como suas características físicas e químicas. Além disso, investiga suas interações com o ambiente e sua associação com a vida, analisando sua presença na superfície terrestre, no solo e no subsolo (Villela; Mattos, 1975). A hidrologia é fundamentada em princípios de hidráulica, física e estatística, e se destaca por seu foco no ciclo hidrológico e em interações com os continentes. De maneira geral, este campo científico investiga os fenômenos que ocorrem quando a precipitação pluvial interage com a superfície terrestre. Em contraste, a hidrologia, enquanto ramo da engenharia, concentra-se na resolução de questões pertinentes à gestão e à conservação dos recursos hídricos (Cordeiro, 2013).

3.1.1 Água

A água é o componente mais abundante na superfície do planeta Terra, cobrindo aproximadamente 70% do globo terrestre. Este elemento é singular, pois pode existir nos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso (ANA c, 2022). Sua estrutura molecular (H_2O) confere à água notáveis propriedades, incluindo uma elevada inércia térmica (Collischonn; Tassi, 2008). A água é um recurso essencial para a sobrevivência dos organismos vivos e para a manutenção dos ecossistemas terrestres. O uso humano da água abrange diversas atividades, incluindo abastecimento de água potável, irrigação agrícola, dessedentação animal, geração de energia elétrica, navegação, diluição de efluentes, pesca, recreação e paisagismo (Cordeiro, 2013).

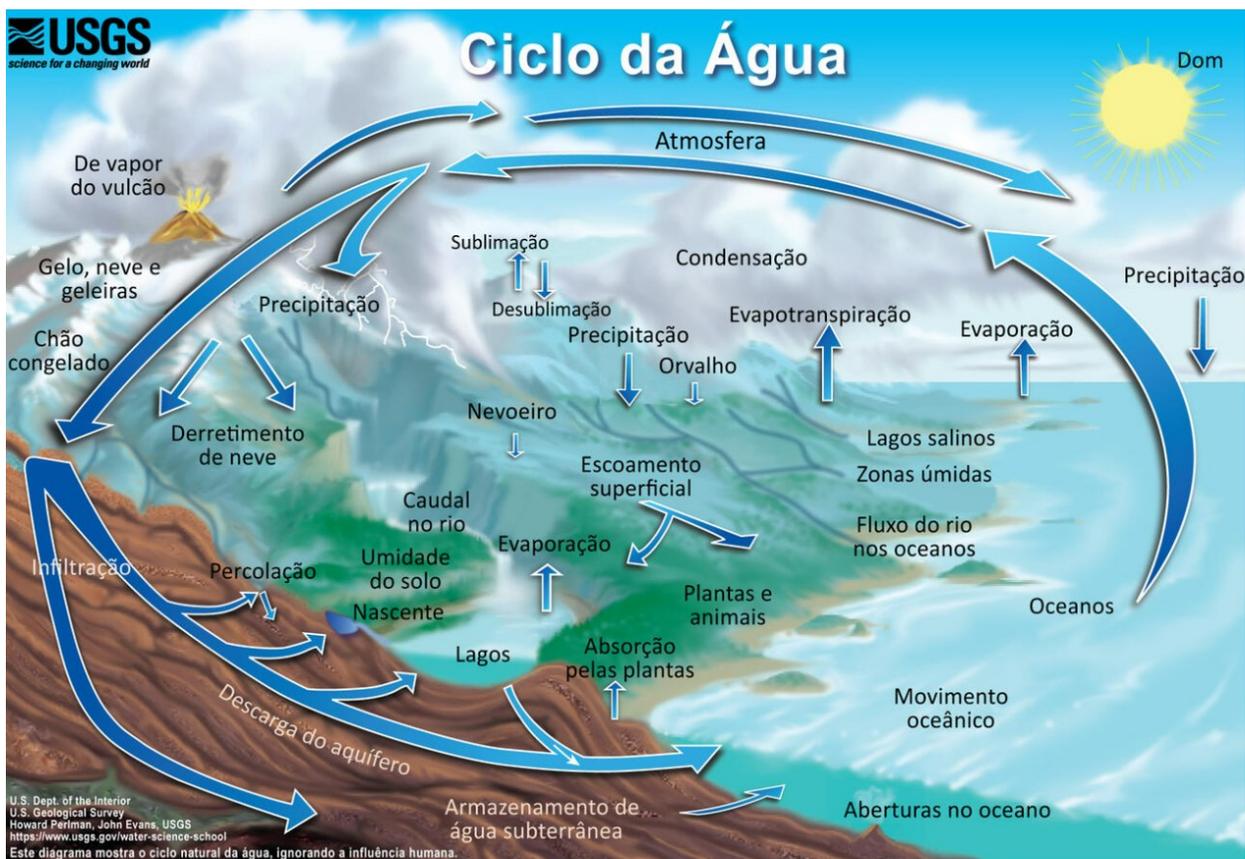
Segundo Cordeiro (2013), e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA a, 2022), os usos da água podem ser classificados em duas categorias: consuntivos e não consuntivos. Os usos consuntivos resultam na diminuição da quantidade de água disponível para outros usuários; um exemplo disso é a irrigação, na qual a maior parte da água se perde por meio da evapotranspiração. Em contraste, os usos não consuntivos têm um impacto limitado sobre a quantidade total de água, mas podem afetar sua qualidade, como ocorre na geração de energia hidrelétrica e na navegação, que não alteram significativamente o volume de água dos corpos hídricos. Além disso, os usos da água podem ser diferenciados pela necessidade de retirada de recursos hídricos de rios ou lagos. Atividades como navegação, geração de energia e recreação não

exigem a extração de água, enquanto o abastecimento humano, a irrigação e a dessedentação de animais requerem essa retirada, mesmo que parte da água utilizada retorne ao sistema hídrico.

3.1.2 Ciclo Hidrológico

A água presente na Terra desde sua origem permanece constante, sendo continuamente reciclada por meio do ciclo hidrológico, o qual é impulsionado pela energia solar (ANA c, 2022). O ciclo hidrológico (Figura 1) é a concepção principal da hidrologia, refere-se ao comportamento natural da água em suas diferentes formas de ocorrência, transformação e interação com o ambiente, incluindo suas relações com a vida humana. Esse processo é amplamente descrito pelo conceito de ciclo hidrológico, que abrange as etapas de infiltração, percolação, armazenamento e escoamento, essenciais para o funcionamento dos sistemas hídricos subterrâneos e superficiais (Villela; Mattos, 1975).

Figura 1 - Constituintes e processo do ciclo hidrológico



Fonte: Water Science School (2017).

O ciclo hidrológico, embora não tenha um ponto de início claramente definido, pode ser descrito a partir da evaporação da água dos oceanos, impulsionada pela energia solar. Essa energia aquece o ar, o solo e as superfícies aquáticas, promovendo a evaporação da água. O aquecimento também afeta o movimento das massas de ar, que transportam o vapor d'água pela atmosfera. Sob certas condições atmosféricas, o vapor se condensa, formando nuvens que podem resultar em precipitação. Quando a precipitação atinge a superfície terrestre, a água é distribuída de diversas maneiras: uma parte é temporariamente retida no solo e retorna à atmosfera por evapotranspiração, outra parte esco superficialmente, alimentando rios, e uma fração infiltra-se no solo, abastecendo aquíferos subterrâneos. Dessa forma, o ciclo da água se mantém em constante movimento e renovação (Villela; Mattos, 1975; Collischonn; Tassi, 2008; Cordeiro, 2013; ANA c,2022).

Os seres humanos influenciam diretamente o ciclo hidrológico, aumentando ou diminuindo os fluxos naturais, não apenas em nível local, mas também global. A água é controlada por uma complexa rede de infraestruturas, práticas sociais e políticas, formando o conceito de ciclo hidrossocial. Nesse contexto, a disponibilidade hídrica é tanto um dado natural quanto social, devendo-se analisar quem tem acesso ao recurso, como ele é utilizado e como isso afeta o poder e a sociedade. As mudanças climáticas e as ações humanas alteram os padrões naturais de circulação da água, impactando sua distribuição e disponibilidade. Com isso, áreas anteriormente abastecidas podem enfrentar secas ou inundações (ANA c, 2022).

3.1.3 Sistemas de Bacias Hidrográficas

O ciclo hidrológico é frequentemente abordado com foco em sua fase terrestre, tendo a bacia hidrográfica como unidade central de análise. Esta bacia representa uma unidade natural de captação dos fluxos hídricos gerados pela precipitação, que convergem para um ponto de saída comum, denominado exutório. As bacias podem ser divididas em sub-bacias, com funcionamento semelhante, mas diferenciadas pela hierarquização, a bacia compreende a drenagem do rio principal, enquanto a sub-bacia drena afluentes (Collischonn; Tassi, 2008; Lima, 2018)

Conceitualmente, a bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema físico que recebe água por meio da precipitação e gera saídas através do escoamento superficial e da evapotranspiração, convertendo eventos pluviométricos em fluxos distribuídos ao longo do tempo.

As características geomorfológicas, particularmente influenciadas pelo relevo, incluem a área, o comprimento do canal principal de drenagem e a declividade do terreno (Collischonn; Tassi, 2008).

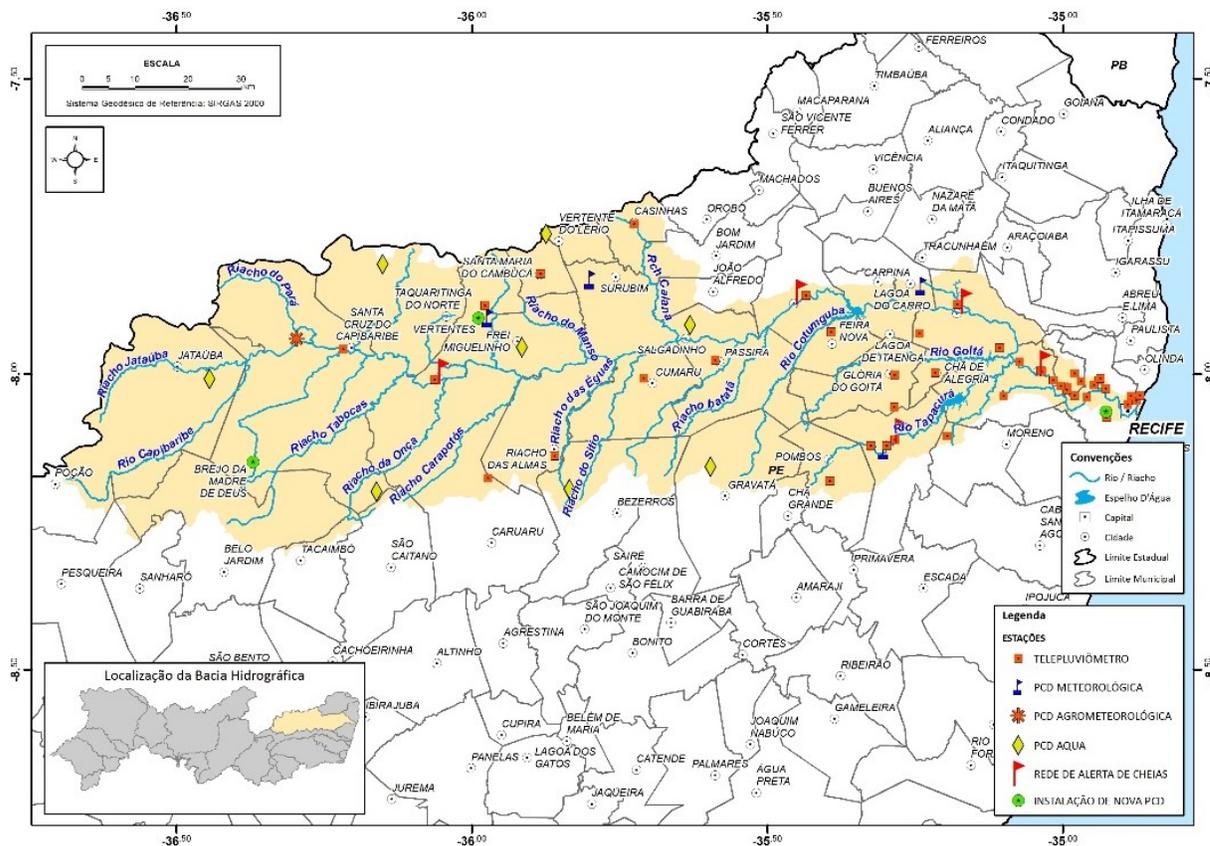
O Brasil, com cerca de 13% da água doce mundial, possui grandes reservas em aquíferos subterrâneos e uma vasta rede hidrográfica. O país é naturalmente subdividido em bacias hidrográficas que fornecem água para consumo humano, agricultura e atividades industriais (IBGE, 2021). Contudo, o comprometimento da qualidade da água, juntamente com a incidência de chuvas abaixo da média, e conseqüentemente a escassez hídrica, afeta significativamente a oferta de água nas bacias hidrográficas.

A divisão hidrográfica nacional, estabelecida pela Resolução nº 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) de 2003, define doze áreas hidrogeológicas no Brasil, visando orientar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Nessas áreas, os sistemas aquíferos compartilham características semelhantes em termos de armazenamento, circulação e qualidade das águas subterrâneas (Brasil, 2003).

No Nordeste, particularmente na região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, o potencial hidrogeológico é reduzido devido ao clima semiárido e à presença de rochas cristalinas, que contribuem para altas taxas de salinização. Esta região abrange estados como Pernambuco e Paraíba, ambos inseridos no Semiárido Brasileiro (Lima, 2018).

O município de Brejo da Madre de Deus, objeto deste estudo, está integralmente inserido na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, localizado no estado de Pernambuco. O Rio Capibaribe é um curso d'água litorâneo que deságua no Oceano Atlântico. Segundo a Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC, 2024), o Rio Capibaribe está situado entre as coordenadas 07°41'20" de longitude e 08°19'30" de latitude, ocupando uma área de 7.454,88 km² no território pernambucano. O rio percorre 240 km desde sua nascente, entre os municípios de Poção e Jataúba, passando por cidades importantes incluindo a capital, Recife, onde deságua no Oceano Atlântico, conforme ilustrado na Figura 2. O Rio Capibaribe abrange 42 municípios e apresenta regime intermitente nos trechos superior e médio, tornando-se perene a partir do município de Limoeiro. Seus principais tributários incluem os rios Tapacurá e Goitá.

