



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
M O N D L A N E

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLÓGIA

Licenciatura em Cartografia e Pesquisa Geológica

PROJECTO CIÊNTEFICO

Título

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero  
Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo

**Autora:** Savata Alberto Banze

Maputo, Agosto de 2023



**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**Licenciatura em Cartografia e Pesquisa Geológica**

**PROJECTO CIÊNTÍFICO**

**Título**

**Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero  
Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo**

**Autora:** Savata Alberto Banze.

**Curso:** Licenciatura em Cartografia e Pesquisa Geológica

**Supervisor:** Prof. Doutor Farisse Chirindja

**Co-supervisor:**

Dr.

Agostinho Vilanculos

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho, fruto da minha fé e perseverança é dedicado a mim mesma por ter encarado esse desafio tão grande e complexo, e mesmo assim ter superado.

Dedico também a minha família por acreditar em mim e me apoiar incondicionalmente.

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu, **Savata Alberto Banze**, declaro por minha honra, que este trabalho científico é resultado da minha investigação pessoal e das orientações do meu supervisor e co-supervisor e que o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionados tanto no texto como na sua bibliografia final.

Declaro ainda que este trabalho não foi feito e nem apresentado nesta presente Instituição para obtenção de qualquer grau académico.

A candidata

---

(Savata Alberto Banze)

## AGRADECIMENTOS

*“Que diremos, pois, diante destas coisas? Se Deus é por nós quem será contra nós?”... “Aquele que não poupou seu próprio Filho... como não nos dará com Ele todas as coisas?”* (Romanos 8:31-32), agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter permitido com que um dos meus sonhos se concretizasse.

Imensa gratidão aos meus pais Alberto Cossa e Teresa Macuácuá pelos ensinamentos, durante a jornada da vida e pelos ensinamentos que serviram de fonte de inspiração para concretizar um sonho tão importante.

Aos meus irmãos Julai, Vera e Karen (Banze), meus tios Vicente, Rute, Rosa, Delfina e Sandra que sempre se demonstraram amigos e dispostos a ajudar no que precisasse, pelo apoio moral e pela partilha de experiências que fizeram com que escolhesse o melhor caminho.

O meu grande agradecimento em especial ao meu supervisor, Dr. Farisse Cherindja e ao meu co-supervisor Dr. Agostinho Vilanculos pelo apoio e acompanhamento, durante a realização do trabalho e pela transmissão do conhecimento.

Agradeço à Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (DNGRH), por terem disponibilizado parte muito importante do material usado para o estudo e estarem sempre aptos a ajudar em especial a dra. Filoca, Mestre Dércio Zandamela e Dr. Chairuca.

Agradecer ao Romário da Beatriz Inácio por todo apoio, companheirismo diário que me motivam a querer crescer tanto na vida pessoal como profissional.

E por fim agradecer aos professores e meus colegas de turma com quem partilhei os melhores momentos durante o processo da minha formação, em especial a Edna Zandamela, Cardoso Bande, Regina, Márcia, Aldevina, Arminda, Judite, Glayds e Nélia com os quais desenvolvi laços de amizade que serviram de ombro amigo nos momentos mais difíceis no Departamento de Geologia e aos demais, que directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## **RESUMO**

Este projecto científico teve como enfoque a estimativa da recarga do aquífero freático da região metropolitana do grande Maputo, onde foram empregues dois métodos: o método balanço hídrico baseado em dados de precipitação e evapotranspiração real que foi calculado usando a formula de *Thorntwaite*, para os anos de (1940-2000) que corresponde a 60 anos hidrológicos e o método variação do nível freático utilizando dados de 11 piezómetros para o período (2015-2019) correspondente a 4 anos. O método balanço hídrico indicou para o período de estudo um défice anual que 73.6 a 159.6mm/ano com predominância nos meses de Abril á Novembro e excesso que varia de 23.9 a 39.3mm/ano distribuídas nos meses de Fevereiro á Março. Para o método variação do nível freático, adoptou-se um rendimento específico médio de 0,21 a 0,27 considerando a media dos depósitos de areias finas, médias e grosseiras, segundo a classificação de Morris e Johnson (1967), os valores médios da recarga anual variaram de 56.2 á 215 mm/ano. Os resultados obtidos com esta pesquisa foram úteis para o entendimento do comportamento do sistema aquífero livre do grande Maputo, auxiliando nos processos de gestão das águas subterrâneas.

**PALAVRAS-CHAVES:** Aquífero, Recarga de aquífero, *Thorntwaite*.

## ÍNDICE

DEDICATÓRIA .....	i
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO.....	iv
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABELAS.....	xii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xv
CAPITULO I .....	1
1.0 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	2
1.2 JUSTIFICATIVA .....	2
1.3 OBJECTIVOS.....	3
1.3.1 Objectivo Geral .....	3
1.3.2 Objectivo Específico .....	3
1.4 HIPÓTESE.....	3
1.5 PERGUNTA DE PESQUISA.....	3
1.6 ACTIVIDADES.....	4
1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
CAPITULO II.....	6
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1 INTRODUÇÃO .....	6
2.2 RECARGA DE AQUÍFEROS.....	6
2.3 IMPORTÂNCIA E OBJECTIVOS DA RECARGA DE AQUÍFEROS.....	8
2.4 FORMAS DE RECARGA DE AQUÍFEROS .....	8
2.5 FACTORES QUE PODEM INFLUENCIAR NO PROCESSO DE RECARGA DE AQUÍFEROS .....	12
2.6 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS .....	17

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da  
Região Metropolitana do Grande Maputo

---

2.6.1 Métodos de balanço hídrico .....	18
2.6.2 Métodos físicos baseados em relações hidrodinâmicas na zona saturada.....	21
2.7 Vantagem e Desvantagem dos Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos .....	24
CAPITULO III.....	26
3.0 DISCRICÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	26
3.1 INTRODUÇÃO .....	26
3.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	26
3.3 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO.....	27
3.3.1 Geologia e Geomorfologia Regional.....	27
3.4 TIPOS DE SOLO.....	29
3.5 Uso / cobertura do solo .....	31
3.7 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	34
3.7.1 Cima e Precipitação.....	34
CAPITULO IV.....	36
4.0 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	36
4.1 INTRODUÇÃO .....	36
4.1.1 Revisão Bibliográfica.....	36
4.1.3 <i>Softwares usados</i> .....	36
4.2 Seleção do Método.....	37
4.2.1 Método do Balanço hídrico .....	37
4.2.2 Flutuação/variação do nível freático .....	38
4.3 Processamento de Dados.....	38
CAPITULO V.....	39
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	39
5.1 Cálculo da recarga do aquífero usando os métodos de Balanço Hídrico e Flutuação do Nível Freático.....	39
5.1.1 Método de Balanço Hídrico .....	39
5.1.2 Variação do Nível Freático .....	46
CAPÍTULO VI.....	62
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	62
CAPÍTULO VII .....	66



Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da  
Região Metropolitana do Grande Maputo

---

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....	66
7.1 CONCLUSÃO .....	66
7.2 RECOMENDAÇÕES .....	67
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
8. ANEXO.....	i
8.1 Tabelas de dados estatísticos .....	i

## LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

ALT	Alteração no armazenamento
ARM	Armazenamento
BHC	Balanço Hídrico Climatológico
CENACARTA	Centro Nacional de Cartografia
CFPAS	Centro de Formação Profissional de Água e Saneamento.
DEF	Deficiência.
DNAAS	Direcção Nacional de Abastecimento de Águas e Saneamento
DNGRH	Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos.
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
EXC	Excedente
FIPAG	Fundo de Investimento e Património do Abastecimento de Água.
FIG	Figura
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia.
INE	Instituto Nacional de Estatística.
Kg/m <sup>3</sup>	Quilogramas por metros cúbicos
MISAU	Ministério da Saúde
MOPHRH	Ministério das Obras Publicas, Habitação e Recursos Hídricos
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MTA	Ministério da Terra e Ambiente
m <sup>3</sup> /d	Metros cúbicos por dia
m	Metros
NA	Nível de Água
NegAc	Negativa Acumulada
N/m <sup>2</sup>	Newton por metros quadrados
%	Porcentagem
UEM	Universidade Eduardo Mondlane

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da  
Região Metropolitana do Grande Maputo

---

R	Recarga
T	Temperatura média mensal (C°)
SY	Rendimento Especifico.
Tab	Tabela
VNF	Varição do Nível Freatico
WTF	<i>Water Table Flutation</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1:Ciclo hidrológico na recarga natural de aquíferos (Fonte: <a href="https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Aguas-Subterraneas-Origem-e-ocorrencia">https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Aguas-Subterraneas-Origem-e-ocorrencia</a> , 2020).....	6
Fig. 2: Descrição esquemática de um sistema de recarga aquífera (Fonte: MMA, 2007).....	7
Fig. 3: Descrição esquemática de um sistema de recarga natural de aquíferos (Fonte: <a href="https://www.ecodebate.com.br/2014/06/10/aguas-superficiais-e-subterraneas-e-meio-ambiente-artigo-de-roberto-naime/">https://www.ecodebate.com.br/2014/06/10/aguas-superficiais-e-subterraneas-e-meio-ambiente-artigo-de-roberto-naime/</a> ).....	9
Fig. 4: Sistema de recarga artificial de aquífero por meio de construção de bacias (Fonte: <a href="https://mdgeo.com.br/por-que-investir-na-recarga-artificial-de-aquiferos-para-a-protecao-dos-recursos-hidricos/2023/20/6">https://mdgeo.com.br/por-que-investir-na-recarga-artificial-de-aquiferos-para-a-protecao-dos-recursos-hidricos/2023/20/6</a> ). ....	10
Fig. 5: Representação de um sistema de recarga: (A) recarga facilitada por injeção em dolinas, (B e C) recarga induzida por meio de construção de furos e (D) recarga acidental por meio de fossas sépticas não impermeabilizadas (Fonte: <a href="https://www.google.com/url">https://www.google.com/url</a> ). ....	11
Fig. 6: Representação esquemática dos principais processos hidrológicos em um balanço hídrico (Fonte: Eilers, 2002; Pereira <i>et al.</i> , 2002). ....	19
Fig. 7: Representação esquemática da curva de recessão ou rebaixamento hidrostático (Fonte: Freitas, 2010). ....	23
Fig. 8: Mapa de Localização Geográfica da Área de Estudo (Fonte: Modificado pela Autora). .	26
Fig. 9: Mapa geológico da área de Estudo (Fonte: Modificado pelo Autor). ....	28
Fig. 10: Distribuição espacial do Uso / cobertura do solo na área de estudo (Fonte: Nogueira, 2017). ....	32
Fig. 11: Perfis Elaborados no aquífero do Grande Maputo (Fonte: Cendón <i>et al.</i> , 2020).....	34
Fig. 12: Distribuição temporal da precipitação (mm) e temperatura (°C) na área de estudo (Fonte: INAM).....	35
Fig. 13: Representação dos excedentes, deficiências hídricas, precipitação, evapotranspiração potencial e real (P1) (Fonte: Elaborado pela autora). ....	42
Fig. 14: Representação dos excedentes, deficiências hídricas, precipitação, evapotranspiração potencial e real (P2) (Fonte: Elaborado pela autora). ....	43

Fig. 15: Representação dos excedentes, deficiências hídricas, precipitação, evapotranspiração potencial e real (P3) (Fonte: Elaborado pela autora). .....	44
Fig. 16: Representação dos excedentes e deficiência hídrica no solo (P4) (Fonte: Elaborado pela autora). .....	46
Fig. 17: Variação do nível piezométrico (m) (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	47
Fig. 18: Variação do nível freático (m) na estação de monitoramento de Montanhane (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	48
Fig. 19: Variação do nível piezométrico (m) em Pazimane (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	49
Fig. 20: Variação do nível piezométrico (m) em Faftine (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	50
Fig. 21: Variação do nível piezométrico (m) em Maluana (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	52
Fig. 22: Variação do nível piezométrico (m) de Checheche (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	53
Fig. 23: Variação do nível piezométrico (m) de Matilde (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	54
Fig. 24: Variação do nível piezométrico (m) de Gumbana (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	55
Fig. 25: Variação do nível piezométrico (m) de Triunfo (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	56
Fig. 26: Variação do nível piezométrico (m) de Lagoa Phati (Fonte: Elaborado pela Autora). ....	57
Fig. 27: Variação do nível piezométrico (m) de Chiau (Fonte: Elaborado pela Autora). .....	58
Fig. 28: Variação do nível piezométrico (m) de Camunguine (Fonte: Elaborado pela Autora). ...	59
Fig. 29: Análise espacial da recarga para o método balanço hídrico (Fonte: Modificado pela Autora). .....	60
Fig. 30: Análise espacial da recarga para o método variação do Nível Freático (Fonte: Modificado pela Autora). .....	61

## ÍNDICE DE TABELAS

Tab.1: Classificação da porosidade.....	16
Tab. 2:Variação do rendimento específico de acordo com a textura do material.....	23
Tab. 3: Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1940-2000 do ponto 1.....	40
Tab. 4: Processo de cálculo da Recarga pelo método Balanço Hídrico para o ponto 1.....	41
Tab. 5: Processo de cálculo da Recarga pelo método Balanço Hídrico para o ponto 2.....	42
Tab. 6: Processo de cálculo da Recarga pelo método Balanço Hídrico para o ponto 3.....	43
Tab. 7: Processo de cálculo da Recarga pelo método Balanço Hídrico para o ponto 4.....	44
Tab. 8: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz01 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	47
Tab.9: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz02 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	48
Tab.10: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz03 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	49
Tab. 11: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz04 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	51
Tab.12: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz05 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	52
Tab. 13: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz09 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	53
Tab. 14: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz10 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	54
Tab. 15: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz14 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	55
Tab. 16:Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz18 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	56
Tab. 17: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz19 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.....	57

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da  
Região Metropolitana do Grande Maputo

---

Tab. 18: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz20 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada..... 58

Tab. 19: Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz22 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada..... 59

## Lista de Anexos

Anexo 1: Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1940-2000 do ponto 2 (Fonte: Elaborado pela Autora).....	i
Anexo 2: Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1940-2000 do ponto 3 (Fonte: Elaborado pela Autora).....	ii
Anexo 3: Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1940-2000 do ponto 4 (Fonte: Elaborado pela Autora).....	ii
Anexo 4: Precipitação média mensal (Fonte: Elaborado pela Autora).....	iii
Anexo 5: Temperatura média mensal (Fonte: Elaborado pela Autora). ....	iii
Anexo 6: Evapotranspiração potencial (Fonte: Elaborado pela Autora). ....	iii
Anexo 7: Variação da Recarga (mm) (Fonte: ARA Sul, 2021).....	iii
Anexo 8: Recarga de aquíferos de Moçambique (Fonte: DNGRH, 2023). ....	iv



## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	16
Equação 2.....	17
Equação 3.....	18
Equação 4.....	22
Equação 5.....	39
Equação 6.....	39
Equação 7.....	39
Equação 8.....	40

## CAPITULO I

### 1.0 INTRODUÇÃO

A área de estudo tem registado um rápido crescimento da população e expansão para novas áreas peri-urbanas onde se notou uma fraca infra-estruturação e serviços formais de abastecimento de água. Para suprir as necessidades crescentes da população bem como alcançar as populações localizadas cada vez mais longe da rede formal tem havido um crescimento de abertura de furos de água por investidores privados que operam esses sistemas muitas vezes sem a devida formalização. O surgimento de novos operadores de água nas zonas de expansão da cidade tem preocupado as autoridades de gestão de água devido a ausência de coordenação e orientação sobre a forma apropriada de captação de água subterrânea (ARA Sul, 2011; Adamo, 2012; Wendland *et al.*, 2015; Silva, 2019).

Estudos realizados por Varnier & Hirata (2004) demonstraram pouco desempenho para estimar a recarga de aquíferos e alto grau de incerteza, principalmente quando se pretende aplicar uma metodologia que permite uma medição directa da recarga. Entretanto, estes estudos verificaram um bom desempenho ao estimar a recarga em aquíferos livres devido à sua simplicidade na estimativa de recarga directa. Esta simplicidade deve-se à rápida resposta aos eventos de precipitação por meio das variações temporais e padrões espaciais dos níveis de águas subterrâneas dada pelas medições dos níveis freáticos em piézômetros de monitoramento por um período de tempo pré-determinado (Healy & Cook, 2002; Delin *et al.*, 2007; USGS, 2007).

Em Moçambique poucos estudos foram desenvolvidos na área metropolitana do grande Maputo sobre a estimativa da recarga de aquíferos e é dentro deste contexto que surge este estudo, cujo propósito é fazer uma análise comparativa e apresentar os métodos de variação do nível freático e balanço hídrico como um meio de obtenção de dados que viabilizem uma gestão integrada dos recursos hídricos, maximização e/ou optimização do uso da água e o desenvolvimento da região.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

As águas subterrâneas constituem uma fonte estratégica para o abastecimento público em Moçambique e nos últimos tempos tem sido explorada de forma contínua, o que remete uma especial preocupação em relação aos impactos negativos que podem advir da sua exploração (Adamo, 2012). A região Metropolitana do Grande Maputo é principalmente abastecida pela água captada no rio Umbelúzi, a cerca de 30 km a Sul de Maputo e é tratada na estação com o mesmo nome com uma capacidade de aproximadamente 144,000,00 m<sup>3</sup>/d (FIPAG, 2012). A recente seca que assolou a Província de Maputo mostrou que o caudal do rio Umbelúzi foi insuficiente para continuar a abastecer as comunidades. Como consequência, houve uma deterioração na provisão de água potável e soluções descentralizadas foram encontradas como por exemplo, a construção de furos de água de gestão privada (Silva, 2019).

A exploração intensa dos recursos hídricos subterrâneos, o uso inadequado do solo, o incumprimento de normas legais e a urbanização, são factores que contribuem para a necessidade de quantificar a recarga pois a partir desse dado pode ser estimado o volume que poderá ser bombeado em uma região durante um certo período (Batista *et al.*, 2017). No entanto, há falta de estudos sobre a recarga de aquíferos, na região metropolitana do Grande Maputo, o que pode influenciar directamente na má gestão de água, pois estes aquíferos abastecem cerca de 65% da população que vive dentro dessa área (Silva, 2019).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho justifica-se pela ausência de estudos sobre a quantificação de águas subterrâneas, e da disponibilidade hídrica de um aquífero, principalmente porque, a região do Grande Maputo oferece uma boa oportunidade de estudo e embora tenha poucos dados. Contudo, em comparação com outras partes do país, a região do Grande Maputo apresenta um elevado número de dados hidrogeológicos disponíveis. Este pressuposto serviu de base para a realização do presente projecto científico no aquífero de Grande Maputo, na perspectiva de melhorar e contribuir com informação relevante para a melhor gestão integrada dos recursos hídricos do país.

## 1.3 OBJECTIVOS

### 1.3.1 Objectivo Geral

Estimar a recarga do aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo.

### 1.3.2 Objectivo Específico

- Calcular a recarga usando os métodos de Balanço Hídrico e flutuação do Nível Freático do aquífero freático da área de estudo;
- Comparar os resultados dos dois métodos de cálculo obtidos;
- Fornecer subsídios científicos para uma gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos no aquífero do Grande Maputo.

## 1.4 HIPÓTESE

**Hipótese Alternativa ( $H_0$ ):** Os aquíferos freáticos têm a tendência de estar em pequenas profundidades, com ausência de uma camada impermeável, por cima do aquífero, podendo desse modo, influenciar na alta recarga dos aquíferos, na área metropolitana do Grande Maputo.

**Hipótese nula ( $H_1$ ):** Os aquíferos freáticos não têm a tendência de estar em pequenas profundidades, com ausência de uma camada impermeável, por cima do aquífero, podendo desse modo, influenciar na alta recarga dos aquíferos, na área metropolitana do Grande Maputo.

