



**FACULDADE DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**Projecto Científico**

**Licenciatura em Geologia Aplicada**

**Contribuição hidrogeológica para a protecção das zonas de recarga  
do aquífero que abastece a Cidade de Xai-Xai**

**Autora:**

- Maria Natércia Catarino Portugal



**FACULDADE DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**Projecto Científico**

**Licenciatura em Geologia Aplicada**

**Contribuição hidrogeológica para a protecção das zonas de Recarga  
do aquífero que abastece a Cidade de Xai-Xai**

**Autora:**

Maria Natércia Catarino Portugal

**Supervisores:**

Prof. Doutor Farisse João Chirindja (UEM)

dr. Osvaldo Matessane (Mestrando na FAPF-UEM)

---

Departamento de Geologia – Faculdade de Ciências

Universidade Eduardo Mondlane

Caixa postal, 257. Maputo – Moçambique

**Maputo, Junho de 2026**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pelo dom da vida, por me guiar e iluminar durante a minha peregrinação na terra.

Agradeço a toda minha família e de forma especial aos meus pais, por acreditarem sempre em mim e estarem sempre presentes na minha vida, em momentos de alegria, bem como nos de tristeza. Agradeço-lhes imensamente por não terem poupado esforços e recursos para a minha educação, principalmente em termos académicos, pelos quais nunca serei capaz de lhes retribuir, só Deus pai para tal. Agradeço as minhas irmãs Maida e Vaugna pelo apoio e confiança que sempre depositaram em mim.

Este trabalho só foi possível graças ao acompanhamento sábio e incansável do Professor Doutor Farisse João Chirindja, agradeço pelos ensinamentos com base em suas experiências, pela paciência e simpatia que sempre demonstrou comigo. Agradeço igualmente ao dr.Osvaldo Matessane pela sua mentoria, disponibilidade durante todo este percurso.

Agradeço aos meus amigos “geofriends” em especial a Jenifa, Flávia e Cristovão, agradeço de igual modo ao Nélío e ao Yussufo, que estiveram comigo durante os anos de caminhada e muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como profissional.

A todos outros que de forma directa ou indirecta acompanharam-me o meu,

*Khanímambo, Obrigada, Thank you!*

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu, Maria Natércia Catarino Portugal, declaro por minha honra que o presente trabalho é da minha autoria e que nunca foi apresentado ou submetido a uma outra instituição académica nacional ou estrangeira para a obtenção do título de Licenciada em Geologia Aplicada, e constitui o resultado do trabalho investigação, sendo que todas as bibliografias consultadas estão devidamente citadas e referenciadas.

**Maputo, Junho de 2026**

---

(Maria Natércia Catarino Portugal)

## Resumo

As águas subterrâneas representam uma das principais reservas de água doce do planeta e desempenham um papel fundamental no abastecimento humano. Em Moçambique, a gestão sustentável dos recursos hídricos é actualmente uma das maiores prioridades das autoridades que gerem este precioso líquido. Estima-se que maior da população moçambicana é abastecida através de águas subterrâneas, por essa razão torna-se vital destacar-se o aquífero que abastece a cidade de Xai-Xai, o qual cobre uma área extensa com cerca de 1355 km<sup>2</sup>, onde predomina o clima tropical húmido a seco, com relevo suave a acentuado e com predominância de solos arenosos. O objectivo do presente projecto é de contribuir, hidrogeologicamente, na protecção do aquífero que abastece a cidade de Xai-Xai. Para o efeito, o projecto usou as zonas de recarga, valores de condutividade eléctrica e zonas de protecção para criar mapas indicação de locais com grau de sensibilidade diferentes e com abordagem de gestão e protecção diferenciado.

Dos resultados obtidos foi possível distinguir 4 zonas de recarga principais, as zonas de alta e muito alta recarga, as zonas moderada e baixa recarga. Ao analisar de forma simultânea as zonas de recarga e a distribuição furos, identificou-se que as zonas de alta e muito alta recarga encontram-se localizadas em áreas com protecção sanitária crítica, necessitam de mais atenção devido a exposição excessiva daqueles furos aos agentes poluentes. A análise espacial dos valores de condutividade eléctrica resultou em mapa dividido em 4 classes, nomeadamente, água de boa qualidade com baixa salinidade e adequada para o consumo humano, ou seja, inferior a 414  $\mu S/cm$ , água de uma qualidade moderada pouco mineralizada, porém ainda aceitável para o consumo (no intervalo de 415 a 1410  $\mu S/cm$ ), água de má qualidade mas útil para a irrigação e água de muito má qualidade, que não é adequada tanto para o consumo, bem como para a irrigação (a cima de 1420  $\mu S/cm$ ). A área de estudo é constituída maioritariamente por água de qualidade moderada pouco mineralizada, onde a interacção água-rocha é reduzida e consequentemente há menor dissolução de sais no aquífero. A partir de todos resultados obtidos foi possível identificar as áreas dos bairros Patrice Lumumba, bairro 6 e 9 de Chongoene, Siaia bairro 2 e bairro Fidel Castro que precisam de protecção.

**Palavras-chave:** *Aquífero, recarga, zonas de protecção, águas subterrâneas, condutividade eléctrica, lei, modelo hidrogeológico conceptual, AHP.*

## Lista de Figuras

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Ciclo da hidrológico. (Fonte: EPAL-Empresa Portuguesa das Águas livres. Lisboa) .....       | 4  |
| <b>Figura 2:</b> Classificação dos aquíferos (Fonte: Miguel, 2024). .....                                    | 5  |
| <b>Figura 3:</b> Esquema ilustrativo das zonas de descarga e recarga do aquífero. ....                       | 7  |
| <b>Figura 4:</b> Mapa de localização da área de estudo. ....                                                 | 14 |
| <b>Figura 5:</b> Enquadramento topográfico da área de estudo. ....                                           | 15 |
| <b>Figura 6:</b> Enquadramento geológico da área de estudo. ....                                             | 16 |
| <b>Figura 7:</b> Enquadramento pedológico da área de estudo. ....                                            | 17 |
| <b>Figura 8:</b> Enquadramento hidrogeológico da área de estudo represenando a delimitação do aquífero. .... | 18 |
| <b>Figura 9:</b> Mapa de precipitação da área de estudo. ....                                                | 21 |
| <b>Figura 10:</b> Mapa de uso e cobertura do solo. ....                                                      | 23 |
| <b>Figura 11:</b> Mapa de declividade .....                                                                  | 24 |
| <b>Figura 12:</b> Mapa de densidade de drenagem. ....                                                        | 25 |
| <b>Figura 13:</b> Mapa potencial de recarga das águas subterrâneas. ....                                     | 29 |
| <b>Figura 14:</b> Mapa da variação espacial da condutividade eléctrica na área de estudo. ....               | 30 |
| <b>Figura 15:</b> Modelo hidrogeológico conceptual simplificado da área de estudo. ....                      | 31 |
| <b>Figura 16:</b> Mapa ilustrativo da protecção dos furos. ....                                              | 32 |

## Lista de tabelas

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1:</b> Escala de Saaty (Adaptado de Saaty 1980). ....                               | 10 |
| <b>Tabela 2:</b> Quadro resumo das leis em vigor em Moçambique( Adaptado de Nunes 2024). .... | 12 |
| <b>Tabela 3:</b> : Área ocupada pelo aquífero. ....                                           | 14 |
| <b>Tabela 4:</b> Materiais usados para o desenvolvimento do estudo. ....                      | 19 |
| <b>Tabela 5:</b> Tabela de comparação pareada. ....                                           | 26 |
| <b>Tabela 6:</b> Tabela de pesos normalizados .....                                           | 27 |
| <b>Tabela 7:</b> Valores de índice aleatório(Fonte: Saaty, 1980) .....                        | 27 |

## Índice

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                                          | i   |
| <b>DECLARAÇÃO DE HONRA</b> .....                                     | ii  |
| <b>Resumo</b> .....                                                  | iii |
| <b>Lista de Figuras</b> .....                                        | iv  |
| <b>Lista de tabelas</b> .....                                        | iv  |
| <b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b> .....                               | 1   |
| Introdução .....                                                     | 1   |
| Objectivos .....                                                     | 2   |
| 1.1.1. Objectivo geral .....                                         | 2   |
| 1.1.2. Objectivos específicos .....                                  | 2   |
| Apresentação do Problema e relevância do projecto .....              | 2   |
| <b>CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                      | 3   |
| 2.1. Ciclo Hidrológico .....                                         | 3   |
| 2.2. Águas Subterrâneas.....                                         | 4   |
| 2.3. Sistema de Aquífero.....                                        | 4   |
| 2.3.1. Tipos de aquíferos .....                                      | 5   |
| 2.4. Recarga e descarga dos aquíferos .....                          | 6   |
| 2.4.1. Recarga .....                                                 | 6   |
| 2.4.2. Descarga .....                                                | 6   |
| 2.5. Factores que influenciam a recarga dos aquíferos .....          | 7   |
| 2.5.1. Precipitação .....                                            | 7   |
| 2.5.2. Uso e cobertura do solo .....                                 | 7   |
| 2.5.3. Declividade do terreno.....                                   | 8   |
| 2.5.4. Geologia .....                                                | 8   |
| 2.5.5. Solos .....                                                   | 8   |
| 2.5.6. Densidade de Lineamentos.....                                 | 8   |
| 2.5.7. Densidade de drenagem.....                                    | 8   |
| 2.6. Métodos de identificação e mapeamento das Zonas de Recarga..... | 9   |

|                                                                     |                                                            |           |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.1.                                                              | Métodos directos .....                                     | 9         |
| 2.6.2.                                                              | Métodos indirectos .....                                   | 9         |
| 2.7.                                                                | Hidroquímica e Qualidade da água.....                      | 10        |
| 2.7.1.                                                              | Hidroquímica .....                                         | 10        |
| 2.7.2.                                                              | Qualidade da água .....                                    | 11        |
| 2.8.                                                                | Modelo Hidrogeológico Conceptual.....                      | 11        |
| 2.9.                                                                | Legislação e zonas de protecção de furos .....             | 12        |
| <b>CAPÍTULO III: ÁREA DE ESTUDO .....</b>                           |                                                            | <b>14</b> |
| 3.1.                                                                | Enquadramento geográfico .....                             | 14        |
| 3.2.                                                                | Clima e hidrografia .....                                  | 15        |
| 3.3.                                                                | Enquadramento Topográfico .....                            | 15        |
| 3.4.                                                                | Enquadramento geológico .....                              | 16        |
| 3.5.                                                                | Enquadramento Pedológico .....                             | 16        |
| 3.6.                                                                | Enquadramento Hidrogeológico .....                         | 17        |
| <b>CAPÍTULO IV: METODOLOGIA.....</b>                                |                                                            | <b>19</b> |
| 4.1.                                                                | Materiais .....                                            | 19        |
| 4.2.                                                                | Métodos .....                                              | 20        |
| 4.2.1.                                                              | Delimitação do aquífero .....                              | 20        |
| 4.2.2.                                                              | Delimitação das potenciais zonas de recarga .....          | 20        |
| 4.2.3.                                                              | Análise da variação espacial condutividade eléctrica ..... | 28        |
| 4.2.4.                                                              | Desenvolvimento do modelo hidrogeológico .....             | 28        |
| 4.2.5.                                                              | Protecção dos furos de captação.....                       | 28        |
| <b>CAPÍTULO V: APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b> |                                                            | <b>29</b> |
| 5.1.                                                                | Delimitação das zonas potenciais de recarga.....           | 29        |
| 5.2.                                                                | Variação espacial da condutividade eléctrica .....         | 30        |
| 5.3.                                                                | Modelo hidrogeológico conceptual .....                     | 30        |
| 5.4.                                                                | Protecção dos furos de captação .....                      | 31        |
| <b>CAPÍTULO VI- DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>                  |                                                            | <b>33</b> |



|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b> | <b>35</b> |
| 7.1. CONCLUSÕES .....                                  | 35        |
| 7.2. RECOMENDAÇÕES.....                                | 36        |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                              | <b>37</b> |

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES

## Introdução

As águas subterrâneas constituem um dos principais recursos hídricos para o abastecimento humano, agrícola e industrial em regiões onde há limitações de disponibilidade hídrica superficial, estima-se que cerca de dois bilhões de pessoas no mundo dependem directamente dos aquíferos para o consumo e para o desenvolvimento socioeconómico (Kemper, 2004). As águas subterrâneas representam cerca de 94% de toda a água doce líquida da terra e são consideradas a verdadeira riqueza oculta do planeta (Koudouri & Groom, 2010).

Em Moçambique, a gestão sustentável dos recursos hídricos é actualmente uma das maiores prioridades das autoridades que gerem este precioso líquido. Destes recursos, estima-se que cerca de 67% da população moçambicana é abastecida através de águas subterrâneas (DNGRH, 2025), principalmente em zonas geograficamente desprovidas de rios e zonas com características rurais, onde sistemas centralizados de abastecimento de água não são viáveis (OMS, 2017; PDUL, 2020). Assim, os recursos hídricos subterrâneos, em particular no contexto de Moçambique, representam uma alternativa estratégica para suprir a crescente demanda populacional (Nunes, *et al.*, 2024).

A gestão e preservação dos recursos hídricos depende principalmente das zonas de recarga, pois são zonas com grande influência na manutenção da qualidade e quantidade de água que chega aos aquíferos. São várias as características que influenciam a recarga das águas subterrâneas dentre eles destacam-se a litologia, a declividade, a drenagem, os lineamentos, o tipo e uso do solo (Kaewdum & Chotpantararat, 2021), assim sendo compreender estes factores é essencial para avaliar a vulnerabilidade e estabelecer medidas de protecção que assegurem a sustentabilidade dos recursos subterrâneos.

A área de estudo compreende o aquífero que abastece a Cidade de Xai-Xai e foi escolhida por depender maioritariamente das águas subterrâneas para o abastecimento público através dos furos de captação e por localizar-se em uma área onde predominam formações arenosas que favorecem a infiltração da água e consequente recarga do aquífero. O aumento da população, crescimento urbano desordenado criam uma pressão crescente sobre os recursos hídricos disponíveis reforçando a necessidade de delimitação e protecção das zonas de recarga, diante desse contexto, o estudo do aquífero que abastece a cidade de Xai-Xai concentra-se em usar uma abordagem, resultante da combinação de análises hidrogeológicas, geoespaciais e hidroquímicas, para compreender o funcionamento do aquífero e poder por fim prever o seu comportamento, criar medidas para controlar e mitigar as varias alterações causadas principalmente pelo desenvolvimento humano.

Apesar da abordagem usada neste estudo, várias limitações como a disponibilidade de dados (hidrogeológicos, geoespaciais e hidroquímicos), a resolução espacial e temporal dos dados geoespaciais foram encontradas, porém, não constituiu barreira para o alcance dos resultados esperados.

## **Objectivos**

### **1.1.1. Objectivo geral**

- Contribuir hidrogeologicamente para protecção das zonas de recarga do aquífero que abastece a cidade de Xai-Xai.

### **1.1.2. Objectivos específicos**

- Delimitar as potenciais zonas de recarga;
- Determinar a variação espacial da condutividade eléctrica na área do estudo;
- Elaborar um modelo conceptual do sistema de aquífero que abastece a cidade de Xai-Xai.

## **Apresentação do Problema e relevância do projecto**

Nas zonas de recarga dos aquíferos a contaminação dos solos e da água subterrânea decorre principalmente pela falta do saneamento do meio, crescimento desordenado dos aglomerados urbanos e da produção agrícola e industrial que não estão sujeitos a um controlo ambiental mais efectivo. Daí, surge a necessidade de protecção, para evitar que as zonas de recarga sejam comprometidas e comprometendo consequentemente a qualidade dos aquíferos (qualidade da água), principalmente dos aquíferos abertos.