Figura 3 - Representação geográfica da bacia hidrográfica do Rio Capibaribe



Fonte: APAC (2024).

O Estado da Paraíba encontra-se subdividido em onze bacias hidrográficas (AESA, 2024), entre os quais se destaca a bacia hidrográfica do Rio Paraíba. Os municípios de Sumé e Serra Branca, localizados na bacia hidrográfica do Rio Paraíba (Figura 3), que é segmentada em uma sub-bacia o Rio Taperoá e três regiões o Alto Paraíba, Médio Paraíba e Baixo Paraíba, também constituem o foco deste estudo. De acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA, 2024), o Rio Paraíba situa-se entre as coordenadas $06^{\circ}51'31''$ e $08^{\circ}26'21''$ de latitude sul, e $34^{\circ}48'35''$ e $37^{\circ}2'15''$ de longitude oeste, ocupando uma área de 20.127,17 km², o que corresponde a 38% do território estadual. É a segunda maior bacia do Estado e abriga 53% da população, sendo considerada uma das mais importantes do semiárido nordestino. A bacia inclui os municípios de João Pessoa, capital do Estado, e Campina Grande, seu segundo maior centro urbano, o que contribui para sua elevada densidade demográfica.

A salinização das águas subterrâneas é condicionada por múltiplos fatores, incluindo a resistência mineral das formações geológicas, o pH das águas, processos de lixiviação e a salinização dos solos circundantes. A infiltração de águas superficiais já salinizadas intensifica esse fenômeno, exacerbando o acúmulo de sais nos aquíferos (Costa, 1995). No semiárido, região marcada pela irregularidade pluviométrica e pela escassez hídrica crônica, mesmo as águas subterrâneas de elevada salinidade, captadas por poços tubulares, representam uma fonte essencial de abastecimento (Lopes *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, a dessalinização por osmose reversa tem emergido como uma solução promissora, pois além de remover os sais dissolvidos, contribui para a eliminação de micro-organismos, tornando a água potável (Lopes *et al.*, 2020).

3.3 PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA

A qualidade da água é caracterizada por parâmetros físicos, químicos e biológicos que refletem suas principais propriedades. Esses parâmetros estão intrinsecamente relacionados a diversos processos que ocorrem no corpo hídrico e na bacia de drenagem, influenciando diretamente suas características (Von Sperling, 1996). Nesse contexto, verifica-se, portanto, que a água, composta pelos elementos hidrogênio e oxigênio na proporção de dois para um, possui a capacidade de dissolver uma ampla gama de substâncias, o que contribui para suas características peculiares (Brasil, 2014).

Nesse ensejo, a análise dos elementos e espécies iônicas presentes na água, por meio de sua identificação e quantificação, permite correlacionar suas propriedades com questões ambientais. Esse estudo viabiliza a obtenção de respostas quanto às substâncias presentes e suas concentrações, identificando potenciais riscos aos ecossistemas e à saúde humana (Parron; Muniz; Pereira, 2011).

Entre os parâmetros físico-químicos presentes na água, os próximos tópicos detalharão os abordados neste estudo.

3.3.1 Parâmetros Físicos

3.3.1.1 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE) representa o potencial da água de carrear corrente elétrica, a qual está vinculada diretamente à concentração de espécies iônicas presentes na solução (Silva;

Oliveira, 2002). Esses íons, resultantes da dissociação de compostos químicos em meio aquoso, apresentam cargas elétricas positivas ou negativas que facilitam a condução elétrica. Assim, a CE serve como um indicador indireto da presença de sólidos dissolvidos, como cloretos, nitratos, sulfatos, fosfatos, sódio, magnésio, cálcio e ferro. Além disso, altos valores de CE pode ser um indicador da poluição da água (Fay *et al.*, 2008).

3.3.1.2 Sólidos totais dissolvidos

Os sólidos totais dissolvidos (STD) e a condutividade elétrica apresentam uma relação direta. Os sólidos totais dissolvidos são às substâncias que atravessam um filtro e permanecem dissolvidas na solução aquosa (Bonifácio; Nóbrega, 2021). Esses sólidos são compostos predominante de sais inorgânicos, gases dissolvidos e quantidades remanentes de resíduos orgânicos (Fay; Silva; Brito *et al.*, 2008; Silva; Oliveira, 2002). Os sólidos totais dissolvidos refletem a influência de descargas de efluentes domésticos, além de impactarem as propriedades organolépticas da água (Brasil, 2014).

3.3.2 Parâmetros Químicos

3.3.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH é uma medida que quantifica a acidez, neutralidade ou basicidade de um meio, expressando a concentração de íons hidrogênio H^+ em uma solução (Bonifácio; Nóbrega, 2021). Sua determinação é essencial na química da água, especialmente no abastecimento hídrico, pois influencia processos como coagulação química, controle de corrosão, abrandamento e desinfecção. Além disso, o pH é um parâmetro crítico para caracterizar espécies químicas em amostras de água potável e efluentes (Silva; Oliveira, 2002). Mudanças no pH podem ser causadas por fatores naturais, como a dissolução de rochas e fotossíntese, ou resultantes de atividades humanas, como despejos de efluentes. Em águas de abastecimento, um pH baixo pode aumentar a corrosividade, enquanto um pH elevado pode favorecer incrustações (Brasil, 2014).

3.3.2.2 Íon cloreto (Cl^-)

O íon cloreto (Cl^-) é um dos principais constituintes inorgânicos presentes em águas naturais e, em particular, em efluentes (Silva; Oliveira, 2002). Sua origem geralmente está

associada à dissolução de minerais ou à intrusão de água marinha, podendo também ser decorrente de descargas de esgotos domésticos ou industriais. Em concentrações elevadas, o cloreto pode conferir à água um sabor salino e, em alguns casos, induzir efeitos laxativos (Brasil, 2014). A percepção do sabor salgado

na água potável resultante da presença de cloretos varia em função de sua composição química. Em águas constituídas de 250 mg L^{-1} de cloreto Cl^- , o sabor salgado pode ser notado quando o cátion predominante é o sódio. Por outro lado, em águas com concentrações de até 1000 mg L^{-1} de Cl^- , o sabor salgado pode não ser percebido, caso os cátions predominantes sejam cálcio ou magnésio. Ademais, elevadas concentrações de íons cloreto podem causar danos a tubulações e estruturas metálicas, além de comprometer o desenvolvimento vegetal (Silva; Oliveira, 2002).

3.3.2.3 Íon sódio (Na^+)

O íon sódio (Na^+) é normalmente detectado em águas naturais devido à sua grande quantidade e a elevada solubilidade de seus sais, os quais se encontram predominantemente na forma iônica (Na^+). A concentração desse íon em corpos d'água varia amplamente, sendo influenciada por fatores geológicos locais e pela introdução de efluentes (Parron; Muniz; Pereira, 2011). Conforme o Instituto Adolfo Lutz (2008), as concentrações de íons de sódio em águas naturais podem oscilar de menos de 1 mg L^{-1} a mais de 500 mg L^{-1} . Parron, Muniz e Pereira (2011), afirmam que o sódio é comumente encontrado em baixas concentrações em águas superficiais, incluindo aquelas que recebem descargas de efluentes, apresentando níveis inferiores a 50 mg L^{-1} . Todavia, em águas subterrâneas, a concentração desse íon frequentemente ultrapassa esse valor.

O sódio em altas concentrações na água podem ser prejudicial devido a seu papel no agravamento de várias condições de saúde. O excesso de sódio contribui para a retenção de líquidos no corpo, o que pode levar à hipertensão arterial, uma condição perigosa que aumenta o risco de doenças cardiovasculares, como acidentes vasculares cerebrais e dissecação da aorta. Além disso, o consumo elevado de sódio sobrecarrega os rins, comprometendo sua capacidade de filtração e potencialmente levando ao desenvolvimento de problemas renais e à elevação da pressão arterial. Por essas razões, é recomendável optar por águas com baixo teor de sódio (Ceron, 2014).

3.3.2.4 Íon potássio (K^+)

O íon potássio (K^+) é originado da dissolução de minerais e da decomposição de material vegetal, sendo encontrado em baixas concentrações em águas subterrâneas. Ao contrário de outros íons, como o sódio, o potássio é rapidamente assimilado pelas plantas e facilmente incorporado em argilas (Parron; Muniz; Pereira, 2011). De acordo com o Instituto Adolfo Lutz (2008), os íons de K^+ podem ser encontrados de forma natural nas águas, com concentrações que, em geral, raramente ultrapassam 20 mg L^{-1} .

O potássio é um mineral essencial no organismo humano, atuando na regulação dos batimentos cardíacos, no controle dos impulsos nervosos e na facilitação das contrações musculares. Sua deficiência (hipocalcemia) pode resultar em sintomas como fadiga, hipoglicemia e insônia, enquanto a hipercalemia, ou excesso de potássio, pode desencadear câibras, fadiga, paralisia muscular e diarreia (Stivanin, 2014).

3.3.2.5 Dureza total

Águas duras são definidas como aquelas que requerem quantidades significativas de sabões e xampus para a formação de espuma. Historicamente, a dureza da água era utilizada como um parâmetro para avaliar sua capacidade de precipitar sabão. Nesse contexto, a dureza é consequência da existência de cátions metálicos bivalentes, que reagem com sabões formando precipitados, além de interagirem com determinados ânions presentes na água, levando à geração de incrustações, a chamada dureza temporária. Os íons predominantes que contribuem para a dureza da água são o cálcio e o magnésio, enquanto o zinco e o estrôncio têm um papel secundário nesse processo (Silva; Oliveira, 2002). A dureza hídrica pode ter origem em processos naturais, como a dissociação de rochas calcárias ricas em cálcio e magnésio, ou de fontes antropogênicas, causada pela liberação de efluentes industriais (Brasil, 2014). Na Tabela 1, é apresentada a classificação da dureza total da água, conforme os critérios aplicados ao tratamento e abastecimento de água.

Tabela 1 – Classificação da dureza da água

Concentração	Grau de dureza
< 50 mg L ⁻¹ CaCO ₃	Mole ou branda
50 e 150 mg L ⁻¹ CaCO ₃	Dureza moderada
150 e 300 mg L ⁻¹ CaCO ₃	Dura
> 300 mg L ⁻¹ CaCO ₃	Muito dura

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996) e Brasil (2014).

3.4 DIRETRIZES PARA ÁGUA POTÁVEL

A água potável é essencial para a saúde pública, e em países emergentes, a falta de saneamento adequado contribui para a disseminação de doenças que estão associadas ao consumo de água, como febre tifoide, hepatite A e parasitoses. No Brasil, a legislação sobre potabilidade da água evoluiu desde 1977 com a criação de normas que estabelecem limites físicos, químicos e biológicos para a água destinada ao consumo humano (Campos *et al.*, 2019). Atualmente, a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011), a Resolução CONAMA nº 375/2005 (Brasil, 2005) e a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021) estabelecem os critérios para o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano.

Embora as águas subterrâneas sejam, em geral, menos contaminadas por estarem protegidas de agentes poluentes, elas podem ser comprometidas por fatores geológicos e atividades humanas, como o uso de fertilizantes e despejo de esgotos. Portanto, a potabilidade dessas águas requer análises microbiológicas e físico-químicas para garantir sua segurança (Campos *et al.*, 2019).

A Tabela 2, apresentada a seguir, especifica os limites máximos permitidos para os parâmetros físico-químicos analisados no presente estudo.

Tabela 2 – Valor máximo permitido (VPM) para os parâmetros analisados neste estudo, conforme as normativas vigentes

Parâmetros	Unidade	VPM
pH		6 – 9,5
Condutividade elétrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$	-
Sólidos totais dissolvidos	mg L^{-1}	500
Cloretos	mg L^{-1}	250
Sódio	mg L^{-1}	200
Potássio	mg L^{-1}	-
Dureza total	mg L^{-1}	300

Fonte: Adaptado da Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011), Resolução CONAMA nº 375/2005 (Brasil, 2005) e Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021).

4 METODOLOGIA

4.1 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS

Para o desenvolvimento deste estudo, foram selecionadas três regiões específicas, o bairro Frei Damião, inserido no município de Sumé, o distrito Sucuru, pertencente à cidade de Serra Branca, ambos localizados no Cariri Ocidental paraibano, e a zona rural do município de Brejo da Madre de Deus, situado no Agreste pernambucano.

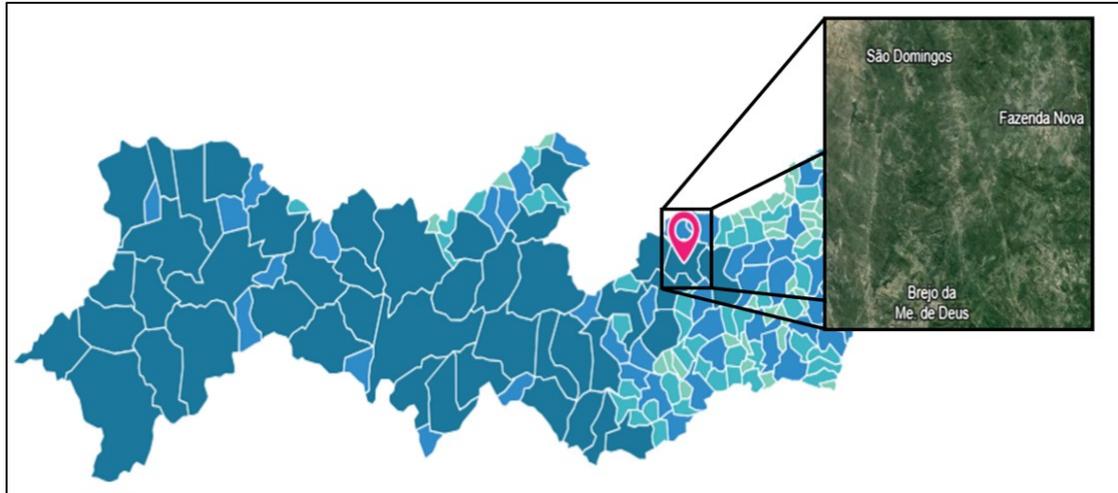
4.1.1 Brejo Da Madre De Deus – PE

O sítio Cacimba de Pedro de Cima, objeto de estudo, está localizado no município de Brejo da Madre de Deus (Figura 4), inserido na mesorregião do Agreste e na microrregião do Vale Ipojuca, Estado de Pernambuco, Brasil. O município limita-se ao norte com os municípios de Santa Cruz do Capibaribe e Taquaritinga do Norte, ao sul com Belo Jardim, Tacaimbó e São Caetano, a leste com Caruaru e Toritama, e a oeste com Jataúba. A sede municipal encontra-se geograficamente situada nas coordenadas de 08°08'45" de latitude sul e 36°22'16" de longitude oeste, a uma distância de 202,2 km da capital, Recife. O acesso a cidade é realizado pelas rodovias BR – 232/104 e PE – 145 (Jatobá; Silva; Silva, 2019). Conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o Brejo da Madre de Deus possui uma população de 48.648 habitantes e uma área territorial de 762,35 km².

