



**INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA**  
**DIVISÃO DE AGRICULTURA**  
**ENGENHARIA HIDRÁULICA AGRÍCOLA E ÁGUA RURAL**

**MAPEAMENTO DO ZONEAMENTO HIDROGEOQUÍMICO DA QUALIDADE DE  
ÁGUA SUBTERRÂNEA E DO SEU POTENCIAL PARA MULTI-USO NO  
DISTRITO DE CHÓKWÈ**

Monografia Científica apresentada e defendida como requisito para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica, Agrícola e Água Rural

**Autor:** Mussá Moisés Delivane

**Tutor:** Doutor Lateiro Salvador de Sousa, PhD

**Co-tutor:** Eng<sup>o</sup>. Paulo Sérgio Lourenço Saveca, MSc

Lionde, Novembro de 2023



**INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA**

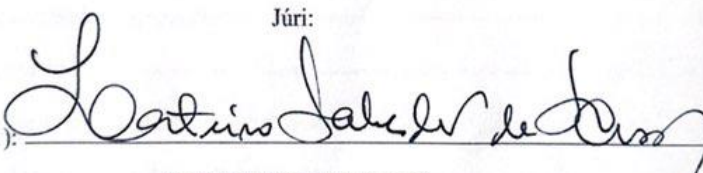
**DIVISÃO DA AGRICULTURA**

**ENGENHARIA HIDRÁULICA AGRÍCOLA E ÁGUA RURAL**

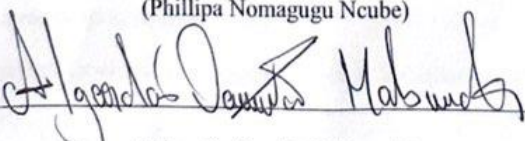
Monografia de investigação científica sobre “Mapeamento do zoneamento hidrogeoquímico da qualidade de água subterrânea e do seu potencial para multi-uso no Distrito de Chókwè” apresentado ao Curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural na Divisão de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para conclusão das actividades de investigação, no âmbito do trabalho de culminação de curso, em forma de monografia.

Monografia científica defendida e aprovada no dia 31 de Outubro de 2023

Júri:

Supervisor (1):   
(Lateiro Salvador de Sousa)

Avaliador (1): Phillipa Nomagugu Ncube  
(Phillipa Nomagugu Ncube)

Avaliador (2):   
(Algardás Damião Mabunda)

Lionde, 08 de Novembro de 2023

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	ix
DEDICATÓRIA.....	xi
AGRADECIMENTOS .....	xii
RESUMO .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivos.....	2
1.1.1. Objectivo geral.....	2
1.1.2. Objectivos específicos .....	2
1.2. Problema de Estudo e Justificação .....	2
1.3. Questão de estudo.....	3
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. Ciclo hidrológico.....	4
2.2. Zoneamento hidrogeoquímico .....	4
2.3. Água subterrânea.....	5
2.4. Hidrogeoquímica das águas subterrâneas .....	5
2.4.1. Composição hidrogeoquímica .....	5
2.4.2. Qualidade da água subterrânea para consumo humano .....	6
2.4.3. Qualidade de água subterrânea para irrigação.....	6
2.5. Parâmetros físico-químicos da qualidade de água .....	7
2.5.1. Atributos iónicos da qualidade de água subterrânea .....	10
2.6. Classificação hidroquímica das águas subterrâneas .....	12
2.6.1. Faces hidroquímicas da qualidade de água .....	12
2.7. Factores hidrogeomorfológicos que influenciam a hidrogeoquímica e qualidade de água subterrânea .....	14

2.8.	Variabilidade espacial da hidrogeoquímica da qualidade de água e o seu potencial de múlti-uso -----	15
2.8.1.	Métodos de interpolação de dados -----	15
2.9.	Classificações dos padrões químicos de múlti-uso da qualidade de água subterrânea -----	16
2.9.1.	Classificação da qualidade de água para consumo humano -----	16
2.9.2.	Classificação da qualidade de água Subterrânea para irrigação -----	16
III.	METODOLOGIA.....	18
3.1.	Descrição da área do estudo -----	18
3.2.	Clima-----	18
3.3.	Relevo e solos -----	19
3.4.	Hidrografia-----	19
3.5.	Geologia-----	19
3.6.	Hidrogeologia -----	19
3.7.	Métodos -----	20
3.7.1.	Colecta de dados-----	20
3.8.	Análise e interpretação dos dados -----	22
3.9.	Geração de mapas-----	22
3.9.1.	Interpolação dos dados -----	22
3.10.	Método de correlação -----	23
3.11.	Hidrogeoquímica e diagnóstico químico dos atributos iónicos da qualidade -	23
3.11.1.	Determinação de parâmetros físico-químicos da água subterrânea -----	23
3.11.2.	Avaliação do balanço iónico-----	24
3.11.3.	Faces hidroquímicas da qualidade de água -----	25
3.12.	Classificação da qualidade da água subterrânea para irrigação agrícola-----	25
IV.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	26
4.1.	Hidrogeoquímica e diagnóstico químico dos atributos iónicos da qualidade -	26
4.1.1.	Erro de Balanço Iônico -----	26
4.1.2.	Análise de correlação entre parâmetros físico-químicos -----	27

4.2.	Faces hidroquímicas na água subterrânea -----	28
4.2.1.	Diagrama de Piper-----	28
4.3.	Factores hidrogeomorfológicos que influenciam a hidrogeoquímica e qualidade de água subterrânea -----	32
4.3.1.	Geologia -----	32
4.3.2.	Uso e cobertura de terra -----	34
4.3.3.	Solos-----	35
4.3.4.	Topografia -----	36
4.4.	Variabilidade espacial da hidrogeoquímica e potencial de múlti-uso -----	37
4.4.1.	Potencial hidrogeniônico -----	37
4.4.2.	Condutividade elétrica -----	39
4.4.3.	Cátions -----	40
4.4.4.	Aniões-----	47
4.5.	Classificação dos padrões químicos da qualidade de água subterrânea para consumo humano-----	54
4.5.1.	Potencial Hidrogeniônico -----	54
4.5.2.	Condutividade Elétrica -----	55
4.5.3.	Cátions -----	56
4.5.4.	Aniões-----	61
4.6.	Classificação da qualidade de água Subterrânea para irrigação agrícola -----	66
4.6.1.	Avaliação dos parâmetros físico-químicos da água -----	66
4.6.2.	Classes de qualidade da água subterrânea para irrigação-----	66
V.	CONCLUSÃO.....	71
VI.	RECOMENDAÇÕES.....	72
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73
VIII.	ANEXOS .....	83
IX.	APÊNDICE .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico -----	4
Figura 2. Representação do diagrama de Piper -----	13
Figura 3. Diagrama para Classificação das Águas de Irrigação do U.S.S.L. -----	17
Figura 4. Mapa do Distrito de Chókwè -----	18
Figura 5. Mapa de Localização dos pontos de amostragem na área de estudo-----	21
Figura 6. Diagrama de Piper e faces hidroquímicas da água subterrânea na área de estudo -----	29
Figura 7. Mapa das fácies hidroquímicas na área de estudo -----	32
Figura 8. Mapa de geologia da área de estudo. -----	33
Figura 9. Mapa de uso e cobertura de terra da área de estudo com as respectivas definições de classes -----	35
Figura 10. Mapa de tipos de solos da área de estudo -----	36
Figura 11. Topografia da área de estudo-----	37
Figura 12. Mapa de distribuição espacial do pH na água subterrânea-----	38
Figura 13. Mapa de distribuição espacial da condutividade elétrica na água subterrânea -----	39
Figura 14. Mapa de distribuição espacial do sódio na água subterrânea-----	41
Figura 15. Mapa de distribuição espacial do cálcio na água subterrânea -----	42
Figura 16. Mapa de distribuição espacial do magnésio na água subterrânea-----	43
Figura 17. Mapa de distribuição espacial do potássio na água subterrânea -----	45
Figura 18. Mapa de interpolação de dureza total da área de estudo -----	46
Figura 19. Distribuição espacial de cloreto na água subterrânea-----	48
Figura 20. Distribuição espacial de sulfato na água subterrânea-----	49
Figura 21. Distribuição espacial de nitrato na água subterrânea -----	51
Figura 22. Distribuição espacial de bicarbonato na água subterrânea-----	52
Figura 23. Distribuição espacial de sólidos totais dissolvidos na água subterrânea -----	53
Figura 24. Gráfico ilustrativo de concentração de potencial hidrogeniônico da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004). -----	54
Figura 25. Gráfico ilustrativo de concentração de condutividade elétrica da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004)-----	56

Figura 26. Gráfico ilustrativo de concentração de sódio da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004) -----	57
Figura 27. Gráfico ilustrativo de concentração de cálcio da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004) -----	58
Figura 28. Gráfico ilustrativo de concentração de magnésio da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004)-----	59
Figura 29. Gráfico de concentração de potássio da água em diferentes pontos de amostragem -----	59
Figura 30. Gráfico ilustrativo de concentração de dureza total da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004)--	60
Figura 31. Gráfico ilustrativo de concentração de cloreto da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004) -----	62
Figura 32. Gráfico ilustrativo de concentração de sulfato da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004) -----	63
Figura 33. Gráfico ilustrativo de concentração de nitrato da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004) -----	64
Figura 34. Gráfico ilustrativo de concentração de sólidos totais dissolvidos da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004)-----	65
Figura 35. Resultados da classificação da qualidade de água para irrigação usando RAS -----	67
Figura 36. Diagrama para classificação de águas para irrigação segundo U.S.S.L-----	68

### **Lista de Figuras de Apêndices**

Figuras Ap. 1: Diploma Ministerial n.o 180/2004 de 15 de Setembro. -----	85
--	----

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de alcalinidade em função do pH -----	7
Tabela 2. Classificação das águas subterrâneas de acordo com sólidos totais dissolvidos -----	8
Tabela 3. Classificação das águas de acordo com a dureza em mg/L de $\text{CaCO}_3^-$ -----	9
Tabela 4. Resultados de calculo de erro de balanço iônico referente as amostras de água subterrânea -----	26
Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson (r) para os parâmetros físico-químicos de qualidade de águas subterrâneas dos parâmetros.-----	27
Tabela 6: Principais características hidroquímicas e unidades geológicas associadas nas águas subterrâneas da área. -----	31
Tabela 7. Classificação de amostras de águas subterrâneas com base nos valores de dureza -----	46
Tabela 8. Estatística descritiva dos resultados físico-químicos -----	65
Tabela 9. Classificação usada na determinação dos parâmetros físico-químicos da fonte de água subterrânea -----	66
Tabela 10. Análise estatística descritiva de RAS para qualidade de água de irrigação -	67

### Lista de Tabelas de anexos

Tabela A1. Pontos de coleta e suas respectivas localizações -----	83
Tabela A2. Localização e distribuição das classes de USSL. -----	84





**INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA**

**DIVISÃO DA AGRICULTURA**

**ENGENHARIA HIDRÁULICA AGRÍCOLA E ÁGUA RURAL**

Monografia de investigação científica sobre “Mapeamento do zoneamento hidrogeoquímico da qualidade de água subterrânea e do seu potencial para multi-uso no Distrito de Chókwè” apresentado ao Curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural na Divisão de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural.

**Tutor:** Doutor Lateiro Salvador de Sousa, PhD

**Co-tutor:** Eng<sup>o</sup>. Paulo Sérgio Lourenço Saveca, MSc

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Ca <sup>2+</sup>	Ião Cálcio
CE	Condutividade elétrica
Cl <sup>-</sup>	Ião Cloreto
CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Ião Carbono
CSR	Carbonato Sódico Residual
DT	Dureza total
EBI	Erro do balanço iónico
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ião Bicarbonato
IGS	Institute for Groundwater Studies
IDW	Inverso da distancia ponderada
K <sup>+</sup>	Ião Potássio
MAE	Ministério da Administração Estatal
meq/L	Miliequivalentes por litro
Mg <sup>2+</sup>	Ião Magnésio
mg/L	Miligramas por litros
MISAU	Ministério da Saúde de Moçambique
Na <sup>+</sup>	Ião Sódio
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ião Nitrato
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
ppm	Parte por milhão
pH	Potencial hidrogeniônico
QGIS	Sistema de Informações Geográficas Quânticas
RAS	Relação de Absorção de Sódio
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Ião Sulfato
STD	Sólidos totais dissolvidos
TA	Titulação alcalimétrica
TAC	Titulação alcalimétrica completa
USSL	United States Salinity Laboratory



## INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

### DECLARAÇÃO

Eu, Mussá Moisés Delivane, declaro com toda a honestidade, que este trabalho de Culminação do Curso é o resultado da minha própria pesquisa e das orientações do meu tutor. Todo o conteúdo presente é original e todas as fontes consultadas foram devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia final. Além disso, afirmo que este trabalho não foi apresentado em qualquer outra instituição com objectivos semelhantes ou para a obtenção de qualquer grau académico.

Lionde, 08 de Novembro de 2023

Mussa' Moisés Delivane

(Mussá Moisés Delivane)

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado com amor e gratidão aos meus pais, Moisés Mussá e Luísa Custódio. Aos meus irmãos Daniel e Dina, sobrinhos e demais familiares pelo carinho e amizade. As minhas tias, Odete Ferreira e Marta Custódio com profundo carinho e gratidão que sempre me apoiaram e cuidaram de mim para que eu possa ter um futuro melhor.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de começar por agradecer a Deus, por me conceder força, sabedoria e fé ao longo de toda a minha jornada académica. A sua presença constante e apoio inabalável foram essenciais para superar os desafios e alcançar os resultados desejados.

Também sou imensamente grato à minha família, que esteve sempre ao meu lado, incentivando-me e apoiando-me em cada etapa desta jornada. Agradeço em especial aos meus pais, cujo amor, apoio e dedicação foram fundamentais para o meu sucesso.

Quero expressar a minha gratidão às minhas tias Marta Custódio e Odete Ferreira pelo apoio, amor e cuidado que me têm dado ao longo dos anos. A sua presença na minha vida é como a de segundos pais, e sou profundamente grato por tê-las ao meu lado.

À minha namorada, Preciosa Yúmina, pelo seu amor, apoio e dedicação ao longo desta jornada académica. A sua presença constante tem sido uma fonte de inspiração e força para mim.

Aos amigos que fiz ao longo desta caminhada, António Langa, Clinton de Sousa, Déclio Tsenani, Obed Simbine, Fernando dos Litos, Viegas Tino, Edio Bambamba (amigos do condomínio Mabunda) e tantos outros, quero agradecer pela amizade e pelo apoio constante.

Agradeço também ao meu tutor, Eng<sup>o</sup>. Paulo Sérgio Lourenço Saveca MSc, e ao co-tutor Doctor Lateiro Salvador de Sousa, PhD, por dedicarem o seu tempo, conhecimento e paciência para me orientar nesta jornada académica. A sua orientação valiosa, sugestões construtivas e feedback detalhado foram fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento do meu trabalho. E, claro, aos docentes do Curso de EHAAR, por serem excelentes docentes.

Quero agradecer também aos meus colegas de curso (EHAAR 2019), que contribuíram com as suas ideias, discussões e debates enriquecedores, criando um ambiente de aprendizagem estimulante e colaborativo.

Por fim, agradeço a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. O vosso apoio, incentivo e confiança foram fundamentais para que eu pudesse concluir esta jornada com sucesso. Expresso a minha profunda gratidão a todos vocês, muito obrigado!

"Os que confiam no Senhor são como o monte Sião, que não se abala, mas permanece para sempre. Assim como os montes cercam Jerusalém, assim o Senhor cerca o seu povo, desde agora e para sempre" (Salmos 125:1-2).

## RESUMO

A qualidade da água subterrânea é de extrema importância para os ecossistemas e atividades humanas. O objectivo principal deste estudo foi mapear as diferentes zonas hidrogeoquímicas da qualidade da água subterrânea e avaliar o seu potencial para diversos usos no Distrito de Chókwè. Além disso, foram estabelecidos objectivos específicos para determinar a composição hidrogeoquímica da água, identificar os factores que influenciam na sua qualidade, analisar a variabilidade espacial e classificar os padrões físico-químicos para multi-uso. O distrito de Chókwè é destacado por prática de agricultura, mas a água subterrânea sofre deterioração devido ao uso excessivo e intensivo de fertilizantes e práticas impróprias de agricultura. A falta de dados hidrogeoquímicos limita a compreensão e a adequação da qualidade da água, especialmente em áreas urbanas em crescimento que dependem de poços para abastecimento humano. Para tal, foram utilizados softwares hidrogeológicos como o Qualigraf v.17, e o Sistema de Informações Geográficas Quânticas (QGIS v.2.18.10), juntamente com o Excel 2016 para análises estatísticas, a fim de avaliar a qualidade das águas subterrâneas e mapeá-las. Além disso, foram aplicados métodos de proporções geoquímicas, correlação e métodos gráficos para compreender a hidrogeologia local e sua influência na hidroquímica das águas subterrâneas. O estudo utilizou uma abordagem de compilação de dados históricos, que coletou-se amostras de água subterrânea em poços entre 2015 - 2019. Essas amostras foram analisadas em laboratório do Instituto de Estudos de Águas Subterrâneas (IGS), para investigar a presença de elementos químicos. Os resultados indicam que a água subterrânea na região é afectada pelo clima semiárido, o que resulta em altas concentrações de sais. Os resultados analíticos da química das águas subterrâneas indicaram que a sequência na ordem decrescente dos iões  $\text{Na}^{2+} > \text{Ca}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  para os cátions e  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$  para os aniões e as análises laboratoriais revelaram que muitos parâmetros excedem os limites de potabilidade estabelecidos pelo MISAU e pela OMS, indicando contaminação nas áreas agrícolas e a inadaptação da água para consumo humano. Parâmetros como pH, CE e STD estão dentro das normas, mas altas concentrações de sódio e cloreto tornam a água imprópria para consumo. E, as águas subterrâneas na região foram classificadas como cloretadas sódicas, bicarbonatadas cálcicas/magnesianas, sulfatadas e sódio bicarbonatadas. A predominância de íons sódio em áreas agrícolas destaca a presença de sódio, cálcio/magnésio, cloreto, sulfato e bicarbonato nessas águas. A aplicação do esquema de classificação para irrigação USSL mostrou que cerca de 68,75% das amostras são adequadas, enquanto 31,25% são inapropriadas devido ao risco de prejudicar a estrutura do solo.

**Palavras-chave:** Mapeamento, hidrogeoquímica, fácies hidroquímicas, qualidade da água subterrânea; potencial multi-uso, Distrito de Chókwè.

## ABSTRACT

The quality of groundwater is of utmost importance for ecosystems and human activities. The main objective of this study was to map the different hydrogeochemical zones of groundwater quality and assess its potential for various uses in the Chókwè District. In addition, specific goals were established to determine the hydrogeochemical composition of the water, identify factors influencing its quality, analyze spatial variability, and classify physical-chemical patterns for multi-use. The Chókwè District is known for agricultural practices, but groundwater undergoes deterioration due to excessive and intensive use of fertilizers and improper farming practices. The lack of hydrogeochemical data limits the understanding and adequacy of water quality, especially in growing urban areas that rely on wells for human water supply. To address this, hydrogeological software such as Qualigraf v.17 and the Quantum Geographic Information System (QGIS v.2.18.10) were used, along with Excel 2016 for statistical analyses, to evaluate groundwater quality and map it. Additionally, geochemical proportions, correlation methods, and graphical techniques were applied to understand local hydrogeology and its influence on groundwater hydrochemistry. The study employed a data compilation approach, collecting groundwater samples from wells between 2015 and 2019. These samples were analyzed in the laboratory of the Institute for Groundwater Studies (IGS) to investigate the presence of chemical elements. The results indicate that groundwater in the region is affected by the semi-arid climate, resulting in high concentrations of salts. Analytical results of groundwater chemistry indicated a sequence in decreasing order of ions for cations ( $\text{Na}^{2+} > \text{Ca}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$ ) and for anions ( $\text{Cl}^{-} > \text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^{-}$ ). Laboratory analyses revealed that many parameters exceed the potability limits established by MISAU and WHO, indicating contamination in agricultural areas and unsuitability of water for human consumption. Parameters such as pH, EC, and STD are within standards, but high concentrations of sodium and chloride make the water unsuitable for consumption. Groundwater in the region was classified as sodium chloride, calcium/magnesium bicarbonate, sulfate, and sodium bicarbonate. The predominance of sodium ions in agricultural areas highlights the presence of sodium, calcium/magnesium, chloride, sulfate, and bicarbonate in these waters. The application of the USSL irrigation classification scheme showed that about 68.75% of the samples are suitable, while 31.25% are unsuitable due to the risk of harming soil structure."

**Keywords:** Mapping, hydrogeochemistry, hydrogeochemical facies, groundwater quality, potential multiple uses, Chókwè District.





## I. INTRODUÇÃO

A qualidade da água subterrânea desempenha um papel crucial na determinação das atividades humanas que podem ser realizadas em uma determinada região (Rawat & Gautam, 2018). A maior parte da água do mundo, cerca de 97,5%, faz parte do sistema de água do mar, tornando-a inadequada para consumo devido à alta concentração de sólidos totais dissolvidos (STD) acima de 35.000 partes por milhão (ppm). Em contraste, apenas 2,5% da água disponível é doce (Lal *et al.*, 2023).

A qualidade da água é uma questão vital na hidrogeologia, pois é tão essencial quanto a quantidade disponível para diferentes usos. Isso se deve ao facto de que as propriedades físicas, químicas e biológicas da água determinam sua adequação para diferentes propósitos. No entanto, quando se trata da utilização das águas subterrâneas para fins agrícolas, é necessário ter uma série de precauções, especialmente em relação aos efeitos resultantes das características físico-químicas da água de irrigação. Esses efeitos podem ter impacto no solo, nas culturas, nos sistemas de distribuição e até mesmo nos mananciais hídricos locais, (Santos & Bulhões, 2017).

O estudo das propriedades químicas e das condições ambientais das águas subterrâneas é de extrema importância para determinar como esses recursos hídricos podem ser usados com qualidade ( Mattos *et al.*, 2019)

De acordo com a pesquisa conduzida por Cao *et al.*, (2016), a deterioração significativa da qualidade das águas superficiais e o aumento da demanda por água têm levado a um aumento exponencial na exploração das águas subterrâneas. Portanto, é crucial compreender a dinâmica do ambiente hidrogeológico e os processos de superfície para uma gestão eficaz dos recursos hídricos.

A avaliação dos parâmetros físico-químicos da água é uma medida eficaz para identificar possíveis problemas relacionados à saúde humana e outros aspectos, essa análise permite alertar sobre a qualidade da água e auxiliar na prevenção de potenciais riscos, (Silva *et al.*, 2022). Uma vez que essa análise envolve muitos dados e variáveis, uma solução pode ser dada pelo tratamento de múltiplas variações dos dados ser apresentados num formato sintético, para que representem e descrevam de forma compreensível e significativa o estado e as tendências da qualidade da água (Paim *et al.*, 2018).

Deste modo, com o auxílio do Sistema de Informação Geográfica (SIG), esses parâmetros podem ser explorados para mapeamento e execução de análises espaciais, podendo fornecer um importante auxílio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos (Mattos *et al.*, 2019).

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo mapear as diferentes zonas hidrogeoquímicas da qualidade da água subterrânea e avaliar o seu potencial para múltiplos usos na região. Será utilizada uma metodologia para avaliar a qualidade da água subterrânea, através da análise de dados hidrogeoquímicos recolhidos. Espera-se obter um mapa de zoneamento hidrogeoquímico da área em estudo, identificando as áreas com maior potencial para utilização múltipla da água subterrânea e os resultados desta pesquisa contribuirão para a gestão e planeamento dos recursos hídricos na região.

## **1.1. Objectivos**

### **1.1.1. Objectivo geral**

- ✚ Mapear as zonas hidrogeoquímicas da qualidade de água subterrânea e o seu respectivo potencial múlti-uso no Distrito de Chókwè.

### **1.1.2. Objectivos específicos**

- ✚ Determinar a composição hidrogeoquímica e correspondente diagnóstico químico dos atributos iónicos da qualidade de água subterrânea;
- ✚ Identificar os factores hidrogeomorfológicos que influenciam a hidrogeoquímica e qualidade de água subterrânea
- ✚ Analisar a variabilidade espacial da hidrogeoquímica da qualidade de água e o seu potencial de múlti-uso;
- ✚ Classificar os padrões químicos de múlti-uso da qualidade de água subterrânea

## **1.2. Problema de Estudo e Justificação**

A qualidade da água subterrânea é um factor crucial para a sustentabilidade dos ecossistemas e é amplamente utilizada em actividades humanas, como agricultura e consumo humano. No entanto, nos últimos anos, tem havido um aumento no reconhecimento da importância da qualidade e quantidade da água subterrânea devido à ameaça de contaminação por factores naturais e ações humanas, (Souza, 2015).

O Distrito de Chókwè é uma região agrícola de destaque no país. Infelizmente, isso tem contribuído para uma deterioração significativa da qualidade da água subterrânea na região, devido ao uso excessivo de fertilizantes, esterco animal, pesticidas e práticas culturais inadequadas. Esses factores aumentam o risco de contaminação das águas subterrâneas, representando um risco para a saúde humana quando consumido sem tratamento e o meio ambiente, ( Krishna Kumar *et al.*, 2014; Filho, 2017).

A falta de informações sobre a hidrogeoquímica da qualidade da água subterrânea é um problema no Distrito de Chókwè, pois não há dados disponíveis sobre o assunto, o que limita a compreensão da variabilidade da qualidade da água e seu potencial de uso. Com o crescimento urbano e a expansão da agricultura, há uma pressão cada vez mais sobre os recursos hídricos subterrâneos. A população local depende dos poços para obter água para o consumo, porém, sem ter conhecimento científico sobre a adequação dos parâmetros químicos da qualidade da água para consumo humano. Deste modo, torna difícil para a população determinar se a água captada dos poços é adequada para consumo humano. Portanto, é essencial obter conhecimento sobre as águas subterrâneas para garantir a saúde da população, para uma gestão e planeamento adequados dos recursos hídricos na região, (Macorreia, 2018).

Nesse contexto, este estudo sobre o mapeamento do zoneamento hidrogeoquímico da qualidade da água subterrânea e seu potencial de uso múltiplo no Distrito de Chókwè é essencial para a gestão e planeamento dos recursos hídricos. Pois, permitirá identificar áreas com maior potencial para uso da água para diferentes fins, como abastecimento humano e agricultura.

Além disso, a pesquisa irá contribuir para o desenvolvimento sustentável da região, garantindo o fornecimento de informações da qualidade da água subterrânea para as actividades económicas e para a população local.

### **1.3. Questão de estudo**

Como a análise hidrogeoquímica pode ser aplicada para mapear o zoneamento hidrogeoquímico da qualidade da água subterrânea no Distrito de Chókwè e identificar áreas com potencial multi-uso, considerando as necessidades de abastecimento de água para consumo humano e as actividades agrícolas?

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é um processo contínuo e fechado no qual a água se movimenta entre a superfície terrestre e a atmosfera, não tendo um começo ou fim definidos (Figura 1). Esse ciclo tem início com a evaporação da água dos oceanos, impulsionada pela energia solar, que se transforma em nuvens na atmosfera. Essas nuvens se condensam e retornam à terra na forma de chuva, granizo ou neve, sendo conhecida como água meteórica. A água proveniente da precipitação infiltra no solo, tornando-se a fonte de renovação dos recursos hídricos (Silva & Cavalcanti, 2019; Ferreira, 2023).

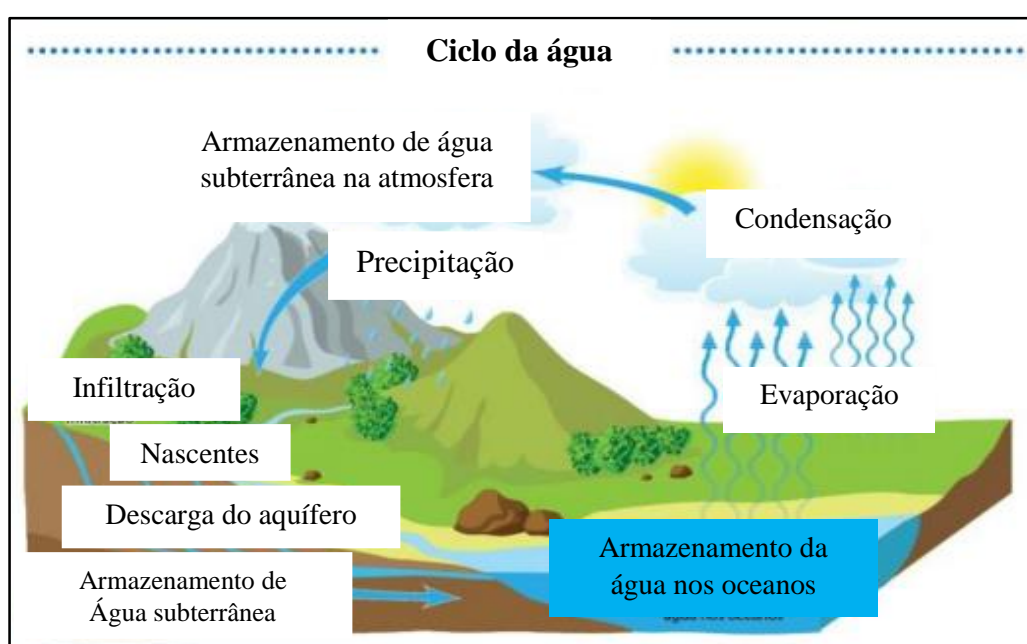


Figura 1. Ciclo hidrológico. Fonte: Bordignon, (2016).

### 2.2. Zoneamento hidrogeoquímico

De acordo com Mattos *et al.*, (2019), os mapas de zoneamento hidrogeoquímico fornecem informações que ajudam a compreender como a água subterrânea flui em uma determinada área. Isso ocorre porque as características químicas da água são influenciadas por factores como a geologia, a topografia e as propriedades físicas e químicas do aquífero. Esses mapas dividem a área em zonas com base na qualidade da água, classificando-as como boa, regular ou baixa. Essa classificação auxilia na gestão dos recursos hídricos, pois permite identificar áreas que apresentam risco de contaminação e orientar a adoção de medidas de proteção e controle da qualidade da água subterrânea.

### **2.3. Água subterrânea**

As águas subterrâneas são uma fonte importante de água doce para o planeta, e os aquíferos são os principais reservatórios dessa água potável (Batabyal, 2018). As águas subterrâneas são uma parte essencial do ciclo hidrológico, movendo-se lentamente através dos aquíferos desde as áreas de recarga onde a água da chuva penetra no solo, até as áreas de descarga onde as águas subterrâneas emergem na superfície ou são descarregadas em rios e lagos. Elas também desempenham um papel fundamental na manutenção da umidade do solo. No entanto, as actividades humanas na superfície podem afetar a qualidade da água subterrânea, tornando-a inadequada para uso, (Hirata *et al.*, 2019,).

Para Srivastava & Jain, (2017) a água subterrânea se refere àquela que está presente abaixo da superfície da terra, preenchendo os espaços vazios das rochas e sedimentos. Ela desempenha um papel crucial na manutenção da umidade do solo, bem como no fluxo dos rios e lagos, sendo influenciada por duas forças principais: a adesão e a gravidade. As águas subterrâneas representam maior percentagem das águas doces e líquidas do planeta, tornando os aquíferos maiores reservatórios de água potável da humanidade

### **2.4. Hidrogeoquímica das águas subterrâneas**

De acordo com Quaggio *et al.*, (2020) o processo de evolução hidrogeoquímica das águas subterrâneas começa quando as águas da chuva, que contêm uma grande quantidade de CO<sub>2</sub>, entram em contato com a camada superficial do solo e interagem com os minerais e a matéria orgânica presentes ali. À medida que se movem no subsolo, a evolução das águas subterrâneas é influenciada pelas características geológicas dos reservatórios e pelos processos de interação entre a água ou rochas.