Este trabalho será de extrema relevância em várias vertentes como:

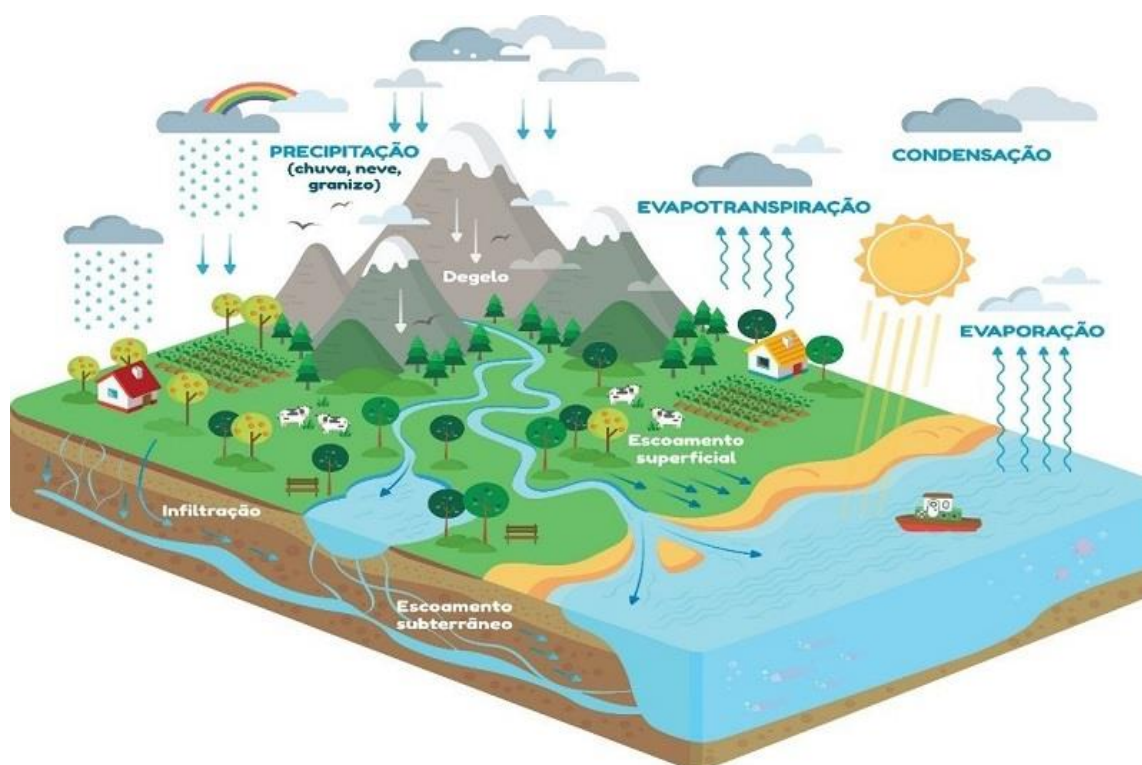
- Do ponto de vista Social, vai promover acesso sustentável à água, através da identificação e protecção das zonas recarga;
- Do ponto de vista ambiental, vai contribuir para a manutenção da dinâmica dos aquíferos no âmbito do ciclo hidrológico, preservação do ecossistema existente na área de estudo e para uma melhor gestão dos recursos hídricos;
- Do ponto de vista científico, vai contribuir através do conhecimento da hidrogeologia local na protecção das águas subterrâneas que são usados no abastecimento da cidade de Xai-Xai.

## CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Ciclo Hidrológico

É o movimento contínuo da água que ocorre na superfície do planeta, bem como do seu interior e exterior, ele é governado no solo e no subsolo pela acção de gravidade, pelo tipo e densidade da cobertura vegetal, e na atmosfera e superfícies líquidas pelos elementos e factores climáticos, como a temperatura do ar, o vento, e a humidade relativa do ar, em suma os factores que regulam as etapas do ciclo são a força gravitacional e a energia solar (Feitosa, *et al.*, 2008) e (Carvalho, 2013).

Segundo (Heath, 1983) quase toda a água subterrânea existente na terra, tem origem no ciclo hidrológico, sendo um ciclo ele não possui começo ou fim, por essa razão ele pode ser descrito a partir de qualquer um dos seus componentes, iniciando pelos oceanos, onde a água evapora devido a energia solar e segue para a atmosfera em forma de vapor, perdendo os sais marinhos. Na atmosfera, o vapor de água se condensa, em determinadas condições o que favorece a precipitação em forma de chuva ou neve, que pode ocorrer no continente ou no oceano. Quando a água se precipita no continente, ela pode ser interceptada pela vegetação, atingir os corpos de água superficiais (rios, lagos, etc.) ou cair directamente sobre o solo. Quando atinge a vegetação ela pode evaporar e retornar para atmosfera (Carvalho, 2013). Quando atinge o solo e dependendo da humidade do solo, a água pode assim infiltrar e percolar o perfil do solo em um movimento vertical, podendo ser captada pelas raízes das plantas onde pode retornar a atmosfera pela transpiração ou então até a zona saturada. Quando a água não infiltra e o relevo é favorável, ela pode correr livremente pela acção de gravidade pelo solo, caracterizando o escoamento superficial (figura 1). Caso ela não infiltre ou não escoe, a água vai novamente evaporar, sendo assim, a água que escoar ou infiltra em determinado momento vai atingir novamente os oceanos, fechando assim o ciclo (Miguel, 2024).



**Figura 1:** Ciclo da hidrológico. (Fonte: EPAL-Empresa Portuguesa das Águas livres. Lisboa)

## 2.2. Águas Subterrâneas

Águas subterrâneas definem-se como sendo aquelas que ocorrem a baixo nível freático, presente nas formações geológicas aflorantes, parcialmente fracturadas e nas formações geológicas profundas totalmente saturadas (Feitosa, *et al.*, 2008). Elas representam uma das principais reservas de água doce do planeta e desempenham um papel fundamental no abastecimento humano (Freeze & Cherry, 1979), fazem parte do ciclo hidrológico, e são resultado do processo de infiltração da precipitação no solo.

## 2.3. Sistema de Aquífero

Vários autores apresentam diferentes conceitos de um aquífero, como:

Para Cleary (2007), um aquífero é uma formação geológica com suficiente permeabilidade e porosidade interconectadas para armazenar e transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos naturais.

Para Feitosa *et al.* (2008), um aquífero é uma formação geológica que contem água e permite que quantidades significativas dessa água se movimente no seu interior em condições naturais.

Para ANA (2016), um aquífero é uma formação geológica com capacidade de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos.

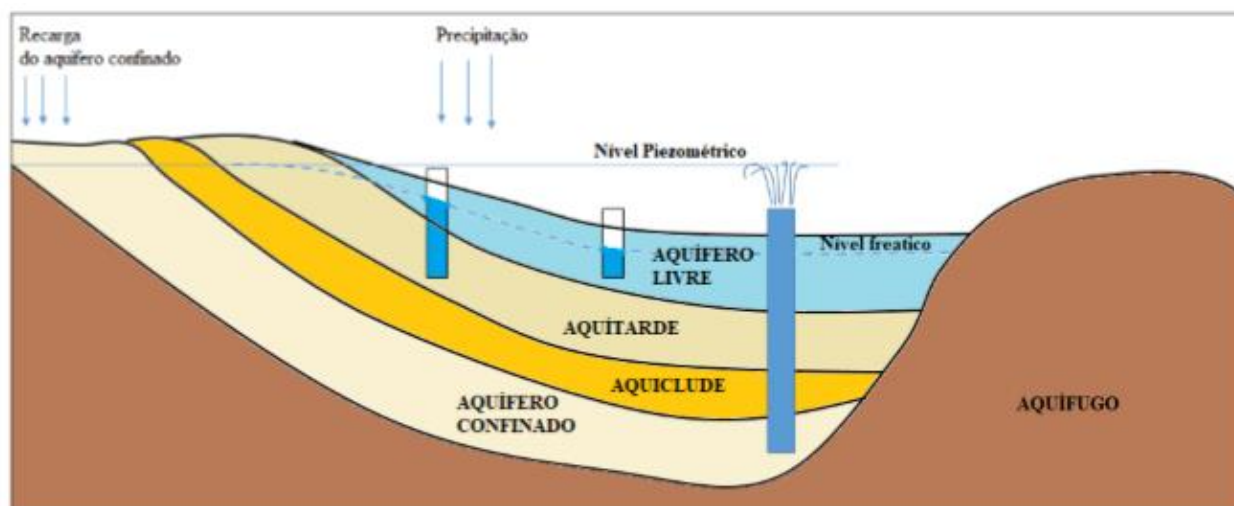
Para Borghetti (2011), define-se aquífero como sendo uma reserva permanente e uma reserva reguladora de água que é abastecida através da infiltração da chuva e de outras fontes subterrâneas, ou seja, o volume de água renovável que entra anualmente no aquífero.

Para este estudo define-se aquífero como sendo um sistema dinâmico composto por formações porosas e permeáveis, onde é principalmente regido pelo equilíbrio entre a quantidade de água que entra (recarga) e pela quantidade de água que sai (descarga).

### 2.3.1. Tipos de aquíferos

A classificação mais comum nos aquíferos é quanto ao confinamento, podendo ser confinados e não confinados, dependendo da presença ou ausência do lençol freático (Cleary, 2007).

**Aquífero confinado** são formações geológicas permeáveis que são contornadas abaixo e acima por materiais pouco permeáveis(drenante) ou impermeáveis(não drenante), nos quais a pressão da água no topo é maior que a pressão atmosférica (Cleary, 2007). **Aquífero não confinado** são também chamados de freáticos ou livres, são aqueles cujo limite superior é uma superfície freática, onde todos os pontos de encontram à pressão atmosférica e é inferiormente limitado por uma rocha permeável ou semipermeável (Feitosa, *et al.*, 2008) (Carvalho, 2013). **Aquífero semi-confinado**, são aqueles localizados em zonas do aquífero confinadas e não confinadas. (Feitosa, *et al.*, 2008). **Aquífero suspenso** são geralmente um caso especial de aquífero livre, que se encontram na zona aerada do solo e eles são sustentados por uma camada impermeável ou semipermeável de extensão horizontal limitada, que impede que a água atinja a zona saturada do solo. (Cleary, 2007) (Carvalho, 2013).



**Figura 2:** Classificação dos aquíferos (Fonte: Miguel, 2024).

## **2.4. Recarga e descarga dos aquíferos**

### **2.4.1. Recarga**

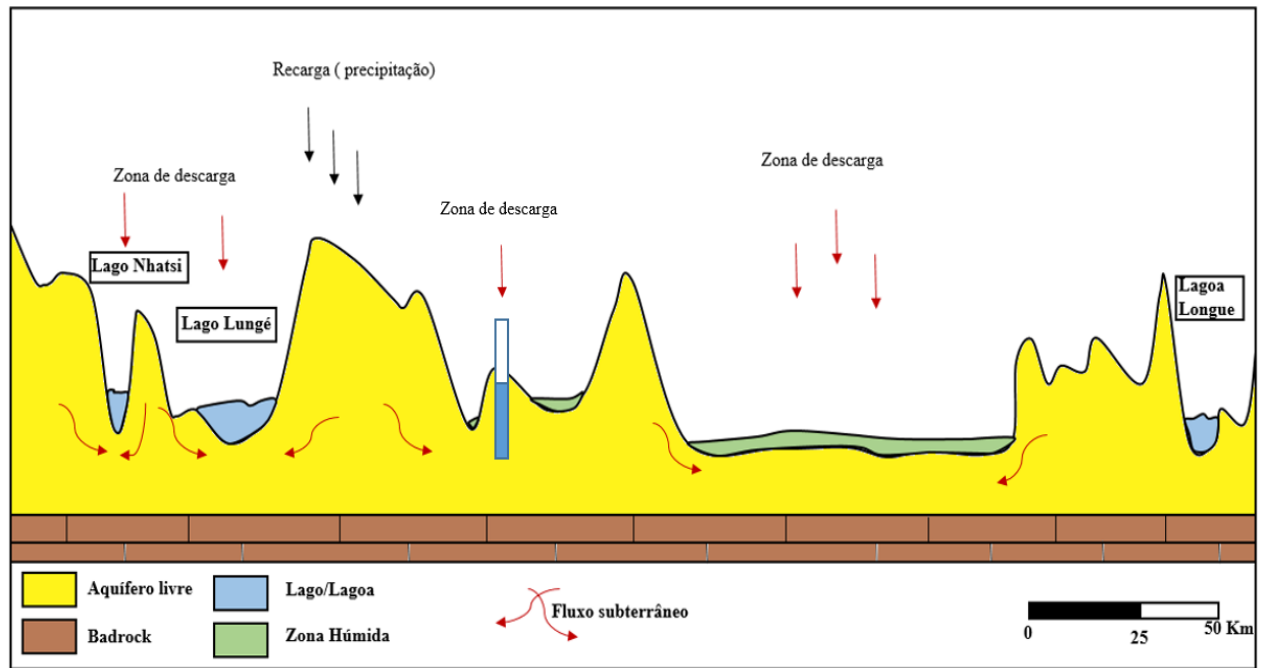
É um processo de movimento da água que atinge a zona saturada sob forças gravitacionais, ou em uma direcção específica por condicionamento hidráulico (Vasconcelos, 2005). Ela é influenciada por factores como precipitação, uso do solo, declividade, tipo de solo, e presença de infra-estruturas impermeabilizantes (Scanlon, *et al.*, 2001). A recarga é fundamental para a manutenção do nível dos aquíferos e para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos.

#### **2.4.1.1. Recarga natural e artificial**

Recarga natural é o processo pelo qual a água proveniente da precipitação e de outras fontes superficiais se infiltra no solo, reabastecendo o aquífero. A eficiência e a taxa de recarga natural são influenciadas por factores como o tipo de solo, a geologia, a cobertura do solo, a topografia, a profundidade do lençol freático, a vegetação e as condições climáticas, são favorecidas pelos solos permeáveis, formações rochosas fracturadas, rios, cobertura florestal e terrenos relativamente planos (Gebreslassie, *et al.*, 2025). Enquanto que recarga artificial é qualquer processo que induza a infiltração ou injeção da água no subsolo, ela é planejada e controlada pelo Homem (Souza, 2021). Tem como objectivo aumentar a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos, melhorar a qualidade da água, restabelecer o nível freático e diminuir o escoamento superficial. Para tal pode-se usar água dos rios e lagos, águas residuais resultantes de estações de tratamento, água dessalinizada e água da chuva e de escoamento superficial (De Souza Barbosa & Mattos, 2008).

### **2.4.2. Descarga**

O processo de descarga é o oposto do de recarga, ou seja, é o processo no qual a água subterrânea sai do sistema aquífero de forma natural ou é removida através de meios naturais. Ela corresponde geralmente a áreas topograficamente baixas onde o lençol freático pode estar em contacto directo com a superfície e/ou com os corpos de água, podendo aflorar em lagos, lagoas, rios, nascentes, zonas húmidas, ela apresenta um fluxo ascendente e não descendente como o do processo de recarga.



**Figura 3:** Esquema ilustrativo das zonas de descarga e recarga do aquífero.

## 2.5. Factores que influenciam a recarga dos aquíferos

### 2.5.1. Precipitação

É o principal factor que controla a recarga aquífera, pois é a fonte primária da água, porém apenas uma parte da água da chuva contribui para a recarga, pois parte dessa água retorna à atmosfera pela evapotranspiração (Healy & Cook, 2002). Segundo Lerner (2002) a influência da precipitação não depende apenas do volume do precipitado, mas também da intensidade, duração, frequência e distribuição temporal da chuva. Chuvas de baixa intensidade e longa duração tendem a infiltrar-se mais, pois água percorre mais calmamente o perfil do solo, enquanto que chuvas intensas de curta duração geram escoamento superficial (Freeze & Cherry, 1979).