De acordo com o levantamento da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2005), o Brejo da Madre de Deus está situado na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. Compreendendo como os principais reservatórios de água da região os açudes Machado, com capacidade de 1.228.340 m³, e Oitis, com capacidade de 3.020.159 m³. Além disso, os cursos d'água do município têm um fluxo intermitente, ocorrendo apenas em certos períodos, e a rede de drenagem na região apresenta um padrão ramificado, dendrítico. Além de que, a região apresenta um aspecto hidrogeológico fissural, caracterizado pela presença de rochas do embasamento cristalino, incluindo tanto rochas metamórficas quanto rochas ígneas.

Ademais, o clima de Brejo da Madre de Deus caracteriza-se como semiárido, apresentando uma temperatura média anual de 22,3 °C. As precipitações pluviométricas totalizam 928,1 mm, com os meses de maior pluviosidade ocorrendo geralmente entre abril e julho.

Figura 4 – Representação territorial do Estado de Pernambuco, evidenciando a localização geográfica do Município de Brejo da Madre de Deus, localizado na região do Agreste pernambucano



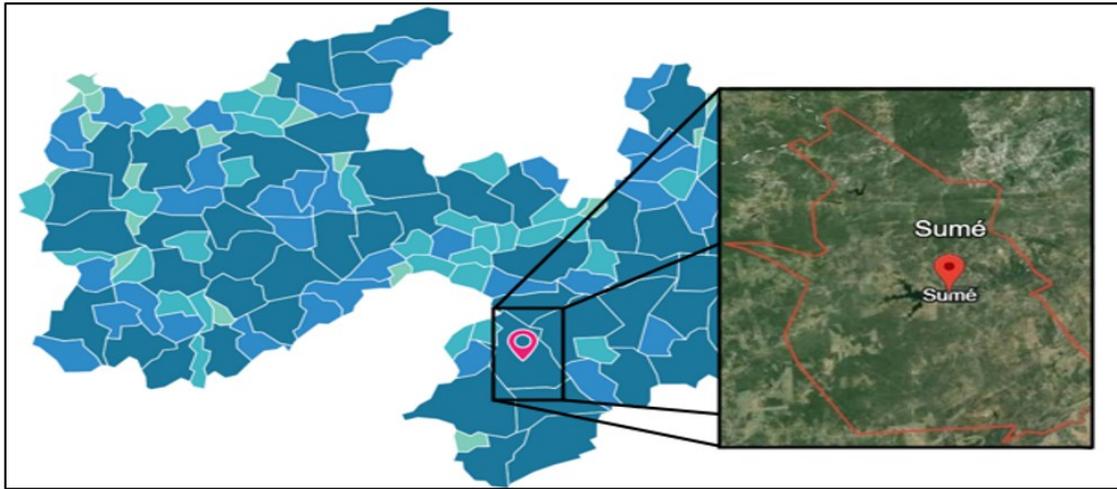
Fonte: Adaptado do Google Earth (2023) e IBGE (2022).

4.1.2 Sumé – PB

O Bairro Frei Damião, objeto de análise, encontra-se no município de Sumé (Figura 5), no estado da Paraíba, inserido na mesorregião da Borborema e na microrregião do Cariri Ocidental. O referido município está situado a uma distância de 136 km de Campina Grande e a 261 km da capital do estado, João Pessoa. O acesso à região se dá pelas rodovias BR-230 e BR-412. Segundo informações divulgadas pelo IBGE (2022) a extensão territorial do município é de 833,32 Km², e, no último censo, sua população era de 17.166 habitantes. A região apresenta um clima semiárido quente, caracterizado por baixos índices pluviométricos.

A rede hidrográfica da região é composta pela bacia do rio Paraíba e seus afluentes, que são predominantemente intermitentes e têm seus cursos d'água controlados, em grande parte, pela rede de fraturas geológicas da região. As principais fontes de água para o município de Sumé são o rio Sucuru e o açude Sumé, que possui capacidade de armazenamento de aproximadamente 44.846.100 m³. Além disso, a hidrologia da região é caracterizada por aquíferos fissurais, compostos majoritariamente por rochas cristalinas (Salgado, 2016; CPRM, 2000).

Figura 5 – Representação territorial do Estado da Paraíba, evidenciando a localização geográfica do Município de Sumé, localizado na região do Cariri Ocidental paraibano



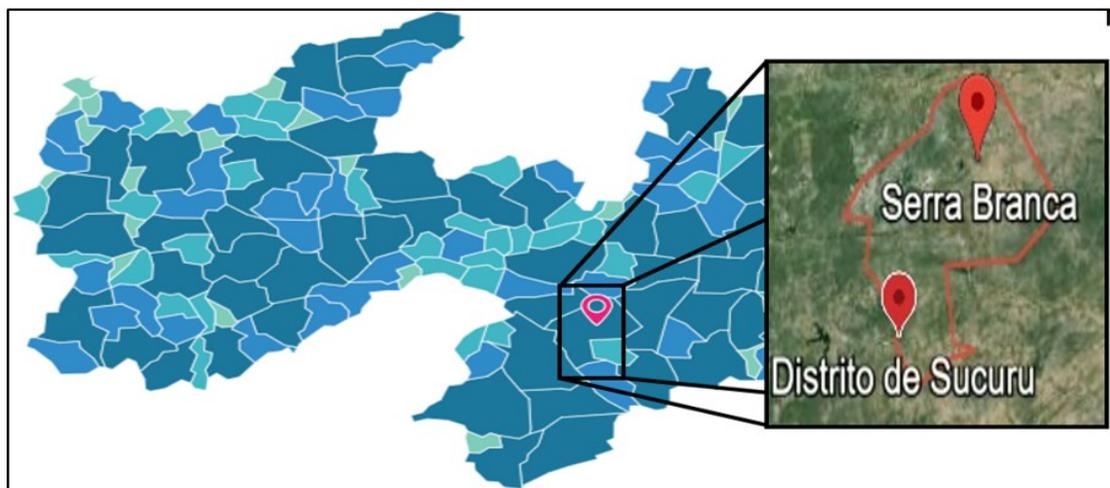
Fonte: Adaptado do Google Earth (2023) e IBGE (2022).

4.1.3 Serra Branca – PB

O distrito de Sucuru está localizado no município de Serra Branca (Figura 6), pertencente à mesorregião da Borborema e à microrregião do Cariri Ocidental, no Estado da Paraíba, Brasil. A sede do município está situada nas coordenadas geográficas de 7°29'00" de latitude sul e 36°39'54" de longitude oeste, a uma distância de 104 km de Campina Grande e 234 km de João Pessoa. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o município abrange uma área total de 698,102 km² e possui uma população de 13.614 habitantes, conforme o último censo. Ademais, o distrito de Sucuru é uma microárea pertencente a Serra Branca, composta por aproximadamente oitenta e nove moradores fixos.

Em termos hidrográficos, o município de Serra Branca está situado na bacia hidrográfica do Rio Paraíba, abrangendo as regiões do Alto Paraíba e a sub-bacia do Rio Taperoá. Os principais tributários incluem os rios Serra Branca e Sucuru, além de diversos riachos. Entre os corpos hídricos de acumulação, destacam-se os açudes Público Serra Branca e da Lagoa de Cima, bem como várias lagoas menores, como as de Maria Preta, Cipó, Velho, Maracajá e Panati. De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta um clima BSh, caracterizado como semiárido quente, com média pluviométrica anual de 529,7 mm e uma temperatura média anual de 24,1 °C (CPRM,2005; Pontes et al, 2013).

Figura 6 – Representação territorial do Estado da Paraíba, evidenciando a localização geográfica do Distrito de Sucuru pertencente ao Município de Serra Branca, localizado na região do Cariri Ocidental paraibano



Fonte: Adaptado do Google Earth (2023) e IBGE (2022).

4.2 PONTOS DE COLETA

A delimitação das áreas de coleta foi fundamentada considerando diversos critérios para a seleção dos poços, como: I) poços tubulares situados nas proximidades e/ou dentro do Centro de Desenvolvimento Sustentável, Campus da UFCG; II) poços que constituem a principal e/ou mais abundante fonte de água da população; III) poços que não passaram por nenhum sistema de tratamento até o momento ou durante o período de estudo; IV) poços que não foram submetidos a avaliações físico-químicas desde sua perfuração; V) poços em uso efetivo. A vista disso, na Tabela 3 estão descritas as características técnicas dos poços selecionados para o desenvolvimento do presente estudo.

Tabela 3 – Caracterização técnica dos pontos de coleta de água dos poços tubulares da zona rural de Brejo da Madre de Deus – PE, Sumé – PB e o distrito Sucuru - PB

Código	Localidade	Natureza	Prof.(m)	Finalidade do uso	Coordenadas
BMD1	Sítio Cacimba de Pedro	Particular	52	Doméstico secundário e dessedentação animal	8°07'38.6"S 36°22'04.7"W
BMD2	Sítio Cacimba de Pedro	Particular	45	Doméstico secundário	8°07'33.9"S 36°22'03.7"W
BMD3	Sítio Cacimba de Pedro	Particular	56	Doméstico secundário	8°07'34.9"S 36°22'03.9"W
BMD4	Sítio Cacimba de Pedro	Particular	56	Doméstico secundário e dessedentação animal	8°07'45.7"S 36°22'07.6"W
SUM1	Bairro Frei Damião	Particular	32	Doméstico secundário e dessedentação animal	7°39'43.7"S 36°53'24.7"W
SUM2	Bairro Frei Damião	Particular	50	Doméstico secundário	7°39'42.4"S 36°53'24.8"W
SUM3	Bairro Frei Damião	Particular	50	Doméstico secundário	7°39'46.1"S 36°53'24.7"W
SUM4	Bairro Frei Damião	Particular	-	Doméstico secundário	7°39'54.3"S 36°53'25.7"W
SUM5	Bairro Frei Damião	Público	33	Doméstico secundário e Irrigação	7°39'42.0"S 36°53'39.0"W
PDSU	Distrito Sucuru	Público	36	Doméstico primário, secundário e dessedentação animal	7°40'34.1"S 36°47'21.5"W

Fonte: Autoral (2024).

4.2.1 Sítio Cacimba de Pedro de Cima

O sítio Cacimba de Pedro de Cima, localizado na zona rural de Brejo da Madre de Deus, foi selecionado como a área de estudo dentro do município, com os pontos BMD1, BMD2 e BMD3 atendendo aos critérios II, III e V e o BMD4 II, III, IV e V. Diante disso, na localidade, foram coletadas amostras de água de quatro poços tubulares particulares, os pontos BMD1, BMD2 e BMD3 têm água canalizada para algumas residências e/ou são coletadas por moradores utilizando baldes, enquanto o ponto BMD4 é restrito ao uso familiar. A Figura 7 demonstra a localização dos poços tubulares estudados na região de Brejo da Madre de Deus, Pernambuco.

Figura 7 – Localização dos poços tubulares na zona rural de Brejo da Madre de Deus - PE



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

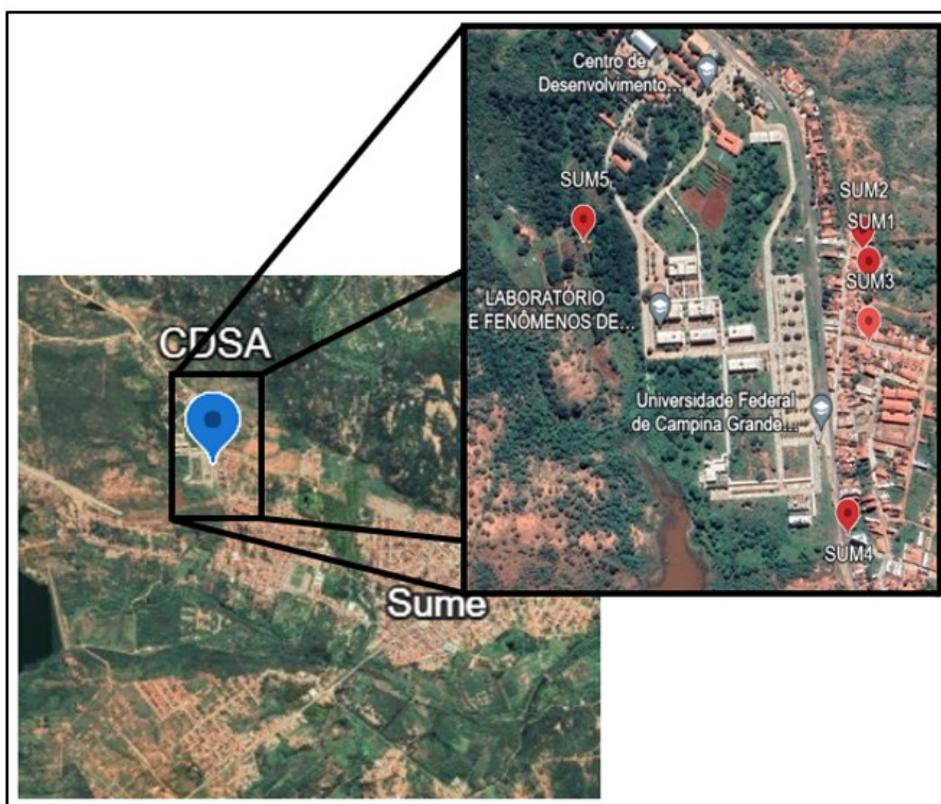
Segundo relatos dos proprietários e usuários do recurso hídrico, as águas dos poços são utilizadas para fins secundários, como uso doméstico geral e para dessedentação animal. No entanto, para consumo humano, são utilizadas água da chuva, água mineral e/ou água proveniente

da nascente de água doce da zona brejeira, que é comercializada nas comunidades sem acesso a água tratada.