Para Mattos *et al.*, (2019), o zoneamento hidrogeoquímico visa a repartição do território e regulação dos regimes espaciais para o uso dos recursos hídricos que possibilita a melhor composição dos padrões da qualidade de água subterrânea.

#### **2.4.1. Composição hidrogeoquímica**

De acordo com Leite *et al.*, (2018), as águas subterrâneas possuem composição química iônica que varia conforme a disponibilidade dos íons dissolvidos. Essa composição determina a classificação hidrogeoquímica da água e estabelece padrões de qualidade para

diferentes finalidades, como consumo humano, agricultura e uso industrial. Os íons mais comuns são sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato, carbonato e bicarbonato. Em pesquisas recentes Leite *et al.*, (2021), foi explicado que a dissolução mineral é responsável pela liberação de íons nas águas subterrâneas, possibilitando a interação com outras espécies iônicas e precipitação seguindo equilíbrios termodinâmicos e a Lei de Conservação de Massa. Com o aumento do uso de água para abastecimento público, a hidroquímica das águas subterrâneas tem sido amplamente estudada em todo o mundo.

#### **2.4.2. Qualidade da água subterrânea para consumo humano**

De acordo com Vilanculos (2022), é fundamental garantir a qualidade e segurança da água destinada ao consumo humano, pois a escassez e a poluição representam ameaças ao fornecimento adequado. Para garantir que a água seja livre de contaminantes e adequada para várias finalidades, como consumo direto, preparação de alimentos e higiene pessoal, é necessário que ela atenda aos padrões de qualidade definidos pela legislação. Além disso, a legislação ambiental desempenha um papel crucial na regulamentação e preservação dos aquíferos subterrâneos, visando evitar impactos negativos e prevenir a contaminação por substâncias poluentes persistentes e móveis.

Nesse contexto, o Diploma Ministerial nº 180/2004 do Ministério da Saúde de Moçambique, define água própria para consumo humano como aquela que é utilizada para ingestão, preparação de alimentos e higiene pessoal, independentemente de sua origem, sem representar riscos para a saúde do consumidor.

#### **2.4.3. Qualidade de água subterrânea para irrigação**

A qualidade da água para irrigação depende da composição e concentração dos constituintes dissolvidos. Além disso, é importante considerar o aumento da salinidade e alcalinidade na área irrigada. Um parâmetro relevante nesse contexto é a Razão de Adsorção de Sódio (RAS), que mede a tendência de substituição dos cátions de sódio na água de irrigação pelo cálcio e magnésio adsorvidos nas argilas do solo, podendo danificar sua estrutura. As características da qualidade da água para a irrigação podem ser avaliadas através da condutividade elétrica e da relação sódio-adsorção (RAS). Esses parâmetros permitem classificar a qualidade da água para a irrigação, auxiliando na avaliação do risco de salinidade e sodicidade do solo (Franco & Hernandez, 2009).

## 2.5. Parâmetros físico-químicos da qualidade de água

Segundo de Carvalho, (2017), na avaliação da qualidade da água subterrânea, vários íons presentes na água são considerados, sendo que os mais comuns incluem: Sódio ( $\text{Na}^+$ ), Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Potássio ( $\text{K}^+$ ), Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). A presença e concentração desses íons podem afetar a produtividade das plantas e a qualidade da água para consumo humano.

### a) Potencial hidrogeniônico

De acordo com Belizário, (2016), o pH da água é importante para determinar a qualidade da água e pode ser influenciado por fatores naturais e poluentes. O pH mede a concentração de íons hidrogênio e hidroxilo e sua variação pode afetar a capacidade das plantas de absorver nutrientes, e a unidade do pH é o logaritmo negativo de concentração do íon hidrogênio, conforme expressa a Equação (1).

$$\text{pH} = -\log(\text{H}^+) \quad (1)$$

Onde:

pH: potencial hidrogénico;

$\text{H}^+$ : íon hidrogênio

Tabela 1. Tipos de alcalinidade em função do pH

Nível de pH	Descrição
< 5	Muito Ácido
5-7	Ácido
7	Neutro
8-9	Alcalino
9-14	Muito alcalino

Fonte: Chrispim, (2016).

### b) Condutividade elétrica

Segundo Nascimento, (2020), a condutividade elétrica da água está diretamente relacionada à presença de íons dissolvidos, onde maiores concentrações de íons resultam em maior condutividade. A temperatura também desempenha um papel nesse parâmetro. A unidade de medida internacional é o Siemens por metro (S/m), equivalente ao Mhos/m.



Para Barroso *et al.*, (2011) a condutividade elétrica da água é amplamente utilizada como parâmetro para avaliar a salinidade. Esse parâmetro reflete a capacidade dos íons presentes na água de conduzir eletricidade e aumenta proporcionalmente com o aumento da concentração de sais. A condutividade elétrica é um indicador confiável da quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) na água, sendo que os STD em mg/L são proporcionais à condutividade em microsiemens. Essa relação matemática pode ser expressa pela equação (2):

$$\text{STD (mg/L)} = k * \text{condutividade elétrica } (\mu\text{S/cm}) \quad (2)$$

Onde:

$$K = 0,54 - 0,96 \text{ normalmente } (0,55-0,76)$$

**c) Sólidos totais dissolvidos**

De acordo com Abreha, (2014), os sólidos totais dissolvidos (STD) são minerais presentes em solução na água, indicando a concentração de substâncias dissolvidas. Na avaliação do STD em águas subterrâneas, a condutividade elétrica (CE) pode ser usada, multiplicada por um fator entre 0,55 e 0,75. O STD é amplamente utilizado para avaliar o grau de salinização dessas águas. O cálculo do conteúdo de STD é realizado adicionando a massa dos íons presentes à massa de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), como demonstrado na equação (3):

$$\text{STD} = \text{massa dos íons} + \text{massa do } \text{SiO}_2 \quad (3)$$

Onde:

$$\text{SiO}_2 - \text{Dióxido de Silício- (mg/L)}$$

**Tabela 2.** Classificação das águas subterrâneas de acordo com sólidos totais dissolvidos

Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	Tipos de água
0-1000	Água Doce
1000-10 000	Água Salobre
10 000 – 100 000	Água Salina ou Salgada
> 100 000	Água Hipersalina

Fonte: Chrispim, (2016)

NB: TDS > 2000-3000 mg/L, água muito salgada para consumo humano, Fonte: (Chrispim, 2016).

**d) Dureza total**

A dureza total da água subterrânea, de acordo com Frazão *et al.* (2011), é um atributo iônico importante que é principalmente causado pela presença de íons de cálcio e magnésio. Essa dureza é calculada como a soma das concentrações desses íons na água, expressa em termos de carbonato de cálcio.

Para Mendonça & Flores, (2017), a dureza da água é uma propriedade que está relacionada à concentração de certos cátions em solução, especialmente cálcio e magnésio. A dureza da água pode ser classificada em duas categorias:

✚ dureza temporária, é causada pela presença de sais de carbonato e bicarbonato desses cátions, os quais se tornam insolúveis quando a amostra é aquecida;

✚ dureza permanente, é causada pela presença de sais de cloretos, nitratos e outros compostos que permanecem solúveis mesmo após o aquecimento da amostra.

Para calcular a dureza total em miligramas por litro (mg/L) de CaCO<sub>3</sub>, pode-se utilizar a equação (4) proposta por (Rawat *et al.*, 2018) e classificação conforme Tabela 3.

A soma das duas durezas é chamada de dureza total.

$$\text{Dureza total (DT)} = 2,5 (\text{Ca}^{+2}) + 4,1 (\text{Mg}^{+2}) \quad (4)$$

Onde:

DT - Dureza total(mg/L de CaCO<sub>3</sub>);

Ca<sup>+2</sup> - Concentração de cálcio (mg/L);

Mg<sup>+2</sup> - Concentração de magnésio (mg/L).

**Tabela 3.** Classificação das águas de acordo com a dureza em mg/L de CaCO<sub>3</sub>

Concentração em Carbonato de Cálcio (mg/L)	Grau de Dureza
< 60	Mole
60 - 120	Moderadamente Dura
120 - 180	Dura
> 180	Muito Dura

Fonte: Mendonça & Flores, (2017).

### 2.5.1. Atributos iônicos da qualidade de água subterrânea

#### a) **Cátions**

##### **Sódio**

O sódio é um elemento químico que está frequentemente presente nas águas subterrâneas, sendo um dos principais componentes das rochas ígneas. Sua principal fonte mineral, os feldspatos plagioclásios, é pouco resistente aos processos intempéricos, especialmente aos processos químicos. Os sais formados durante esses processos são altamente solúveis (Sousa, 2006).

De acordo com Júnior & Silva, (2012), o sódio é um metal alcalino encontrado em grande quantidade nas águas subterrâneas. É altamente solúvel e sua concentração pode ser maior do que nas águas superficiais. Na irrigação, é utilizando a Relação de Adsorção de Sódio (RAS) para evitar problemas de salinização do solo. No consumo humano, altas concentrações de sódio na água potável podem contribuir para doenças, e a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2004) recomenda um limite máximo de 200 mg/litro de sódio na água.

##### **Potássio**

Braga & Ferrão, (2015), destacam que o potássio é um elemento abundante na crosta terrestre, mas ocorre em baixas concentrações nas águas subterrâneas devido à sua adsorção pelos minerais de argila. É essencial para o crescimento das plantas e não representa riscos significativos à saúde nas águas subterrâneas destinadas ao consumo humano. Os sais de potássio são altamente solúveis e os teores nas águas subterrâneas são geralmente inferiores a 10 mg/L, sendo mais comuns entre 1 e 5 mg/L.

##### **Cálcio**

Segundo Carvalho, (2017), o cálcio é um íon essencial para a formação do solo e para a nutrição das plantas. Sua solubilidade é influenciada pela presença de dióxido de carbono, sendo mais solúvel na forma de bicarbonato.

O cálcio está presente nas rochas ígneas, e suas principais fontes são os minerais calcita, dolomita, aragonita, plagioclásios cálcicos e hepatita. Nas águas subterrâneas, os níveis de cálcio variam de 10 mg/L a 100 mg/L, mas em salmoura podem chegar a até 75.000 mg/L, sendo mais comum em rochas calcárias (Maciel, 2019).

## **Magnésio**

Segundo Caminha, (2022), o magnésio é um íon importante nas águas subterrâneas, apresentando comportamento semelhante ao cálcio. Ele, pode formar sais solúveis e sua presença junto ao cálcio em águas interiores indica contaminação por água marinha.

Minerais como magnetite, biotita, granada, olivina, anfibólios e piroxénios são fontes comuns de magnésio. Esses minerais são mais estáveis do que os minerais de cálcio, resultando em teores menores de magnésio nas águas subterrâneas. Nas áreas como rochas carbonáticas, a dolomita é uma fonte importante de magnésio. Os teores de magnésio variam de 1 mg/L a 50 mg/L, enquanto na água do mar chegam a cerca de 1.000 mg/L. O magnésio também contribui para a dureza da água (Chripim, 2016).

### **b) Ânions**

#### **Cloreto**

De acordo com Gómez *et al.*, (2014), o cloreto é um íon presente em todas as águas, em rochas sedimentares, é mais comum ocorrer como resultado da evaporação, enquanto em rochas ígneas sua presença é limitada. A quantidade de cloreto na água pode fornecer informações sobre suas características e também pode servir como um indicador de contaminação. Concentrações elevadas de cloreto podem ter efeitos negativos na irrigação e no consumo humano. Na irrigação, o excesso prejudica o crescimento das plantas e a absorção de nutrientes. No consumo humano, altos níveis de cloreto afetam a qualidade da água. A OMS recomenda um limite máximo de 250 mg/L de cloreto na água potável.

Para Uamusse, (2015), o cloreto é um dos íons mais abundantes na água e pode indicar o nível de salinidade. Sua presença na água pode ser atribuída à contaminação por águas residuais, dissolução de minerais ou intrusão de água do mar.

#### **Sulfato**

De acordo com Chripim, (2016), o sulfato é um íon abundante nas águas subterrâneas, ocorrem em em certos minerais de rochas ígneas do e são resultante da dissolução de solos e lixiviação das rochas sedimentares, incluindo depósitos de gipsite e anidrita. A presença de sulfato em águas superficiais pode ser influenciada devido aos despejos industriais e precipitação. As concentrações de sulfato nas águas naturais variam de 2 a 80 mg/L, podendo ser mais elevadas em áreas com descargas industriais ou regiões áridas.

É essencial controlar o teor de sulfato em águas tratadas para consumo humano, devido aos efeitos laxativos associados à sua ingestão excessiva.

### **Nitratos**

De acordo com Braga *et al.*, (2017), os nitratos são solúveis em água e geralmente estão presentes em concentrações moderadas nos corpos de água como resultado natural do processo de nitrificação. No entanto, as principais fontes de poluição por nitratos são os fertilizantes utilizados na agricultura e os efluentes de estações de tratamento de esgoto.

### **Bicarbonato e Carbonato**

De acordo com Chrispim (2016), o bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) é um íon que mantém sua carga elétrica em águas naturais e é facilmente precipitado, especialmente como bicarbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Sua concentração em águas doces varia de 50 a 350 mg/L, podendo chegar a 800 mg/L. A alcalinidade é frequentemente utilizada para calcular a concentração de bicarbonato, sendo expressa em mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . A presença do íon carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) na água é influenciada pelo pH e pela quantidade de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente. Em águas naturais, a presença de carbonato é maior que a do bicarbonato apenas quando o pH é igual ou superior a 10. A equação (5) é utilizada para calcular a concentração de bicarbonato com base na alcalinidade da água.

$$\text{HCO}_3^- = 1,2 \times \text{Alcalinidade (mg/L de CaCO}_3^{2-}) \quad (5)$$

## **2.6. Classificação hidroquímica das águas subterrâneas**

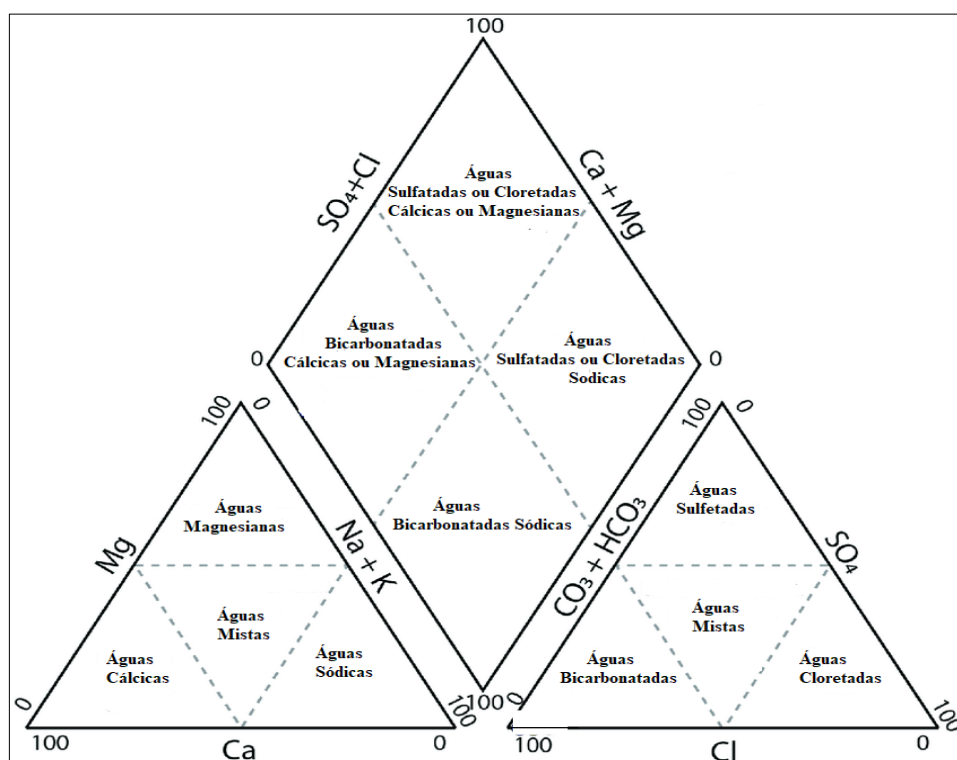
### **2.6.1. Faces hidroquímicas da qualidade de água**

As faces hidroquímicas são determinadas com base na relação entre os íons predominantes na água, representados pelas partes catiónica e aniônica. O diagrama de Piper é o modelo mais utilizado para representar graficamente a composição química da água, (Silva, 2013).

Essa representação gráfica facilita a interpretação das propriedades da água, permite comparações e correlações entre os íons e também ajuda a visualizar o comportamento e a variação da qualidade da água em um local específico ao longo do tempo. Essa abordagem é útil para a análise da qualidade da água e auxilia na gestão e monitoramento dos recursos hídricos, (Vasconcelos *et al.*, 2018).

a) **Diagrama de Piper**

De acordo com Leite *et al.*, (2021) o diagrama tri-linear de Piper (Figura 2) é uma ferramenta utilizada para determinar o regime hidroquímica de uma área com base nos valores analíticos das águas subterrâneas. Ele utiliza constituintes aniônicos ( $\text{CO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$ ) e catiónicos ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{Ca}^{+2}$ ) como variáveis para analisar as modificações que ocorrem na água ao longo de sua passagem em uma determinada área, bem como problemas geoquímicos específicos.



**Figura 2.** Representação do diagrama de Piper. Fonte: Filho, (2017).

De acordo com Chrispim, (2016), o diagrama de Piper fornece informações detalhadas sobre a geoquímica e hidrodinâmica da água subterrânea em relação ao seu meio. O diagrama agrupa os principais cátions e ânions em dois campos triangulares menores, abaixo do diagrama, com escalas em porcentagem. Isso permite visualizar as relações químicas dos recursos hídricos e classificar as águas subterrâneas com base nas concentrações iônicas, que são:

- ✚ Águas bicarbonatadas do tipo cálcio e magnésio;
- ✚ Águas sulfatadas ou cloradas de cálcio e magnésio;
- ✚ Águas cloradas e/ou sulfatadas de sódio;
- ✚ Águas bicarbonatadas sódicas.

## **2.7. Factores hidrogeomorfológicos que influenciam a hidrogeoquímica e qualidade de água subterrânea**

### **2.7.1. Factores hidrogeomorfológicos**

Segundo Goerl *et al.*, (2012), os fatores hidrogeomorfológicos que influenciam a hidrogeoquímica e a qualidade da água subterrânea incluem a composição do solo, a geologia, a topografia, o clima, a vegetação e o uso do solo, podem afetar a qualidade da água subterrânea. É importante entender esses fatores para gerenciar os recursos hídricos subterrâneos de forma sustentável e garantir a disponibilidade de água potável para as gerações atuais e futuras.

#### **Geologia**

De acordo com Iqbal *et al.*, (2021) a geologia é um fator importante que influencia a hidrogeoquímica e qualidade da água subterrânea. A composição química da água subterrânea é influenciada pelas características geológicas da área, como o tipo de rocha e solo presentes na região, em regiões com rochas calcárias, a água subterrânea tende a ter alta concentração de cálcio e magnésio, resultando em água dura. Já em regiões com rochas sedimentares, a água subterrânea tende a ter alta concentração de ferro e manganês.

#### **Topografia**

De acordo com Clark, (2015), a topografia influencia a hidrogeoquímica e a qualidade da água subterrânea. Solos permeáveis e declives acentuados aumentam a vulnerabilidade à contaminação, enquanto solos compactados e declives suaves oferecem maior proteção. Áreas com declives elevados têm maior velocidade de circulação da água subterrânea, enquanto áreas com declives suaves têm menor velocidade.

#### **Vegetação**

De acordo com Goerl *et al.* (2012), a vegetação é um fator importante na hidrogeomorfologia, pois pode afetar a qualidade e quantidade da água subterrânea. A vegetação também pode afetar a recarga de água subterrânea, pois, as plantas podem aumentar ou diminuir a taxa de infiltração da água no solo. Além disso, a vegetação pode afetar a qualidade da água, uma vez que algumas plantas podem liberar compostos orgânicos e nutrientes no solo e na água, enquanto outras podem absorver poluentes da água.

## **Uso e cobertura de terra**

De acordo com Iqbal *et al.*, (2021), o uso e a cobertura da terra afetam a qualidade da água subterrânea. Vegetação e solo exposto liberam poluentes no solo, que podem infiltrar-se na água subterrânea. Áreas urbanas e industriais têm mais poluentes na água subterrânea do que áreas rurais e naturais. A forma como a terra é usada afeta a quantidade, qualidade e presença de contaminantes na água subterrânea.

### **2.8. Variabilidade espacial da hidrogeoquímica da qualidade de água e o seu potencial de múlti-uso**

A variabilidade espacial da hidrogeoquímica da qualidade da água subterrânea envolve a distribuição dos parâmetros químicos presentes na água em uma determinada região. Essa variabilidade pode ser influenciada por fatores como geologia, clima, uso do solo e atividades humanas. Analisar essa variabilidade é importante para entender os processos hidrogeológicos e identificar áreas com potencial para uso sustentável da água subterrânea. Também auxilia no monitoramento e planejamento de ações para proteção e gestão adequada da qualidade da água, conforme destacado por (Vicente *et al.* 2018).

#### **2.8.1. Métodos de interpolação de dados**

De acordo com Souza *et al.*, (2016), a interpolação espacial é um processo que transforma dados de observações pontuais em campos contínuos, gerando mapas que buscam representar a distribuição real do atributo estudado da maneira mais precisa possível. Dentre os diversos métodos de interpolação disponíveis para conjuntos de dados relacionados, neste caso será utilizado o método do Inverso da Distância elevado a uma Potência (inverso da distancia ponderada, IDW).

##### **a) Inverso da distancia ponderada**

No método de interpolação IDW, os pesos são determinados como o inverso da distância elevado a uma potência, em que a distância separa o valor interpolado dos valores observados. Esse método considera os pesos dos dados durante o processo de interpolação, onde a influência de cada ponto amostrado é inversamente proporcional à sua distância em relação ao ponto a ser estimado. O fator peso é pré-determinado pelo valor da potência escolhida, ou seja, quanto maior o valor da potência, menor será a influência dos pontos mais distantes. Além disso, o método IDW é rápido e requer baixo custo computacional (Betzek, 2017).



## **2.9. Classificações dos padrões químicos de múlti-uso da qualidade de água subterrânea**

### **2.9.1. Classificação da qualidade de água para consumo humano**

A classificação da qualidade da água para consumo humano pode ser feita utilizando as normas estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) e pelo Diploma 180/2004 do Ministério da Saúde de Moçambique (MISAU), em que estabeleceu limites para os parâmetros de qualidade da água, de acordo com os diferentes usos que ela pode ter.

Vilanculos, (2022), destaca que a qualidade da água é determinada por uma série de características físico-químicas e biológicas, que devem estar em conformidade com os padrões de água potável e ser adequadas ao uso a que se destina.

### **2.9.2. Classificação da qualidade de água Subterrânea para irrigação**

De acordo com Menezes *et al.*, (2013), a qualidade da água para irrigação pode ser classificada de acordo com a proposta do USSL com base na condutividade elétrica (CE) que indica o risco de salinidade e com base o sódio que indica sodicidade, em quatro categorias, neste caso, as letras C e S identificam a classe de água.

O mesmo autor diz que na condutividade elétrica a água de baixa salinidade (C1) com CE entre 0 e 0.25 dS/m, a 25°C, pode ser utilizada na maioria das culturas. A salinidade média (C2) com CE de 0.25 a 0.75 dS/m, a 25°C, pode ser usada se houver uma lixiviação moderada ocorrendo. A água de alta salinidade (C3) com CE de 0.75 a 2.25 dS/m, a 25°C, não é adequada para solos com drenagem restrita. A água de salinidade muito alta (C4) com CE entre 2.25 a 5.00 dS/m, a 25°C, não é adequada para irrigação.

Além disso, a classificação da qualidade da água para irrigação também considera o risco de sódio (alcalinidade), que é uma função da razão de adsorção de sódio e salinidade (Figura 3). A água com baixo teor de sódio ( $S1 \leq 10$ ) pode ser usada para irrigação em quase todos os tipos de solo. A água de sódio média ( $10 < S2 \leq 18$ ) apresenta um considerável risco de sódio em solos de textura fina. A água com alto teor de sódio ( $18 < S3 \leq 27$ ) pode produzir níveis prejudiciais de sódio trocável na maioria dos solos. A água com teor de sódio muito alto ( $S4 > 27$ ) geralmente não é adequada para irrigação, o risco de sodicidade é avaliado com mais segurança relacionando a RAS corrigida com a salinidade da água, estimada por meio de uma Equação (6), (Almeida *et al.*, 2017).

$$RAS = \frac{NA^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (6)$$

Onde:

Na<sup>+</sup> - Concentração de sódio na água em (meq/L);

Ca<sup>2+</sup> - Concentração de cálcio na água em (meq/L);

Mg<sup>2+</sup> - Concentração de magnésio na água em (meq/L).

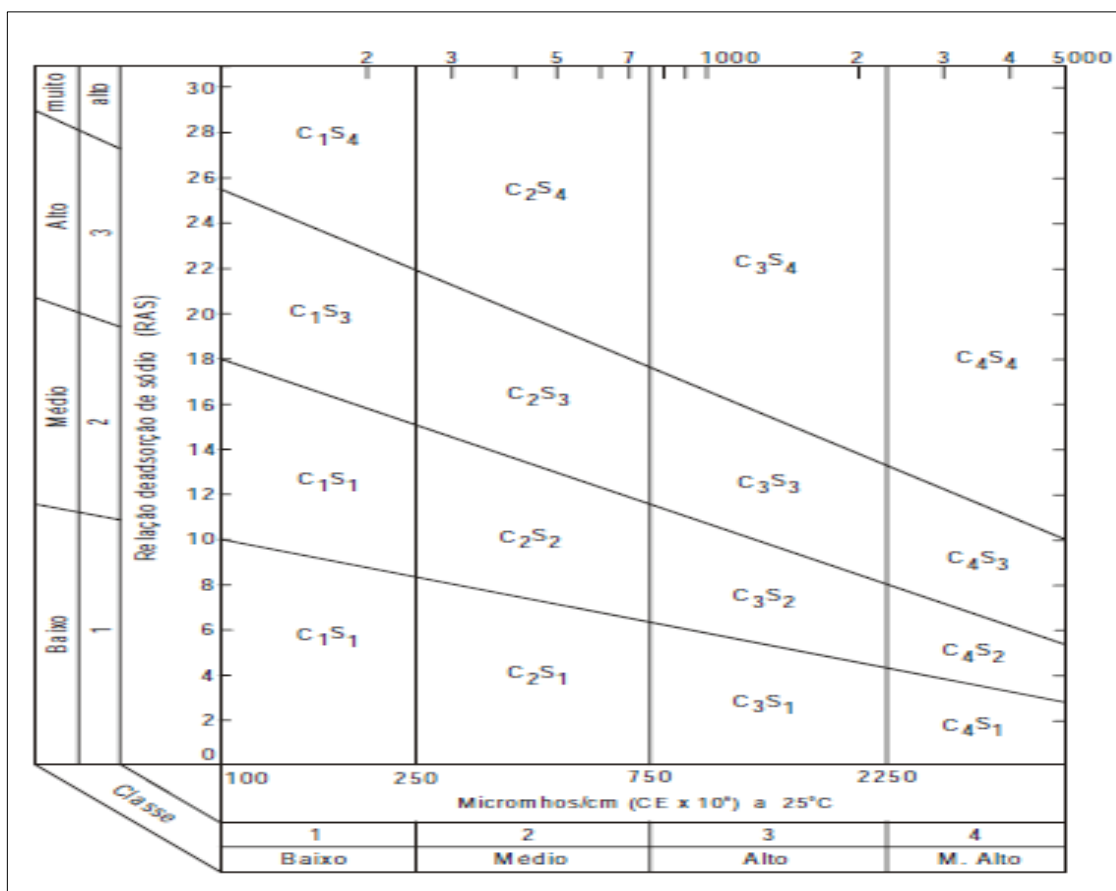


Figura 3. Diagrama para Classificação das Águas de Irrigação do U.S.S.L. Fonte: Oliveira *et al.*, (2017).

### III. METODOLOGIA

#### 3.1. Descrição da área do estudo

O estudo de caso será realizado no distrito de Chókwè, localizado ao sul da Província de Gaza, com o rio Limpopo ao norte separando-o dos distritos de Massingir, Mabalane e Guijá, e o distrito de Bilene e o rio Mazimuchope ao sul, limitando-o com os distritos de Bilene, Chibuto e Xai-Xai. A leste, confina com os distritos de Bilene e Chibuto, e a oeste com os distritos de Magude e Massingir. O distrito possui uma área de 2 450 km<sup>2</sup> e uma população de cerca de 197 mil habitantes em 2012, com uma densidade populacional de aproximadamente 80,3hab/km<sup>2</sup>, de acordo com o MAE, (2014).

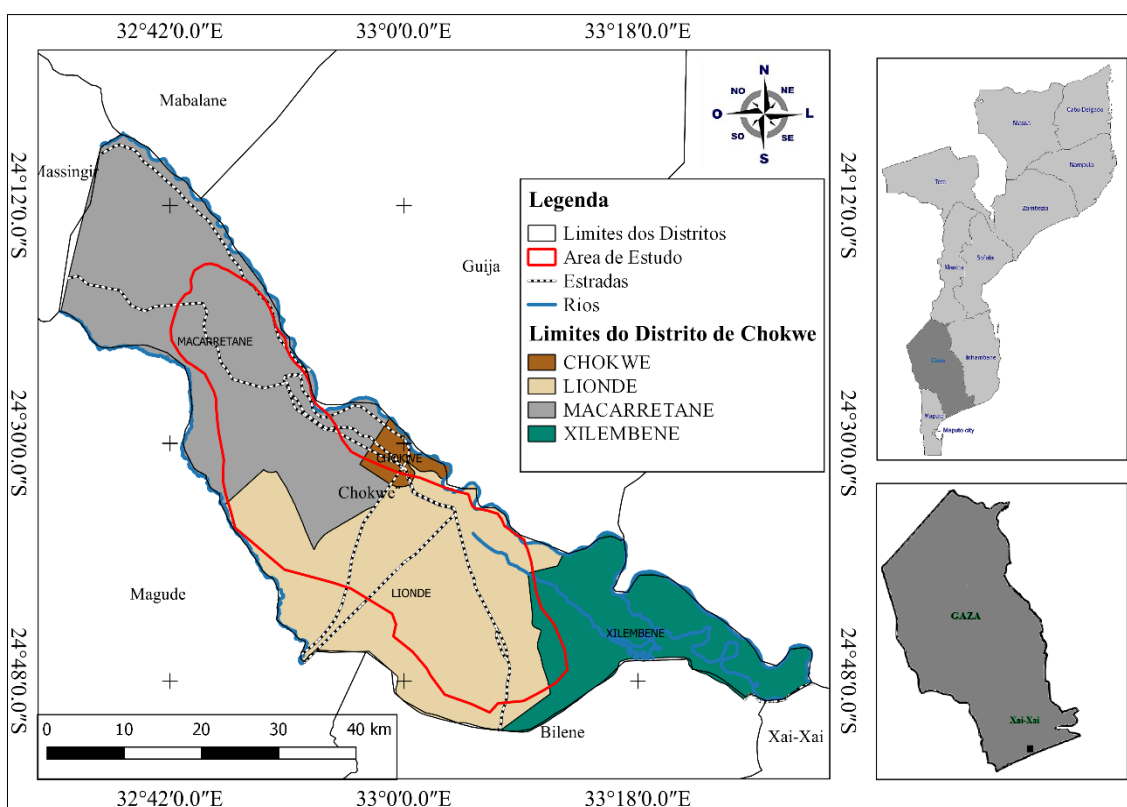


Figura 4. Mapa da área de estudo no Distrito de Chókwè.

#### 3.2. Clima

O clima predominante no distrito é do tipo semiárido, caracterizado por um regime de precipitação variando de 500 a 800 mm. A evapotranspiração potencial de referência (ET<sub>o</sub>) nessa região é estimada entre 1400 e 1500 mm. As temperaturas médias anuais estão na faixa de 22°C a 26°C, enquanto a humidade relativa média anual varia entre 60%-65%. A pluviosidade é baixa e ocorrem chuvas irregulares, resultando em períodos de estiagem e secas frequentes, mesmo durante a estação chuvosa, (MAE, 2014).

