



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

DIVISÃO DA AGRICULTURA

ENGENHARIA HIDRÁULICA AGRÍCOLA E ÁGUA RURAL

Monografia Científica

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA
UTILIZADA PARA O ABASTECIMENTO PÚBLICO NO POSTO
ADMINISTRATIVO DE LIONDE, DISTRITO DE CHÓKWÈ.**

Autor: Simião Celeste

Tutora: Eng^a. Philippa Ncube

Cotutor: Eng^o. Paulo Sérgio Lourenço Saveca

Lionde, Outubro de 2023



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

Monografia de investigação científica sobre a caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas utilizadas para o abastecimento público no posto administrativo de Lionde, apresentada ao Curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural na Divisão de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito parcial para fim das actividades de investigação no âmbito de trabalho de culminação de curso em forma de monografia científica.

Monografia científica defendida e aprovada no dia 17 de Outubro de 2023

Júri:

Supervisora (1): Phillipa Nwagwaga Ncube
(Phillipa N. Ncube)

Avaliador (1): Enoque Moiane
(Enoque Moiane)

Avaliador (2): Algardás Mabunda
(Algardás Mabunda)

Lionde, 31 de outubro de 2023

ÍNDICE

I.	Introdução.....	15
1.1.	Objetivos.....	16
1.1.1.	Geral.....	16
1.1.2.	Específicos.....	16
1.2.	Problema de Estudo e Justificativa.....	17
1.3.	Questão de estudo.....	18
II.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1.	Ciclo hidrológico.....	19
2.2.	Poços tubulares.....	20
2.3.	Intemperismo.....	20
2.4.	Hidrogeoquímica.....	20
2.5.	Parâmetros físico-químicos da água subterrânea.....	21
2.5.1.	Potencial hidrogeniônico.....	22
2.5.2.	Condutividade elétrica.....	22
2.5.3.	Sólidos totais dissolvidos.....	23
2.5.4.	Temperatura.....	24
2.5.5.	Alcalinidade.....	24
2.5.6.	Sulfatos.....	24
2.5.7.	Cloretos.....	25
2.5.8.	Cálcio.....	25
2.5.9.	Magnésio.....	26
2.6.	Classificação hidroquímica das águas subterrâneas.....	26
2.6.1.	Fácies hidroquímicas.....	26
2.6.2.	Diagrama de piper.....	26
2.7.	Modelagem Geoquímica.....	28
III.	METODOLOGIA.....	30

3.1.	Caracterização da área de estudo	30
3.1.1.	Clima e Hidrologia.....	30
3.2.	Identificação dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas	32
3.2.1.	Amostragem.....	32
3.2.2.	Procedimentos para identificação dos parâmetros físico-químicos	33
3.3.	Classificação hidroquímica das águas subterrâneas.....	34
3.4.	Índice de saturação e especiação química	35
3.5.	Análise estatística.....	36
IV.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1.	Parâmetros físico-químicos	37
4.1.1.	Balanco iônico	37
3.1.	Classificação Hidroquímica	46
3.2.	Modelagem Geoquímica	48
IV.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	51
V.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
VI.	ANEXOS	56

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação (1): Balanço Hídrico.....	19
Equação (2): Sólidos Dissolvidos Totais	23
Equação (3): Erro de Balanço Iônico.....	34
Equação (4): Índice de Saturação	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico.....	19
Figura 2: Diagrama de Piper	27
Figura 3: Mapa de localização do distrito de Chókwè.....	30
Figura 4: Mapa geológico da área de estudo.....	32
Figura 5: Imagem ilustrativa dos pontos de amostragem.	33
Figura 6: Concentrações do PH em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.....	38
Figura 7: Concentrações de CE em distintos pontos de amostragem e seu limite na norma do INNOQ para fins de consumo.....	39
Figura 8: Concentrações de Sólidos Totais Dissolvidos nas águas subterrâneas em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.....	40
Figura 9: Concentrações de Cl em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.....	41
Figura 10: Concentrações de dureza total em diferentes pontos de amostragem e os limites das normas do INNOQ para fins de consumo	42
Figura 11: Concentrações de sódio em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo	42
Figura 12: Concentrações de sulfatos em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.....	43
Figura 13: Concentrações de cálcio em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.	43
Figura 14: Concentrações de Magnésio em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.....	44

Figura 15: Concentrações de Potássio em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.....	45
Figura 16: Diagrama trilinear de piper, referente a classificação hidroquímica das águas em estudo.	47
Figura 17: Resultados geoquímicos da área em estudo relativo aos índices de saturação dos minerais presentes na área em estudo.	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Iões mais comuns presentes nas águas subterrâneas.....	21
Tabela 2: Condutividades elétricas teóricas para diferentes tipos de água.	23
Tabela 3: Faixas de concentração de sólidos dissolvidos para diferentes tipos de água.	23
Tabela 4: Localização dos pontos de amostragem.....	33
Tabela 5: Fases e reações usadas na modelagem geoquímica.	36
Tabela 6: Erro de Balanço Iônico referente as amostras das águas subterrâneas.	37
Tabela 7: Estatística descritiva dos resultados físico-químicos.....	46
Tabela 8: Resultados físico-químicos da água do Local de estudo	56
Tabela 9: Coeficientes de correlação de Pearson (r) para os parâmetros físico-químicos avaliados nas águas subterrâneas	56



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

Monografia de investigação científica sobre a caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas utilizadas para o abastecimento público no posto administrativo de Lionde, apresentada ao Curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural na Divisão de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural.

Tutora: Eng^a. Philippa Ncube

Cotutor: Eng^o. Paulo Sérgio Lourenço Saveca

LISTA DE ABREVIATURAS

CE – Condutividade Elétrica;

CON – Conhane;

INNOQ – Instituto Nacional de Normalização da Qualidade;

IS – Índice de saturação;

LIO – Lionde;

MAP – Mapapa;

MAS – Massavasse;

mm – Milímetros;

NWA – Nwachicoluane;

pH – Potencial Hidrogeniônico;

T °C – Temperatura;

STD – Sólidos Totais Dissolvidos.



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

DECLARAÇÃO

Declaro por minha honra que este trabalho de culminação do curso é resultado da minha investigação pessoal e das orientações dos meus tutores, o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente citadas no texto e na bibliografia final. Declaro ainda que este trabalho não foi apresentado em nenhuma outra instituição para propósito semelhante ou obtenção de qualquer grau académico.

Lionde, Outubro de 2023

(Simião Celeste)

Dedicatória

À Deus, que desde a infância sempre me ajudou a superar os meus medos e a atingir os meus objetivos. Que me dá a alegria e a força para continuar, quando nada parece estar certo, acompanha-me e ajuda-me a seguir em frente.

Aos meus avôs, Bernardo Notiço Halar "*in memorian*" e Matilde Zefanias Nhambe, que com o seu apoio e conselho incondicional conseguiram alcançar esse objetivo.

A minha mãe, Celeste, que incansavelmente batalhou para a formação do seu primogénito.

A minha tia, Joana Natividade, que me tem velado para ter um futuro melhor.

Aos meus irmãos, Matilde, Natália (*in memorian*) e Santos, por sempre me darem o seu apoio e amizade.

Agradecimentos

Agradeço à Deus em primeiro lugar, por tudo que tem me proporcionado, por ter guiado e iluminado o meu caminho até aqui, pela sabedoria para conduzir os experimentos e fé para superar os obstáculos. *“o senhor é o meu refúgio e a minha fortaleza, o meu Deus, em quem eu confio”*. (Salmos 91:2)

A minha família que sempre me apoiou e nunca me deixaram desistir nos momentos difíceis.

A minha avó, pelo amor incondicional, carinho, dedicação, apoio, por tudo que fez, faz e fará por mim. Você é a pessoa mais importante da minha vida, amo-te demais.

Aos meus pais que com seus sacrifícios, exemplos e guias ajudam-me a seguir de forma perseverante aos meus ideais, que Deus os abençoe.

A minha tutora Eng.^a Philippa Ncube e meu Cotutor Eng.^o Paulo Lourenço Saveca, pelo acolhimento, por todo apoio, dedicação, pela paciência, comprometimento, incentivo e suporte para realização do presente trabalho.

Ao Professor Doutor Jorge Manuel Rodrigues Tavares, do Instituto Politécnico de Beja (IPBeja), Portugal, pela paciência, dedicação e apoio na elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas do Instituto Superior Politécnico de Gaza (ISPG), pela amizade e acompanhamento durante os longos 4 anos.

Aos meus colegas do Instituto Politécnico de Beja, Daniela Lopes de Miranda (do Instituto Federal de Santa Catarina e em mobilidade pelo IPBeja) e Elidérico Artur Mabécua, pelo apoio na compreensão de alguns softwares e na elaboração do presente trabalho.

Aos Amigos Válder Vidigal Cavele e Romário Joaquim Marrengula por todo apoio na elaboração desse trabalho.

“O sucesso nasce do desejar, da determinação e perseverança em chegar-se a um objetivo. Mesmo se não forem alcançados os objetivos almejados, quem explora e supera obstáculos, no mínimo fará coisas esplêndidas”.

José de Alencar.

Resumo

As águas subterrâneas são um recurso natural importante para o abastecimento doméstico. No entanto, este recurso tem sofrido algumas alterações no que diz respeito à sua qualidade para consumo, devido a alguns processos naturais e induzidos de salinização. O processo de salinização de águas subterrâneas em áreas semiáridas tem sido um problema estudado ao longo dos anos, visando identificar os processos geoquímicos atuantes, as prováveis fontes e acelerar as medidas de mitigação quanto à composição dessas águas. Na mesma visão, os principais processos que desencadeiam essas mudanças são, nomeadamente, a precipitação atmosférica, o intemperismo químico e o processo de evaporação-cristalização. Sendo fatores secundários, o clima, o uso e ocupação do solo, entre tantos fatores que desencadeiem de certa forma os processos acima mencionados. O presente estudo elucidou a caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas utilizadas no abastecimento público no posto administrativo de Lionde, concretamente nas comunidades de Conhane, Lionde, Massavasse, Mapapa e Nwachicoluana, onde foram recolhidas 10 amostras em 5 poços tubulares, entre os meses de Setembro e agosto de 2022, nas quais foram obtidos os valores de pH, temperatura, condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD) e dos iões Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} e HCO_3^- . As análises geoquímicas das águas foram procedidas tendo em conta a sua dominância aniónica e cationica, pelo Diagrama de Piper, classificaram-se como 100% cloretada mista, e seguidas de várias demonstrações envolvendo processos principais de mineralização, utilizando o software *Phreeqc*. A simulação mostrou ainda, como resposta ao processo sucessivo de evaporação, um possível desenvolvimento dos iões de Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} nas águas, respetivamente. As mesmas simulações, mostraram que uma possível troca iónica reversa tenha promovido a subtração da concentração do ião de sódio, estimulando assim, o aumento progressivo das concentrações dos iões de Ca^{2+} e Mg^{2+} , respetivamente. Com a sua superfluidade, houve supersaturação e precipitação das fases minerais carbônicas, calcite e dolomite, e dissolução de gipsites, halite e silvite.

Palavras-chave: Geoquímica, fácies hidroquímicas, hidrogeoquímica das águas subterrâneas, Lionde.

Abstract

Groundwater is an important natural resource for domestic supply. However, this resource has undergone some changes regarding its quality for consumption, due to some natural and induced salinization processes. The salinization process of groundwater in semi-arid areas has been a problem studied over the years, aiming to identify the active geochemical processes, the likely sources and accelerate mitigation measures regarding the composition of these waters. In the same view, the main processes that trigger these changes are, namely, atmospheric precipitation, chemical weathering, and the evaporation-crystallization process. Secondary factors include climate, land use and occupation, among many factors that trigger the aforementioned processes in a certain way. The present study elucidated the hydrogeochemical characterization of groundwater used in public supply in the administrative post of Lionde, Chókwè district, where 10 samples were collected in 5 tubular wells, between the months of September and August 2022, in which the values were obtained pH, temperature, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (STD) and Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} and HCO_3^- ions. The geochemical analyzes of the waters were carried out taking into account considering their anionic and cationic dominance, using the Piper Diagram, and followed by several demonstrations involving main mineralization processes, using the *Phreeqc* software. The simulation also showed, as a response to the successive evaporation process, a possible development of Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} ions in the water, respectively. The same simulations showed that a possible reverse ion exchange promoted the subtraction of the sodium ion concentration, thus stimulating the progressive increase in the concentrations of Ca^{2+} and Mg^{2+} ions, respectively. With its superfluity, there was supersaturation and precipitation of the carbonic mineral phases, calcite and dolomite, and dissolution of gypsum, halite and sylvite.

Keywords: Geochemical, hydrochemical facies, Groundwater hydrogeochemistry, Lionde.

I. INTRODUÇÃO

Água subterrânea é em geral, é tida como aquela que se encontra sob a superfície da terra, com limites fixados entre uma camada impermeável ou permeável na sua base e uma superfície freática no topo. Ela, é tida como uma solução liquefeita de vários elementos e compostos em diferentes estados (líquidos, sólidos e gasosos), em inúmeras porções procedentes do ar no decorrer do processo de condensação e precipitação, dos solos e das rochas, nas quais circunda ou é mantida e do contato com as diversas atividades humanas. (Ribeiro, 2018).

A composição química destas águas, geralmente, deriva da liquefação das distintas espécies iônicas provenientes do progresso geoquímico local e proporcionada, geralmente, pelo contato entre a água e as rochas que compõem de certa forma os aquíferos da região e pela água infiltrada no solo. (Leite *et al.*, 2021). A cedência de catiões e aniões nas águas subterrâneas e, concludentemente, a sua caracterização química, normalmente estão associadas ao processo de intemperismo gerado pelo CO₂ dissolvido vindo da recarga das águas subterrâneas, possibilitando assim, evoluções distintas em função do tipo da litologia e dos minerais integrantes da rocha. (Bonotto, 2016 & Varnier *et al.*, 2017).