4.2.2 Bairro Frei Damião

Na cidade de Sumé, Paraíba, a área de estudo delimitada foi o bairro Frei Damião. Nesta região, foram escolhidos cinco poços tubulares, distribuídos conforme indicado na Figura 8. Conseqüentemente, os poços foram codificados como SUM1, SUM2 e SUM3, atendendo aos critérios I, II, III, IV e V, enquanto o poço SUM4 e SUM5 está em conformidade com os requisitos I, II, III e V.

Figura 8 – Localização dos poços tubulares no bairro Frei Damião, Sumé - PB



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

Ademais, os poços analisados são de natureza particular e um público pertencendo a instituição federal, o ponto identificado como SUM5 está localizado dentro do Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDSA), e é utilizado para o abastecimento de áreas experimentais

e da Escola Agrotécnica Deputado Evaldo Gonçalves de Queiroz. Enquanto, os poços SUM1, SUM2, SUM3 e SUM4 estão situados nas proximidades do CDSA e são destinados ao abastecimento domiciliar, sendo que o poço SUM4 pertence a uma empresa imobiliária e abastece os edifícios respectivos, localizados em frente à Universidade.

Os usuários das águas provenientes desses poços utilizam-nas para fins secundários, abrangendo o preparo de alimentos, atividades domésticas diversas, irrigação e dessedentação animal.

4.2.1 Distrito de Sucuru

No Distrito de Sucuru, objeto de estudo, a população é abastecida por um único poço tubular, de natureza pública, mostrado na Figura 9. O poço artesiano que abastece a comunidade foi selecionado para o presente estudo, atendendo aos critérios estipulados nos itens II e V, sendo identificado com o código PDSU.

Figura 9 – Localização do poço tubular no distrito Sucuru, Serra Branca - PB



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

Esse poço foi perfurado pela prefeitura com o intuito de suprir a demanda hídrica da comunidade. Inicialmente, a água era tratada por um sistema de dessalinização por osmose reversa, porém, durante as duas primeiras coletas, o sistema de encontrava-se inoperante, resultando no fornecimento de água sem tratamento. Nessa circunstância, os moradores tiveram que adquirir água de outras fontes para consumo humano e preparo de alimentos. Apesar disso, uma pequena parte da população continuou utilizando a água não tratada para cozinhar. Na última coleta, entretanto, constatou-se que o sistema de tratamento havia sido retomado, e a população passou a receber água tratada para o consumo e preparo de alimentos.

4.3 COLETA E ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS

As coletas para as análises físico-químicas das águas dos poços tubulares ocorreram de junho/julho a setembro de 2024, seguindo a frequência descrita na Tabela 4.

Tabela 4 – Frequência da coleta das amostras

Pontos	Junho/julho	Agosto	Setembro
BMD1	25/06/2024	07/08/2024	22/09/2024
BMD2	25/06/2024	07/08/2024	22/09/2024
BMD3	25/06/2024	07/08/2024	22/09/2024
BMD4	25/06/2024	07/08/2024	22/09/2024
SUM1	04/07/2024	09/08/2024	30/09/2024
SUM2	04/07/2024	09/08/2024	30/09/2024
SUM3	04/07/2024	09/08/2024	30/09/2024
SUM4	04/07/2024	09/08/2024	30/09/2024
SUM5	28/06/2024	09/08/2024	30/09/2024
PDSU	04/07/2024	08/08/2024	24/09/2024

Fonte: Autoral, 2024.

As amostras foram obtidas diretamente do fluxo dos poços ou de torneiras próximas conectadas aos reservatórios de armazenamento das águas dos poços tubulares. Além disso, para assegurar a precisão das amostras, a água foi deixada escoar por pelo menos 5 minutos para purgar as tubulações. Após esse procedimento, procedeu-se com o armazenamento das águas em garrafas

de polietileno com volume de aproximadamente 1,5 L todas previamente higienizadas e enxaguadas com água dos próprios poços. Ademais, é importante ressaltar que todas as garrafas foram devidamente identificadas e mantidas sob refrigeração até o momento das análises.

4.4 DETERMINAÇÃO FÍSICO – QUÍMICAS DAS ÁGUAS DE POÇOS TUBULARES

A caracterização físico-química das amostras de água foram realizadas nos Laboratórios de Qualidade de Água (LAQUA), Química Experimental, Química e Fertilidade dos Solos (LASOL) e Fenômenos de Transporte, Hidráulica, Hidrologia, Irrigação e Drenagem (LAFHID), situados no Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, campus da Universidade Federal de Campina Grande. Para realização das análises foram empregadas as técnicas descritas na Tabela 5. Nesse ensejo, foram avaliados os parâmetros físicos sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica (CE), bem como os parâmetros químicos, o potencial hidrogeniônico (pH), sódio, potássio, cloretos e a dureza total.

Tabela 5 – Materiais necessários para o procedimento de caracterização físico-química

Parâmetros	Técnicas / métodos	Equipamentos/ reagentes/ indicadores	Referências
pH, CE e STD	Eletrométrico	Sonda HANNA - HI 9829	-
Sódio e Potássio	Fotométrico	Fotômetro de chama	APHA, 1995
Dureza Total	Titulometria de Complexação	EDTA 0,025 M e solução tampão amoniacal pH 10/ negro de eriocromo em pó.	APHA, 1995
Cloretos	Método de Mohr	Nitrato de prata 0,05 N e hidróxido de sódio 0,1 M / cromato de potássio a 5%.	APHA, 1995

Fonte: Autoral (2024).

4.4.1 pH, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos

A avaliação dos parâmetros de pH, sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica foi realizada utilizando o equipamento sonda de multiparâmetros HANNA - HI 9829. Inicialmente, verificou-se que a sonda estava devidamente calibrada conforme as instruções do fabricante. Após a conclusão da calibração, ocorreu a realização do teste com a amostra padrão de água destilada que foi adicionada ao campo designado para imersão dos eletrodos. Certificando-se de que os sensores relevantes estivessem completamente submersos na amostra, para obter leituras precisas. Consequente, aguardou-se o tempo necessário para que a sonda estabilizasse as leituras, momento em que os valores dos parâmetros medidos foram registrados. O procedimento descrito procedeu-se para a avaliação de todas as amostras de águas de poços tubulares em estudo.

4.4.2 Dureza total

A titulometria de complexação foi o método utilizado para determinar a dureza das águas dos poços tubulares analisados, devido à presença dos íons Ca^{+2} e Mg^{+2} , o procedimento iniciou-se com a transferência da solução titulante de EDTA – Na_2 (0,025 M) na bureta, seguida da aferição. Consequente, foram pipetados 25 mL da solução amostra, os quais foram transferidos para o erlenmeyer, este procedimento foi realizado com todas as amostras em duplicata. Posteriormente, realizou-se a medição de 3 mL da solução tampão pH 10 em uma pipeta, os quais foram adicionados a cada amostra, as quais foram agitadas para garantir a homogeneização. Em seguida, adicionou-se o indicador negro de eriocromo em pó à amostra e observou – se a mudança de coloração. Logo, a titulação da amostra com a solução padrão EDTA - Na_2 (0,025 M) foi realizada até que ocorresse a mudança de coloração, do vermelho vinho para o azul. Obtido o volume gasto para a titulação, procedeu-se com a determinação da concentração dos íons Ca^{+2} e Mg^{+2} nas soluções amostrais utilizando o princípio da equivalência (Equação 1);

$$M_{\text{EDTA}} * V_{\text{EDTA}} = M_{\text{Amostra}} * V_{\text{Amostra}} \text{ (Equação 1)}$$

Por fim, os valores da dureza total foram expressos em $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ (Equação 2), que é uma forma convencional de expressar a dureza total da água;

$$\text{ppm}_{\text{CaCO}_3} = M_{\text{Amostra}} * \text{mol}_{\text{CaCO}_3} * 10^3 \text{ (Equação 2)}$$

Onde;

$$\text{mol}_{\text{CaCO}_3} = \text{Massa molar} / \text{Nox (Equação 3)}.$$

4.4.3 Íons cloretos

A determinação de íons de cloretos pelo método de Mohr, o primeiro passo consistiu em verificar o pH das amostras com papel indicador universal, garantindo que estivessem dentro da faixa entre 7,0 e 10,5. Caso contrário, foi necessário realizar o ajuste utilizando a solução básica (NaOH 0,1 M) até atingir aproximadamente pH 7 – 8. Consequente, alíquotas de 25 mL das soluções amostrais foram pipetadas para erlenmeyers de 100 mL. A cada amostra foram adicionadas duas gotas do indicador cromato de potássio K_2CrO_4 a 5%, seguido de agitação para homogeneização. Consequente, a solução titulante de AgNO_3 (0,05 N) foi transferida para a bureta e houve a aferição. Realizado este procedimento, iniciou-se a titulação da amostra com a solução titulante AgNO_3 (0,05 N) até a mudança de cor do amarelo para o vermelho tijolo. Obtido o volume gasto para a titulação, realizou-se a determinação da concentração molar nas soluções amostrais utilizando o princípio da equivalência (Equação 3);

$$M_{\text{AgNO}_3} * V_{\text{AgNO}_3} = M_{\text{Amostra}} * V_{\text{Amostra}} \text{ (Equação 3)}$$

Definindo os ppm de cloretos na alíquota titulada, utilizando a Equação 4;

$$\text{ppm}_{\text{Cl}} = M_{\text{Amostra}} * \text{mol}_{\text{Cl}} * 10^3 \text{ (Equação 4)}.$$

4.4.4 Íons sódio e potássio

Para a realização das análises dos íons sódio e potássio, foi utilizado o fotômetro de chama Analyser 910 M. Inicialmente, o equipamento foi calibrado com padrões de cloreto de sódio e cloreto de potássio, ambos a uma concentração de 100 ppm. Após a calibração, as amostras foram submetidas à análise por fotometria de chama. Durante o procedimento, observou-se que a concentração de sódio nas amostras excedia 100 ppm, o que exigiu a diluição de 5 mL de cada amostra em água destilada, conforme indicado na Tabela 6. Ademais, entre cada medição subsequente, foi necessário limpar o sistema utilizando água destilada como padrão branco, garantindo, assim, a precisão dos resultados obtidos.

Tabela 6 – Diluições requeridas das amostras para a leitura do parâmetro sódio no fotômetro de chama

	1ª coleta	2ª coleta	3ª coleta
Amostras	Diluições		
BMD1	1/6	1/8	1/8
BMD2	1/8	1/20	1/20
BMD3	1/8	1/20	1/20
BMD4	1/8	1/20	1/20
SUM1	1/3	1/3	1/3
SUM2	1/3	1/3	1/3
SUM3	1/3	1/4	1/3
SUM4	1/3	1/3	1/3
SUM5	1/3	1/3	1/3
PDSU	1/3	1/3	1/3

Fonte: Autoral (2024).

Para garantir maior precisão nos resultados, o procedimento foi replicado em dois laboratórios distintos, o LAFHID e o LASOL, utilizando o mesmo tipo de equipamento e adotando a mesma metodologia.

4.4.5 Avaliação dos dados

A análise estatística descritiva foi realizada utilizando o software Minitab® Statistical. No Microsoft® Excel®, foram tabulados os dados obtidos neste estudo, bem como elaborados os gráficos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VARIAÇÃO ESPAÇO – TEMPORAL DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

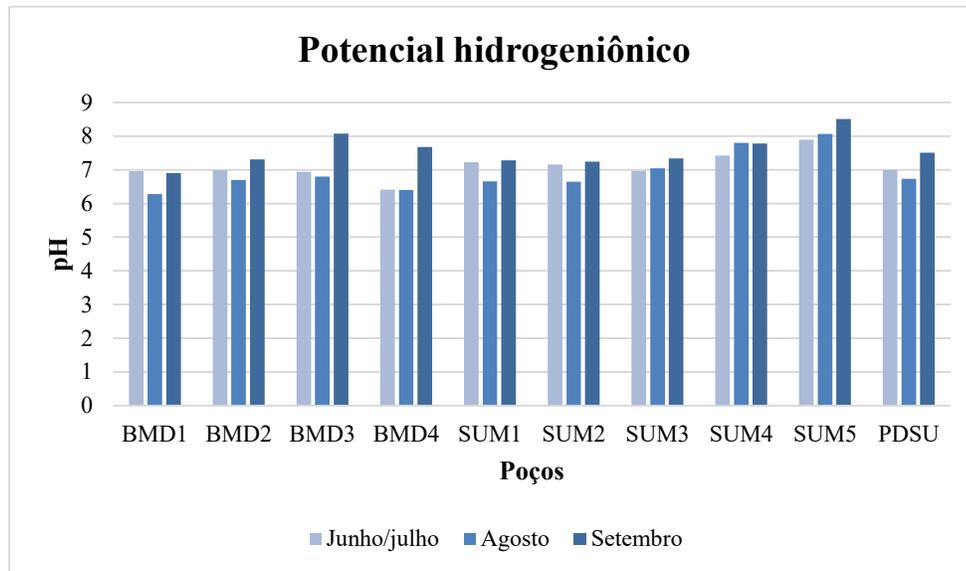
5.1.1 pH

Avaliando o pH dos poços analisados, conforme demonstrado no Gráfico 1, percebe-se que o pH ao longo do período estudado se manteve em torno da neutralidade, exceto em alguns pontos que apresentaram comportamentos distintos. Destacando-se os pontos BMD3 e SUM5 que apresentaram elevação considerável no pH em setembro, atingindo valores significativamente alcalinos, de 8,08 e 8,51, respectivamente. Este aumento possivelmente se relaciona a fatores sazonais, uma vez que quase todos os poços apresentaram valores de pH mais elevados em setembro.