## 1.5 PERGUNTA DE PESQUISA

Este projecto visa responder a seguinte pergunta de pesquisa: **Qual é a quantidade de água que é armazenada no sistema aquífero do Grande Maputo?**

Esta pergunta será respondida pelos métodos de estimativa de recarga dos aquíferos seleccionados para a área de estudo e espera-se encontrar um método que se considere perto da realidade e aplicável noutros locais deste vasto Moçambique e que a metodologia usada possa ser replicada para outros aquíferos não só em Moçambique mas também noutros países que necessitam de uma gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos.

## **1.6 ACTIVIDADES**

O presente projecto científico teve as seguintes actividades:

- Pesquisa bibliográfica que consistiu na recolha de informações em artigos de revistas científicas, publicações da internet, trabalhos de licenciatura anteriores e livros que abordam assuntos que avaliam a recarga de aquíferos e os métodos de análise para os parâmetros identificados;
- Recolha e tratamento dos dados;
- Discussão e interpretação dos resultados, que consistiu na compilação de informação e interpretação dos resultados, correlacionando os diferentes resultados obtidos de cada método aplicado;
- Conclusões e recomendações.

## **1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O presente trabalho é composto por sete capítulos que constituem o seu corpo. A anteceder os capítulos, encontram-se os elementos pré-textuais nomeadamente, dedicatória, agradecimentos, resumo, o índice geral, lista de acrónimos e símbolos, lista de figuras, a lista de tabelas e a lista de equações. A seguir ao corpo, encontra-se a parte pós-textual, da qual fazem parte os anexos e as referências bibliográficas.

O primeiro capítulo faz uma introdução ao trabalho e aborda de forma generalizada alguns aspectos referentes ao projecto científico. Este capítulo faz referência aos motivos que inspiraram a realização deste trabalho, às metas que se pretendem atingir, assim como aos mecanismos que foram seguidos para a concretização dos objectivos pretendidos.

O segundo capítulo aborda conceitos chaves que compreende a revisão bibliográfica sobre os aspectos importantes para o trabalho.

No terceiro capítulo refere-se a área de estudo, contem as descrições e características fisiografias da área, bem como as características climáticas, a hidrológicas e hidrogeológicas, o uso e cobertura de terra e as características socioeconómicas da área de estudo.

## Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo

---

Inicia-se o quarto capítulo com uma análise de metodologias e descrição dos materiais e os métodos usados para a realização do trabalho.

No quinto capítulo é onde são apresentados dos resultados

No sexto capítulo apresenta se a discussão dos resultados.

Finalmente, o sétimo capítulo refere-se às conclusões e recomendações.

## CAPITULO II

### 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 INTRODUÇÃO

A revisão da literatura apresenta algumas definições e conceitos básicos relevantes que auxiliam melhor a compreensão do trabalho. O capítulo explica detalhadamente o que é recarga de aquíferos, a sua relação com o ciclo hidrológico, tipos de recarga, bem como os factores que influenciam na recarga de aquíferos. Ainda neste capítulo faz-se menção de diferentes métodos de cálculo de recarga de aquíferos e vantagens e desvantagens da sua utilização.

#### 2.2 RECARGA DE AQUÍFEROS

A recarga é definida como o fluxo descendente de água que atravessa o nível freático e atinge a zona saturada (aquífero), acrescentando o volume da água no armazenamento subterrâneo (Doble & Crosbie, 2016). A principal fonte de recarga natural é a chuva que através da infiltração profunda alcança os aquíferos. Outras fontes de recarga incluem a infiltração de águas superficiais (rios, canais e lagos) e os processos induzidos por actividades antrópicas, como irrigação e urbanização (Paiva, 2006) (Fig.1).

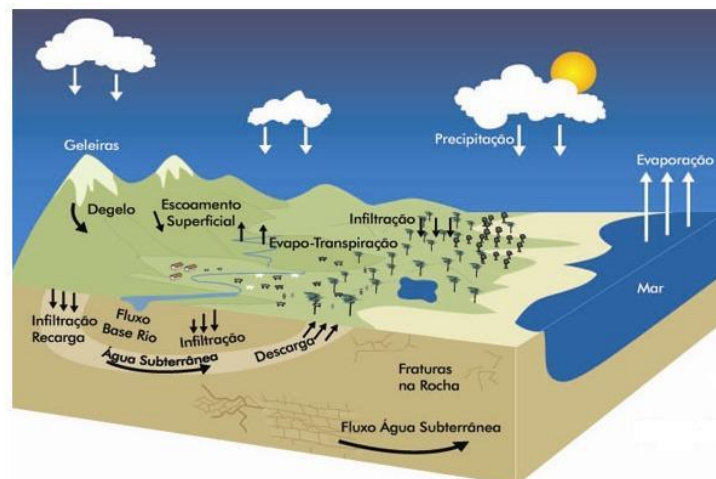
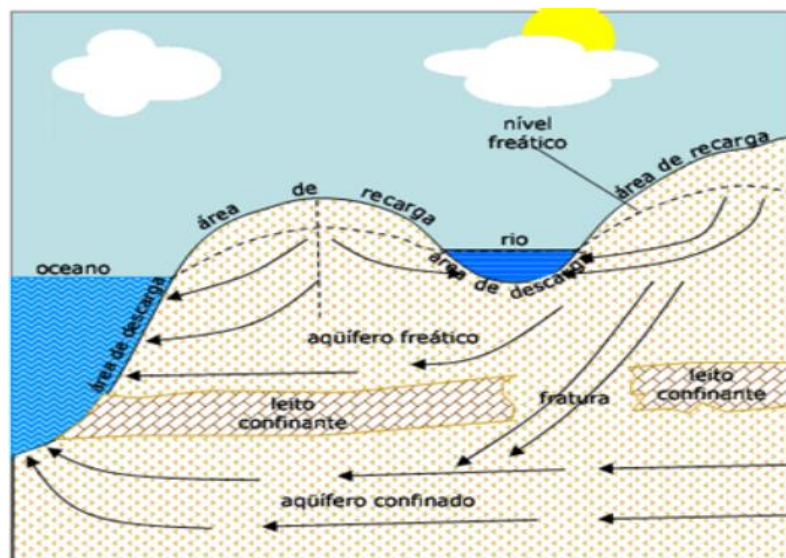


Fig. 1: Ciclo hidrológico na recarga natural de aquíferos (Fonte: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Aguas-Subterraneas-Origem-e-ocorrencia>, 2020).

Sendo a chuva a principal fonte da recarga dos aquíferos e porque nem toda a água da chuva participa na recarga, quando ela chega na superfície pode seguir os diferentes caminhos MMA (2007):

- Infiltra e percola no solo ou nas rochas, podendo formar aquíferos, ressurgir na superfície na forma de nascentes, fontes, pântanos, ou alimentar rios e lagos;
- Flui lentamente entre as partículas e espaços vazios dos solos e das rochas, podendo ficar armazenada por um período muito variável, formando aquíferos;
- Evapora retornando à atmosfera. Em adição a essa evaporação da água dos solos, rios e lagos, uma parte da água é absorvida pelas plantas, essas, por sua vez, liberam a água para a atmosfera através da transpiração;
- Congela formando as camadas de gelo nos topos da montanha e geleiras.

Para as outras fontes de recarga dum aquífero, a recarga pode acontecer de forma directa ou indirecta (Oliveira, 2017). A recarga directa é aquela em que os aquíferos são reabastecidos por meio de infiltração directa das águas no solo/rocha, esta infiltração ocorre em toda superfície dos aquíferos livres ou, no caso dos aquíferos confinados, nas áreas de afloramento (áreas onde a rocha aparece na superfície) (Fig.2).



**Fig. 2:** Descrição esquemática de um sistema de recarga aquífera (Fonte: MMA, 2007).



A recarga indirecta acontece nos locais em que os aquíferos não estão em contacto directo com as águas superficiais, mas continuam a ser recarregados. Nesse caso, os aquíferos recebem água através de outras rochas. As áreas de recarga indirecta geralmente estão localizadas em altos topográficos (morros, serras, etc.) e afloramentos de rochas sedimentares que são áreas extremamente importantes para a manutenção da qualidade e quantidade das águas subterrâneas. Portanto, é fundamental que estas áreas sejam protegidas, evitando-se o desmatamento, o uso incorrecto dos solos e a instalação de actividades potencialmente poluidoras (Jones, 1997).

### **2.3 IMPORTÂNCIA E OBJECTIVOS DA RECARGA DE AQUÍFEROS**

Segundo Barbosa *et al.* (2008), a recarga de aquíferos tem como finalidade aumentar a disponibilidade da água e, eventualmente, resolver problemas localizados, como o desenvolvimento de tecnologias de recarga artificial, utilizando efluentes adequadamente tratados. Esta modalidade de recarga de aquíferos é direccionada para os seguintes objectivos (Hespanhol, 2003):

- Proporcionar tratamento adicional de efluentes;
- Aumentar a disponibilidade de água em aquíferos potáveis ou não potáveis;
- Proporcionar reservatórios de água para uso futuro;
- Prevenir subsidência do solo;
- Prevenir a intrusão de cunha salina, em aquíferos costeiros.

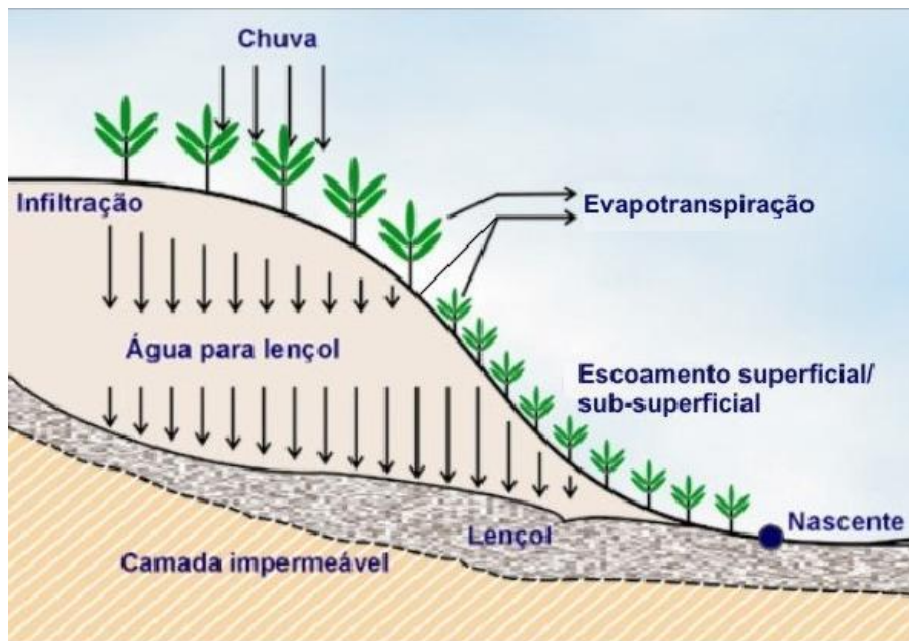
O conhecimento das taxas de recarga é importante para construção de modelos de fluxo subterrâneo que são ferramentas importantes para o estudo de cenários de extracção de água, bem como para o estudo de cenários de extracção de água subterrânea e a vulnerabilidade de aquíferos, podendo também ser utilizado em casos de contaminação aquífera (Mattiuzi, 2013).

### **2.4 FORMAS DE RECARGA DE AQUÍFEROS**

A recarga de aquíferos pode ocorrer de diversas formas: natural e artificial que pode ocorrer de forma facilitada, induzida e acidental (Diamantino, 2005).

**a) Recarga Natural:** A recarga natural é definida como um processo que consiste na infiltração das águas pluviais que são posteriormente armazenadas no solo ou nos espaços vazios das

rochas, sem intervenção humana. Alterações nas áreas de recarga como impermeabilizações e desmatamento afectam o processo de recarga natural e consequentemente o ciclo hidrológico (Nunes, 2017). A recarga natural dos aquíferos dá-se em áreas sob a influência de dois factores fundamentais: a disponibilidade de água; seja proveniente de precipitação pluviométrica ou de corpos de água superficiais; e a presença de formações geológicas que permitam a infiltração e transporte subterrâneo da água (ex. solos arenosos, fracturas) (Moura, 2004) (Fig.3).



**Fig. 3:** Descrição esquemática de um sistema de recarga natural de aquíferos (Fonte: <https://www.ecodebate.com.br/2014/06/10/aguas-superficiais-e-subterraneas-e-meio-ambiente-artigo-de-roberto-naime/>).

A água que se infiltra no solo fica sujeita à evaporação e pode ser absorvida pelas plantas passando posteriormente pela evapotranspiração, ou pode escoar em profundidade em direcção à zona saturada. A recarga natural é responsável pela formação e manutenção dos recursos hídricos subterrâneos e resulta da diferença entre as entradas (precipitação, infiltração a partir dos rios, lagos e outros corpos hídricos superficiais) e as saídas de água para o solo (evapotranspiração e escoamento superficial) (Doble & Crosbie, 2016).

**Recarga artificial** – A recarga artificial pode ser definida como uma actividade planeada cujo objectivo principal consiste em aumentar a quantidade de água subterrânea disponível, através da construção de infraestruturas projectadas para aumentar a recarga natural, ou para facilitar a percolação das águas superficiais ou para introduzir directamente a água no aquífero através de furos de injeção, pode ser praticada, a princípio, em qualquer tipo de formação permeável que tenha condições de armazenar e transmitir água (Diaz *et al.*, 2000 e Diamantino, 2005).

De acordo com Eden *et al.* (2007), a recarga artificial é o processo de adicionar água a um aquífero. Enquanto Roseiro (2009), define recarga artificial de aquíferos como sendo o armazenamento de excedentes hídricos em meio subterrâneo nos períodos de maior disponibilidade para serem utilizados em períodos de seca ou escassez. Para Bouwer (2002), a recarga artificial de aquíferos é alcançada através da introdução de água superficial em bacias, valas ou outros dispositivos, que permitem a infiltração de água no solo até atingir o aquífero (Fig.4) A recarga artificial pode ser facilitada, induzida e acidental (Fig.5).



**Fig. 4:** Sistema de recarga artificial de aquífero por meio de construção de bacias (Fonte: <https://mdgeo.com.br/por-que-investir-na-recarga-artificial-de-aquiferos-para-a-protecao-dos-recursos-hidricos/2023/20/6>).



**Fig. 5:** Representação de um sistema de recarga: (A) recarga facilitada por injeção em dolinas, (B e C) recarga induzida por meio de construção de furos e (D) recarga acidental por meio de fossas sépticas não impermeabilizadas (Fonte: <https://www.google.com/url>).

**Recarga Facilitada:** Consiste em promover medidas que melhoram a capacidade de infiltração do solo, tais como: 1) substituir as plantas de raízes profundas por plantas com raízes mais superficiais, diminuindo dessa forma as perdas por evapotranspiração, 2) dar preferência a plantas com folhagem que interceptam menos as águas da chuva, 3) adoptar medidas de acumulação e conservação da água no solo, 4) remover o material argiloso que se deposita no solo e 5) rebaixar o nível piezométrico pela exploração do aquífero mais superficial (Nunes, 2017).

**Recarga Induzida:** São sistemas de recarga designados barreiras de infiltração. Consistem na execução de furos próximos de cursos de água, com o objectivo de que uma maior quantidade de água do rio recarregue o aquífero subjacente, à medida que se provoca o rebaixamento no aquífero através desses furos (Nunes, 2017).

**Recarga Acidental:** A recarga ocorre com a disposição incorrecta de efluentes em fossas sépticas não impermeabilizadas, infiltração em aterros sanitários, campos agrícolas excessivamente irrigados, escoamento superficial de áreas urbanas e rupturas de sistemas de

abastecimento de água e de captação de esgoto, efluentes líquidos que alcançam a zona vadosa e saturada dos aquíferos (Barbosa *et al.*, 2008).

## **2.5 FACTORES QUE PODEM INFLUENCIAR NO PROCESSO DE RECARGA DE AQUÍFEROS**

Segundo Bortolin (2018), a recarga possui variação espacial e temporal, cuja ocorrência e quantidade dependem de uma série de processos que ocorrem na superfície do terreno e de características inerentes ao aquífero como a variabilidade espacial e temporal, clima, tipos de solos, geologia, topografia, hidrografia, cobertura vegetal, uso do solo, e permeabilidade ou condutividade hidráulica.

**Variabilidade espacial e temporal da recarga:** Em zonas não saturadas mais espessas é menos provável a ocorrência de eventos de recarga episódicos e é expectável que a recarga seja sazonal e mais constante no tempo, já que as frentes de humedecimento que se movem pela zona não saturada apresentam diminuição da sua velocidade com o aumento da profundidade e demoram mais tempo a atingir a superfície freática (Healy & Scanlon, 2010). Em relação à variabilidade temporal, historicamente falando, vários modelos de águas subterrâneas foram desenvolvidos com o pressuposto de que a recarga era constante no tempo. No entanto, as aplicações actuais de modelos conceptuais permitem colocar a recarga a variar no tempo, caso isso seja desejado (Healy & Scanlon, 2010).

**Clima:** A recarga de aquíferos é fortemente influenciada pelas condições climáticas, em regiões de clima húmido as taxas de recarga são limitadas pela capacidade de armazenar e transmitir água, ou seja, pelas características geológicas, ao passo que em regiões de clima seco, as limitações estão relacionadas com a disponibilidade da água, ou seja, com, condições climáticas (Freitas, 2010). A precipitação atmosférica é a componente dominante do balanço hídrico para a maioria das bacias hidrográficas, em que precipitações elevadas aumentam a probabilidade de existir recarga, sendo esta apenas limitada temporalmente pela capacidade de armazenamento dos aquíferos (Doble & Crosbie, 2016). As condições para a percolação de água, através da zona não saturada são mais favoráveis quando a quantidade de precipitação é superior à quantidade de evapotranspiração. Em regiões em que a evapotranspiração (ET) é elevada, a quantidade de

precipitação que é interceptada e evapotranspirada a partir da zona não saturada é mais elevada. As taxas de evapotranspiração em regiões temperadas seguem uma tendência sazonal, dependendo da radiação solar, da precipitação e do armazenamento de água no solo, tendendo o seu máximo a ocorrer durante os meses de primavera e os mínimos nos meses de inverno e verão. Se as taxas de evapotranspiração forem bastante uniformes ao longo do ano, a altura mais provável para ocorrer infiltração é entre o inverno e a primavera, quando as taxas de precipitação excedem as taxas de evapotranspiração. A duração e a intensidade de eventos individuais de precipitação podem, também, ter uma grande influência na recarga (Healy & Scanlon, 2010).

**Solos e Geologia:** O tipo de solo ou de rocha aflorante afecta muito activamente os processos de recarga. É mais provável que a recarga aconteça em áreas com solos de textura grosseira, como no caso de solos arenosos ou francos, que apresentam maiores taxas de infiltração do que os solos finos, siltosos ou argilosos (Doble & Crosbie, 2016). Do mesmo modo, sedimentos mais grosseiros e com reduzida matriz silto-argilosa têm uma permeabilidade mais elevada e são capazes de transmitir água rapidamente. A presença destes materiais geológicos promove a recarga, uma vez que a água pode infiltrar-se rapidamente e percolar pela zona das raízes antes sequer de ser absorvida pelas raízes das plantas (Healy & Scanlon, 2010). A água que se move através de caminhos hídricos preferenciais, como fissuras, buracos de raízes, cavidades cársticas ou fracturas, atinge rapidamente a superfície freática do que a que se movimenta através dos poros existentes na matriz do solo, o que faz com que haja menos perdas de água para a evapotranspiração. Igualmente, em regiões onde afloram rochas muito fissuradas ou carsificadas pode ocorrer uma rápida infiltração da precipitação atmosférica, que é prontamente canalizada para o aquífero subjacente através das fracturas ou cavidades existentes (Healy & Scanlon, 2010). Outro aspecto que condiciona a infiltração e o escoamento de água é o teor de humidade existente no solo anteriormente a um evento de precipitação. Geralmente um teor de humidade elevado favorece a recarga profunda, mas nos episódios de precipitação em que o solo se encontra previamente saturado ou atinge a saturação existe igualmente um aumento do escoamento. A influência da humidade do solo na recarga perde importância em estudos de longo prazo (Doble & Crosbie, 2016).