O contato entre a água subterrânea, as rochas e os seus minerais, bem como o seu progresso dentro do sistema-aquífero através de processos como a precipitação e dissolução, e a sua conexão com a qualidade da água, tem sido objeto frequente de pesquisas atuais. Em condições normais, estas interações, são as principais causas responsáveis pela qualidade das águas subterrâneas. Sendo assim, a qualidade da água e a quantidade são fatores importantes sob o aspeto hidrogeológico. (Roberto, 2010)

Conforme diz o (Pereira *et al.*, 2020), apesar de serem desconhecidas as disponibilidades hídricas subterrâneas, o seu papel no abastecimento é essencial ao verificar-se o número de áreas abastecidas por poços, nesta circunstância, as águas subterrâneas tornam-se cada vez mais parte da solvência para as limitações hídricas.

Os estudos hidrogeoquímicos, são feitos, na sua maioria, com o intuito de reconhecer e calcular às principais características e componentes químicas presentes nas águas subterrâneas e procurar instituir, de certa forma, uma conexão com o meio físico, sendo esses os principais carnis formadores de rochas e solos.

A qualidade da água é definida pelas espécies químicas nela dissolvidas e pelas consequências que esses compostos podem acarretar ao homem, ao meio ambiente ou às atividades nas quais é utilizada (Roberto, 2010). Ainda no mesmo contexto, o autor afirma que diversos fatores, quer seja intrínseco ou extrínseco podem afetar a qualidade das águas subterrâneas. Em princípio, a água subterrânea tende a acumular as concentrações de substâncias diluídas à medida que vai percorrendo os distintos aquíferos. Entretanto, vários fatores complementares tais como o clima, a composição da água de recarga, o tempo de contato água/meio físico, entre outros, podem interferir na qualidade dessas águas. (Roberto, 2010)

A água é o solvente mais abastado, com a capacidade de integrar imensas porções de substâncias ao meter-se em contato com os minerais integrantes dos solos e rochas nos quais circunda. Por esta ser quimicamente ativa, tem de certa forma, o poder natural de liquefazer e reagir com as substâncias orgânicas ou inorgânicas distintas. Com o intuito de compreender o que ocorre ao longo do caminho de fluxo subterrâneo, alguns programas foram desenvolvidos, dentre eles destaca-se o aplicativo *Phreeqc* (Parkhurst & Appelo, 2013), com o qual se pode realizar a modelagem hidrogeoquímica das águas, na tentativa de determinar os processos que ocorrem no caminho evolutivo que determinam a composição química dessas águas. (Roberto, 2010)

O presente trabalho teve como objetivo, caracterizar a hidrogeoquímica das águas subterrâneas utilizadas para o abastecimento público no Posto Administrativo de Lionde, Distrito de Chókwè.

1.1.Objectivos

1.1.1. Geral

- ✓ Caracterizar a hidrogeoquímica da água subterrânea utilizada para o abastecimento público no posto administrativo de Lionde.

1.1.2. Específicos.

- ✓ Identificar a composição dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea do posto administrativo de Lionde e sua especiação química;
- ✓ Classificar a hidroquímica das águas subterrâneas do posto administrativo de Lionde e sua composição química;
- ✓ Analisar a geoquímica da água subterrânea do posto administrativo e seu índice de saturação.

1.2. Problema de Estudo e Justificativa

A água subterrânea patenteia comumente excelente qualidade físico-química, sendo adequada para o consumo humano, maioritariamente sem um prévio tratamento. A contaminação advém sempre que alguma transformação na água põe em risco à saúde ou o bem-estar de uma certa população. (Santos, 2011)

Possivelmente, o contágio das águas subterrâneas pode suceder por mecanismos naturais. A interação água-rocha faz com que a água solubilize algumas substâncias, em concentrações que a tornam não potável. Estes problemas, embora não tão comuns, sucedem em aquíferos onde a matriz mineral apresenta uma concentração elevada dessas substâncias, como por exemplo, nas áreas com anomalias geoquímicas. Os contaminantes mais comuns em zonas semiáridas são: cálcio, cloretos, magnésio e sódio, que promovem de certa forma, a salinização e a dureza do recurso hídrico, e em concentrações menores Potássio, nitratos, entre outros. (Santos, 2011)

Dessa maneira, a qualidade das águas subterrâneas assumiu um importante papel nessas regiões, a fim de assegurar o abastecimento público. Olhando para a qualidade desses recursos hídricos, a salinização mostra-se ser o principal problema a ser defrontado em regiões com características semiáridas, pois carrega a transformação química que envolve a concentração de sais solúveis em água aliado à sua origem, quer seja, antropogénica ou natural. (Santos, 2011)

A salinização das águas subterrâneas, de forma concreta, nas regiões com características semiáridas, têm estimulado uma grande procura por mecanismos ou meios que ajudam no controlo da sua química, de certa forma, e assim identificar os possíveis processos geoquímicos existente na região e suas prováveis fontes de proliferação, e com base nisto, apressar as futuras modificações concernente à composição química destas águas. (Santos, 2011)

No posto administrativo de Lionde, esta situação tem se mostrado bastante lamentosa olhando para o ponto em que uma grande porção da população recorre às água subterrânea, através dos poços tubulares, como sua fonte principal para o abastecimento. Portanto, para garantir a qualidade da água desta região, é necessário o desenvolvimento de ferramentas que permitam a análise e um diagnóstico deste ambiente, com o objetivo principal de colaborar

para o melhoramento da qualidade de vida da população beneficiada por esses recursos hídricos.

Nesse contexto, a investigação dos processos geoquímicos que controlam de certa forma a química da água deste local, tornou-se prioridade para este estudo.

Sendo assim, ponderado o risco à saúde pública dessas comunidades, relacionados à ingestão continuada de substâncias prejudiciais, fundamenta-se o alcance social e científico deste estudo.

1.3. Questão de estudo

A água subterrânea geralmente apresenta características aceitáveis para o consumo humano. Contudo, devido aos fatores naturais ou antropológicos que se fazem sentir no local de estudo, chegou-se a seguinte questão de estudo, como encontra-se a qualidade de água desta região para fins de abastecimento público e qual dos processos geoquímicos está a ocorrer nesta região?

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é considerado como sendo o agrupamento de todos os comportamentos hidrológicos de orientação das massas de água da face da terra ou do oceano para a atmosfera, e vice-versa, através do processo de evaporação e o seu regresso através do processo da precipitação. Esse processo acontece entre os oceanos, calotas de gelo, águas superficiais, águas subterrâneas e a atmosfera (Cruz, 2021). A figura 1 ilustra o processo do ciclo hidrológico.

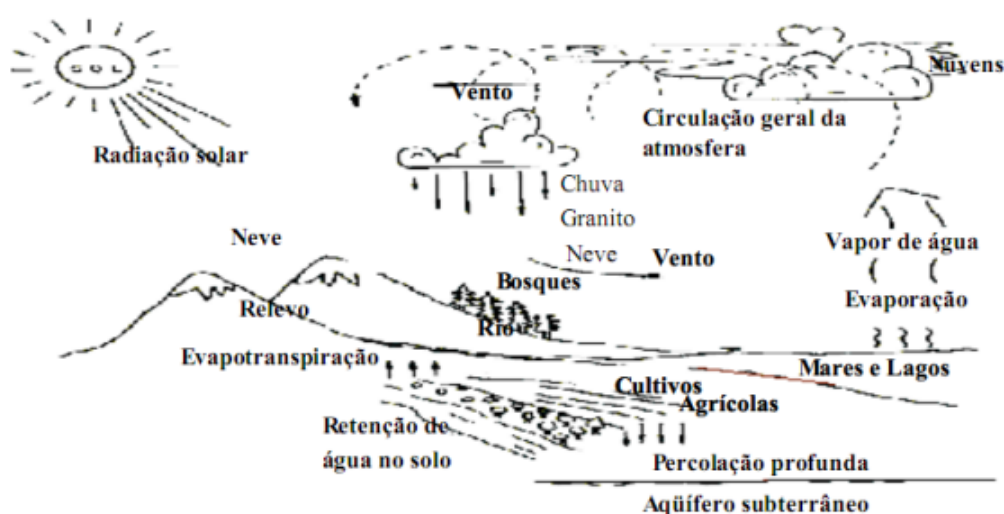


Figura 1: Ciclo hidrológico

Fonte: cruz (2021)

O balanço hídrico permite relacionar a vazão das águas subterrâneas com os componentes do ciclo hidrológico, sua determinação é baseada na aplicação do princípio de conservação de massa ou equação de continuidade (Equação 1), em uma região que possui volume e condições de contorno conhecidas. (Ramos, 2022).

$$E = S \pm \Delta S \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

E – Entradas (mm)

S – Saídas (mm)

ΔS – Variação de armazenamento (mm)

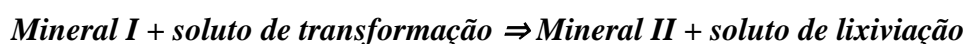
O ciclo hidrológico pode ser influenciado por algumas particularidades da bacia hidrográfica, tais como, a topografia, a vegetação, o tipo de solo (porosidade, tamanho dos grãos, profundidade e permeabilidade) e a quantidade e/ou intensidade de chuva. (Cruz, 2018).

2.2. Poços tubulares

Conforme diz o (Monção, 2021), são designados poços tubulares, aqueles perfurados para a captação de água subterrânea e que após a perfuração recebem um revestimento integrado de tubos sejam eles metálicos ou plásticos.

2.3. Intemperismo

O intemperismo é um método geoquímico que combina os processos físicos e químicos que sucede através da desagregação de rochas e putrefação química dos minerais que as compõem (minerais primários), levando assim, à formação de novos minerais (minerais secundários). Este processo, é conhecido por acontecer com ou sem a participação de seres vivos, todavia, com a participação esmagadora da água. A reação geral abaixo, mostra o processo de intemperismo químico:



O Mineral I corresponde a um mineral acoplado na rocha dura, ou seja, um mineral primário e o mineral II, corresponde a um mineral secundário. Esta reação pode estar subjugada às leis de equilíbrio, podendo esta ser acelerada, retardada ou mesmo ter resultados diferentes das fases anteriormente mencionadas, levando este a um caminho diferente. (Cruz, 2021).

O intemperismo químico é um conjunto de transformações químicas que desagrupam as rochas na superfície da Terra. Essas transformações alteram a rocha sã (não intemperada) em solo e ainda modificam o arranjo cristalino dos minerais, originando a neoformação de outros. (Guimarães, 2018).

2.4. Hidrogeoquímica

A hidrogeoquímica é uma ciência interdisciplinar que combina análises químicas, biológicas e geológicas para analisar os processos e reações que afetam a distribuição e circulação de espécies químicas dissolvidas na água. (Ramos, 2022)

A Hidrogeoquímica une os conceitos fundamentais de Hidrogeologia e a Geoquímica, com o objetivo de estudar quimicamente as águas subterrâneas e superficiais, especificamente, a sua

relação existente entre suas particularidades químicas, a qualidade das águas e de sua geologia local e regional. (Júnior, 2017).

As substâncias minerais que podem ser encontradas dissolvidas na água são especialmente cátions (íons carregados positivamente) e aniões (íons carregados negativamente), dos quais os mais comuns são mostrados na Tabela 1, e com menos frequência pode ser encontrado o arsênio, boro, cádmio, cromo, estrôncio e manganês. (Ramos, 2022)

Tabela 1: Iões mais comuns presentes nas águas subterrâneas.

Catiões	Aniões
Cálcio (Ca^{2+})	Bicarbonato (HCO_3^-)
Magnésio (Mg^{2+})	Sulfatos (SO_4^{2-})
Sódio (Na^+)	Cloretos (Cl^-)
Potássio (K^+)	Nitratos (NO_3^-)
Ferro (Fe^{2+})	Silício (Si)

Fonte: (Ramos, 2022).

2.5. Qualidade de água

De acordo com os dizeres do (Silva, 2020), a qualidade da água é aclarada pelas diversas contaminações incorporadas a si por meio da capacidade de transportar partículas e das propriedades solventes da água e está diretamente ligada à sua quantidade, pelo fato de que é necessário um determinado volume para se dissolver, diluir e transportar substâncias (Constanço, 2016).

A avaliação da qualidade da água preconiza os possíveis usos, dentre os diversos existentes, que mais se adequem as suas características, levando a gestão dos recursos hídricos a uma otimização (Santos, 2016)

A avaliação da qualidade se dá pela análise das suas características físicas, químicas e biológicas, comparando-os com padrões estabelecidos para usos previsto, além da avaliação de seu regime hidrológico (Constanço, 2016; Silva, 2020). Sendo um solvente quimicamente ativo, a água exerce uma interação com as superfícies em contato, agregando substâncias orgânicas e inorgânicas promovendo transformação em suas características (Santiago, 2010; Santos, 2016).

Em Moçambique, os padrões da potabilidade da água utilizada para o consumo humano são estabelecidos pelo Diploma Ministerial n.º 180/2004 de 15 de Setembro do Ministério da Saúde.

A alteração das características da água dependerá de aspetos naturais como o clima, a geomorfologia e a hidrologia e também de fatores antropogénicos relacionados a bacia hidrográfica por onde essa água circulará (Silva, 2020).

Os diversos elementos químicos presentes na água, que denotam o seu grau de integridade e retratados como características físicas, químicas e biológicas, são expressos na forma de parâmetros de qualidade da água. Dependendo do uso a que se destine a água, são determinados e analisados parâmetros que fornecem a dimensão desses constituintes. A verificação da salinidade da água, por exemplo, é um requisito de qualidade de água postulada pela irrigação e pelo abastecimento humano (Silva, 2020).

De acordo com os dizeres do (Deocampo & Jones, 2014), para a avaliação dos níveis de salinidade, são determinadas as proporções de sais dissolvidos que se apresentam na forma de Catiões e aniões. Menos de 10 solutos principais dominam as águas salinizadas, são eles, os cloretos (Cl^-), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), sulfatos (SO_4^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e, raramente, a sílica (SiO_2). Destes, o Na^+ é o Catião mais comum e em salmouras evoluídas, é frequentemente, o único Catião em solução. Esses iões são provenientes de minerais distribuídos em três grupos, carbonatos, sulfatos e cloretos dos quais tem-se, respetivamente como exemplos, a calcite (CaCO_3), a gipsite ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a halite (NaCl).