### **3.3. Relevo e solos**

O distrito de Chókwè consiste principalmente em uma planície de baixa altitude, com menos de 100 metros, composta por depósitos aluviais encontrados ao longo do rio Limpopo, que segue uma direção noroeste-sudeste. No restante do distrito, especialmente nas áreas de Macarretane e Lionde, encontram-se depósitos indiferenciados. Na região do extremo sudeste do distrito, próximo ao Posto Administrativo de Chilembene e ao distrito de Bilene, é possível identificar a presença de terraços, (MAE, 2014).

### **3.4. Hidrografia**

O distrito possui uma abundância de recursos hídricos, sendo atravessado pela margem direita do Rio Limpopo e pelo Rio Mazimuchope, além de contar com riachos sazonais, como Ngonwane, Munhuane, Chuezi, Nhambabwe, e as lagoas de Chinangue, Ngondzo, Nha-nhai, Mbalambe e Khokhotiva. O fluxo do Rio Limpopo varia consideravelmente, chegando a secar em alguns anos por vários meses. Acredita-se que apenas 10% do fluxo medido em Chókwè seja gerado na área de captação do rio em Moçambique. Durante a estação seca, os caudais são muito baixos, especialmente na região baixa do Rio Limpopo desde a barragem de Macarretane até a foz em Zongoene), devido à construção de represas e barragens nos países a montante (Matlhombe, 2015).

### **3.5. Geologia**

A geologia predominante na maior parte da Bacia do Limpopo em Moçambique consiste em espessos depósitos de sedimentos marinhos do Pleistocénico chamados "Mananga", que são encontrados em áreas relativamente elevadas, juntamente com depósitos arenosos do Quaternário. Essa região possui uma textura franco-arenosa, com uma alta percentagem de areia grossa. A Bacia do Limpopo é compartilhada por quatro países: África do Sul, Moçambique, Botswana e Zimbábwe. Sua extensão abrange aproximadamente 412.000 km<sup>2</sup>, (MAE, 2014).

### **3.6. Hidrogeologia**

Em termos geológicos, Moçambique é composto por diferentes tipos de formações. Cerca de 57% do país é ocupado por formações pré-câmbricas do Complexo de Base, enquanto as formações sedimentares do Karroo abrangem 5% do território. Rochas intrusivas e extrusivas pós-Karroo representam aproximadamente 3% da área, e formações sedimentares meso-cenozoicas correspondem a 35% do país (DNA, 1987).

Moçambique possui sete bacias hidrogeológicas que se estendem por vastas áreas do país, compartilhando características geológicas, climáticas e hidrogeológicas semelhantes, apesar de estarem geograficamente separadas (DNA, 1987). Os rios principais dentro dessas bacias incluem o Maputo, Umbeluzi, Incomáti, Limpopo e Save. Embora esses rios sejam considerados de regime permanente, estudos indicam que os rios Limpopo, Incomáti e Save têm apresentado diminuição na sua perenidade, secando regularmente no final da estação, (Ferro & Bouman, 1987).

### **3.7. Métodos**

#### **3.7.1. Colecta de dados**

Este estudo utiliza uma abordagem de compilação de dados históricos relacionados aos parâmetros físico-químicos, excluindo informações microbiológicas, de pesquisas anteriores às quais teve acesso, com o objectivo de reunir e consolidar informações relevantes sobre a qualidade da água no Distrito de Chókwè. A preparação do trabalho e a colecta de dados foram realizadas em diferentes pontos de amostragem de água subterrânea, buscando uma visão abrangente e representativa da situação hídrica na região.

Os dados utilizados neste estudo foram colectados nos anos de 2015 a 2019, durante as actividades do projeto A4Labs (Arid African Alluvial Aquifers), no qual o ISPG fazia parte, como uma instituição de investigação, abrangendo períodos de seca e chuva para obter uma visão abrangente das condições hídricas ao longo do tempo. Os pontos de colecta de amostras de água foram escolhidos com base em suas coordenadas geográficas, conforme apresentado na Tabela A1, disponível nos anexos.

De acordo com Saveca *et al.*, (2022), durante a colecta de amostras, foram selecionados 16 pontos em três zonas administrativas: Chókwè, Lionde e Macarretane (Figura 5). A seleção dos locais levou em consideração a disponibilidade de poços existentes na região, com o objectivo de abranger diferentes características geológicas. Na base de dados, após a análise dos dados, constatou-se que cada ponto da mesma unidade geológica apresentava o mesmo padrão de qualidade de água. Com base nessa descoberta, neste estudo, assumiu-se que cada ponto de uma unidade geológica tem o mesmo padrão de qualidade de água e foi considerado uma repetição.

As colectas de amostras envolveram a seleção de diferentes tipos de poços, como poços abertos, poços piezométricos, fontenárias e furos de água, com profundidades variando de 13 metros a 150 metros. Foram seguidos os procedimentos recomendados por Appelo & Postma (2005), que consistem em bombear a água do poço antes de recolher a amostra, de modo a garantir a remoção da água estagnada presente. Além disso, foram seguidas diretrizes para evitar a turbidez e a agitação das amostras durante o processo de coleta. Utilizaram-se os equipamentos adequados para a recolha, como tubos plásticos (bayler) e uma bomba manual inserida num tubo VD-16 (Saveca *et al.*, 2022).

O mesmo autor diz que as amostras de água foram colectadas em recipientes de polietileno, identificados para distinguir os diferentes elementos presentes, como cátions e ânions, com capacidade de 500 ml, foi lavado previamente, três vezes com a água destilada, para garantir a limpeza dos frascos, a posterior as amostras foram colocadas em uma caixa térmica "coleman" e mantidas a temperaturas entre 20-25 °C. Após 24 horas, as amostras foram transportadas para o laboratório do Institute for Groundwater Studies (IGS), localizado na University of the Free State, na África do Sul. No laboratório, foram realizados os testes laboratoriais necessários para analisar as amostras.

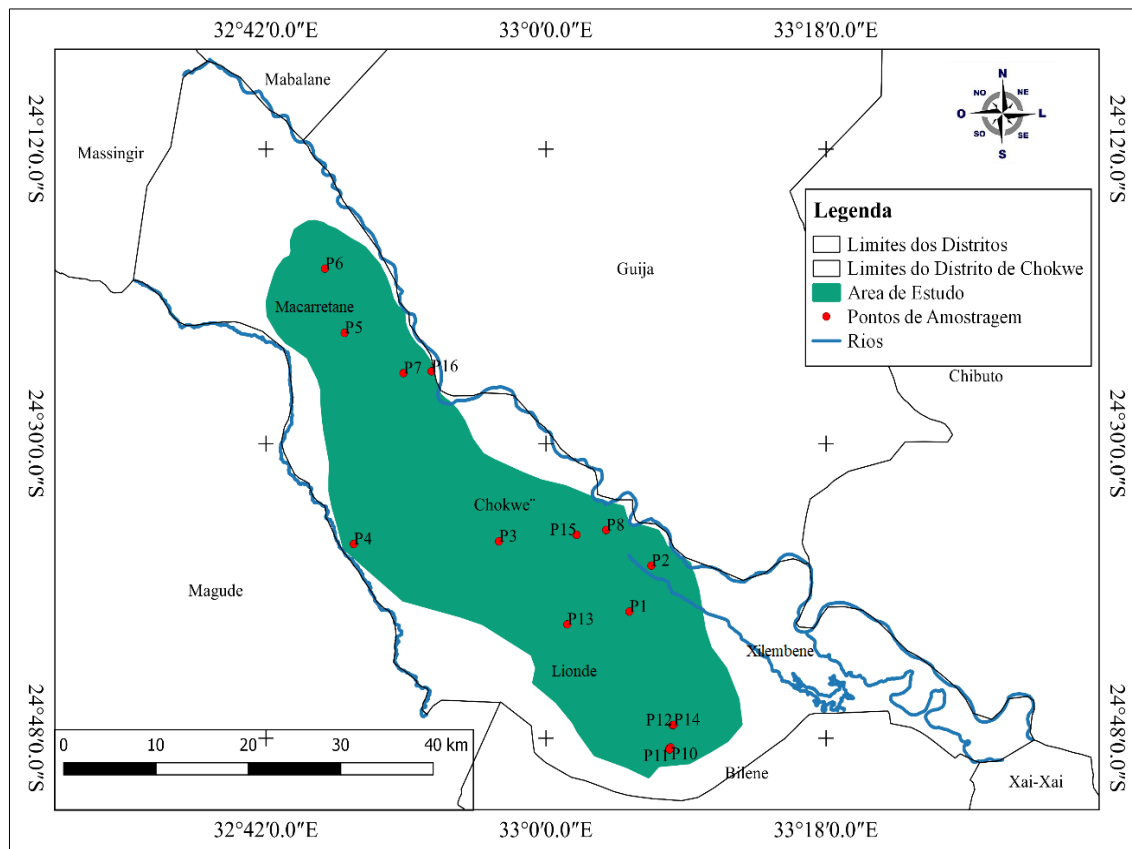


Figura 5. Mapa de Localização dos pontos de amostragem na área de estudo.

### **3.8. Análise e interpretação dos dados**

Diferentes softwares foram utilizados para realizar a análise e interpretação dos dados. O Microsoft Excel (versão 2016) foi empregado para realizar cálculos estatísticos descritivos, como valores máximos, mínimos, média aritmética, desvio padrão e correlação de Pearson.

Além disso, o software Qualigraf (versão 1.17) específico para qualidade de água foi utilizado, neste caso, foi responsável por classificar as águas com base na predominância de cátions e ânions, examinar as faces hidroquímicas e gerar os diagramas de Piper.

A versão 1.17 do Qualigraf ofereceu diversas funcionalidades para gerenciamento e interpretação dos dados relacionados à qualidade da água. Isso incluiu análise espacial, análise de séries temporais e criação de diagramas químicos especializados, conforme relatado por (Macedo *et al.* 2013).

### **3.9. Geração de mapas**

Para elaborar os mapas, utilizou-se o software QGIS versão 2.18.10, visando uma melhor visualização espacial dos resultados. Por meio do Sistema de Informação Geográfica (SIG), foram realizadas diversas operações, como criação de banco de dados, digitalização de dados vetoriais, edição de polígonos e geração de mapas. Além disso, houve a integração de arquivos.

Durante essa etapa, foram elaborados diversos mapas temáticos para visualizar e analisar os pontos cadastrados e coletados nas análises físico-químicas. Para isso, adotou-se várias etapas, incluindo a delimitação e identificação das áreas de interesse usando o software Google Earth. Além disso, baixou-se imagens de satélite ESA Sentinel-2, com resolução de 10 m, publicadas em julho de 2021. Também foram criados mapas relacionados à geologia, uso e cobertura do solo, além de realizar a interpolação dos dados, como pH, condutividade elétrica, nitratos, sódio, cálcio, cloreto, magnésio, potássio, bicarbonato e dureza total. Esses mapas foram essenciais para uma melhor compreensão e visualização das informações geográficas relevantes para o estudo em questão.

#### **3.9.1. Interpolação dos dados**

Para a criação dos mapas de interpolação dos parâmetros em análise no trabalho foi utilizado o método da Inversa da Distância Ponderada (IDW) no programa de geoprocessamento QGis versão 2.18.0, que é um modelo de interpolação espacial (IDW).

O princípio desta ferramenta é o de que os valores de atributos de qualquer par de pontos são relacionados uns aos outros, mas sua similaridade é inversamente relacionada à distância entre os dois locais, (Cardoso, 2019).

### 3.10. Método de correlação

Com o uso do Coeficiente de Correlação de Pearson, foi possível avaliar a influência e a semelhança entre os atributos por meio de métodos matemáticos. Por outras, o cálculo de Pearson indica se, à medida que um atributo muda, o outro atributo terá um comportamento linear e previsível. O teste de classificação de Pearson categoriza os resultados de correlação em três intervalos específicos para cada classificação. Valores de  $r$  entre  $0 < r < 0,1$  indicam uma correlação positiva ínfima, valores entre  $0,1 \leq r < 0,4$  indicam uma correlação fraca, valores entre  $0,4 \leq r < 0,7$  indicam uma correlação moderada, valores entre  $0,7 \leq r < 0,9$  indicam uma correlação forte, e um valores de  $r$   $0,9 \leq r < 1,0$  indica uma correlação muito forte, conforme indicado por (Bolonini *et al.*, 2019)

Para o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson envolve a covariância entre as duas variáveis dividida pelo produto dos desvios padrão de cada variável e é representada da seguinte Equação 7:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

onde:

$x_i$  e  $y_i$  : são os valores individuais das duas variáveis;

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  : são as médias das duas variáveis.

Utilizando o Microsoft Excel 2016, foram identificados os iões presentes em maior ou menor quantidade em cada tipo de água.

### 3.11. Hidrogeoquímica e diagnóstico químico dos atributos iônicos da qualidade

#### 3.11.1. Determinação de parâmetros físico-químicos da água subterrânea

A análise dos parâmetros físico-químicos da água subterrânea foi conduzida através de dois métodos: análise em laboratório e medição (*in situ*). Para a análise em laboratório, foram coletadas amostras representativas de água subterrânea nos locais selecionados. Essas amostras foram posteriormente transportadas ao laboratório, onde foram



submetidas a uma série de testes e análises utilizando técnicas e equipamentos específicos. Através dessas análises, foi possível determinar os cátions ( $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ) e aniões ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ).

Além disso, foi utilizado o método de medição *in situ*, no qual alguns parâmetros físico-químicos foram medidos diretamente no local de coleta da água subterrânea. Foram utilizados instrumentos portáteis adequados para realizar essas medições, como um pHmetro para determinar a acidez ou alcalinidade da água, bem como medir sua temperatura, e um condutivímetro para avaliar a condutividade elétrica (EC) presente na água.

### 3.11.2. Avaliação do balanço iônico

O cálculo do Balanço Iônico (BI) é importante para garantir que uma solução aquosa seja eletricamente neutra. Isso significa que a soma das cargas dos cátions presentes na solução, expressa em miliequivalentes por litro (meq/L), deve ser igual à soma das cargas dos ânions, também em (meq/L), como a Equação 8 ilustra. A utilização do cálculo do balanço iônico é útil para detectar eventuais erros nas análises e possibilita a identificação de íons não analisados, (Siqueira, 2021).

Através do cálculo do Balanço Iônico, foi possível determinar o coeficiente de erro individual das análises realizadas. De acordo com Santos (2008), se esse coeficiente de erro analítico for inferior a 10%, considera-se que a análise está correta. No entanto, muitos autores preferem adotar um critério mais rigoroso, estabelecendo valores inferiores a 5% como limite aceitável. Neste estudo, optou-se por utilizar o valor de 10% como critério para as análises realizadas.

O cálculo do erro do balanço iônico foi feito usando a Equação 8 (Chripim, 2016):

$$EBI (\%) = \frac{\Sigma \text{ dos cátions} - \Sigma \text{ dos ânions}}{\Sigma \text{ dos cátions} + \Sigma \text{ dos ânions}} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

EBI = Erro do balanço iônico

$\Sigma$  Cátions = somatório dos cátions em meq/L

$\Sigma$  Aniões = somatório dos aniões em meq/L

### 3.11.3. Faces hidroquímicas da qualidade de água

Após a avaliação erro do balanço iônico (EBI), identificou-se os processos e as diferentes composições químicas presentes na água subterrânea. Para isso, foram utilizados os resultados das análises de íons positivos (catiões) e íons negativos (aniões).

#### a) Diagrama de Piper

Para determinar as características hidroquímicas, foi utilizado o diagrama hidroquímico de Piper. Este diagrama permite representar os íons presentes na água e interpretar os resultados para identificar o tipo de composição da água. Com base na combinação de íons positivos e negativos, foi possível classificar a água de acordo com a sua tipologia química. O diagrama possui três eixos, nos quais é necessário converter o valor de cada íão expresso em meq/L para uma percentagem em relação ao total de aniões e catiões. Estes valores são representados no losango do gráfico, e a interseção destes pontos indica a tipologia química da amostra de água (Ganyaglo *et al.*, 2011). Para criar estes diagramas, foi utilizado o software Qualigraf (versão 1.17), especializado em análise de qualidade da água.

### 3.12. Classificação da qualidade da água subterrânea para irrigação agrícola

Para classificar a qualidade da água para irrigação, utilizou-se a metodologia proposta pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL). Essa metodologia se baseia em dois parâmetros principais: condutividade elétrica (CE) e razão de adsorção de sódio (RAS). Através da análise desses parâmetros, foi possível determinar em qual classe a água se enquadra, utilizando um diagrama de classificação específico.

A condutividade elétrica é uma medida da capacidade da água de conduzir corrente elétrica e está relacionada à quantidade de sais dissolvidos na água. A razão de adsorção de sódio é calculada levando em consideração a concentração de sódio, cálcio e magnésio na água. Com base nesses valores, a RAS foi calculada baseando-se em três parâmetros químicos como mostra a Equação 6.

O diagrama de classificação da água para irrigação, permite visualizar a classe em que a água se enquadra, utilizou-se o programa QualiGraf, v.1.17. disponível gratuitamente no site da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, através desse método, foi possível classificar a qualidade da água em diferentes classes, indicando se ela é adequada, marginal ou inadequada para irrigação agrícola.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

##### 4.1. Hidrogeoquímica e diagnóstico químico dos atributos iônicos da qualidade

###### 4.1.1. Erro de Balanço Iônico

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises químicas que foram submetidas a um balanço iônico entre cátions e ânions como forma de verificar a confiabilidade das análises laboratoriais. Utilizando o software Qualigraf, foram calculados os erros de balanço iônico. Na análise hidroquímica abrangente, é recomendado que o erro do balanço iônico seja preferencialmente inferior a 5%, e em nenhum caso ultrapasse 10%. Valores acima desses limites sugerem a possibilidade de um erro analítico, e, portanto, a análise em questão deve ser desconsiderada na interpretação hidrogeoquímica das águas subterrâneas (Assunção, 2016; Chrispim, 2016).

**Tabela 4.** Resultados de calculo de erro de balanço iônico referente as amostras de água subterrânea

Amostras	(meq/L)		Erro BI (%)
	$\Sigma$ Cations	$\Sigma$ Anions	
Local 1	9,2805	8,7494	2,95
Local 2	17,9221	17,1234	2,28
Local 3	64,8568	58,3846	5,25
Local 4	36,3036	32,5141	5,51
Local 5	58,9314	58,4967	0,37
Local 6	142,1708	128,9249	4,89
Local 7	13,816	11,0995	10,9
Local 8	10,0262	8,7561	6,76
Local 9	8,0899	7,5457	3,48
Local 10	8,5673	8,113	2,72
Local 11	7,0513	7,0401	0,08
Local 12	31,4501	27,7656	6,22
Local 13	28,9451	26,3289	4,73
Local 14	3,3029	3,3768	1,11
Local 15	11,8284	11,5232	1,31
Local 16	7,6941	6,547	8,05

Segundo Assunção (2016), para que uma análise seja considerada "aproveitável", o balanço iônico deve ser de no máximo 10%. No presente estudo, foi constatado que 93.75% dos resultados das amostras de água estão dentro dos limites aceitáveis (BI <10%), indicando que a interpretação da composição química da água reflete a realidade de campo na maioria dos casos. No entanto, 6.25% das amostras (local 7) esta fora dos

limites aceitáveis (BI >10%), o que sugere que esse resultado pode não ser representativo da qualidade da água na região.

#### 4.1.2. Análise de correlação entre parâmetros físico-químicos

A Tabela 5 apresenta a matriz de correlação de Pearson para os atributos analisados, valores de  $r$  entre  $0 < r < 0,1$  indicam uma correlação positiva ínfima, valores entre  $0,1 \leq r < 0,4$  indicam uma correlação fraca, valores entre  $0,4 \leq r < 0,7$  indicam uma correlação moderada, valores entre  $0,7 \leq r < 0,9$  indicam uma correlação forte, e um valor de  $r \geq 0,9$  indica uma correlação muito forte e essas mesmas interpretações se aplicam às correlações negativas

**Tabela 5.** Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) para os parâmetros físico-químicos de qualidade de águas subterrâneas dos parâmetros.

	pH	CE	Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	STD
pH	1,00										
CE	0,26	1,00									
Ca <sup>+</sup>	0,20	<b>0,96</b>	1,00								
Mg <sup>2+</sup>	0,19	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	1,00							
Na <sup>2+</sup>	0,33	<b>0,96</b>	0,85	<b>0,86</b>	1,00						
Cl <sup>-</sup>	0,21	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	1,00					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,50	-0,15	-0,23	-0,20	-0,10	-0,14	1,00				
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,84	0,31	0,34	0,32	0,32	0,25	-0,52	1,00			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,24	<b>0,92</b>	<b>0,88</b>	<b>0,88</b>	<b>0,90</b>	<b>0,90</b>	-0,03	0,33	1,00		
K <sup>+</sup>	-0,78	0,19	0,16	0,18	0,16	0,23	0,60	-0,67	0,19	1,00	
STD	0,26	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>	<b>1,00</b>	-0,15	0,31	<b>0,92</b>	0,19	1,00

A matriz de correlação mostra uma correlação forte e positiva entre o pH e o (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), o que indica que um aumento no pH geralmente está associado a um aumento no bicarbonato e vice-versa. A condutividade elétrica (CE) mostrou uma correlação muito forte com (Ca<sup>+</sup>), (Mg<sup>2+</sup>), (Na<sup>2+</sup>), (Cl<sup>-</sup>), (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e STD, isso sugere que a condutividade elétrica é influenciada por esses elementos e indica possível influência desses íons no aumento da salinidade das águas na área, de acordo com (Costa *et al.*, 2020).

O Cálcio (Ca<sup>+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>) estão altamente correlacionados entre si e com (Na<sup>2+</sup>), (Cl<sup>-</sup>) e STD, e apresenta correlação forte com (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). O Sódio (Na<sup>2+</sup>), cloreto (Cl<sup>-</sup>) e STD

têm uma correlação muito forte entre si, assim como o ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), o que indica uma possível dependência de sódio. O nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) possui uma correlação moderada e negativa com o pH e com o ( $\text{HCO}_3^-$ ).

Por outro lado, o bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) apresenta uma correlação forte e positiva com o pH e correlações fracas com ( $\text{Ca}^+$ ), ( $\text{Mg}^{2+}$ ), ( $\text{Na}^{2+}$ ), ( $\text{Cl}^-$ ) e ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). O sulfato ( $\text{SO}_4$ ) apresenta correlações fortes com várias variáveis, incluindo cálcio ( $\text{Ca}^+$ ), ( $\text{Mg}^{2+}$ ), ( $\text{Na}^{2+}$ ), ( $\text{Cl}^-$ ) e ( $\text{HCO}_3^-$ ). O potássio ( $\text{K}^+$ ) mostra uma correlação moderada com o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), e uma correlação fraca com (STD, isso sugere uma possível relação entre esses elementos, embora menos significativa em comparação com outras correlações observadas. E por fim, os (STD) estão correlacionados positivamente com a (EC), ( $\text{Ca}^+$ ), ( $\text{Mg}^{2+}$ ), ( $\text{Na}^{2+}$ ), ( $\text{Cl}^-$ ), ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

## 4.2. Faces hidroquímicas na água subterrânea

Com base nos resultados das análises químicas e com auxílio de software Qualigraf v.17 foi criado o diagrama hidroquímica de Piper (Figura 6) para classificar as águas subterrâneas estudadas e estabelecer relações e comparações entre as amostras coletadas em diferentes pontos da área de estudo. Esse diagrama mostra as relações entre os íons presentes nas águas.

### 4.2.1. Diagrama de Piper

Na área de estudo, foram analisadas as concentrações de cátions e ânions em diversas amostras. Observou-se o catião dominante foi o sódio e o anião dominante foi o cloreto em quase todas as amostragens, seguindo a seguinte sequência na ordem decrescente dos íons  $\text{Na}^{2+} > \text{Ca}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  para os catiões e  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$  para os aniões.

Na Figura 6, é possível visualizar as 15 amostras que foram validadas por meio do balanço iônico e posteriormente utilizadas para a construção do diagrama de Piper. A categoria predominante é a água sódica cloretada ( $\text{Na-Cl}^-$ ) representada pelo círculo preto no diagrama, que corresponde a 75% das amostras analisadas. Em seguida, temos a água sódica bicarbonatada ( $\text{Na-HCO}_3^-$ ) representada pelo círculo azul, que compreende 12,5% das amostras (P1 e P7). A categoria das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas ( $\text{Ca/Mg-HCO}_3^-$ ) é representada pelo círculo vermelho e corresponde a 6,25% das amostras (P16). Por fim, a categoria das águas sulfatadas ou cloretadas ( $\text{SO}_4/\text{Cl}^-$ ) é representada pelo círculo verde e representa 6,25% das amostras, (P5).

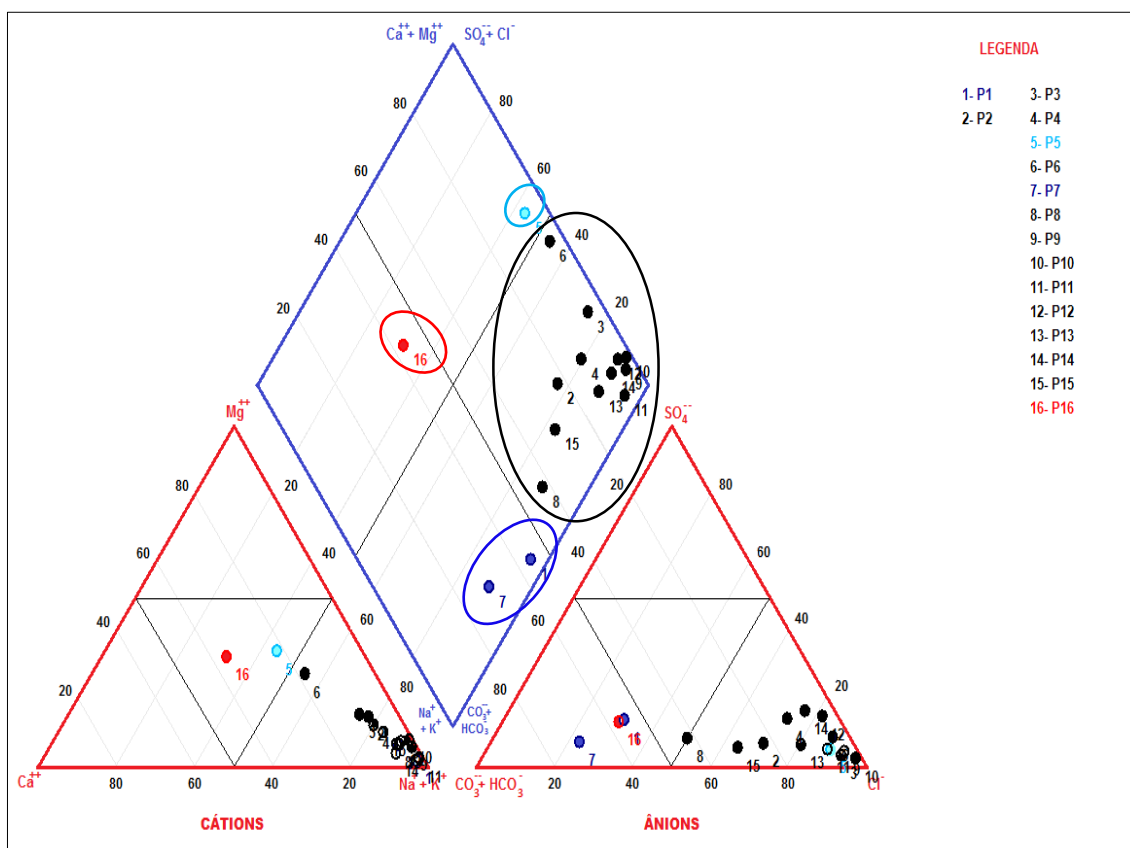


Figura 6. Diagrama de Piper e faces hidroquímicas da água subterrânea na área de estudo.

### a) Águas sódicas cloretadas

Na área de estudo, foi observada uma predominância de água sódica cloretada (Na-Cl) em 75% das amostras de águas subterrâneas, (Figura 6), e sua ocorrência foi observada em duas unidades geológicas duna interior, areia eólica vermelha; Escorrência argilo-arenoso fluvial. Essa classificação relaciona um tipo de água com dureza permanente. A ocorrência de águas Na-Cl na área pode ser atribuída à influência de atividades humanas, como agricultura intensiva, uso de fertilizantes e efluentes de esgoto (Costa, 2010).

Estudos anteriores mostraram que as práticas agrícolas podem alterar a hidroquímica das águas subterrâneas, aumentando a mineralização da água devido à mobilização de contaminantes naturais e intensificação das interações água e rocha (Concepción *et al.*, 2022).

Além disso, a geologia da área de estudo, com a presença de fontes minerais de feldspatos e plagioclásios, também pode contribuir para a composição química das águas subterrâneas. Esses minerais, comuns em rochas ígneas e metamórficas, podem liberar

íons de sódio (Na) e cloro (Cl) quando interagem com a água, (Wilson, 2009; Andrade *et al.* 2010).

Segundo Troian *et al.*, (2020), a presença de depósitos marinhos na área de estudo pode ser um dos factores que influenciam a composição química das águas subterrâneas. Isso ocorre devido ao processo de lixiviação de materiais intemperados e à dissolução de sedimentos marinhos durante a recarga do aquífero. Esses processos contribuem para a variabilidade na hidroquímica das águas subterrâneas na região.

#### **b) Águas sódicas bicarbonatadas**

Em relação às características químicas das águas subterrâneas, foi observado que cerca de 12.5% das amostras apresentam fácies hidroquímicas sódicas bicarbonatadas (Na-HCO<sub>3</sub>) (Figura 7). Essa composição é resultado de processos de troca iônica e foi identificada em unidades geológicas específicas, como a Escorrência argilosa fluvial e a Escorrência argilo-arenoso fluvial, é importante destacar que águas com essa composição, se utilizadas para fins de irrigação, têm a capacidade de depositar carbonato de sódio residual, podendo acarretar problemas relacionados à formação de espuma na água. Além disso, a presença de sódio nessas águas pode levar à salinização do solo. Essas observações foram destacadas por (Malagón *et al.* 2021).

As concentrações de Na e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> nessas fácies são principalmente resultantes do intemperismo de feldspatos alcalinos, que estão relacionados às áreas de recarga das águas subterrâneas (Sakram & Adimalla, 2018). No entanto, é importante destacar que a presença dessa fácies representa água do tipo "Fresco" no aquífero devido à sua baixa condutividade elétrica (CE), essas águas geralmente apresentam concentrações mais baixas de íons dissolvidos, o que as torna menos salinas e mais adequadas para diversos usos, como consumo humano e irrigação, (Ahmed *et al.*, 2019).

#### **c) Águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas**

A análise das amostras revelou que 6.25% delas demonstram características hidroquímicas de águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, encontrada em áreas geológicas de aluvião, areia, silte e cascalho (Figura 7). A presença da composição bicarbonatada cálcica ou magnésiana sugere a existência de feldspatos e argilo-minerais ricos em cálcio, que em sódio, bem como a presença de magnésio associada à presença de micas, como a biotita (Chang *et al.*, 2014).

De acordo com Bittencourt *et al.* (2003), as águas bicarbonatadas cálcicas estão ligadas à mineralogia do aquífero, com os cátions cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) originados dos plagioclásios e dos minerais ferromagnesianos presentes nos basaltos. A ocorrência predominante de águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas esta relacionada à composição química das litologias que compõem o sistema aquífero.

Soares & Alegre, (2016) dizem que as águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas tendem a ser encontradas em regiões onde a espessura do aquífero confinante é inferior a 80 metros.