### 2.5.2. Uso e cobertura do solo

A taxa de recarga das águas subterrâneas é significativamente afectada por este factor, ele fornece informações essenciais sobre a humidade do solo, a infiltração, escoamento superficial e águas subterrâneas (Arulbalaji, *et al.*, 2019). Graças a esse factor é possível saber que as florestas, campos e terras agrícolas proporcionam maior tendência de recarga, enquanto que os afloramentos rochosos, a mineração e a urbanização diminuem o potencial de recarga (Kumar, *et al.*, 2007) (Karliraj, *et al.*, 2014) (GONÇALVES, *et al.*, 2020).



### **2.5.3. Declividade do terreno**

Tem grande influência na infiltração da água no solo (Dar, *et al.*, 2021), pois a taxa de infiltração está relacionada com a capacidade da superfície do terreno em reter água no solo (Deepa, 2016) e quanto menor a declividade, maior é o potencial de recarga (Magesh, *et al.*, 2012).

### **2.5.4. Geologia**

Ela determina a capacidade de infiltração e a natureza do meio poroso, litologias permeáveis como arenitos pouco consolidados, depósitos aluvionares e formações arenosas favorecem a recarga (Freeze & Cherry, 1979), enquanto que rochas cristalinas como basaltos e granitos pouco fracturados funcionam como barreira natural, limitando assim a recarga (Feeter, 2001). Além da litologia, às estruturas geológicas desempenham um papel crucial, a presença de falhas, fracturas e zonas de intemperismo podem aumentar significativamente a conectividade hidráulica favorecendo a recarga.

### **2.5.5. Solos**

Os solos constituem uma parte fundamental de ligação entre a superfície e o aquífero, a textura é um factor dominante, pois, solos arenosos com grãos mais grossos apresentam maior condutividade hidráulica, o que favorece a recarga, enquanto que os solos argilosos por serem menos porosos dificultam a percolação da água, retendo-a na zona superficial dificultando o processo de recarga (NRC, 1994).

### **2.5.6. Densidade de Lineamentos**

Os lineamentos são linhas estruturais, como falhas e fracturas. Eles geralmente representam zonas de fracturamento e aumento da porosidade e permeabilidade secundárias, portanto, zonas de maior ocorrência e movimento de águas subterrâneas (Lemacha, 2008). Variações no tamanho, forma e orientação desses lineamentos são atribuídas principalmente ao estilo, à natureza da deformação e ao comportamento geológico das rochas (Kumar, *et al.*, 2020). Áreas com alta densidade de lineamento tendem a apresentar maior percolação da água até ao aquífero, enquanto que áreas com baixa densidade de lineamento dependem mais da permeabilidade do solo e das condições superficiais para a recarga (Saranya & Saravanan, 2020).

### **2.5.7. Densidade de drenagem**

A densidade de drenagem indica permeabilidade da rocha e capacidade de infiltração e, portanto, capacidade de recarga (Lemacha, 2008), zonas com maior densidade de drenagem indicam a presença de numerosos cursos de água nas suas proximidades, que favorecem o escoamento rápido da água da superfície, o que conseqüentemente reduz a recarga do aquífero, enquanto que regiões com baixa

densidade de drenagem são caracterizadas por menos cursos de água, o que favorece a infiltração e contribui para a recarga das águas subterrâneas (Saranya & Saravanan, 2020).

## **2.6. Métodos de identificação e mapeamento das Zonas de Recarga**

A identificação das zonas de recarga e a estimativa da recarga aquífera são essenciais para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, diversos métodos têm sido desenvolvidos, podendo ser classificados em directos e indirectos, conforme a abordagem adoptada na obtenção dos dados e na escala de aplicação.

### **2.6.1. Métodos directos**

Descrevem a recarga como um mecanismo de percolação da água desde o solo até ao aquífero, entrando com parâmetros como a variação da humidade no solo, evapotranspiração, escoamento superficial, ou seja, eles baseiam-se em medições realizadas no campo, podendo quantificar a recarga e seus efeitos imediatos no aquífero. Os mais usados são traçadores químicos, flutuação do nível freático e infiltromêtro (De Souza Barbosa & Mattos, 2008).

### **2.6.2. Métodos indirectos**

Utilizam dados ambientais, espaciais e modelagem para inferir a recarga sem medi-la directamente, os mais comuns são o balanço hídrico, as técnicas de sistema de informação geográfica (SIG), técnicas de análise de dados multicritério como método de análise hierárquica de processo (AHP) (Vargas, *et al.*, 2022).

#### **2.6.2.1. Método de Balanço hídrico**

É a determinação do movimento da água para dentro e para fora, e da mudança de armazenamento dentro de um volume de controle, ela baseia-se no princípio de conservação de massa (USGS, 2010). É uma das ferramentas consolidada e confiável para quantificação da recarga e pode ser expressa pela seguinte equação  $R = P - ET - Q \pm \Delta S$  (Feitosa & Filho, 2000) (Carvalho, 2013).

Onde: R= Recarga, P=Precipitação, ET= Evapotranspiração,  $\Delta S$ = Variação de armazenamento

Q= Escoamento

#### **2.6.2.2. Método de análise hierárquica de processo**

É uma técnica de apoio a decisão desenvolvida por Thomas Saaty em 1980, que permite lidar com problemas complexos envolvendo múltiplos critérios e factores em uma hierarquia de objectivos (Saaty, 1980). O AHP tem sido amplamente usado em áreas como planeamento urbano, gestão ambiental e estudos hidrogeológicos especialmente para identificar e priorizar as zonas de recarga (Machiwal & Jha, 2011) (Rahmati, *et al.*, 2016).

O método consiste em estruturar o problema em diferentes níveis, comparando os factores par a par para assim determinar a sua importância e para essa comparação é usada a escala de Saaty que varia de 1 a 9 (tabela 1), onde a partir das comparações, constrói-se uma matriz quadrada a partir da qual são calculados os pesos relativos de cada factor (Saaty, 1980). Depois de se obter os pesos deve-se fazer a verificação da consistência, por meio do índice de consistência (CI) e da razão de consistência (CR), onde valores de  $CR \leq 0,10$  indicam uma matriz consistente (Malczewski, 1999).

**Tabela 1:** Escala de Saaty (Adaptado de Saaty 1980).

| Importância | Significado                 |
|-------------|-----------------------------|
| 1           | Igual importância           |
| 3           | Moderadamente importante    |
| 5           | Fortemente importante       |
| 7           | Muito fortemente importante |
| 9           | Extremamente importante     |
| 2,4,6 e 8   | Valores intermediários      |

### 2.6.2.3. Método de sistema de informação geográfica (SIG)

É usado principalmente para analisar e integrar variáveis que influenciam a infiltração da água, é um método que não depende inteiramente das medições em campo, mas também da avaliação espacial dos factores que condicionam a recarga (Malczewski, 1999) (Machiwal, *et al.*, 2018).

A aplicação do SIG permite sobrepor vários mapas temáticos e atribuir os pesos relativos de acordo com a importância de cada factor no processo de recarga. Tem como principal vantagem a capacidade de analisar áreas extensas, mesmo com dados hidrogeológicos limitados (Chenini & Ben, 2010).

## 2.7. Hidroquímica e Qualidade da água

### 2.7.1. Hidroquímica

A hidroquímica é uma das principais ferramentas para compreensão da dinâmica das águas subterrâneas, a composição química das águas subterrâneas pode ser resultado da dissolução de minerais presentes nas rochas e solos, bem como da mistura com águas superficiais e da recarga (Appelo & Postma, 2005), ela é importante não só para o conhecimento da sua composição química, mas também para avaliar a sua adequação a diferentes usos (Feeter, 2001).

### 2.7.2. Qualidade da água

A qualidade da água é determinada pela dissolução em água de gases e solutos, bem como pela matéria suspensa e flutuante na água, ela é uma consequência do estado físico e químico natural da água, bem como de qualquer alteração que possa ter ocorrido como consequência da actividade humana. Para a sua avaliação são necessárias análises físico-químicas, análises bacteriológicas, microbacteriológicas, radiactivas e ambientais. São medidos indicadores como o PH, salinidade, turbidez, cor, sabor, temperatura, Eh, acidez, total de sólidos dissolvidos e condutividade eléctrica, pois ajudam na obtenção de informações rápidas e consistentes sobre a composição e sua aptidão para o consumo humano e para o uso agrícola (Feeter, 2001) (Feitosa, *et al.*, 2008).

#### 2.7.2.1. Condutividade Eléctrica (CE)

A condutividade eléctrica é a capacidade que uma solução aquosa possui de conduzir corrente eléctrica, está directamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob a forma de íons. Soluções ácidas, básicas e sais inorgânicos são geralmente bons condutores de corrente eléctrica (Feitosa, *et al.*, 2008) (Filho, 2018).

A condutividade eléctrica é uma medida eficaz para avaliar a qualidade da água devido à sua sensibilidade às concentrações de íons dissolvidos. A variação na condutividade reflecte mudanças na composição química da água, indicando potenciais contaminações por poluentes orgânicos e inorgânicos. Valores elevados de condutividade eléctrica indicam maiores concentrações de sais dissolvidos, podendo estar associados tanto a processos naturais, como a dissolução de minerais e evapotranspiração intensa, tanto a processos antrópicos, como a irrigação malfeita, descargas de efluentes e uso de fertilizantes (Freeze & Cherry, 1979). Segundo o Ministério da Saúde no diploma ministerial nº180/2004 de 15 de Setembro, a água para ser considerada própria para o consumo deve ter valores de CE na faixa dos 50-2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por essa razão a medição a condutividade eléctrica é usada como parâmetro de monitoramento rápido que nos permite identificar as variações espaciais e temporais da qualidade da água, permitindo assim a detecção precoce de possíveis riscos à saúde pública e ao meio ambiente (Miguel, 2024).

### 2.8. Modelo Hidrogeológico Conceptual

Segundo Miguel (2024) o Modelo Hidrogeológico Conceptual é um modelo científico usado para prever o comportamento do fluxo de águas subterrâneas e compreender os processos físicos e hidrológicos envolvidos em um aquífero. Este modelo procura representar a realidade hidrogeológica da forma mais fiel possível e é a base para qualquer investigação hidrogeológica. (Feitosa, *et al.*, 2008).

A produção de um modelo obedece-se fases como a identificação dos sistemas de aquíferos, identificação das fronteiras do modelo, condições de contorno, levantamento dos parâmetros hidrogeológicos e das saídas e entradas (Feitosa, *et al.*, 2008) (Anderson, *et al.*, 2015). Ele é um instrumento estratégico de gestão, pois nos permite prever o comportamento do aquífero em diferentes cenários de exploração, avaliar a sua vulnerabilidade e definir as zonas prioritárias para a protecção.

### 2.9. Legislação e zonas de protecção de furos

A protecção das captações subterrâneas é um componente fundamental na gestão dos recursos hídricos, pois garante a qualidade da água e prolonga a vida útil dos aquíferos, diversos organismos internacionais como a OMS, recomendam a definição de zonas de protecção em torno dos furos de abastecimento, conhecidos por buffer zone (WHO, 2017). Recomenda que as áreas ao redor dos furos, sejam protegidas para prevenir a contaminação pelas actividades humanas. A tabela 2 mostra as leis e decretos vigentes no nosso país sobre a protecção e conservação as águas subterrâneas no nosso país.

**Tabela 2:**Quadro resumo das leis em vigor em Moçambique( Adaptado de Nunes 2024)

| <b>Legislação</b>                                                                                 | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lei de água: Lei n° 16/91                                                                         | Estabelece que as águas subterrâneas, são de domínio público, estabelece também a necessidade e o direito de uso da água pela população e a necessidade do mantimento da sua qualidade e quantidade, destacando o respeito pelas zonas protecção.                        |
| Regulamento de Pesquisa e Exploração de Águas Subterrâneas – RPEAS. Decreto 18/2012 de 5 de Julho | Estabelece normas e procedimentos de licenciamento para a pesquisa, perfuração e exploração de águas subterrâneas e os critérios a observar na abertura de furos, poços e outras obras de captação de águas subterrâneas (compete as Administrações Regionais de Águas). |
| Lei de terras: Lei n° 19/97 de 1 de Outubro                                                       | Estabelece que o uso e o aproveitamento de terra deve respeitar as áreas onde se localizam                                                                                                                                                                               |

| <b>Legislação</b>                                                                                      | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                        | captações de águas subterrâneas e superficiais (poços, furos e nascentes).                                                                                                                                                            |
| Regulamento sobre a qualidade de água para o consumo humano. Ministerial n° 180/2004 de 15 de Setembro | Estabelece padrões para o controlo da qualidade da água para consumo humano, apresenta um conjunto sistemático de acções de avaliação de qualidade de água realizadas com carácter regular da entidade reguladora do sistema de água. |

No nosso país a lei de água: Lei n° 16/91 de 3 de Agosto e a lei de terras: Lei n° 19/97 de 1 de Outubro são instrumentos legais muito fortes para compreender a questão da protecção das captações. Onde a lei de águas clarifica que os furos de captação devem estar localizados em zonas de protecção e a lei de terras estabelece distâncias a serem obedecidas dentro dessas zonas de protecção, neste caso fala-se da recomendação de um raio de 50m de um ponto de abstracção de águas subterrâneas.

## CAPÍTULO III: ÁREA DE ESTUDO

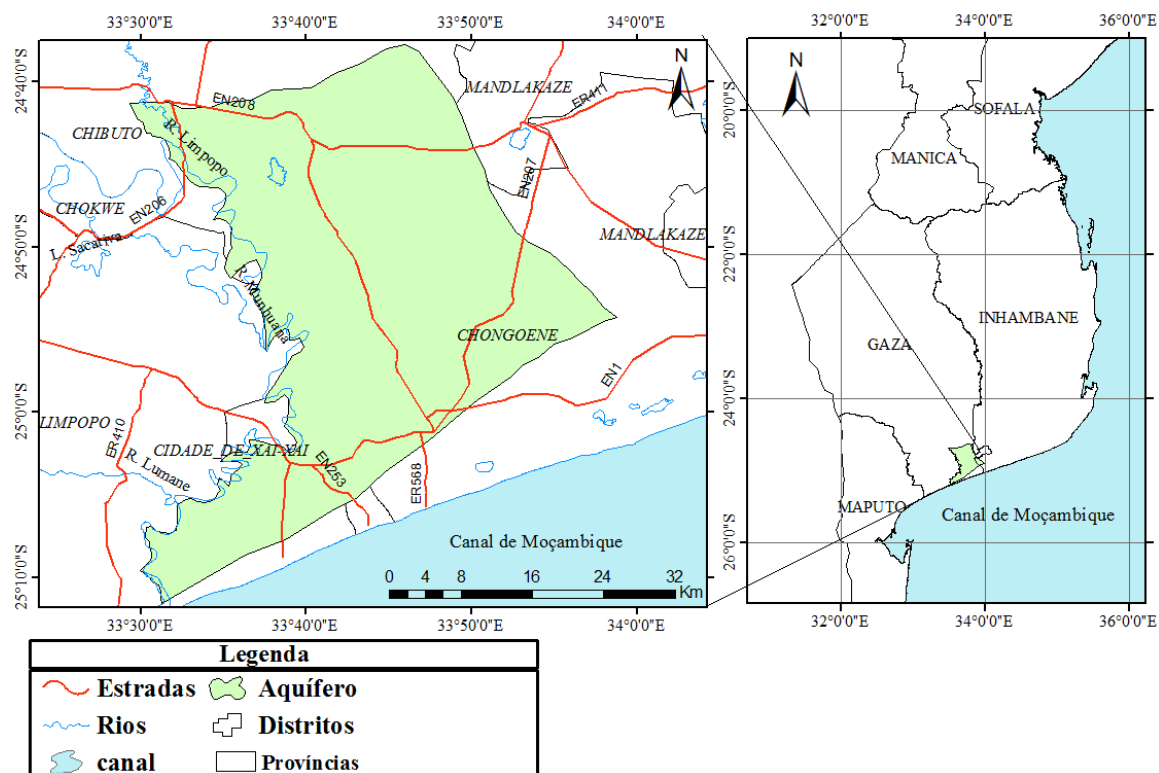
### 3.1. Enquadramento geográfico

A área de estudo corresponde ao aquífero que abastece a Cidade de Xai-Xai, que compõe os distritos de Chongoene, Chibuto, Limpopo e a Cidade de Xai-Xai, na província de Gaza, sul de Moçambique, ocupando maior extensão no distrito de Chongoene com cerca de 645 Km<sup>2</sup> de área (tabela 3).