2.6. Parâmetros físico-químicos da água subterrânea

2.6.1. Potencial hidrogeniónico

O pH é o coeficiente que indica a concentração de iões hidrogénio presente numa solução, e indica o grau de acidez ou alcalinidade da mesma se apresenta numa escala que vai de 1 a 14, sendo 1, um pH extremamente ácido, 7 um pH neutro e 14 um pH extremamente alcalino. Nas águas subterrâneas potáveis o pH varia entre 5,5 e 8. (Ramos, 2022)

2.6.2. Conductividade eléctrica

A condutividade eléctrica (CE) é um parâmetro que demonstra diretamente, ou seja, está diretamente proporcional à concentração iónica na água, permitindo avaliar, de forma rápida

e global, o seu grau de mineralização. Esta situação pode ser descrita como o resultado entre a fortíssima relação existente entre o teor em sais dissolvidos na água e a sua resistência quanto à passagem da corrente elétrica. (Lima, 2020)

A condutividade elétrica é a capacidade de uma solução de permitir a passagem de corrente elétrica, que é o fluxo de eletrões por uma diferença de potencial elétrico, está relacionada com o número de iões e a temperatura da solução, aumentando com o aumento dos iões e temperatura. Devido a isso, a condutividade elétrica permite a medição indireta da quantidade de iões em uma solução. A Tabela 2 mostra as condutividades elétricas teóricas de diferentes tipos de água. (Ramos, 2022)

Tabela 2: Condutividades elétricas teóricas para diferentes tipos de água.

Tipo de água	CE ($\mu\text{S/cm}$)
Água pura	0,055
Água destilada	0,5-5
Água das chuvas (pluvial)	5-30
Água subterrânea potável	30-2000
Rios e Riachos	1
Salmoura (Salgada)	>100000
Água do mar	50000

Fonte: (Ramos, 2022).

2.6.3. Sólidos totais dissolvidos

Os sólidos totais dissolvidos (TDS) permitem determinar a concentração de iões em uma solução, relacionando-se com a condutividade elétrica por meio da Equação 2.

$$STD = CE * 700 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

STD – Sólidos Totais Dissolvidos (mg/l)

CE – Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)

A Tabela 3 mostra as faixas teóricas de concentrações de sólidos dissolvidos para diferentes tipos de água.

Tabela 3: Faixas de concentração de sólidos dissolvidos para diferentes tipos de água.

Tipo de água	SDT (mg/l)
Fresca	0-1000
Salobre	1000-10000
Salina	10000-100000
Salmoura (Salgada)	>100000

Fonte: (Ramos, 2022)

2.6.4. Temperatura

A Temperatura é a medida de aquecimento ou arrefecimento do corpo, sendo originada de forma natural. Considerando a qualidade das águas subterrâneas, a temperatura é extremamente importante por acelerar reações químicas e reduzir a solubilidade dos gases (O_2 e H_2S), assim como intensificar o sabor e odor das águas naturais. Em geral a temperatura anual das águas subterrâneas é baixa, variando entre 1 e 2 °C, e não dependendo comumente da temperatura ambiente. (Goese, 2021)

2.6.5. Alcalinidade

A Alcalinidade refere-se a aptidão que a água tem de fazer a neutralização dos ácidos, ou seja, sendo influenciada diretamente pela presença de iões de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, sobretudo o anião HCO_3^- . A unidade de medição amplamente utilizada é mg/l de $CaCO_3$. (Ribeiro, 2018)

A alcalinidade total da água é explicada como sendo a sua capacidade de neutralizar ácidos. Em geral, esta grandeza em águas naturais, é na sua maioria gerenciado pelo alto índice da presença de iões de carbonatos e de bicarbonatos, sendo as águas subterrâneas caracterizadas por ter uma alcalinidade superior às águas superficiais. (Santos, 2011)

2.6.6. Sulfatos

Surge a partir da oxidação do enxofre presente na litologia e lixiviação de compostos sulfatados, como a gipsite e anidrita. De uma forma comum, as águas subterrâneas podem apresentar teores inferiores a 100 mg/l. Os que geralmente marcam uma grande presença nas águas subterrâneas com pH muito baixo (< 2), são os iões de SO_4^{2-} e HSO_4^- , respetivamente. (Ribeiro, 2018)

O ião sulfato (SO_4^{2-}) é bastante solúvel e comumente estável. Têm origem ligada a ambientes ácidos e oxidantes, geralmente proveniente do intemperismo de minerais como gipsite e

anidrite, também pode estar presente nas águas das chuvas em lugares com ar poluído (Lima, 2020).

2.6.7. Cloretos

Os cloretos usufruem de um alto poder de solubilidade, sendo estes, caracterizados por um movimento lento nos aquíferos, acarretando assim, um acúmulo constante e progressivo de seus teores nas águas subterrâneas, na direção do fluxo. Estes, têm uma origem interligada, principalmente, a um processo de lixiviação de rochas evaporativas. Os cloretos têm presença em todas as águas naturais, sendo que nas subterrâneas, apresentam um valor genericamente menor a 100 mg/l. (Ribeiro, 2018)

Segundo (Lima, 2020), o íon de cloreto (Cl^-) está presente nas rochas magmáticas e carbônicas, porém em concentrações menores ele é muito solúvel e bastante estável em solução. Nessas rochas o cloreto está presente como cloreto de sódio ou em solução de íons de cloreto e sódio. (Lima, 2020) ainda explana que aproximadamente 75% do cloro encontram-se nos oceanos sob a forma de cloreto e que somente uma parte é derivada do intemperismo de rochas.

2.6.8. Cálcio

O cálcio é um constituinte primordial das águas naturais, com a capacidade de precipitar em forma de CaCO_3 , no entremeio de moderada à alta solubilidade, ou mesmo tornar-se mais solúvel em casos do aumento da presença de sais de sódio e potássio. Este íon deriva, particularmente, do processo de lavagem de minerais ricos em Ca^{2+} , como é o exemplo dos minerais, calcite, aragonite e dolomite, respetivamente. Nas águas subterrâneas, a concentração deste íon prevalece no intervalo compreendido entre 10 e 100 mg/l. (Ribeiro, 2018)

O íon de cálcio é um dos principais constituintes das águas, pois os elementos químicos que o contém possuem elevada solubilidade e fácil precipitação (Lima, 2020). Ainda nos mesmos dizeres de (Lima, 2020), os minerais que contém Ca^{2+} são geralmente mais solúveis. As principais fontes naturais de Ca^{2+} em águas são: o plagioclásio proveniente de rochas ígneas, e os minerais derivados de rochas calcárias, que são a calcita que é um carbonato de cálcio, na dolomita que é um carbonato cálcio e magnésio e na gipsite que é um sulfato de cálcio.

2.6.9. Magnésio

O Magnésio é um íon bivalente, com as propriedades similares às do cálcio, sendo este, apenas mais solúvel em comparação com o cálcio e gera uma certa dificuldade no processo de precipitação. É ião surge como resultado do processo da lavagem de rochas carbônicas, sendo gerado pelos principalmente pelos minerais magnesite, biotite, granada e hornblenda, respetivamente. Este íon, junto com o íon de cálcio, são os principais responsáveis pela dureza das águas, acrescentando de certa forma, um paladar salobre às águas. Em geral, os teores do magnésio para as águas subterrâneas rondam no intervalo entre 1 e 40 mg/l. Para este parâmetro, a dureza tem servido como um parâmetro indicador ou contribuinte à potabilidade. (Ribeiro, 2018)

De acordo com o (Lima, 2020), o íon de magnésio (Mg^{2+}) é mais solúvel e mais fácil de precipitar que o cálcio, e é originado das rochas ígneas e metamórficas, da biotita que é uma mica escura e das rochas carbonatadas. Em carbonatos ígneos e sedimentares o magnésio pode substituir o cálcio. Ainda na mesma perspetiva do (Lima, 2020), é explanado que em águas naturais doces as concentrações de magnésio são inferiores a 40 mg/l e que concentrações elevadas (> 40 mg/l) estão relacionadas a uma salinidade maior da água.

2.7. Classificação hidroquímica das águas subterrâneas

2.7.1. Fácies hidroquímicas

Semelhante aos dizeres de (Leite, 2021), as fácies hidroquímicas fazem uma descrição minuciosa das amostras das águas consoante à variação da sua contextura química em exercício da sua litologia, da cinética da solubilidade e dos padrões do curso do aquífero. Geralmente, usa-se os diagramas de piper e stiff.

2.7.2. Diagrama de piper

O diagrama de Piper é constituído por dois triângulos equiláteros, onde estão apresentados os íões maioritários. Nestes, os triângulos de catiões e aniões ocupam os ângulos inferiores esquerdo e direito com suas bases alinhadas. Os dados dos gráficos triangulares são projetados em um losango central que representa a composição da água deduzida de aniões e catiões. (Leite, 2021). A figura 2, mostra a representação dos tipos de água no diagrama de piper.

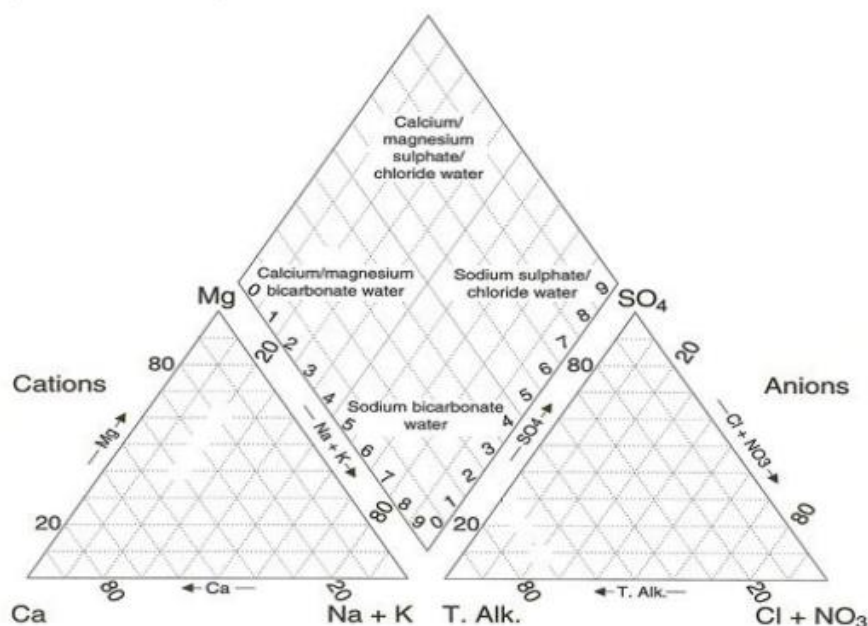


Figura 2: Diagrama de Piper

Fonte: (Ramos, 2022)

Este diagrama de Piper, segundo (Ramos, 2022) permite representar um grande número de amostras em um único gráfico, o agrupamento de pontos define famílias de águas com características químicas semelhantes em termos de conteúdo iônico, que são principalmente quatro:

- I. Águas bicarbonatadas do tipo cálcio e/ou magnésio.
- II. Águas sulfatadas e/ou cloradas de cálcio e/ou magnésio.
- III. Águas cloradas e/ou sulfatadas de sódio.
- IV. Águas bicarbonatadas sódicas.

As águas do tipo bicarbonatadas (Números I e IV) correspondem a uma área com fluxo superficial ativo, geralmente de trajetos curtos influenciados pela precipitação (tráfego local), com menor solubilidade de minerais e a permanência pode ser de alguns anos. A água de recarga para esses fluxos normalmente vem da chuva (água meteórica tem baixa concentração iônica) que atravessa a zona insaturada em tempos curtos. Quanto à composição catiónica, tem uma evolução esperada onde predomina o ião cálcio seguido do magnésio. (Ramos, 2022)

As águas sulfatadas (Números II e III), teriam um tempo de circulação maior de acordo com a sequência de Chevotarev ou essa composição poderia ser influenciada pela decomposição

de minerais ricos em sulfetos como a pirita (FeS_2) presente em algumas formações aflorantes. Sopés, também em xistos de pirita ou magnésia e da lavagem de terrenos formados em ambientes marinhos. Estas águas, em geral, apresentam percursos menos ativos, mais longos, gerando conseqüentemente tempos de residência das águas mais longos. (Ramos, 2022)

2.8. Modelagem Geoquímica

Os processos geoquímicos das águas, em geral, surgem com o intuito de reconhecer e fazer a quantificação das propriedades e constituintes químicos principais, através da relação dos mesmos com o meio físico (SANTIAGO, 2010).

Magalhães (2016), frisa ainda que os processos naturais que de certa forma fazem a interferência na composição química, são a sua geologia, a sua pedologia, a sua química (solubilidade dos minerais), a sua geomorfologia, os aspetos biológicos e climáticos, respetivamente.

Olhando para os dizeres de (Silva, 2020), as águas doces têm geralmente em sua composição catiónica, o ião Ca^{2+} como catião predominante, sendo o oposto nas águas salinas, que o ião predominante é o Na^+ . Esta relação, compreendendo estes dois iões, cálcio e sódio, na seguinte razão ($\text{Na}/\text{Ca}+\text{Na}$) e os sólidos totais dissolvidos, é utilizada de forma avultada nas discussões que envolvam os processos que controlam o espectro da química da água, através do diagrama desenvolvido por Gibbs.

O ião cálcio (Ca^{2+}) é extensamente partilhado por rochas e solos, e define a dureza nas águas tendo principalmente as fontes geológicas como, a calcite (CaCO_3) e a dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), respetivamente. O ião sódio (Na^+) por sua vez, possui como primordial a sua característica, deste estar amplamente distribuído em diversas fontes minerais, tais como, carbonatos, sulfatos e cloretos. Ainda assim, também é reconhecido por gerar uma estabilidade química baixa dos minerais da qual integra e conseqüentemente elevar a sua solubilidade, causando assim uma difícil precipitação dos seus constituintes químicos em solução (Magalhães, 2016).