#### **d) Águas sulfatadas ou cloretadas**

A fácies hidroquímica predominante nas águas sulfatadas, representam 6.25% das amostras e foi coletada em um grupo geológico de Escorrência argilo-arenoso fluvial (Figura 6). Essas águas são caracterizadas pela presença significativa de íons sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ) ou cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) em sua composição. A presença de águas sulfatadas pode indicar a influência de atividades antrópicas, como a mineração, que pode liberar sulfatos para o meio ambiente (Soares & Alegre, 2016).

Machado & Freitas, (2005) também apontaram a presença desse tipo de água, atribuindo a maior concentração de sais às águas devido ao aumento do grau de confinamento do aquífero, evoluindo para águas sódicas e posteriormente para águas sulfatadas ou cloretadas. Por outro lado, a presença de íons cloreto pode estar relacionada a processos naturais, como a dissolução de sais presentes nas rochas, ou a influência de depósitos de sal provenientes de águas marinhas. No entanto, como essa região não possui influência marinha, a presença de cloretos pode ser atribuída a atividades humanas (Celligoi, 2009).

A Tabela 6, apresenta o resumo das principais características hidroquímicas e unidades geológicas associadas nas águas subterrâneas da área estudada.

**Tabela 6:** Principais características hidroquímicas e unidades geológicas associadas nas águas subterrâneas da área.

<b>Faces</b>	<b>%</b>	<b>Unidade</b>
<b>Hidroquímicas</b>	<b>Amostras</b>	<b>Geológica</b>
<b>Sódica Cloretada</b> <b>(Na-Cl)</b>	75%	Duna interior, areia eólica vermelha; Escorrência argilo-arenoso fluvial.



<b>Sódica Bicarbonatada</b> (Na- HCO <sub>3</sub> )	12.5%	Aluvião, areia, silte, cascalho; Escorrência argilo-arenoso fluvial.
<b>Sódica cálcica</b> (Ca/Mg-HCO <sub>3</sub> )	6.25%	Aluvião, areia, silte, cascalho.
<b>Sulfatada (SO<sub>4</sub>)</b>	6.25%	Escorrência argilo-arenoso fluvial.

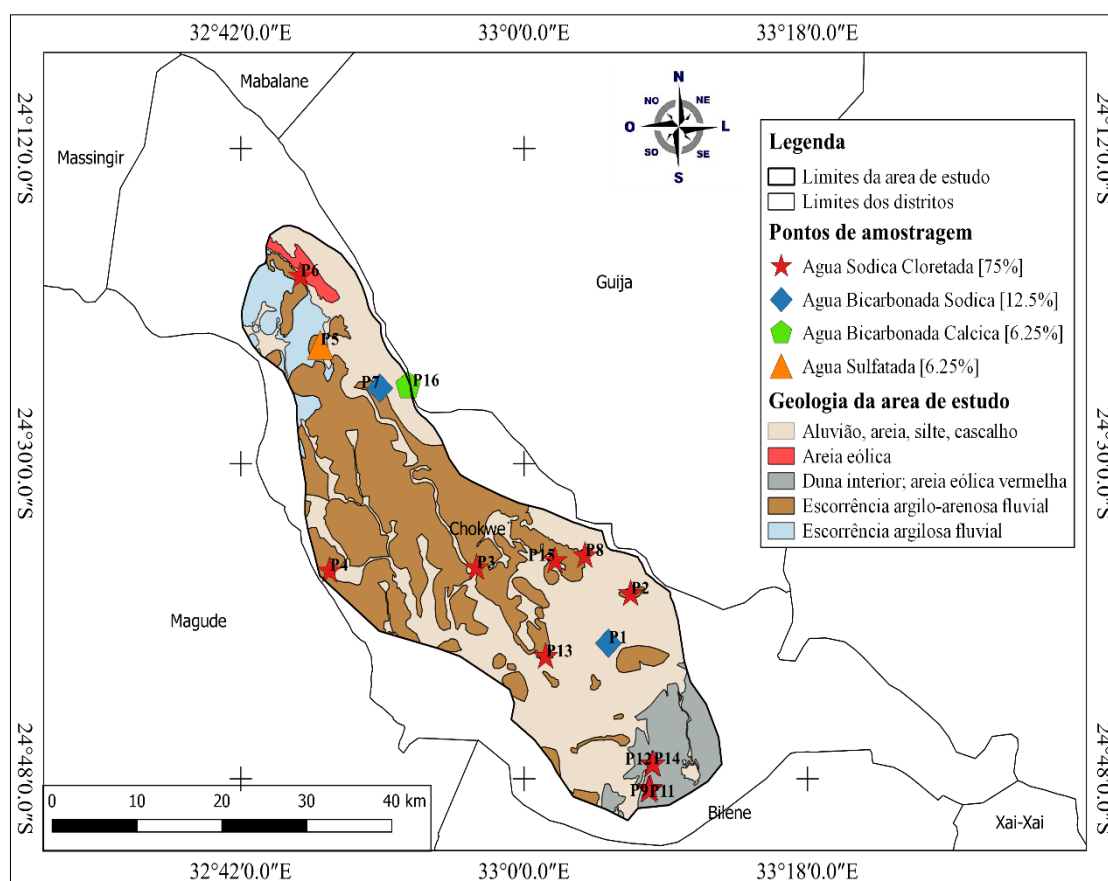


Figura 7. Mapa das fácies hidroquímicas da área de estudo.

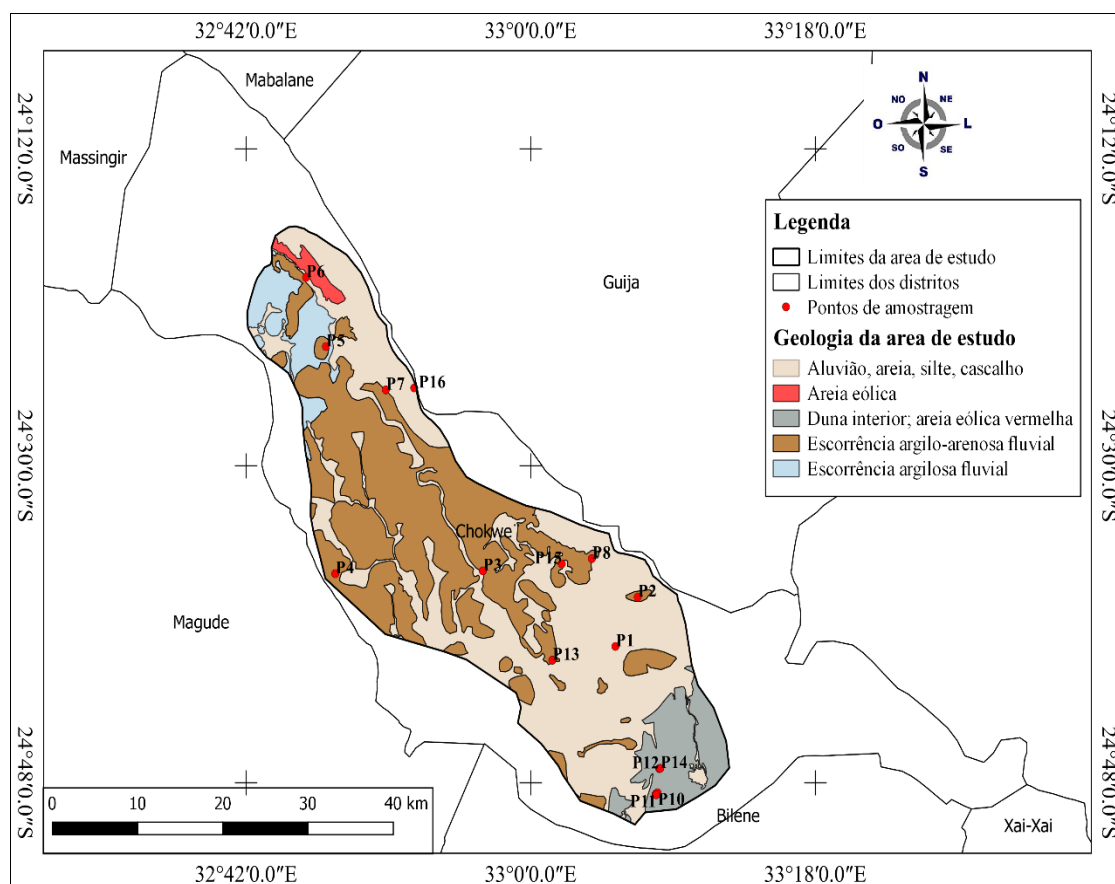
### 4.3. Factores hidrogeomorfológicos que influenciam a hidrogeoquímica e qualidade de água subterrânea

#### 4.3.1. Geologia

A área de estudo apresenta uma geologia caracterizada por depósitos aluviais quaternários compostos por sedimentos clásticos, como cascalhos, areias pouco selecionadas, siltes e argilas (Figura 8). Esses depósitos estão localizados abaixo do curso do Rio Limpopo e abrangem a planície de inundação adjacente. A formação predominante consiste em areia argilosa de baixa permeabilidade. Essa geologia é influenciada pela flutuação do nível do mar devido aos processos das mudanças climáticas associadas a períodos de glaciação, o

que resulta em uma predominância de rochas quaternárias, incluindo depósitos eólicos, eluviais, aluviais e fluviais (Lima & Lupinacci, 2019).

Esses depósitos aluviais têm uma influência significativa na qualidade da água subterrânea, uma vez que atuam como um filtro natural, retendo e filtrando os contaminantes presentes na água. Além disso, a presença de areia argilosa de baixa permeabilidade na formação predominante pode limitar a infiltração e a circulação da água subterrânea, o que pode resultar em uma menor interação entre a água subterrânea e os contaminantes presentes no solo.



**Figura 8.** Mapa de geologia da área de estudo.

Os depósitos aluviais do grupo Aluvio (areia, silte, cascalho) estão associados a essa formação, compartilhando características sedimentares semelhantes. Isso indica que a água subterrânea nesse grupo pode ser influenciada pela presença de minerais provenientes desses sedimentos aluviais. Além disso, os depósitos de areia eólica vermelha do grupo Duna interior estão presentes na área de estudo. Essas dunas são formadas pela ação dos ventos e consistem principalmente em areia. Por fim, os depósitos de argila e sedimentos fluviais do grupo Escorrência estão associados às bacias fluviais

da área de estudo. Esses sedimentos podem ser encontrados em áreas de fluxo de água e possuem características hidrogeomorfológicas específicas.

#### 4.3.2. Uso e cobertura de terra

O uso e cobertura de terra da área de estudo é caracterizada pelo predomínio das atividades agrícolas, pecuária, agricultura e mineração, que desempenham um papel significativo no uso da terra (Júnior, 2016).

As classes de uso do solo mais comuns incluem zonas arbustivas (58.8%), corpos de água (0.25%), zonas de árvores (14%), pastagens (3.63%), áreas agrícolas (18%), zonas com construção (4.51%), e solos expostos (0.07%), ocupando cerca de 1 199,9 km<sup>2</sup>, como ilustra a Figura 9. Essas atividades podem influenciar a hidrogeoquímica e qualidade da água subterrânea, devido à contaminação por despejos animais, uso de produtos químicos e liberação de substâncias tóxicas na mineração (Ribeiro *et al.*, 2007; Filho & José, 2018).

O uso e a cobertura do solo têm um impacto significativo. A contaminação por despejos animais, o uso de produtos químicos agrícolas e a liberação de substâncias tóxicas na mineração podem resultar na presença de contaminantes na água subterrânea. Esses contaminantes podem incluir nutrientes em excesso, como nitratos e fosfatos provenientes de fertilizantes agrícolas, bem como produtos químicos utilizados na agricultura, como pesticidas e herbicidas.

Além disso, a remoção da vegetação natural para dar lugar às atividades agrícolas e pecuárias pode aumentar a erosão do solo e a sedimentação nos corpos de água, afetando a qualidade da água. A sedimentação pode transportar partículas de solo, nutrientes e outros contaminantes para os corpos d'água, afetando negativamente a qualidade da água superficial e, potencialmente, a qualidade da água subterrânea.

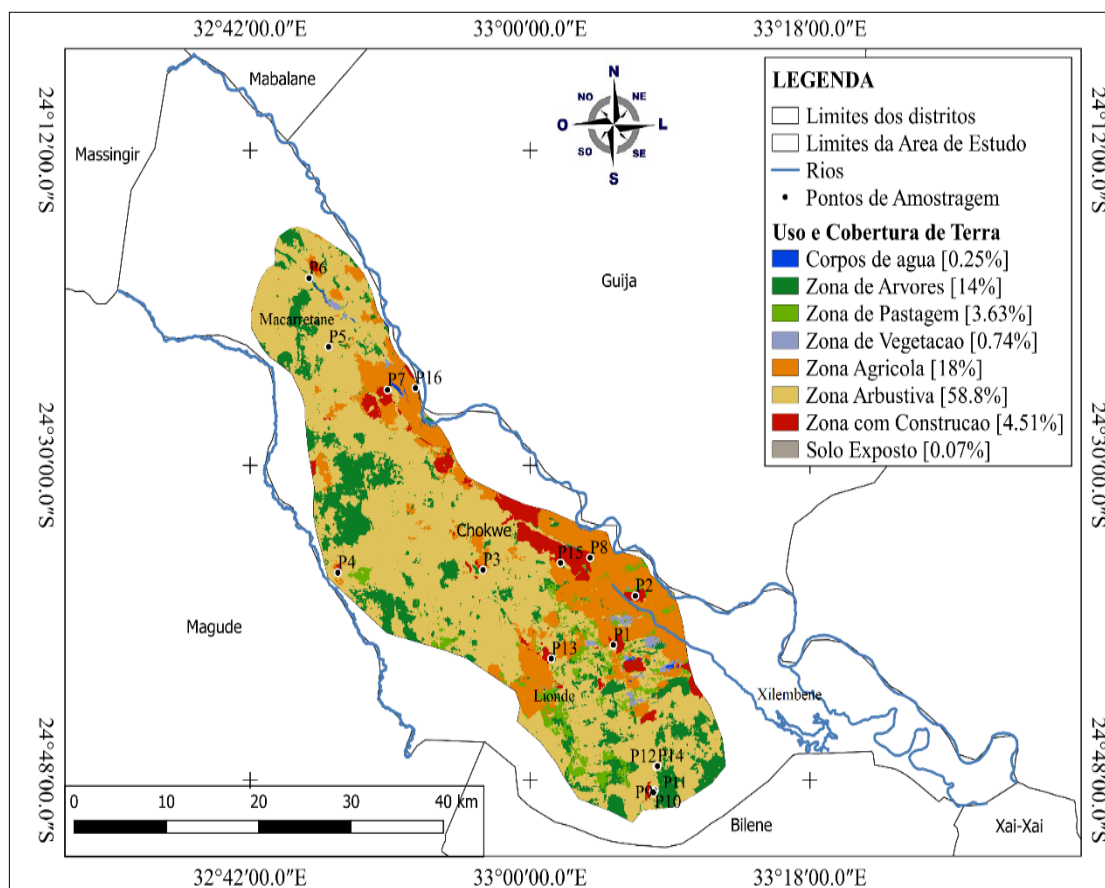


Figura 9. Mapa de uso e cobertura de terra da área de estudo com as respectivas definições de classe.

#### 4.3.3. Solos

As diferentes características dos solos na área de estudo apresentam variações significativas em termos de permeabilidade, capacidade de retenção de água e habilidade de filtrar contaminantes, essas características desempenham um papel crucial na hidrogeoquímica e na qualidade da água subterrânea. A área de estudo é composta pelas seguintes unidades de solo: solos aluviais com textura grosseira, solos de coluvião argiloso de Mananga, solos aluviais de argila e solos arenosos amarelos (Figura 10) (Langa, 2015).

Os solos arenosos amarelados apresentam alta permeabilidade, o que aumenta o risco de lixiviação de substâncias químicas. Por outro lado, os solos de aluviões argilosos retêm mais água e possuem uma capacidade de filtragem mais eficiente para contaminantes. Já os solos de aluviões estratificados de textura grossa exibem variações na permeabilidade e retenção de água, o que pode influenciar a qualidade da água subterrânea. Os solos de coluviões argilosos de Mananga actuam como uma barreira natural contra a lixiviação de contaminantes, contribuindo para a proteção da água subterrânea. Por fim, os solos pouco

profundos sobre rocha não calcária possuem baixa permeabilidade e são mais vulneráveis à contaminação (Matlhombe, 2015).

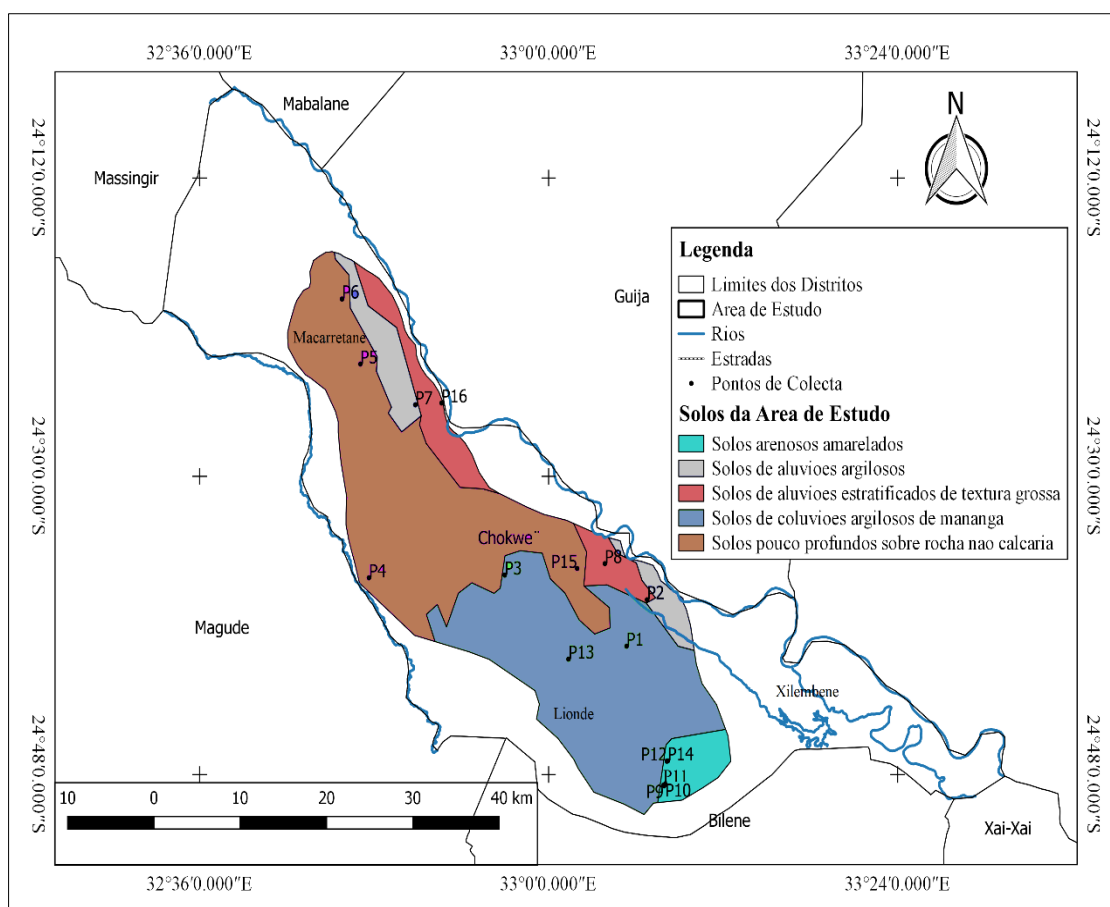


Figura 10. Mapa de tipos de solos da área de estudo.

#### 4.3.4. Topografia

A topografia da área de estudo desempenha um papel crucial no fluxo da água, na recarga dos aquíferos e no escoamento superficial. A morfologia do relevo do Distrito de Chókwè é caracterizada por altitudes relativamente baixas, formando uma planície com altitudes inferiores a 200 m em toda a região. Nas áreas onduladas, onde as elevações são mais altas, a água tende a ser retida e infiltrada, contribuindo para a formação de águas subterrâneas de melhor qualidade. No entanto, nas áreas planas, o escoamento superficial rápido e a drenagem podem aumentar o risco de erosão, transporte de sedimentos e lixiviação de contaminantes.

Na área de estudo, o relevo predominante é plano e ondulado, com altitudes inferiores a 30 m e relevo ondulado declividades entre 45-65 m, como ilustra a Figura 11. Esse relevo tem influência no zoneamento hidrogeoquímico, pois afecta o escoamento superficial e a

infiltração da água no solo. Nas áreas planas, o escoamento é mais lento e permite maior interação entre a água subterrânea e os contaminantes presentes no solo. Já nas áreas onduladas, o escoamento é mais rápido, limitando a infiltração.

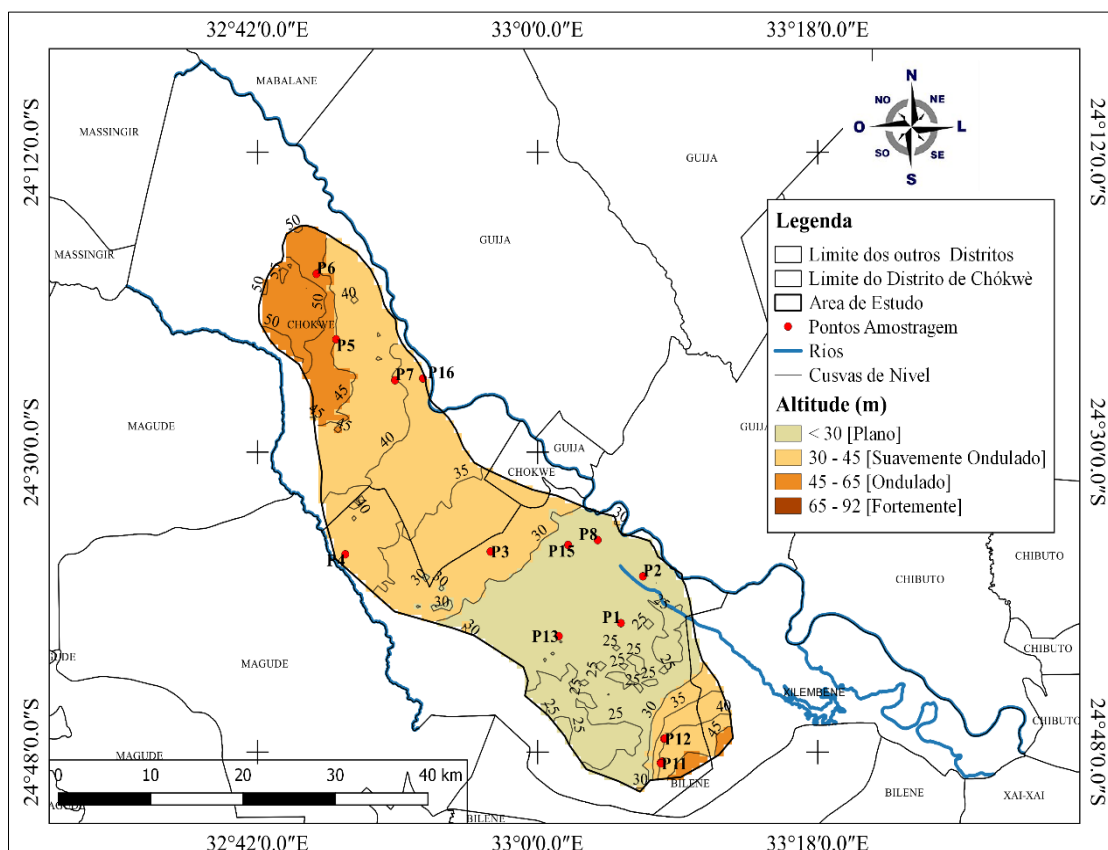


Figura 11. Mapa de topografia da área de estudo.

#### 4.4. Variabilidade espacial da hidrogeoquímica e potencial de múlti-uso

##### 4.4.1. Potencial hidrogeniônico

A Figura 12 ilustra o mapa da variação do pH da água para diferentes usos na área de estudo. Por meio da técnica de interpolação IDW, foi possível gerar esse mapa, revelando uma diversidade significativa nos valores de pH em toda região.

Na região Sul de Lionde, os valores de pH são <6.5, indicando uma leve acidez, representada pela cor vermelha. Na faixa seguinte, marcada pela cor castanha, os valores de pH variam de 6.5 a 7.0, indicando um início de neutralidade ao sul de Lionde. A faixa verde representa um pH entre 7.0 a 7.5, caracterizando a neutralidade completa. Essa faixa abrange a região oeste e leste de Lionde e é considerada mais adequada para o consumo humano. A cor verde-claro delimita uma faixa de pH entre 7.5 a 8.0, começando

ao norte de Lionde e estendendo-se pela parte oeste do distrito de Chókwè até o Norte em Macarretane. Por fim, a cor azul representa valores de pH superiores a 8.0, presentes em duas áreas específicas: Chókwè, Lionde e uma pequena área a sueste de Macarretane. Essas áreas são ocupadas por práticas agrícolas de regadio.

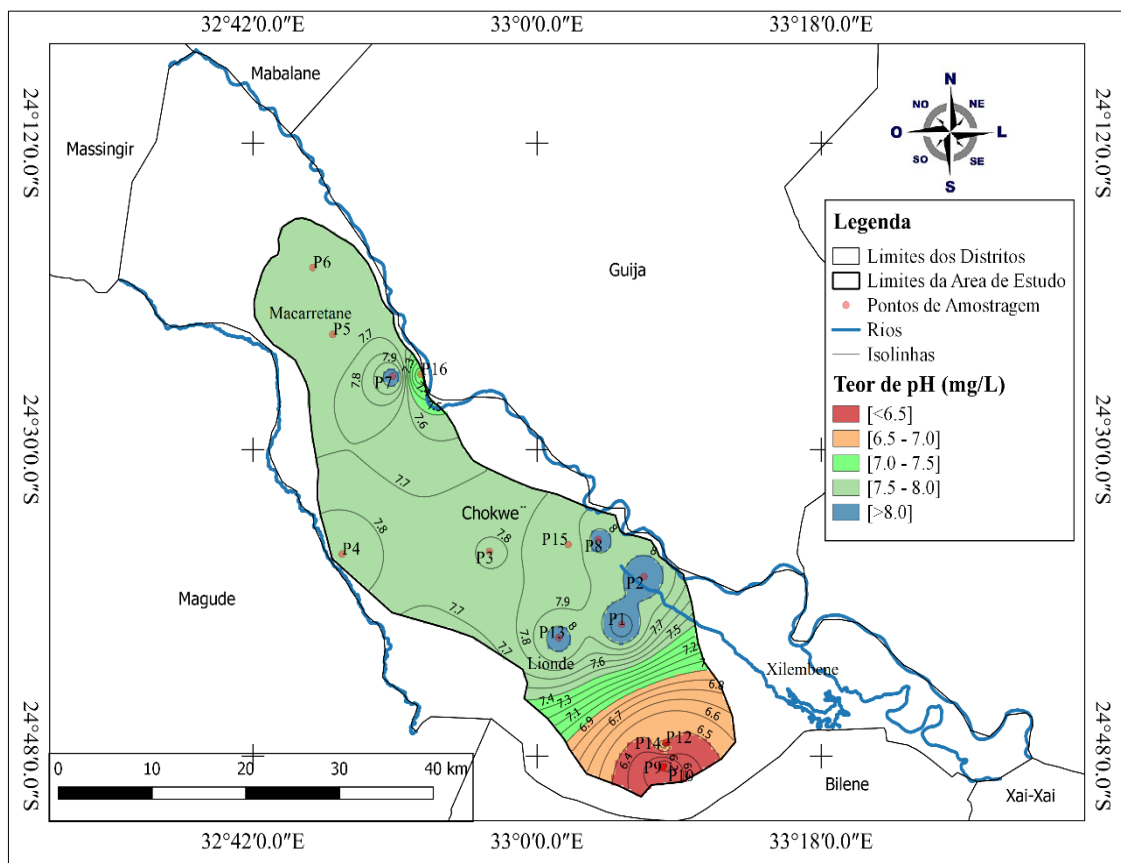


Figura 12. Mapa de distribuição espacial do pH na água subterrânea.

#### potencial de múlti-uso

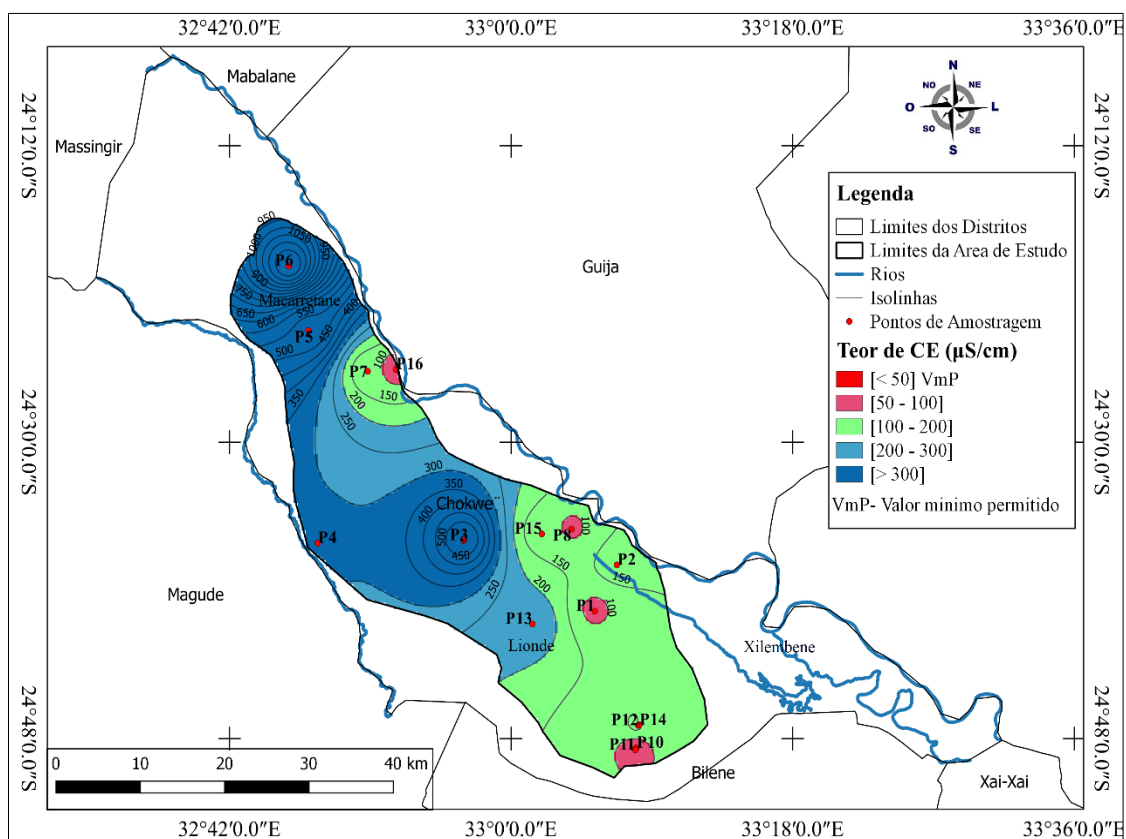
A variação nos níveis de pH na região indica a existência de áreas com água de qualidade adequada para consumo humano nas partes Sul de Lionde e Sudeste de Macarretane, com uma variação neutra (7.0-7.5). Adicionalmente, as áreas com pH mais elevado (>8.5), como a norte de Lionde e uma pequena região a sudeste de Macarretane, sugerem a possibilidade de utilizar a água subterrânea em actividades agrícolas de irrigação. No entanto, uma pequena porção ao sul de Lionde apresenta pH inferior a (<6.5), indicando uma leve acidez, o que não é considerado boa qualidade para consumo humano e nem para irrigação.



#### 4.4.2. Condutividade elétrica

A Figura 13 ilustra o mapa da variação da condutividade elétrica (CE) em relação à qualidade da água para diferentes usos na área de estudo. Cada cor representa uma faixa específica de variação da CE.