A geologia influencia também os processos de descarga e se a taxa de descarga de um aquífero for menor que a taxa de recarga, o armazenamento de água dentro do aquífero aumenta. Este pode atingir um máximo, a partir do qual a recarga adicional não é aceite, independentemente da quantidade de precipitação, conduzindo a um aumento do escoamento (Healy & Scanlon, 2010).

**Topografia:** A topografia da superfície do terreno desempenha um papel importante para a recarga quer difusa quer pontual. Declives acentuados tendem a promover taxas de infiltração baixas e taxas de escoamento elevadas e, por oposição, regiões planas que têm fraca drenagem superficial são mais propícias a recarga difusa e podem favorecer situações de inundação (Healy & Scanlon, 2010). A existência de pequenas depressões, muitas vezes tem uma influência profunda nas taxas de infiltração e de recarga. Delins *et al.* (2000), mostra que mesmo com solos altamente permeáveis, depressões ligeiras existentes em regiões de relevo aparentemente uniforme faziam com que a infiltração e a recarga nessa área fossem substancialmente maior que no resto do terreno.

Dunne *et al.* (1991) afirma que mesmo com características de superfície uniformes, a taxa de infiltração aparente, ao longo de uma encosta, aumenta na direcção dos declives menores, resultado do facto de as zonas de menor declive estarem expostas ao escoamento vindo das zonas de maior declive e também à precipitação Stonestrom & Harril (2007), referem que o relevo local, a orientação e altitude de cadeias montanhosas são factores topográficos adicionais que podem afectar os processos de recarga (Healy & Scanlon, 2010).

**Hidrografia:** Um modelo conceptual de recarga precisa considerar os sistemas de fluxo de água superficial e de água subterrânea e a forma como os mesmos estão ligados. Healy & Scanlon, (2010), afirmam que a profundidade da superfície freática é importante porque se a zona não saturada for pouco espessa, a água que se infiltra pode viajar rapidamente até à superfície freática, ocorrendo a recarga em resposta a qualquer grande evento de precipitação, no entanto, o volume de recarga aceite é limitado, podendo haver a rejeição de água infiltrada. Superfícies freáticas pouco profundas são também mais susceptíveis à descarga de água subterrânea pela transpiração das plantas e por escoamento de base. Assim, a água que recarrega sistemas

aquíferos pouco profundos pode ter tempos de residência reduzidos na zona saturada antes de ser extraída pelas plantas e voltar para a atmosfera (Healy & Scanlon, 2010).

**Vegetação e Uso do Solo:** A vegetação influencia de forma considerável a estrutura do solo e a magnitude do fluxo de água (Freitas, 2010). A existência, densidade e o tipo de vegetação, em conjunto com outros tipos de uso do solo, nos processos de recarga, já que influenciam os padrões de interceptação e evapotranspiração. Uma superfície de solo com vegetação tem tipicamente uma taxa de evapotranspiração maior (e, por isso, menos água disponível para recarga) do que uma superfície de solo sem vegetação, sob condições similares. A profundidade das raízes das plantas influencia ainda a eficiência com que estas conseguem extrair água (Healy & Scanlon, 2010). Na maioria das circunstâncias, a influência da vegetação é sazonal alternando períodos de crescimento e dormência, em que a presença de plantas pode promover a recarga uma vez que a degradação ou o envelhecimento das raízes pode expor cavidades que vão actuar como canais de fluxo preferenciais e promover a infiltração. A preparação de campos agrícolas para o cultivo pode ter efeitos distintos, por um lado desfazendo crostas no solo e aumentando o potencial para a infiltração e por outro, compactando e destruindo canais de fluxo preferenciais e, portanto, diminuindo a infiltração preferencial (Healy & Scanlon, 2010).

Paiva (2006), em seu estudo relata que as recargas subterrâneas foram normalmente muito maior em áreas sem vegetação do que em áreas vegetadas, e maior em áreas de cultura anual e pastagens do que em áreas com árvores e arbustos. A existência de escoamento superficial é uma característica comum em paisagens urbanas, este pode levar água a corpos de água superficiais ou galerias de infiltração artificial. No primeiro caso, a recarga para a área é reduzida, mas no segundo caso a recarga pode ser significativa e redireccionada, já que teremos a alteração do padrão de recarga, de uma recarga difusa para uma recarga pontual. Os sistemas de abastecimento e tratamento de água são artefactos adicionais da urbanização que podem afectar os processos de recarga, quer em termos de fornecimento de água a aquíferos urbanos quer em termos de potencial para contaminação. Estes sistemas consistem em canais abertos ou tubos de água e esgotos. Invariavelmente existem fugas associadas a qualquer sistema de abastecimento,



que constituem formas de recarga potencial e podem tornar-se efectivamente recarga real (Healy & Scanlon, 2010).

**Porosidade:** É a capacidade que o solo ou rocha tem de armazenar água (Capucci *et al.*, 2001). É um parâmetro que quantifica o percentual do volume total da formação rochosa ou seja, o volume ocupado pelos vazios ou poros no corpo rochoso, o qual é ocupado por espaços intersticiais, normalmente, contendo fluídos, como apresenta a (Equação.1), em Hipólito & Vaz (2011).

$$n = \frac{Vv}{Vt} \times 100\% \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$n$  é porosidade (%);  $Vv$  é o Volume dos vazios( $m^3$ ) e  $Vt$  é o Volume total ( $m^3$ )

A porosidade depende do tamanho, da forma, do grau de uniformidade e da arrumação dos grãos que compõem o material. Quando a granulometria do material é uniforme, a porosidade é maior do que quando se trata de partículas de tamanhos diferentes, pois neste caso as menores ocupam os vazios deixados pelas maiores e é classificada segundo a (Tab.1).

**Tab.1:** Classificação da porosidade.

Classes	Tipo de Porosidade
$n > 20\%$	Porosidade grande
$5\% < n < 20\%$	Porosidade média
$n < 5\%$	Porosidade pequena

Fonte: (Adaptado de Wisler & Brater, 1965).

**Permeabilidade ou Condutividade Hidráulica (K):** A permeabilidade ou condutividade hidráulica é a capacidade que a rocha ou solo tem para armazenar e transmitir a água. Ela depende do tamanho dos poros e da intercomunicação entre eles (Capucci *et al.*, 2001).

**Transmissividade (T):** É o potencial de transmissão de água de um aquífero, que não depende só da permeabilidade mas também da sua espessura. O coeficiente de transmissividade do aquífero,  $T$ , é dado pelo produto do coeficiente de permeabilidade,  $K$ , pela espessura  $H$  de uma camada do material e é geralmente expressa em  $m^2/dia$ , calculado em (Equação. 2) Hipólito & Vaz (2011).

$$T = KxH \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

$T$  Corresponde a Transmissividade;  $K$  a Permeabilidade e  $H$  é a Espessura ( $m^2/dia$ ).

## 2.6 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DA RECARGA DE AQUÍFEROS

Existem diversas metodologias para estimar a recarga aquífera e todas requerem um conhecimento amplo sobre a área de estudo, porque este processo é influenciado por diversos factores, como: clima, geologia, solos, topografia, vegetação e hidrologia, entre outros. Estes factores trazem variáveis necessários para o processo de estimativa de recarga, como a quantidade de chuvas, tipo e uso de solo, formações geológicas, aquíferos presentes na região, tipo de vegetação e finalmente, presença de cursos de água (Mattiuzi, 2013). Os métodos de estimativa da recarga hídrica podem genericamente ser divididos em sete grandes grupos (Simões, 2018):

- Métodos de balanço hídrico;
- Métodos de modelação numérica;
- Métodos baseados em dados da água superficial;
- Métodos físicos baseados em relações hidrodinâmicas na zona não saturada;
- Métodos físicos baseados em relações hidrodinâmicas na zona saturada;
- Métodos de traçadores químicos e térmicos.

O funcionamento de cada método está descrito no Simões (2018). Em seguida, a descrição dos métodos usados neste trabalho.

### 2.6.1 Métodos de balanço hídrico

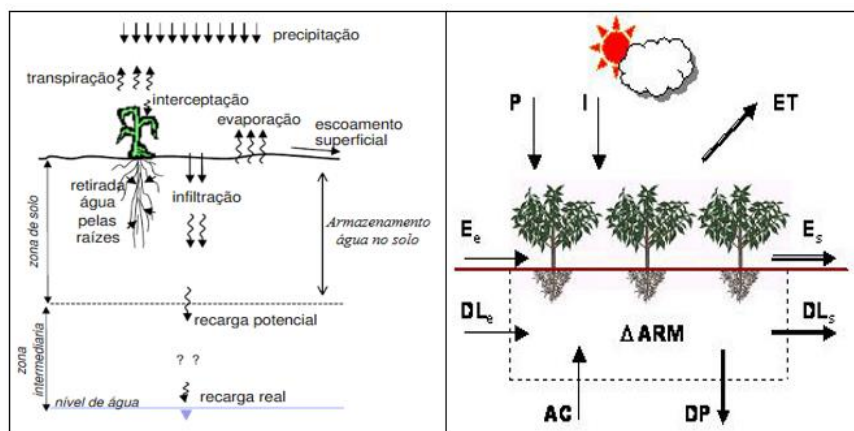
Os métodos de balanço hídrico representam a maior classe de técnicas para estimar a recarga aquífera, que contabiliza os movimentos de entrada e saída de água e das mudanças de armazenamento de um balanço volumétrico (Eilers, 2002). É uma técnica muito utilizada para ser aplicada em diferentes escalas espaciais e temporais (Scanlon, Healy & Cook 2002). Este método considera que em uma bacia hidrográfica o sistema é fechado onde a entrada de água dá-se pela precipitação pluviométrica e a saída esta relacionada com a evapotranspiração, a variação da reserva de água utilizável pelas plantas e o excedente de hídrico (Campos *et al.*, 2021), ainda neste contexto, Campos *et al.* (2021), revela que uma das maiores limitações deste método esta relacionado a eficácia na obtenção dos parâmetros que compõem a equação do balanço hídrico que pode ser traduzido pela (Equação.3).

$$P = ET + ESCsup + I \rightarrow P = ET + EXC \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$P$  representa a precipitação (mm) ;  $ET$  a evapotranspiração (mm);  $ESCsup$  o escoamento superficial (mm);  $I$  a infiltração(mm) e  $EXC$  o excedente hídrico (mm).

Neste método a infiltração e o escoamento superficial, representados como excedente hídrico podem ser considerados equivalentes à recarga, desde que a água consiga chegar até o nível freático. A (Fig.6) apresenta uma representação esquemática dos principais elementos quantificados em um balanço hídrico, representando assim, a disponibilidade da água para a vegetação natural ou culturas agrícolas e a evapotranspiração (Eilers, 2002).



**Fig. 6:** Representação esquemática dos principais processos hidrológicos em um balanço hídrico (Fonte: Eilers, 2002; Pereira *et al.*, 2002).

#### Entradas

**P** = Precipitação (+ Orvalho);

**I** = Irrigação;

**Ee** = Escoamento Superficial (entrada);

**DLe** = Drenagem Lateral (entrada);

**AC** = Ascensão Capilar.

#### Saídas

**ET** = Evapotranspiração;

**Es** = Escoamento Superficial (saída);

**DLs** = Drenagem Lateral (saída);

**DP** = Drenagem profunda.

**Componentes do Balanço Hídrico:** O balanço hídrico é composto por diferentes componentes necessários para o cálculo da recarga aquífera de uma determinada área que são:

- a) **Precipitação (P), Escoamento superficial e infiltração:** A precipitação pluviométrica sobre uma área é o principal componente de entrada no balanço hídrico, dependendo das condições locais parte da água precipitada pode ser interceptada pelas plantas ou escoar directamente em subsuperfície e por isso a infiltração é representada pela precipitação menos o volume escoado interceptado (Eilers, 2002). O escoamento superficial é considerado uma perda para o balanço volumétrico em uma escala temporal de curto

período de tempo, portanto não inclui a parcela da água que infiltra e escoasubsuperficialmente (Souza *et al.*, 2018).

- a) **Evapotranspiração potencial (ETP):** A evapotranspiração é o processo de perda de água para a atmosfera, através de uma superfície natural gramada, sem restrição hídrica no solo (Freitas, 2010). Pode ser expressa como a quantidade equivalente de água evapotranspirada por unidade de tempo (Moura *et al.*, 2013). É considerada um elemento meteorológico, fundamental. É definida como a perda de água para a atmosfera, por uma superfície natural, sem restrição hídrica para transpiração e evaporação do solo (Mather, 1958).
- b) **Evapotranspiração real (ETR):** É a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de humidade e cobertura vegetal. É um caso especial da evapotranspiração potencial (Souza *et al.*, 2018).
- c) **Deficiência hídrica (DEF):** É definido como a quantidade de água, em mm (milímetros) por unidade de área, necessária para fazer o conteúdo de água no solo alcançar a capacidade de campo que é determinada pela máxima quantidade de água que o solo pode reter (Eilers, 2002). Representa a água que faltou no período para que as plantas sofram evapotranspiração na razão da evapotranspiração potencial (Allen *et al.*, 1998).
- d) **Excedente hídrico (EXC):** É a quantidade de água da chuva que escoas pela superfície do terreno e chega até os rios, isso ocorre quando o solo está húmido o suficiente e a água não é aproveitada pelas plantas. Este pode ser considerado como sendo o escoamento superficial e ou escoamento subterrâneo, que é de grande importância para o dimensionamento de sistemas de abastecimentos, sistemas de drenagem, barragens, e projectos de controle de enchentes (Mather, 1958). A variável excedente é o somatório da infiltração além da “reserva de água utilizável pelas plantas” (recarga) e os escoamentos directos e subsuperficiais potenciais. Portanto, a dificuldade do método do balanço hídrico para a avaliação da recarga está na separação das componentes da variável excedente (EX). A separação e quantificação do fluxo de base e do escoamento superficial directo podem ser feitas a partir de diversas técnicas de separação de

hidrogramas, podendo ser utilizadas técnicas manuais ou técnicas automatizadas (Costa, 2005).

- e) **Armazenamento de água no solo (ARM):** É a quantidade de água que o solo tem disponível depois da evapotranspiração, o armazenamento só é positivo se a quantidade de água evaporada for menor que a precipitação se levando em conta também a capacidade de água que o solo pode armazenar (Souza *et al.*, 2018).
- f) **Alteração do armazenamento (ALT):** É a diferença entre o armazenamento do mês em questão e o Armazenamento do mês anterior, ou seja, é a quantidade de água que sobrou ou faltou em relação ao mês anterior (Souza *et al.*, 2018).

### 2.6.2 Métodos físicos baseados em relações hidrodinâmicas na zona saturada

As técnicas de estimativa de recarga baseadas em medições de níveis de água subterrânea são as mais utilizadas pela abundância de dados de níveis de água subterrânea e facilidade da aplicação directa destes métodos. Sendo, mais usado modelo das flutuações do nível freático que é um método onde utilizam as variações do nível freático ao longo do tempo para estimar a recarga em aquíferos não confinados (Healy & Scanlon, 2010). O método das Flutuações do Nível Freático foi proposto por Meinzer & Stearns (1929) e continua a ser bastante utilizado devido à sua simplicidade (Healy & Cook, (2002); citado em Crosbie *et al.*, 2015). Este método é usado para calcular a recarga num aquífero de natureza suspensa e/ou não confinada e assume que uma subida do nível hidrostático, medida em piezómetros ou observada em poços, é o resultado de uma subida no armazenamento do aquífero não confinado e corresponde a uma recarga a partir da precipitação atmosférica. Deste modo, o cálculo da recarga ocorre com base na relação entre nível acumulado no lençol freático e o rendimento específico do aquífero que é o volume da água que pode ser tirado dum meio sob condições livres e também pode ser calculado. A variação do nível hidrostático é multiplicada pelo armazenamento do aquífero, que neste caso se considera igual ao rendimento específico  $S_y$ , para obter uma taxa de recarga (Brown *et al.*, 2006). A relação entre a recarga (R), a variação do nível freático ( $\Delta h$ ) e o armazenamento ( $S=S_y$ ) é mostrado pela (Equação.4), a equação assume que a água que atinge o nível freático entra imediatamente em armazenamento e que todos os outros componentes do balanço hídrico

subterrâneo (evapotranspiração subterrânea, fluxo de base, entrada e saída de fluxo sub-superficial) são nulos durante o período de recarga.

$$R = \Delta h x S_y$$

Equação 4

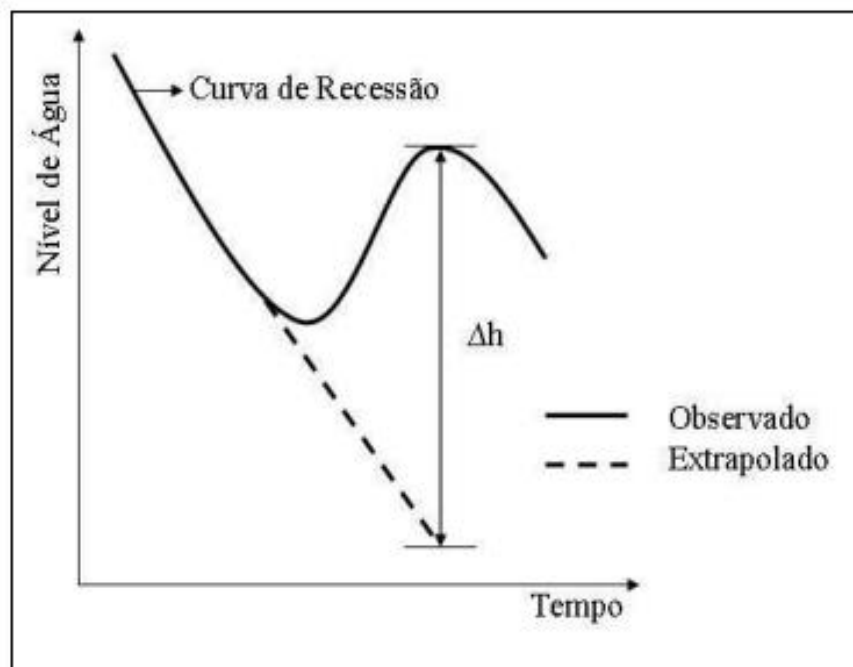
Onde:

$S_y$  é o rendimento específico(%) e  $\Delta h$  é a variação do nível freático(m).

Este método é particularmente eficaz em áreas com uma quantidade de precipitação elevada durante o inverno e com superfície freática pouco profunda, o que pode levar a recargas episódicas que podem ser reportadas quase instantaneamente (Armstrong & Narayan, 1998; citado em Brown *et al.*, 2006). A profundidade da superfície freática é, precisamente, uma limitação deste método no caso de se querer saber a recarga induzida por um episódio de precipitação, já que, se a profundidade for excessiva a resposta da superfície freática à precipitação vai sofrer um atraso e, assim, as flutuações vão ser atenuadas e a recarga será subestimada.

### **Hidrografia hipotética de um poço de monitoramento de água subterrânea**

Conforme Healy (2010), com a aplicação da (equação 4) teremos que para cada elevação individual de nível será gerada uma estimativa de recarga. Para determinar a recarga total,  $\Delta h$  é considerado igual à diferença entre o pico de subida e ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico (Fig.7). A curva de recessão antecedente é o traço que o hidrograma do poço teria seguido na ausência de elevação do nível de água (Healy, 2002).



**Fig. 7:** Representação esquemática da curva de recessão ou rebaixamento hidrostático (Fonte: Freitas, 2010).

Para a obtenção das recargas, cada valor de  $\Delta h$  é multiplicado pelo rendimento específico da área de estudo, uma das maiores dificuldades para efectuar este cálculo é a estimativa do rendimento específico ( $S_y$ ). Segundo Healy (2010), o rendimento específico pode ser utilizado de acordo com a literatura ou ser estimado por equações matemáticas, métodos laboratoriais ou métodos de campo.