O software *Phreeqc interactive* foi comumente utilizado por (Wahed et al., 2014, Almeida; Frischkorn, 2015 e Silva, 2020) em estudos sobre a evaporação de água e predominância do intemperismo por (Lima, 2020). A análise de evaporação foi crucial, por ela possuir entre suas funcionalidades, a capacidade de remoção dos moles de água e promoção da simulação do conduta dos iões por meio do aumento das suas concentrações (Wahed et al., 2014). O

algoritmo do programa é baseado nas equações da lei de ação em massa e conhecimento das constantes de solubilidade e dissociação. (Silva, 2020)

Os minerais carbônicos (calcite e dolomite) e sulfatos são sais inorgânicos de natureza menos solúveis que facilmente precipitam, sendo necessário, a interferência de CO₂ para mobilizar a dissociação dos mesmos. Os cloretos, são caracterizados pela sua alta capacidade de solvência, sendo para estes, muito difícil ultrapassar o limite máximo de saturação, a não ser quando este é subjugado à altíssimas temperaturas (Silva, 2020)

Tendo em conta os dizeres de (Silva, 2020), a evaporação é um processo que geralmente leva à precipitação dos minerais com baixa capacidade de solvência. As simulações deste processo são obtidas por via da remoção de moles de H₂O de um soluto na fase inicial (Wahed *et al.*, 2014). Ainda no mesmo contexto, os dados introdutórios, geralmente, incluem o pH da água, a massa da água, potencial redox, a densidade e a temperatura da mesma, e por fim os iões a serem avaliados.

Após estes serem processados, os seus resultados são aprovisionados em unidade molar (moles), com exceção apenas dos índices de saturação (IS) que são números adimensionais. Para o efeito, usou-se uma solução equilibrada com a pressão parcial de CO₂ na atmosfera, estimada em cerca de $1,0 \times 10^{-3,5}$ atm, em todo processo de simulação. (Silva, 2020)

III. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no posto administrativo de Lionde. O distrito de Chókwè é limitado a Norte pelos distritos de Massingir e Mabalane, a Sul pela cidade de Xai-Xai e distrito de Bilene, a Este é limitado pelos distritos de Massingir e Magude, e a Oeste é limitado pelos distritos de Chibuto e Guijá. O distrito de Chókwè está subdividido em quatro postos administrativos, nomeadamente, Cidade de Chókwè, Lionde, Macarretane e Xilembene (INE, 2013), como ilustra a figura 3 do mapa de localização do distrito de Chókwè.

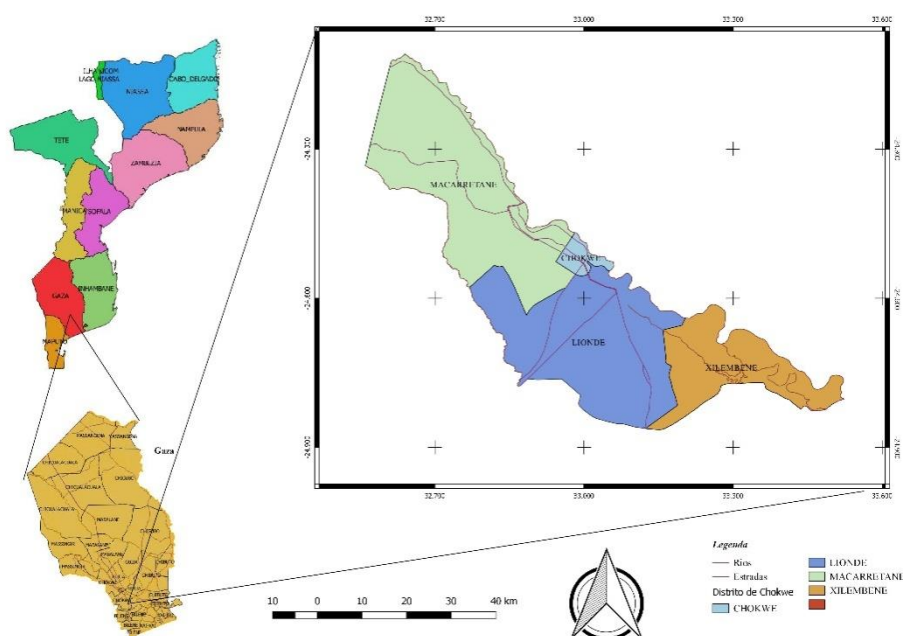


Figura 3: Mapa de localização do distrito de Chókwè. | **Fonte:** Autor (2023)

3.1.1. Clima e Hidrologia

Dando um olhar aprofundado sobre a classificação de Thornthwaite do local em estudo, o (Mamade, 2006) afirma que o distrito de Chókwè é geralmente abrangido por um clima semiárido perfazendo-se em duas épocas distintas, nomeadamente:

- I. A chuvosa e quente ocorrendo de outubro à março, e
- II. A seca e fresca ocorrendo de abril à setembro.

A precipitação média anual é de 660mm, com uma variação entre 550mm e 800mm. Mais de 75% desta precipitação tem se concentrado na época chuvosa, e repartindo-se em pouquíssimos dias de chuva, gerando de certa forma, uma grande ocorrência de enxurradas

que ocasionam problemas gravíssimos de erosão e, conseqüentemente, períodos demorados de encharcamento do solo. (Mamade, 2006)

As temperaturas médias mensais do distrito variam entre 18 °C no mês de julho (época seca e fria) e 27 °C nos meses de dezembro a fevereiro (época chuvosa e quente), proporcionando de certa forma, uma média anual de 23,6 °C. Relativamente a velocidade do vento, esta varia entre 1,2 e 2,3 m/s nos meses de setembro a dezembro, respetivamente, registando assim uma média anual de 1,8 m/s. A humidade relativa varia de 54% a 77% nos meses de novembro a maio respetivamente e a evapotranspiração média anual é aproximadamente a 1400 mm. (Mamade, 2006)

3.1.2. Geologia

A geologia da área de estudo é formada por uma sucessão de rochas sedimentares de arenitos e aluviões com uma distribuição complexa resultante dos processos tectónicos ativos associados à transportes dos sedimentos através de rios ou riachos (Ramos, 2022). Para garantir a sua compreensão, a figura 4 apresenta um mapa geológico, com três perfis e um bloco de diagramas, com sua respetiva descrição estratigráfica e estrutural, com base na nomenclatura e descrições referente a geologia local.

Ainda nesse mesmo contexto, (Ramos, 2022) afirma que os domínios hidrogeológicos locais são formados por sedimentos indiferenciados, os terraços e os depósitos aluvionares. Sendo, de acordo com o mesmo autor, os depósitos aluvionares, sedimentos arenoargilosos recentes que ocorrem nas calhas dos principais rios e riachos que drenam a região e apresentam, em geral, uma boa alternativa como manancial, tendo alta importância no ponto de vista hidrogeológico, pois produzem grandes vazões.

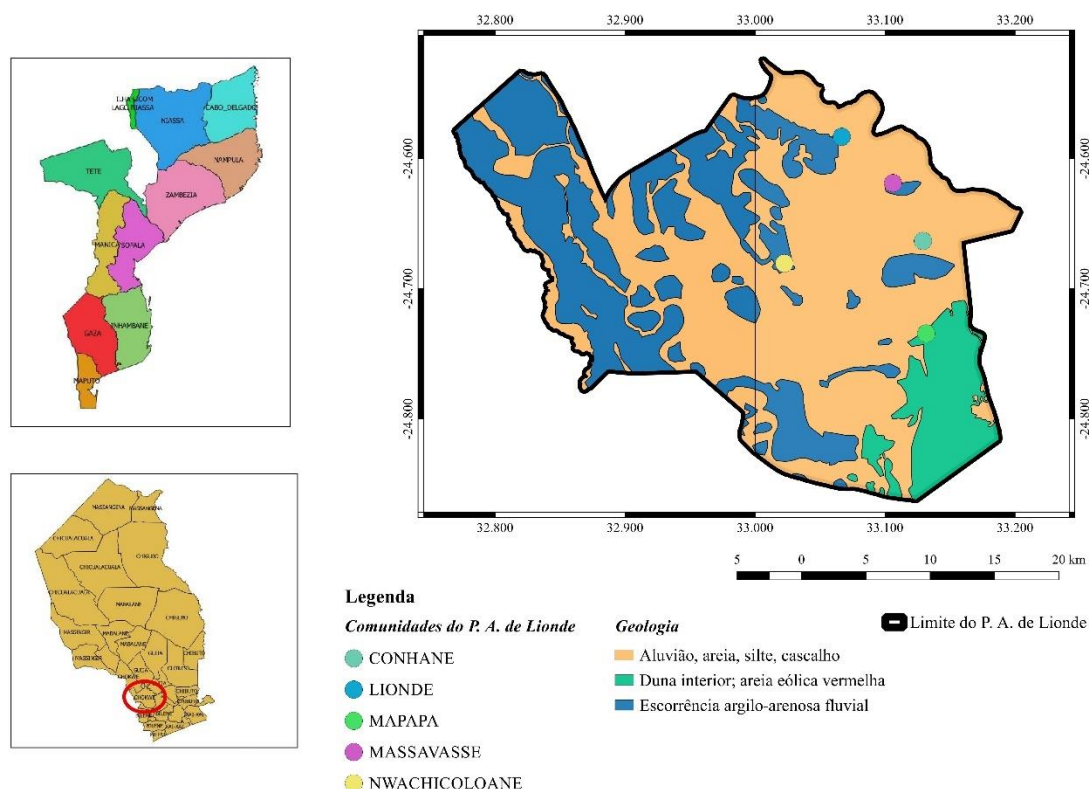


Figura 4: Mapa geológico da área de estudo | Fonte: Autor (2023)

3.2. Identificação dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas

3.2.1. Amostragem

Neste estudo, foram recolhidas no total 10 amostras, em 5 poços tubulares usados para o abastecimento público no Posto Administrativo de Lionde, nas localidades de Lionde, Massavasse, Conhane, Nwachicoluane e Mapapa, respetivamente, como pode se ilustrar na tabela 4 referente à localização dos pontos de recolha das amostras.

A recolha das amostras de águas subterrâneas foi feita em recipientes com uma capacidade de 1L de em cada poço, conservadas em garrafas plásticas de mesmo volume e embaladas em recipientes isolantes térmicos contendo gelo, que de seguida foram transportadas para o Laboratório Provincial de Higiene de Águas e Alimentos de Gaza, onde prosseguiu-se com os testes laboratoriais.

As amostras de águas subterrâneas foram recolhidas no período seco, compreendendo os meses de julho e agosto de 2022, respetivamente.

Tabela 4: Localização dos pontos de amostragem.

Pontos de amostragem	Coordenadas geográficas	
	Latitude	Longitude
LIONDE (LIO)	-24.580629°	33.036223°
MASSAVASSE (MAS)	-24.622504°	33.110024°
CONHANE (CON)	-24.670068°	33.087732°
NWACHICOLUANE (NWA)	-24.683948°	33.022611°
MAPAPA (MAP)	-24.689959°	33.106542°

Fonte: Autor (2023)

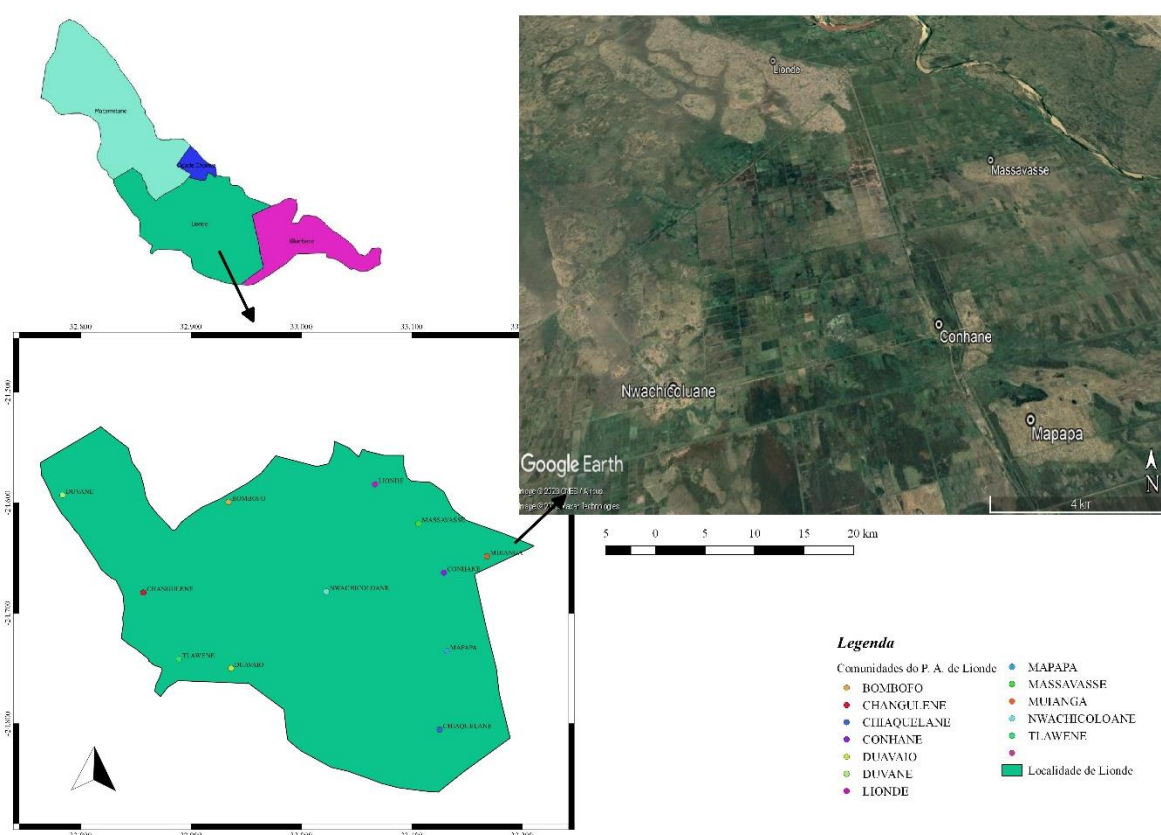


Figura 5: Imagem ilustrativa dos pontos de amostragem.

3.2.2. Procedimentos para identificação dos parâmetros físico-químicos

No momento da recolha das amostras, os parâmetros, potencial hidrogeniónico (pH), temperatura (T °C) e condutividade elétrica (CE) foram medidos *in situ*, após feita a estabilização do fluxo de água e a verificação de estabilidade dos parâmetros.

As análises químicas das amostras recolhidas foram feitas, baseando-se na metodologia *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Para tal, a

determinação das concentrações iônicas, dos compostos como, cloreto, nitrato e sulfato, foram efetuadas pelo método colorimétrico.

Relativamente, a determinação das concentrações dos compostos catiónicos, nomeadamente, cálcio, magnésio, sódio e potássio, efetuou-se com base no método de Espectrometria de Absorção Atômica, após a sua acidificação.