O mapa de interpolação da condutividade elétrica, criado utilizando a técnica de IDW, revela uma variação significativa nos valores de CE na área de estudo. Na parte sul Lionde, pode-se observar uma pequena área com valores de CE  $< 50 \mu\text{S/cm}$  (P14), representada pela cor vermelha, o que indica baixa concentração de íons e boa água nesse local. Na faixa seguinte, representada pela cor rosa, os valores de CE variam entre 50 a  $100 \mu\text{S/cm}$ , com pequena porção no P11, P1, P8 e P16. A faixa verde indica valores de CE entre 100 a  $200 \mu\text{S/cm}$ , essa faixa se estende do Sul à Nordeste de Lionde e também abrange uma pequena porção ao sudeste de Macarretane. A cor azul-claro, que varia de 200 a  $300 \mu\text{S/cm}$ , começando no Sudoeste de Lionde e se estende pela parte leste de Chókwè, também abrangendo uma pequena área ao sudeste de Macarretane. Por fim, a cor azul, que representa valores de CE acima de  $300 \mu\text{S/cm}$  e está presente em duas zonas: Macarretane e no centro do Distrito de Chókwè.



**Figura 13.** Mapa de distribuição espacial da condutividade elétrica na água subterrânea.



### **Potencial multi-uso**

A diversidade nos valores de CE ao longo do distrito indica que na região sul de Lionde, os valores de CE sugerem uma boa qualidade da água, sendo propícios para consumo humano. Nas regiões sul e nordeste de Lionde, a água subterrânea apresenta potencial tanto para abastecimento quanto para irrigação. No entanto, áreas com valores de CE mais elevados, como em Macarretane e no centro do Distrito de Chókwè, podem indicar a presença de sais, limitando a adequação para irrigação, mas sendo favoráveis para consumo humano, pois não ultrapassam 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 4.4.3. Cátions

##### a) Sódio

A Figura 14 ilustra a variação dos níveis de sódio (Na), criado utilizando a técnica de IDW, revela uma variação significativa nos valores de sódio na área de estudo. Na parte sul de Lionde e sudeste de Macarretane, os valores de sódio estão abaixo de 200 mg/L e são identificados pela cor azul. Uma faixa seguinte, representada pela cor verde, indica valores de sódio variando entre 200 a 400 mg/L, demonstrando um leve aumento na concentração de sódio que se inicia no Sul de Lionde em Chaquelane e se estende até o Sudeste de Macarretane. A cor amarela, que varia entre 400 a 600 mg/L, é observada no Sudoeste de Lionde e se expande pela parte leste do Distrito de Chókwè até o Sudeste de Macarretane. A cor castanha representa valores de sódio entre 600 e 800 mg/L, presente no sudoeste do Distrito de Chókwè e em uma área específica em Macarretane. Por fim, a cor castanho carregado indica valores acima de 800 mg/L, localizados no centro de Chókwè e no Norte de Macarretane.

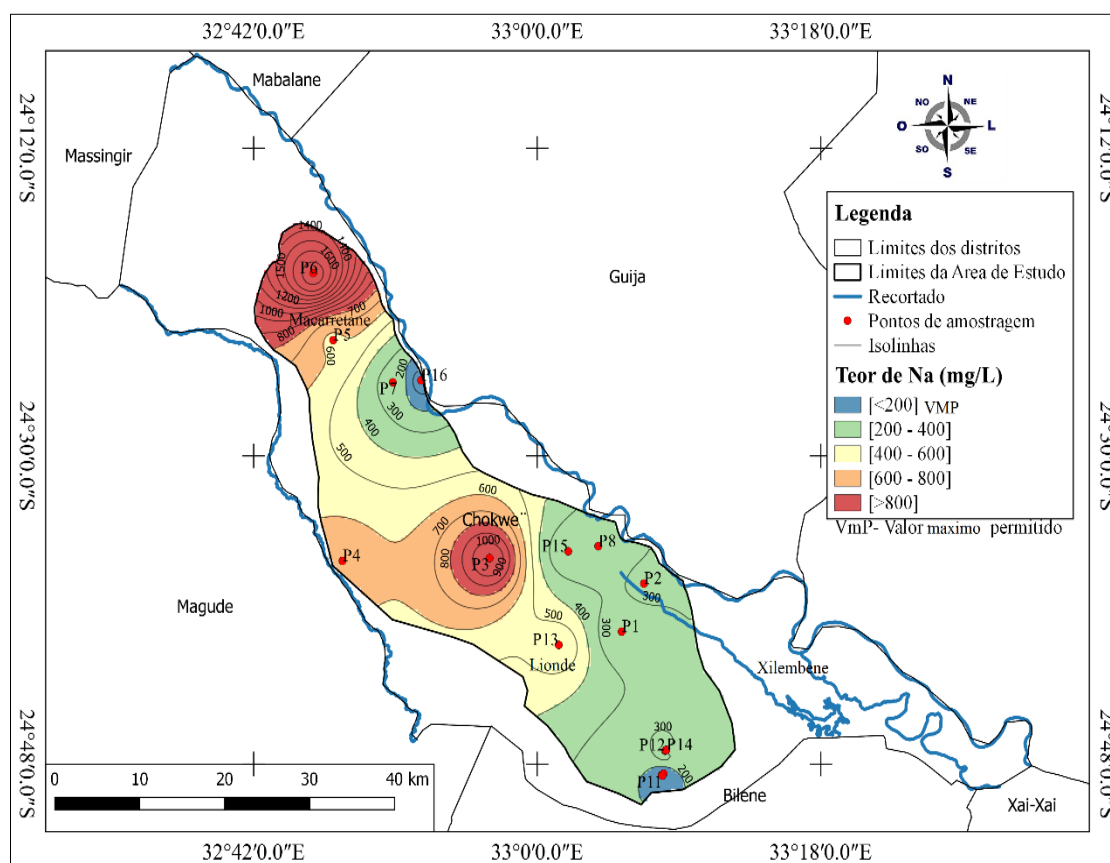


Figura 14. Mapa de distribuição espacial do sódio na água subterrânea.

### ➦ Potencial multi-uso

Existe uma diversidade notável nos valores de sódio em toda a região, sendo que as áreas ao sudeste de Macarretane e uma pequena porção ao sul de Lionde apresentam boa qualidade para consumo humano e irrigação. No entanto, é importante ressaltar que áreas com níveis mais elevados de sódio, localizadas nas regiões sul de Lionde, Macarretane e no centro de Chókwè, podem apresentar desafios para o consumo humano e para a irrigação de culturas sensíveis ao sódio.

#### b) Cálcio

No mapa a seguir (Figura 15), é apresentada a variação da concentração de cálcio em relação à qualidade da água para consumo humano no distrito de Chókwè. O cálcio é representado por diferentes cores, incluindo azul, castanha, verde e castanho carregado, cada uma indicando uma faixa de variação.

A análise do mapa de interpolação do cálcio (Ca), gerado utilizando a técnica de IDW, revela uma notável variação nos níveis de Ca na área de estudo. Na região sul e norte de

Lionde, os valores de Ca são inferiores a 50 mg/L, indicados pela cor azul. Na faixa seguinte, representada pela cor castanha, os valores de Ca variam entre 50-100 mg/L e abrangem todo o Distrito de Chókwè, além de uma pequena área a sudoeste de Macarretane, mostrando um leve aumento nos níveis de Ca. A faixa verde indica valores de Ca entre 100 e 150 mg/L, com uma pequena área no centro do Distrito de Chókwè e no Sul de Macarretane. Por fim, a cor castanho carregado ocupa uma porção significativa de Macarretane.

### 🚦 Potencial multi-uso

A variação da concentração de cálcio (Ca) no distrito de Chókwè indica a diversidade nos níveis de Ca na área. Na região norte e sul de Lionde, apresentam valores baixos que, por sua vez, sugerem potencial para consumo humano. Faixas de 50-100mg/L, neste caso, podem ser exploradas para irrigação. Áreas com concentrações mais elevadas, a partir de 100mg/L, podem apresentar desafios para consumo humano, mas ainda têm potencial para práticas de irrigação agrícola.

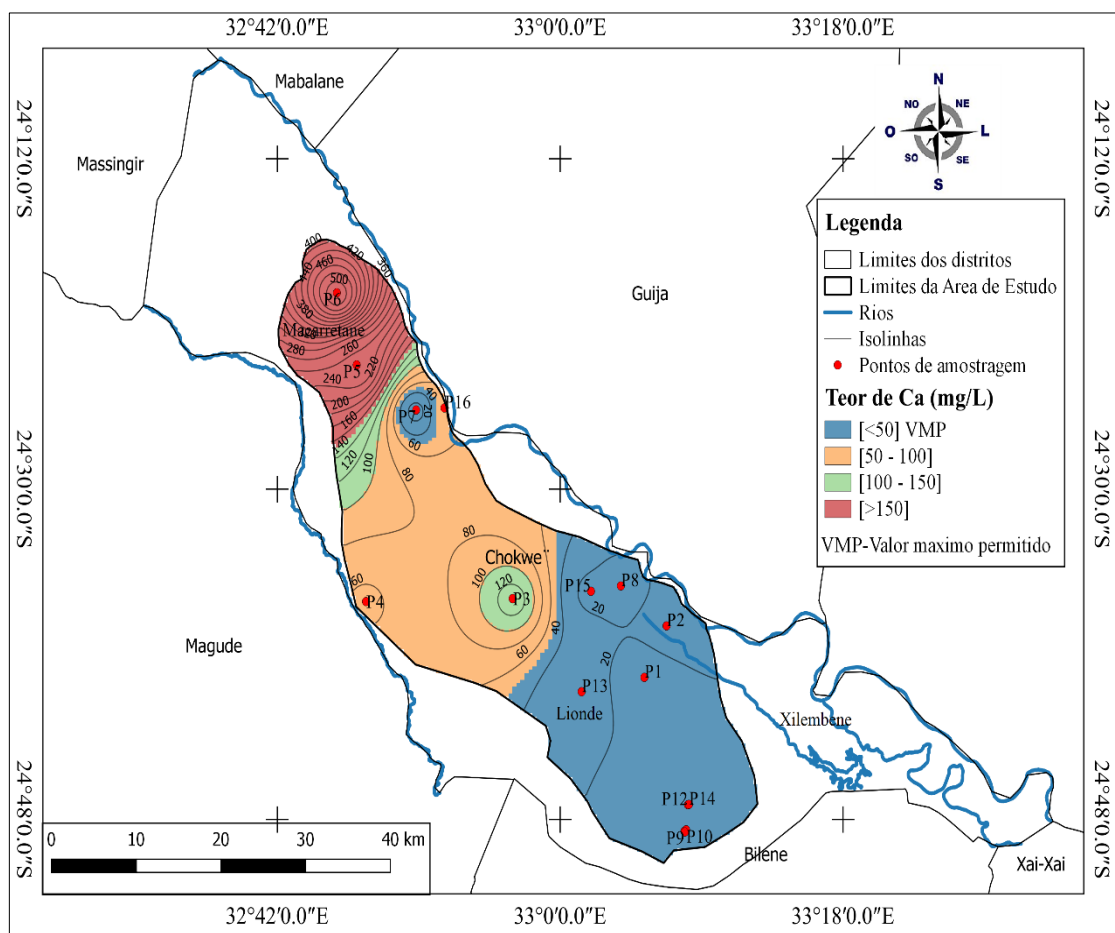


Figura 15. Mapa de distribuição espacial do cálcio na água subterrânea.

### c) Magnésio

A Figura 16 ilustra o mapa dos níveis de magnésio ( $Mg^{2+}$ ) em relação à qualidade da água para diversas finalidades na área do estudo. Utilizando a técnica de interpolação IDW, foi criado um mapa que apresenta a variação dos níveis de magnésio ( $Mg^{2+}$ ) na área de estudo, revelando diferenças significativas nos valores de  $Mg^{2+}$ . Na região sul de Lionde e nordeste, os valores de Mg são inferiores a 20 mg/L, representados pela cor vermelha.

Na faixa seguinte, representada pela cor castanha, os valores de Mg variam de 20 a 50 mg/L, começando no Sudoeste de Lionde e se estendendo para o Leste, indicando o limite máximo permitido para consumo humano. A cor cinza representa valores de Mg entre 50 e 70 mg/L, abrangendo as áreas oeste e leste do Distrito de Chókwè, com uma pequena elevação no Sudeste de Macarretane. A faixa verde indica valores de Mg entre 70 e 90 mg/L, com uma pequena porção no centro do Distrito de Chókwè e no Sul de Macarretane. Por fim, a cor azul indica uma elevação drástica ao Sul de Macarretane.

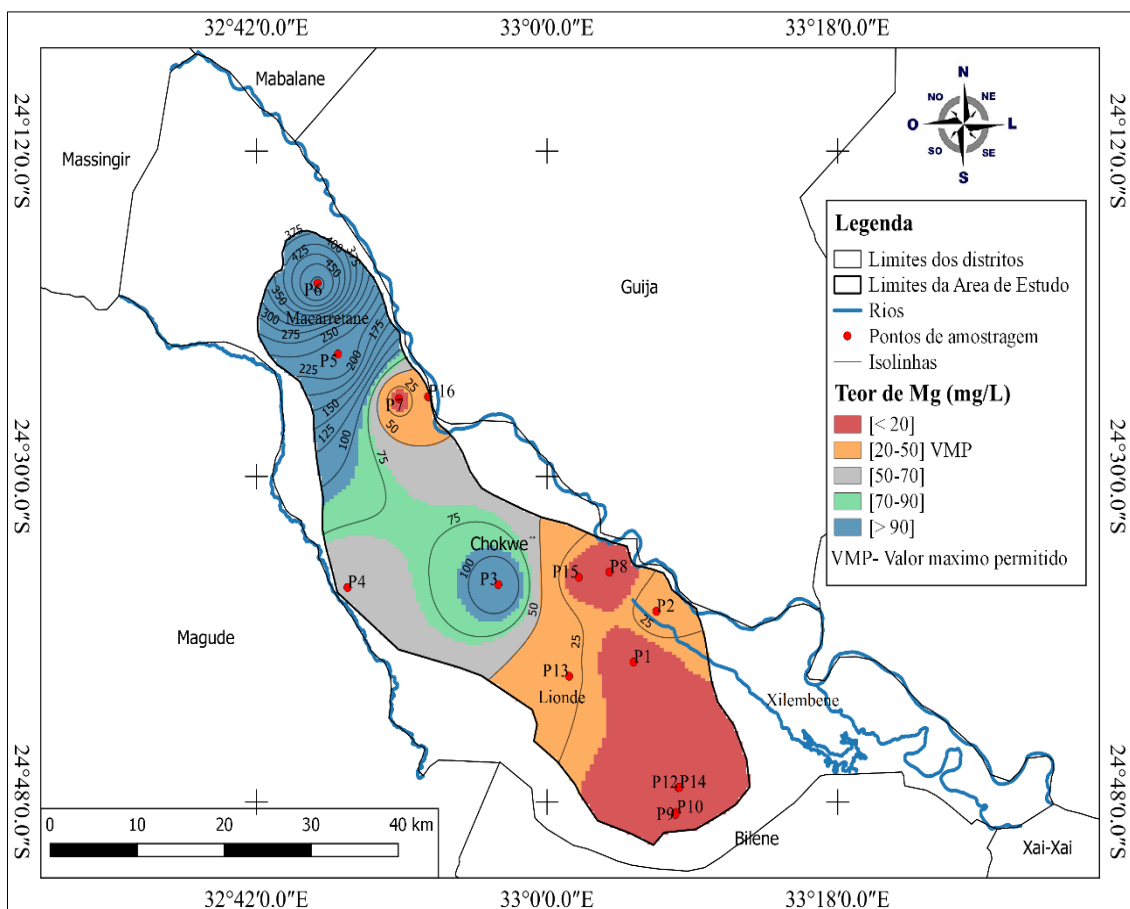


Figura 16. Mapa de distribuição espacial do magnésio na água subterrânea.

### **Potencial multi-uso**

A variação da concentração de magnésio ( $Mg^{2+}$ ) na área de estudo, destaca um potencial, ao norte e sul de Lionde e uma pequena porção ao sudeste de Macarretane, que são propícias para consumo humano, não ultrapassam 50mg/L. A faixa seguinte, em Chókwè tem com potencial consumo humano e irrigação. A presença de valores significativamente altos  $> 90mg/L$  ao sul de Macarretane sugere possíveis limitações para o consumo humano, mas com oportunidades para práticas agrícolas.

#### **d) Potássio**

A Figura 17 apresentada a variação de potássio em relação à qualidade da água para diversas finalidades na área de estudo. A variação é representada por diferentes cores, incluindo cor vermelha, azul, violeta e castanha, cada uma indicando uma faixa específica de variação de potássio na região.

Utilizando a técnica de interpolação IDW, foi criado o mapa que apresenta a variação dos níveis de Potássio ( $K^+$ ) na área de estudo, revelando diferenças significativas nos valores de  $K^+$  na área de estudo. A região representada pela cor vermelha que abrange uma pequena região a Sudeste de Macarretane e Leste de Lionde apresenta uma variação de  $K^+ < 5$  mg/L. Em seguida a cor azul que indica a variação de  $K^+ 5-10$  mg/L que começa a sul de Lionde abrangido a região Leste da cidade de Chókwè e terminando a sul de Macarretane. A faixa violeta indica variação de  $K^+ 10-15$  que abrange uma pequena porção a sul de Lionde e se alastrando a uma pequena região a sudoeste da cidade de Chókwè e por fim a centro de Macarretane. A ultima faixa, castanha indica variação de  $K^+ >15$  que abrange a região Sul de Lionde e a região Sul de Macarretane.

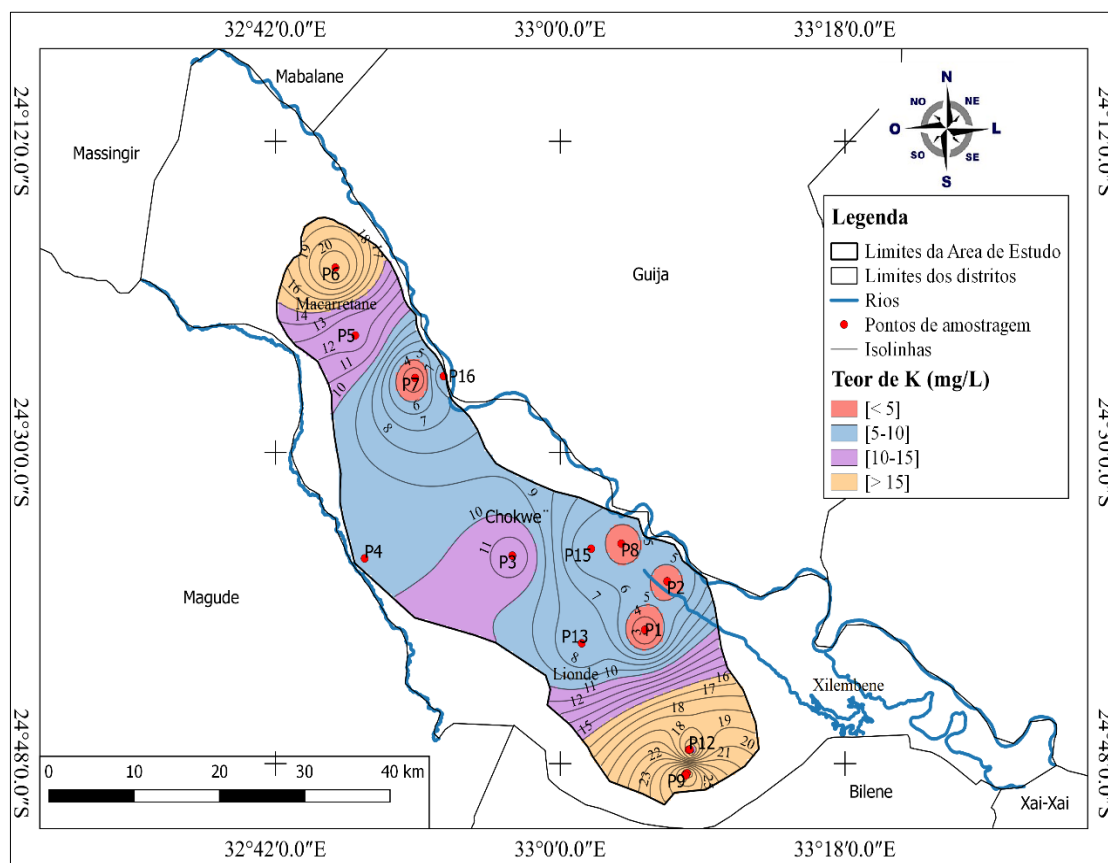


Figura 17. Mapa de distribuição espacial do potássio na água subterrânea.

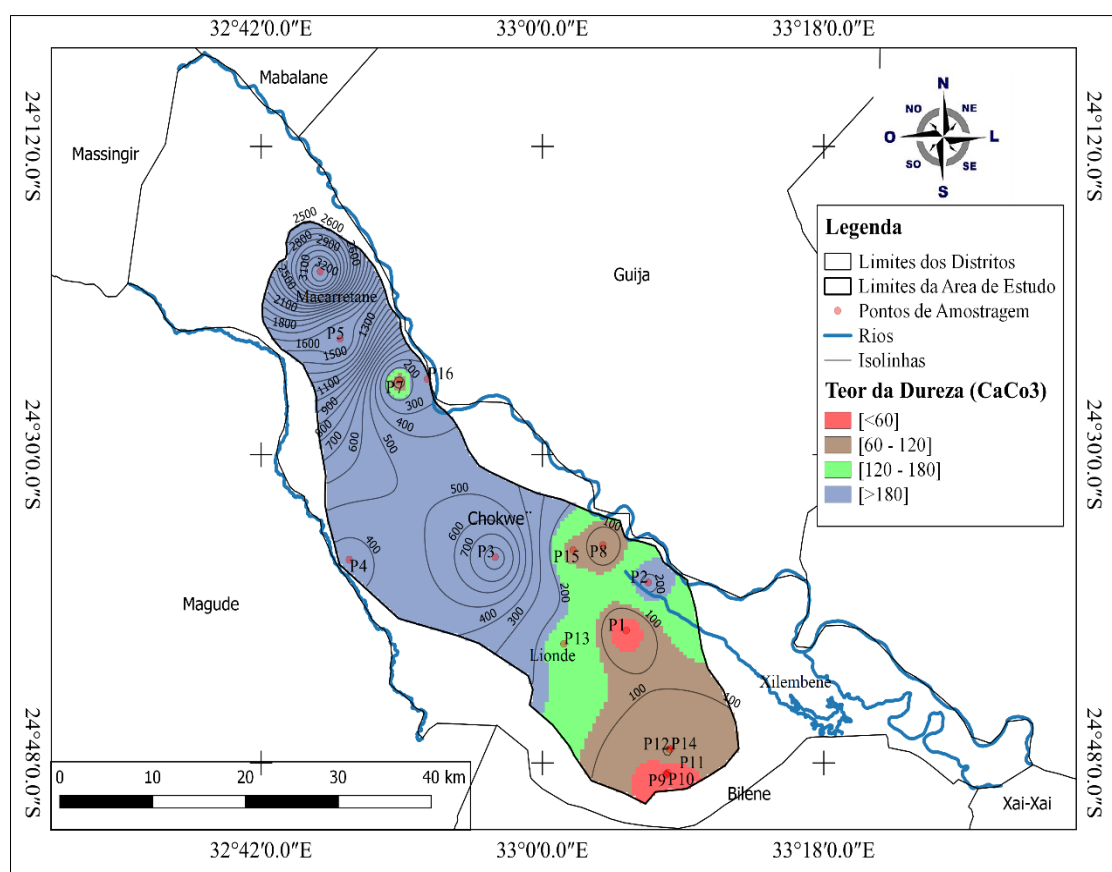
#### Potencial multi-uso

A concentração de potássio apresenta variações com potencial para consumo humano e irrigação. As regiões com variações a sudeste de Macarretane e Sudeste de Lionde são consideradas adequadas para consumo humano. Ao sul de Lionde, abrangendo a região leste de Chókwè e terminando ao sul de Macarretane, indica-se um potencial para irrigação. A região com variação de  $K^+ > 15$  mg/L, que abrange uma pequena porção ao sul de Lionde e se estende para uma pequena região a sudoeste de Chókwè e, por fim, ao centro de Macarretane, sugere oportunidades para irrigação e apresentam desafios para o consumo humano.

#### e) Dureza total

A Figura 18, apresenta uma variação da dureza total da água em relação à qualidade da água para diversas finalidades na área de estudo. O mapa de interpolação da dureza total da água foi gerado por meio da técnica de interpolação por IDW, revelando uma variação significativa nos valores da DT na área em estudo.

A região representada pela cor castanha apresenta uma variação de  $DT < 60$  mg/L  $\text{CaCO}_3$ , indicando água mole. Essa variação abrange uma pequena área ao sul de Lionde em Chaquelane e uma pequena percentagem nas localidades P1 e P7. A faixa de cor castanha indica uma variação de dureza entre 60-120 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , caracterizando a água como moderadamente dura, essa faixa tem início ao sul de Lionde, com uma pequena porção a nordeste de Lionde e também uma porção ao sudoeste de Macarretane. A faixa verde indica uma variação de dureza entre 120-180 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , indicando água dura, essa variação tem início no sudoeste e nordeste de Lionde. Por fim, a cor azul representa uma variação de  $DT > 180$  mg/L  $\text{CaCO}_3$ , indicando água muito dura, essa variação se estende do Sudoeste de Lionde, passando pelo distrito de Chókwè até o Norte de Macarretane.



**Figura 18.** Mapa de interpolação de dureza total da área de estudo.

Com base nos limites estabelecidos por Ayers e Westcot (1985), a classificação da dureza da água mostra que a maioria das amostras se enquadra na categoria de água muito dura (37,5%), seguida por água dura (12,5%), água moderadamente dura (18,75%) e água mole (31,25%), como ilustra a Tabela 7.

**Tabela 7.** Classificação de amostras de águas subterrâneas com base nos valores de dureza

<b>Dureza total (CaCO<sub>3</sub>)</b>	<b>Números de amostragens</b>	<b>Porcentagem (%)</b>	<b>Classificação da água</b>
<b>&lt; 60</b>	5	31.25 %	Água mole
<b>60-120</b>	3	18.75 %	Água moderadamente dura
<b>120-180</b>	3	18.75 %	Água dura
<b>&gt; 180</b>	5	31.25 %	Água muito dura
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>100 %</b>	

As análises dos dados de dureza da água da área do estudo revelam uma ampla variação nos valores, variando de 14,58 mg/L a 3261,88 mg/L. A média da dureza total é de 457,08 mg/L, indicando uma grande dispersão dos dados.

Esses resultados indicam que a dureza da água nas amostras analisadas apresenta uma ampla variação, com uma tendência predominante de água dura e muito dura, neste caso. Essa dureza pode ter várias consequências indesejáveis, como conferir um sabor desagradável à água, promover a formação de biofilmes, ter efeitos laxativos e interferir na capacidade de formação de espuma por sabão e detergentes (Coelho *et al.*, 2017).

#### **Potencial multi-uso**

A variação da dureza total da água na área de estudo indica que a água ao sul de Lionde é mole, ao sul e nordeste de Lionde é moderadamente dura, e no sudoeste e nordeste de Lionde é dura. Essas variações oferecem oportunidades para consumo humano e irrigação. No entanto, a água com dureza total acima de 180 mg/L CaCO<sub>3</sub>, que representa água muito dura, abrangendo o sudoeste de Lionde, Chókwè até o norte de Macarretane, não é adequada para consumo humano nem para irrigação.

#### 4.4.4. **Aniões**

##### a) **Cloreto**

A Figura 19 ilustra o mapa da variação do íon cloreto (Cl<sup>-</sup>) na qualidade da água para diversas finalidades na área de estudo. Ele utiliza 5 cores diferentes para representar faixas de variação de cloreto.

O mapa de interpolação dos níveis de cloreto foi gerado utilizando a técnica de interpolação por IDW. Observou-se que no centro e nordeste de Lionde, os valores de



cloreto apresentam pequenas variações, variando entre 50-250 mg/L, representados pela cor azul. Essa variação continua até o Sudeste de Macarretane. Na faixa seguinte, representada pela cor cinza, os valores de cloreto variam de 250 a 500 mg/L, abrangendo a parte Sul e Nordeste de Lionde e uma pequena porção no Sudeste de Macarretane. A faixa castanha indica valores de cloreto entre 500 e 750 mg/L, iniciando no Sudoeste de Lionde e terminando no norte do distrito de Chókwè. Por fim, a cor vermelha representa uma variação de cloreto acima de 750 mg/L, estendendo-se do sudoeste do distrito de Chókwè até o Norte de Macarretane, indicando valores elevados de cloreto nessa região.

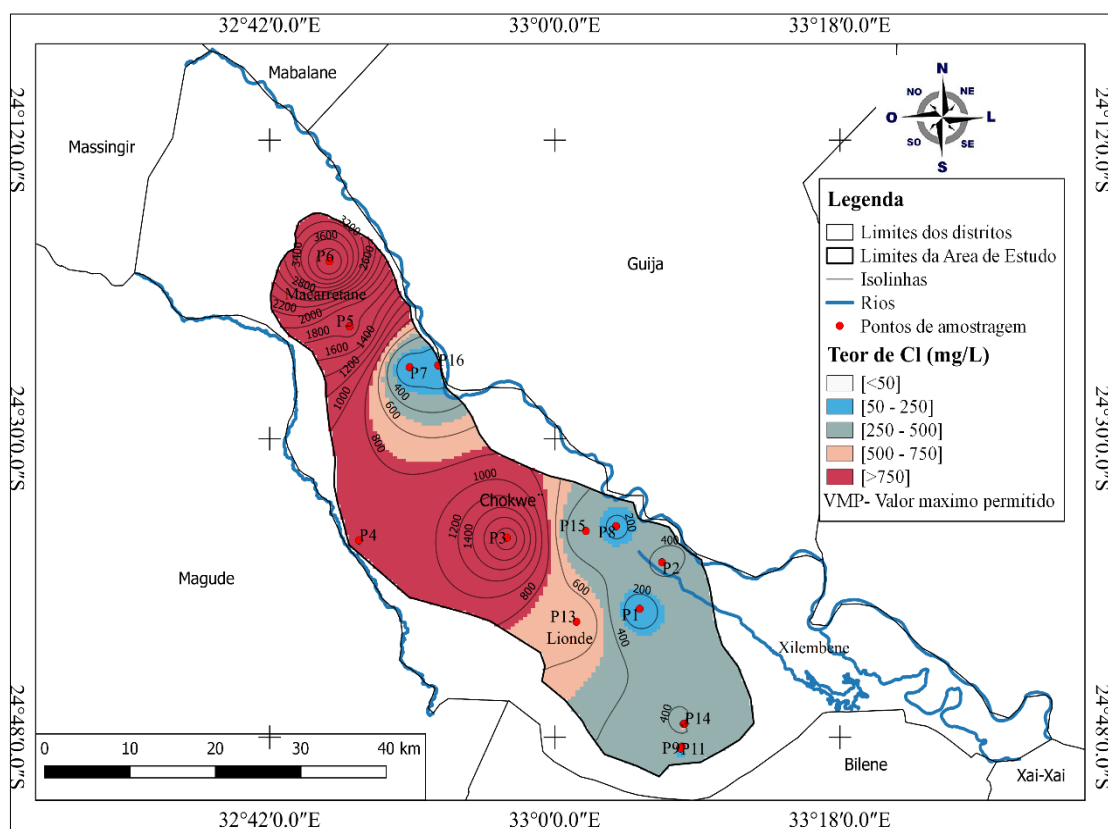


Figura 19. Distribuição espacial de cloreto na água subterrânea.

### ✚ Potencial multi-uso

A região nordeste de Lionde e sudeste de Macarretane apresenta uma variação moderada de concentração de Cloretos na água subterrânea, entre 50-250 mg/L, o que indica um potencial para consumo humano e irrigação. No entanto, áreas localizadas no sul e nordeste de Lionde e parte do Sudeste de Macarretane apresentam concentrações mais elevadas, na faixa de 250-500 mg/L, sugerindo que a água pode não ser adequada para o consumo humano. Valores ainda mais elevados, especialmente na faixa de 500-750 mg/L

e acima de 750 mg/L, indicam desafios significativos para a irrigação, pois concentrações mais altas exigem precauções e a seleção de plantas mais tolerantes ao cloreto.