**Tabela 3:** : Área ocupada pelo aquífero.

| DISTRITO          | Área km <sup>2</sup> | Área % |
|-------------------|----------------------|--------|
| Chibuto           | 497                  | 37     |
| Chongoene         | 645                  | 48     |
| Cidade de Xai-Xai | 87                   | 6      |
| Limpopo           | 126                  | 9      |

Geograficamente situa-se aproximadamente entre as latitudes -25,1° e -24,4° S e entre as longitudes 33,30° e 34,0° E conforme ilustrado na figura 4. A Cidade de Xai-Xai é o principal centro urbano da região, onde está concentrada maior parte da população e das actividades económicas, representando assim o foco do abastecimento hídrico (figura 4).



**Figura 4:** Mapa de localização da área de estudo.

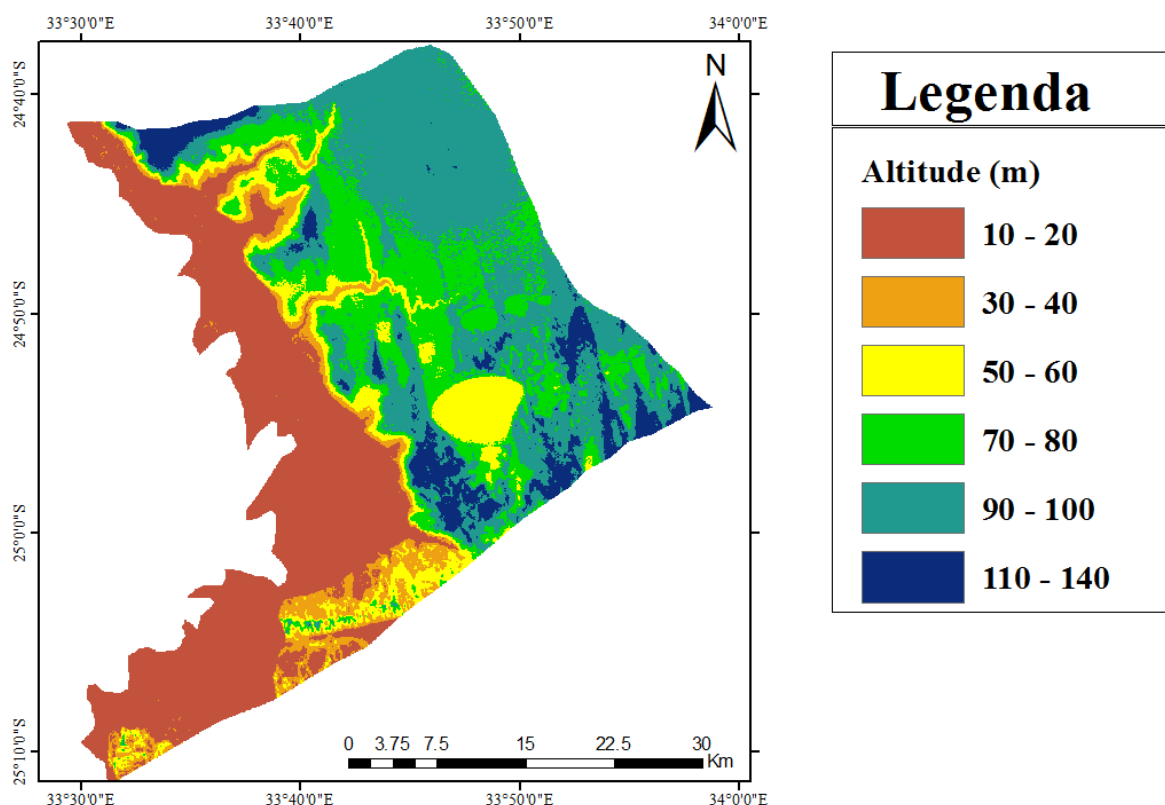
### 3.2. Clima e hidrografia

A área de estudo apresenta um clima tropical húmido a seco, com a estação seca muito bem definida, apresenta uma precipitação média anual que pode variar entre 800 a 1148 mm (CHIRPS, 2020-2024). Essa sazonalidade é fortemente influenciada pelos sistemas climáticos regionais e globais, como o El Niño, que provoca variações significativas na disponibilidade hídrica (Tadross, *et al.*, 2005)

Durante a estação chuvosa as temperaturas médias anuais situam-se em torno dos 27-31°C e na estação seca entre 19-26°C (Expert, 2023). A hidrografia da região é dominada principalmente pelo rio Limpopo, que é considerado um dos principais rios da província de Gaza. A região é drenada por alguns cursos de água secundários, como é o caso do rio Lumane e pequenos riachos sazonais que desaguam no rio Limpopo (MICOA, 2012).

### 3.3. Enquadramento Topográfico

A área de estudo apresenta um relevo relativamente plano a suavemente ondulado, com altitudes não superiores à 140m, as altitudes mais baixas estão próximas ao rio Limpopo e apresentam um relevo extremamente suave (figura 5).



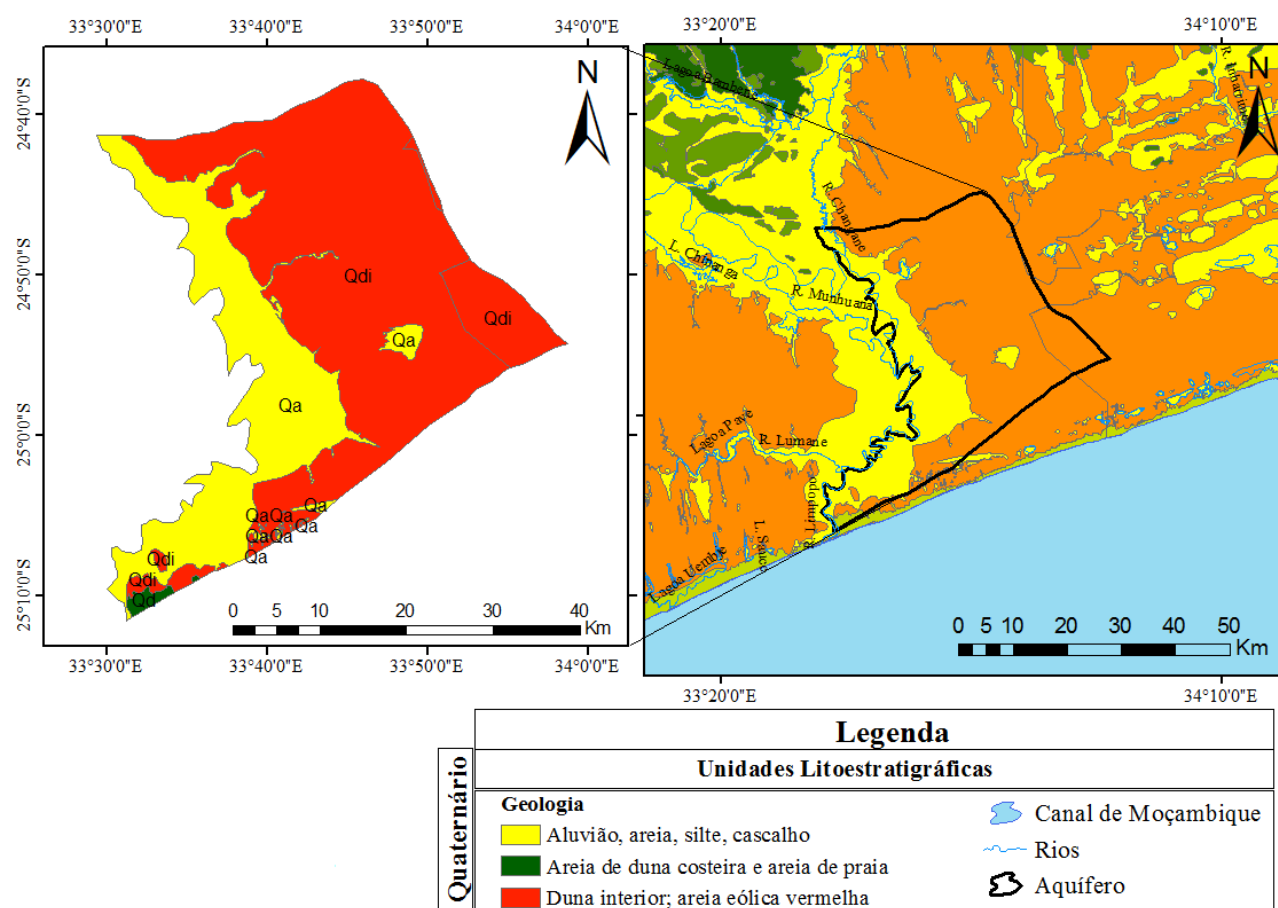
**Figura 5:** Enquadramento topográfico da área de estudo.



As áreas com altitudes entre 10-40 m correspondem a planície e a terrenos suavemente ondulados, são zonas que favorecem a acumulação e infiltração da água no solo. As áreas com 50-80 m representam as áreas de transição, apresentam relevo moderado, as áreas com 90-140 m representam as dunas interiores, que apesar de possuírem boa permeabilidade, não favorecem a infiltração devido ao escoamento superficial (Kaewdum & Chotpantararat, 2021).

### 3.4. Enquadramento geológico

Segundo a Carta geológica, a área de estudo é marcada por formações do Quaternário de origem fluvial marinha e eólica, ao longo do vale do Limpopo temos predominância de depósitos aluvionares compostos por areia, silte e cascalho e no seu interior há presença de dunas interiores compostas de areia eólica vermelha (figura 6).



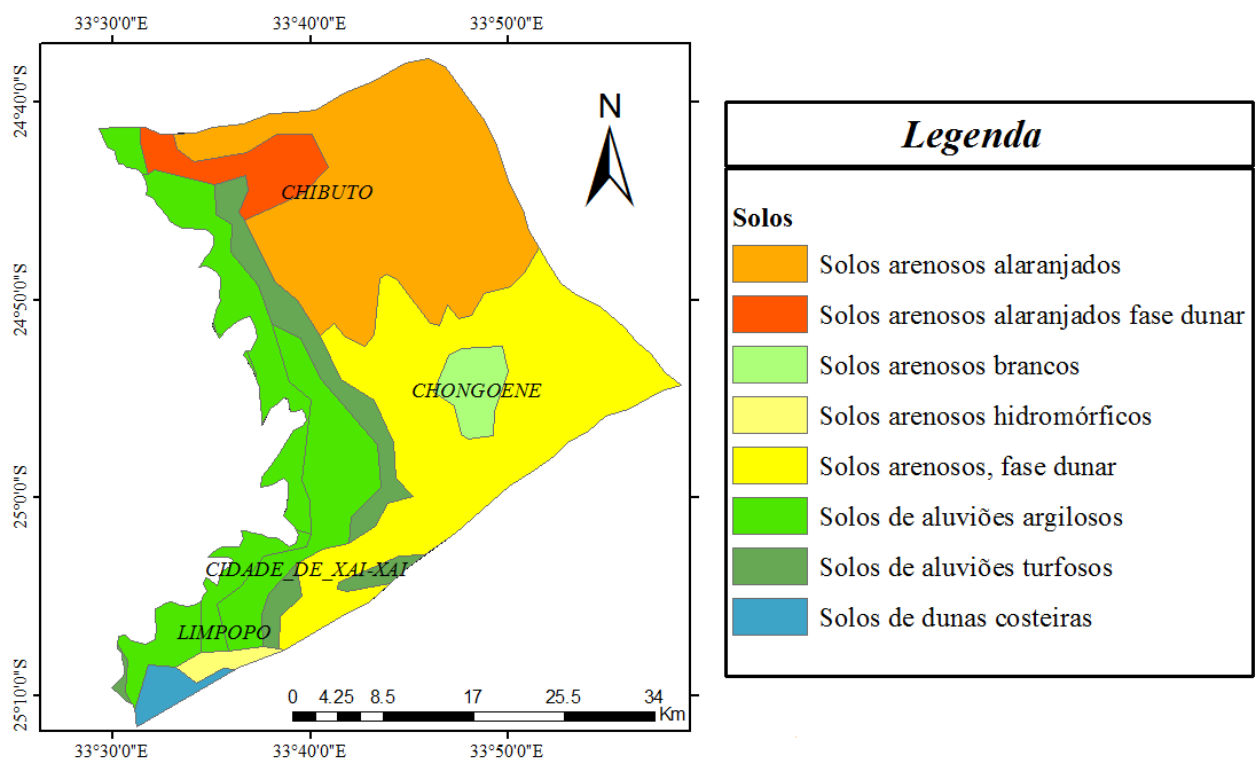
**Figura 6:** Enquadramento geológico da área de estudo.

### 3.5. Enquadramento Pedológico

Segundo a carta de solos, a área de estudo apresenta uma grande variação litológica (figura 7), ao longo do vale do rio temos uma variação de solos aluvionares argilosos e turfosos a presença desses componentes não facilita o processo de recarga, por isso nessa área a recarga pode ser moderada a

baixa (FAO, 1988). No distrito de Limpopo ele apresenta uma variação de solos arenosos hidromórfico, de dunas costeiras e solos arenosos em fase dunar, sendo os dois últimos muito permeáveis e com uma boa capacidade de drenagem.

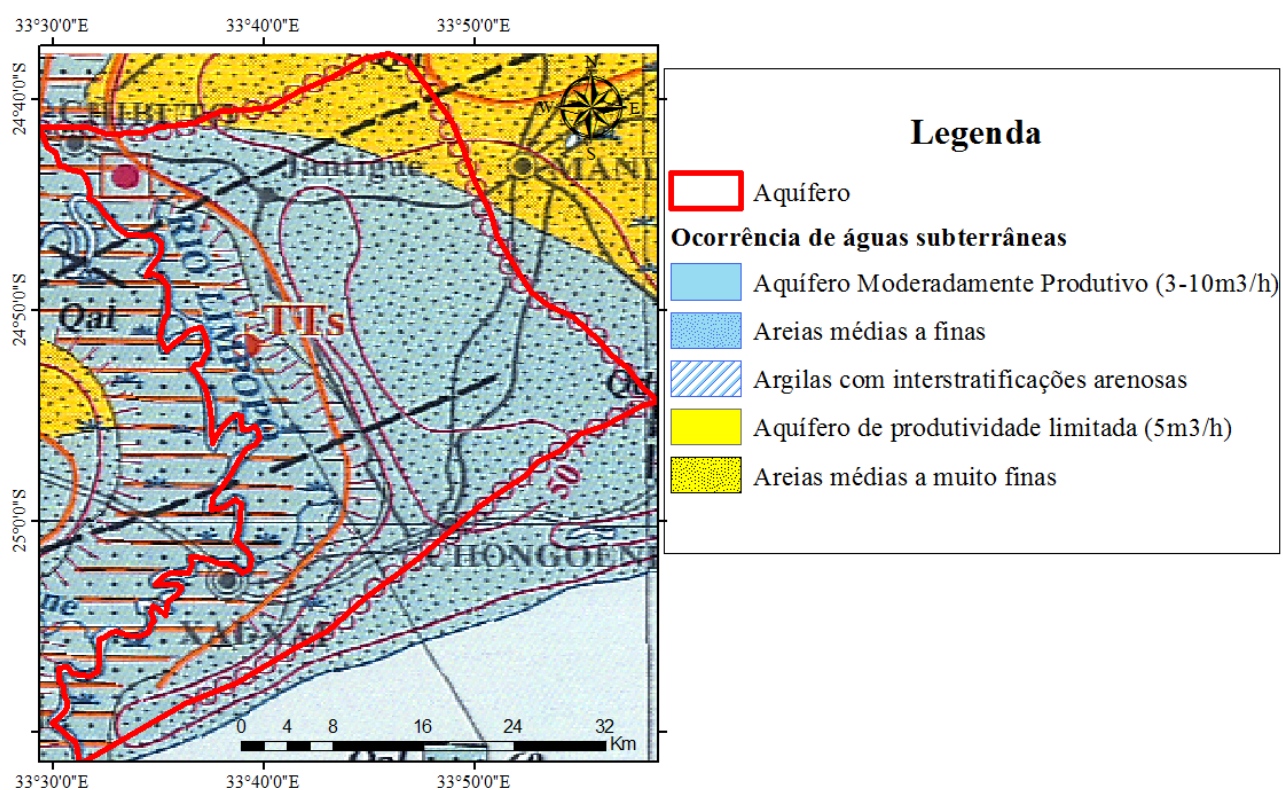
Os distritos de Chibuto, Chongoene e Xai-Xai apresentam na sua maioria uma variação de solos arenosos que vão desde solos arenosos em fase dunar, solos arenosos alaranjados, solos alaranjados fase dunar, solos arenosos brancos, todos eles apresentam uma drenagem moderada a excelente o que facilita a infiltração da água no solo e consequentemente o processo de recarga.