Com o objetivo de garantir a confiabilidade destas análises químicas, prosseguiu-se com o cálculo do erro de balanço iônico (EBI), por meio do programa computacional *Qualigraf* versão 1.18, sendo considerados para o efeito, todos aniões e catiões analisados. A precisão da análise dos iões principais foi avaliada seguindo o pressuposto por (Silva, 2020) em seu trabalho.

A verificação foi realizada calculando-se a razão entre catiões e aniões, como mostra a seguinte equação:

$$EBI(\%) = \left(\frac{\Sigma Catiões - \Sigma Aniões}{\Sigma Catiões + \Sigma Aniões} \right) \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

EBI (%) – Erro de Balanco Iónico

$\Sigma Catiões$ – concentrações totais de catiões ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}$)

$\Sigma Aniões$ – concentrações totais de aniões ($HCO_3^{-} + Cl^{-} + SO_4^{2-}$)

3.3. Classificação hidroquímica das águas subterrâneas

Para a classificação das águas subterrâneas, utilizou-se o diagrama trilinear de Piper com a finalidade de realizar a classificação das amostras, em que as concentrações de catiões e aniões foram dispostas em agrupamentos de iões pré-estabelecidos, o grau de enriquecimento de cada ião (razões iônicas) e visualização da evolução geoquímica, com a qual a cartografia é finalmente realizada a partir da localização dos pontos de amostragem para caracterizar adequadamente os diferentes tipos de água presentes na área de estudo, usando o software *Qualigraf* versão 1.18.

Para tal, foram inseridos dos todos os dados analisados na planilha do software, em mg/l, onde de forma automática houve a conversão dos mesmos para meq/l, gerando assim as suas percentagens, que foram cruciais para a projeção do diagrama trilinear de Piper.

3.4. Índice de saturação e especiação química

Os índices de saturação (IS) e a pressão parcial de CO₂ (IS_{CO₂}) das amostras de água subterrânea foram avaliados conforme a metodologia descrita por Parkhurst e Appelo (2013), utilizando o software geoquímico *Phreeqc Interactive* versão 3.8.3 desenvolvido pelo U.S. Geological Survey (USGS), para verificar a origem de determinados íons presentes na água em função dos minerais. Os índices de saturação (IS) destas águas foram avaliados tendo em consideração os minerais que predominantemente compõem as feições geológicas dos aquíferos na área de estudo, sendo eles, calcite (CaCO₃), dolomite (CaMg (CO₃)₂), halite (NaCl) e silvite (KCl), respetivamente.

O programa de simulação hidrogeoquímica *Phreeqc*, é baseado no equilíbrio químico das soluções aquosas com minerais e gases e possibilita, assim, a simulação de mistura de águas, trocas iônicas, equilíbrio de soluções sob pressão ou volume constantes, dissolução e precipitação de fases minerais para alcançar o equilíbrio com a fase aquosa.

Os índices de saturação das fases minerais presentes na solução, bem como a pressão parcial de CO₂ (pCO₂) foram determinados seguindo o considerado por Parkhurst e Appelo (2013) no desenvolvimento do programa:

$$IS = \log \frac{PI}{Kps} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

IS – Índice de Saturação (não-saturada, saturada e supersaturada)

PI – Produto de atividade iônica

Kps - Produto de solubilidade

Para fazer-se a seleção das fases minerais que compõem o local de estudo, recorreu-se ao perfil distrital de Chókwè, publicado no ano de 2005, pelo extinto Ministério da Administração Estatal (MAE), que garantiu que a litologia do local em questão é formada por rochas de origem sedimentar, providenciando de certa forma os minerais como, calcite, dolomite, gipsite e quartzo, nomeadamente. Segundo o (Silva, 2020), presume-se que solos que contêm dolomite e calcite, também contenham a halite e silvite. O quartzo não foi contemplado nas simulações por este apresentar as características de extrema resistência ao processo de intemperismo (Silva, 2020)

A tabela abaixo, faz a descrição ilustrativa das fases e suas respectivas reações no meio aquoso a serem experimentadas para a simulação geoquímica.

Tabela 5: Fases e reações usadas na modelagem geoquímica.

Fases	Reações	Log K
Calcite	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{Ca}^{2+}$	-8,49
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$	-17,15
Halite	$\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$	1,57
Gipsite	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	-4,58
Silvite	$\text{KCl} \rightarrow \text{K}^+ + \text{Cl}^-$	0,89 - 0,91

Fonte: Adaptado de (Silva, 2020)

3.5. Análise estatística

O resultado proveniente das análises dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas foi subjugado à uma análise estatística descritiva, sendo estimados os valores mínimos, máximos, a média aritmética e desvio padrão dos valores obtidos nas análises químicas. Tendo em conta a relevância das variáveis usadas para a discussão deste estudo, foi feita uma correlação entre elas com o objetivo primordial de colaborar na interpretação dos dados, por meios de situações de similaridade entre os parâmetros estudados, tendo em consideração o fator de significância a 95% de probabilidade ($p < 0,05$). Para o efeito, utilizou-se o programa computacional *Microsoft Excel 365*.

A interpretação da correlação aponta que valores mais próximos de 1, entre duas variáveis, sugerem a existência da alta correlação positiva, por outra, os valores tem uma tendência de crescer ou decrescer concomitantemente. Sempre que os valores de R são próximos a -1 há indicação da alta correlação negativa, ou seja, o valor de uma variável tem tendência de crescer quando o valor da outra decresce. De modo geral, a correlação de 1 indica que as variáveis são dependentes e uma correlação baixa muito próxima a zero aponta a inexistência da correlação entre as variáveis, ou seja, são de forma linear independentes. Em termos de interpretação, considera-se que uma ótima correlação apresenta valores superiores à 0,7 ($R^2 > 0,7$).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Parâmetros físico-químicos

Os resultados das análises físico-químicas foram estruturados em planilha Excel de modo a proporcionar elementos para a construção de gráficos de concentração iônica de cada variável nas águas subterrâneas do posto administrativo de Lionde, como ilustra a tabela 7 referente aos resultados dos parâmetros físico-químicos avaliados, e foi calculado o seu erro de balanço iônico com o objetivo de validar as amostras recolhidas (tabela 6). De modo geral, torna-se exequível estabelecer uma análise da situação de forma separada para os parâmetros analisados a seguir.

4.1.1. Balanço iônico

Após a conclusão das análises hidroquímicas, os valores obtidos em meq/l, correspondentes aos aniões e catiões, respetivamente, foram submetidos a um teste de balanço iônico com o objetivo de fazer a verificação da aproximação entre as concentrações dos catiões e aniões, e a validação das mesmas. O limite pré-estabelecido ou recomendado para o erro de balanço iônico é de $\pm 5\%$. (Silva, 2020)

A tabela 6, faz a descrição ilustrativa das concentrações em meq/l dos aniões e catiões. A mesma, ilustra ainda que para todo o caso, os valores do erro de balanço iônico encontram-se dentro dos parâmetros pré-estabelecidos ou recomendados no estudo de (Silva, 2020).

Tabela 6: Erro de Balanço Iônico referente as amostras das águas subterrâneas.

Amostras	Σ Catiões (meq/L)	Σ Aniões (meq/L)	EBI (%)
LIO-Jul.22	13,95	14,27	1,12
MAS-Jul.22	12,91	13,43	1,98
CON-Jul.22	13,08	13,9	3,01
NWA-Jul.22	13,76	12,72	-3,91
MAP-Jul.22	13,53	13,33	-0,76
LIO-Ago.22	12,26	13,35	4,26
MAS-Ago.22	12,98	13,06	0,30
CON-Ago.22	12,47	12,85	1,51
NWA-Ago.22	13,66	13,24	-1,57
MAP-Ago.22	13,01	13,1	0,31

Fonte: Autor (2023)

4.1.2. pH

O pH da água da área em estudo para o período analisado, variou entre 6,5 e 8,2 evidenciando uma tendência à neutralidade do mesmo, cumprindo com os limites estabelecidos pelo Instituto Nacional de Normalização e Qualidade (INNOQ). O pH das águas subterrâneas estimadas, correlacionaram-se de forma positiva com algumas espécies iônicas presentes na mesma, tais como, o pH e HCO_3^- ($r = 0,66$); pH e SO_4^{2-} ($r = 0,57$); pH e K^+ ($r = 0,03$); pH e Na^+ ($r = 0,20$), respetivamente, conforme é descrito ou ilustrado na tabela 9. Conforme os dizeres de (Leite *et. al*, 2021), quando o pH se encontra na escala entre 6,5 e 10,5, há um deslocamento do equilíbrio químico dos carbonatos (CO_3^{2-}) para a formação dos bicarbonatos (HCO_3^-) em meio aquoso, elucidando assim, a correlação positiva registada com as várias variáveis correlacionadas. O aumento progressivo das atividades iônicas dos bicarbonatos nas águas analisadas, está associado à sua abundância comparando com os demais aniões presentes na água, não sendo este superior apenas para o cloreto. Este aumento é resultado dos elevados teores da condutividade elétrica. Olhando para a situação contrária, verifica-se a presença de correlações negativas fraquíssimas entre as variáveis, tais como, o pH e Cl^- ($r = -0,23$) e pH e Ca^+ ($r = -0,30$), respetivamente, como é descrito ou ilustrado na tabela 9. De modo geral, concernente as distribuições iônicas, houve variações que acompanham o seu aumento do poder iónico, olhando para a direção do principal do fluxo das águas da área de estudo, o mesmo comportamento foi registado no trabalho de (Silva, 2020)

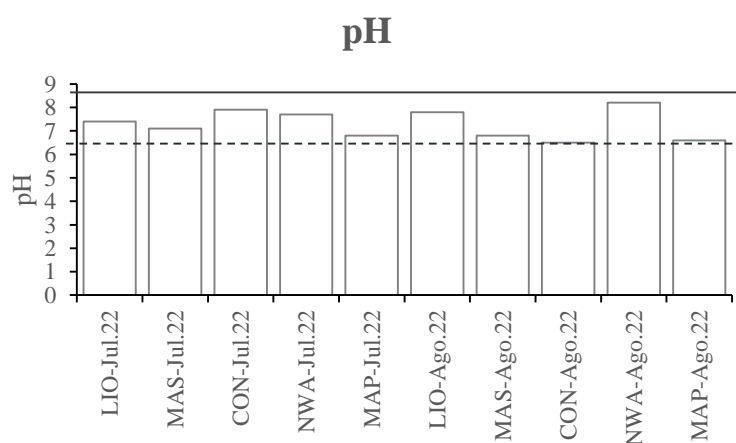


Figura 6: Concentrações do PH em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.

4.1.3. Condutividade Elétrica CE

Na figura 6, observa-se que a condutividade elétrica analisada se situa na média de 2109,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, variando entre o mínimo de 773 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na temperatura de 21,1°C (CON-Jul.22) e o máximo de 6150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à temperatura de 25,3°C (MAP-Jul.22). Os valores de CE que estão acima de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estão relacionados às águas resultantes das rochas calcárias, evidenciando a influência da dissolução dos carbonatos.

O valor máximo permitido pelo INNOQ, de acordo com o Diploma Ministerial n.º 180/2004 de 15 de Setembro é de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os valores superiores ao limite máximo permitido pela norma podem trazer sabor desagradável à água, afetando sua capacidade de uso para consumo.

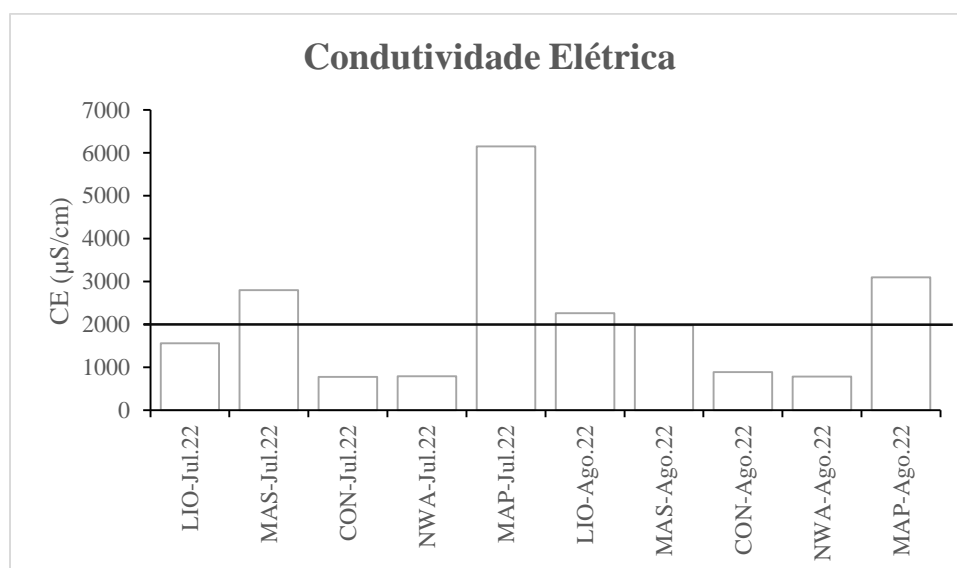


Figura 7: Concentrações de CE em distintos pontos de amostragem e seu limite na norma do INNOQ para fins de consumo.

4.1.4. Sólidos Totais Dissolvidos

Os valores de STD, de forma geral mostraram uma oscilação entre os mesmos, influenciados principalmente pelas concentrações de sódio e cloreto, não deixando de lado o principal aliado que é a Condutividade Elétrica. As concentrações do ião cloreto, mostraram-se ser elevadas, podendo estas terem alcançado valores superiores a 100 mg/l. A área em estudo apontou valores de CE's em alguns pontos, superiores ao limite pré-estabelecido pelo INNOQ para fins de consumo humano, que limita aos 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como é ilustrado ou descrito na tabela 8, sendo estes, considerados como estando na categoria de alto nível de salinidade pelo diagrama de Richards, citado por (Silva, 2020) no seu estudo.

Considerando a normativa sobre a qualidade de água publicada pelo Instituto Nacional de Normalização e Qualidade (INNOQ), os valores de STD obtidos nas análises das amostras indicam valores mínimos de 1287,0 mg/l, superando assim, o valor máximo estabelecido de 1000 mg/l pelo INNOQ para o abastecimento público.