**Tab. 2:** Variação do rendimento específico de acordo com a textura do material.

Material	Rendimento Especifico (%)		
	Mínimo	Máximo	Média
Argila	0	5	2
Argila-arenosa	3	12	7
Silte	3	19	18



Areia fina	10	28	21
Areia media	15	32	26
Areia grossa	20	35	27
Cascalho	20	35	25
Cascalho fino	21	35	25
Cascalho médio	13	26	23
Cascalho grosso	12	26	22

**Fonte:** (Healy & Cook, 2002).

## 2.7 Vantagem e Desvantagem dos Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos

Cada método de estimativa de recarga possui restrições de escalas de tempo, espaço e fluxo, bem como incerteza na sua aplicação (Bortolin, 2018). Destacam-se algumas características a considerar sobre os métodos explanados.

Os métodos baseados em águas superficiais e em zona saturada são mais aplicáveis a regiões de clima húmido e em pequenas áreas, enquanto os métodos de zona não-saturada, possuem melhor aplicabilidade em regiões áridas e geralmente, estimam recargas sobre pequenas áreas, originalmente estimam a recarga com maior confiança que os métodos baseados nas outras zonas, devido ao fato dos métodos de zona saturada estimarem a recarga real, enquanto os que são baseados nas outras zonas, estimam a recarga potencial (Scanlon *et al.*, 2002; Healy, 2010).

Maior parte dos métodos tem aplicação tanto em clima seco e húmido, com magnitude de erro que varia de média a grande. Os autores classificam apenas o uso de métodos de separação de escoamento com menor erro, enquanto modelos de bacias e modelagem numérica não foram enquadrados.

Os métodos de separação de escoamento têm sido amplamente utilizados pela sua facilidade e baixo custo de aplicação. Os inconvenientes associados aos métodos de separação de hidrogramas é que são arbitrários e muitos dependentes dos parâmetros associados à extracção das curvas de recessão (Bortolin, 2018). As limitações do método VNF incluem o facto de que as

flutuações do nível da água em um poço podem ser apenas representativas de uma pequena área dentro de uma bacia hidrográfica.

Em algumas situações, principalmente em poços localizados próximos aos cursos de água, o aumento do nível da água pode nem sempre ser o resultado da recarga directa, podendo ser influenciado pelos rios (Delin *et al.*, 2007). Coelho *et al.* (2012); citado em Bortolin, 2018) comentam que esse método pode ser usado em extensas áreas, desde que ocorram repentinas variações do lençol freático, comportamento esperado em aquíferos livres e regiões com altos índices de precipitação, ainda neste contexto, Wanfried & Hirata (2005) explicam que o VNF é um método sensível para registar recarga quando há possibilidade de implantar uma rede representativa de monitoramento de níveis para a área de estudo.

A precisão das estimativas indirectas por qualquer um dos métodos apresentados é geralmente difícil de determinar, portanto à luz da incerteza inerente a qualquer método de estimativa de recarga, é conveniente a aplicação de múltiplos métodos que pode ser beneficiada com análise conjunta de dados da variação de níveis das águas subterrâneas (Healy, 2010).

### CAPITULO III

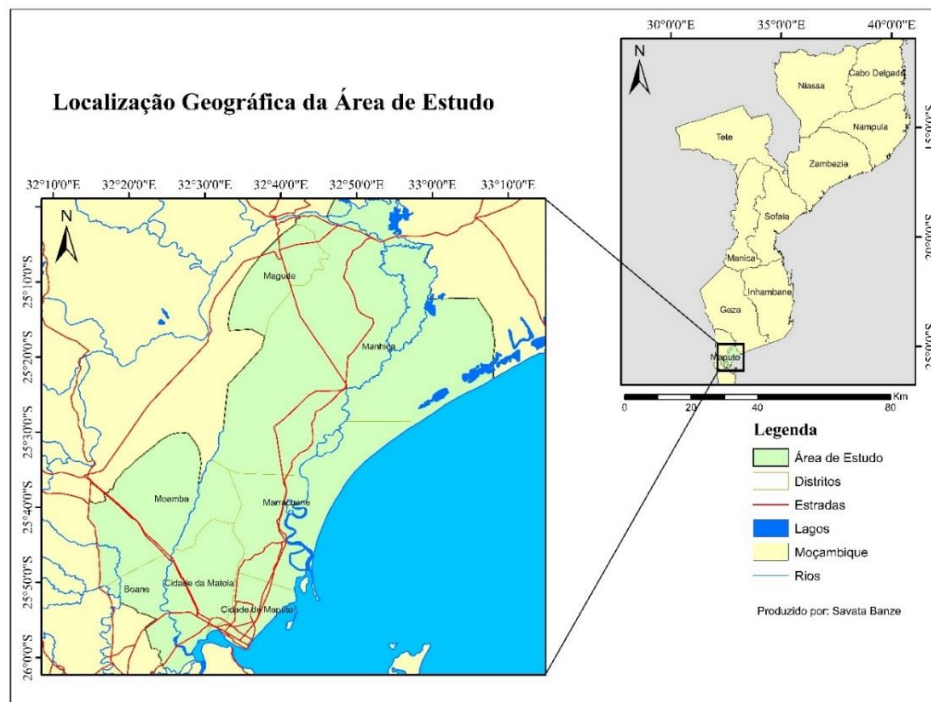
#### 3.0 DISCRICÃO DA ÁREA DE ESTUDO

##### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o enquadramento da área de estudo, suas características fisiográficas, climáticas, uso e cobertura de terra, hidrologia, a hidrogeologia e principais fontes de abastecimento de água na área de estudo.

##### 3.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na região Sul de Moçambique e abrange as cidades de Maputo e Matola bem como os distritos de Boane, Marracuene, Manhiça, Magude e Moamba (Fig.8), a população da área de estudo é estimada em 2 926 308 habitantes (hab) com a maior concentração na Cidade de Maputo, que conta com cerca de 1 094 320 hab, seguido da Cidade da Matola com cerca de 68 269 500 hab. As regiões de Manhiça, Marracuene, Magude e Moamba têm cerca de 472 926 hab, 174 673 hab, 59 162 hab e 169 677 hab respectivamente (INE, 2017).



**Fig. 8:** Mapa de Localização Geográfica da Área de Estudo (Fonte: Modificado pela Autora).

### 3.3 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

#### 3.3.1 Geologia e Geomorfologia Regional

A geologia e a geomorfologia têm por objectivo descrever e explicar as formas do relevo terrestre visto que são alguns dos factores que influenciam na dinâmica do escoamento superficial.

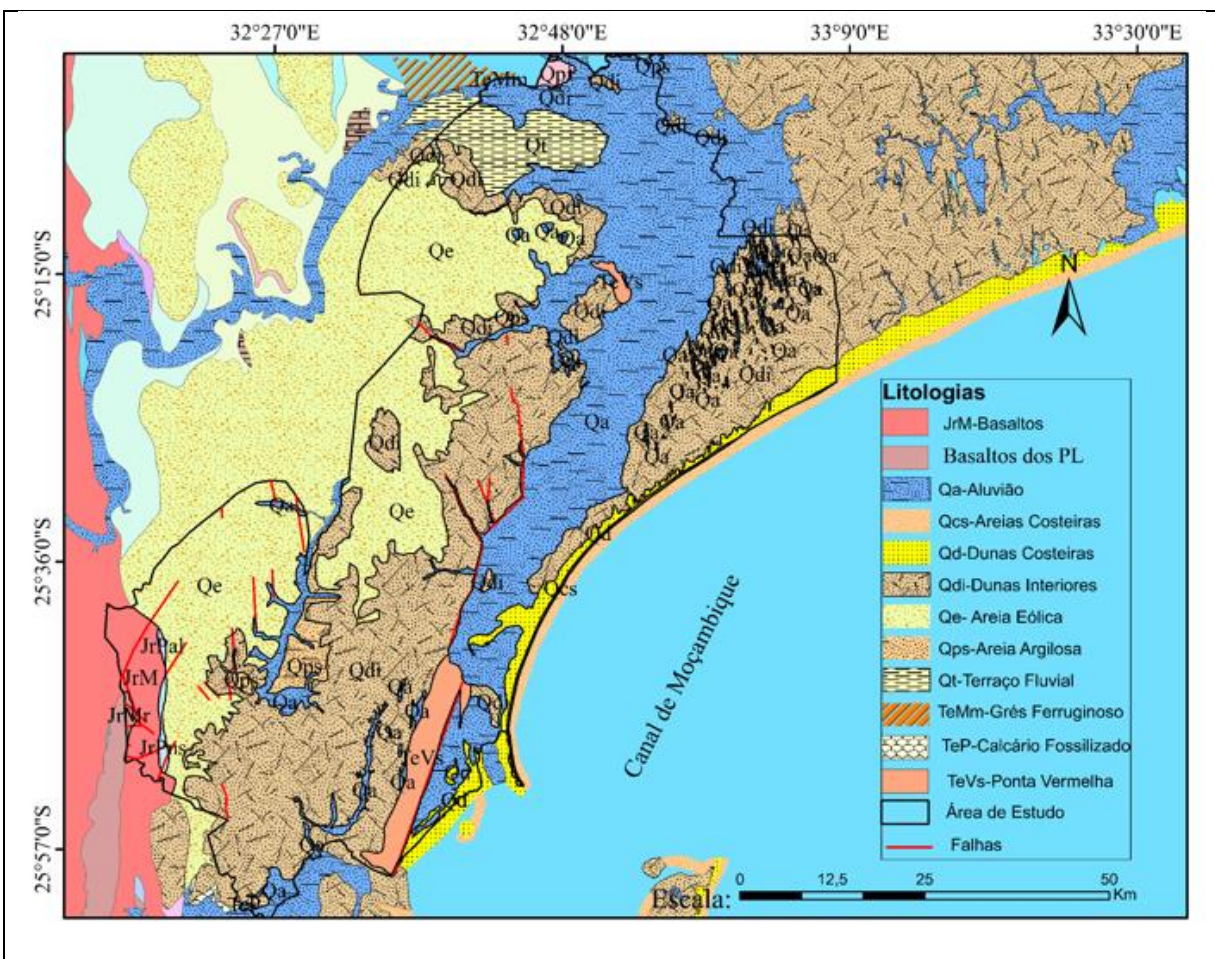
##### a) Geologia Regional

Geologicamente, a área de estudo está localizada na Bacia Sedimentar Meso- Cenozóica do Sul de Moçambique, formada pelas subsidências que se verificaram ao longo dos afundamentos profundos orientados segundo N- S, associadas ao sistema dos riftes da África Oriental e ao longo do eixo do Canal de Moçambique (Burgeap 1962, citado por Muchimbane, 2010).

Segundo ARA-Sul (2011), citado em Nogueira (2017), de baixo para cima, a bacia sedimentar é composta por séries de transição transgressivas e marinhas. Depósitos do Terciário, compostos principalmente por unidades carbonáticas (calcários e calcarenitos), seguidos por sedimentos eólicos do Quaternário. Ambas as séries aumentam em espessura em direcção à costa, enquanto o teor de argila aumenta para o interior. Os depósitos aluviais são bem desenvolvidos ao longo dos cursos a jusante dos principais rios, cortando os sedimentos eólicos da região. Cinco grupos geológicos principais são observados na superfície. Na superfície, o principal grupo geológico é representado pelos sedimentos eólicos quaternários, seguido pelos depósitos de aluvião e rochas cristalinas, a última aparecendo apenas no limite oeste da área de estudo. Basaltos e riolitos relacionados ao riftamento do jurássico formam a base do sistema e os seus afloramentos podem ser observados no limite oeste da área de estudo. Esta unidade é caracterizada por argilas castanho-escuras e areias argilosas, com baixa permeabilidade (Nogueira 2017).

- Segundo Bouman (1985), distinguem-se três domínios litológicos sedimentos na área de estudo (Fig.9): a) Dunas costeiras modernas expandindo-se para o norte, paralelas à costa

e ao rio Incomáti (são compostas por areias finas e claras); b) aluviões dos vales, sedimentos argilosos nas margens dos rios Incomáti, Matola e Infulene; c) Dunas interiores também denominadas “dunas velhas” ou “dunas de areia vermelha” (formação Ponta Vermelha) estendendo-se até à costa limítrofe da cidade de Maputo e compostas por areia ferruginoso intercalada por alguns leitos de argila com teor de argila aumentando a noroeste.



**Fig. 9:** Mapa geológico da área de Estudo (Fonte: Modificado pelo Autor).

Segundo Bouman (1985), distinguem-se três domínios litológicos na área de estudo: a) Dunas costeiras modernas expandindo-se para o Norte, paralelas à costa e ao rio Incomáti (são

compostas por areias finas e claras); b) aluviões dos vales, sedimentos argilosos nas margens dos rios Incomáti, Matola e Infulene; c) Dunas interiores também denominadas “dunas velhas” ou “dunas de areia vermelha” (formação Ponta Vermelha) estendendo-se até à costa limítrofe da cidade de Maputo e compostas por areia ferruginosa intercalada por alguns leitos de argila com teor de argila aumentando a noroeste

### **3.4 TIPOS DE SOLO**

Os solos da área de estudo variam muito na superfície da terra, tanto à sua espessura, como a cor, quantidade e organização das partículas de que são compostos (argila, silte e areia), fertilidade, porosidade (quantidade e arrançamento dos poros), entre outras características (Rosa, 2010).

A distribuição dos solos pela área de estudo varia, destacando-se a ocorrência de solos arenosos amarelados na região Oeste dos distritos de Manhiça, Marracuene e Cidade de Maputo e na região Este do distrito de Moamba e da Cidade da Matola.

Ocorrem também Solos arenosos alaranjados na maior parte do distrito de Moamba e em boa parte do distrito de Boane e da Cidade da Matola. Ainda no distrito de Moamba, na extremidade da região Oeste, ocorrem solos de post-mananga e solos riolíticos líticos mais a Sudoeste e solos basálticos pretos em direcção ao Norte. Ocorre uma área de solos de post-mananga, que separa a região Oeste da Cidade da Matola da região Este do distrito de Boane. No Sudeste da Cidade de Maputo ocorrem solos de grés vermelho e solos de sedimentos marinhos estuários, numa faixa que se estende até ao Nordeste da Cidade de Maputo e contínua em direcção ao distrito de Marracuene no Sudeste. Outro tipo de solo notável na área de estudo são os solos de aluviões argilosos que ocorrem numa faixa que se estende pela região Este do distrito de Marracuene à quase toda região Este do distrito de Manhiça com excepção de uma parte em que ocorrem solos arenosos alaranjados e solos hidromórficos. Outros tipos de solo que podem ser encontrados na área de estudo são: solo de mananga isso no Noroeste do distrito de Manhiça e em uma pequena parte do Sul do distrito de Boane e solos pouco profundos sobre rocha não calcária também no Noroeste do distrito de Manhiça.

### 3.4.1 Variáveis do Solo da área de estudo

As variáveis do solo da região Metropolitana do grande Maputo descritas foram seleccionadas devido a sua importância para com este estudo nomeadamente: a textura e a capacidade de infiltração:

- a) **Infiltração:** A capacidade de infiltração do solo está associada a textura dos solos, ou seja, a habilidade de deixar passar a água para as camadas profundas do solo varia de acordo com a textura do solo. Na cidade de Maputo, no Oeste ocorrem solos com uma capacidade infiltração que varia de boa à excessiva, que passa a excessiva a medida em que se caminha para o Este e muda para má à muito má na extremidade da região Este. O mesmo acontece no distrito de Marracuene sendo que o cenário muda numa pequena área na extremidade da região Este do distrito em que a capacidade de infiltração é excessiva.

A Cidade da Matola também apresenta solos com uma capacidade de infiltração que varia de boa à excessiva, com excepção da região Oeste em que se junta a região Este do distrito de Boane, onde a capacidade de infiltração é boa. No Sul do distrito de Boane ocorrem solos com uma capacidade de infiltração imperfeita e o cenário muda a Norte e Nordeste do distrito e numa pequena parte a Sudoeste em que a capacidade varia de boa a excessiva.

Na extremidade Oeste do distrito de Moamba os solos apresentam uma capacidade de infiltração má à muito má e boa um pouco mais a Sudoeste, o restante do distrito apresenta solos com capacidade boa a excessiva que continua a medida em que se caminha para em direcção ao Norte no distrito de Manhiça, e o cenário vai mudando quando se vai em direcção a Este no distrito de Manhiça onde encontra-se solos com uma capacidade de infiltração má à muito má voltando a boa à excessiva logo de seguida. Algumas áreas do distrito de Manhiça apresentam solos com uma capacidade excessiva de infiltração e outras com capacidade imperfeita. Nota-se que nas áreas em que a textura do solo é arenosa ou arenosa franca a capacidade de infiltração dos solos varia de boa a excessiva, enquanto nas áreas de solos de textura franca arenosa limosa à argilosa a capacidade de infiltração vai de ma à muito má, no entanto a área de estudo é na sua maioria uma área com uma capacidade de infiltração que varia de boa a excessiva.

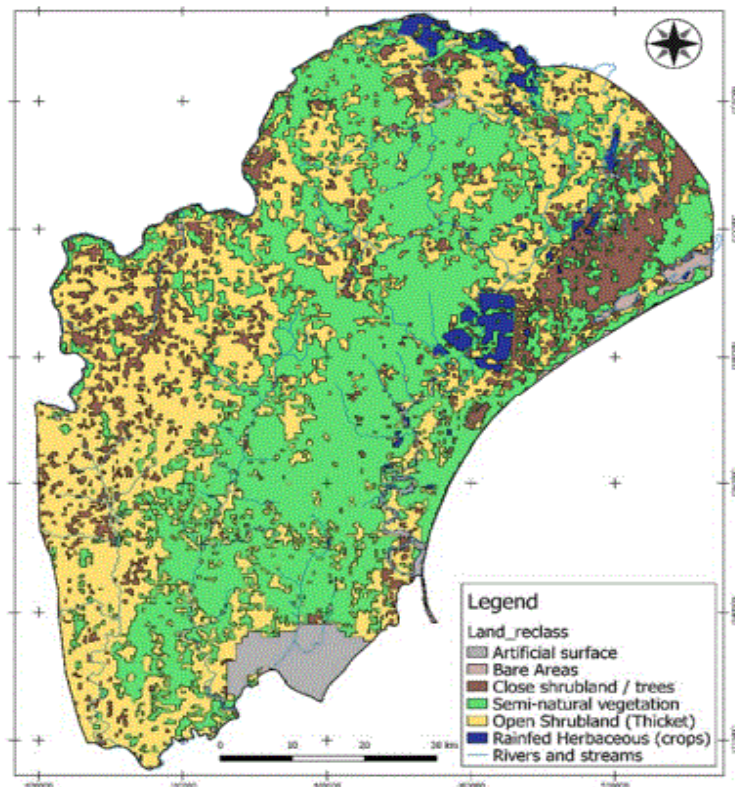
### **b) Textura**

A textura do solo esta relacionada com a porção de tamanho das partículas minerais do solo e constitui um factor importante do solo pois é uma característica que não pode ser modificada, permite classificar os componentes sólidos do solo em classes de acordo com os seus diâmetros, sendo divididos em areia, silte e argila (Rosa, 2010). A textura na área de estudo varia de acordo com os tipos de solo. Nos distritos de Moamba, Boane e Cidade da Matola, onde os solos são arenosos amarelados a textura varia de arenosa à arenosa franca. A faixa que liga a região oeste da cidade da Matola a região Este do distrito de Boane apresenta textura arenosa franca e franca argilosa arenosa. As regiões Este do distrito de Moamba, e Manhiça bem como a região Oeste do distrito de Marracuene e das Cidades de Maputo e Matola apresentam solos de textura arenosa. Na faixa Este da cidade de Maputo ocorrem solos de textura arenosa à franco arenoso e solos de textura franca arenosa à argilosa. Os solos de textura franca arenosa à argilosa se estendem pela região Este do distrito de Marracuene em direção ao Norte se estendendo pelo distrito de Manhiça em quase toda parte Este com exceção de uma área mais a Sudeste em que ocorrem solos de textura arenosa à arenosa franca, que ocorrem também no Noroeste do distrito de Manhiça.