**Figura 7:** Enquadramento pedológico da área de estudo.

### 3.6. Enquadramento Hidrogeológico

Segundo a Carta hidrogeológica, o aquífero em estudo é na sua maioria intergranular (contínuos, geralmente não consolidado) composto principalmente por areias médias a finas (de origem eólica e/ou marinha) e por argilas com interstratificações arenosas, com produtividade moderada e com caudal variando entre 3-10m<sup>3</sup>/h, mais a norte no distrito de Chibuto o aquífero é local contínuo ou descontínuo de produtividade limitada com caudal de 5m<sup>3</sup>/h (figura 8).



**Figura 8:** Enquadramento hidrogeológico da área de estudo representando a delimitação do aquífero.

## CAPÍTULO IV: METODOLOGIA

A compreensão do sistema aquífero que abastece a Cidade de Xai-Xai exige uma abordagem integrada, resultante da combinação de análises hidrogeológicas, geoespaciais e hidroquímicas. O presente capítulo descreve os procedimentos adoptados para atingir os objectivos do estudo.

### 4.1. Materiais

O desenvolvimento deste trabalho, baseou-se em diferentes tipos de dados e ferramentas, os materiais utilizados são descritos na tabela a seguir:

**Tabela 4:** Materiais usados para o desenvolvimento do estudo.

| Material                           | Fonte                                                                                         | Utilidade                                                                                              |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modelo Digital de Elevação (DEM)   | USGS, resolução de 30m                                                                        | Foi usado na geração do mapa de declividade, na extracção da drenagem e dos lineamentos                |
| Dados de precipitação              | CHIRPS (climate hazards group), com uma resolução de 0,05° (5km), série temporal de 2020-2024 | Permitiram avaliar a variabilidade espacial da chuva na área de estudo, ao longo de 5 anos.            |
| Carta hidrogeológica de Moçambique | Direcção nacional de águas (DNA), na escala 1:1000 000                                        | Para a delimitação do aquífero, identificação das formações aquíferas predominantes.                   |
| Carta geológica de Moçambique      | Instituto Nacional de Minas (INAMI), na escala 1:1000 000                                     | Foi usada para identificar as formações geológicas presentes na área de estudo e elaboração do perfil. |
| Carta de Solos de Moçambique       | Instituto Nacional de Investigação Agronómica, na escala 1:250 000                            | Para identificar os principais solos da região e estudar a sua capacidade de infiltração               |
| Dados de uso e cobertura do solo   | ESA world cover, resolução 10 m                                                               | Para mapear e identificar as áreas urbanas                                                             |
| Dados de Furos                     | Sistema de informação nacional de água e saneamento (SINAS)                                   | Para obter informações relevantes sobre os furos da região e para extracção de                         |

| Material         | Fonte                 | Utilidade                                                     |
|------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|
|                  |                       | valores de condutividade eléctrica.                           |
| Google Earth Pro | Google                | Auxílio para a elaboração do perfil geológico e buffer zones. |
| ArcGIS 10.5      | ESRI                  | Para processamento, análise e elaboração de mapas.            |
| Microsoft Excel  | Microsoft Corporation | Para cálculo dos pesos AHP.                                   |
| Golden Surfer    | Golden Software       | Elaboração do Modelo Conceptual                               |

## 4.2. Métodos

A metodologia adaptada para este estudo seguiu uma sequência lógica de etapas interligadas, que me permitiram compreender e representar o funcionamento da área de estudo.

### 4.2.1. Delimitação do aquífero

A delimitação de um sistema aquífero é um aspecto fundamental de para a quantificação local e regional das águas subterrâneas. Ela foi feita com base na carta hidrogeológica, onde os limites foram definidos a partir das linhas divisórias das águas subterrâneas representados no mapa através de linhas de bolas vermelhas e pela rede de drenagem superficial presente na área de estudo (figura 8). Estes procedimentos me permitiram identificar com mais rigor os limites naturais do sistema aquífero, assegurando assim, uma representação coerente com as condições geológicas e hidrogeológicas locais.

### 4.2.2. Delimitação das potenciais zonas de recarga

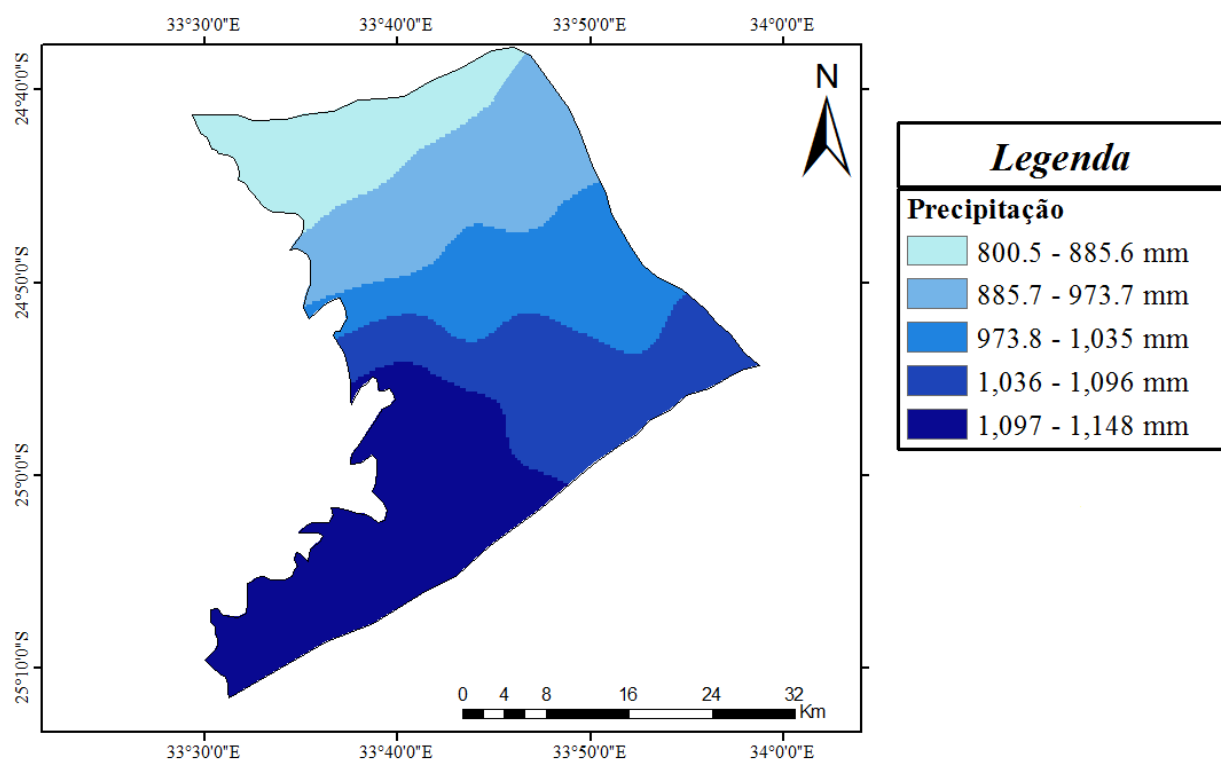
#### 4.2.2.1. Preparação das camadas temáticas

Após a delimitação do aquífero seguiu-se a selecção dos factores e a preparação das camadas temáticas para delimitação das zonas de recarga, esta etapa teve como principal objectivo organizar e padronizar todos os dados espaciais e garantir a compatibilidade entre as fontes e formatos. A escolha desses factores baseou-se em estudos como (Priya, et al., 2022) e usou factores como a precipitação, geologia, os solos, a densidade de lineamento, declividade, densidade de drenagem e o uso e cobertura do solo. Esses factores foram trabalhados no software Arcgis 10.5 onde primeiramente, todas as camadas foram convertidas para o mesmo sistema de coordenadas e projecção cartográfica, para garantir o alinhamento espacial entre os diferentes factores. Todos os

dados vectoriais como os dados de solo e a geologia foram convertidos em formato raster, adoptando uma resolução espacial semelhante para permitir a integração com as outras variáveis, as outras camadas como declividade, densidade de drenagem e lineamentos foram derivadas a partir do modelo digital de elevação.

#### 4.2.2.1.1. Mapa de precipitação

Este mapa foi elaborado através da combinação de 5 séries anuais de precipitação de 2020-2024, ele nos permite identificar as regiões com maior disponibilidade de água proveniente da precipitação na nossa área de estudo, indicando assim, as zonas que estão mais propensas a infiltração (figura 9). No mapa, as áreas representadas pela cor azul escuro (1097-1148mm) indicam regiões com maior disponibilidade hídrica anual, que favorecem o processo de recarga, enquanto que as áreas representadas pelo azul mais claro correspondem a regiões com menos disponibilidade hídrica anual (800,5-800,6mm). A compreensão dessa distribuição é fundamental, pois a recarga de um aquífero freático depende fundamentalmente da disponibilidade hídrica superficial



**Figura 9:** Mapa de precipitação da área de estudo.

#### **4.2.2.1.2. Mapa Geológico**

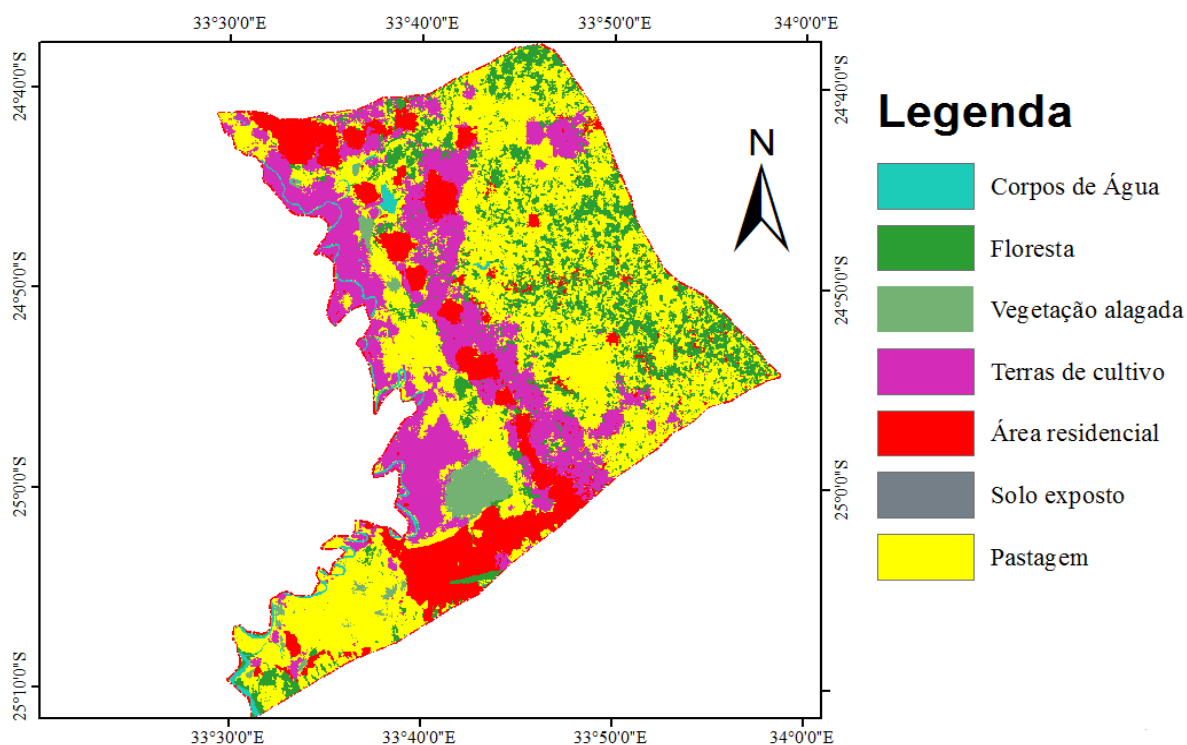
O mapa geológico mostra que a distribuição espacial dos depósitos sedimentares recentes que influenciam directamente no potencial de recarga (figura 6). As áreas Qa estão localizadas ao longo da planície do Limpopo destacam-se como ambientes de elevada permeabilidade, o que permite a retenção da água no solo, e as áreas Qdi apresentam condições favoráveis para a recarga dunas interiores com elevada permeabilidade e rápida infiltração.

#### **4.2.2.1.3. Mapa de solos**

A distribuição dos solos exerce forte influência no processo de infiltração e armazenamento da água no subsolo, solos arenosos predominantes na região e os (figura 7) possuem partículas grandes e com amplos espaços porosos, o que resulta em uma alta permeabilidade, permitindo assim que a água da precipitação percole mais rapidamente para as camadas mais profundas, enquanto que solos de aluviões argilosos apresentam partículas mais finas e poros pequenos, o que torna a infiltração mais lenta e pode levar muito tempo para recarregar o aquífero (Lentswe & Molwalefhe, 2020).

#### **4.2.2.1.4. Mapa de uso e ocupação do solo**

Esse mapa mostra como as actividades humanas e a ocupação da terra influenciam a recarga, áreas urbanizadas tem se desenvolvido ao longo dos anos e isso faz com que, a capacidade de infiltração devido à impermeabilização do solo reduza anualmente, podendo comprometer seriamente as zonas de recarga. As terras de cultivo, as florestas, as zonas de pastagem predominam na área de estudo, permitem que a água da chuva infiltre no solo de forma eficiente (figura 10).