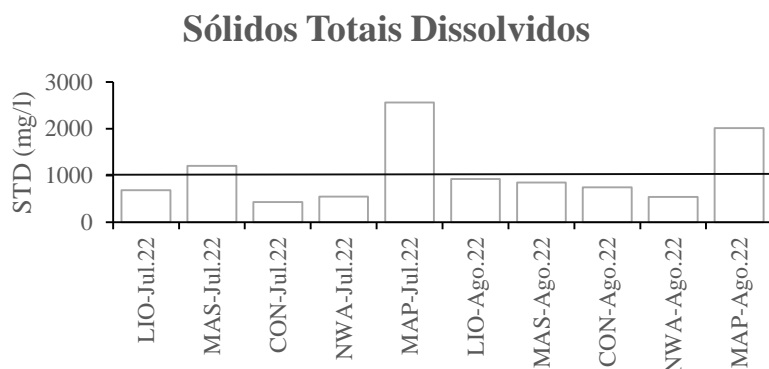


Figura 8: Concentrações de Sólidos Totais Dissolvidos nas águas subterrâneas em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.

4.1.5. Cloretos

Os cloretos constituem um dos sais mais afluentes na natureza, procedendo em todas as águas naturais em quantidades variáveis. Em aquíferos cársticos, devido a algumas alterações químicas e à profunda solubilização dessas rochas, podem derivar compostos extremamente solúveis, com proporção variável, de cloretos cálcicos, magnesianos e sódicos.

A figura 8, demonstra o comportamento do Cl^- e limite máximo aconselhado pela norma do INNOQ (indicado com traço). A quantidade dos cloretos representa um valor não superior ao limite máximo recomendado pela norma do INNOQ em quase 60% dos pontos amostrados, com exceção dos pontos (MAS-Jul.22, CON-Jul.22, NWA-Jul.22 e CON-Ago.22) pelo que estes ultrapassam o limite máximo admissível.

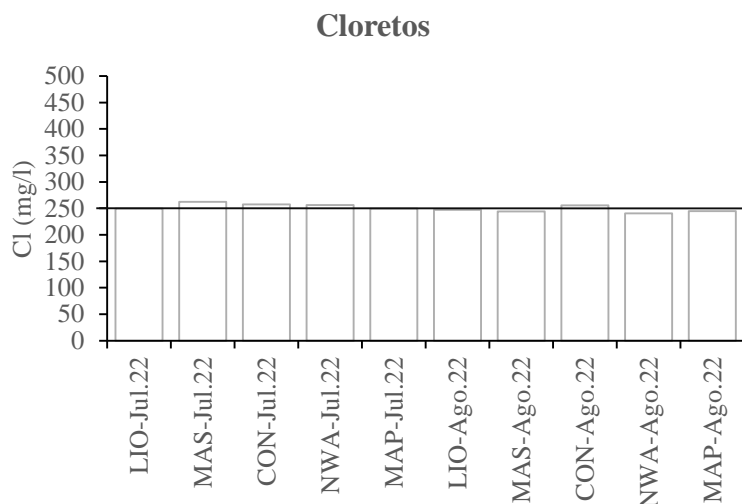


Figura 9: Concentrações de Cl em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.

4.1.6. Alcalinidade total

Na área em estudo, os valores de alcalinidade total patenteiam uma média geral de 135,24 mg/l, variando entre o valor mínimo de 126,8 mg/l (LIO-Ago.22) e o máximo de 151,07 mg/l (MAS-Jul.22), como ilustra a figura 9. De modo geral, os valores da alcalinidade não ultrapassam o valor admissível pela normativa do INNOQ. A Tabela 6 é apresenta o resultado da correlação estatística entre as variáveis HCO_3^- , pH, STD, Cl^- e NO_3^- . Os resultados patenteiam altas correlações entre a HCO_3^- e os valores de pH e STD, respetivamente ($R^2 = 0,66$ e $0,59$). Em compensação, nota-se uma baixa correlação entre a HCO_3^- e os valores de Cl^- e NO_3^- (0,44 e -0,48), confirmando assim, a predominância da interação água/rocha como fator decisório para os valores da alcalinidade. Além disso, a correlação baixa da alcalinidade com os valores de Cl^- e NO_3^- revela que não é significativa a preponderância da contaminação antrópica, no tangível à variação dos valores de alcalinidade total.

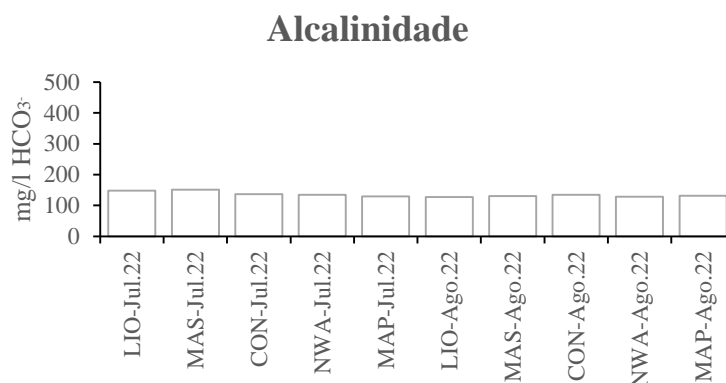


Figura 10: Concentrações de dureza total em diferentes pontos de amostragem e os limites das normas do INNOQ para fins de consumo

4.1.7. Sódio

O sódio é um dos metais alcalinos mais substanciais nas águas subterrâneas, procedendo principalmente sob a forma de cloretos. O desenvolvimento natural dessas águas com sódio se dá a partir de fontes minerais de feldspatos e plagioclásios.

Como ilustra a figura 10, os valores de sódio não ultrapassam o valor admissível pela normativa do INNOQ no que tange aos valores pré-estabelecidos para o consumo humano.

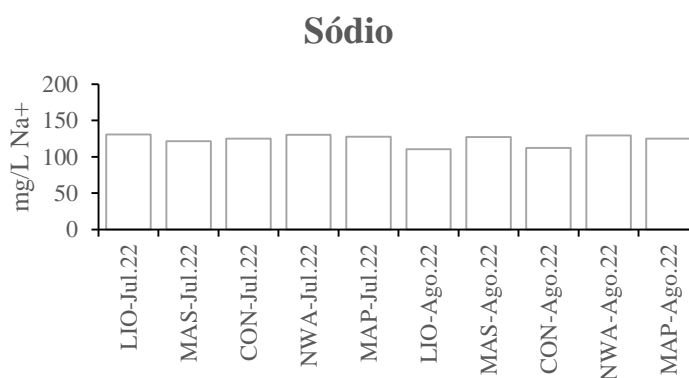


Figura 11: Concentrações de sódio em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo

4.1.8. Sulfatos

Os sulfatos ocorrem naturalmente em águas, uma vez que este composto se encontra facilmente presente nas plantas, sob a forma de enxofre, nos solos e na água das chuvas.

Nas amostras de águas recolhidas, os teores de sulfato variaram entre o valor mínimo de 21,05 mg/l (MAP-Ago.22) e máximo de 42,01 mg/l (LIO-Jul.22), com média de 23,5 mg/l,

como ilustra a figura 12. Todos os valores estão dentro do limite estabelecido pela normativa do INNOQ (250 mg/L).

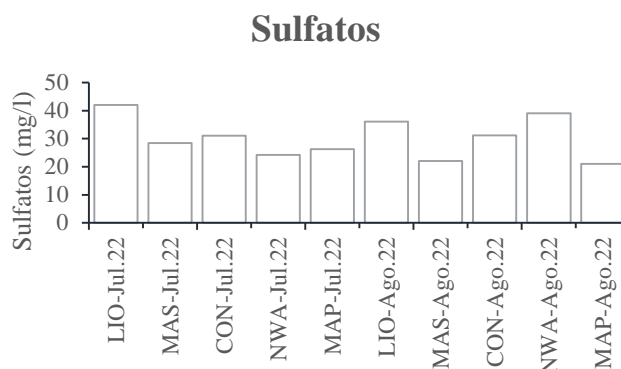


Figura 12: Concentrações de sulfatos em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.

4.1.9. Cálcio

Dada a sua vasta distribuição nos distintos tipos de solos e rochas, o cálcio está naturalmente presente em todas as águas, embora em frações muito variáveis. Nas águas subterrâneas, a sua concentração é dominada principalmente pelos minerais mais solúveis, como a calcite (CaCO_3), a dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e a anidrite (CaSO_4).

Nas águas analisadas, os valores de cálcio variam com o máximo de 62,35 mg/l (CON-Jul.22) e o mínimo 48.02 mg/l (MAS-Jul.22), possuindo uma média geral de 55,19 mg/l (Figura 12). Estes valores ultrapassam o valor admissível pelo INNOQ, contribuindo assim para o aumento da dureza da água.

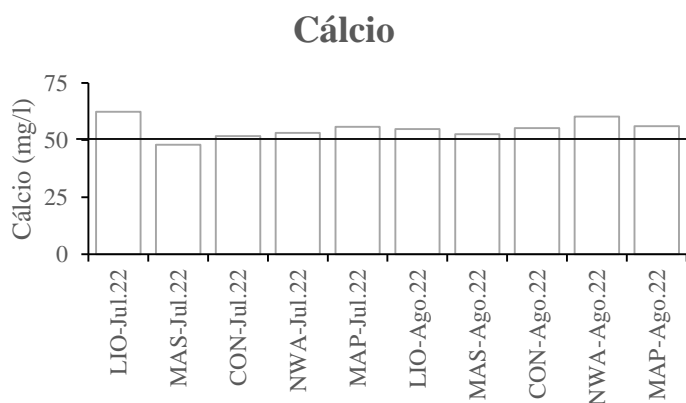


Figura 13: Concentrações de cálcio em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.

O Ca^{2+} apresentou um coeficiente de correlação (r) positivo e significativo com o íon Mg^{2+} ($r = 0,65$), sendo estes cátions bivalentes, têm o mesmo comportamento, ou seja, agem de forma semelhante, no decorrer do processo de paragéneses mineral. Este resultado foi similar ao obtido no trabalho de (Leite *et al.*, 2021) realizado com as águas subterrâneas do município de São Carlos, Brasil.

4.1.10. Magnésio

O magnésio, juntamente com o cálcio, contribui para a variação dos valores de dureza da água. Apresentando propriedades semelhantes ao cálcio, o magnésio ocorre, principalmente, em rochas carbônicas, variando em concentrações medianas de 5 a 10 mg/l, sob a forma de carbonatos e bicarbonatos (Santos, 2011). As principais fontes de Magnésio nessas rochas são a magnesite (MgCO_3) e a dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Nas águas analisadas, os valores de magnésio variam com o máximo de 71,5 mg/l (NWA-Jul.22) e o mínimo 58,61 mg/l (MAS-Jul.22), possuindo uma média geral de 65.06 mg/l, como se pode ver na figura 13. Estes valores ultrapassam o valor admissível pelo INNOQ, contribuindo assim para o aumento da dureza da água e sabor desagradável.

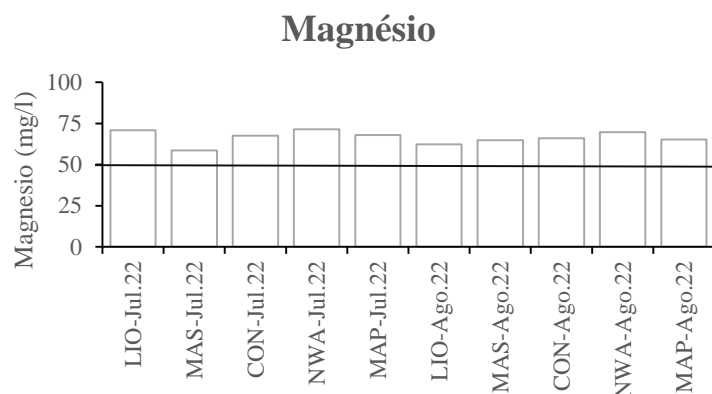


Figura 14: Concentrações de Magnésio em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo

4.1.11. Potássio

O íon potássio, apresentou no geral, as concentrações baixas em detrimento aos demais íons, em todos os pontos de amostragem. Fato esse que é resultante da maior dificuldade de liberação, por este possuir uma alta estabilidade nos minerais aluminossilicatos, além de possuir uma tendência avultada de fazer a sua reincorporação ao solo de forma natural, principalmente, dos íons de provenientes das argilas (Silva, 2020).

O valor médio para o potássio encontrado nas águas analisadas é de 16,24 mg/l, possuindo um valor mínimo de 11,06 mg/l (NWA-Ago.22) e máximo de 22,02 mg/l (MAP-Jul.22), ilustrados na figura 14. O potássio não é um parâmetro legislado pelo INNOQ devido a sua difícil libertação e capacidade de se reincorporar no solo.

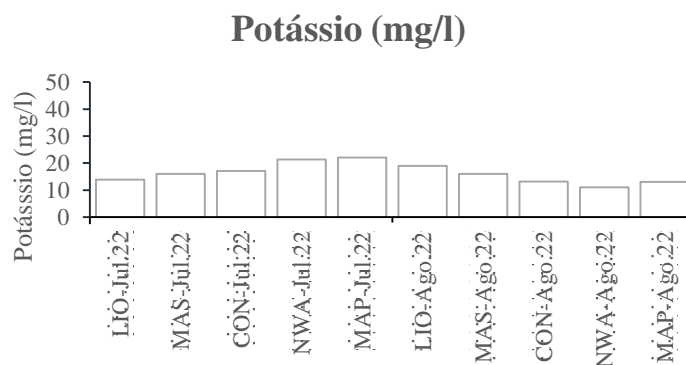


Figura 15: Concentrações de Potássio em diferentes pontos de amostragem e os valores limites das normas do INNOQ para fins de consumo.

Em relação às concentrações de íons dissolvidos nas águas subterrâneas, verificou-se também grande variação (Tabela 8), seguindo a sequência de expressividade $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ para os aniões e $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$ para os catiões, no conjunto das amostras das águas subterrâneas do local. Entretanto, notou-se uma disparidade ligeira entre os valores analisados, uma vez que os valores das suas médias, comparados com o seu desvio-padrão, verifica-se que a media é maior que o desvio-padrão em 10x. sendo que o valor do desvio padrão dos compostos analisados ronda em torno de (<10mg/l), com exceção apenas da CE que atingiu um desvio-padrão 10x maior. A tabela 7, faz a descrição dos fatos acima relatados, conforme se pode analisar na mesma.