Os poços BMD1, BMD2 e BMD4, por sua vez, exibiram variações entre condições levemente ácidas e neutras ao longo dos meses, sendo que o BMD4, em particular, registrou uma mudança significativa de pH, passando de 6,41 em junho para 7,68 em setembro do decorrente ano, demonstrando um deslocamento gradual para condições mais alcalinas. Além disso, os poços SUM1 e SUM2 oscilaram entre neutro e o levemente ácido nos primeiros meses, retornando para valores neutros no mês de setembro. Por outro lado, os poços SUM3 e SUM4 permaneceram próximos da neutralidade, com variações moderadas ao longo dos meses deslocando-se para alcalinidade. Enquanto o ponto PDSU indicou inicialmente uma leve acidificação, com uma queda no pH de 7,0 em julho para 6,73 em agosto, seguida de uma recuperação em setembro, quando o pH atingiu 7,51, indicando um retorno a condições mais alcalinas.

Ao analisar os resultados deste estudo com os dados reportados na literatura, constata-se que a variação dos valores de pH está em concordância com as observações de Salgado (2016), que realizou seu trabalho no município de Sumé – PB e Regô (2018), que desenvolveu seus estudos na cidade de Campina Grande - PB. Nestes foram registrados valores de pH predominantemente próximos à neutralidade, com alguns desvios tendendo à alcalinidade. Além disso, os níveis de pH encontraram-se dentro da faixa habitual para águas subterrâneas e nascentes, que varia de 5,5 a 8,5, conforme delineado por Santos (2008) e Nakamura *et al.* (2014).

Gráfico 1 - Variação espaço – temporal do pH em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano



Fonte: Autoral (2024).

Na Tabela 7 são apresentados os dados obtidos da estatística descritiva do parâmetro de pH dos conjuntos estudados. O grupo BMD demonstraram uma maior variabilidade, com o desvio padrão variando de 0,30 em BMD2 a 0,74 em BMD4, o que indica uma maior dispersão dos dados, especialmente em BMD3 e BMD4. O coeficiente de variação (CV) reforça essa análise, com a amostra BMD4 apresentando o maior índice de variação, atingindo 10,78%, sugerindo maior instabilidade nas condições dessa amostra. Todavia, as amostras SUM exibiram menor variabilidade, com desvios padrão (DesvPad) variando de 0,19 em SUM3 a 0,34 em SUM1, refletindo maior consistência nos dados de pH. Os valores de CV para as amostras SUM, particularmente em SUM3 de 2,73% e SUM4 de 2,79%, indicam uma estabilidade significativa. O ponto PDSU apresentou uma variabilidade intermediária, com desvio padrão de 0,40 e um coeficiente de variação de 5,59%, posicionando-se entre as amostras BMD e SUM em termos de consistência. De modo geral, os dados de CV indicam uma baixa dispersão, com valores abaixo de 15%, sugerindo uma maior homogeneidade dos dados analisados.

Tabela 7 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro pH

	Média	DesvPad	CV (%)	Mínimo	Máximo
BMD1	6,71	0,38	5,61	6,28	6,96
BMD2	7	0,30	4,36	6,7	7,31
BMD3	7,27	0,70	9,65	6,8	8,08
BMD4	6,83	0,74	10,78	6,4	7,68
SUM1	7,06	0,34	4,88	6,66	7,28
SUM2	7,02	0,32	4,56	6,65	7,24
SUM3	7,12	0,19	2,73	6,97	7,34
SUM4	7,67	0,21	2,79	7,42	7,8
SUM5	8,16	0,31	3,86	7,9	8,51
PDSU	7,08	0,40	5,59	6,73	7,51

Fonte: Autoral (2024).

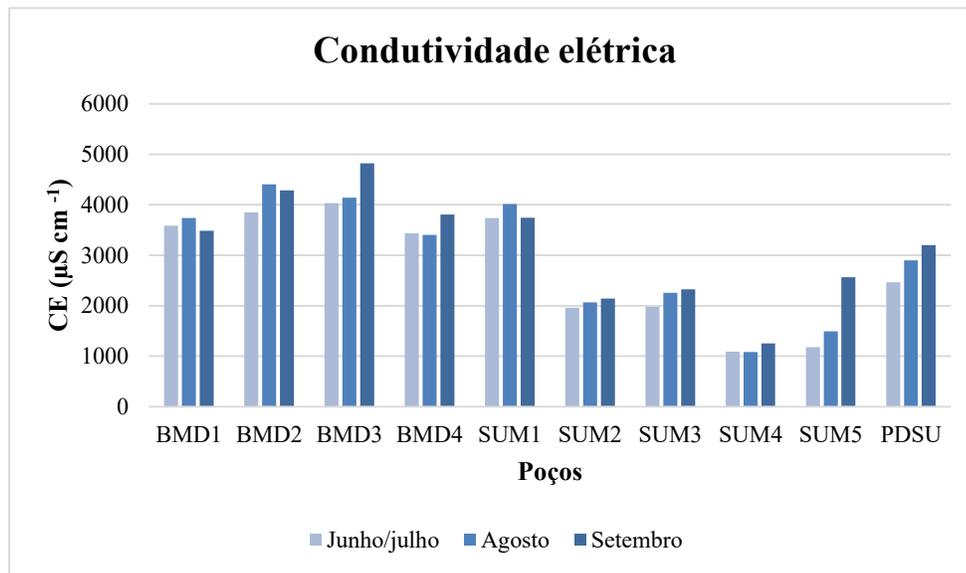
5.1.2 Condutividade elétrica

A variação dos valores de condutividade elétrica (Gráfico 2) observada nos poços analisados foi de 1087 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 4825 $\mu\text{S cm}^{-1}$, indicando significativas alterações nas condições da água subterrânea, podendo sugerir influências tanto naturais quanto antrópicas. Nos poços BMD (BMD1 a BMD4), observou-se um comportamento diferenciado entre os pontos, com destaque para o aumento expressivo em BMD3 alterações de CE de 4032 $\mu\text{S cm}^{-1}$ em junho para 4825 $\mu\text{S cm}^{-1}$ em setembro. De modo similar ao comportamento observado no ponto BMD. Os poços denominados SUM (SUM1 a SUM5) também apresentaram variações na CE, com destaque para o poço SUM5, onde foi registrado um aumento abrupto de 1180 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para 2566 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Concomitantemente, o poço PDSU demonstrou um aumento contínuo na CE, atingindo 3200 $\mu\text{S cm}^{-1}$ no mês de setembro.

O aumento da condutividade elétrica pode estar diretamente associado à dissolução natural de íons, provenientes do próprio solo local, ou ao fluxo de contaminantes que solubilizam certos elementos presentes no solo, transportando-os e permitindo que alcancem o lençol freático. Estudos realizados em Itabaiana/SE por Anjos (2023), e em Sumé/PB por Nascimento *et al.* (2024),

identificaram valores compatíveis de condutividade elétrica. Conforme os dados analisados por Anjos (2023); em nove poços, a condutividade elétrica (CE) variou entre $53,77 \mu\text{S cm}^{-1}$ e $1962,67 \mu\text{S cm}^{-1}$. Por sua vez, Nascimento *et al.* (2024), avaliaram três poços e observaram oscilações nos valores de CE, que variaram de $650 \mu\text{S cm}^{-1}$ a $1897 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Submetido à publicação).

Gráfico 2 - Variação espaço – temporal da CE em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano



Fonte: Autoral (2024).

Na Tabela 8 é possível analisar a variabilidade dos conjuntos BMD, SUM e PDSU por meio do desvio padrão e coeficiente de variação. No conjunto BMD, o desvio padrão varia de $126,4 \mu\text{S cm}^{-1}$ a $430 \mu\text{S cm}^{-1}$, com coeficientes de variação entre 3,51% e 9,93%, indicando uma dispersão baixa e dados relativamente consistentes. Já o conjunto SUM apresenta uma maior inconstância, com desvio padrão de $91,6 \mu\text{S cm}^{-1}$ a $727 \mu\text{S cm}^{-1}$, sendo SUM5 o mais heterogêneo, com um coeficiente de variação extremamente alto de 41,62%. Isso sugere uma alta dispersão entre as amostras. O ponto PDSU, por sua vez, tem um desvio padrão de $368 \mu\text{S cm}^{-1}$ e coeficiente de variação de 12,9%, representando uma variação intermediária entre os dois outros conjuntos.

Tabela 8 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro CE

	Média	DesvPad	CV (%)	Mínimo	Máximo
BMD1	3603,7	126,4	3,51	3487	3738
BMD2	4181	294	7,02	3849	4407
BMD3	4332	430	9,93	4032	4825
BMD4	3549	226	6,37	3402	3809
SUM1	3833	160,3	4,18	3735	4018
SUM2	2056	91,6	4,45	1959	2141
SUM3	2188	184	8,41	1979	2326
SUM4	1144	96,1	8,4	1087	1255
SUM5	1746	727	41,62	1180	2566
PDSU	2855	368	12,9	2467	3200

Fonte: Autoral (2024).

5.1.3 Sólidos totais dissolvidos

Os sólidos totais dissolvidos são reconhecidos como indicadores do grau de salinidade das águas, apresentando uma relação direta com a condutividade elétrica. A condutividade pode ser utilizada como um método para avaliar a concentração de sólidos totais dissolvidos de uma amostragem de água (Rêgo, 2018; Salgado, 2016).

Nesse ensejo, ao examinar o Gráfico 3, são observados alterações nas concentrações de STD, nos poços BMD (BMD1 a BMD4), houve um comportamento distinto entre os pontos, com destaque para BMD 3, que apresentou um aumento expressivo na concentração de STD, passando de 2016 mg L⁻¹ em junho para 2412 mg L⁻¹ em setembro, evidenciando coerência da correlação positiva entre os dados de CE observados e os dados de STD. O ponto BMD2 também mostrou um aumento, com valores de 1925 mg L⁻¹ em junho, subindo para 2203 mg L⁻¹ em agosto e decaindo para 2143 mg L⁻¹ em setembro. Por outro lado, BMD1 e BMD4 tiveram variações menores e mais estáveis, com concentrações de 1793 mg L⁻¹ e 1718 mg L⁻¹ em junho, respectivamente.

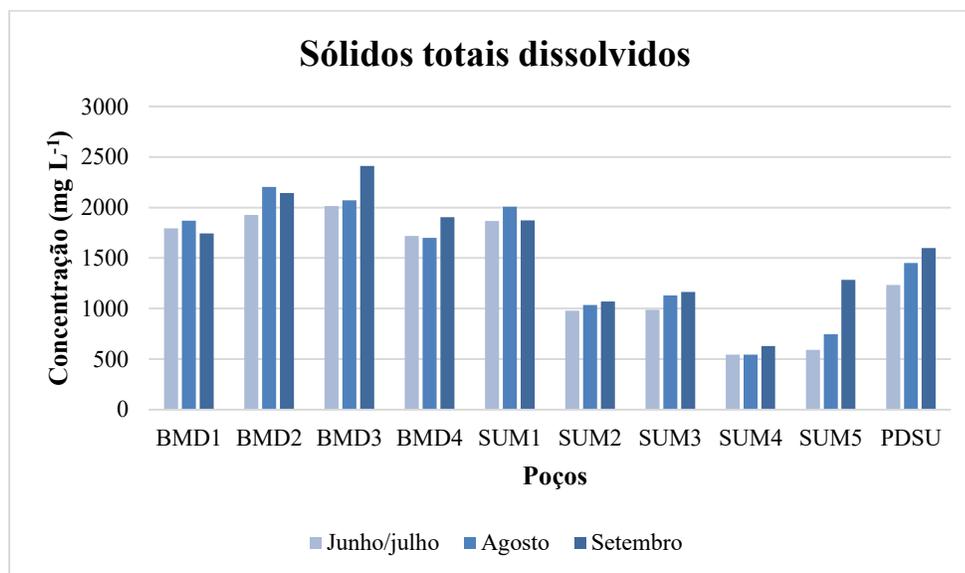
Nos pontos SUM (SUM1 a SUM5), também foram registradas variações na concentração de STD, com destaque para SUM5, onde houve um aumento acentuado de 590 mg/L em julho para

1283 mg/L em setembro, indicando uma grande dispersão nos dados. Os poços SUM1, SUM2 e SUM3 apresentaram variações mais graduais, refletindo uma dispersão menos intensa. Simultaneamente, o poço PDSU demonstrou um aumento contínuo na concentração de STD, atingindo 1600 mg/L em setembro, sugerindo uma tendência de crescimento ao longo do tempo.

Os resultados obtidos para este parâmetro podem ser corroborados pelos obtidos por Regô (2018), que realizou investigações em seis poços, dos quais cinco apresentaram concentrações de sólidos dissolvidos totais variando de 1107 mg L⁻¹ a 1889 mg L⁻¹. Similarmente, Nascimento *et al.* (2024), observaram que os valores de sólidos totais dissolvidos variaram de 650 mg L⁻¹ a 1897 mg L⁻¹ (Submetido à publicação). Em terrenos cristalinos, de modo geral, a salinidade pode superar 4.000 mg L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos (Farias *et al.*, 2017).

De acordo com a classificação proposta por Custódio e Llamas (1987), as concentrações de STD podem ser categorizadas da seguinte forma: águas doces apresentam teores de 0 a 500 mg L⁻¹, águas salobras variam de 500 a 1500 mg L⁻¹, e águas salinas possuem concentrações superiores a 1500 mg L⁻¹. A partir dessa classificação, observa-se que os poços pertencentes ao grupamento BMD e SUM1 são classificados como salinos, enquanto os poços SUM2, SUM3, SUM4 e SUM5 são considerados salobros. O poço PDSU, por sua vez, apresenta características que o situam na faixa entre salobra e salina. Contudo, conforme a classificação estabelecida pela Resolução CONAMA 357/2005, as águas dos poços em estudo, de acordo com os padrões de sólidos totais dissolvidos apresentados, são caracterizadas como salobras (Brasil, 2005).

Gráfico 3 - Variação espaço – temporal dos STD em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano



Fonte: Autoral (2024).