## b) Sulfato

A Figura 20 apresenta o mapa da variação do Sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ) na qualidade da água para diversas finalidades na área de estudo. Ele utiliza 5 cores diferentes para representar faixas de variação.

O mapa de interpolação dos níveis de cloreto foi gerado utilizando a técnica de interpolação por IDW. Observou-se uma pequena porção a sul e norte de Lionde e a sudeste de Macarretane que varia de 0-50mg/L. A faixa seguinte com a coloração verde que varia de 50-100mg/L, que começou da região Sul de Lionde alastra-se a oeste de Chókwè e uma pequena região a sudeste de Macarretane. A faixa castanha que varia de 100-150mg/L começando no centro da cidade de Chókwè passando da região sudoeste de Macarretane terminado a noroeste da mesma região. A faixa branca começa de oeste da cidade de Chókwè terminando na zona sul de Macarretane mostrando a variação de 150-200mg/L de sulfato. Por fim a faixa azul que mostra a variação de sulfato superior a 200mg/L, começando com uma pequena Porção no ponto 4 a oeste da cidade de Chókwè e finalizando a norte de Macarretane.

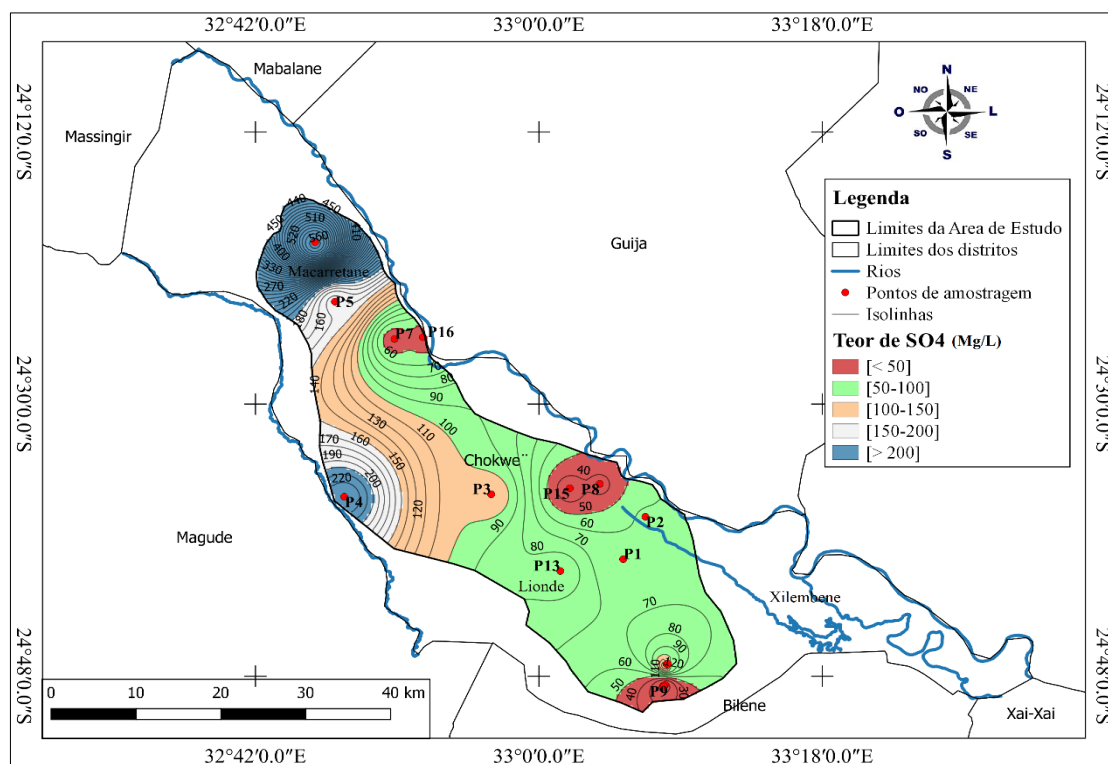


Figura 20. Distribuição espacial de sulfato na água subterrânea.

### **Potencial multi-uso**

A variação de sulfato indica potencial para consumo humano em algumas áreas ao sul e norte de Lionde, sudeste de Macarretane, e possivelmente para irrigação em regiões com concentrações moderadas 50-100mg/L. No entanto, a presença de níveis mais elevados sugere a necessidade de análises mais detalhadas para avaliar a adequação para ambas as finalidades, especialmente em áreas com concentrações mais elevadas de sulfato.

#### **c) Nitrito**

A Figura 21 representa a variação dos nitratos em relação à qualidade da água para diversas finalidades na área em estudo. A variação dos nitratos é exibida através da utilização de diferentes cores, sendo elas verde, castanha, azul, amarela e vermelha, cada uma representando uma faixa específica de variação dos nitratos na área analisada.

O mapa de interpolação dos nitratos foi gerado através da aplicação da técnica de Interpolação por IDW, revelando uma variação significativa nos valores de  $\text{NO}_3^-$  na área em estudo. A região representada pela cor verde apresenta uma variação de  $\text{NO}_3^-$  inferior a 25 mg/L, abrangendo desde o Sudoeste de Lionde até o Norte de Macarretane. Em seguida, a faixa castanha indica uma variação de nitratos entre 25 e 50 mg/L, sendo este o valor máximo permitido, abrangendo a região sudoeste e centro de Lionde. A faixa azul indica valores de nitratos entre 50 e 75 mg/L, cobrindo toda a região Sul de Lionde. Por fim, a cor amarela indica uma variação de  $\text{NO}_3^-$  entre 75 e 100 mg/L, com uma pequena porção localizada no ponto 10, ao sul de Lionde.

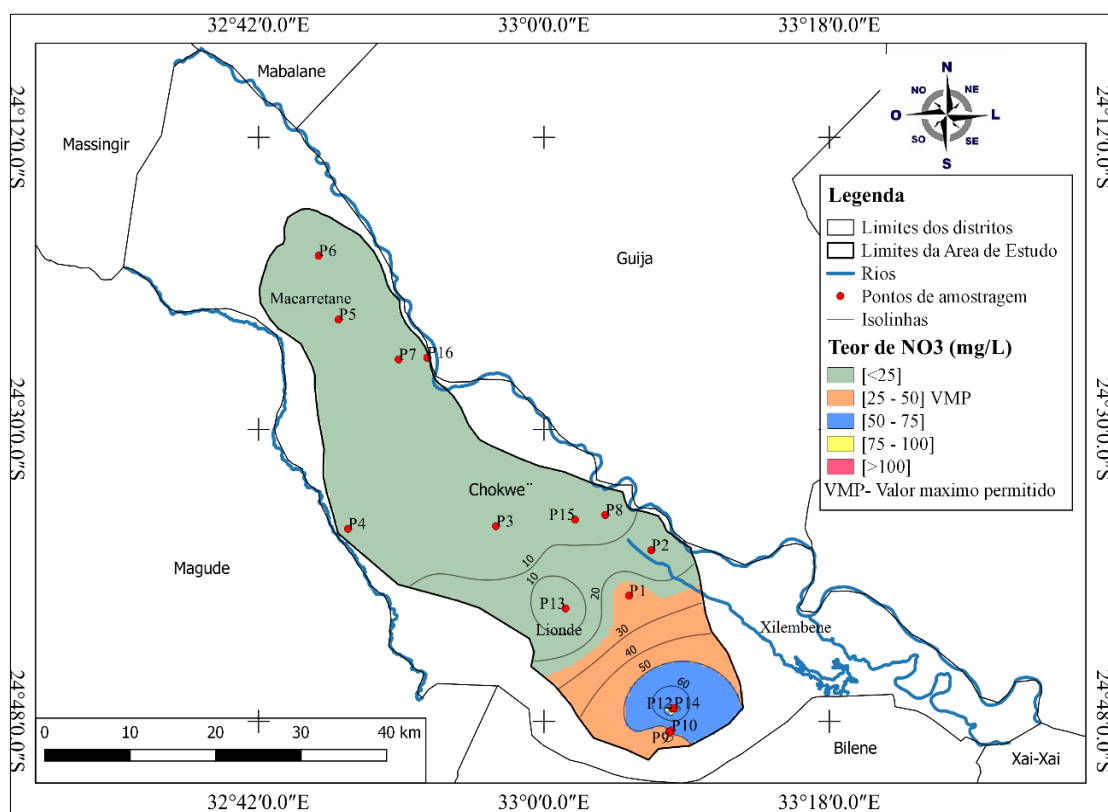


Figura 21. Distribuição espacial de nitrato na água subterrânea.

#### ✚ Potencial Multi-uso

A variação de nitratos na água subterrânea, indica potencial para consumo humano em áreas com concentrações baixas 0-50 mg/L em Macarretane, Chókwè e a norte de Lionde e para irrigação em regiões com valores moderados 50-75mg/L. No entanto, áreas com concentrações mais elevadas >100 exigem uma análise mais detalhada para avaliar a viabilidade para ambos os usos.

#### d) Bicarbonato

A Figura 22 a seguir representa a variação dos  $\text{HCO}_3^-$  em relação à qualidade da água para diversas finalidades na área em estudo. A variação do bicarbonato é exibida através da utilização de diferentes cores.

O mapa de interpolação dos nitratos foi gerado através da aplicação da técnica de Interpolação por IDW, revelando uma variação significativa nos valores de  $\text{HCO}_3^-$  na área em estudo. A região representada pela cor castanha apresenta uma varia de bicarbonato menor que 100 que abrange somente a zona sul de Lionde. A faixa seguinte com cor verde representa uma variação que começa de 100-200 mg/L de  $\text{HCO}_3^-$ , que abrange a região nordeste de Lionde, se estendendo ate ao centro da cidade de Chókwè. A faixa vermelha

apresenta uma variação de 200 - 300mg/L de  $\text{HCO}_3^-$ , tendo uma porção a norte de Lionde, se alastrando a nordeste e noroeste da cidade de Chókwè e tendo termino a norte de Macarretane mais com uma pequena percentagem. a faixa amarela apresenta variação de 300 - 400mg/L a sudeste de Macarretane na região de P7 e também no P6 a norte de Macarretane. Por fim a cor azul que apresenta valores acima de 400, mostrando uma pequena variação no P6.

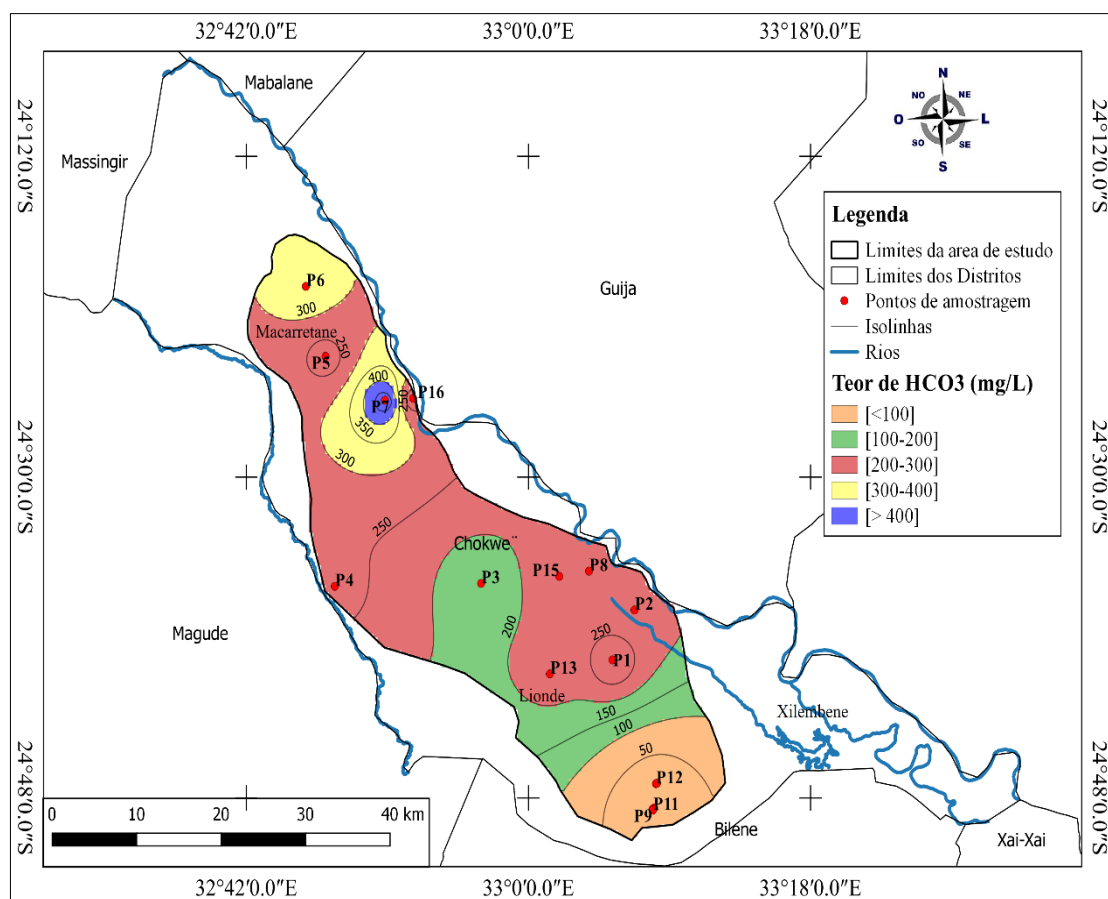


Figura 22. Distribuição espacial de bicarbonato na água subterrânea.

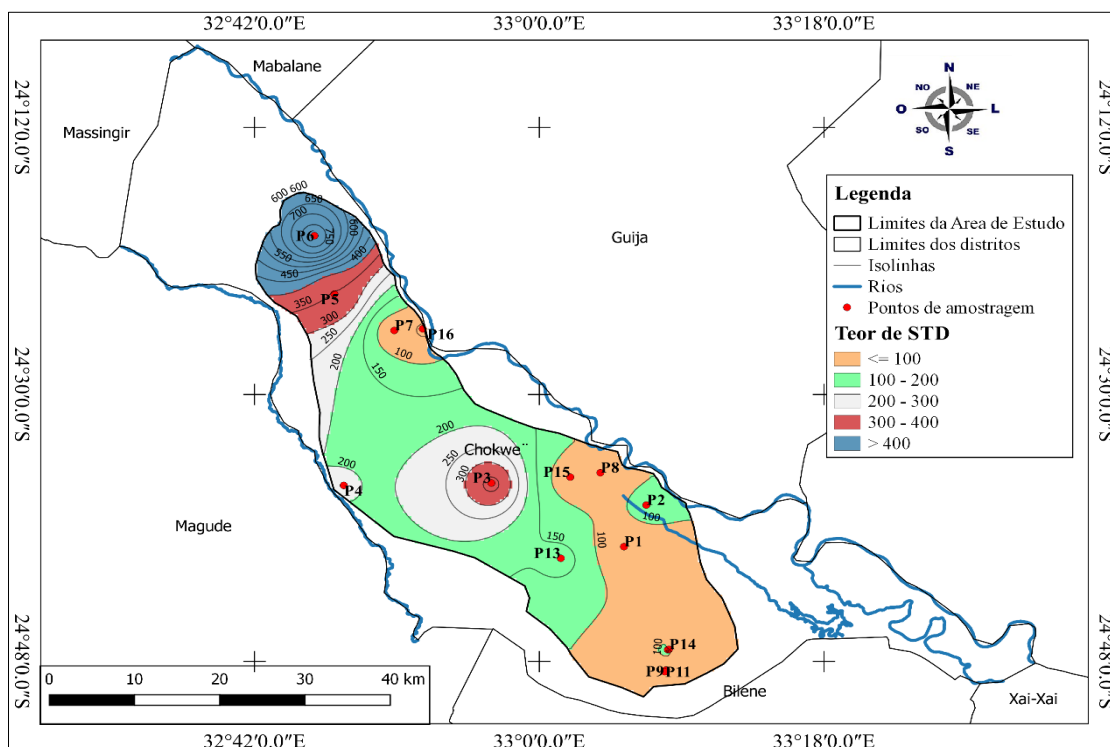
### ✚ Potencial multi-uso

A variação de bicarbonato na água subterrânea da região indica diferentes potenciais de uso. Ao sul de Lionde, com valores abaixo de 100 mg/L, indica um maior potencial para consumo humano. Na faixa de 100-200 mg/L, encontrada no Nordeste de Lionde até o centro de Chókwè, o potencial para consumo humano é moderado. Na faixa de 200-300 mg/L, presente em áreas como o norte de Lionde, nordeste de Chókwè e norte de Macarretane, o potencial para consumo humano não é adequado e na faixa de 300-400 mg/L, no sudeste de Macarretane (P7) e norte de Macarretane (P6), indica um maior potencial para irrigação.

e) **Sólidos totais dissolvidos**

A Figura 23 representa a variação dos níveis de STD em relação à qualidade da água para várias finalidades na área em estudo. A variação do STD é mostrada através da utilização de diferentes cores.

O mapa de interpolação dos nitratos foi gerado utilizando a técnica de Interpolação por IDW, revelando uma variação significativa nos valores de STD na área em estudo. A região representada pela cor castanha apresenta uma variação de STD inferior a 100, abrangendo a zona sul de Lionde e estendendo-se até a região norte de Lionde. A faixa seguinte, com cor verde, representa uma variação que vai de 100-200 mg/L de STD, começando no Sudeste de Lionde e com uma pequena porção em P2, estendendo-se a nordeste e noroeste da cidade de Chókwè até a região sudeste de Macarretane. A faixa branca apresenta uma variação de 200-300 mg/L de STD, com uma porção no centro de Chókwè, na região de P3, e uma área menor em P4, a oeste de Chókwè, e também a sudoeste de Macarretane até a nordeste. A faixa vermelha tem uma pequena área no centro de Chókwè, em P3, e também a norte de Macarretane, apresentando uma variação de 300-400 mg/L de STD, a sudeste de Macarretane, na região de P7, e também em P6, ao norte de Macarretane. Por fim, a cor azul representa valores acima de 400 mg/L, mostrando uma pequena variação ao norte de Macarretane.



**Figura 23.** Distribuição espacial de sólidos totais dissolvidos na água subterrânea.

## Potencial multi-uso

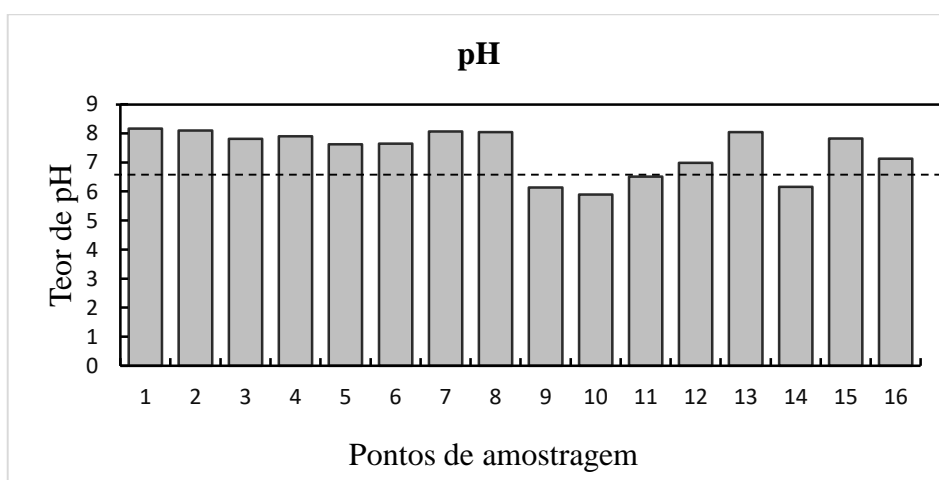
A variação de sólidos totais dissolvidos na água subterrânea da região indica que toda a área de estudo é adequada para consumo humano e para irrigação, pois os valores não ultrapassam 1000 mg/L de STD.

### 4.5. Classificação dos padrões químicos da qualidade de água subterrânea para consumo humano

#### 4.5.1. Potencial Hidrogeniônico

A Figura 24 ilustra o gráfico da variação do pH em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo e limite mínimo e máximo aconselhado pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e (OMS, 2004), indicado com uma linha tracejada que indica limite mínimo e uma simples que indica o limite máximo.

Com base nos resultados obtidos na área de estudo, foi observado que o valor mínimo de pH nas amostras é 5.9 (local 10), e o valor máximo é de 8.17 (local 1), com uma média de 7.38. dos 16 locais analisados na área de estudo, cerca de 68.75% apresentaram valores de pH dentro dessa faixa, pois, os valores de pH para OMS, varia de 6.5 a 9.5 e o MISAU 6.5 a 8.5, tanto para o Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e OMS estão dentro dos limites. No entanto, cerca de 18.75% dos pontos de amostragem apresentaram valores de pH abaixo dos limites recomendados, indicando uma fraca acidez, devido à presença de ácidos dissolvidos. Por outro lado, aproximadamente 12.5% dos pontos de amostragem apresentaram pH neutro, próximo a 7. Essa condição pode ser influenciada pela prática agrícola nas proximidades do rio Limpopo.



**Figura 24.** Gráfico ilustrativo de concentração de potencial hidrogeniônico da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

A pesquisa realizada por Uamusse, (2015), avaliou a qualidade da água de poços e furos para uso doméstico e constatou que os valores de pH estavam dentro dos parâmetros recomendados, neste caso, observa-se que 81,25% dos pontos de amostragem do estudo estavam em conformidade com os regulamentos do Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e da OMS (2004).

Por sua vez, segundo Arruda, (2016), diz que se o pH for muito ácido, o ambiente aquático pode não ser capaz de sustentar certas espécies, no presente estudo cerca de 18.75% das amostras apresentam acidez fraca.

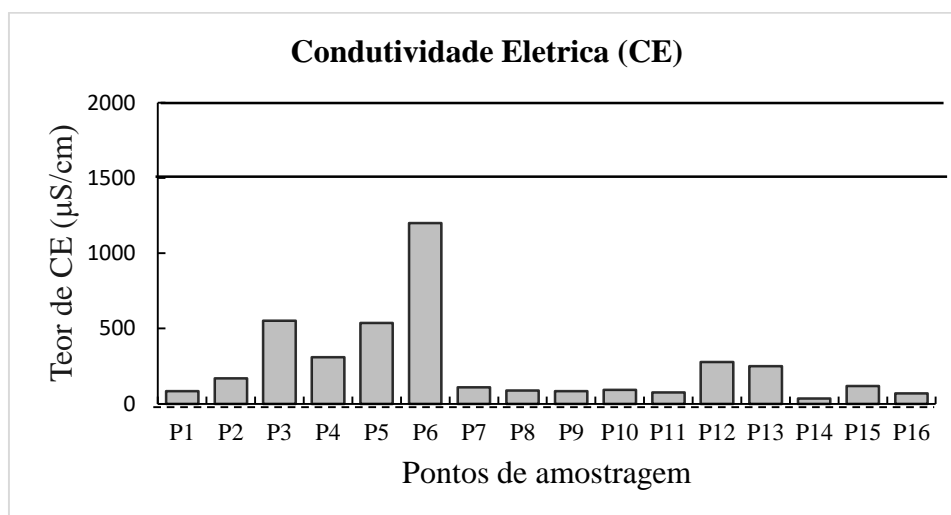
Outro estudo conduzido por Silva *et al.* (2019) investigou os parâmetros físico-químicos da água de poços artesianos e indicou que ambientes com pH próximo da neutralidade geralmente apresentam baixa dureza devido às baixas concentrações de carbonatos e a uma reação limitada com o CO<sub>2</sub>, oferecendo água adequada para o consumo humano.

#### 4.5.2. Condutividade Elétrica

A Figura 25, apresenta o gráfico da variação da condutividade elétrica (CE) em relação à qualidade da água para consumo humano, e limite máximo aconselhado pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e (OMS, 2004), indicado por uma linha.

Com base nos resultados obtidos na área de estudo, foi observado que o valor mínimo é de 36 µS/cm (local 14), e máximo é de 1200 µS/cm (local 6), com média de 253.4 µS/cm. É importante destacar que apenas 6.25% do valor esta abaixo do mínimo recomendado, o que indica uma baixa concentração de íons nesse local. Os demais valores das amostras estão dentro dos padrões estabelecidos pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e pela (OMS, 2004). De acordo com esse diploma, os limites máximos aceitáveis para a água destinada ao consumo humano variam de 50 a 2000 µS/cm, enquanto a OMS recomenda limites máximos permitido até 1500 µS/cm.





**Figura 25.** Gráfico ilustrativo de concentração de condutividade elétrica da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

Em um estudo realizado por Corcóvia, (2012), que avaliou a qualidade da água subterrânea no município de ibiporã-pr, constatou que todos os poços se encontram dentro dos limites permitidos para o consumo humano. Os resultados obtidos neste estudo são considerados satisfatórias para o consumo humano.

Segundo (Neto et al., 2016), quando a água apresenta uma condutividade elétrica superior a 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , torna-se difícil utilizá-la para irrigação, pois pode causar salinização do solo. Além disso, para consumo humano, essa água pode ter um sabor desagradável. No presente estudo, o poço P6 apresentou uma condutividade elétrica de 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , o que o torna desagradável para consumo, mas ainda dentro dos limites exigidos pelo Ministério da Saúde e pela OMS.

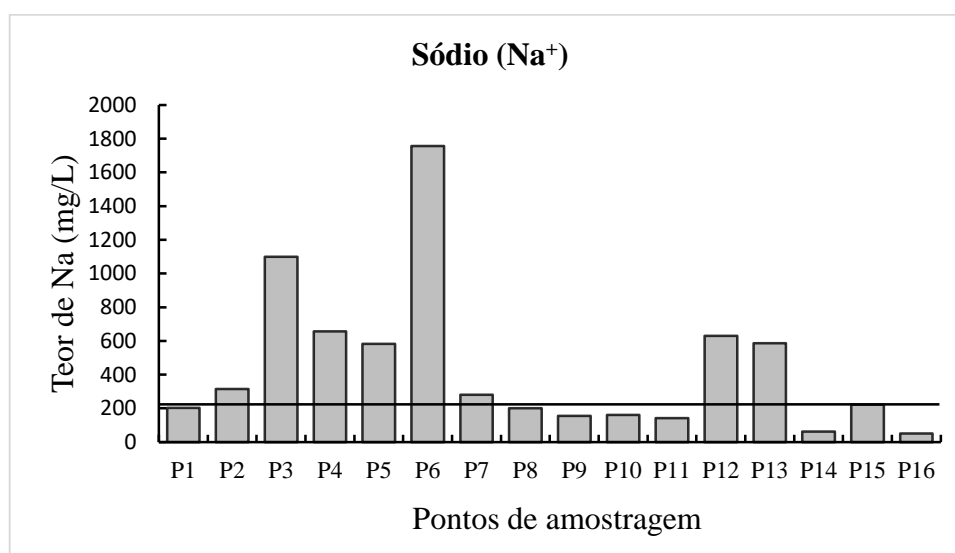
#### 4.5.3. Cátions

##### a) Sódio

A Figura 26 ilustra o gráfico da variação da condutividade elétrica Sódio em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo, e limite máximo aconselhado pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e (OMS, 2004), indicado com traço, que dita o limite máximo.

Na área de estudo, as águas subterrâneas são caracterizadas pela presença predominante do íon sódio. Em um conjunto de 16 amostras, a concentração de sódio varia de 51.3 mg/L (local 16) a 1756.4 mg/L (local 6), com uma média de 443.7 mg/L. Dentre essas amostras, aproximadamente 37.5% estão dentro dos limites estabelecidos pelo Diploma

Ministerial 180/2004 do MISAU e pela OMS (2004), os quais estabelecem um limite de 200 mg/L em águas potáveis. No entanto, cerca de 62.5% das amostras apresentam concentrações de sódio acima desse limite, indicando uma alta concentração desse íon na água, o que resulta em um sabor desagradável na água



**Figura 26.** Gráfico ilustrativo de concentração de sódio da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

De acordo com o estudo realizado por Ganyaglo *et al.*, (2011); Mansouri *et al.*, (2022) a presença natural de sódio nas águas subterrâneas pode ocorrer devido a fontes minerais de feldspatos e plagioclásios, que é derivado de rochas ígneas básicas adjacentes. Esses minerais são comumente encontrados em rochas e podem liberar íons de sódio na água durante o processo de lixiviação.

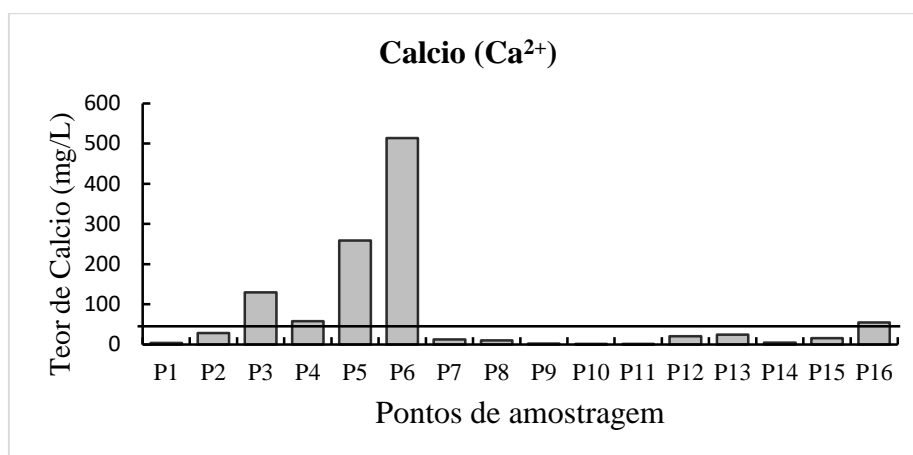
Altos níveis de sódio afetam o sabor da água, podendo ser fator de restrição ao seu consumo e também podem ter impactos na saúde humana, como a contribuição para o desenvolvimento de doenças cardiovasculares (Queiroz & Oliveira, 2018).

## b) Cálcio

A Figura 27 ilustra o gráfico da variação de cálcio em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo, e limite máximo aconselhado pelo (MISAU) e (OMS), indicado com uma linha.

Ao realizar análises, observou-se que os níveis de cálcio nas amostras de água variam de 1.608 mg/L (local 11) a 513.98 mg/L (local 6), com uma média de 71.20 mg/L. Aproximadamente 68.75% das amostras estão dentro dos limites estabelecidos pelos

critérios de potabilidade do Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e da OMS, (2004) que variam de 0-50 mg/L. No entanto, 31.25% das amostras não estão dentro desses limites, contribuindo para o aumento da dureza da água. O valor elevado de cálcio encontrado na amostra do local 6, 513.98 mg/L, pode ser atribuído à presença de fertilizantes agrícolas, uma vez que essa amostra foi coletada em uma área de atividade agrícola.

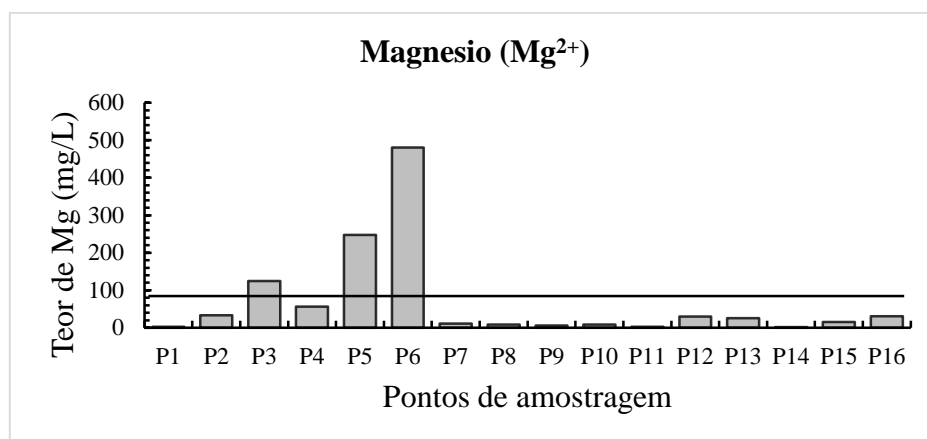


**Figura 27.** Gráfico ilustrativo de concentração de cálcio da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

### c) **Magnésio**

A Figura 28 ilustra o gráfico da variação de magnésio em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo, e limite máximo aconselhado pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e (OMS, 2004), indicado com traço.