### **3.5 Uso / cobertura do solo**

Para além da vegetação natural, grande parte da área de estudo é coberta por plantas decíduas (25,3%) e matagal (matagal) (12,6%). As culturas herbáceas de sequeiro (2%) são compostas principalmente por vastas plantações de cana-de-açúcar, geralmente se alimentam de água da chuva e irrigação adicional de águas superficiais. Embora a área periurbana de Maputo seja vasta (aproximadamente 450 km<sup>2</sup>), apenas as áreas com pavimento são consideradas como superfícies artificiais e portanto representam 2,2% da área de estudo (Nogueira, 2017) (Fig.10).





**Fig. 10:** Distribuição espacial do Uso / cobertura do solo na área de estudo (Fonte: Nogueira, 2017).

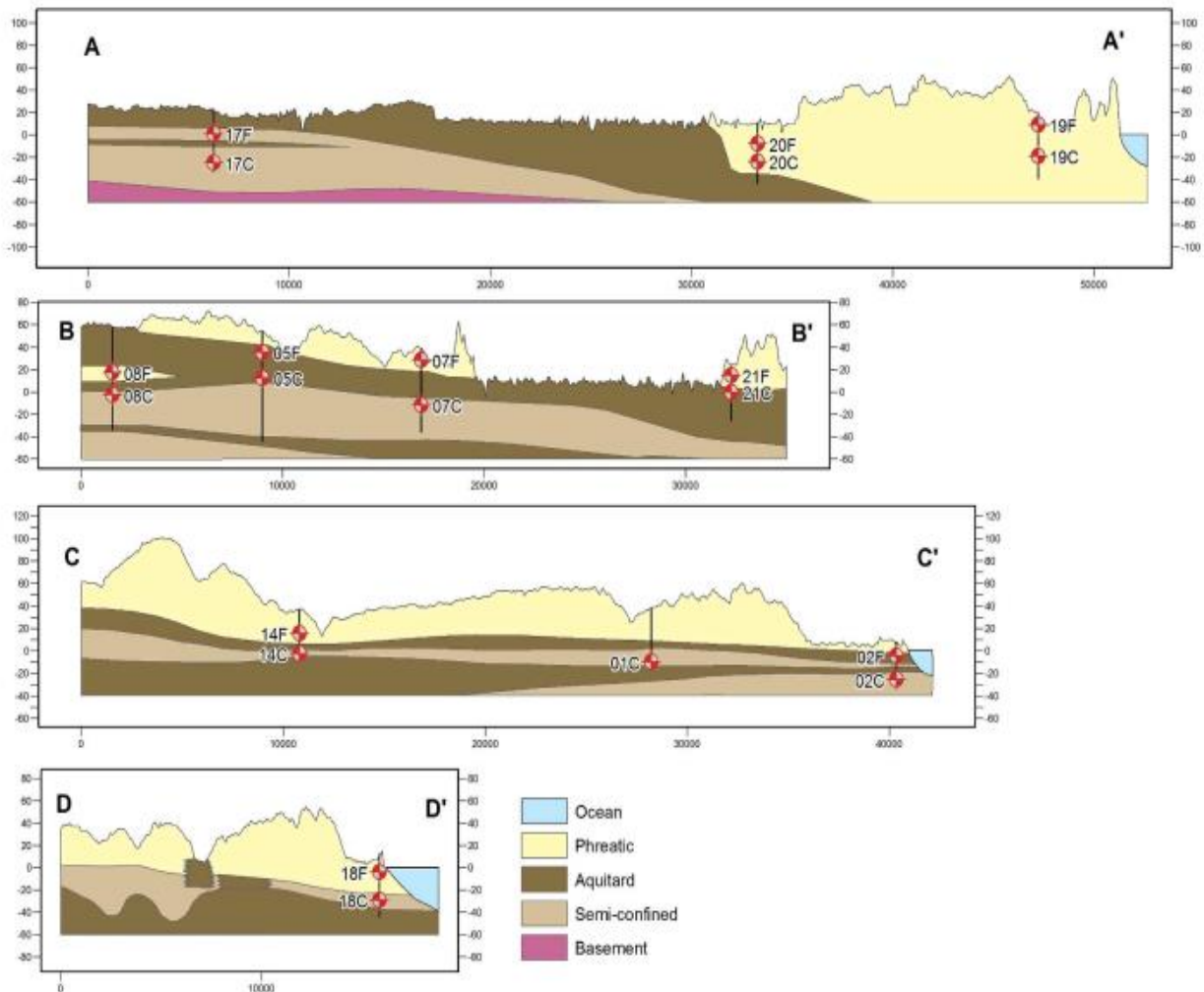
### 3.6 HIDROGEOLOGIA

A Área de estudo é caracterizada por três diferentes unidades geológicas: areias costeiras modernas, areias do interior mais antiga e arenitos subjacentes, que foram melhoradas com os registos de perfuração que passaram a diferenciar as três unidades em formações, do mais antigo ao mais jovem. A formação de Gudja do Cretácico superior que é composta por argilas e areias finas que geralmente são consideradas como aquífero e a formação de Salamanga do oligoceno sobreposta e compostas por calcarenitos nas áreas Este e Oeste com alto conteúdo de argila na parte central da área de estudo (Cendón *et al.*, 2020).

As unidades geológicas acima citadas foram simplificadas como aquífero freático e semi-confinado. O primeiro encontra-se dentro dos depósitos de areia eólica quaternária, é recarregado na parte elevada das dunas de areia e o segundo encontra-se dentro de areias consolidadas,

arenitos e rochas carbonatadas (principalmente calcarenitos) da parte inferior através de uma unidade de aquitardo composta por marga siltosa e argila, as águas subterrâneas em unidades freáticas fluem em direcção aos vales dos rios e ao oceano. Em algumas áreas esta formação é muito fina (< 2m espessura) ou ausente, para que o sistema possa ser analisado como uma única unidade (Chairuca *et al.*, 2016; Cendón *et al.*, 2020).

Segundo Cendón *et al.* (2020), citado por Silva (2022), um programa de perfuração realizado pela ARA-Sul (Administração Regional Águas do Sul) instalou 25 novos furos de monitoramento (série Pz). Na maioria dos locais, dois piezómetros foram instalados, um no aquífero freático superior e um no aquífero semi-confinado. As profundidades do furo final variam de 7 á 63 m (Fig.11).



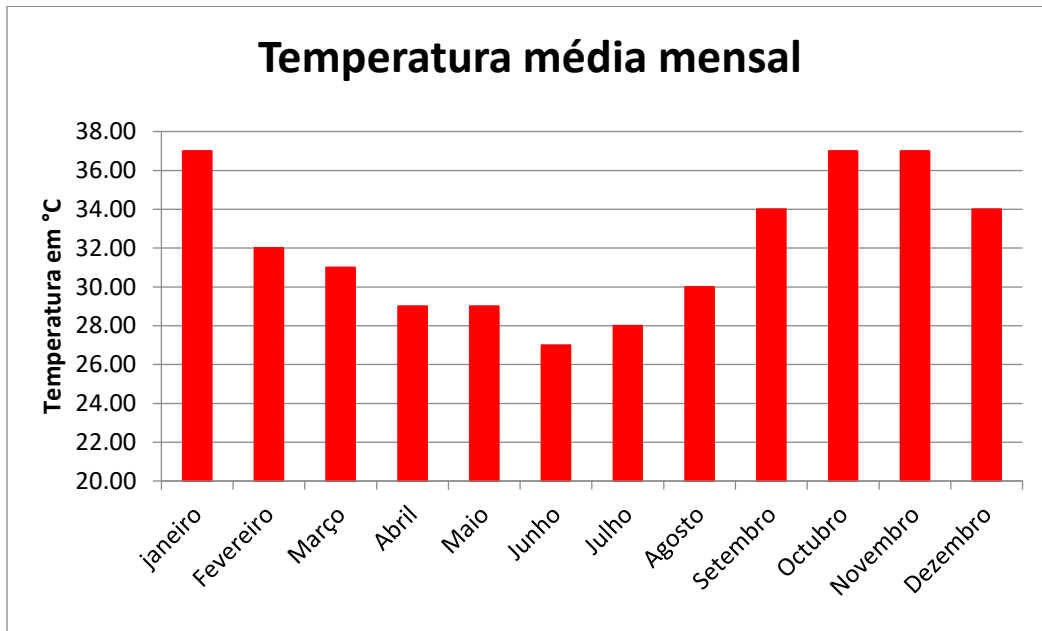
**Fig. 11:** Perfis Elaborados no aquífero do Grande Maputo (Fonte: Cendón *et al.*, 2020).

### 3.7 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

#### 3.7.1 Cima e Precipitação

A partir dos dados obtidos na (Fig.12), duas estações são definidas para a área: Verão chuvoso (Novembro a Abril) e um Inverno seco (Maio a Outubro). As temperaturas médias baixas e altas estão em torno de 25 e 30 graus célsius, respectivamente, com baixas temperaturas durante Junho e Julho, e altas temperaturas durante Novembro à Janeiro.

De acordo com (Rosário, 2016), a precipitação média anual varia de 400 á 800 mm / ano (média de 700 mm / ano), enquanto a evapotranspiração potencial média (ETP) é muito maior, entre 1000-1500 mm / ano.



**Fig. 12:** Distribuição temporal da precipitação (mm) e temperatura (°C) na área de estudo (Fonte: INAM).

## CAPITULO IV

### 4.0 MATERIAIS E MÉTODOLOGIA

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho de final do curso foi usada uma metodologia baseada essencialmente em:

##### 4.1.1 Revisão Bibliográfica

Além de livros, artigos científicos, e relatórios de estudos anteriores referentes a área de estudo foi usada informação de base de dados de instituições, com destaque para a DNGRH. A revisão bibliográfica visava obter um embasamento teórico e científico sobre aspectos relevantes ao estudo através de livros, relatórios, artigos científicos, brochuras, revistas científicas e estudos semelhantes de outros autores. Parte do material foi obtido na Biblioteca da Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (DNGRH), Administração Regional das Águas do Sul, Instituto Público (ARA Sul, IP) e outra parte foi baixada da internet.

##### 4.1.2 Obtenção dos dados

Para a aplicação do método do balanço hídrico, foram utilizados dados de temperatura e precipitação média mensal de 4 pontos na Região Metropolitana do Grande Maputo correspondente a 60 anos hidrológicos (1940 á 2000) e para o método variação do nível freático Foram utilizados dados de variação do nível de água de 11 piezómetros de monitoramento que estão instalados em diferentes bairros da área de estudo correspondente aos anos 2015 a 2019. Estes dados foram colectados na DNGRH e na ARA Sul, IP e podem ser observados no anexo.

##### 4.1.3 *Softwares usados*

- ArcGIS 10.5 – Usado na elaboração de mapas de localização geográfica, Geológico, Vegetação, Recarga e Défice hídrico.
- Microsoft Excel 2016 – Usado para tratamento estatístico, cálculo dos componentes do balanço hídrico e a recarga.

## 4.2 Selecção do Método

Após a análise dos diferentes métodos de estimativa da recarga hídrica, foram seleccionados 2 (dois) métodos diferentes. Estes métodos foram seleccionados segundo a disponibilidade de dados, pelas vantagens que os métodos apresentam como o facto de apresentar, poucos parâmetros hidráulicos do aquífero para o seu cálculo. A seguir estão descritas as características dos métodos seleccionados para este estudo.

### 4.2.1 Método do Balanço hídrico

O balanço hídrico, desenvolvido por Thornthwaite & Mather (1955) é uma das várias maneiras de estimar o armazenamento médio de água do solo ao longo do tempo, simbolizado pela precipitação (P) e pela evapotranspiração potencial (ETP), com uma capacidade de água disponível (CAD) apropriado. O balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento da água no solo (ARM). O Balanço Hídrico estimado depende da evapotranspiração potencial (ETP) determinada pelo método de Thornthwaite (1948) e da capacidade de água disponível. Esse método considera que a variação do armazenamento de água no solo é uma função exponencial que envolve uma capacidade de retenção da humidade no solo e perda de água acumulada (Negativo Acumulado) (Oliveira, 2007).

Para a área de estudo foi adoptado o limite de 100 milímetros para a capacidade de retenção da humidade no solo (CAD). Os valores de capacidade de água utilizável são corroborados pelo *European Soil Data Centre* (ESDAC) que referem que os solos existentes têm em geral valores baixos (inferiores a 100 mm), embora se encontrem, nas zonas mais orientais, alguns solos com valores médios (de 100 a 140 mm) e elevados (de 140 a 190 mm) de capacidade de água utilizável.

#### 4.2.2 Flutuação/variação do nível freático

O método da variação do nível freático é baseado em medições do nível freático em piézômetros instalados na região de interesse. Este método relaciona a recarga de aquífero livre com a variação do nível freático e tem melhor desempenho quando aplicado em curtos períodos de tempo em aquíferos livres, como é o caso deste estudo (Scanlon *et al.*, 2002). Maiores informações sobre esta metodologia, determinação do rendimento específico e aplicação do método por outros autores podem ser encontradas em Simon (2014), Healy (2010), e Healy & Cook (2002).

Existem em torno de 25 piezômetros de monitoramento instalados na área de estudo e para esta pesquisa foram seleccionados 11 piézômetros correspondente aos meses de Janeiro de 2015 á Dezembro de 2019 em dependência da disponibilidade de dados com ausência de alguns meses por falta de monitoramento. Inicialmente, os dados de profundidade de nível de água adquiridos foram organizados em tabelas individualizadas por estação, permitindo a elaboração de gráficos no *software Excel* para cada piezómetro. Os gráficos possibilitaram a identificação dos hidrogramas, sendo assim possível traçar as curvas de rebaixamento pelo *software Excel*, e assim, quantificar cada variação do nível de água.

Mediante a definição do intervalo de valores de rendimento específico ( $S_y$ ), tendo em conta as características da composição do aquífero foi-lhe atribuído um valor médio de 0,21 a 0,27 considerando depósitos de areias finas, médias e grosseiras, segundo a classificação de Morris e Johnson (1967); citado em Batu (1998). Assim, foi então aplicada a equação 6.

#### 4.3 Processamentos de Dados

O processamento de dados consistiu na produção de tabelas, gráficos e mapas dos parâmetros (Excedente e Recarga) com recurso ao programa ArcMap 10.3. A descrição da metodologia para geração das tabelas do método do balanço hídrico pode ser encontrada em Thornthwaite & Mather (1955).

## CAPITULO V

### 5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

#### 5.1 Cálculos da recarga do aquífero usando os métodos de Balanço Hídrico e Flutuação do Nível Freático

##### 5.1.1 Método de Balanço Hídrico

Através da precipitação média mensal avaliada para o período 1940/1941 á 1999/2000, efectuou-se o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) usando a fórmula empírica de Thornthwaite, que é um modelo de fácil manipulação que precisa apenas dos dados de temperatura média do ar e da precipitação anual.

Primeiramente foram calculados os valores de ETP mensais, pelo método de Thornthwaite (1948), tal como referido no capítulo 2 (Equação 5). Os resultados são apresentados (Tab.4).

$$ETP = 16. \left(10 \frac{T}{I}\right)^a \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

ETP é a evapotranspiração potencial (mm)  $T$  é a temperatura média do mês em °C; e  $I$  é o nível de calor da região estudada (Equação. 6), e que depende do ritmo anual da temperatura, integrando o efeito térmico de cada mês em que o expoente “a” (Equação 7), é uma função de  $I$  (Pereira *et al.*, 2002).

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad \text{Equação 6}$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01791 \cdot I + 0,492 \quad \text{Equação 7}$$



Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da  
Região Metropolitana do Grande Maputo

---

O valor de ETP representa o total mensal de evapotranspiração que ocorreria nas condições térmicas de um mês padrão de 30 dias e cada dia com 12 horas de foto período (N). Portanto, a ETP deve ser corrigida em função de N e do número de dias do período (NDP) (Equação 8).

$$COR = \left(\frac{N}{12}\right) \cdot \left(\frac{NDP}{31}\right)$$

Equação 8

**Tab. 3:** Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1940-2000 do ponto 1.

PI	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
T média mensal (mm)	26	26	25.1	23.4	21	18.6	18.4	19.8	21.4	23	24.2	25.4
Índice de calor	12.13	12.13	11.50	10.35	8.78	7.31	7.19	8.03	9.04	10.08	10.89	11.71
EP (mm)	128.99	128.99	117.39	97.31	72.85	52.66	51.16	62.25	76.63	92.92	106.47	121.18
Dias do mês	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
nº de horas luz/dia	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
i	119.14											
a	2.67											
ETP <sub>cor</sub> (mm)	111.07	100.32	101.08	81.09	62.74	43.88	44.05	53.60	63.86	80.02	88.72	104.35

**Fonte:** (Modificado pela Autora).

Foi calculado o balanço hídrico com o objectivo de encontrar o valor do excedente de água anual em que foi processado o balanço hídrico para os anos hidrológicos (1940/1941 á 1999/2000), com o programa *Excel* conforme a metodologia apresentada por Rolim *et al.* (1998) (Tab.4).

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo

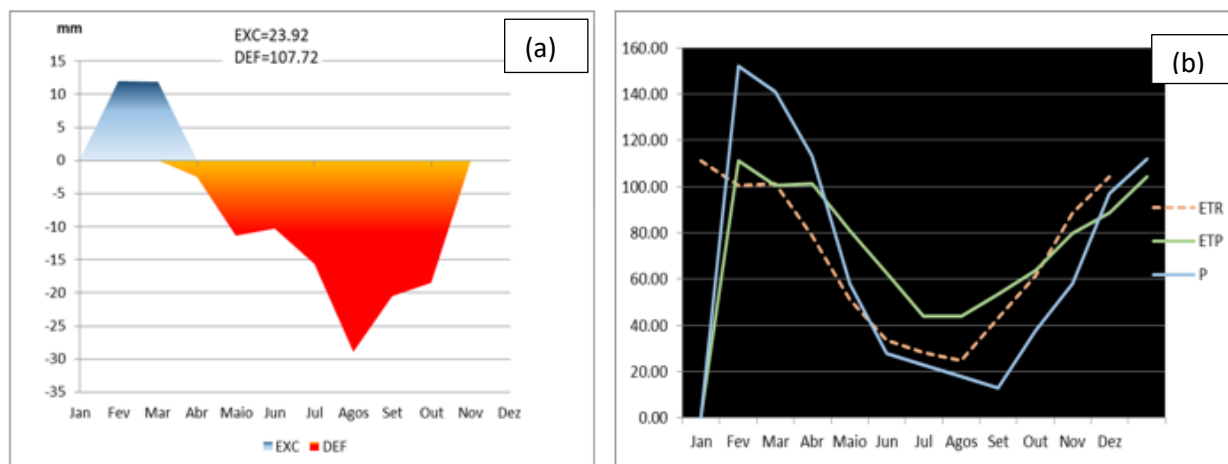
**Tab. 4:** Processo de cálculo da Recarga pelo método Balanço Hídrico para o ponto 1.