Olhando para estes resultados, em ordem de sequência ou dominância iônica presentes nas águas do local, chega-se a conclusão das similaridades existentes entre os resultados encontrados no estudo feito pelo (Nethononda *et al.*, 2019), onde teve como seu principal objetivo a observação dos impactos do intemperismo mineral, seguido da análise de algumas reações de troca iônica que desencadearam durante o processo, nas águas subterrâneas da região de Limpopo, África do Sul. Neste estudo, foi feita uma repartição em dois grupos as amostras das águas, nas zonas de interação água/rocha, onde concluiu-se que o processo principal que influência de forma maioritária a química da água na região em questão, é o intemperismo dos minerais de silicato e carbonato, distanciando-se da hipótese de ser o processo de evaporação ou precipitação.

Tabela 7: Estatística descritiva dos resultados físico-químicos

Variáveis	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ⁺ (mg/l)	Mg ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	CE (µS/cm)	pH	T °C
Valor	110,6	11,06	48,02	58,61	240,4	126,8	21,05	0,19	1980	6,5	25,1
Mínimo											
Valor	130,5	22,02	62,35	71,5	262,1	151,07	42,01	0,40	6800	8,2	27,2
Máximo											
Média	123,84	16,24	55,008	66,47	250,75	135,24	30,14	0,25	4108	7,28	26,22
Aritmética											
Desvio	7,13	3,65	4,12	3,97	6,85	8,26	7,14	0,07	1651,05	0,6	0,77
Padrão											

Fonte: Autor (2023)

4.2. Classificação Hidroquímica

As características inorgânicas das amostras de águas recolhidas no local de estudo, entre os meses de julho e agosto, correspondentes a época seca, são dadas na Tabela 8. Tendo como base os resultados obtidos dos iões presentes na água em questão, foi possível a verificação do nível da dominância iónica existente no local, tanto para os aniões quanto para os catiões, seguindo à risca a seguinte ordem de abundância, tendo em conta os valores das médias, $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ e $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$ para os aniões e catiões, respetivamente. A mesma sequência de abundância foi observada por (Silva, 2020; Wahed, *et al.*, 2014) nos estudos levantados por eles na mesma temática e realizados com as águas superficiais nas regiões de Sergipe, Brasil e Quarum, Egipto, nomeadamente.

4.2.1. Diagrama de Piper

As águas analisadas da área em estudo, conforme é indicado pelo diagrama trilinear de Piper na Figura 15, apresentam uma composição catiónica muito equilibrada, com as suas amostras todas centralizadas no triangulo central dos catiões, sem fazer a revelação do catião dominante. Com isso os catiões tiveram uma revelação de 100%, sendo todas as amostras consideradas como da face mista. Em relação aos aniões, 100% das amostras são do tipo cloretada, com maior destaque na dominância aniónica do cloreto.

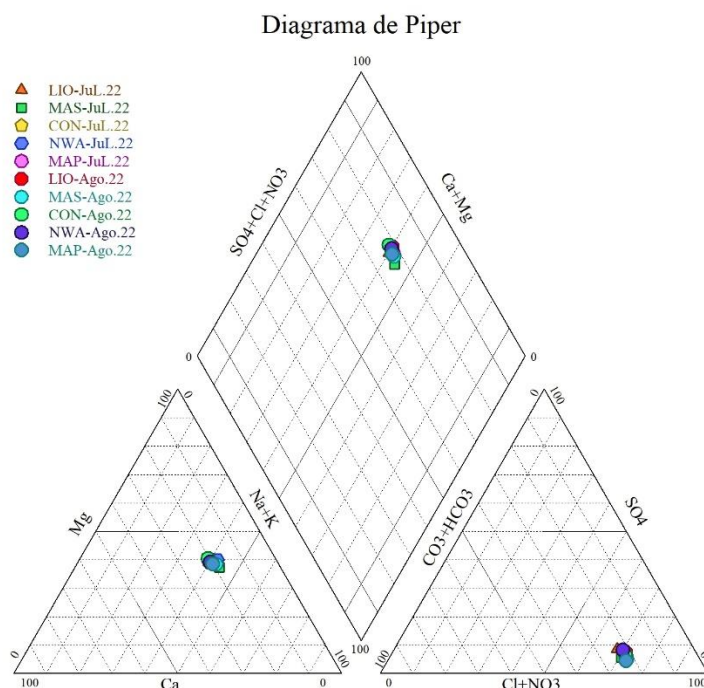


Figura 16: Diagrama trilinear de piper, referente a classificação hidroquímica das águas em estudo.

Embora não se tenha um cátion dominante, das análises realizadas foi possível verificar em diferentes pontos onde foram recolhidas as amostras, que os valores dos metais alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), em meq/l, mostraram uma certa dominância mista comparados com os metais alcalinos terrosos ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), fato este que culminou com a demonstração ativa da presença de um equilíbrio entre os mesmos. Olhando para a composição química dos ácidos fortes (Cl^-), nota-se uma total e completa dominância destes, em todos os pontos onde fez-se a recolha, aos ácidos fracos (HCO_3^-). Os resultados similares a estes foram também observados pelos pesquisadores (Silva, 2020; Wahed *et al.*, 2014) nas pesquisas feitas sobre a mesma temática, realizadas no lago Quarun, Egito e nos reservatórios de carira e coité, no estado de Sergipe, Brasil, respectivamente.

Em termos gerais, a composição química desta área em questão tem tido a tendência de tornar-se de forma progressiva rica em cloreto, com as suas amostras bem localizadas na extremidade do triângulo dos cloretos, a região de predominância desse íon, no diagrama de trilinear de piper.

4.3. Modelagem Geoquímica

Vários estudos têm sido feitos com a mesma modelagem, usando o software *Phreeqc* para obter os resultados e interpretar o comportamento dos minerais, como é o caso dos estudos feitos por (Wahed *et al.*, 2014; Silva, 2020; Leite *et al.*, 2021; e Ramos, 2022), com um objetivo principal de fazer o esclarecimento dos processos de seguida garantir o ordenamento dos eventos considerados como essenciais, que possam transcorrer em determinados processos, tais como, o intemperismo, a precipitação atmosférica ou evaporação, respetivamente.

O índice de saturação é tido geralmente, como um fator indicativo do desequilíbrio mineral e assim, fazer a previsão da situação do local das fases minerais presentes na água, por meio dele. Ainda no mesmo contexto, olhando para os dizeres do (Silva, 2020), um índice de saturação (IS) positivo, em geral, faz o indício do estado de supersaturação apontando, de certa forma, uma possível formação da fase sólida por meio da química inversa, ou seja, prevê-se a precipitação das espécies químicas. Por outro lado, quando se tem um Índice de Saturação (IS) negativo, prevê-se a possibilidade destas espécies atingirem a subsaturação e dissolução das mesmas. Com os índices de saturação estabelecidos, ou seja, obtidos após a modelagem foi possível identificar o estado de uma solução, se esta está em equilíbrio, subsaturada ou supersaturada, no que concerne a alguma fase sólida. Um índice de saturação (IS) é dado na configuração de equilíbrio da fase mineral, quando está compreendido entre -0.05 e 0.05. (Silva, 2020)

Este índices de saturação foram submetidos a uma simulação na modelagem das principais fases minerais, com o objetivo principal de determinar as fases que tem uma dominância no que tange a solvência e proceder com a estimação do ponto onde possivelmente haverá uma ocorrência de precipitação (Silva, 2020). A Figura 16, faz a exibição ou a descrição ilustrativa da evolução dos índices de saturação obtidos no decorrer da modelagem das principais fases minerais.

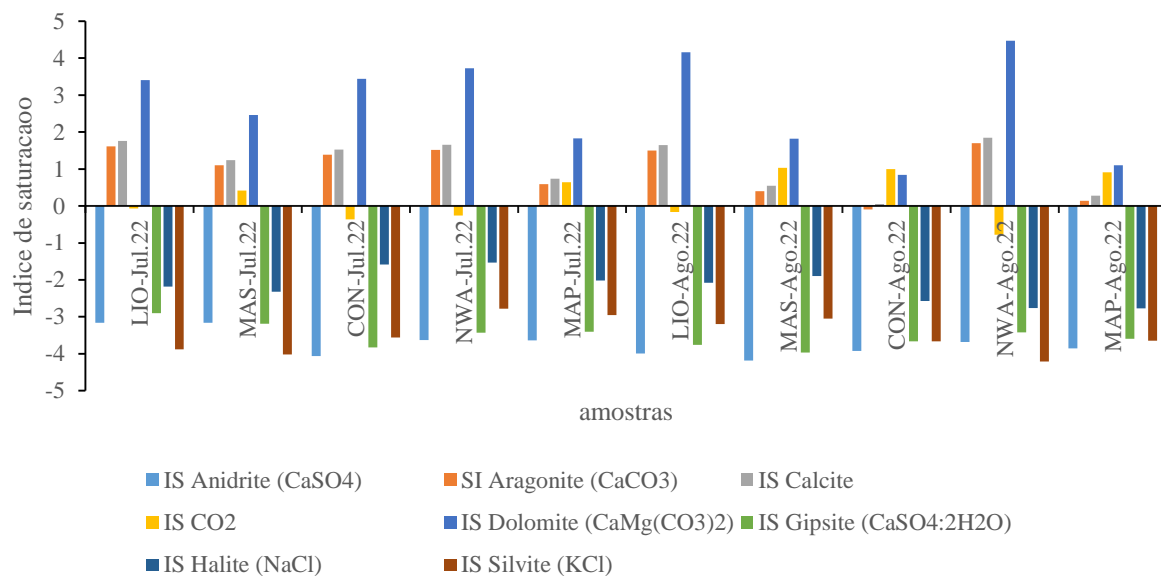


Figura 17: Resultados geoquímicos da área em estudo relativo aos índices de saturação dos minerais presentes na área em estudo.

O mineral dolomite tendo apresentado um $IS > 0.05$, mostrou-se ser supersaturada, ou seja, precipitou em todos os pontos de recolha das suas amostras, provando que na área em estudo há uma menor taxa de circulação das águas levando assim, o mineral a libertar os seus constituintes em meio aquoso.

O mineral gipsite tendo apresentado como resultado da sua simulação um $IS < -0.05$, mostrou-se estar subsaturada, ou seja, sofre o processo de dissolução em todos pontos de onde foram feitas as recolhas das águas. Ainda no mesmo contexto, nos dizeres do (Silva, 2020) esse comportamento de subsaturação da gipsite em regiões com características áridas e semiáridas, é em geral, devido aos ciclos entre períodos secos e chuvosos e as baixas precipitações, que de certa forma não aprovencionam um tempo suficiente de contacto entre os sais pouco solúveis (gipsite) e a água, para estabelecer, de certa forma, o equilíbrio entre as fases. Um comportamento similar a este foi observado nos estudos feitos na mesma temática por (Silva, 2020) na Bacia de Teels Marsh, oeste central de Nevada, Estados Unidos.

O mineral gipsite também teve o mesmo comportamento de insaturação na pesquisa feita pelo Wahed *et al.* (2014), sobre a mesma temática, contudo, analisando as águas superficiais do lago Quarum, Egipto. O mineral gipsite por sua vez contribuiu apenas para o aumento da concentração de soluções e na presença de HCO_3^- , o ião Ca^{2+} fornecido pela dissolução desta, garantiu o aumento do produto da atividade iônica que consequentemente, alargou o índice de

saturação da calcite, ocasionando, de certa forma, a supersaturação deste mineral (Wahed *et al.*, 2014)

O mineral halite e o silvite, tiveram características constates em todos os pontos analisados, tendo estes se mantido subsaturados em todos os pontos analisados na área em estudo, por estes terem uma característica similar entre ambas, de serem altamente solúveis, visto que quanto maior for a evaporação destes minerais, menor será a sua razão de subsaturação, indicando concentração e dissolução dos mesmos, sendo assim, estes agem num sentido de proporção inversa entre ambos. Os minerais evaporativos gipsite, halite e silvite possuem graus de saturação mais baixos que os carbonários (Touhari *et al.*, 2014). Estes resultados foram similares aos encontrados por Silva (2020) e Barzegar *et al.* (2018), durante as suas simulações, mostrando-se o estado de subsaturação para as fases gipsite, halite e silvite, sugerindo assim a ocorrência de uma simples dissolução.

V. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.

5.1. Conclusão

A água subterrânea é um recurso natural primordial e estratégico para o posto administrativo de Lionde, carecendo, portanto, ser cuidada como um bem coletivo, onde a preservação da sua qualidade estará relacionada, diretamente, à saúde e bem-estar de toda a população. O estudo qualitativo destas águas expôs, de forma geral, que este recurso tem uma má característica hidroquímica para todos os parâmetros amostrados, no que diz respeito à sua qualidade para abastecimento público.

De salientar que os resultados das análises físico-químicas das amostras recolhidas e conduzidas ao Laboratório Provincial de Higiene de Águas e Alimentos de Gaza, não foram satisfatórios no que concerne às exigências da potabilidade para fins domésticos ou público, comparados com os padrões estabelecidos pelo INNOQ. Em termos de água para fins domésticos, os resultados dos parâmetros estudados, Ca^{2+} , Mg^{2+} , CE, Cl^- , mostraram-se acima dos limites recomendados pelas normas do INNOQ não oferecendo, assim, uma boa qualidade da água para o abastecimento público. Os parâmetros pH, SO_4^- e NO_3^- , Na^+ e K^+ mostraram-se dentro dos limites aceitáveis pelas normas do INNOQ.

De modo geral, a água subterrânea do local em estudo não é recomendada para fins domésticos devido aos níveis elevados de salinidade e dureza total.

Os processos resultantes do intemperismo químico e das sucessivas evaporações ocorridas no local em estudo, revelaram-se ser os principais processos responsáveis pela composição química das águas subterrâneas do posto administrativo de Lionde, sendo este resultado obtido por vias de simulações geoquímicas executadas no software *Phreeqc*. Ainda no mesmo contexto, as mesmíssimas análises fizeram a revelação da ocorrência de comportamentos geoquímicos que estão ligadas ao processo de evaporação com a possível troca iónica reversa, com o aumento progressivo das concentrações dos iões, da dissolução e por fim, da precipitação mineral.