Durante a análise das amostras, foram encontrados diferentes valores de magnésio, variando de 1,8 mg/L (local 14) a 480,8 mg/L (local 6), com uma média de 67,9 mg/L. A maioria dos pontos de amostragens estudadas apresenta concentrações de magnésio abaixo de 50 mg/L, o que corresponde a cerca de 75% das amostras e cerca de 25% das amostras apresentam concentrações de magnésio acima dos padrões de potabilidade de água estabelecidos pelo Diploma Ministerial 180/2004 do (MISAU) e pela (OMS, 2004).



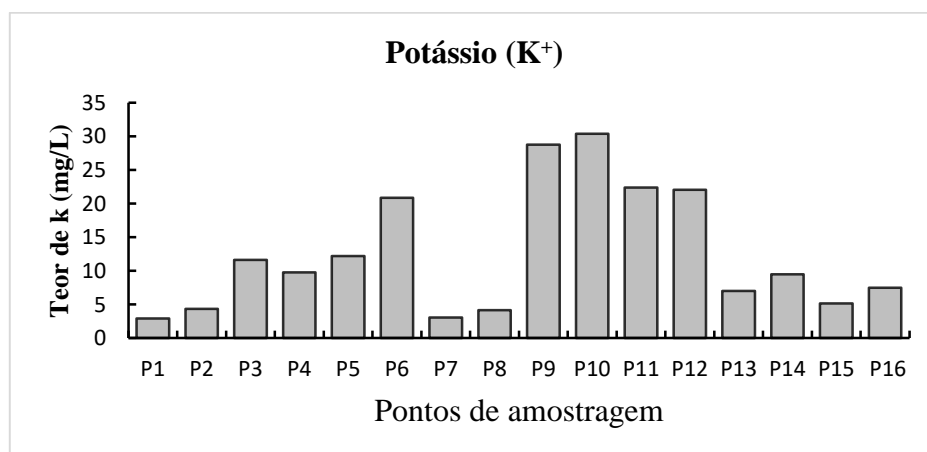
**Figura 28.** Gráfico ilustrativo de concentração de magnésio da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

O comportamento geoquímico do íon magnésio é semelhante ao do cálcio, mas com teores menores. Isso ocorre porque os minerais formados com base no magnésio são mais estáveis em relação aos processos químicos de intemperismo do que os minerais de cálcio (Stein *et al.*, 2012).

#### d) Potássio

A Figura 29 apresenta o gráfico da variação de potássio em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo.

Na área de estudo, foram registrados valores de concentração de potássio que possuem um valor mínimo de 2.91 mg/L (local 1) e máximo de 30.386 mg/L (local 10), apresentando uma média de 12.62 mg/L. É importante ressaltar que o potássio não é um parâmetro regulamentado pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e pela OMS (2004), Isso se deve à sua difícil mobilidade e à capacidade de ser reincorporado no solo.



**Figura 29.** Gráfico de concentração de potássio da água em diferentes pontos de amostragem.

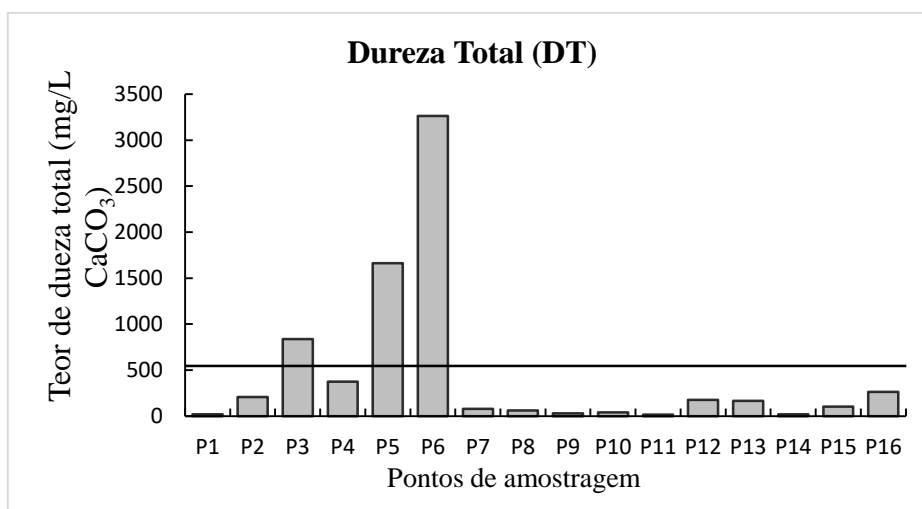
A presença do potássio em águas subterrâneas é geralmente limitada devido à sua elevada atividade em processos de troca iônica, que o mantém em equilíbrio com os minerais do solo. Além disso, o potássio é facilmente retido pelos minerais de argila e é amplamente absorvido pelas plantas, o que contribui para sua redução nas águas subterrâneas (Feitosa *et al.*, 2008).

As concentrações de potássio nas águas subterrâneas geralmente são baixas, normalmente inferiores a 10 mg/L, e é mais comum encontrá-las na faixa de 1 a 5 mg/L. Como observado na Figura 30, cerca de 56,25% dos valores obtidos neste estudo estão dentro desse intervalo e restante estão fora (Feitosa *et al.*, 2008; Cetesb, 2009).

#### e) Dureza total

A Figura 30 ilustra o gráfico da variação de dureza total em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo, e limite máximo aconselhado pelo (MISAU, 2004) e (OMS, 2004) indicado com traço.

Durante a análise das amostras, foram encontrados diferentes valores de dureza da água, variando de 14,58 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  (local 11) a 3261,88 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  (local 6), com uma média de 457,07 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . A maioria dos pontos de amostragens estudadas apresenta concentrações de dureza abaixo de 500 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , o que corresponde a cerca de 81,25% das amostras estão dentro dos limites estabelecidos e cerca de 18,25% das amostras apresentam concentrações de magnésio acima dos padrões de potabilidade de água estabelecidos pelo Diploma Ministerial 180/2004 do (MISAU) e pela (OMS, 2004).



**Figura 30.** Gráfico ilustrativo de concentração de dureza total da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

O estudo realizado por Queiroz & Oliveira (2018) sobre a qualidade da água em comunidades quilombolas do Vão Grande constatou que todas as amostras analisadas estavam dentro dos limites estabelecidos, portanto, neste estudo, cerca de 81.75% dos valores encontrados estão abaixo desse limite máximo permitido, inferior a 500mg/L, indicando água adequada para consumo humano

A informação de Lal *et al.*, (2023) destaca que águas superiores a 500mg/L estão fora limites estabelecidos pela OMS, (2011), portanto, 18.25% da água está fora dos limites estabelecidos pelos regulamentos do Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e pela OMS (2011), indicando que essa água é inadequada para consumo humano. O estudo destaca que a presença de água dura pode levar a problemas de saúde, como distúrbios cardiovasculares, mortalidade pré-natal, urolitíase e alguns tipos de câncer, especialmente quando consumida continuamente por um longo período.

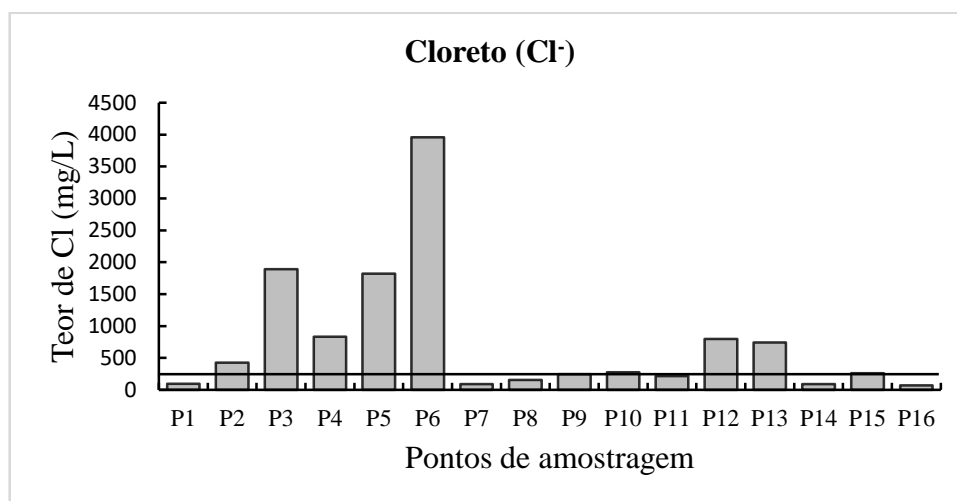
Além disso, de acordo com a classificação de dureza total de Ayers e Westcot (1985), a maioria das amostras de água se enquadram na categoria de água muito dura (37,5%), seguida por água dura (12,5%), água moderadamente dura (18,75%) e água mole (31,25%). A presença abundante de elementos alcalino-terrosos, como  $\text{Ca}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , contribui para a dureza da água, (Hinge *et al.*, 2022).

#### 4.5.4. Aniões

##### a) Cloreto

A Figura 31 ilustra a variação de cloreto em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo, e limite máximo aconselhado pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e (OMS, 2004), indicado com traço.

Com base nos dados coletados na área de estudo, verificou-se que a menor concentração de cloretos encontrada nas amostras foi de 68,2 mg/L (local 16), enquanto a concentração máxima alcançou 3961,43 mg/L (local 6), com uma média de 747,7 mg/L. É importante ressaltar que cerca de 43,75% das amostras, está dentro dos padrões permitidos, não ultrapassando o limite de 250 mg/L de cloretos conforme estabelecido pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e pela OMS (2004). No entanto, 56,25% das amostras apresentam concentrações de cloretos acima desses limites máximos recomendados.



**Figura 31.** Gráfico ilustrativo de concentração de cloreto da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

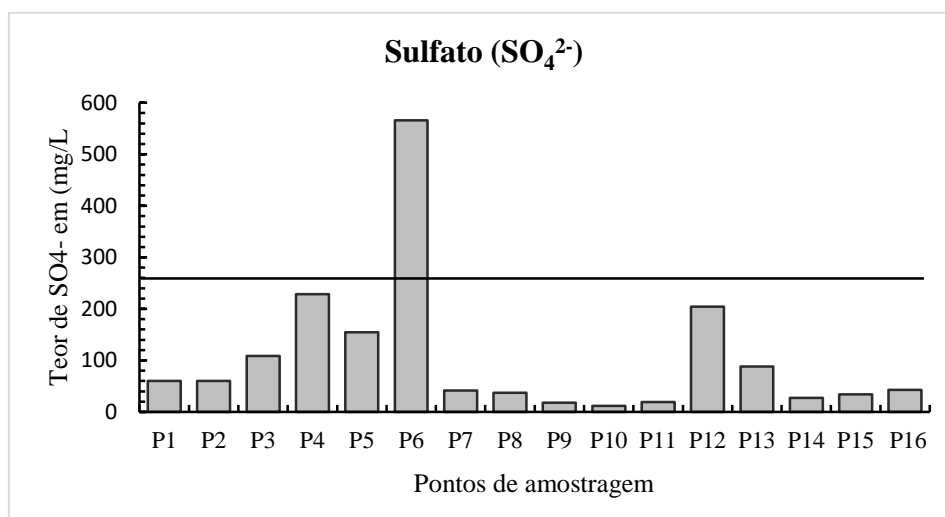
De acordo com Silva Filho *et al.*, (2019) os cloretos na água podem ter origem na dissolução de minerais ou na entrada da água do mar. No entanto, quando são encontrados em concentrações elevadas, pode indicar a presença de fatores não naturais, como esgotos domésticos, irrigação ou industriais, portanto, é provável que a fonte de cloretos nas águas da área estudada seja de irrigação, uma vez, que amostras coletadas em locais com práticas agrícolas mostraram concentrações elevadas de cloretos.

Em altas concentrações, os cloretos conferem um sabor salgado à água e podem ter efeitos laxantes. Além disso, os cloretos aumentam a capacidade de condução elétrica da água e podem influenciar na corrosão de metais nas tubulações, dependendo da alcalinidade da água (Brasil, 2014).

## b) Sulfato

A Figura 32 ilustra a variação de sulfato em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo, e limite máximo aconselhado pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e (OMS, 2004), indicado com traço.

Com base nos dados, verificou-se que o valor mínimo de 11.56 mg/L (local 10), e a concentração máxima alcançou 565.84 mg/L (local 6), com uma média de 106.44 mg/L. Cerca de 93,75% das amostras, estão dentro dos padrões permitidos, não ultrapassando o limite de 250 mg/L de sulfato conforme estabelecido pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e pela OMS (2004). No entanto, 6,25% das amostras apresentam concentrações acima desses limites máximos recomendados.



**Figura 32.** Gráfico ilustrativo de concentração de sulfato da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

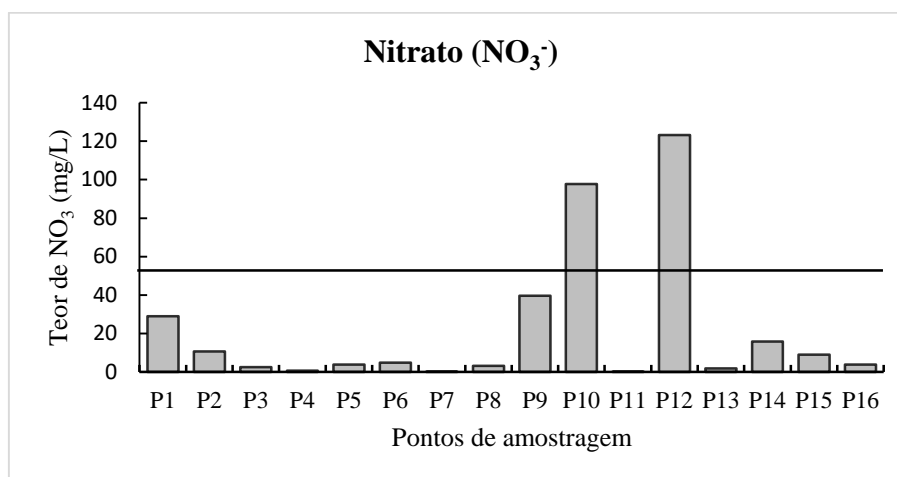
A presença de sulfato nas águas pode ser resultado da oxidação de sulfuretos presentes nas rochas e sedimentos, bem como da lixiviação de minerais como gipsita, pirita e anidrita (Gomes, 2012). Além disso, pode estar associada a zonas de intrusão salina. O aumento da concentração de sulfato no local 6 pode estar relacionado ao uso de fertilizantes agrícolas, uma vez que essa amostra está localizada em uma região agrícola. De acordo com Stipp & Casarin, (2006) o uso de fertilizantes agrícolas pode aumentar os níveis de sulfato no solo, quando esses fertilizantes são aplicados ao solo, eles se decompõem e liberam íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) durante o processo de dissolução.

### c) Nitrato

A Figura 33 ilustra o gráfico da variação de nitrato em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo, e limite máximo aconselhado pelo (MISAU, 2004) e (OMS, 2004) indicado com traço.

Com base nos resultados obtidos, foi observado que a concentração mínima de nitratos nas amostras é de 0.060 mg/L (local 7), e máxima é de 123.23 mg/L (local 12), com uma média de 21.14 mg/L. Dos 16 locais analisados, 87.5% apresentaram concentrações de nitratos dentro dos limites recomendados pelo Diploma Ministerial 180/2004 do MISAU e pelas diretrizes da (OMS,2004), não ultrapassando o limite de 50 mg/L, indicando boa qualidade da água subterrânea nessas áreas. Entretanto, 12.5% das amostras analisadas mostraram concentrações de nitratos acima dos limites estabelecidos, sugerindo uma possível contaminação nos locais específicos.





**Figura 33.** Gráfico ilustrativo de concentração de nitrato da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

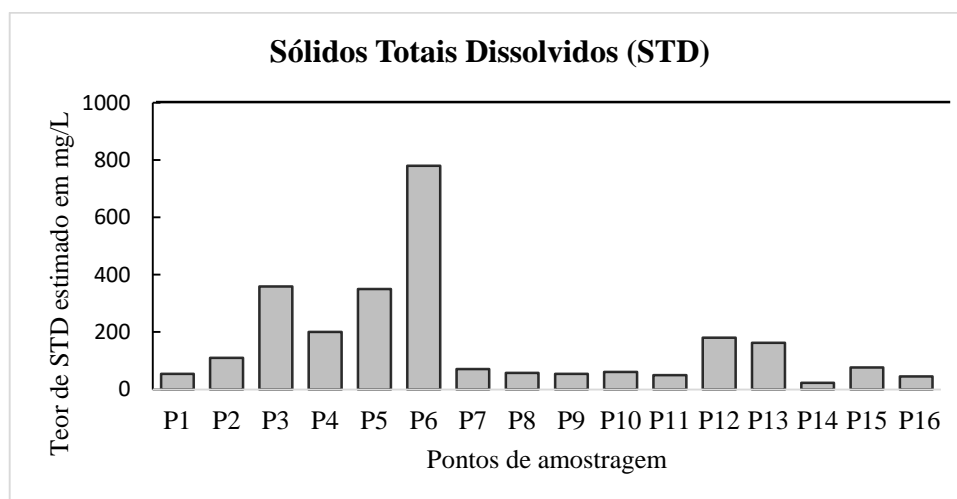
Dos 12.5% das amostras analisadas mostraram concentrações de nitratos acima dos limites estabelecidos, sugerindo uma possível contaminação nos locais específicos, esses resultados são motivo de preocupação, conforme mencionado por Spiro & Stigliani (2009). De acordo com Ganyaglo *et al.*, (2011); Chrispim, (2016), indicam que a maior parte da água com nitrato vem de fontes orgânicas ou de fontes industriais e produtos químicos.

Neste estudo, as amostras foram coletadas em áreas com vegetação arbustiva, o que indica contaminação decorrente de fontes orgânicas e a presença desse elemento pode afetar as características do solo, como permeabilidade e capacidade de retenção de água. Solos mais permeáveis podem permitir a infiltração mais fácil de nitratos na água subterrânea, aumentando o risco de contaminação (Farinha, 2014).

#### **d) Sólidos Totais Dissolvidos**

A Figura 34 ilustra a variação de STD em relação à qualidade da água para consumo humano na área de estudo, e limite máximo aconselhado pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004), indicado com traço.

Os valores de STD obtidos nas análises das amostras indicam valores mínimos 23.4 mg/l, e máximo 780 mg/L, com media de 164.7 mg/L, demonstrando assim, que todos parâmetros estão dentro dos parâmetros estabelecidos (MISAU, 2004) e (OMS, 2004).



**Figura 34.** Gráfico ilustrativo de concentração de sólidos totais dissolvidos da água em diferentes pontos de amostragem e os valores permitidos pelo MISAU, (2004) e OMS, (2004).

De acordo com Chrispim, (2016), a salinização pode ser determinada através da condutividade elétrica (CE), em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , para fins de consumo humano, o local 6 apresentou  $1200 \mu\text{S}/\text{cm}$  sendo assim, considerado como água Salobre, e o remanescente dos locais com 93.75% são classificados como água doce pelo diagrama de Richards. O descarte de esgoto e o escoamento de fertilizantes também são fontes antropogênicas de TDS nas águas subterrâneas (Hinge *et al.*, 2022), indicando assim que o local 6 é contaminado pelo escoamento de fertilizantes através de pratica de agricultura.

A Tabela 8 ilustra a análise estatística descritiva dos resultados físico-químicos em relação às concentrações de iões dissolvidos nas águas subterrâneas, neste caso, observou-se uma grande variação, com a seguinte ordem decrescente nos catiões:  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$  e para os aniões a ordem decrescente foi  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  para os catiões, no conjunto das amostras das águas subterrâneas.

**Tabela 8.** Estatística descritiva dos resultados físico-químicos

Unidades	pH	$\mu\text{S}/\text{cm}$		(mg/L)						
		EC	$\text{Cl}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$
Valor	5.9	36	68.2	1.61	1.79	0.06	66.68	11.6	51.25	2.91
Mín										
Valor	8.17	1200	3961.4	513.9	480.8	123.1	474	565.8	1756.3	30.386
Máx										
Média	7.38	253.4	747.7	87.3	67.87	21.63	188.2	106.4	443.7	12.62

#### 4.6. Classificação da qualidade de água Subterrânea para irrigação agrícola

##### 4.6.1. Avaliação dos parâmetros físico-químicos da água

A Tabela 9, mostra a classificação da água para irrigação na área de estudo. No entanto, as análises realizadas nas amostras indicam que nem todos os parâmetros estão dentro dos limites aceitáveis. Esse facto é comprovado por diversas fontes bibliográficas mencionadas na tabela.

**Tabela 9.** Classificação usada na determinação dos parâmetros físico-químicos da fonte de água subterrânea

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Unid	Limites Aceitáveis	% Amostras	Classificação Utilizada
pH	5.9	8.17	7.38		(6.5 - 8.5)	100%	Almeida, (2010); FAO, (2010)
EC	36	1200	253.4	µS/cm	(100 - 750)	93.75%	Silva, (2011)
Ca <sup>2+</sup>	0.04	6.421	1.78	meq/L	(0-20)	87.5%	Almeida, (2010)
Mg <sup>2+</sup>	0.0735	19.762	2.69	meq/L	(0-5)	81.25%	Ayers & Westcot, (1985); Almeida, 2010
Na <sup>+</sup>	2.237	76.334	19.31	meq/L	(0-10)	50%	Almeida, (2010)
Cl <sup>-</sup>	1.92	111.643	21.10	meq/L	(0-10)	56.25%	Chaves, (2014); FAO, (2010)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.0043	8.8069	1.55	mg/L	(0-10)	62.5%	Almeida, (2010)

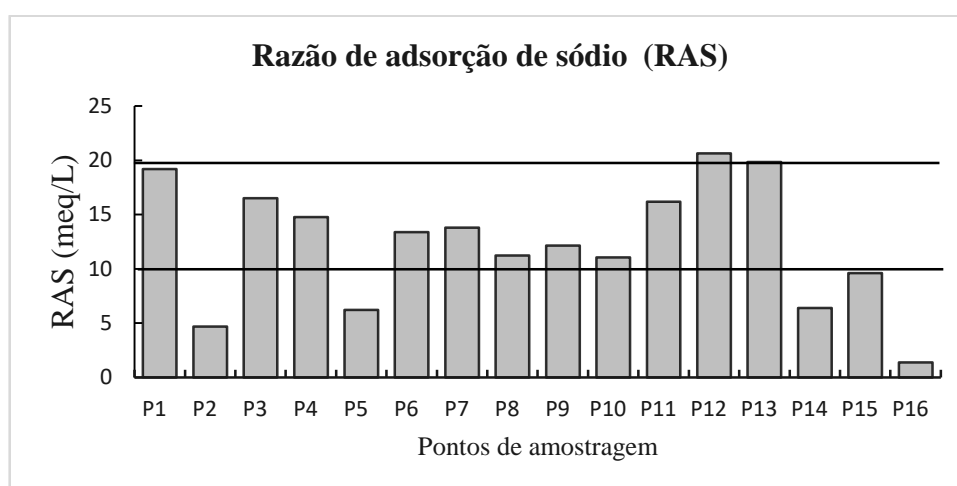
##### 4.6.2. Classes de qualidade da água subterrânea para irrigação

A qualidade da água subterrânea para irrigação agrícola é avaliada com base na Relação de Adsorção de Sódio (RAS). No caso em questão, os valores encontrados variam de 1.37 (local 16) a 20.6 (local 12), com uma média de 12.3. Essas informações são ilustradas na Figura 35.

Segundo Luiz *et al.*, (2017), a classificação do risco de sodificação para as águas é dividida em risco baixo (RAS <10 meq/L), que é adequado para irrigação e apresenta baixo risco de problemas relacionados à sodicidade do solo, risco médio (RAS entre 10 - 18 meq/L), risco alto (RAS entre 18 - 26 meq/L) e risco muito alto (RAS >26 meq/L).

É importante observar que águas com alto teor de sais também podem ser prejudiciais, mesmo quando a relação RAS é baixa (Cordeiro, 2001).

Entretanto, com base nos dados colectados, cerca de 81.25% dos valores encontrados estão dentro dos limites aceitáveis, ou seja, RAS <10 e entre 10-18 meq/L. Os 18.75% restantes dos dados, com RAS >18 meq/L, indicam, segundo Concepción, *et al.*, (2022) que a água não atende aos critérios de qualidade para irrigação e pode representar um risco de sodicidade para o solo, como ilustra a Figura 35.



**Figura 35.** Resultados da classificação da qualidade de água para irrigação usando RAS.

Na Tabela 10 é apresentada a análise estatística descritiva dos resultados da razão de absorção do sódio em relação à concentração de condutividade elétrica disponível nas águas subterrâneas. Neste caso, observou-se que a RAS > CE. Indicando uma concentração alta de sódio em relação aos outros íons presentes na água subterrânea. Alta concentração de sódio na água de irrigação pode levar ao acúmulo de sódio no solo ao longo do tempo, resultando em problemas de salinização e sodificação do solo. Neste caso, afectando negativamente a estrutura do solo, reduzindo a infiltração de água, e prejudicando o crescimento das plantas (Almeida, 2010).

**Tabela 10.** Análise estatística descritiva da razão de absorção do sódio para qualidade de água de irrigação

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	36	1 200	253.4	299
RAS (meq/L)	1.3731	20.6441	12.3144	5.1326

A Tabela A2 presente nos anexos, ilustra a classificação da água para irrigação por meio do método USSSL. Com base nos dados físico-químicos, foi elaborado o diagrama de salinidade (Figura 36) que mostra o risco de sodificação usando o índice RAS, e o risco de salinidade total, estimado pela condutividade elétrica da água medida em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . O diagrama utiliza nove cores distintas para representar diferentes categorias em vários locais. Essas cores incluem azul (local 2), preta (local 3), verde (local 4), vermelho (local 5), amarelo (local 6), violeta (local 7), cinza (local 12), azul claro e verde claro (local 15). Cada cor no gráfico representa uma faixa específica de valores de RAS e CE.

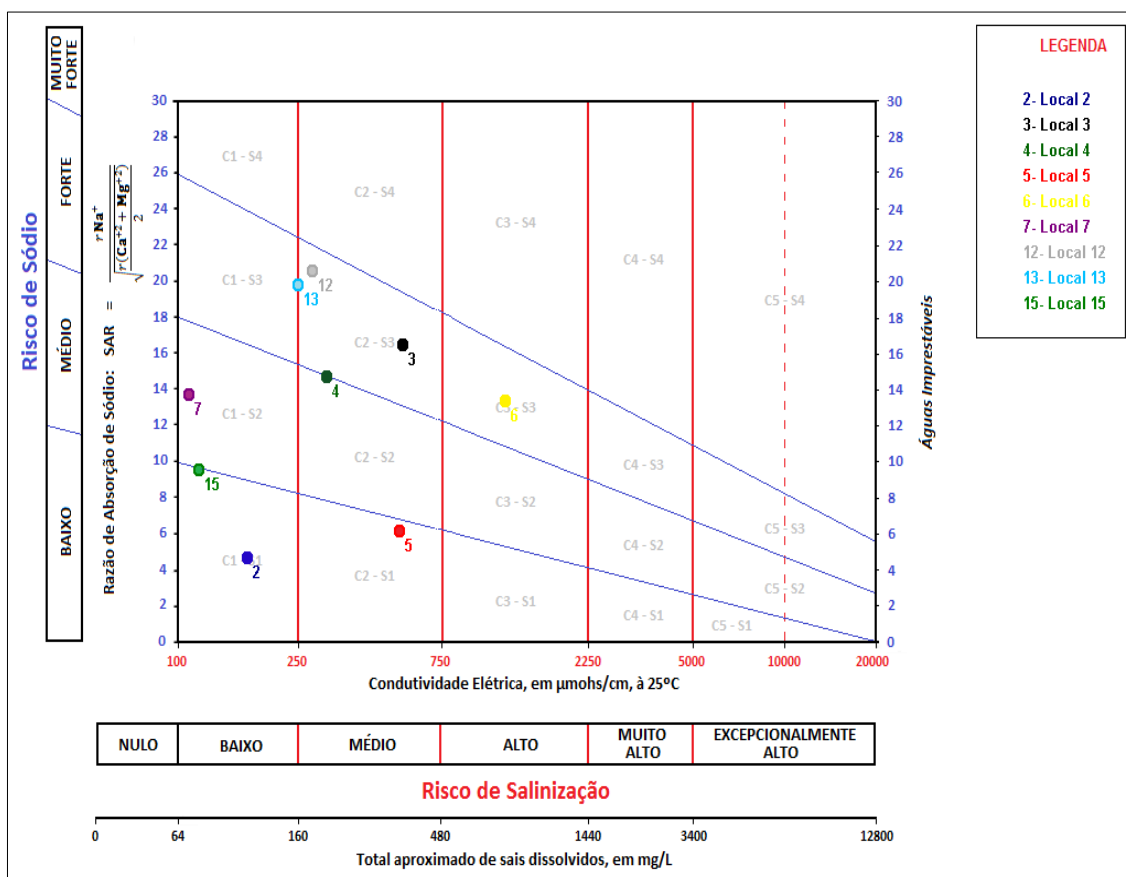


Figura 36. Diagrama para classificação de águas para irrigação segundo USSSL.

Com base nos resultados obtidos, observou-se as seguintes classificações para as 16 amostras,  $(C_0 - S_1)$ ,  $(C_0 - S_2)$ ,  $(C_0 - S_3)$ ,  $(C_1 - S_1)$ ,  $(C_3 - S_3)$ ,  $(C_1 - S_2)$ ,  $(C_2 - S_1)$  e  $(C_2 - S_3)$ . As amostras classificadas como  $C_0-S_1$  (12.5%) apresentam água com salinidade fraquíssima e baixa sodicidade;  $C_0-S_2$  (25%) apresentam água com baixa salinidade e moderada sodicidade;  $C_0-S_3$  (6.25%) apresentam água com salinidade fraquíssima e sodicidade moderada;  $C_1-S_1$  (6.25 %) local 2, apresenta salinidade e sodicidade baixa;  $C_1-S_2$  (12.5 %) local 7 e 15, apresentam salinidade baixa e sodicidade moderada;  $C_1-S_3$

(6.25%) local 13, apresenta salinidade baixa e alta sodicidade; C<sub>2</sub>-S<sub>1</sub> (6.25%) local 5 apresenta salinidade moderada e sodicidade baixa; C<sub>2</sub>-S<sub>3</sub> (18.75%) local 3, 4 e 12, apresentam salinidade moderada e sodicidade alta e por fim, C<sub>3</sub>-S<sub>3</sub> (6.25%) local 6 apresentaram salinidade e sodicidade alta.

As amostras com C<sub>0</sub>-S<sub>1</sub> e C<sub>0</sub>-S<sub>2</sub> que não são ilustrado no diagrama, indicam que são classes que são adequadas para irrigação sem grandes preocupações, e também a classe C<sub>0</sub>-S<sub>3</sub> e C<sub>1</sub>-S<sub>3</sub>, é permitida de acordo com Luiz *et al.*, (2017), essa água pode produzir níveis tóxicos de sódio trocável em muitos solos, no entanto, o uso dessas águas para irrigação requer a utilização de práticas especiais de manejo da água aliadas a um eficiente sistema de drenagem.

Freire *et al.* (2003), estudando o risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas, advertem que é importante ter um controle cuidadoso das águas de irrigação com baixa condutividade elétrica e alta relação de adsorção de sódio. Isso ocorre porque essas condições favorecem a dispersão dos coloides, o que pode levar à impermeabilização do solo.