<i>Mês</i>	<i>P(mm)</i>	<i>ETp(mm)</i>	<i>P-ETP(mm)</i>	<i>NegAc(mm)</i>	<i>Arm(mm)</i>	<i>ALT(mm)</i>	<i>ETr(mm)</i>	<i>Def(mm)</i>	<i>Exc(mm)</i>
<i>Jan</i>	152	111.07	40.93	-33.77	71.34	40.93	111.07	0.00	0
<i>Fev</i>	141	100.32	40.68	0	100.00	28.66	100.32	0.00	12.01
<i>Mar</i>	113	101.08	11.92	0	100	0.00	101.08	0.00	11.92
<i>Abr</i>	58	81.09	-23.09	-23.09	79.38	-20.62	78.62	2.47	0
<i>Mai</i>	28	62.74	-34.74	-57.83	56.09	-23.29	51.29	11.44	0
<i>Jun</i>	23	43.88	-20.88	-78.71	45.52	-10.57	33.57	10.31	0
<i>Jul</i>	18	44.05	-26.05	-104.77	35.08	-10.44	28.44	15.61	0
<i>Agos</i>	13	53.60	-40.60	-145.37	23.37	-11.70	24.70	28.90	0
<i>Set</i>	38	63.86	-25.86	-171.22	18.05	-5.32	43.32	20.53	0
<i>Out</i>	58	80.02	-22.02	-193.24	14.48	-3.57	61.57	18.45	0
<i>Nov</i>	97	88.72	8.28	-148.02	22.76	8.28	88.72	0.00	0
<i>Dez</i>	112	104.35	7.65	-119.04	30.41	7.65	104.35	0.00	0
<i>Total</i>	851	934.79	-83.79	-1075.1	596.46	0.00	827.07	107.72	23.928

**Fonte:** (Modificado pela autora).

O BHC mostra o comportamento da água no solo em que ocorre déficit e excesso (Fig.13). O período de excesso contempla dois meses do ano (Fevereiro e Março) (Fig.13a). Todos esses valores encontram-se no período chuvoso da região, por isso a quantidade de precipitação ocorrida nos meses de excesso hídrico ultrapassam facilmente o valor da capacidade de água disponível (CAD), o período de déficit contempla sete meses do ano (Abril á Outubro) e os restantes meses não ocorre nem déficit e nem excesso (Fig.13).

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo



**Fig. 13:** Representação dos excedentes, deficiências hídricas, precipitação, evapotranspiração potencial e real (P1) (Fonte: Elaborado pela autora).

**Tab. 5:** Processo de cálculo da Recarga pelo método Balanço Hídrico para o ponto 2.

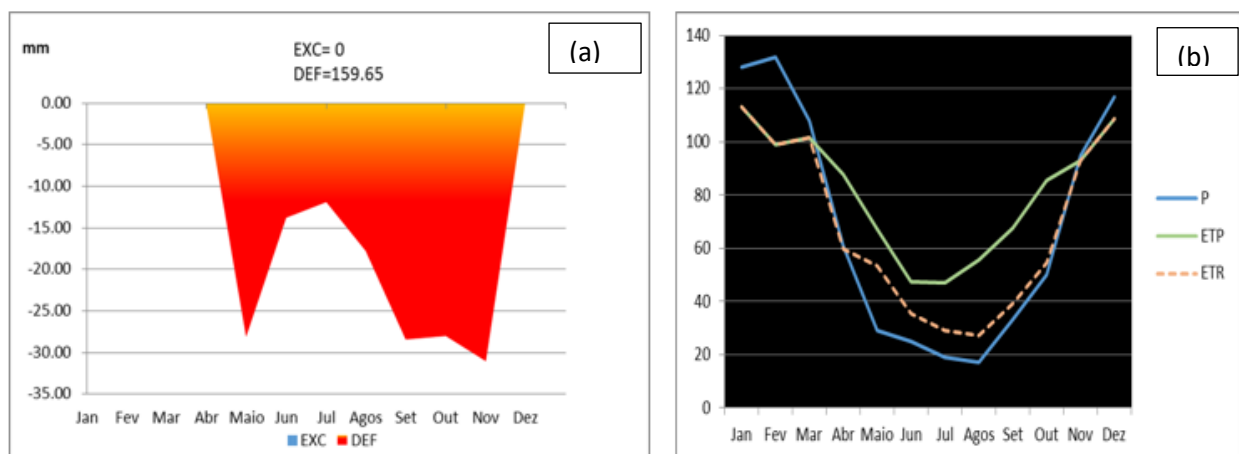
Mês	P (mm)	ETP(mm)	P- ETP(mm)	NA(mm)	ARM(mm)	ALT(mm)	ETR(mm)	DEF(mm)	EXC(mm)
Jan	128	113.28	14.72	-102.72	35.80	14.72	113.28	0.00	0.00
Fev	132	99.09	32.91	-37.52	68.71	32.91	99.09	0.00	0.00
Mar	108	101.65	6.35	-28.68	75.06	6.35	101.65	0.00	0.00
Abr	61	87.88	-26.88	-26.88	76.43	1.37	59.63	28.24	0.00
Maio	29	67.02	-38.02	-64.90	52.26	-24.18	53.18	13.85	0.00
Jun	25	47.48	-22.48	-87.38	41.74	-10.52	35.52	11.96	0.00
Jul	19	46.97	-27.97	-115.35	31.55	-10.19	29.19	17.79	0.00
Agos	17	55.66	-38.66	-154.01	21.44	-10.12	27.12	28.55	0.00
Set	33	67.39	-34.39	-188.40	15.20	-6.24	39.24	28.15	0.00
Out	50	85.68	-35.68	-224.08	10.64	-4.56	54.56	31.12	0.00
Nov	95	93.03	1.97	-207.07	12.61	1.97	93.03	0.00	0.00
Dez	117	108.53	8.47	-155.68	21.08	8.47	108.53	0.00	0.00

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo

Total	814	973.65	-159.65	-1392.7	462.51	0.00	814.00	159.65	0.00
-------	-----	--------	---------	---------	--------	------	--------	--------	------

(Fonte: Elaborado pela Autora).

Os resultados do cálculo do (BHC) para o P2 (Fig.14) mostram o comportamento da água no solo em que ocorreu défice nos meses de Abril á Outubro e no período de Janeiro á Abril não ocorreu nem o excesso nem o défice (Fig.14a).



**Fig. 14:** Representação dos excedentes, deficiências hídricas, precipitação, evapotranspiração potencial e real (P2) (Fonte: Elaborado pela autora).

**Tab. 6:** Processo de cálculo da Recarga pelo método Balanço Hídrico para o ponto 3.

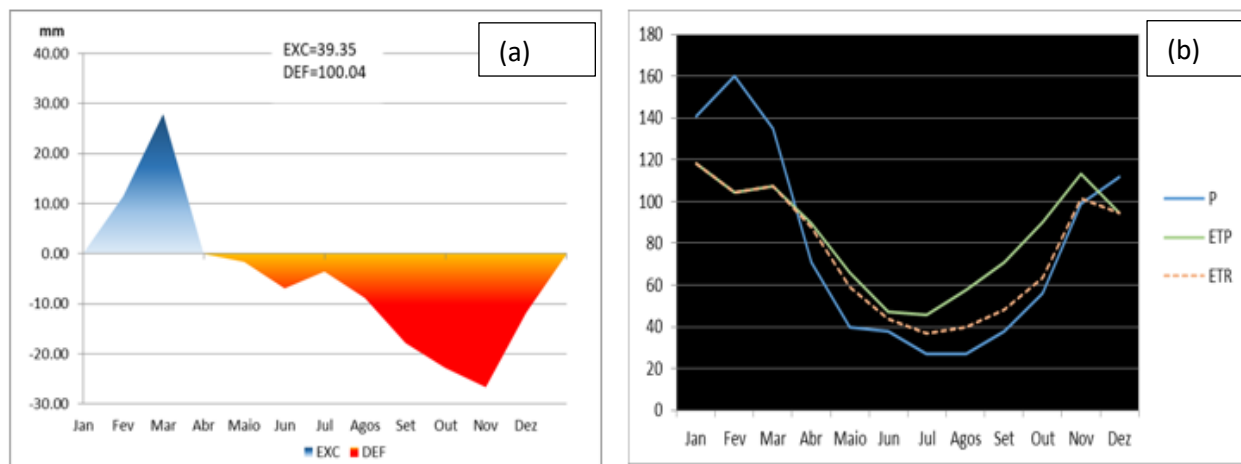
Mês	P(mm)	ETP(mm)	P-ETP(mm)	NA(mm)	ARM(mm)	ALT(mm)	ETR(mm)	DEF(mm)	EXC(mm)
Jan.	141	118.20	22.80	-58.066	55.95	22.80	118.20	0.00	0.00
Fev.	160	104.48	55.52	0	100.00	44.05	104.48	0.00	11.47
Mar.	135	107.12	27.88	0	100	0.00	107.12	0.00	27.88
Abr.	71	89.36	-18.36	-18.36	83.23	-16.77	87.77	1.59	0
Mai.	40	66.02	-26.02	-44.38	64.16	-19.07	59.07	6.95	0
Jun.	38	47.06	-9.06	-53.44	58.60	-5.56	43.56	3.50	0
Jul.	27	45.83	-18.83	-72.26	48.55	-10.06	37.06	8.77	0
Ago.	27	57.69	-30.69	-102.95	35.72	-12.83	39.83	17.86	0
Set.	38	70.86	-32.86	-135.81	25.71	-10.00	48.00	22.86	0

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo

<i>Out.</i>	56	90.19	-34.19	-170.00	18.27	-7.45	63.45	26.74	0
<i>Nov.</i>	99	113.19	-14.19	-184.19	15.85	-2.42	101.42	11.77	0
<i>Dez.</i>	112	94.70	17.30	-110.40	33.16	17.30	94.70	0.00	0
<i>Total</i>	944	1004.69	-60.69	-949.84	639.20	0.00	904.65	100.04	39.35

**Fonte:** Elaborado pela Autora).

Os resultados do cálculo do BHC para o P3 mostram o comportamento da água no solo em que ocorre déficit e excesso (Tab.6). O período de excesso contempla dois meses do ano (Fevereiro e Março) (Fig.15a). Todos esses valores encontram-se no período chuvoso da região, por isso a quantidade de precipitação ocorrida nos meses de excesso hídrico ultrapassam o valor da capacidade de água disponível (CAD), o período de déficit contempla sete meses do ano (Abril á Novembro) e os restantes meses não ocorre nem déficit e nem excesso (Fig15b).



**Fig. 15:** Representação dos excedentes, deficiências hídricas, precipitação, evapotranspiração potencial e real (P3) (Fonte: Elaborado pela autora).

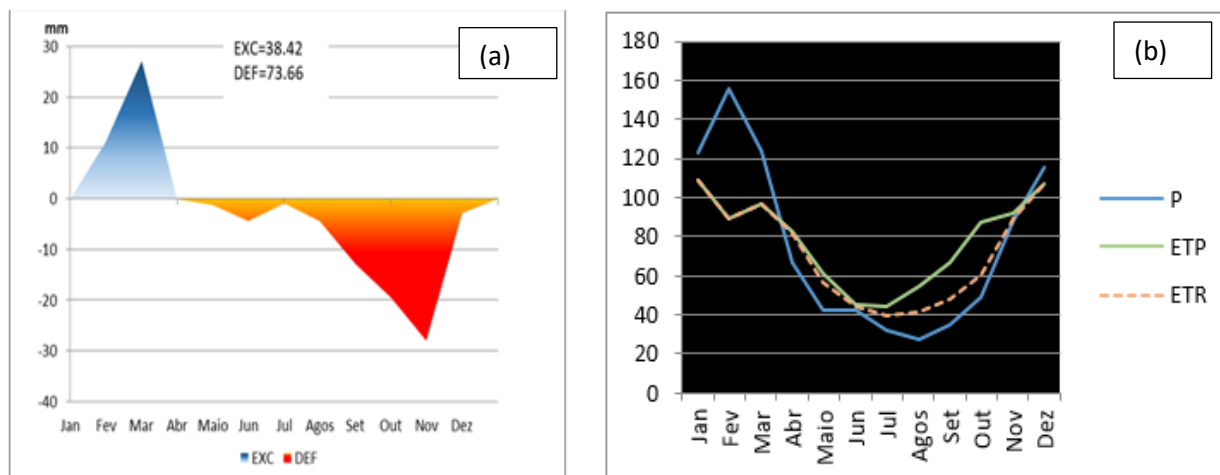
A tabela 7 mostra os resultados obtidos no cálculo da recarga pelo método do BH no Ponto 4. Onde o mês de Janeiro registou a evapotranspiração potencial máxima (108.79 mm/ano) e a mínima (43.99 mm/ano) foi registada em Julho (Tab.5).

**Tab. 7:** Processo de cálculo da Recarga pelo método Balanço Hídrico para o ponto 4.

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da  
Região Metropolitana do Grande Maputo

<i>Mês</i>	<i>P(mm)</i>	<i>ETP(mm)</i>	<i>P- ETP(mm)</i>	<i>NA(mm)</i>	<i>ARM(mm)</i>	<i>ALT(mm)</i>	<i>ETR(mm)</i>	<i>DEF(mm)</i>	<i>EXC(mm)</i>
<i>Jan.</i>	123	108.79	14.21	-80.771	44.59	14.21	108.79	0.00	0
<i>Fev.</i>	156	89.35	66.65	0	100	55.41	89.35	0.00	11.24
<i>Mar.</i>	124	96.81	27.19	0	100	0	96.81	0.00	27.19
<i>Abr.</i>	67	82.92	-15.92	-15.92	85.28	-14.72	81.72	1.20	0
<i>Mai.</i>	42	61.09	-19.09	-35.02	70.46	-14.82	56.82	4.27	0
<i>Jun.</i>	42	45.10	-3.10	-38.11	68.31	-2.15	44.15	0.95	0
<i>Jul.</i>	32	43.99	-11.99	-50.11	60.59	-7.72	39.72	4.27	0
<i>Agos.</i>	27	54.27	-27.27	-77.37	46.13	-14.46	41.46	12.81	0
<i>Set.</i>	35	67.05	-32.05	-109.42	33.48	-12.65	47.65	19.40	0
<i>Out.</i>	49	87.65	-38.65	-148.07	22.75	-10.73	59.73	27.91	0
<i>Nov.</i>	88	91.67	-3.67	-151.73	21.93	-0.82	88.82	2.85	0
<i>Dez.</i>	115	106.55	8.45	-119.14	30.38	8.45	106.55	0.00	0
<i>Total</i>	900	935.23	-35.23	-825.66	683.89	0.00	861.57	73.66	38.429

Os resultados do cálculo do BHC no P4 mostram o comportamento da água no solo. O período de excesso contempla dois meses do ano (Fevereiro e Março) (Fig.16a) e o período de déficit contempla sete meses do ano (Abril á Novembro) e nos restantes meses não ocorre nem déficit e nem excesso (Fig.16b).



**Fig. 16:** Representação dos excedentes e deficiência hídrica no solo (P4) (Fonte: Elaborado pela autora).

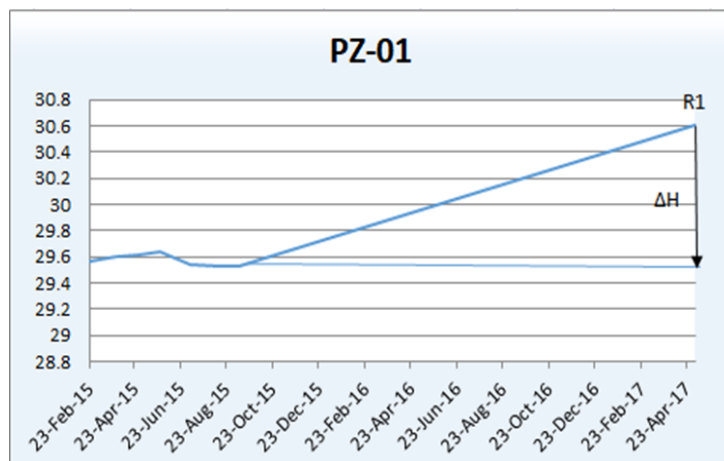
De forma geral os resultados obtidos no cálculo da recarga do aquífero usando o método balanço hídrico mostraram que a precipitação registou máximos no mês de Janeiro á Março. Todos esses valores altos de precipitação encontram-se no período chuvoso da região, o que demonstra que a precipitação é um factor muito importante e tem bastante influencia na recarga dos aquíferos e por isso a quantidade de precipitação ocorrida nos meses de excesso hídrico ultrapassam facilmente o valor da capacidade de água disponível. Esses resultados são influenciados pela sazonalidade da estação climática em Moçambique, que apresentam um verão muito quente e chuvoso e um inverno frio e seco (Tembe, 2015; Manjate, 2013). E apresentaram maiores valores de evapotranspiração potencial nos meses de (Outubro á Março) isso mostra que a evapotranspiração potencial é um parâmetro que é directamente proporcional a temperatura do ar, sendo assim meses quentes registam maiores valores e meses frios registam menores valores.

### 5.1.2 Variação do Nível Freático

O cálculo da recarga usando o método de nível freático foi feito em onze (11) piezómetros que são apresentados a seguir.

- **PZ01-** Piézometro de Monitoramento de Cumbeza.

A Figura 17, mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Cumbeza (PZ01), onde a recarga máxima anual foi de 72.22mm /ano e a mínima foi 56.2mm /ano.



**Fig. 17:** Variação do nível piezométrico (m) (Fonte: Elaborado pela Autora).

**Tab. 8:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz01 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

$\Delta H$	Valor de $\Delta H$ (m)	Recarga Min (mm)	Recarga Max (mm)
R1	1.07	224.7	288.9
Média anual	0.26	56.2	72.22

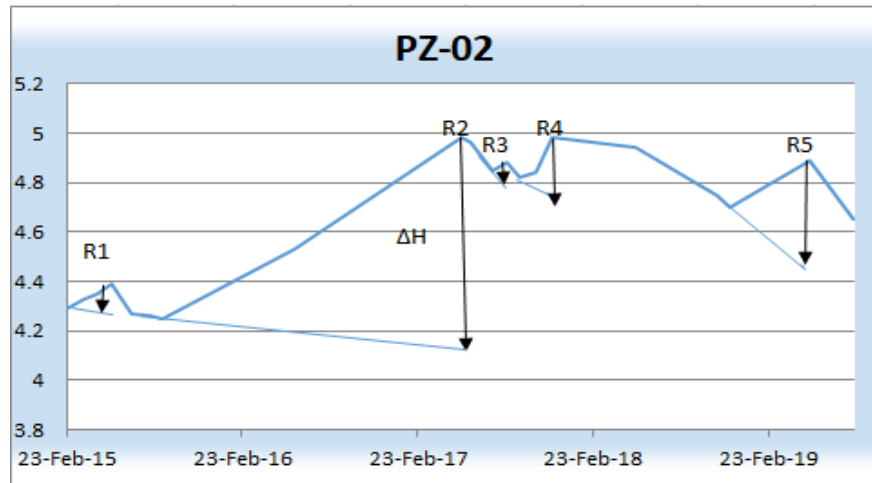
**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

**PZ02-** Piézometro de Monitoramento de Montanhane.

A Figura 18 mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Montanhane (PZ02), onde mostra o cálculo da recarga mínima e máxima no PZ02, onde a recarga máxima foi 95.85mm/ano e a mínima foi 74.55mm/ano. A curva de recessão traçada permite a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1,



R2, R3, R4 e R5. Os valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados na (Tab.9), juntamente com os valores de recarga, calculados para cada variação de nível de água.