A estatística descritiva dos dados para o parâmetro de STD apresenta-se na Tabela 9. Logo, como pode ser analisado, o ponto BMD1 possui um desvio padrão de 63 mg L⁻¹ e um coeficiente de variação de 3,5%, indicando baixa dispersão nos valores e boa homogeneidade. Os pontos BMD2 e BMD4 também apresentam variações moderadas, com coeficientes de variação de 7% e 6,35%, respectivamente, refletindo uma dispersão controlada. Enquanto, o ponto BMD3 apresenta um desvio padrão mais elevado de 215 mg L⁻¹ e coeficiente de variação de 9,91%, revelando maior variabilidade nos dados. Entre os pontos SUM, os poços SUM1 e SUM2 mantêm uma boa estabilidade, com CV de 4,17% e 4,46%, respectivamente. No entanto, os poços SUM3 e SUM4 têm CV de aproximadamente 8,5%, sugerindo maior dispersão. SUM5 chama atenção pela alta variabilidade, com um desvio padrão de 364 mg L⁻¹ e um coeficiente de variação elevado de 41,64%, sinalizando alta dispersão nos valores de STD. O ponto PDSU também apresenta uma variação considerável, com desvio padrão de 184 mg L⁻¹ e coeficiente de 12,88%.

Tabela 9 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro de STD

	Média	DesvPad	CV (%)	Mínimo	Máximo
BMD1	1802	63	3,5	1744	1869
BMD2	2090,3	146,3	7	1925	2203
BMD3	2166	215	9,91	2016	2412
BMD4	1774,3	112,6	6,35	1701	1904
SUM1	1916,7	80	4,17	1868	2009
SUM2	1027,7	45,8	4,46	979	1070
SUM3	1093,7	93	8,5	988	1163
SUM4	571,7	47,9	8,38	543	627
SUM5	873	364	41,64	590	1283
PDSU	1428	184	12,88	1234	1600

Fonte: Autoral (2024).

5.1.4 Íons Cloretos

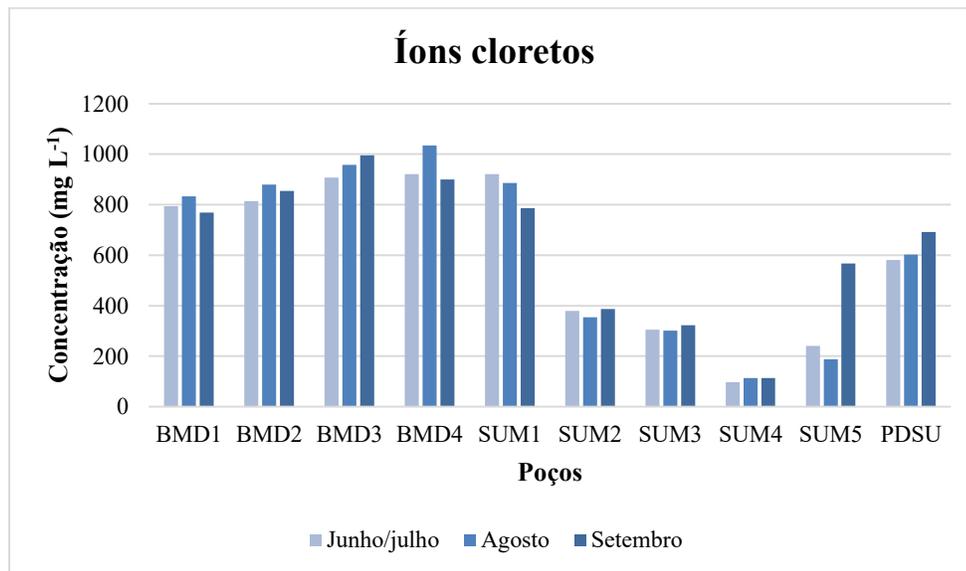
As águas subterrâneas frequentemente exibem concentrações elevadas de íons cloretos, resultantes da lixiviação de minerais como halita (NaCl) e silvita (KCl). Devido à elevada solubilidade desses minerais e à lenta circulação da água nos aquíferos, ocorre um acúmulo gradual e contínuo de cloretos ao longo do tempo (Rocha, 2008). Essas altas concentrações também podem indicar poluição por águas residuárias, especialmente domésticas (Salgado, 2016). Além disso, os cloretos, por não serem susceptíveis à fervura, estão associados à dureza permanente da água.

Conseqüentemente, ao avaliar o Gráfico 4, é possível observar que no grupo BMD, o BMD3 apresenta um aumento constante nas concentrações de íons cloretos, passando de 907,52 mg L⁻¹ em junho para 996,145 mg L⁻¹ em setembro. Entretanto, outros pontos desse grupo, como BMD1, BMD2 e BMD4, demonstram oscilações, com aumentos seguidos por quedas. Por outro lado, no conjunto SUM, o ponto SUM5 inicia com uma concentração de 241,06 mg L⁻¹, reduzindo-se para 187,885 mg L⁻¹ antes de recuperar-se significativamente para 567,2 mg L⁻¹. Contudo, os pontos SUM2 e SUM3 demonstram uma estabilidade relativa. Já o ponto SUM4, após um aumento de 97,5 mg L⁻¹ em julho para 113,44 mg L⁻¹ em agosto, manteve-se estável em 113,44 mg L⁻¹ em

setembro. Ademais, o ponto PDSU distingue-se por apresentar um aumento consistente nas concentrações de cloretos, passando de 581,38 mg L⁻¹ em julho para 691,275 mg L⁻¹ em setembro.

No município de Sumé, Salgado (2016), observou uma variação de íons cloretos entre 35 e 1200 mg L⁻¹. Enquanto, Regô (2018), em suas análises realizadas no município de Campina Grande, registrou concentrações variando de 233,26 a 634 mgCl⁻ L⁻¹. Esses dados reforçam que, em ambientes semiáridos, as águas subterrâneas tendem a apresentar altos teores de íon cloreto. Ademais, as características do solo influenciam significativamente essas concentrações, podendo elevar os níveis de íon cloretos em função da decomposição das rochas em contato com a água.

Gráfico 4 - Variação espaço – temporal dos Cloretos em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano



Fonte: Autoral (2024).

A análise dos dados na Tabela 10 revela que os poços BMD1, BMD2, BMD3, SUM2 e SUM3 apresentam CV inferiores a 5%, indicando baixa dispersão e alta homogeneidade dos dados em torno da média, com desvios padrão variando de 11,4 a 44,4 mg L⁻¹. Poços como BMD4, SUM1, SUM4 e PDSU evidenciam dispersão moderada, com CVs entre 7,6% e 9,32%, e desvios padrão variando de 9,2 a 72,4 mg L⁻¹, indicando maior variabilidade, mas ainda dentro de um nível controlado. Todavia, o ponto SUM5 destaca-se por CV de 61,85% e um desvio padrão muito elevado de 205 mg L⁻¹, refletindo alta dispersão e dados heterogêneos, sugerindo grandes oscilações em torno da média.

Tabela 10 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro cloretos

	Média	DesvPad	CV (%)	Mínimo	Máximo
BMD1	798,8	32,2	4,03	769,3	833,1
BMD2	849,3	32,7	3,85	814,4	879,2
BMD3	953,6	44,4	4,66	907,5	996,1
BMD4	952,4	72,4	7,6	900,4	1035,1
SUM1	865	69,8	8,07	787	921,7
SUM2	373,4	16,75	4,49	354,5	386,4
SUM3	309,59	11,4	3,68	301,32	322,6
SUM4	108,13	9,2	8,51	97,5	113,44
SUM5	332	205	61,85	188	567
PDSU	625,1	58,3	9,32	581,4	691,3

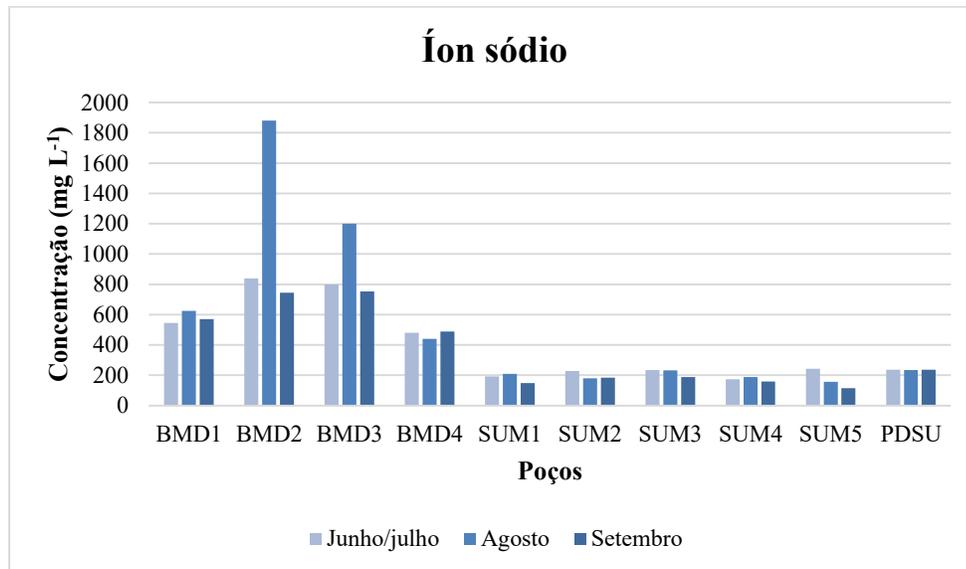
Fonte: Autoral (2024).

5.1.5 Íon sódio

Nas águas subterrâneas, o sódio destaca-se como um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes, desempenhando um papel central no aumento da salinidade natural dessas águas sob a perspectiva catiônica. Ocorrendo predominantemente na forma de cloretos, mas sua concentração pode variar conforme as condições geológicas locais e as influências de descargas de efluentes (Filho, 2018).

Nesse contexto, considerando o Gráfico 5, verifica-se que as concentrações de íon sódio nos pontos de coleta indicam mudanças significativas ao longo dos meses. O ponto BMD2 é o mais notável, com um aumento de 840 mg L⁻¹ em junho para 1880 mg L⁻¹ em agosto, seguido de uma queda para 744 mg L⁻¹ em setembro. Outrossim, o ponto BMD3 também apresenta teores elevados, alterações de 800 mg L⁻¹ para 1200 mg L⁻¹ em agosto, antes de cair para 752 mg L⁻¹. Todavia, os pontos SUM1 a SUM5 exibem concentrações menores. O ponto SUM5 apresenta uma redução expressiva de 243 mg L⁻¹ em julho para 114 mg L⁻¹ em setembro. O ponto PDSU se destaca pela estabilidade, com concentrações de sódio praticamente inalteradas, mantendo-se próximas a 237 mg L⁻¹ ao longo dos três meses.

Gráfico 5 - Variação espaço – temporal da concentração de sódio em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano



Fonte: Autoral (2024).

Com base nos estudos de Farias *et al.* (2017), que investigaram comunidades rurais na cidade de Boa Vista – PB, foram analisados 76 poços tubulares, nos quais se observaram concentrações elevadas de íon Na⁺, variando entre 101,2 e 3385,14 mg L⁻¹. Esses resultados corroboram com os valores encontrados na presente pesquisa.

Na zona rural de Brejo da Madre de Deus, os altos níveis de sódio nas águas subterrâneas podem estar associados ao ambiente hidrogeológico fissural da região, que é caracterizado por rochas cristalinas, como ígneas e metamórficas. Segundo Rocha (2008), minerais como os feldspatos e plagioclásios, comuns nas rochas ígneas, liberam sódio com facilidade devido à sua baixa estabilidade química. A elevada solubilidade do sódio impede sua precipitação, o que favorece sua permanência dissolvida nas águas subterrâneas.

Adicionalmente, os altos níveis de sódio podem estar relacionados à contaminação antrópica, especialmente por efluentes domésticos. Valores anômalos de sódio são frequentemente indicativos de poluição por efluentes residuais, uma vez que esse elemento é comumente encontrado nas excreções humanas (Filho, 2018).

Concentrações excessivas de íon Na⁺ podem impactar negativamente o sistema nervoso central e agravar a hipertensão arterial. Além disso, teores elevados de sódio podem comprometer

as características organolépticas da água, conferindo um sabor salobro e desagradável às águas destinadas ao consumo humano (Farias et al., 2017).

Na tabela 11, a estatística descritiva de sódio demonstra disparidades significativas entre os conjuntos de poços BMD, SUM e PDSU. O grupo BMD apresenta maior variabilidade nos poços BMD2 e BMD3, onde o desvio padrão e o CV atingem valores elevados, com destaque para BMD2, cujo coeficiente de variação atinge 54,56%, indicando oscilações substanciais nos níveis de sódio. Enquanto, no conjunto SUM, o SUM5 demonstra uma dispersão considerável com CV de 38,48%. Por fim, o poço PDSU apresenta uma notável estabilidade dos dados, com um CV de apenas 0,73%, indicando homogeneidade nos dados e uma excelente representatividade da média.

Tabela 11 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro sódio

	Média	DesvPad	CV (%)	Mínimo	Máximo
BMD1	579,3	40,8	7,04	544	624
BMD2	1155	630	54,56	744	1880
BMD3	917	246	26,81	752	1200
BMD4	469,3	25,7	5,48	440	488
SUM1	183,7	31,3	17,06	149	210
SUM2	197	26,9	13,65	180	228
SUM3	218,3	25,4	11,64	189	234
SUM4	174	15	8,62	159	189
SUM5	171	65,8	38,48	114	243
PDSU	236	1,73	0,73	234	237

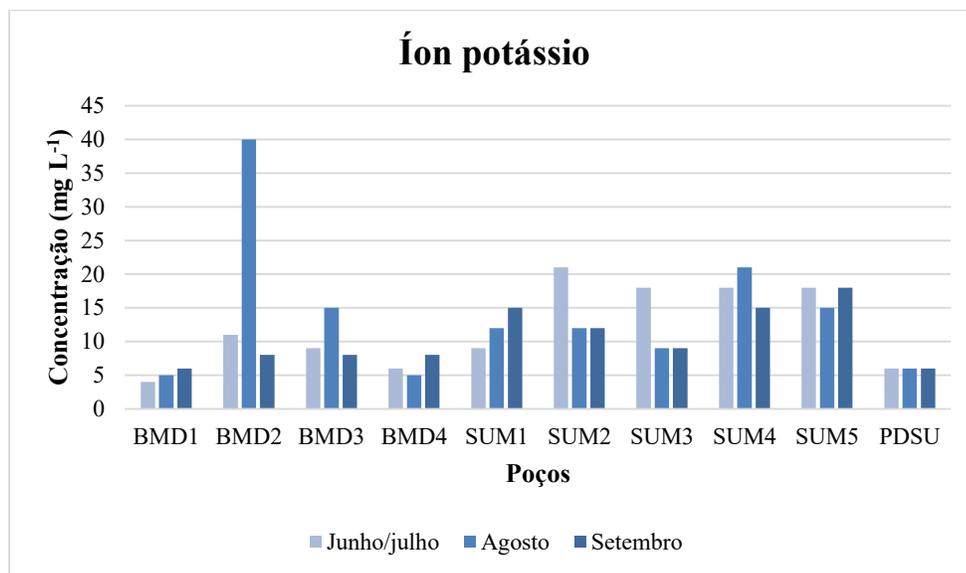
Fonte: Autoral (2024).