As amostras das águas analisadas, em diferentes pontos de recolha no local em estudo, tiveram o mesmo comportamento hidroquímica, sendo estas classificadas como 100% cloretada mista. O diagrama mostrou-nos a maior incidência do cloro na formação dessas águas, tendo assinalado maior acumulo, em percentagem, no extremo aniónico do cloreto.

Em relação às espécies carbônicas, a precipitação mineral da dolomite sendo diagnosticada por simulação, registou-se em todos os pontos de amostragem, já para a calcite, permaneceu dissolvida (subsaturada) em todos os pontos. As fases dos minerais como, halite, silvite e gipsite, respetivamente, prevaleceram dissolvidas em todo o processo, ou seja, em todas as amostras analisadas nos diferentes pontos de recolha espalhados pela área em estudo, tendo estes apenas participado no processo de troca iónica reversa e influenciando de certa forma apenas no aumento de concentração dos iões principais.

Nesse sentido, acredita-se que o presente estudo abrangeu os objetivos propostos inicialmente e que seus resultados viabilizaram o estabelecimento de um diagnóstico sobre a qualidade das águas subterrâneas e sua evolução geoquímica em termos dos minerais presentes na área em estudo.

5.2. Recomendações

Durante a realização do trabalho, considerando o papel das águas subterrâneas no abastecimento público, vários pontos ficaram pendentes devido ao curto tempo para a elaboração do mesmo e a alguns custos associados. Para tal, torna-se de fundamental importância na percepção dos danos ambientais e o estado atual do aquífero, sendo sugeridas as seguintes recomendações:

- Avaliação da variação da qualidade de água na época chuvosa do ano, de modo que se conheça o comportamento dos processos hidroquímicos, durante todo ano hidrológico;
- Pesquisas subsequentes devem ter em consideração, além dos parâmetros hidroquímicos, a ocorrência de contaminação microbiológica, a exemplo dos coliformes totais e Termo tolerantes;
- Pesquisas de carácter hidrogeológico precisam ser efetuadas na área, objetivando, particularmente, a determinação das reservas hídricas e a alteração dos níveis freáticos do aquífero.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J. R. F.; Frischkorn, H. (2015) *Salinization mechanisms of a small alluvion aquifer in the semiarid region of northeast Brazil*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande.
- APHA. (2017). *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. Washington DC, USA.
<https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.030>.
- Barzegar, R.; Nazemi, A. H.; Adamowski, J. (2018). *Evidence for the occurrence of hydrogeochemical processes in the groundwater of Khoy plain, northwestern Iran, using ionic ratios and geochemical modeling*. Environmental Earth Sciences, v. 77. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7782-y>.
- Bonotto, D.M. (2016). *Hydrogeochemical study of spas groundwaters from southeast Brazil*. Journal of Geochemical Exploration, v. 169.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.016>.
- Constanço, M. F. M. (2016). *Estudo da Salinidade nas águas Superficiais das Ribeiras do Concelho de Oeiras*. 2016. 69 f. TCC (Graduação) – Curso de Licenciatura em Gestão do Ambiente e do Território, Atlântica University High Institution, Barcarena.
- Cruz, R. E. C. (2021). *Caracterização hidrogeoquímica das águas fluviais da cabeceira de drenagem do rio soberbo – serra dos órgãos, RJ*. Niterói.
<https://app.uff.br/riuff/handle/1/23109>.
- Deocampo, D. M.; Jones, B. F. (2014). *Geochemistry of Saline Lakes*. Treatise On Geochemistry, Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-0959757.00515-5>.
- Goese, E. J. R. (2021). *Estudo preliminar das características físico-químicas das águas de poços de captação de água subterrânea na localidade de São Joaquim, Cachoeiro de Itapemirim, Es*. <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/1268>.
- Guimarães, V. L. de O. (2018), *Hidrogeoquímica fluvial de área montanhosa granítica-gnáissica florestada: subsídio a compreensão do processo de intemperismo na serra dos órgãos, rj*. Niterói. <https://app.uff.br/riuff/handle/1/7183>.
- INE (2013), *Estatísticas do Distrital de Chókwe*.
<http://www.ine.gov.mz/estatisticas/estatisticas-territorias-distritais/gaza/novembro-de-2013/distrito-de-chokwe.pdf/view>. Acedido no dia 08 de junho de 2022.
- Júnior, T. G. S. (2017). *Caracterização hidrogeoquímica de uma salina solar*. Calcó.,
<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/42797>.

- Leite, C. M. M.; Wendland, E; Gastmans, D. (2021). *Caracterização hidrogeoquímica de águas subterrâneas utilizadas para abastecimento público na porção nordeste do Sistema Aquífero Guarani*. SciELO. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190087>.
- Lima, M. H. R. (2020). *Avaliação Hidrogeoquímica dos Reservatórios Jacarecica I e Macela Situados na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe, Nordeste, Brasil*. São Cristóvão-SE.
- Mamade. A. (2006), *Levantamento das Técnicas de Recolha e Conservação de Água da Chuva na Produção Agrícola no Distrito de Chókwè, Maputo*.
<https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/21363/21363.pdf;jsessionid=2B989C7E2EBC269AA0A9B9BA5F687FD8?sequence=1>.
- Monção, A. G. *et al.* (2021). *A Importância das águas subterrâneas para a gestão integrada dos recursos hídricos: captação, controle e monitoramento na bacia do rio Verde Gande*. Revista Águas Subterrâneas.
<https://dx.doi.org/10.14295/ras.v35i1.30026>.
- MISAU- Ministério da Saúde (2004). Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano, Unicef, Moçambique, pp 26-31.
- Nethononda, V. G. *et al.* (2019). *Irrigation return flow induced mineral weathering and ion exchange reactions in the aquifer, Luvuvhu catchment, South Africa*. Journal of African.
- Parkhurst, D. L.; Appelo, C. A. J. (2013). *Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. US Geological Survey
- Pereira, M. J. M. e G. L. Miguel. (2020). *Avaliação hidroquímica das águas subterrâneas do sistema aquífero Quelo-Luanda*. Revista Angolana de Geociências, 2(1).
<http://www.revista.cicga-uan.co.ao/index.php/RAG/article/view/66>.
- Raoum P. F. (2012) *Métodos de avaliação laboratorial*.
- Ramos, D. E. M. (2022), *Caracterización Hidrogeológica Como Base Para el Análisis de Viabilidad Sobre el Aprovechamiento del Agua Subterránea en la Vereda La Cumbre, Municipio de Villavicencio, Meta, Colombia*. Bogotá.
<http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5902>.
<http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5902>.
- Ribeiro, L. N. (2018). *Estudo hidrogeoquímico aplicado à geologia médica de poços para o abastecimento humano ao longo da br 290 em caçapava do Sul, rio grande do sul*. Rio grande sul. <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/3768>.

- Roberto, J., 2010. *Processos hidrogeoquímicos em águas subterrâneas no cristalino em caucaia/ce. Contribuição da modelagem inversa através do phreeqc.* UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ.
- Santos, R. A. (2011). *Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do Município de Iraquara, Bahia.*
- Santos, C. E. O. (2016). *Qualidade da água do reservatório Poção da Ribeira: uma avaliação com base em técnicas estatísticas multivariadas e nos processos geoquímicos de salinização.* 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Sergipe, São Cristóvão.
- Silva, E. L. (2020). *Processos geoquímicos que controlam a salinização dos reservatórios carira e coité, bacia do rio vaza-barris, estado de sergipe.* são cristóvão. ri.ufs.br.
- Touhari, F.; Meddi, M.; Mehaiguen, M.; Razack, M. (2014). *Hydrogeochemical assessment of the Upper Cheliff groundwater (Northwest Algeria).* Environmental Earth Sciences, Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3598-6>.
- Varnier, C.; Hirata, R.; Aravena, R. (2017). *Examining nitrogen dynamics in the unsaturated zone under an inactive cesspit using chemical tracers and environmental isotopes.* Applied Geochemistry, v. 78. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.12.022>.
- Wahed, M. S., Mohamed, E. A., El-Sayed, M. I., M’Nif, A., & Sillanpää, M. (2014). *Geochemical modeling of evaporation process in Lake Qarun, Egypt.* Elsevier BV: Journal Of African Earth Sciences.

ANEXOS

Tabela 8: Resultados físico-químicos da água do Local de estudo (Posto Administrativo de Lionde)

Amostras	pH	T °C	CE (µS/cm)	STD (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
LIO-Jul.22	7,4	26,8	1563	687	249,8	148,6	42,01	22,8	130,5	62,35	70,8	13,9
MAS-Jul.22	7,1	26,2	2800	1204	262,1	151,07	28,4	26,8	121,3	48,02	58,61	16,02
CON-Jul.22	7,9	25,1	773	432	257,3	136,27	31,08	23,2	125,02	51,73	67,6	17,02
NWA-Jul.22	7,7	27,2	791	546	256,1	134,8	24,2	12,2	130,02	53,12	71,5	21,3
MAP-Jul.22	6,8	25,3	6150	2560	249,8	129,9	26,3	12,38	127,5	55,84	68,01	22,02
LIO-Ago.22	7,8	26,1	2264	928	247,4	126,8	36,08	12,01	110,6	54,8	62,3	18,9
MAS-Ago.22	6,8	26,8	1980	851	244,3	130,1	22,01	0,38	127,01	52,65	64,8	15,98
CON-Ago.22	6,5	25,3	889	746	255,6	134,8	31,2	14,12	112,1	55,21	66,03	13,1
NWA-Ago.22	8,2	27,1	783	540	240,4	128,7	39,03	15,89	129,2	60,34	69,78	11,06
MAP-Ago.22	6,6	26,3	3100	2015	244,7	131,4	21,05	2,8	125,1	56,02	65,31	13,08

Tabela 9: Coeficientes de correlação de Pearson (r) para os parâmetros físico-químicos avaliados nas águas subterrâneas

Variáveis	pH	STD	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
pH	1,00										
STD	-0,18	1,00									
CE	-0,35	1,00	1,00								
Ca²⁺	-0,30	0,56	0,56	1,00							
Mg²⁺	0,32	0,69	0,69	0,65	1,00						
Na⁺	0,20	0,65	0,65	0,53	0,62	1,00					
K⁺	0,03	0,68	0,68	-0,40	0,03	0,03	1,00				
Cl⁻	-0,23	0,77	0,77	-0,64	0,87	0,84	0,34	1,00			
HCO₃⁻	0,66	0,59	0,59	0,85	0,79	0,94	0,68	0,44	1,00		
SO₄²⁻	0,57	-0,37	-0,37	0,64	0,23	0,51	-0,35	-0,12	0,69	1,00	
NO₃⁻	-0,16	0,58	0,58	0,24	0,08	0,02	0,58	-0,74	-0,48	0,14	1,00

Parâmetros de qualidade de água destinada ao consumo humano e seus riscos para a saúde pública

a) Parâmetros microbiológicos

Parâmetro	Limite máximo admissível	Unidades	Riscos para a Saúde Pública
Coliformes totais	Ausente	NMP*/ 100 ml N.º de colónias/ 100 ml	Doenças gastrointestinais
Coliformes fecais	Ausente	NMP*/ 100 ml N.º de colónias/ 100 ml	Doenças gastrointestinais
Vibrio cholerae	Ausente	1000 ml	Doenças gastrointestinais

(NMP): Número Mais Provável

Fonte: Diploma Ministerial n.º 180/2004 de 15 de Setembro

b) Parâmetros físicos e organoléticos

Parâmetro	Limite máximo admissível	Unidades	Riscos para a Saúde Pública
Cor	15	TCU	Aparência
Cheiro	Inodoro		Sabor
Condutividade	50-2000	µhmo/cm	
pH	6,5-8,5		Sabor, corrosão, irritação da pele
Sabor	Insípido		
Sólidos totais	1000	mg/l	Sabor, corrosão
Turvação	5	NTU	Aparência, dificulta a desinfecção

Fonte: Diploma Ministerial n.º 180/2004 de 15 de Setembro

c) Parâmetros químicos

Parâmetro	Límite máximo admissível	Unidades	Riscos para a Saúde Pública
Amoníaco	1,5	mg/l	Sabor e cheiro desagradável
Alumínio	0,2	mg/l	Afecta o sistema locomotor e causa anemia
Arsénico	0,01	mg/l	Cancro da pele
Antimónio	0,005	mg/l	Cancro no sangue
Bárid	0,7	mg/l	Vasoconstrição e doenças cardiovasculares
Boro	0,3	mg/l	Gastroenterites e eritemas
Cádmio	0,003	mg/l	Vasoconstrição urinária
Cálcio	50	mg/l	Aumenta a dureza da água
Chumbo	0,01	mg/l	Intoxicação aguda
Cianeto	0,07	mg/l	Bócio e paralisia
Cloretos	250	mg/l	Sabor desagradável e corrosão
Cloro residual total	0,2-0,5	mg/l	Sabor e cheiro desagradável
Cobre	1,0	mg/l	Irritação intestinal
Crómio	0,05	mg/l	Gastroenterites, hemorragias e convulsões
Dureza total	500	mg/l	Depósitos, corrosão e espumas
Fósforo	0,1	mg/l	Aumenta a proliferação dos microorganismos
Ferro total	0,3	mg/l	Necrose hemorrágica
Fluoreto	1,5	mg/l	Afecta o tecido esquelético
Matéria orgânica	2,5	mg/l	Aumenta a proliferação dos micro-organismos
Magnésio	50	mg/l	Sabor desagradável
Manganês	0,1	mg/l	Anemia, afecta o sistema nervoso
Mercurio	0,001	mg/l	Distúrbios renais e neurológicos
Molibdénio	0,07	mg/l	Distúrbios urinários
Nitrito	3,0	mg/l	Reduz o O ₂ no sangue
Nitrato	50	mg/l	Reduz o O ₂ no sangue
Níquel	0,02	mg/l	Eczemas e intoxicações
Sódio	200	mg/l	Sabor desagradável
Sulfato	250	mg/l	Sabor e corrosão
Selénio	0,01	mg/l	Doenças cardiovasculares
Sólidos totais dissolvidos	1000	mg/l	Sabor desagradável
Zinco	3,0	mg/l	Aparência e sabor desagradáveis
Pesticidas totais	0,0005	mg/l	Intoxicações e distúrbios de várias ordens
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	0,0001	mg/l	Sabor desagradável, intoxicações e distúrbios de várias ordens

Fonte: Diploma Ministerial n.º 180/2004 de 15 de Setembro