**Fig. 18:** Variação do nível freático (m) na estação de monitoramento de Montanhane (Fonte: Elaborado pela Autora).

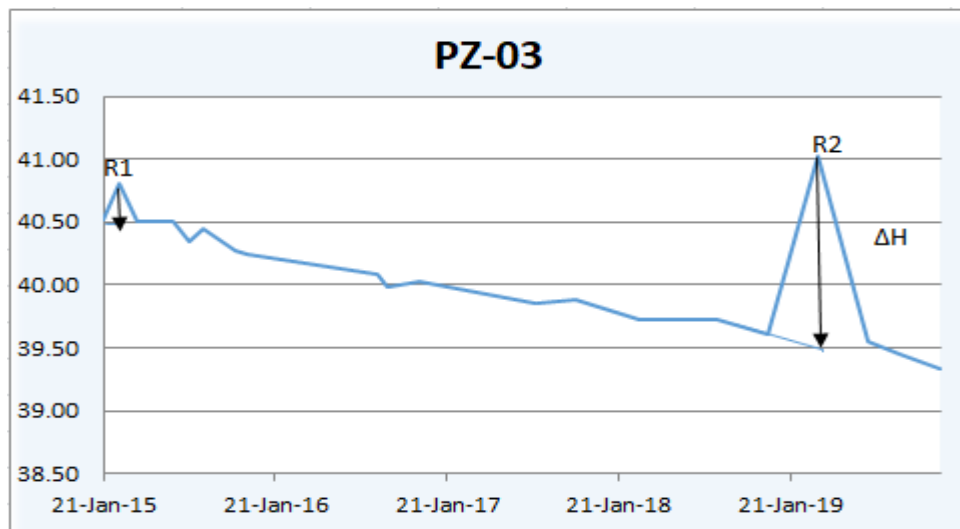
**Tab.9:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz02 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada

$\Delta H$	Valor de $\Delta H$ (mm)	Recarga min (mm)	Recarga max (mm)
R1	0.11	23.1	29.7
R2	0.9	189	243
R3	0.09	18.9	24.3
R4	0.28	58.8	75.6
R5	0.04	8.4	10.8
Média anual	0.35	74.55	95.85

Fonte: (Elaborado pela Autora)

**PZ03-** Piézometro de Monitoramento de Pazimane.

A (Fig.19) mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Pazimane (PZ03). Onde a recarga média anual nos anos de 2015 á 2019, varia de 126.5 á 162.6 mm. A figura também apresenta a curva de recessões traçada, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1 e R2. Os valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados na (Tab.10), juntamente com os valores de recarga, calculados para cada variação de nível de água.



**Fig. 19:**Variação do nível piezométrico (m) em Pazimane (Fonte: Elaborado pela Autora).

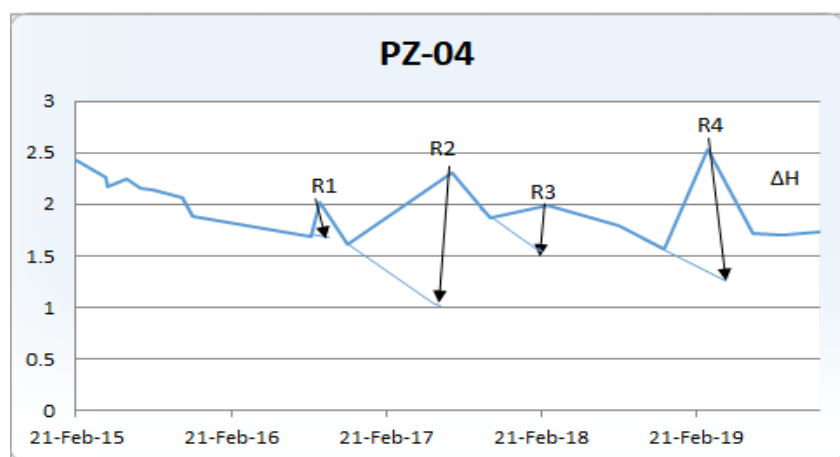
**Tab.10:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz03 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

$\Delta H$	Valor de $\Delta H$ (mm)	Recarga min (mm)	Recarga max (mm)
R1	1	210	270
R2	1.41	296.1	380.7
Média anual	0.60	126.5	162.6

Fonte: (Elaborado pela Autora).

**PZ04-** Piézometro de Monitoramento de Faftine.

Os dados de profundidade do nível de água foram plotados em gráfico (Fig.20) que permite relacionar o incremento na recarga do aquífero e mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Faftine (PZ04), onde a recarga total do Pz04, de 2015 á 2019, foi de 166.8mm/ano á 215 mm/ano. A Figura 20 também apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1, R2, R3 e R4. Os valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados (Tab.11), juntamente com os valores de recarga, calculados para cada variação de nível de água.



**Fig. 20:**Variação do nível piezométrico (m) em Faftine (Fonte: Elaborado pela Autora).

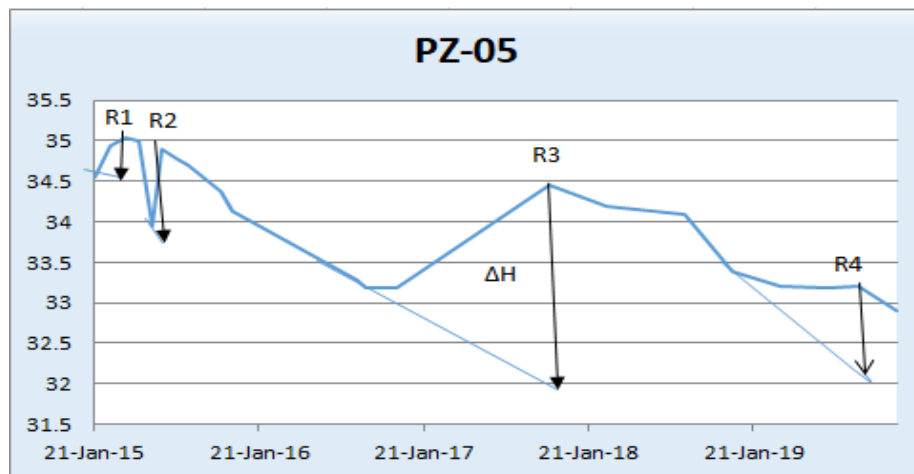
**Tab. 11:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz04 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

$\Delta H$	Valor de $\Delta H$ (mm)	Recarga min (mm)	Recarga max (mm)
R1	0.43	90.3	116.1
R2	1.3	273	351
R3	0.25	52.5	67.5
R4	1.2	252	324
Média anual	0.79	166.8	215

**Fonte:** (Elaborado pela Autora).

**PZ05-** Piezômetro de Monitoramento de Maluana.

A Figura 21 mostra a variação do nível freático no Piezômetro de Monitoramento de Maluana (PZ05), que mostra o cálculo da recarga mínima e máxima no PZ05, onde a recarga média anual do PZ05, de 2015 á 2019, é de 256mm/ano á 330mm/ano. As curvas de rebaixamento, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), estão identificadas como R1, R2, R3 e R4 (Tab.12).



**Fig. 21:** Variação do nível piezométrico (m) em Maluana (Fonte: Elaborado pela Autora).

**Tab.12:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz05 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada

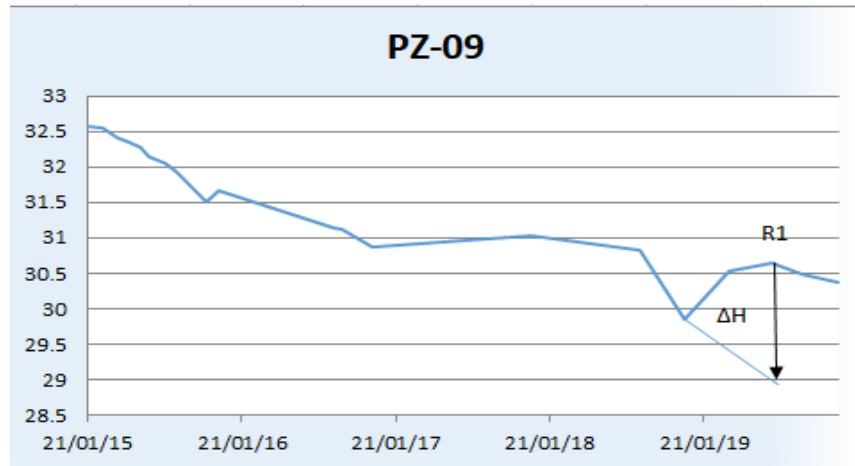
$\Delta H$	Valor de Recarga	Recarga	Recarga
$\Delta H$ (mm)	(mm) min	(mm) max	
R1	0.5	105	135
R2	0.58	121.8	156.6
R3	2.5	525	675
R4	1.3	273	351
Média anual	1.22	256	330

**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

**PZ09-Piézometro de Monitoramento de Checheche.**

A Figura 22 mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Checheche (PZ09), que apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, onde fez a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1. Os

valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados (Tab.13). Em que a recarga total do Pz09, de 2015 á 2019, varia de 89.25mm/ano á 114.7 mm/ano.



**Fig. 22:**Variação do nível piezométrico (m) de Checheche (Fonte: Elaborado pela Autora).

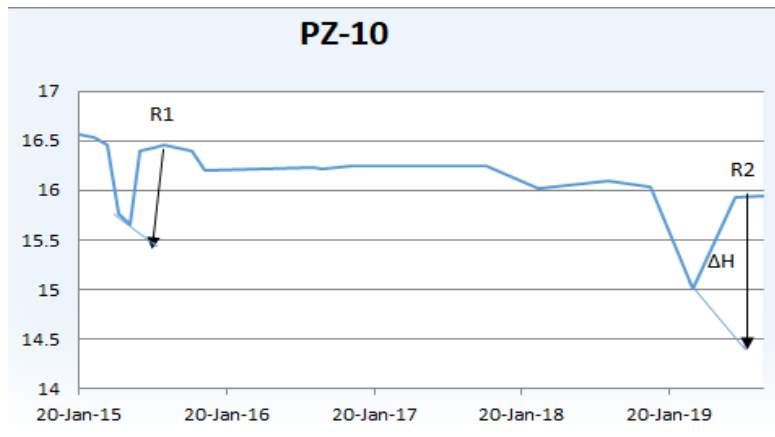
**Tab. 13:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz09 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

$\Delta H$	Valor de Recarga		
	$\Delta H$ (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)
<i>RI</i>	1.7	357	459
<i>Média</i>	0.42	89.25	114.7

**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

**PZ10-** Piézometro de Monitoramento de Matilde.

A Figura 23 mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Matilde (PZ10) e apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1. Os valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados (Tab.16). Onde a recarga total do Pz10, de 2015 á 2019, variou de 109.72mm/ano á 141.07 mm/ano.



**Fig. 23:**Variação do nível piezométrico (m) de Matilde (Fonte: Elaborado pela Autora).

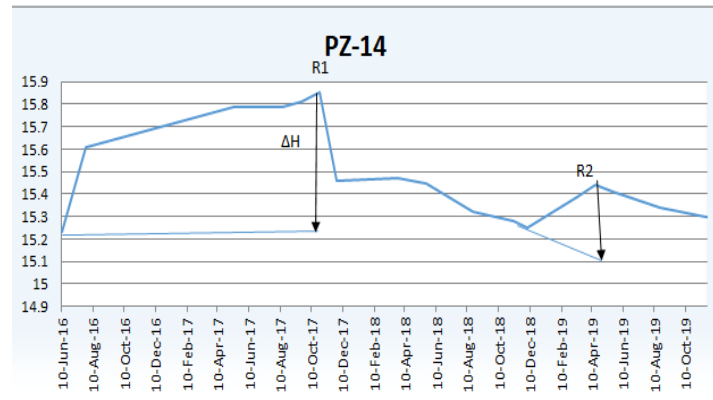
**Tab. 14:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz10 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

$\Delta H$	<i>Valor de Recarga Recarga</i>		
	$\Delta H (mm)$	<i>(mm)</i>	<i>(mm)</i>
<i>R1</i>	1	210	270
<i>R2</i>	1.09	228.9	294.3
<i>Média</i>	0.52	109.72	141.07

**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

PZ14- Piézometro de Monitoramento de Gumbana.

A Figura 24 mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Gumbana (PZ14) que apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, permitindo a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1. A recarga total do Pz14, de 2015 á 2019, variou de 49.8mm/ano á 64.12 mm/ano.



**Fig. 24:** Variação do nível piezométrico (m) de Gumbana (Fonte: Elaborado pela Autora).

**Tab. 15:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz14 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada

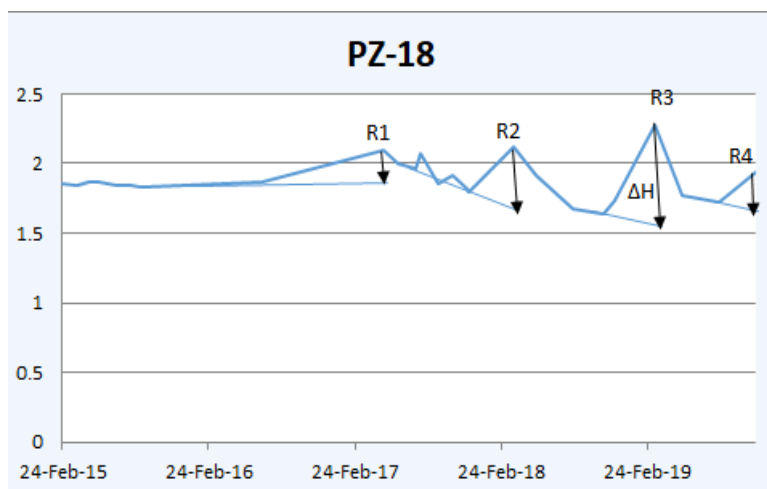
$\Delta H$	Valor de $\Delta H$ (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)
R1	0.6	126	162
R2	0.35	73.5	94.5
Média	0.023	49.8	64.12

**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

#### **PZ18-** Piézometro de Monitoramento de Triunfo.

A Figura 25 mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Triunfo (PZ18), que apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1, R2, R3 e R4. Os valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados (Tab.21). Onde a recarga total do Pz18, de 2015 á 2019, é de 147mm/ano á 189 mm/ano.





**Fig. 25:**Variação do nível piezométrico (m) de Triunfo (Fonte: Elaborado pela Autora).

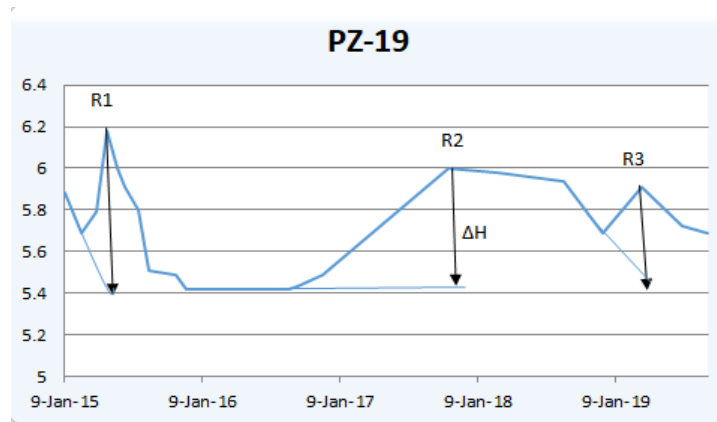
**Tab. 16:**Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz18 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada

$\Delta H$	<i>Valor de Recarga</i>	
	$\Delta H$ (mm)	Recarga (mm)
R1	0.3	63
R2	0.9	189
R3	1.1	231
R4	0.5	105
<i>Média</i>	0.7	147

**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

**PZ19-** Piézometro de Monitoramento de Lagoa Phati.

A Figura 26 mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Lagoa Phati (PZ19) e apresenta as curvas de rebaixamento traçadas que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), que estão identificadas como R1, R2 e R3. Os valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados (Tab.22). Onde a Recarga total do Pz19, de 2015 a 2019, é de 99.75mm/ano á 128.25 mm/ano.



**Fig. 26:**Variação do nível piezométrico (m) de Lagoa Phati (Fonte: Elaborado pela Autora).

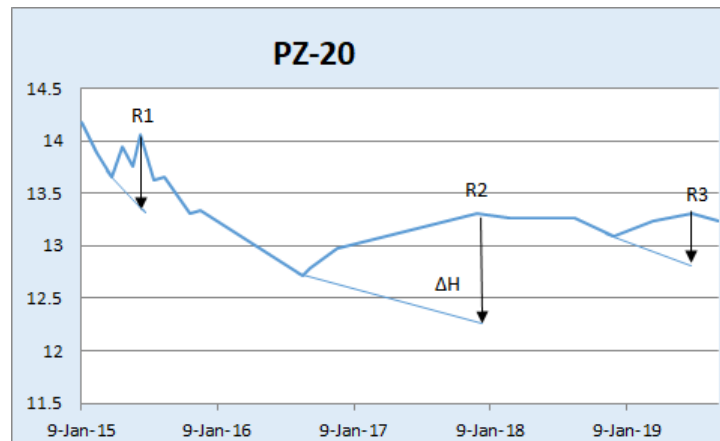
**Tab. 17:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz19 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada

$\Delta H$	<i>Valor de Recarga Recarga</i>		
	$\Delta H$ (mm)	(mm)	(mm)
R1	0.8	168	216
R2	0.6	126	162
R3	0.5	105	135
<i>Média anual</i>	0.47	99.75	128.25

**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

**PZ20-** Piézometro de Monitoramento de Chiau.

Figura 27, mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Chiau (PZ20), que apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente e permitem a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1, R2 e R3. Os valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados (Tab.23). Onde Recarga média anual do Pz20, de 2015 á 2019, é de 118mm/ano á 151.8 mm/ano.



**Fig. 27:**Variação do nível piezométrico (m) de Chiau (Fonte: Elaborado pela Autora).

**Tab. 18:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz20 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada

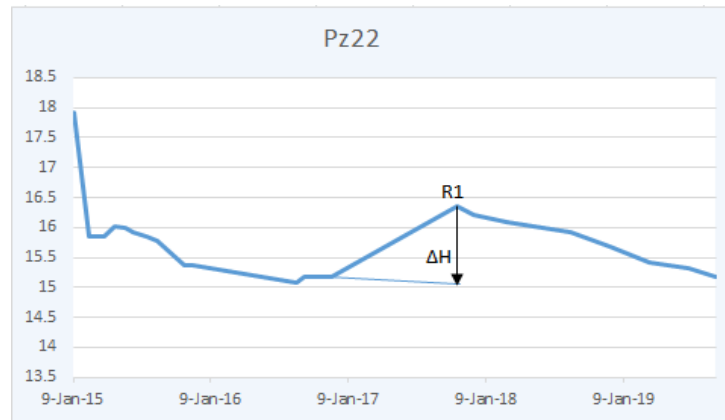
$\Delta H$	Valor de Recarga		Recarga
	$\Delta H$ (mm)	(mm)	(mm)
R1	0.75	157.5	202.5
R2	1	210	270
R3	0.5	105	135
Média anual	0.52	118	151.8

**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

**PZ22-** Piezómetro de Monitoramento de Camunguine.

Figura 28, mostra a variação do nível freático no Piézometro de Monitoramento de Camunguine (PZ22), que apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível de água ( $\Delta h$ ), identificadas como R1. Os valores de  $\Delta h$  obtidos estão representados (Tab.25). Onde a recarga total do Pz22, de 2015 á 2019, varia de 73.5mm/ano á 94.5mm/ano.