5.1.6 Íon potássio

O solo tem uma capacidade significativa de fixar o íon potássio (K^-) de forma irreversível, resultando em concentrações geralmente baixas desse elemento nas águas subterrâneas, como demonstrado no Gráfico 6. No grupo BMD, o ponto BMD2 apresentou uma discrepância notável em agosto, atingindo 40 mg L⁻¹, comparado com 11 mg L⁻¹ em junho e 8 mg L⁻¹ em setembro. No ponto SUM2, a concentração inicial de 21 mg L⁻¹ em julho diminuiu para 12 mg L⁻¹ em agosto, estabilizando-se no mês seguinte. De maneira semelhante, o ponto SUM3 reduziu sua concentração

de 18 mg L⁻¹ em julho para 9 mg L⁻¹ em agosto, mantendo esse valor em setembro. Por outro lado, o ponto SUM4 registrou um aumento de 18 mg L⁻¹ em julho para 21 mg L⁻¹ em agosto, seguido por uma queda para 15 mg L⁻¹ em setembro, sugerindo instabilidade. Os pontos BMD1, BMD4 e SUM5 mantiveram concentrações constantes ao longo do período avaliado. O ponto PDSU apresentou 6 mg L⁻¹ de forma estável durante os três meses, indicando baixa suscetibilidade a variações. De forma semelhante, Salgado (2016) observou concentrações de potássio variando entre 4 e 90 mg L⁻¹.

Gráfico 6 - Variação espaço – temporal da concentração de potássio em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano



Fonte: Autoral (2024).

Conforme os dados apresentados na Tabela 12, os poços BMD2 e SUM3 mostraram alta dispersão, com coeficientes de variação de 89,86% e 43,3%, respectivamente, indicando dados heterogêneos. No entanto, o poço PDSU demonstra uma concentração constante com desvio padrão e CV iguais a zero, caracterizando homogeneidade dos dados e ausência de alterações no período de estudo. Enquanto, os poços BMD1, BMD4 e SUM4 apresentam estabilidade e SUM5 baixa dispersão.

Tabela 12 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro potássio

	Média	DesvPad	CV	Mínimo	Máximo
BMD1	5	1	20	4	6
BMD2	19,7	17,7	89,86	8	40
BMD3	10,67	3,79	35,49	8	15
BMD4	6,33	1,53	24,12	5	8
SUM1	12	3	25	9	15
SUM2	15	5,2	34,64	12	21
SUM3	12	5,2	43,3	9	18
SUM4	18	3	16,67	15	21
SUM5	17	1,73	10,19	15	18
PDSU	6	0	0	6	6

Fonte: Autoral (2024).

5.1.7 Dureza Total

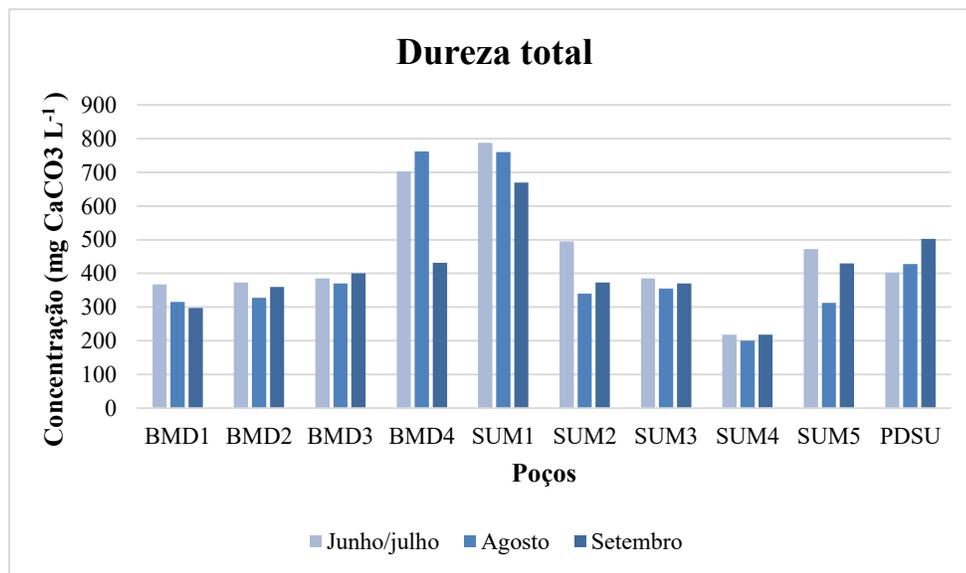
Águas duras acarretam consequências econômicas significativas devido à sua tendência a formar incrustações. Isso resulta em um elevado consumo de sabão e detergentes, além de dificultar o preparo de alimentos. Ademais, a ingestão de água dura pode prejudicar a saúde humana, contribuindo para o desenvolvimento de cálculos renais (Jesus, 2005; Rêgo, 2018).

Logo, observa-se que, a análise dos dados de dureza total (Gráfico 7) indica uma tendência geral de diminuição, com a maioria dos pontos mostrando reduções significativas, principalmente de junho/julho para agosto, seguidas por leves recuperações em setembro. O BMD1 reduziu de 367,5 para 297,5 mg CaCO₃ L⁻¹, enquanto BMD2 passou de 372,5 para 327,5 mg CaCO₃ L⁻¹, recuperando-se para 360 mg CaCO₃ L⁻¹. O ponto BMD4 teve o valor mais alto em agosto de 762,5 mg CaCO₃ L⁻¹, decaindo para 432 mg CaCO₃ L⁻¹ em setembro. O SUM1 também apresentou uma redução significativa, de 787,5 para 670 mg CaCO₃ L⁻¹. Em contrapartida, o PDSU mostrou um aumento, de 402,5 para 502,5 mg CaCO₃ L⁻¹.

Nesse ensejo, com base na classificação de Von Sperling (1996) e Brasil (2014), todas as amostras em estudo, com exceção de SUM4, apresentam-se como águas muito duras, sendo SUM4 classificada como dura.

A investigação conduzida por Salgado (2016) identificou concentrações de dureza total variando de 100 a 1960 mg de $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$. Sob outra perspectiva, Regô (2018) reportou valores entre 208 e 514 mg de $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$. Enquanto, Nascimento et al. (2024) determinaram teores de dureza na faixa de 110 a 365 mg de $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, caracterizando as amostras como apresentando dureza moderadamente dura e muito dura (submetido à publicação).

Gráfico 7 - Variação espaço – temporal do nível de dureza em poços tubulares localizados nos municípios do Cariri Ocidental paraibano e do Agreste pernambucano



Fonte: Autoral (2024).

Na Tabela 13 são mostrados os dados da estatística descritiva da dureza total das águas analisadas. Com isso, verifica-se que o desvio padrão varia de 10,1 mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ em SUM4 a 176 mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ em BMD4, indicando que BMD4 apresenta a maior alteração, enquanto SUM4 tem a menor. Em termos de coeficiente de variação, os valores se diferenciam de 3,9% em BMD3 a 27,84% em BMD4, sendo que BMD4 mostra a maior dispersão relativa em relação à média. Os poços SUM2 (20,31%) e SUM5 (20,46%) também apresentam uma dispersão significativa. Entretanto, BMD3, SUM3 e SUM4, por sua vez, demonstram uma baixa variabilidade, com CV em torno de 4%, indicando que suas concentrações estão mais agrupadas em torno das médias. Por outro lado, em PDSU os dados apresentam uma dispersão moderada.

Tabela 13 – Estatística descritiva dos dados obtidos para o parâmetro da dureza total

	Média	DesvPad	CV	Mínimo	Máximo
BMD1	326,7	36,4	11,15	297,5	367,5
BMD2	353,3	23,2	6,57	327,5	372,5
BMD3	385	15	3,9	370	400
BMD4	632	176	27,84	432	763
SUM1	739,2	61,5	8,31	670	787,5
SUM2	402,5	81,7	20,31	340	495
SUM3	370	15	4,05	355	385
SUM4	211,67	10,1	4,77	200	217,5
SUM5	405	82,9	20,46	312,5	472,5
PDSU	444,2	52	11,72	402,5	502,5

Fonte: Autoral (2024).

5.2 ANÁLISE DA CONFORMIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COM AS NORMAS VIGENTES PARA POTABILIDADE

A análise da conformidade das águas subterrâneas com as normas vigentes é essencial para garantir que a qualidade da água destinada ao consumo humano não exceda os limites estabelecidos para potabilidade. No Brasil, esses limites são determinados pela Portaria nº 2.914/2011, pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e pela Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, prevenindo, assim, riscos significativos à saúde humana. Ademais, o uso seguro desse recurso é particularmente importante em regiões com formações geológicas distintas, como os terrenos cristalinos do semiárido nordestino, onde a alta salinidade é uma característica frequente, resultante de fatores como baixa precipitação e evaporação intensa (Zoby, 2008).

Nesse ensejo, os dados da Tabela 14 indicam que, dos parâmetros analisados, apenas o pH das amostras dos poços da zona rural de Brejo da Madre de Deus codificados de BMD1, BMD2, BMD3 e BMD4 e do distrito Sucuru PDSU encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela legislação 6,5 a 9,0, com valores variando de 6,71 a 7,08. No entanto, os demais parâmetros ultrapassam os limites permitidos, como sólidos totais dissolvidos de 1428 a 2166 mg L⁻¹, cloretos

de 625,1 a 953,6 mg L⁻¹, sódio de 236 a 1155 mg L⁻¹ e dureza total com concentração de 326,7 a 632 mg CaCO₃ L⁻¹, apresentando inconformidade com as normativas.

Tabela 14 – Resultado da qualidade da água dos poços localizados na zona rural de Brejo da Madre de Deus, Pernambuco, e no distrito Sucuru, pertencente ao município de Serra Branca, Paraíba

Parâmetro	Unidade	BMD1	BMD2	BMD3	BMD4	PDSU	VPM
pH		6,71	7	7,3	6,83	7,08	6,5 – 9,0
CE	μS cm ⁻¹	3603,7	4181	4332	3549	2855	-
STD	mg L ⁻¹	1802	2090,3	2166	1774,3	1428	500 mg L ⁻¹
Cl ⁻	mg L ⁻¹	798,8	849,3	953,6	952,4	625,1	250 mg L ⁻¹
Na ⁺	mg L ⁻¹	579,3	1155	917	469,3	236	200 mg L ⁻¹
K ⁺	mg L ⁻¹	5	19,7	10,7	6,33	6	-
Dureza total	mg CaCO ₃ L ⁻¹	326,7	353,3	385	632	444,2	300 mg L ⁻¹

Fonte: Autoral (2024).

A avaliação da qualidade da água proveniente dos poços situados no bairro Frei Damião, no município de Sumé, Paraíba, revelou resultados preocupantes em diversos parâmetros, conforme demonstrado na Tabela 15. O pH das amostras variou entre 7,02 e 8,2, mantendo-se dentro da faixa considerada ideal para a potabilidade. Contudo, a condutividade elétrica apresentou uma variação significativa, com a amostra SUM1 atingindo $3833 \mu\text{S cm}^{-1}$, o que indica uma elevada concentração de sólidos dissolvidos. Os sólidos totais dissolvidos excederam o limite preconizado de 500 mg L^{-1} , com a amostra SUM1 alcançando $1916,7 \text{ mg L}^{-1}$. Os níveis de cloretos também ultrapassaram o limite de 250 mg L^{-1} , sendo a amostra SUM1 a mais crítica, com 865 mg L^{-1} .

No entanto, a amostra SUM4 apresentou um pH de 7,7, CE de $1144 \mu\text{S cm}^{-1}$, STD de $571,7 \text{ mg L}^{-1}$, cloretos de $108,13 \text{ mg L}^{-1}$, sódio de 174 mg L^{-1} , potássio de 18 mg L^{-1} e dureza total de $211,67 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, apresentando maior conformidade com as normativas. Todavia, mesmo assim, os valores ainda se encontram acima dos padrões exigidos para sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica. É importante destacar que, embora a legislação não estabeleça um limite máximo para o parâmetro de condutividade elétrica, altos valores de CE indicam uma elevada mineralização da água, o que pode resultar em um sabor desagradável, tornando seu consumo não recomendado (Rocha, 2008).

Tabela 15 – Resultado da qualidade da água dos poços localizados no bairro Frei Damião, pertencente ao município de Sumé, Paraíba

Parâmetro	Unidade	SUM1	SUM2	SUM3	SUM4	SUM5	VPM
pH		7,06	7,02	7,12	7,7	8,2	6,5 – 9,0
CE	$\mu\text{S cm}^{-1}$	3833	2056	2188	1144	1746	-
STD	mg L^{-1}	1916,7	1027,7	1093,7	571,7	873	500 mg L^{-1}
Cl^-	mg L^{-1}	865	373,4	309,6	108,13	332	250 mg L^{-1}
Na^+	mg L^{-1}	183,7	197	218,3	174	171	200 mg L^{-1}
K^+	mg L^{-1}	12	15	12	18	17	-
Dureza total	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	739,2	402,5	370	211,67	405	300 mg L^{-1}

Fonte: Autoral (2024).

5.3 IMPACTO DO TRATAMENTO NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A água subterrânea, ao percolar por formações geológicas ricas em minerais como calcário ou dolomita, pode sofrer a dissolução de íons, resultando em uma composição altamente mineralizada. Esse processo de mineralização frequentemente confere à água características salinas ou salobras, tornando-a imprópria para o consumo humano direto. Para viabilizar seu uso como fonte de água potável, torna-se imprescindível a aplicação de tecnologias de dessalinização. Este processo tecnológico visa a remoção eficiente de sais dissolvidos, além da eliminação ou redução de outros compostos químicos, orgânicos e biológicos, assegurando a potabilidade da água conforme os padrões estabelecidos (Gaio, 2016).