As amostras classificadas como C<sub>1</sub>-S<sub>1</sub> e C<sub>1</sub>-S<sub>2</sub> são consideradas de melhor qualidade para irrigação. No entanto, a última classificação também é considerada de baixo risco de salinização, mas com um nível médio de sodicidade. Em relação à classificação C<sub>2</sub>-S<sub>1</sub>, que apresenta um risco moderado de salinidade e baixo risco de sodicidade, Barroso *et al.*, (2011) em um estudo sobre a avaliação da qualidade da água para irrigação na região Centro Sul do Estado do Ceará, observaram que o risco associado ao uso dessa água para irrigação é relativamente baixo. No entanto, eles ressaltam a importância de adotar medidas de manejo, como a lixiviação controlada e o monitoramento frequente dos níveis de salinidade no solo e nas plantas.

Por outro lado, amostras classificadas como Classe C<sub>2</sub>-S<sub>3</sub> representam um perigo moderado de salinização e um alto risco de sodicidade para a irrigação. Águas classificadas como S<sub>3</sub>, devido aos altos níveis de sódio, podem levar ao acúmulo de sódio trocável no solo. De acordo com Cauduro & Dorfman (1988), é crucial adotar práticas de manejo e sistemas de drenagem eficientes para mitigar esses efeitos, garantindo uma irrigação adequada e preservando a qualidade do solo, além de estimular um crescimento saudável das culturas.

Segundo Barroso *et al.*, (2011) águas com C<sub>1</sub>S<sub>3</sub>, com baixo risco de salinidade alto risco de sodicidade indica um risco severo de causar problemas de infiltração por sodicidade, a presença excessiva de íons de sódio pode causar problemas na estrutura do solo, prejudicando o crescimento das plantas e comprometendo a eficiência da irrigação.

A amostra de água identificada como Classe C<sub>3</sub>-S<sub>3</sub> é inadequada, apresenta um alto risco de salinização e alcalinidade. Ela foi coletada em uma área próxima a rio Limpopo, caracterizada pelo grupo Aluvio, que consiste em depósitos de areia, silte e cascalho. Essa composição pode ter impacto na concentração de sais minerais na água. Em um estudo realizado por Souza *et al.* (2018), que analisaram os efeitos da água classificada como C<sub>3</sub>S<sub>3</sub> na agricultura, foi constatado que a água com essa classificação, devido à alta salinidade e concentração de sais tóxicos, causa sérios problemas de salinização do solo, resultando em reduções significativas no crescimento e no rendimento das culturas.

## V. CONCLUSÃO

A qualidade das águas subterrâneas e os processos hidrogeoquímicos na área de estudo, especificamente no distrito de Chókwè, são caracterizados por um clima típico das zonas semiáridas. O clima semiárido, caracterizado por uma precipitação escassa e irregular, pode levar a uma maior concentração de sais e minerais dissolvidos nas águas subterrâneas, o que dificulta a prática de agricultura especialmente aos pequenos produtores desta região.

Os resultados das análises físico-químicas realizadas no laboratório do Instituto de Estudos de Águas Subterrâneas da África do Sul não atenderam aos critérios de potabilidade para consumo humano, conforme estabelecido pelo MISAU (2004) e pela OMS (2004). Valores dos parâmetros  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , CE,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{NO}_3^-$  excederam os limites aceitáveis, indicando contaminação das águas subterrâneas nas áreas agrícolas e que a água não é adequada para consumo humano. Parâmetros como pH, CE e STD estão dentro dos padrões estabelecidos. No entanto, a presença de elevadas concentrações de sódio e cloreto em amostras de furos e poços resulta em salinidade e dureza total elevadas, inviabilizando o uso da água subterrânea na área de estudo para consumo humano.

Observa-se que as águas subterrâneas na região estudada são classificadas como cloretada sódicas ( $\text{Na-Cl}^-$ ), águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas ( $\text{Ca/Mg- HCO}_3^-$ ), águas sulfatadas ( $\text{SO}_4$ ) e sódio bicarbonatadas ( $\text{Na-HCO}_3^-$ ), com maior predominância de íons sódio em regiões agrícolas. Isso implica em uma maior presença dos íons Sódio, Cálcio/Magnésio, Cloreto, sulfato e Bicarbonato nessas águas subterrâneas.

Aplicando o esquema de classificação para irrigação proposto pela USSL, as águas subterrâneas são divididas em várias categorias, como  $\text{C}_0\text{-S}_1$ ,  $\text{C}_0\text{-S}_2$ ,  $\text{C}_0\text{-S}_3$ ,  $\text{C}_1\text{-S}_1$ ,  $\text{C}_1\text{-S}_2$ ,  $\text{C}_1\text{-S}_3$ ,  $\text{C}_2\text{-S}_1$ ,  $\text{C}_2\text{-S}_3$  e  $\text{C}_3\text{-S}_3$ . No entanto, cerca de 68,75% das amostras demonstram ser apropriadas para fins de irrigação, enquanto os restantes 31,25% (locais 2, 4, 6, 12 e 13) são considerados inadequados devido ao potencial de causar problemas na estrutura do solo.



## VI. RECOMENDAÇÕES

Após a conclusão desta pesquisa, algumas recomendações são apresentadas:

- ✚ Realizar estudos similares com dados recentes, atualizando as informações sobre a hidrogeoquímica da qualidade da água subterrânea;
- ✚ Expandir a pesquisa incorporando parâmetros microbiológicos, a fim de obter uma compreensão mais abrangente e completa da qualidade da água;
- ✚ Realizar estudos específicos para identificar possíveis fontes de contaminação das águas subterrâneas na área de estudo;
- ✚ Criar um sistema de colecta de dados para obter informações sobre a qualidade e gestão das águas subterrâneas, com o objectivo de realizar uma avaliação abrangente da qualidade e quantidade dessas águas ao longo do tempo e do espaço;
- ✚ Desenvolver alternativas que possam mitigar a contaminação das águas subterrâneas provenientes das atividades agrícolas;
- ✚ Realizar estudo específicos de reconhecimento de possíveis fontes de contaminação das águas subterrâneas na área de estudo;
- ✚ Desenvolver estudos similares em outras regiões com carência de informações no que diz respeito a hidrogeoquímica da qualidade de água potável;
- ✚ Incentivar a pesquisa científica e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o tratamento de águas subterrâneas contaminadas, visando a recuperação e reutilização segura desses recursos hídricos.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Mendonça, J.K., Soares Flores, J., (2017). Desenvolvimento de uma metodologia simples para determinação da dureza da água. *ScientiaTec* 4, 133–142.  
<https://doi.org/10.35819/scientiatec.v4i1.2158>
- Almeida, O.Á., (2010). Qualidade da Água de Irrigação. Embrapa-CNPMPF  
<http://www.cnpmpf.embrapa.br>
- Almeida, K.S.S.A. de, Souza, L. da S., Paz, V.P. da S., Silva, F.T. dos S., Santos, D.N., Pereira, J. da S.L. (2017) - Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em latossolo amarelo distrocoeso, no município de cruz das almas. *Irriga* 22, 259–274.  
<https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p259-274>
- Andrade, E. M., Aquino, D. N., Crisostomo, L. A., Rodrigues, J. O., & Chaves, L. C. G. (2010). Similaridade da composição hidroquímica das águas freáticas do perímetro irrigado do Baixo Acaraú, Ceará, Brasil. Embrapa.  
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes//publicacao/875279/similaridade-da-composicao-hidroquimica-das-aguas-freaticas-do-perimetro-irrigado-do-baixo-acarau-ceara-brasil>
- Assis Júnior, R.N.D., Silva, E.F.D. (2012) - Efeito da qualidade da água de irrigação sobre os atributos físicos de um neossolo flúvico do Município de Quixeré, CE - Brasil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 36, 1778–1786.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600011>
- Assunção, A. L. do C. (2016). Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras na região de Parnamirim, RN, Brasil. Repositório Institucional da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.  
<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/22092>
- Appelo, C.A.J., Postma, D.J. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. CRC Press/Balkema, Amsterdam, NL.  
<http://dx.doi.org/10.1201/9781439833544>
- Ayers RS, Westcot DW (1994) - Qualidade da Água para a Agricultura. Papel de Irrigação e Drenagem da FAO 29, Rev. 1. Roma, Itália.  
<https://www.fao.org/3/T0234E/T0234E00.htm>
- Amer, R., Ripperdan, R., Wang, T. e Encarnación, J. (2012) - Qualidade da água subterrânea e gestão em regiões áridas e semiáridas: Estudo de caso, Deserto

- Central Oriental do Egito. *Journal of African Earth Sciences*, (69):13-25  
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.04.002>
- Bittencourt, A. V. L., Rosa Filho, E. D., Hindi, E. C., & Buchmann Filho, A. C. (2003). A influência dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do rio Piquiri, Paraná-BR. *Águas Subterrâneas*, 17(1).  
<https://doi.org/10.14295/ras.v17i1.1313>
- Barroso, A.D.A.F., Gomes, G.E., Lima, A.E.D.O., Palácio, H.A.D.Q., Lima, C.A.D. (2011). Avaliação da qualidade da água para irrigação na região Centro Sul no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15, 588–593.  
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000600008>
- Batabyal, A.K. (2018). Hydrogeochemistry and quality of groundwater in a part of Damodar Valley, Eastern India: an integrated geochemical and statistical approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32, 2351–2368. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1552-y>
- Bolonini, T.M., Godoy, A.M., Figueiredo, C.A.M., Maurício, A., Pereira, M.F. (2019). Utilização da Progressão Aritmética do coeficiente de correlação de Pearson para previsão da descaracterização superficial de rochas ornamentais. *Geociencias*, 38, 751–763. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.13982>
- Bordignon, S. (2016). Dessalinização da água do mar como alternativa para obtenção de água potável.  
<https://hdl.handle.net/1884/52492>
- Braga, E.S., Freitas, C.B., Mendes, L.S.A.D.S., Aquino, M.D.D., 2017. Avaliação da qualidade de águas subterrâneas localizadas no litoral, serra e sertão do Estado do Ceará destinadas ao consumo humano. *R. Águas Subter.* 32, 17–24.  
<https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28969>
- Braga, L.M.M., Ferrão, A.M. de A. (2015). A gestão dos recursos hídricos na França e no Brasil com foco nas bacias hidrográficas e seus sistemas territoriais. *Labor e Engenho*, 9, 19–33. <https://doi.org/10.20396/lobore.v9i4.8642229>
- Caminha, M.P. (2022). Classificação de qualidade da água para irrigação em microbacia hidrográfica em condições semiáridas. Disponível em:  
<https://repositorio.ufersa.edu.br//handle/prefix/8327>

- Bobsin, C. (2013) - Caracterização Hidrogeológica do município de Osório-RS.  
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/150916/001010169.pdf>
- Brasil. (2014) Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 54 de 15 de junho de 2000. Regulamento Técnico para fixação de identidade e qualidade de água mineral natural e água potável. Disponível em: <[http://www.anvisa.gov.br/anvisa/legis/resol/2000/54\\_00rdc.htm](http://www.anvisa.gov.br/anvisa/legis/resol/2000/54_00rdc.htm)>. Acesso em: 16 julh. 2023.
- Caminha, M.P. (2022). Classificação de qualidade da água para irrigação em microbacia hidrográfica em condições semiáridas. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8327>
- Cao, Y., Tang, C., Song, X., Liu, C., Zhang, Y. (2016). Identifying the hydrochemical characteristics of rivers and groundwater by multivariate statistical analysis in the Sanjiang Plain, China. *Applied Water Science*, 6, 169–178.  
<https://doi.org/10.1007/s13201-014-0215-5>
- Cardoso, J.M. (2019). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira.  
<https://doi.org/10.1590/S1413-415220210240>
- Carvalho, L.L.S. (2017). Influência da sazonalidade climática e da seca prolongada sobre a qualidade das águas subterrâneas do perímetro irrigado do Baixo Acaraú, CE.  
<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/24254>
- Chang, H. K. U., Engels, M., Franke, D., Ladage, S., Pubellier, M. 2014. Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas. (UNESP).  
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.09.002>
- Chripim, Z.M.P. (2016). Análise da Vulnerabilidade e Caracterização Hidrogeoquímica dos Aquíferos Livres Rasos da Parte Emersa da Bacia Sedimentar de Campos.  
<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wpcontent/uploads/sites/3/2016/12>
- Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press.  
<https://books.google.co.mz/books?id=LnN3CAAQBAJ>
- Concepción, R., Javier, S., Hasang-Moran, E. (2022). Salinidade do solo e da água de irrigação na produtividade do arroz no cantão de San Jacinto de Yaguachi, Equador.  
<https://10.21704/rea.v20i1.1691>

- Costa, C.T.F. da, Bezerra, J.E.C.D., Filho, F.J. de P., Firmino, P.R.A., Souza, R.B. de (2020). Análise multivariada aplicada ao estudo hidroquímico das águas subterrâneas na bacia sedimentar do Araripe – CE. *Águas Subterrâneas*, 34. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29874>
- Costa, I.S.D. (2010). A qualidade das águas subterrâneas no campus do Pici – Fortaleza/CE. [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/32379/1/2010\\_tcc\\_iscosta.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/32379/1/2010_tcc_iscosta.pdf)
- Corcóvia, J.A. (2012). Avaliação preliminar da qualidade da água subterrânea no município de Ibiaporã-PR. *Revista de Estudos Ambientais*, 14.
- Cetesb. (2009). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo. São Paulo: CETESB. 44 p.
- Carvalho, L.L.S. (2017). Influência da sazonalidade climática e da seca prolongada sobre a qualidade das águas subterrâneas do perímetro irrigado do Baixo Acaraú, CE. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/24254>
- Souza, M.F. (2015). Qualidade da água do Canal São Gonçalo-RS/Brasil – uma avaliação hidroquímica considerando seus usos múltiplos. <http://repositorio.ufpel.edu.br/handle/ri/2830>
- DNA. (1987). Carta Hidrogeológica de Moçambique, 1ª ed., 1987. República de Moçambique, Ministério de Construção e Águas, Direcção Nacional de Águas, Maputo.
- Farinha, T.C.G. (2014). Análise do impacto da gestão dos recursos hídricos no estado quantitativo e qualitativo das águas subterrâneas na bacia hidrográfica da Ribeira de Quarteira. <http://hdl.handle.net/10400.1/7727>
- Feitosa, F.A.C.; Filho, J.M.; Feitosa, E.C.; e Demetrio, J.G.A. (Coordenadores). (2008). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM - Labhid, 3 Ed, 812p. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14818>
- Ferreira, A.B.M. (2023). Modelagem hidrogeológica de fluxo da água subterrânea na Mina Taboca (Primavera, PA): uma abordagem conceitual e numérica.
- Filho, D.T. (2017). Caracterização hidroquímica e vulnerabilidade das águas subterrâneas da região litorânea do município de Niterói, Estado do Rio de Janeiro.

- Filho, F., José, V. (2018). Qualidade das águas subterrâneas rasas do aquífero Barreiras: estudo de caso em Benevides - PA.  
<https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/19641>
- Franco, R.A.M., Hernandez, F.B.T. (2009). Qualidade da água para irrigação na microbacia do Coqueiro, Estado de São Paulo. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, 13, 772–780.  
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000600016>
- Chang, H.K., Gastmans, D., Hutcheon, I., Menegário, A.A. (2016). Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil). *Journal of Hydrology*, 535, 598–611.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.016>
- Ganyaglo, S.Y., Banoeng-Yakubo, B., Osa, S., Dampare, S.B., Fianko, J.R. (2011). Water quality assessment of groundwater in some rock types in parts of the eastern region of Ghana. *Environ Earth Sci*, 62, 1055–1069.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-010-0594-3>
- Goerl, R.F., Kobiyama, M., Santos, I. (2012). Hidrogeomorfologia: princípios, conceitos, processos e aplicações. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13  
<https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.166>
- Gastmans, D., Wendland, E., Leite, C.M.D.C. (2021). Caracterização hidrogeoquímica de águas subterrâneas utilizadas para abastecimento público na porção nordeste do Sistema Aquífero Guarani. *Eng. Sanit. Ambient.*, 26, 29–43.  
<https://doi.org/10.1590/s1413-415220190087>
- Gómez-del-Campo, M., Pérez-Expósito, M.Á., Hammami, S.B.M., Centeno, A., Rapoport, H.F. (2014). Effect of varied summer deficit irrigation on components of olive fruit growth and development. *Agricultural Water Management*, 137, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.009>
- Hinge, G., Bharali, B., Baruah, A., Sharma, A. (2022). Integrated groundwater quality analysis using Water Quality Index, GIS and multivariate technique: a case study of Guwahati City. *Environ Earth Sci*, 81, 412.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-022-10544-0>

- Hirata, R., Suhogusoff, A., Marcellini, S.S., Villar, P.C., Marcellini, L. (2019). As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. <https://doi.org/10.11606/9788563124074>
- Iqbal, J., Su, C., Rashid, A., Yang, N., Baloch, M.Y.J., Talpur, S.A., Ullah, Z., Rahman, G., Rahman, N.U., Earjh, Sajjad, M.M. (2021). Hydrogeochemical Assessment of Groundwater and Suitability Analysis for Domestic and Agricultural Utility in Southern Punjab, Pakistan. *Water*, 13, 3589. <https://doi.org/10.3390/w13243589>
- Júnior, A.F.A. (2016). Composição Botânica, Disponibilidade e Capacidade de Carga das Pastagens Comunitárias do Distrito de Xai Xai. <http://www.repositorio.uem.mz/handle/258/481>
- Krishna Kumar, S., Bharani, R., Magesh, N.S., Godson, P.S., Chandrasekar, N. (2014). Hydrogeochemistry and groundwater quality appraisal of part of south Chennai coastal aquifers, Tamil Nadu, India using WQI and fuzzy logic method. *Appl Water Sci*, 4, 341–350. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0148-4>
- Lal, B., Sengar, S.S., Singh, R., Jhariya, M.K., Raj, A. (2023). Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment in Ambagarh Chowki, Chhattisgarh, India. *Environ Monit Assess*, 195, 43. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10650-3>
- Langa, M.T. (2015). Avaliação da produtividade e estratégias de manejo na produção de arroz (*Oryza sativa* L.) usando o modelo APSIM: Estudo de caso no regadio de Chokwé. <http://www.repositorio.uem.mz/handle/258/562>
- Leite, C.M.D.C., Wendland, E., Gastmans, D. (2021). Caracterização hidrogeoquímica de águas subterrâneas utilizadas para abastecimento público na porção nordeste do Sistema Aquífero Guarani. *Eng. Sanit. Ambient.*, 26, 29–43. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190087>
- Lima, K.C., Lupinacci, C.M. (2019). Significado de depósitos aluviais holocênicos em ambiente semiárido: estudo de caso na depressão sertaneja da Bahia. *Rev. Bras. Geomorfol.*, 20. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1660>

- Lima AO, Lima-Filho FP, Dias NS, Rego PRA, Blanco FF, Neto MF. (2017). Mechanisms controlling surface water quality in the Cobras river sub-basin, northeastern Brazil. *Rev. Caatinga*, 30(1), 181-189.  
<https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n120rc>
- Luiz, T.B.P., Silva, J.L.S.D., Schröder, T., Descovi Filho, L.L.V. (2017). Mapeamento de risco de sodificação de solos em microbacia hidrográfica no Rio Grande do Sul. *Revista Verde*, 12, 68.  
<https://doi.org/10.18378/rvads.v12i1.4390>
- MAE. (2014). Perfil do distrito do Xai-Xai província de Gaza, Direcção Nacional de Administração Local, Maputo – Moçambique. Acessado em 12/05/2023 em <http://www.portaldogoverno.gov.mz>.
- Macorreia, M.E. (2018). Contribuição da Educação Ambiental no âmbito de desenvolvimento de gestão residual no Instituto Agrário Chókwè, Moçambique. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, 13, 245–262.  
<https://doi.org/10.34024/revbea.2018.v13.1806>
- Machado, J.L.F., Freitas, M.A. (2005). Projeto mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul.
- Mansouri, R.W., Al-Shaibani, A.M., Makkawi, M.H., Tawabini, B.S. (2022). Groundwater quality assessment of northern Harrat Rahat Aquifer, Saudi Arabia. *Hydrogeol J*, 30, 2433–2457.  
<https://doi.org/10.1007/s10040-022-02540-2>
- Matlhombe, A.C. (2015). Balanço Hídrico Climatológico dos Distritos de Boane e Chokwé. Universidade Eduardo Mondlane.  
<http://monografias.uem.mz/handle/123456789/2555>
- Mattos, J.B., Cruz, M.J.M., Paula, F.C.F.D., Sales, E.F. (2019). Mapeamento dos aspectos hidrogeoquímicos de águas subterrâneas a partir de estatística multivariada e redes neurais artificiais. *Eng. Sanit. Ambient.*, 24, 501–514.  
<https://doi.org/10.1590/s1413-41522019178815>
- Menezes, J.P.C., Bertossi, A.P.A., Santos, A.R. dos, Neves, M.A. (2013). Qualidade da água subterrânea para consumo humano e uso agrícola no sul do estado do Espírito Santo. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 3318–3326. <https://doi.org/10.5902/2236117010630>



- Nascimento, D.M. (2020). "A Importância da Qualidade da Água para seu Uso na Irrigação 09." *Tempo Presente*,  
<https://periodicos.ufs.br/tempopresente/issue/view/1042>
- Neto, M.L.Q., Medeiros, M.K.S., Florêncio, F.D.C., Júnior, L.S. (2016). Análise da qualidade da água subterrânea utilizada no abastecimento urbano: um estudo de caso em poços tubulares no município de São Rafael/RN.
- Oliveira, A.M. de, Dias, N. da S., Freitas, J.J.R. de, Martins, D.F.F., Rabelo, L.N. (2017). Avaliação físico-química das águas do processo de dessalinização de poços salobros e salinos em comunidades rurais do oeste potiguar. *Águas Subterrâneas*, 31, 58–73. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i2.28663>
- Paim, R.A., Reginato, P.A.R., Michalski, E.Z., Lanzer, R.M., Dutra, T.D.O. (2018). Análise hidroquímica e da aplicação de diferentes métodos de avaliação da qualidade da água subterrânea em aquíferos costeiros em Osório – RS. *R. Águas Subter.*, 32, 337–345.  
<https://doi.org/10.14295/ras.v32i3.29155>
- Quaggio, C.S., Gastmans, D., Lunardi, M., Santarosa, L.V., Betancur, S.B. (2020). Zoneamento Hidrogeoquímico dos Sistemas Aquíferos do Estado de São Paulo como Ferramenta de Gestão das Águas Subterrâneas. *Anu. Inst. Geoc.*, 43. [https://doi.org/10.11137/2020\\_4\\_176\\_188](https://doi.org/10.11137/2020_4_176_188)
- Queiroz, T.M.D., Oliveira, L.C.P.D. (2018). "Qualidade da água em comunidades quilombolas do Vão Grande, município de Barra do Bugres (MT)." *Eng. Sanit. Ambient.* 23, 173–180.  
<https://doi/10.1590/s1413-41522018166375>
- Rawat, K.S., Singh, S.K., Gautam, S.K. (2018). "Assessment of groundwater quality for irrigation use: a peninsular case study." *Appl Water Sci* 8, 233.  
<https://doi.10.1007/s13201-018-0866-8>
- Ribeiro, M.L., Lourencetti, C., Pereira, S.Y. (2007). "Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar." *Quím. Nova* 30, 688–694.  
<https://doi/10.1590/S0100-40422007000300031>
- Santos, C. de J., Bulhões, E. (2017). "Mapeamento da qualidade da água subterrânea rasa através de índice físico-químico em Campos dos Goytacazes, in: Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento. Instituto de Geociências - Unicamp, pp. 827–833."  
<https://doi/10.20396/sbgfa.v1i2017.2108>

- Saveca, P.S.L., Abi, A., Stigter, T.Y., Lukas, E., Fourie, F. (2022). "Assessing Groundwater Dynamics and Hydrological Processes in the Sand River Deposits of the Limpopo River, Mozambique." *Front.Water* 3, 731642. <https://doi/10.3389/frwa.2021.731642>
- Silva, R.M. da, Mello, I.S., Botezelli, L. (2022). "Utilização de recursos hídricos de fontes públicas no município de Poços de Caldas, sul de Minas Gerais: qualidade da água e implicações para a saúde humana." *Research, Society and Development* 11, e41211629086–e41211629086. <https://doi/10.33448/rsd-v11i6.29086>
- Silva Filho, E.D.D., Da Silva, A.B., Gonzaga, F.D.A.D.S., Menezes, W.M.S., Dantas, G.D.M., Dos Santos, J.S.I., Madureira, I.A. (2019). "Estudo da qualidade físico-química e microbiológica da água de poço tubular situado no sítio alegre no município de Lagoa Seca-PB." *R. Águas Subter.* 33. <https://doi/10.14295/ras.v33i1.29278>
- Silva, F., Lopes, F., Andrade, E., Nogueira, D., Chaves, L.C. (2015). "Dinâmica da qualidade da água para fins de irrigação em reservatório da região semiárida." <https://doi/10.12702/iii.inovagri.2015-a382>
- Soares, A.D., Alegre, P. (2016). "Caracterização hidrogeológica e hidroquímica das águas subterrâneas do município de Osório, RS."
- Sousa, R E (2001). "Noções Sobre Qualidade Da Água, Instituto Superior Técnico de Lisboa departamento de engenharia civil e arquitectura secção de hidráulica e dos recursos hídricos e ambienta."
- Sakram G, Adimalla N (2018). "Caracterização hidrogeoquímica e avaliação da adequação da água para beber e irrigar em rochas cristalinas da região de Mothkur, Estado de Telangana, Sul da Índia." *Appl Água Sci* 8:143.
- Souza, C.A.D., Araujo, Y.R., Neto, J.R.D.A., Palácio, H.A.D.Q., Barros, B.E.A., 2016. Análise Comparativa da Qualidade de Água para Irrigação em Três Sistemas Hídricos Conectados no Semiárido. *RBAI* 10, 1011–1022. <https://doi.org/10.7127/rbai.v10n600481>
- SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. (2009). "Química ambiental. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 334p."
- Santos, J. R. (2008). "Geoquímica das águas do reservatório Poção da Ribeira, Agreste Central de Sergipe." *Scientia Plena* 13. <https://doi/10.14808/sci.plena.2017.109906>

- Spiro, T. G., Stigliani, W. M. (2009). "Chemistry of the environment. Prentice Hall."  
<https://doi/10.5902/2236117014817>
- Troian, G.C., Reginato, P.A.R., Marquezan, R.G., Kirchheim, R. (2020). "Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande do Sul." *R. Águas Subter.* 34, 264–274.  
<https://doi/10.14295/ras.v34i3.29883>
- Uamusse, A.J. (2015). "Estudo da qualidade de água dos poços e furos para fins domésticos no distrito de Chigubo, província de Gaza."  
<http://monografias.uem.mz/bitstream/123456789/571/1/2015%20%20Uamusse%20%20Avelino%20J%C3%BAlio.pdf>
- USSL (1954). "Diagnóstico e melhoramento de solos salinos e alcalinos USDA Agr. Manual nº 60, Washington, DC."
- Vicente, G.Z., Lima, C.G.R., Marques, S.M. (2018). "Variabilidade espacial e temporal do Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru, estado de São Paulo." *Águas Subterrâneas* 32, 295–306.  
<https://doi/10.14295/ras.v32i3.29099>
- Vilanculos, H. (2022). "Avaliação da Qualidade de Água da Barragem do Alto Muda para Consumo Humano no Distrito de Gondola – Província de Manica: Ciências Naturais e do Ambiente." *Revista da UI\_IPSantarém* 10, 11–21.  
<https://doi/10.25746/ruiips.v10.i3.29118>
- WHO (2011) Total dissolved solids in drinking-water. In: WHO (ed) Guidelines for drinking-water quality. Vol 2nd ed. World Health Organization, Geneva  
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241564182>
- WHO (2004) Guidelines for drinking water quality, volume 1 recommendations, 3th edition edn. World Health Organisation, Geneva  
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241564182>
- Wagh, V., Mukate, S., Muley, A., Kadam, A., Panaskar, D., & Varade, A. (2020). Study of groundwater contamination and drinking suitability in basaltic terrain of Maharashtra, India through PIG and multivariate statistical techniques. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*.  
<https://10.2166/aqua.2020.108>.
- Wilson, T.L., 2009. Gestão da Água de Rega e sua Implicação na Salinização de Solos no Regadio de Chókwè.  
<https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/21381/21381.pdf?sequence=1>

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1: (Pontos de Colecta e localizações; distribuição das classes)

Tabela A1. Pontos de colecta e suas respectivas localizações

Local	Coordenadas geográficas	
	latitude	longitude
Local 1	-24.670970	33.089260
Local 2	-24.624200	33.112790
Local 3	-24.599430	32.949550
Local 4	-24.602130	32.793990
Local 5	-24.387110	32.784120
Local 6	-24.321680	32.763110
Local 7	-24.428120	32.847200
Local 8	-24.587910	33.064370
Local 9	-24.810680	33.131710
Local 10	-24.809400	33.133600
Local 11	-24.811370	33.132280
Local 12	-24.786630	33.135480
Local 13	-24.683990	33.022710
Local 14	-24.786330	33.136560
Local 15	-24.592790	33.032670
Local 16	-24.426270	32.877190

---

**Tabela A 2.** Localização e distribuição das classes de USSL.

<b>Local</b>	<b>Na (meq/L)</b>	<b>Ca (meq/L)</b>	<b>Mg (meq/L)</b>	<b>EC (<math>\mu</math>S/m)</b>	<b>RAS</b>	<b>Classificação</b>
<b>Local 1</b>	8.786	0.199	0.220	83.8	19.1967	C0 - S3
<b>Local 2</b>	13.659	28.480	2.723	170	4.6823	C1 - S1
<b>Local 3</b>	47.830	6.467	20.566	553	16.5186	C2 - S3
<b>Local 4</b>	28.597	2.880	4.599	309	14.7624	C2 - S3
<b>Local 5</b>	25.343	12.906	20.268	538	6.2152	C2 - S1
<b>Local 6</b>	76.383	51.220	39.636	1200	13.3777	C3 - S3
<b>Local 7</b>	12.170	0.613	0.945	109	13.7817	C1 - S2
<b>Local 8</b>	8.725	0.487	0.713	87.8	11.2384	C0 - S2
<b>Local 9</b>	6.737	0.107	0.509	83.6	12.1312	C0 - S2
<b>Local 10</b>	6.994	0.084	0.716	93	11.0502	C0 - S2
<b>Local 11</b>	6.185	0.080	0.211	76.1	16.1954	C0 - S2
<b>Local 12</b>	27.364	1.025	2.489	278	20.6441	C2 - S3
<b>Local 13</b>	25.487	1.204	2.090	250	19.8512	C1 - S3
<b>Local 14</b>	2.708	0.208	0.147	36	6.4085	C0 - S1
<b>Local 15</b>	9.683	0.764	1.261	118	9.6039	C1 - S2
<b>Local 16</b>	2.234	2.744	2.56	68.82	1.3731	C0 - S1

## IX. APÊNDICE

### APÊNDICE I: Parâmetros químicos de qualidade de água.

Parâmetro	Limite máximo admissível	Unidades
Amoníaco	1,5	mg/l
Arsénico	0,01	mg/l
Antimónio	0,005	mg/l
Bário	0,7	mg/l
Boro	0,3	mg/l
Cádmio	0,003	mg/l
Cálcio	50	mg/l
Chumbo	0,01	mg/l
Cianeto	0,07	mg/l
Cloretos	250	mg/l
Cobre	1,0	mg/l
Crómio	0,05	mg/l
Dureza total	500	mg/l
Fósforo	0,1	mg/l
Ferro total	0,3	mg/l
Fluoreto	1,5	mg/l
Matéria orgânica	2,5	mg/l
Magnésio	50	mg/l
Manganés	0,1	mg/l
Mercúrio	0,001	mg/l
Molibdénio	0,07	mg/l
Nitrito	3,0	mg/l
Nitrato	50	mg/l
Níquel	0,02	mg/l
Sódio	200	mg/l
Sulfato	250	mg/l
Selénio	0,01	mg/l
Sólidos totais	1000	mg/l
Zinco	3,0	mg/l
Pesticidas totais	0,0005	mg/l

Figuras Ap. 1: Diploma Ministerial n.º 180/2004 de 15 de Setembro.