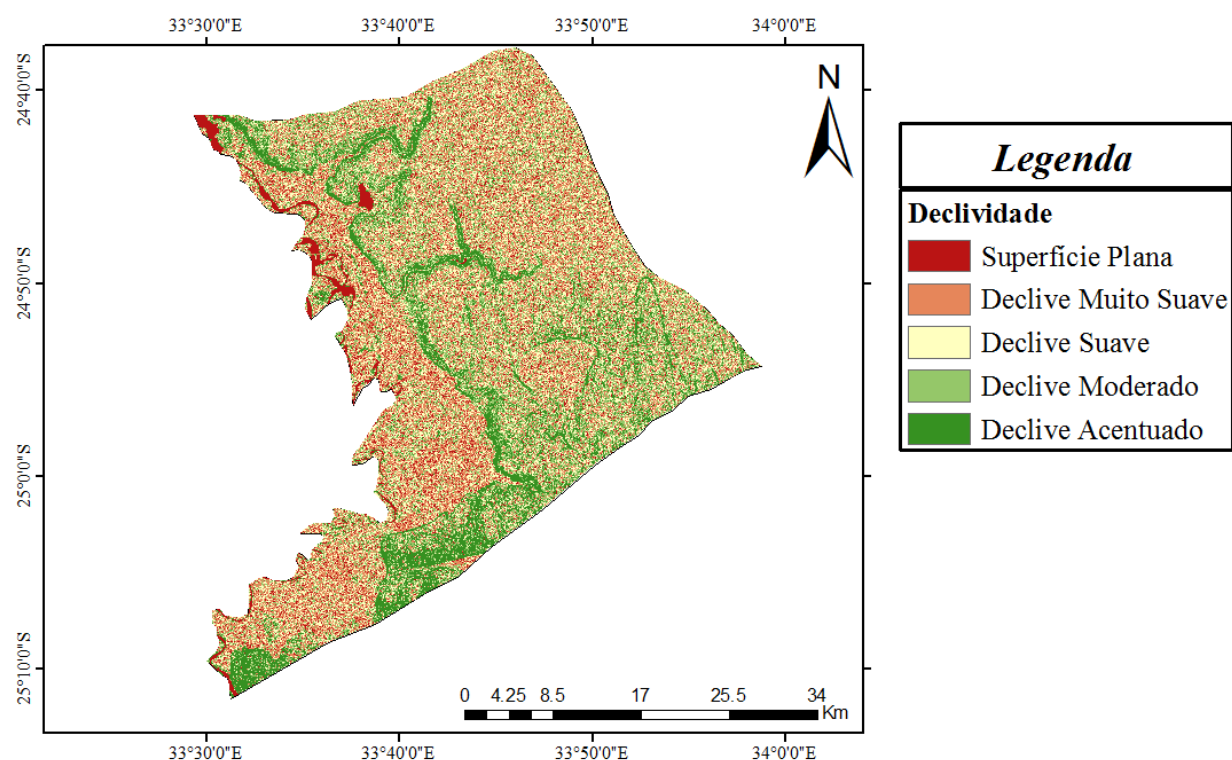


**Figura 10:** Mapa de uso e cobertura do solo.

#### 4.2.2.1.5. Mapa de declividade

Este mapa nos mostra a influência do relevo na dinâmica da recarga do aquífero (figura 11), áreas planas ou suavemente onduladas, comuns em planícies aluviais e zonas próximas aos rios, favorecem a infiltração da água permitindo que ela permaneça mais tempo em contacto com o solo, aumentando assim o potencial de recarga, as zonas com relevo mais acentuado, típicos das dunas interiores apresentam escoamento superficial, podendo reduzir o tempo de contacto da água com o solo limitando assim a infiltração e consequentemente reduzindo o potencial de recarga (Abdalla, 2012).

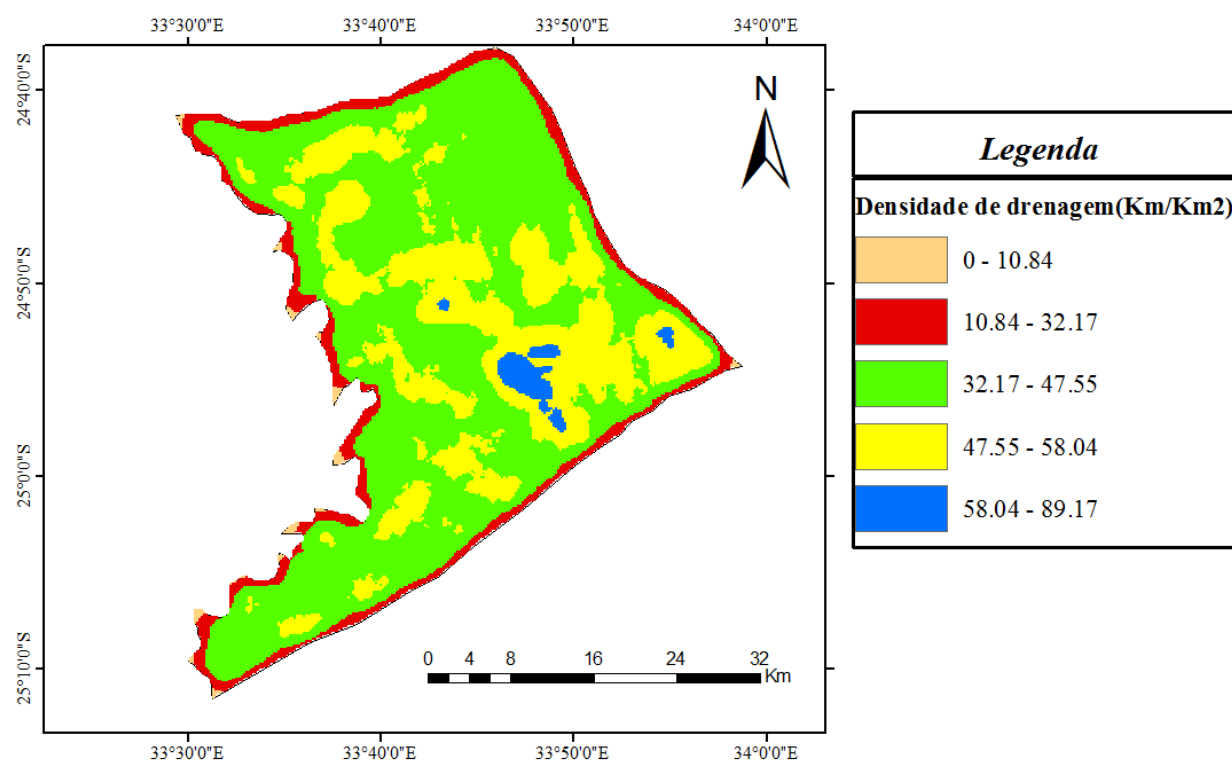




**Figura 11:** Mapa de declividade

#### 4.2.2.1.6. Mapa de Densidade de drenagem

Este mapa nos mostra que zonas com baixa densidade de drenagem são mais favoráveis a recarga subterrânea isso devido a circulação das águas naquele local (figura 12), ou seja, zonas com baixa densidade de drenagem indicam a presença de relevo mais plano e solos permeáveis por essa razão são mais favoráveis a infiltração, enquanto zonas com alta densidade de drenagem apresentam relevo acentuado e por vezes solos pouco permeáveis, por essa razão favorecem o escoamento superficial e consequentemente não favorecem a infiltração da água (Rajasekhar, *et al.*, 2021).



**Figura 12:** Mapa de densidade de drenagem.

#### 4.2.2.2. Classificação e atribuição de pesos

Após a elaboração das camadas temáticas, procedeu-se a fase da classificação desses factores, de forma a permitir a sua integração posterior na análise, a classificação foi desenvolvida com base em estudos anteriores de mapeamento de zonas potenciais de recarga de águas subterrâneas. Essa classificação foi atribuída numa escala de 1 a 5, com 1 indicando muito pouca influência e 5 indicando influência significativa (Priya, *et al.*, 2022).

No caso da declividade as encostas planas recebem uma classificação 5 (muito alta) porque retém a água por um longo período permitindo que as águas subterrâneas se reabastecem mais facilmente por meio da infiltração. A disponibilidade da água para infiltração é maior quanto a precipitação media anual é alta, assim sendo locais com precipitação maior precipitação recebem classificação 5. Em áreas com alta densidade de drenagem o escoamento superficial é maior, sendo assim na região de estudo onde a densidade de drenagem, possui maior valor recebem a classificação mais baixa 1 e as áreas com menor densidade de drenagem recebem a classificação mais alta 5. As classificações do uso e cobertura do solo são baseadas na quantidade de água disponível para a recarga, terras agrícolas, corpos de água, florestas e vegetação inundada recebem classificação 5, as áreas urbanizadas recebem

a classificação, mais baixa 1. As formações geológicas presentes na área de estudo recebem classificações de acordo com a sua influência no processo de recarga, zonas com formações aluvionares e dunas costeiras recebem maior classificação 5, enquanto que formações de dunas interiores com areia eólica vermelha recebem a classificação 3. Quanto aos solos, os solos arenosos recebem maior classificação 5 devido a sua heterogeneidade e soltura e os aluvionares turfosos recebem a classificação 4 (Priya, *et al.*, 2022) (Bera, *et al.*, 2022).

#### 4.2.2.3. Atribuição de pesos pelo método AHP

Usando AHP, uma abordagem de tomada de decisão multicritério, é possível estabelecer a importância relativa de várias camadas temáticas e seus atributos associados (Saaty, 1980) (Bera, *et al.*, 2020). Esta abordagem AHP, emprega a hierarquia para examinar muitos atributos individualmente, a fim de identificar possíveis reguladores de fluxo e armazenamento de águas subterrâneas a partir de parâmetros concorrentes (Agarwal & Garg, 2016). A importância de cada parâmetro foi classificado usando a escala de Saaty que varia de 1 a 9, usando uma matriz de comparação pareada.

**Tabela 5:** Tabela de comparação pareada

| <b>Critério</b>                | <b>Precipitação</b> | <b>Geologia</b> | <b>Declividade</b> | <b>Densidade de drenagem</b> | <b>Uso e cobertura do solo</b> | <b>Solos</b> |
|--------------------------------|---------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------|
| <b>Precipitação</b>            | 1                   | 3               | 3                  | 5                            | 7                              | 5            |
| <b>Geologia</b>                | 1/3                 | 1               | 3                  | 3                            | 5                              | 3            |
| <b>Declividade</b>             | 1/3                 | 1/3             | 1                  | 2                            | 3                              | 1/3          |
| <b>Densidade de drenagem</b>   | 1/5                 | 1/3             | 1/2                | 1                            | 1                              | 1/3          |
| <b>Uso e cobertura do solo</b> | 1/7                 | 1/5             | 1/3                | 1                            | 1                              | 1/3          |
| <b>Solos</b>                   | 1/5                 | 1/3             | 3                  | 3                            | 3                              | 1            |

#### 4.2.2.4. Normalização de pesos

Os pesos de cada linha foram calculados para encontrar a classificação apropriada, tendo como resultado os pesos normalizados de cada parâmetro, conforme mostrado na tabela 7. Com base nas descobertas do estudo, a precipitação observada tem um valor mais alto do que qualquer outra métrica. O que significa que ela é o factor predominante, valores altos da precipitação indicam alta favorabilidade a recarga.

**Tabela 6:** Tabela de pesos normalizados

| <b>Critério</b>          | <b>Pesos Relativos</b> |
|--------------------------|------------------------|
| Precipitação             | 0,41                   |
| Geologia                 | 0,23                   |
| Declividade              | 0,10                   |
| Densidade de drenagem    | 0,06                   |
| Uso e cobertura do solo  | 0,04                   |
| Densidade de lineamentos | 0,04                   |
| Solos                    | 0,15                   |
| Total                    | 1                      |

#### 4.2.2.5. Cálculo do índice de consistência e da razão de consistência

A razão de consistência foi calculada para avaliar a adequação dos pesos aplicados a cada parâmetro. Para que o peso seja considerado constante, a razão de consistência deve ser inferior a 0,10. A razão de consistência (CR) foi calculada usando a seguinte equação (Saaty, 1980) (Priya, *et al.*, 2022):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Onde CI é o índice de consistência e RI é o índice aleatório. Para a presente pesquisa, o valor do índice aleatório é de 1,32, uma vez que foram empregados 7 parâmetros, conforme tabela 6. O índice de consistência foi calculado usando a seguinte (Saaty, 1980):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

**Tabela 7:** Valores de índice aleatório (Fonte: Saaty, 1980)

| <b>N</b>  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|-----------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>RI</b> | 0 | 0 | 0,58 | 0,92 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 |

O valor do índice de consistência obtido foi de 0,075 e a razão de consistência foi de 0,06 que é menor que 0,1, o que significa que a matriz é consistente.

#### **4.2.2.6. Análise de sobreposição ponderada para mapeamento de zonas potenciais de recarga de águas subterrâneas (Weigthed Overlay)**

O Weigthed Overlay é uma abordagem usada para gerar uma análise extensa, atribuindo uma escala comum de valores aos componentes de entrada com base na análise AHP. Cada camada de entrada foi antes reclassificada, com auxílio da ferramenta “reclassify” para uma escala de proporção comum de cinco classes específicas e usando a ferramenta Weigthed Overlay, as camadas reclassificadas e a sua influência percentual no processo de recarga, foram integradas para por fim produzir o mapa potencial de recarga do aquífero que abastece a cidade de Xai-Xai.

#### **4.2.3. Análise da variação espacial condutividade eléctrica**

A determinação da qualidade da água com base nos valores de CE, feita com o auxílio da ferramenta IDW no ArcGIS.

Foram usados cerca de 300 dados de CE provenientes dos furos da área de estudo, os dados foram verificados para confirmar a existência de inconsistências e valores extremo.

Os valores foram posteriormente organizados numa folha Excel e exportados para o ArcMap onde, com auxílio da ferramenta IDW (inverse Distance Weighting) foi gerado o mapa final que mostra a qualidade da água em diferentes pontos da nossa área de estudo.

#### **4.2.4. Desenvolvimento do modelo hidrogeológico**

O modelo hidrogeológico conceptual foi desenvolvido integrando informações obtidas no mapa de recarga. Foi feita uma análise individual de cada um desses parâmetros onde o perfil deu informações sobre a geologia da área de estudo, desde a base até ao topo, deu informações sobre o relevo da região, a direcção preferencial do escoamento superficial. O mapa de recarga deu as potenciais zonas de recarga e a qualidade da água foi integrada como indicador das zonas onde a qualidade da água não é adequada.

Por fim todos esses parâmetros descritos, foram integrados e resultaram em um modelo que representa a realidade aproximada da área de estudo.

#### **4.2.5. Protecção dos furos de captação**

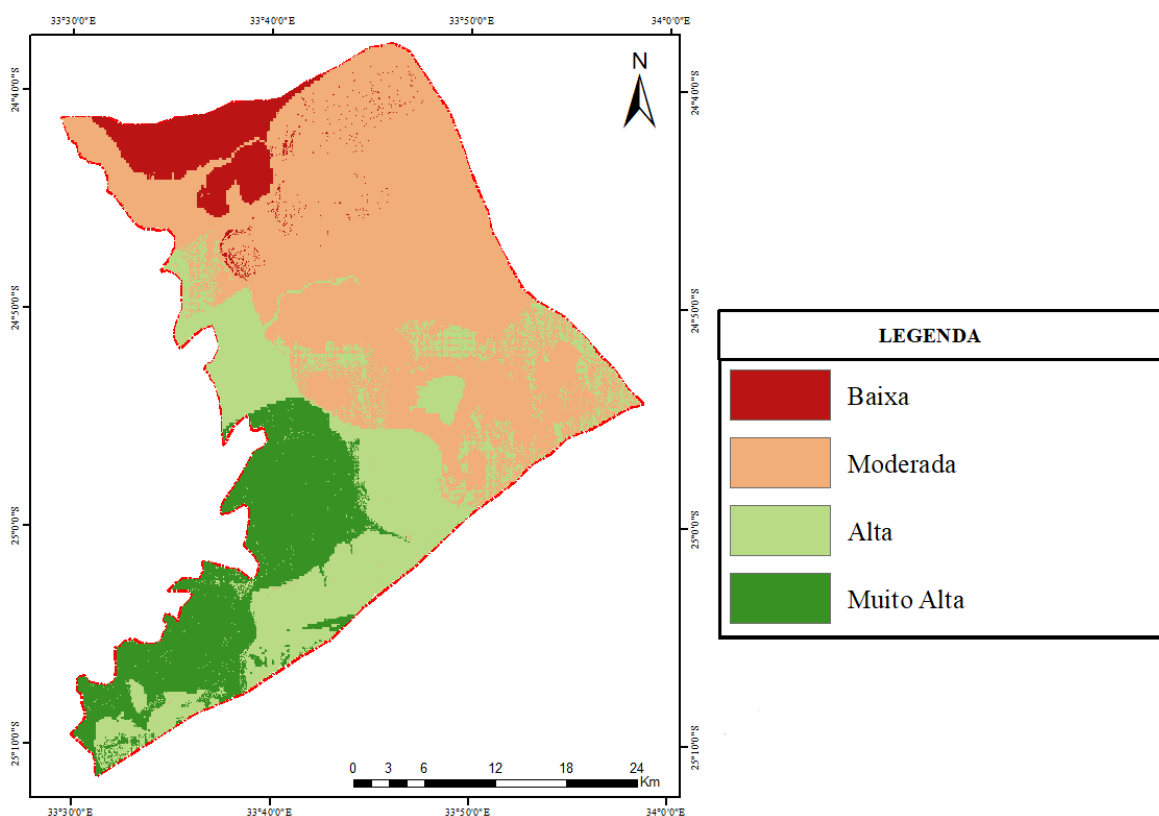
Para análise dos furos da captação existentes na área de estudo foram usados dados da localização dos furos obtidos no sistema de informação nacional de água e saneamento, onde a posterior foram organizados e com o apoio do Arcmap, foram criadas zonas de protecção (buffers zones) em torno de cada um dos furos de captação com o raio de 50m recomendado pela lei de terras, com o objectivo de identificar as áreas potencialmente vulneráveis a contaminação.