Nesse contexto, no distrito de Sucuru, conforme discutido na metodologia, o sistema de tratamento, que permaneceu inoperante por meses, foi restabelecido durante a última coleta desta pesquisa. Isso permitiu a comparação entre a qualidade da água bruta e tratada, fundamental para a análise, uma vez que a população utiliza essa água tanto para consumo quanto para o preparo de alimentos.

Dessa forma, o processo de dessalinização iniciou-se com o bombeamento da água salobra do poço tubular para um reservatório de água bruta. Consequente, a água foi conduzida ao dessalinizador da marca VEGA, equipado com membranas Lewabrane, responsáveis pela separação da fração salina, resultando em água de qualidade adequada para o consumo. Após o tratamento, a água dessalinizada foi armazenada em um reservatório de água doce, de onde foi finalmente distribuída para a comunidade.

Consequentemente, ao examinar a Tabela 16, a análise comparativa entre a água bruta e a tratada no distrito de Sucuru, evidencia uma melhoria significativa na qualidade da água. A condutividade elétrica foi reduzida de 3200 para 82 $\mu\text{S cm}^{-1}$, e os sólidos dissolvidos totais diminuíram de 1600 para 41 mg L^{-1} , ficando bem abaixo do valor permitido de 500 mg L^{-1} . A concentração de cloretos decaiu de 691,28 para 35,45 mg L^{-1} , e o sódio, de 237 para 21 mg L^{-1} , ambos atendendo aos limites regulamentares de 250 mg L^{-1} e 200 mg L^{-1} , respectivamente. A dureza total foi reduzida de 502,5 para 32,5 $\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$, também em conformidade com o valor máximo permitido de 300 mg L^{-1} .

Tabela 16 – Comparativo dos resultados obtidos nas amostras sem tratamento e com tratamento, como também, avaliação da conformidade da água tratada com a legislação

Parâmetro	Unidade	PDSU Bruta	PDSU Tratada	Remoção (%)	VPM
pH		7,51	8,21		6,5 – 9,0
CE	$\mu\text{S cm}^{-1}$	3200	82	97,44	-
STD	mg L^{-1}	1600	41	97,44	500 mg L^{-1}
Cl^-	mg L^{-1}	691,28	35,45	94,87	250 mg L^{-1}
Na^+	mg L^{-1}	237	21	91,14	200 mg L^{-1}
K^+	mg L^{-1}	6	0	100	-
Dureza total	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	502,5	32,5	93,53	300 mg L^{-1}

Fonte: Autoral (2024).

6 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos das três áreas delimitadas e dos dez poços analisados, conclui-se que as características físico-químicas das águas subterrâneas analisadas apresentam variações significativas entre os diferentes poços e regiões.

Destaca-se a elevada mineralização, com concentrações expressivas de cloretos e sódio, principalmente nos poços localizados no município de Brejo da Madre de Deus - PE.

Observou-se, ainda, que os pontos de Sumé - PB exibem concentrações inferiores às do grupo BMD. No entanto, há variações intrarregionais, com o ponto SUM1 apresentando valores comparáveis aos dos poços do grupo BMD, superiores aos demais pontos de Sumé - PB.

O ponto PDSU, situado no distrito de Sucuru, revelou concentrações intermediárias dos parâmetros físico-químicos em relação às demais regiões, embora similares aos demais pontos de Sumé - PB.

Essas condições, associadas à geologia local do semiárido cristalino e a possíveis influências antrópicas, comprometem a qualidade da água, colocando a maioria dos poços fora dos padrões de potabilidade estabelecidos pelas Portarias nº 2.914/2011 e nº 888/2021 do Ministério da Saúde e pela Resolução CONAMA nº 357/2005. A única exceção foi o poço SUM4, que apresentou valores mais próximos dos limites máximos estabelecidos, ainda que com concentrações elevadas de STD e condutividade elétrica.

Ademais, o sistema de dessalinização implementado pela prefeitura no distrito de Sucuru demonstra ser uma solução eficaz, removendo cerca de 90% dos sais e adequando a água aos requisitos para o consumo humano, de acordo com os padrões físico-químicos.

É importante salientar que os dados obtidos neste estudo foram disponibilizados aos proprietários que demonstraram interesse em conhecer a qualidade da água de seus poços. As informações foram apresentadas por meio de laudos técnicos, contendo os resultados das análises e os parâmetros de referência estabelecidos pelo Ministério da Saúde para potabilidade.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, torna-se evidente a importância de avaliações da qualidade das águas subterrâneas, especialmente aquelas destinadas ao consumo humano. A presença excessiva de sais ou a contaminação microbiológica elevada pode representar sérios riscos à saúde pública. Nesse contexto, algumas medidas se mostram essenciais para a gestão e melhoria da qualidade da água:

- Realização de análises microbiológicas, com foco na detecção e quantificação de *Escherichia coli* e coliformes totais, que são indicadores primários de contaminação fecal e refletem a potabilidade da água;
- Análises físico – químicas do solo, com destaque para região dos poços em estudo no município de Brejo da Madre de Deus – PE, são igualmente necessárias para compreender as interações entre o solo e a qualidade da água subterrânea;
- Ampliação do período de monitoramento sazonal para, pelo menos, um ciclo anual completo, permitindo uma análise mais robusta das variações sazonais e climáticas que possam influenciar a qualidade da água;
- Expansão do monitoramento da qualidade da água dessalinizada fornecida a comunidade do distrito Sucuru;
- Testagem de filtros de baixo custo como alternativas acessíveis para a remoção de contaminantes físico-químicos e microbiológicos. Filtros de barro, por exemplo, são amplamente reconhecidos por sua eficiência e viabilidade econômica, sendo uma solução promissora para comunidades vulneráveis e áreas com acesso limitado a tecnologias de tratamento mais avançadas. A adoção de filtros de baixo custo pode ser uma estratégia eficaz para mitigar os impactos da contaminação em áreas de maior vulnerabilidade socioeconômica.

REFERÊNCIAS

- AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas. Rio Paraíba, 2024. Disponível em < <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/comite-de-bacias/rio-paraiba/> >, acesso em 16 de outubro de 2024.
- ANA a -Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores. 2. Ed., Brasília, p.112, 2022.
- ANA b -Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Comitê de bacia hidrográfica: o que é e o que faz?. v.1, Brasília, p.122, 2022.
- ANA c -Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Governanças das águas subterrâneas: desafios e caminhos. Brasília, p.202, 2022.
- ANJOS, D. S. **Análise microbiológica e físico – química da água de poços artesianos que abastecem moradores da zona rural do município de Itabaiana, Sergipe.** Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) – Universidade Federal de Sergipe, p. 77, 2023.
- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Climas. Bacia do Rio Capibaribe, 2024. Disponível em < <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/162-bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/193-bacia-do-rio-capibaribe> >, acesso em 16 de outubro de 2024.
- APHA, A. W. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19 ed. Washington, DC. American Public Health Association. American Water Works Association, Water Pollution control Federation, 1995.
- BONIFÁCIO, C. M.; NÓBREGA, M. T. Parâmetros de qualidade da água no monitoramento ambiental. Recursos hídricos: Gestão, planejamento e técnicas em pesquisa, cap. 1, p. 219-232, 2021.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 18 de março de 2005.
- BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH. Resolução CNRH n° 32 de 15 de outubro de 2003. Institui a Divisão Hidrográfica Nacional. Diário da União, Brasília, 17 de dezembro de 2003.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS. Brasília: FUNASA, 2014.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n.º 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 14 de dezembro de 2011.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS n.º 888, de 04 de maio de 2021. Altera o anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n. 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os

procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, ano 159, n. 85, p. 126 - 137, 07 mai. 2021.

CAMPOS, L. M. V *et al.* Qualidade da água destinada ao consumo humano em Iguatama, MG, Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 16, 2019.

CERON, L. P. A polêmica do sódio na água mineral. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2014.

CHAVES, S. C. S. *et al.* Caracterização hidroquímica de águas subterrâneas da Região Metropolitana do Recife – PE. **Diversitas Journal**, ISSN 2525-5215, v. 7, nº 4, p. 2391 – 2398, Santana da Ipanema/AL, 2022.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo Hidrologia. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 151, 2008.

CORDEIRO, A. Apostila de Hidrologia. Curso de Engenharia Civil – Universidade de Blumenau, Santa Catarina, p. 107, 2013.

COSTA, W. D. Problemática da água subterrânea no Nordeste brasileiro. *Águas Subterrâneas*, 14 (1), p. 29, 1995.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. SUMÉ – FOLHA SB.24-Z-D-V. Brasília – DF: CPRM, 2000.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por águas subterrâneas. Diagnóstico do município de Brejo da Madre de Deus, estado de Pernambuco. Recife, p. 11, 2005.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por águas subterrâneas. Diagnóstico do município de Serra Branca, estado da Paraíba. Recife, p. 11, 2005.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrología subterránea. 2. ed. Barcelona, OMEGA, p. 1200, 1987.

FARIAS, D. S. C. R. *et al.* Águas subterrâneas com elevados teores de sais contribuindo para elevar a salinidade das águas superficiais. CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, Belém do Pará, Brasil, 2017.

FAY, E. *et al.* Análises físicas, químicas e microbiológicas e qualidade da água. Cap. 2, Embrapa Semiárido, p. 9-14, 2008.

FEITOSA, F. A. C.; DINIZ, J. A. O. Água subterrânea no cristalino da região semiárida brasileira. *Águas Subterrâneas*, p. 4, 2011.

FILHO, J. F. **Qualidade das águas subterrâneas rasas do aquífero Barreiras**: estudo de caso em Benevides – PA. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (PPRH), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

GAIO, S. S. M. **Produção de água potável por dessalinização**: tecnologias, mercado e análise de viabilidade econômica. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, p.90, 2016.

GOOGLE EARTH. Google Earth Versão 10.64.0.3. Disponível em: <https://earth.google.com>, acesso em 15 de julho de 2024.

HIRATA, R. *et al.* **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: IGc/USP, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/9788563124074>>, acesso em: 16 out. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Bacias e divisões hidrográfica. Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro, p. 164, 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo, 2022. Disponível em: <IBGE | Cidades@ | Pernambuco | Brejo da Madre de Deus | Panorama>, acesso em 15 de julho de 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Perfil dos Municípios Brasileiros. Coordenação de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro, p. 106, 2017. Disponível em: [496bb4fbf305cca806aaa167aa4f6dc8.pdf](https://ibge.gov.br/496bb4fbf305cca806aaa167aa4f6dc8.pdf) (ibge.gov.br), acesso em 17 de outubro de 2024.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4ª ed. São Paulo, p. 1020, 2008.

JATOBÁ, L; SILVA, H. J.; SILVA, A. F. Caracterização geoambiental da área de exceção do Brejo da Madre de Deus – PE. **Rev. Ciência Geográfica**, Bauru, ano XXIII, p. 758 – 772, 2019.

JESUS, I. P. S. **Caracterização dos aquíferos em meio cristalino da porção oeste da Bacia do Alto Tietê**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo, p.224, São Paulo, 2005.

LIMA, F. V. M. S. **Análise espaço-temporal do armazenamento total de água utilizando GRACE e imagens MODIS**: estudo de caso na região hidrográfica do atlântico nordeste oriental. TCC (Graduação) – Centro de Engenharia e Cartografia e de Agrimensura, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

LIMA, J. M. P. *et al.* Mapeamento e caracterização das águas subterrâneas usadas para a irrigação na região do Distrito de Vazantes, Aracoiaba – CE. **Irriga, Inovagri, Botucatu**, v. 28, n. 3, p. 479-490, 2020.

LOPES, J. R. A. *et al.* Águas subterrâneas como alternativa de subsistência em uma comunidade rural no semiárido brasileiro. **Águas Subterrâneas – Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, 2020

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Águas subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas Petrobras – ABAS, I CONGRESSO AQUÍFERO DO GUARANI, p. 40, Brasília, 2007.

NAKAMURA, C. Y. *et al.* Avaliação da qualidade da água subterrânea no entorno de um aterro sanitário. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS. Ed. 28. N° 2, p. 28 – 40, 2014.

NASCIMENTO, J. D. S. *et al.* Avaliação físico-químicas de águas pluviais e poços tubulares do município de Sumé. Submetido à publicação no XVII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, João Pessoa, Paraíba, 2024.

PARRON, L. M; MUNIZ, D. H. F; PEREIRA, C. M. Manual de Procedimentos de amostragem e análise físico – químicas de água. Embrapa Florestas, p. 63, 2011.

PONTES, H. S. *et al.* Análise Hidroclimática da Região de Serra Branca, PB. Água, Desenvolvimento Econômico e Socioambiental - XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2013.

RÊGO, R. L. C. M. **Análise da qualidade da água de poços no entorno de um açude urbano em Campina Grande – PB.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, p. 75, 2018.

ROCHA, T. S. **Avaliação da qualidade das águas dos poços tubulares da Bacia do Rio Peixe equipamentos com dessalinizadores, com vistas ao aproveitamento econômico dos sias de rejeito.** Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Ambiental – DEA, p. 96, 2008.

SALGADO, J. P. **Influência do lançamento de esgotos na qualidade das águas do aquífero aluvial do rio Sucuru, no município de Sumé-PB.** 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1284>

SANTOS, A. C. **Noções de hidroquímica. Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3ª. ed. - Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, cap. 5.1, p. 325-357, 2008.

SILVA, S. A; OLIVEIRA, R. Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias. Campina Grande, Paraíba, 2002.

STIVANIN, S.C.B. **Desequilíbrio eletrolítico: sódio, potássio e cloro.** Seminário apresentado na disciplina Transtornos Metabólicos dos Animais Domésticos, Programa de Pós-Graduação em Ciências Veterinárias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 10, 2014.

VILLELA S. M. e MATTOS A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill,1975.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2ª ed. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WATER SCIENCE SCHOOL. O Ciclo d'água, The water cycle, Portuguese. Science for a changing world, 2017.

ZOBY, J.L.G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. Águas subterrâneas, 2008. Disponível em < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23802>>, acesso em 12 de outubro de 2024.