## CAPÍTULO V: APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e interpretados todos os resultados obtidos, onde primeiramente apresentam-se as zonas potenciais de recarga que foram determinadas a partir da combinação de vários critérios em ambiente que permitiu uma delimitação robusta, de seguida foi analisada a variação espacial da condutividade elétrica que serve como indicador da qualidade da água na área e por fim o modelo conceptual que evidencia o funcionamento do aquífero, bem como a protecção das captações que serve como indicador das áreas propensas a contaminação por actividades humanas.

### 5.1. Delimitação das zonas potenciais de recarga

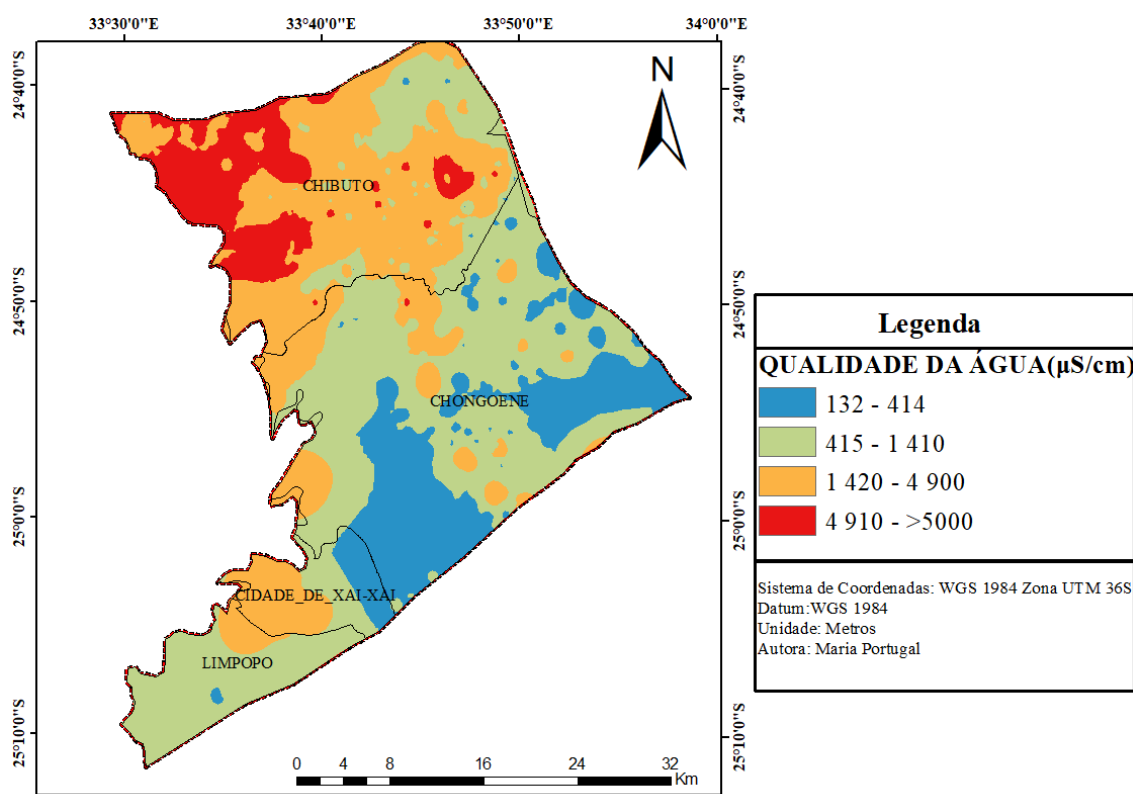
O mapa de recarga indica a distribuição espacial do potencial de infiltração e percolação das águas para o aquífero, ele resulta da integração dos factores seleccionados no método AHP. As classes de recarga estão representadas por diferentes cores, onde a cor vermelha representa áreas com baixo potencial de recarga, a cor laranja representa áreas com potencial de recarga moderado e as áreas verde claro e escuro zonas com alto e muito alto potencial de recarga conforme ilustrado na figura 13, zonas de recarga moderada constituem maior parte da área.



**Figura 13:** Mapa potencial de recarga das águas subterrâneas.

## 5.2. Variação espacial da condutividade eléctrica

A análise espacial dos valores de condutividade eléctrica, evidenciam contrastes marcantes na área de estudo, ele foi elaborado a partir da interpolação dos valores medidos nos pontos de amostragem. (figura 14).

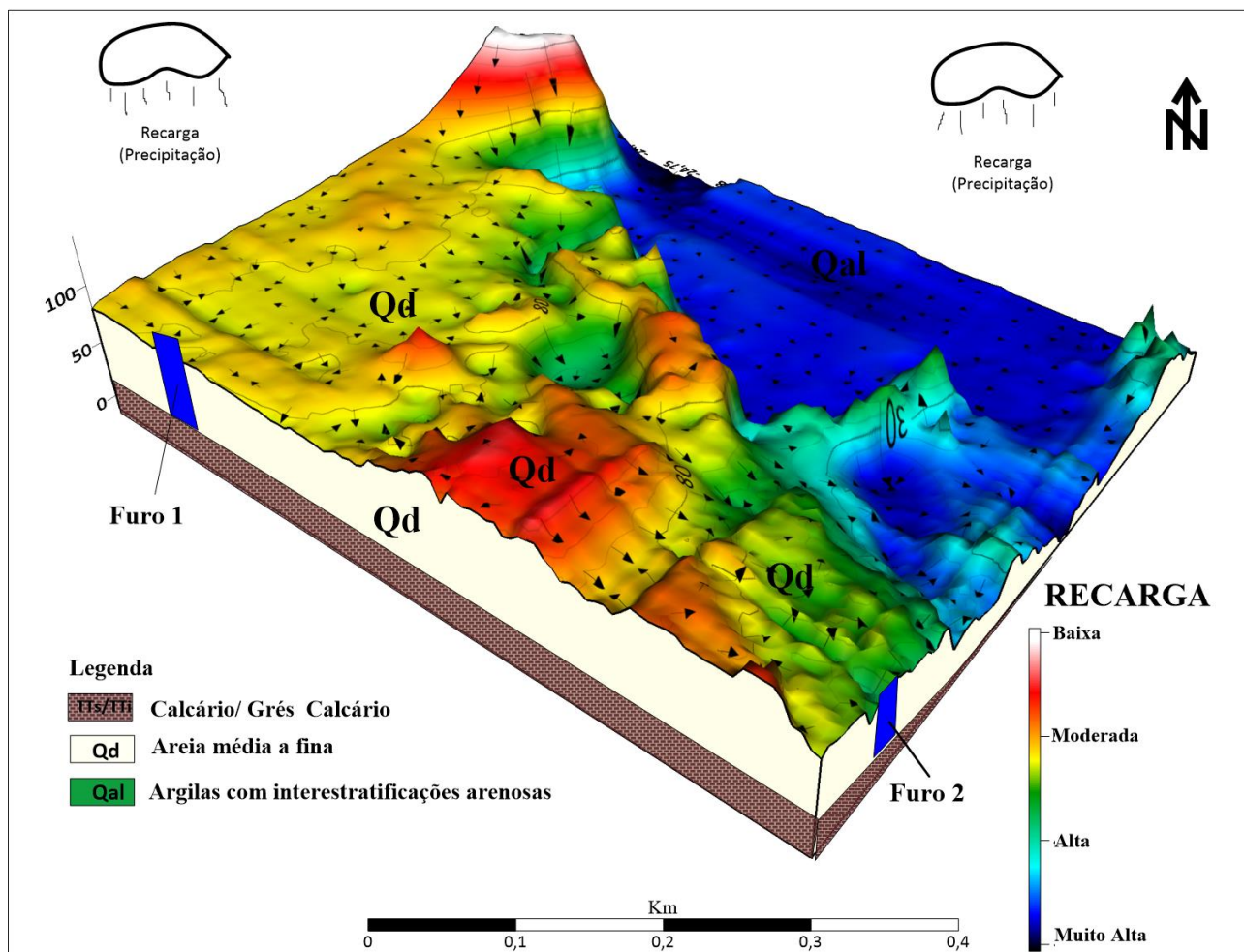


**Figura 14:** Mapa da variação espacial da condutividade eléctrica na área de estudo.

O mapa foi organizado em 4 classes onde a primeira classe agrupa valores de condutividade eléctrica na faixa dos 132-414  $\mu\text{S}/\text{cm}$  que indicam a existências de água de boa qualidade com baixa salinidade e adequada para o consumo humano. A segunda classe agrupa valores de CE na faixa dos 415-1410  $\mu\text{S}/\text{cm}$  indicando a existência de água de uma qualidade moderada pouco mineralizada, porém ainda aceitável para o consumo. A terceira classe agrupa valores de 1420-4900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  indicando água de má qualidade útil para a irrigação e por fim a quarta classe agrupa valores de 4910 - >5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , indicando a existência de água de muito má qualidade, que não é adequada tanto para o consumo, bem como para a irrigação (Davis & De Wiest, 2015).

## 5.3. Modelo hidrogeológico conceptual

O modelo hidrogeológico conceptual desenvolvido para a área de estudo sintetiza o funcionamento hidrogeológico do sistema. Através dele torna-se possível compreender o processo de recarga, armazenamento e escoamento subterrâneo do sistema aquífero (figura 15).



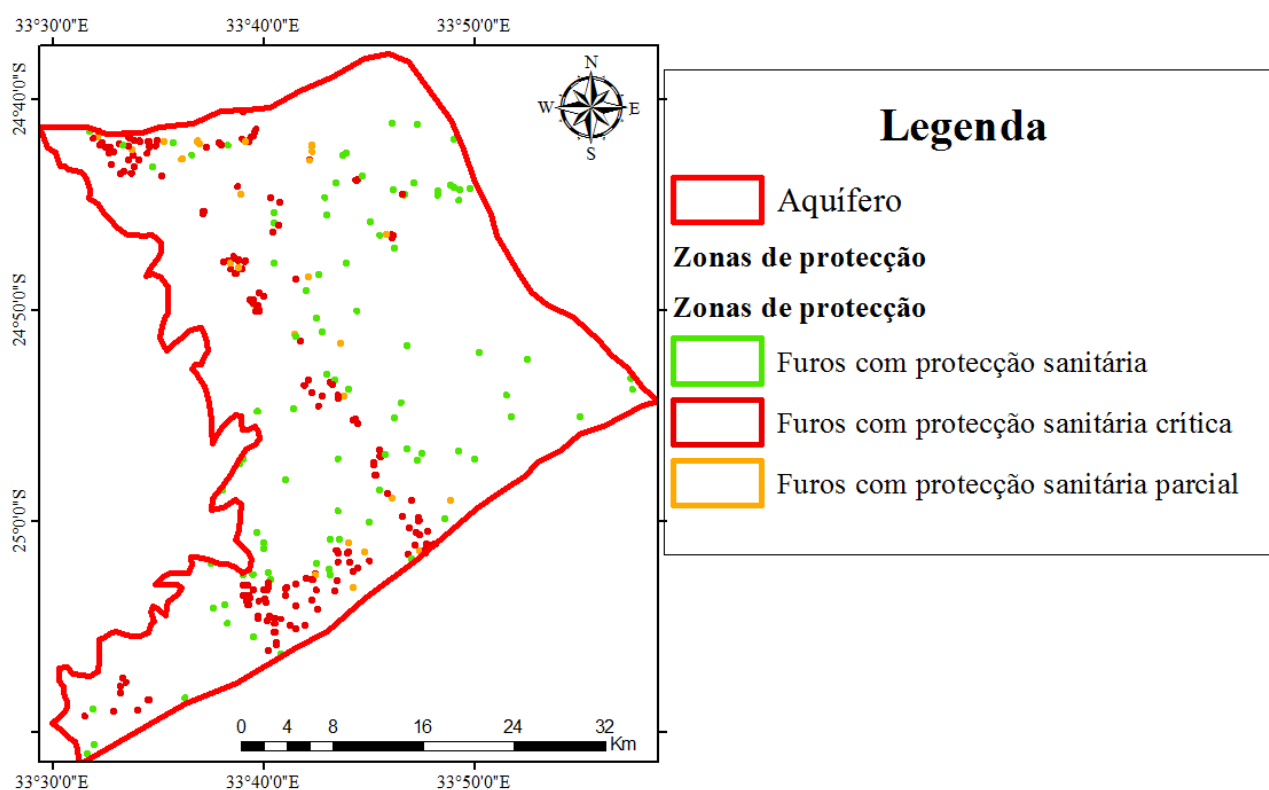
**Figura 15:** Modelo hidrogeológico conceptual simplificado da área de estudo.

Pode-se notar que a precipitação constitui a fonte primária da recarga, favorecida pelos solos arenosos e depósitos aluvionares de alta permeabilidade que permitem a infiltração da água, este processo assegura a reposição do aquífero. O fluxo subterrâneo tem direcção preferencial para as zonas de menor altitude, reflectindo assim o gradiente hidráulico natural, sendo assim o rio e as zonas húmidas assumem o papel de zonas de descarga natural.

#### 5.4. Protecção dos furos de captação

A análise dos furos da captação existentes na área de estudo foi feita com base nos buffers zone com um raio de 50m (figura 16), onde se observou o seguinte:





**Figura 16:** Mapa ilustrativo da protecção dos furos.

Os furos com protecção sanitária (buffers verdes) correspondem a 31% e representam áreas onde as captações respeitam de forma integral a distância de 50m em relação as habitações, estas são consideradas áreas com menor risco de contaminação directa por actividade humana. Os furos com protecção sanitária parcial (buffers laranjas) correspondem a 9% e representam zonas onde a distância dos 50m é parcialmente cumprida, são consideradas zonas de risco moderado. Os furos com protecção sanitária crítica (buffers vermelhos) correspondem a 60% e representam áreas onde não respeitam a distância dos 50m, ou seja, existem habitações dentro desse raio o que viola as normas de protecção, são zonas de alta vulnerabilidade aa contaminação microbiológica e até química.

## CAPÍTULO VI- DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, visando atender os objectivos propostos neste estudo, serão expostos e analisados os resultados obtidos durante a pesquisa, com vista a compreender o funcionamento do sistema aquífero e as alterações sofridas pelas pressões antrópicas e naturais.

O aquífero que abastece a cidade de Xai-Xai está localizado dentro de uma formação geológica constituída por sistemas de dunas (interiores e costeiras), que contêm formações do Quaternário, como areias e depósitos aluvionares que constituem o aquífero livre.

As áreas de alta e muito alta recarga compreendem na sua maioria zonas com protecção sanitária crítica, abrange bairros como Patrice Lumumba, Bairro 6 e 9 de Chongoene, Siaia Bairro 2, Bairro Fidel Castro. Estas áreas estão associadas a relevo planos e suaves, que favorecem a acumulação da água no solo permitindo que ela infiltre, são compostas por solos arenosos que possuem boa porosidade e boa condutividade hidráulica que permitem a infiltração e percolação da água e solos de aluviões correspondentes a planície do rio Limpopo, onde há uma mistura de areia, siltes e materiais argilosos que fazem com que a água se acumule por mais tempo no solo, infiltrando lentamente. As áreas urbanas têm se desenvolvido rapidamente, conduzindo consequentemente a impermeabilização dos solos afectando a capacidade de infiltração da água e aumentando o risco de contaminação do aquífero pelas actividades domésticas e agrícolas e indústrias, por esta razão correspondem a áreas prioritárias para a protecção.

As áreas de recarga baixa compreendem na sua maioria zonas com protecção sanitária crítica e abrange bairros como, Chimundo bairro 4, os Bairros 1,2,3,4 de Eduardo Mondlane, o Bairro 4 de Ka Taka, Bairro 25 de Junho onde a infiltração da água no aquífero é limitada, o que resulta em um abastecimento insuficiente. Mesmo estando localizado em uma área com solos capazes de permitir a infiltração da água, factores como a baixa precipitação, fraco acúmulo de água devido ao escoamento superficial, impermeabilização do solo e relevo acentuados limitam a capacidade de infiltração da água o que contribui para uma lenta renovação do aquífero.

As áreas de recarga moderada correspondem a Malehice bairro 1, Koka Missava bairros 3 e 4, Chegua Bairros 1 e 2, Banganhane bairros 1, 2, 3, 4, Bango bairro 2 correspondentes as dunas interiores. Apesar de estarem localizadas em zonas dunares factores como precipitação moderada, cobertura vegetal densa e relevo acentuado, contribuem para que a taxa de infiltração seja mais reduzida.

As análises dos valores de condutividade eléctrica revelaram variações significativas, onde valores mais elevados são encontrados na sua maioria em Chibuto, o que indica um maior tempo de residência da água no aquífero havendo menor renovação associada a baixas precipitações. Enquanto que valores mais baixos são encontrados a sul, zonas com precipitações mais elevadas e próximas ao rio onde a renovação e dissolução dos sais é mais frequente.

O modelo hidrogeológico mostra a direcção preferencial do fluxo que flui das zonas de maior gradiente hidráulico para as zonas de menor gradiente o que torna possível identificar as zonas de recarga e descarga. O vale do rio Limpopo e os lagos (Chevise, Lungé, Sanzative e Nhatsi) exercem um papel significativo como áreas de descarga durante períodos chuvosos e como áreas de recarga durante os períodos secos.

## CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos neste estudo foi possível chegar as seguintes conclusões:

- A delimitação das potenciais zonas de recarga pelo método AHP permitiu identificar com clareza os diferentes níveis de recarga, onde o nível de alta recarga está associado a planície de inundação onde há alta precipitação e relevo suave à plano e o nível mais baixo está associado a zonas com baixas precipitações e relevo acentuado
- A análise da variação espacial da Condutividade Eléctrica revelou uma clara correlação entre a degradação da qualidade da água e factores climáticos, pois os valores mais elevados de CE foram registrados junto ao distrito de Chibuto onde há baixas precipitações, consequentemente fraca renovação da água no aquífero e maior concentração de sais e os mais baixos na zona de Chongoene onde há alta precipitação consequentemente maior renovação da água no aquífero e menor concentração de sais.
- O modelo hidrogeológico conceptual elaborado sintetiza que o aquífero de Xai-Xai é um sistema predominantemente livre, alimentado principalmente pela infiltração directa da precipitação nas zonas de recarga. A descarga ocorre através fluxo natural em direcção à costa. A principal ameaça ao sistema está relacionada é a contaminação difusa e progressiva a partir da expansão urbana desordenada sobre as suas zonas de recarga principalmente na Cidade de Xai-Xai.
- O grau de protecção dos furos permitiu ver os seus diferentes níveis de susceptibilidade a contaminação. Os furos que obedecem a lei, os furos com protecção sanitária, ocupam áreas mais rurais e os vermelhos zonas urbanas (bairros Patrice Lumumba, Bairro 11, Malehice bairro 1, Koka Missava, Bairros 3 e 4) o que mostra que a expansão desordenada da população é um grande problema para preservação e manutenção do sistema de furos de água que abastece a Cidade de Xai-Xai.

## 7.2. RECOMENDAÇÕES

À luz das conclusões deste estudo, surgem importantes recomendações para direcções futuras de pesquisa:

- Trabalhos de campo para medições da taxa de infiltração in-situ;
- Realização de análises hidroquímicas completas para averiguar a existência de outras fontes contaminantes;
- Monitoria constante dos níveis de contaminação nas zonas de buffers vermelhos;
- Monitoria constante das zonas de descarga para observar a sua eficácia como zonas de recarga.

## BIBLIOGRAFIA

- (DNA), Direção nacional de águas. (1987). *Carta hidrogeológica de Moçambique*. Maputo: DNA.
- (INAMI), Instituto Nacional de Minas. (2008). *Carta geológica de Moçambique*. Maputo: INAMI.
- (INIA) Agronómica, Instituto Nacional de Investigação. (1990). *Carta de Solos de Moçambique*. Maputo: INIA.
- Abdalla, F. (2012). Mapping of groundwater prospective zones using remote sense and GIS techniques: A case study from the central eastern desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*.
- Agarwal, & Garg. (2016). . Remote sensing and GIS based groundwater potential & recharge zones mapping using multi-criteria. *Water Resource Managment*, 243-260.
- Allison, G. B., Gee, G. W., & Tyler, S. W. (1994). Vodose-Zone Techniques for Estimating GroundWater Recharge in Arid an semiarid Regions. *Soil Science Society of America Journal*, 6-14.
- ANA, A. N. (2016). *Hidrogeologia Conceitos Básicos*. Brasília.
- Anderson, M., Woessner, W., & Hunt, R. (2015). Applied Groundwater Modeling : Simulation of Flow and Advective Transport 2.ed. *Academic Press*.
- Ankiluyi, F., Olorunfemi, M., & Bayowa, O. (2018). Investigation of the influence of lineaments, lineament intersections and geology on groundwater yield in the basement complex terrain of Ondo State, Southwestern Nigeria. *Appllied Water Science*.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). Geochemistry, Groundwater and Pollution. *Leiden:Bakelma*.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 1–17.
- Barbosa, C. M., & Mattos, A. (2008). Conceitos e diretrizes para Recarga artificial dos aquíferos. *Aguas subterraneas*.
- Bera, A., Mukhopadhyay, & Barua. (2020). Delineation of groundwater potential zones in Karha river basin, Maharashtra, India. *Arab Journal of Geoscience*, 13-69.
- Bera, A., Mukhopadhyay, B., & Das, S. (2022). Groundwater vulnerability and contamination risk mapping of semi-arid. *ELSEVIERER*, 1-14.

- Borghetti, N. B., Borghetti, J. R., & Filho, E. F. (2011). *A integração das águas: Revelando o verdadeiro aquífero Guarani*. Curitiba.
- Carvalho, V. E. (2013). Modelagem Hidrogeológico De Uma Sub-Bacia Hidrográfica Da Zona Da Mata De Minas Gerais. 5-6.
- Chenini, I., & Ben, M. (2010). Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS-based soil water balance. *Journal Of Water Resource and protection*, 283-291.
- CHIRPS, C. h. (2020-2024). CHIRPS (climate hazards group), com uma resolução de 0,05° (5km), série temporal de 2020-2024.
- City-Facts. (2023). Xai-Xai, Giza, Mozambique: Climate and Weather.
- Cleary, R. W. (2007). Aguas Subterraneas . *Princeaton Groundwater*, 10-15.
- COUNCIL, N. R. (1994). Ground Water Recharge Using waters of impaired quality. *National Academies*.
- Dar, T., Raj, N., & Bhat, A. (2021). Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP). *Geology, Ecology, and Landscapes*, v. 5, n. 4, 292–307.
- Davis, S. N., & De Wiest, R. J. (2015). Hydrogeology. *New York, Wiley*.
- De Souza Barbosa, C. M., & Mattos, A. (2008). Conceitos e Diretrizes para Recarga Artificial de Aquíferos. *Águas subterrâneas* .
- Deepa, S. (2016). Groundwater recharge potential zones mapping in upper Manimuktha Sub basin Vellar river Tamil Nadu India using GIS and remote sensing technique. *Modeling Earth Systems and Environmental*, v-2, 1-13.
- DNGRH. (2025). *Seminário de águas subterrâneas*. Maputo .
- EPAL-Empresa Portuguesa das Águas livres. Lisboa. (24 de 8 de 2025). *Ciclo da hidrológico*. Obtido de EPAL: <https://www.epal.pt>
- Expert, M. (2023). Mozambique, Xai-Xai, Giza climate. Disponível em <https://www.mozambiqueexpert.com/en/mozambique-xai-xai-giza-climate/>.
- FAO. (1988). Soil map of the World. *UNESCO*.
- Feeter, C. W. (2001). Applied Hydrogeology. *Prentice Hall*.

- Feitosa, F., & Filho, J. (2000). *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. Serviço Geológico do Brasil.
- Feitosa, F., Filho, J., Feitosa, E. C., & Demetrio, J. G. (2008). *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. Brasília: Serviço Geológico do Brasil.
- Filho, V. J. (2018). Qualidade das águas subterrâneas rasas do aquíferos barreiras: Estudo de Caso em Benevides-PA. Belém.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater Englewood. *Prentice Hall*.
- Gebreslassie, H., Berhane, G., & Hagos, M. (2025). Water Harvesting and Groundwater recharge: A Comprehensive Review and Synthesis of current Practices. *Department of Geology*.
- GONÇALVES, J., Perreira, P. H., & Vieira, E. (2020). Evaluation of the groundwater recharge potential using GIS multi-criteria data analysis: a case study from district of Itabira, Minas Gerais, southeastern Brazil. *Ciência e Natura*, v. 42, n. 2020, 84.
- Healy, R. (2010). Estimating Groundwater Recharge. *Cambridge University Press*, 1-10.
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using Groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 91-109.
- Heath, R. (1983). Hidrologia básica de água subterrânea. United States. *Geological Survey Water Supply*, paper 2220.
- Kaewdum , N., & Chotpantararat, S. (2021). Mapping Potential Zones for Groundwater recharge Using a GIS Technique in thev Lower Khwae Hanuman Sub-basin Area, Prachin Buri Province, Thailand. . 1-16.
- Kariliraj, S., Chandrasekar, N., & Magesh, N. S. (2014). Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 7, n. 4, 1385–1401.
- Kemper, k. (2004). Água subterrânea — do desenvolvimento à gestão. *Hydrogeology journal*, 3-5.
- Koudouri, P., & Groom, B. (2010). Groundwater management: An overview of hydrogeology,economic values and principles of management. *In groundwater*.
- Kumar, P., Gopinath, G., & Seralathan, P. (2007). Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, southwest coast of India. *International Journal of Remote Sensing*, 5583–5601.



- Kumar, V. A., Mondal, N. C., & Amed, S. (2020). Identification of groundwater potential zones using RS, GIS and AHP techniques: A case study in a part of decan province, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 497-511.
- Lemacha, G. (2008). Groundwater potential for upper Tumet catchment, Merge and Komosha woredas, Benishangul-Gumuz region. Guide for GIS developers. *WaterAid Ethiopia and Ripple*.
- Lentswe, G. B., & Molwalefhe, L. (2020). Delineation of potential groundwater recharge zones using an analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*.
- Lerner, D. N. (2002). Identifying and quantifying urban recharge. *Hydrogeology Journal*, 143-152.
- Machiwal, D., & Jha, M. (2011). Assessment of groundwater potential in semi arid region of India using remoting sensing, GIS and MCDM techniques. *Water Resources managmnet* , 1359-138.
- Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2018). GIS based assessment and mapping of Groundwater vulnerability to pollution in semi-arid region of India. *Environmental Monitoring and assessment*, 1-6.
- Magesh, N. M., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 189–196.
- Mahmud, M., Roy, D., & Paul, P. (2021). Natural Groundwater Recharge: A Review on the Estimation Methods. *Bangladesh R*, 50-51.
- Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria Decision Analysis. *Jhon Wiley & Sons*, 10-15.
- MICOA, M. (2012). PERFIL AMBIENTAL E MAPEAMENTO DO USO ACTUAL DA TERRA NOS DISTRITOS DA ZONA COSTEIRA DE MOÇAMBIQUE. 3-4.
- Miguel, N. C. (2024). Modelo Hidrogeológico Conceptual de Aquíferos do Arquipélago de Bazaruto Nélío Clésio. *Departamneto de Geologia*, 15-17.
- Neto, A. C., & Rodrigues, L. N. (2020). Evaluation of groundwater recharge estimation methods in a watershed in the Brazilian Savannah. *Environmental Earth Science*, 140-145.

- Nimmo, J., Stonestrom, D., & Healy, R. (2008). Aquifers: Recharge. *US Geological Survey*, 55-58.
- Nunes, I., Salência, C., Juízo, D., & Chirindja, F. J. (2024). *Caracterização dos sistemas hidrogeológicos que servem de fontes de abastecimento de água na cidade de Xai-Xai. MESTRADO EM HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS*. Maputo.
- Organization, W. H. (2017). Guidelines for Drinking Water Quality. *WHO*.
- PDUL, P. D. (2020). *água e saneamento*.
- Priya, U., Iqbal, M., Salam, M., & Uddin, M. (2022). Sustainable Groundwater Potential Zoning with Integrating GIS, Remote Sensing, and AHP Model: A case from North-Central Bangladesh. *Sustainability*, 7-10.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016). Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: case of study at Mehran Region, Iran. *Water*, 12.
- Rajasekhar, A., Ajaykumar, K., & Sudarsana, G. R. (2021). Identification of artificial groundwater recharge zones in semi-arid region of southern India using geospatial and integrated decision-making approaches. *Environmental Challenges*.
- República de Moçambique. (1997). *Lei de terras: Lei n° 19/97 de 1 de Outubro*. Maputo: Boletim da República.
- República de Moçambique. (1991). *Lei de água: Lei n° 16/91 de 3 de Agosto*. Maputo: Boletim da República.
- República de Moçambique. (2004). *Regulamento sobre a qualidade de água para o consumo humano. Diploma Ministerial n° 180/2004 de 15 de Setembro*. Maputo: Boletim da República.
- Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. *McGraw Hill International Book; New York*, 50-290.
- Saranya, T., & Saravanan, S. (2020). Groundwater potential zone mapping using analytical hierarchy process (AHP) and GIS for Kancheep. *Modeling Earth System and Environment*.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, G. P. (2001). Choosing Appropriate Techniques For Quantifying Groundwater Recharge. *Hydrogeology Journal*.
- Souza, M. L. (2021). Recarga de Aquífero. *UEM*.

- Tadross, M., Jack, C., & Hewitson, B. (2005). On RCM-based projections of change in southern African summer climate. *Geophysical Research Letters*, 32.
- UNESCO. (2012). Groundwater Resources Assessment. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*.
- USGS. (2010). Estimating Groundwater recharge. *Cambridge University press*, 15-42.
- Vargas, T. D., Sgoria, V., Belladonna, R., & Vedana, L. A. (2022). Mapas de zonas potenciais de recarga da água subterrânea como uma nova ferramenta para a segurança hídrica do abastecimento público. *Revista águas subterrâneas*, 2-3.
- Vasconcelos, S. M. (2005). Avaliação da Recarga Subterrânea Através da Variação do Nível Potenciométrico no Aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.