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo



**Fig. 28:** Variação do nível piezométrico (m) de Camunguine (Fonte: Elaborado pela Autora).

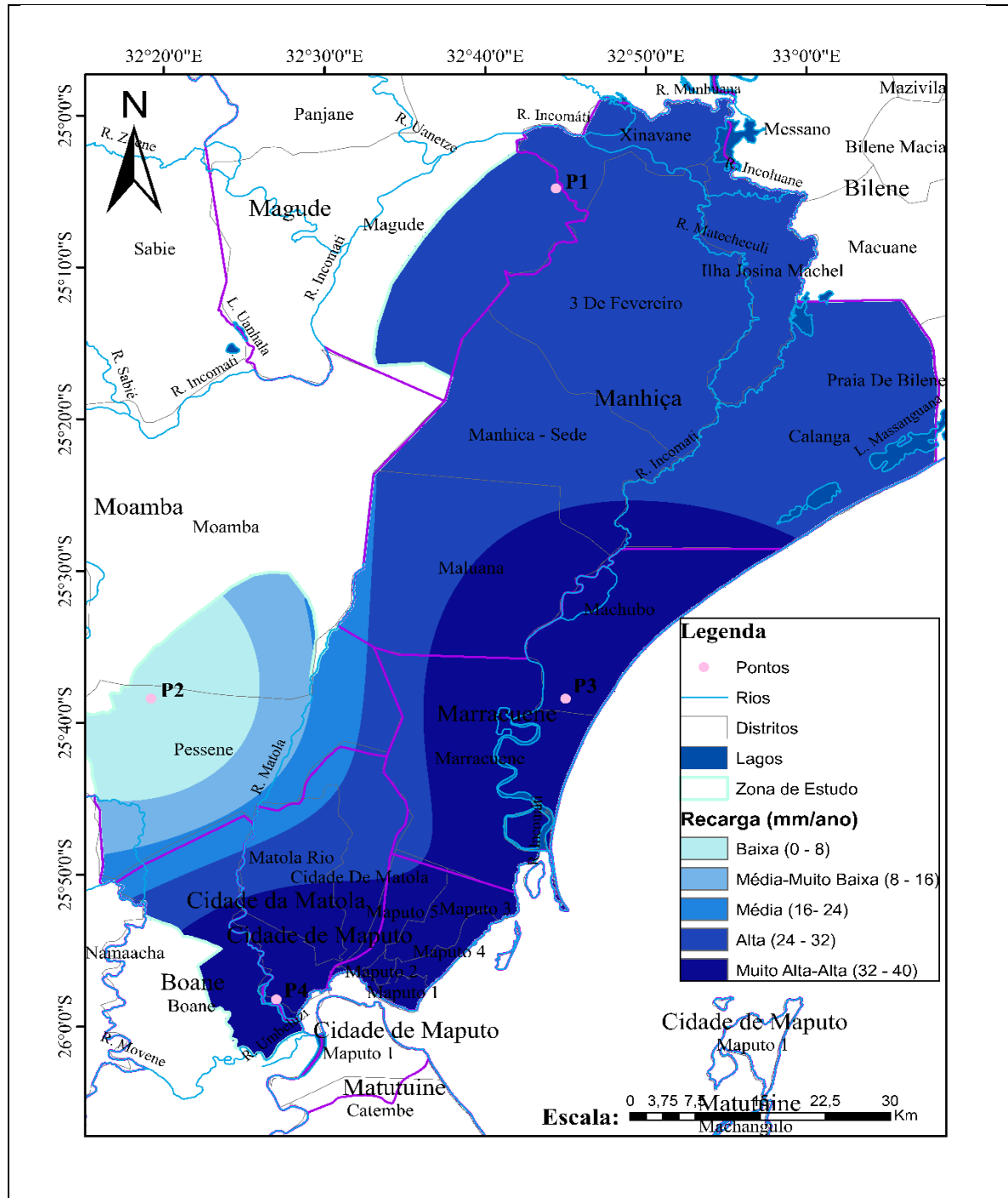
**Tab. 19:** Valores das variações dos níveis de água ( $\Delta h$ ) obtidos no Pz22 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

$\Delta H$	Valor de $\Delta H$ (mm)	Recarga (mm)	Recarga (mm)
<i>RI</i>	1.4	294	378
<i>Média anula</i>	0.35	73.5	94.5

**Fonte:** (Elaborado pela Autora)

Através dos resultados obtidos no cálculo da recarga, foram elaborados os mapas representados nas figuras 29 e 30 que demonstram a variação espacial da recarga média anual na região metropolitana do Grande Maputo para os métodos Balanço Hídrico e Variação do Nível freático. Conforme o que se encontra patente no mapa a recarga na área de estudo, para os diferentes métodos resultou em cinco (5) diferentes categorias ou classes de recarga media anual e varia de baixa á muito alta.

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo



**Fig. 29:** Análise espacial da recarga para o método balanço hídrico (Fonte: Modificado pela Autora).

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da Região Metropolitana do Grande Maputo

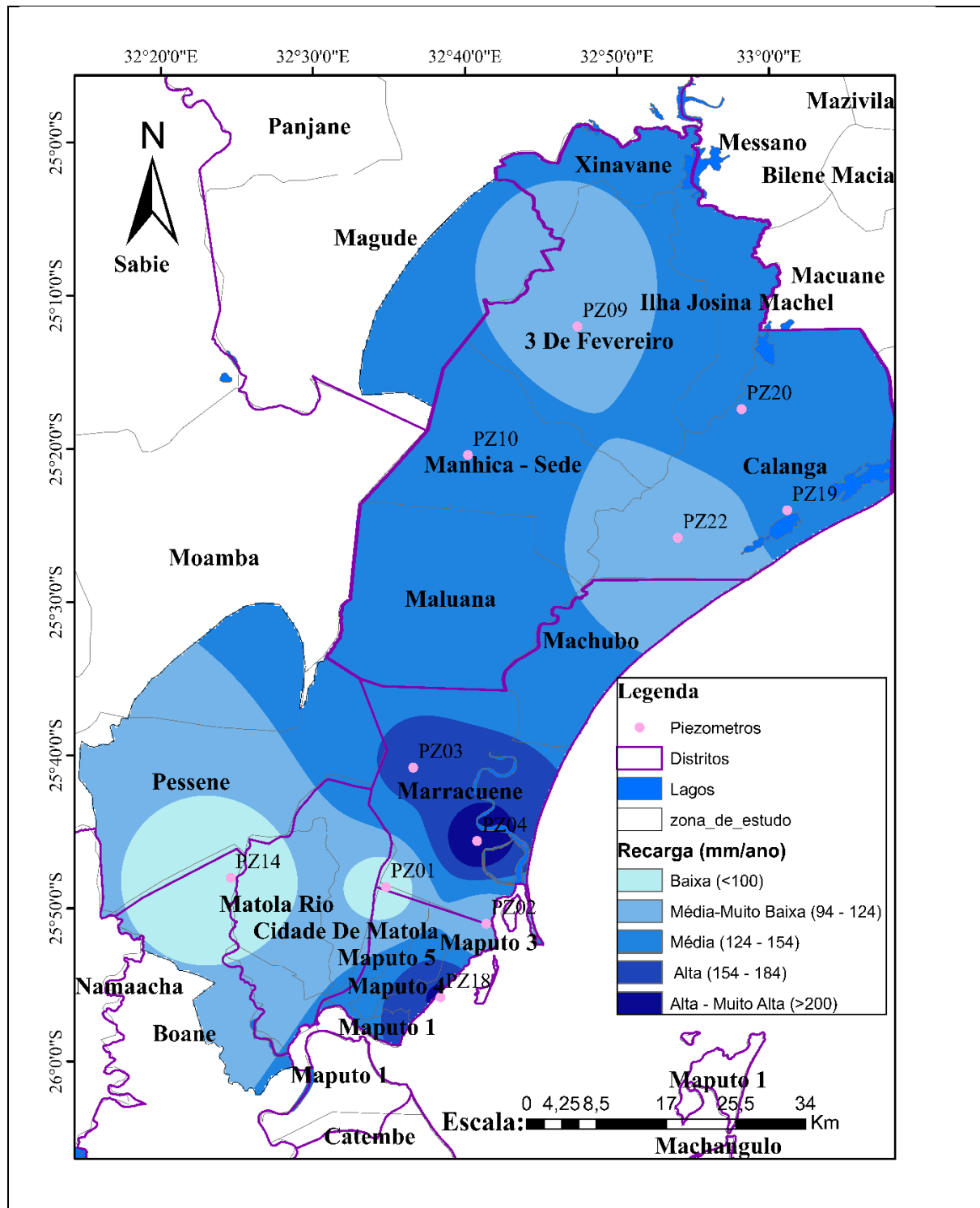


Fig. 30: Análise espacial da recarga para o método variação do Nível Freático (Fonte: Modificado pela Autora).

## CAPÍTULO VI

### 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente estudo visa encontrar uma forma de estimar de recarga num aquífero. Para se realizar o objetivo foi usado o aquífero freático da região Metropolitana do Grande Maputo. Onde Primeiramente fez se o cálculo da recarga usando dois métodos nomeadamente Balanço Hídrico e Variação do Nível Freático dos aquíferos.

Tomou-se o intervalo de tempo que parte do ano 1940 á 2000 para se calcular as precipitações médias mensais para a execução do Balanço Hídrico e tomou-se os dados dos 11 piézometros existentes na região Metropolitana Grande Maputo para o cálculo da recarga pelo método Variação do Nível Freático.

Na aplicação dos métodos seleccionados, foi possível estimar a recarga aquífera da região metropolitana do Grande Maputo pelo método de balanço hidrico, onde os valores de ETP anual obtidos através da fórmula empírica de Thorntwaite & Matter (1955) variaram de 24.70mm/ano á 118.20mm/ano, dados estes que possibilitaram a definição dos meses que ocorrem excedente hídrico. Foi observado também que os maiores valores de evapotranspiração média mensal ocorreram nos meses de Janeiro com 111.07mm/ano, 113.28mm/ano, 118.20mm/ano, 108.79 mm/ano, facto este que foi provocado pelas altas temperaturas e que consequentemente influenciou na alta taxa de evapotranspiração fazendo com que o consumo de água pelas plantas fosse maior que o disponível no solo e o mês de Julho com 44.05mm/ano, 46.97mm/ano, 45.83mm/ano, 43.99 mm/ano apresentou menores valores de evapotranspiração respectivamente. A partir destes dados obteve-se o comportamento das linhas de P, ETR, DEF e EXC.

Os cálculos mostraram que as deficiências hídricas estão distribuídas entre os meses de Abril á Outubro e o excedente hídrico nos meses de Janeiro á Março que a precipitação é superior a evapotranspiração real, com excepção do ponto 2 em que, não ocorre nem excedência, nem deficiência hídrica. Este facto deve-se a ocorrência de equilíbrio hídrico, isto é o excedente e a deficiência hídrica são iguais a zero (0mm/ano), o que significa que a quantidade de água que entrou no sistema aquífero foi igual a quantidade de água que saiu do mesmo sistema. Também pode se observar, nos gráficos plotados que o défice de água está directamente relacionado com

precipitação e o comportamento da linha de excedência é semelhante ao da precipitação. Os meses com menor precipitação em relação a evapotranspiração apresentaram maior deficiência, ou seja, o balanço hídrico é negativo por apresentar uma evapotranspiração maior que a precipitação, o que significa que no intervalo destes meses houve menor disponibilidade hídrica. Desta forma, tem-se uma recarga potencial de 23.92mm/ano, 0.0mm/ano, 39.35mm/ano e 38.42mm/ano para os Pontos 1, 2, 3 e 4.

Para o método variação do Nível freático nos 11 piézômetros de monitoramento seleccionados, foram constatadas dinâmicas diversas de variações de nível. Em que os piézômetros 04 e 18 apresentaram alta variabilidade do nível freático em relação aos outros piézômetros, isto pode ter sido causado por se localizarem próximo do mar e o seu nível freático provavelmente foi influenciado pela pressão da água do mar. De acordo com este método foi possível também identificar que as maiores elevações de nível freático ocorrem na estação chuvosa (Janeiro á Março). Os menores valores ocorreram nos meses de Junho a Setembro, correspondendo aos intervalos de menores precipitações. E os valores de recarga obtidos variam de 56.2mm á 215mm/ano nos 11 piézômetros de monitoramento. Vale também ressaltar que este método possui incertezas no que diz respeito a variação do nível freático, porque o nível de água nos aquíferos pode também ser influenciado pela alta densidade de extracção de água no local. Como é o caso do distrito de Manhiça que não possui alta recarga segundo o método, mas constitui uma região pantanosa em relação aos outros distritos da área de estudo.

De acordo com os resultados dos cálculos acima feitos e fazendo a respectiva comparação entre os dois métodos constatou-se que o método do balanço hídrico mostrou se efectivo para obtenção dos parâmetros que compõem a equação do balanço hídrico para a região metropolitana do grande Maputo, obtendo valores que variam entre 23mm/ano á 39 mm/ano de excedente. Estes valores não apresentaram grande variabilidade espacial devido a ausência de dados, reduzindo assim a precisão dos resultados obtidos , ao passo que o método de variação do nível freático apresentou alta variabilidade espacial.

Para os dois métodos a regiões com maior recarga estão localizados nas áreas costeiras sendo que os pontos que apresentaram menor valores de recarga estão localizados em áreas em que as



características geológicas local não são favoráveis à infiltração, as altas taxas de impermeabilização da área possivelmente foram um dos principais factores responsáveis pela baixa recarga. Em correspondência à precipitação total, esse facto sugere que o tempo de resposta do sistema é curto, o que implicaria em curto tempo de retenção das águas de recarga na zona, isto demonstra a necessidade de políticas de gestão do uso e ocupação do solo em espaços urbanos que viabilizem áreas para permitir a infiltração da precipitação. Os mapas das figuras 29 e 30 mostram ainda que para o método balanço hídrico ocorre uma recarga alta á muito alta no distrito de Marracuene e cidade de Maputo, na cidade da Matola e Boane a recarga varia de média á muito alta, para Moamba a recarga varia de baixa á média e para os distritos de Manhiça e Magude a recarga varia de baixa á média muito baixa.

Para o método Variação do Nível Freático no distrito de Marracuene ocorre uma recarga que varia de média á muito alta, na cidade da Matola e Boane a recarga varia de baixa á média muito baixa, para a cidade de Maputo a recarga varia de baixa á muito alta e para os distritos de Moamba, Manhiça e Magude a recarga varia de média muito baixa á média.

No entanto estes métodos podem-se considerar muito próximo da realidade devido os parâmetros considerados para o cálculo de recarga, por exemplo os dois métodos mostraram resultados que indicam uma boa recarga na região do distrito da Manhiça e parte Norte do distrito de Marracuene que segundo a carta hidrogeologia há ocorrência de aquíferos com boa produtividade com um caudal maior que  $50\text{m}^3/\text{h}$  e para os distritos de Moamba e Matola os métodos indicaram uma recarga baixa á média muito baixa o que vai de acordo com a carta hidrogeológica que mostra a ocorrência de aquíferos com produtividade limitada apresentando um caudal menor que  $5\text{m}^3/\text{h}$ .

Estudos feitos por Richt et al. (2011) com base em estudos da BGR e de UNESCO publicados no projecto *Whymap - The Worldwide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme* ([www.whymap.org](http://www.whymap.org)) revelaram que em Moçambique não existem áreas de sobre-exploração significativa, com a excepção da cidade de Maputo como resultado de rápida urbanização o que torna as águas superficiais das barragens de Pequenos Libombos e Moamba-Major ineficientes para abastecer toda a população durante todo o ano. Revelaram ainda que o balanço hídrico de

todas as bacias hidrográficas de Moçambique é considerado positivo uma vez que chove consideravelmente e também pelo facto de Moçambique localizar-se na zona costeira onde a maioria dos rios desagua. Esta informação combinada com a quantidade de recarga de água subterrânea foi modelada por Doell et al. (2006) e resultou nas diferentes categorias de recarga média anual de água subterrânea *per capita*, em que para a região Metropolitana do Grande Maputo a recarga foi considerada média com uma variação de (20 - 100mm/ano) que pode ser observado na (Fig.31) em anexo.

Entretanto, deve-se ressaltar que diversos dados utilizados neste trabalho ainda são insuficientes, o que afectou de certa forma os resultados finais obtidos.

Como forma de subsídio para uma gestão integrada da água deve se evitar alta densidade de poços de exploração, ou seja deve se manter uma distância considerável, principalmente para regiões em que ocorre a deficiência hídrica e conseqüentemente baixa recarga porque podem interferir localmente na disponibilidade dos aquíferos.

O presente estudo teve como objectivo não somente determinar as taxas de recarga aquífera, mas também apresentar esse método como um meio de obtenção de dados, para além disto, deve-se levar em consideração que os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, não devem ser abordados separadamente, pois existe uma relação mútua entre ambos.

## CAPÍTULO VII

### 7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

#### 7.1 CONCLUSÃO

O objectivo principal do presente trabalho era de estimar a recarga aquífera média da região Metropolitana do Grande Maputo. Para atingir este objectivo fez-se um estudo com base em dados de precipitação correspondentes a 4 pontos para o método de balanço hídrico e 18 furos Piezométricos para o método de variação do nível freático conforme a disponibilidade de dados da área. Deste estudo pode-se tirar as seguintes conclusões:

- O método do balanço hídrico apresentou valores de carga média anual que variam de 23.92mm/ano á 38.42mm/ano e para o método variação do nível freático os valores de recarga média anual variam de 56.2/ano á 215mm/ano.
- O método de balanço hídrico é eficaz para estimar a quantidade de água que entra e que sai de um sistema num determinado tempo, porem num contexto hidrogeológico o excedente hídrico não é igual a infiltração, porque nem toda água que cai no solo infiltra. O método de flutuação de nível freático demonstrou-se eficiente para determinar a recarga dos aquíferos e é recomendável para pesquisas geológicas porque fornece maior precisão do valor médio da recarga;
- Que este estudo serve de subsídios científicos para uma gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos no aquífero do Grande Maputo. O conhecimento da recarga é importante para auxiliar na tomada de decisão, e garantir o uso sustentável da água subterrânea, pois a extracção de um volume maior de água pode induzir a rebaixamentos indesejáveis e afectar os aquíferos ou ainda deixa-los vulneráveis a contaminações ou intrusão salina

## **7.2 RECOMENDAÇÕES**

Com vista a proteger as águas subterrâneas em zonas de recarga recomenda-se:

- Estabelecer planos de gestão dos recursos hídricos, de modo assegurar a qualidade das águas subterrâneas, assim, como um programa de monitoramento, que fiscalize os aquíferos conhecidos, identifique e evite fontes de poluição;
- Fazer o monitoramento contínuo, com intervalos de tempo menores, a fim de avaliar a variabilidade da recarga em função da variação da precipitação em curto espaço de tempo;
- Fazer estudos de áreas potenciais de recarga de modo a se fazer o ordenamento territorial com vista a que não se façam construções de infra-estruturas em áreas de recarga.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamo, N. (2012). *Sistema de Abastecimento de Água e Saneamento do Meio: Uma Análise Comparativa. Relatório de Estágio*. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique.
- Administração Regional das Águas do Sul [ARA SUL] (2011), *Sustainable Management of the Groundwater Resources in the Maputo Metropolitan Area*. Ministério das Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos, Relatório.
- Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage paper 56. FAO-ONU, Rome, Italy.
- Antenor, B. J. (2004). Elementos de Hidrologia Aplicada. Infiltração.
- Barbosa, C.M.S. & Mattos A. (2008). *Conceitos e diretrizes para recarga artificial de aquíferos*. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - Natal- RN.
- Batu, V. (1998). *Aquifer Hydraulics: A comprehensive guide to hydrogeologic data analysis*. New York: John Wiley e Sons, Inc.
- Bortolin, T.A. (2018). *Estudo Do Sistema Aquífer Serra Geral Na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas*. Porto Alegre, 200f.
- Bouman, D. (1985). *Hydrogeology of the Medium Lower Incomati between Magude and Marracuene: an Analysis of Existing Borehole Data*. Direcção Nacional de Águas. DEP/S. de Geohidrologia, Maputo, Mozambique.
- Bouwer, H. (2002). “Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering”. *Hydrogeology Journal*. N.10, pp. 121-142.
- Brown, K., Harrington, G. and Lawson, J. (2006). *Review of groundwater resource condition and management principles for the Tertiary Limestone Aquifer in the south east of South Australia*. Department of Water, Land and Biodiversity Conservation, Naracoorte, Australia.
- Cendón D.I., Haldorsen, S., Chen, J., Hankin, S., G.E.H., Nogueira, D.E.H., Momade, F., Achimo, M., Muiuane, E., Mugabe, J. & Stigter, T.Y. (2020). *Hydrogeochemical aquifer characterization and its implication for groundwater development in the Maputo district, Mozambique*.
- Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção [CENACARTA] (1997). *Data basins*. Maputo: CENACARTA.

- Costa F.M. (2005). *Análise por métodos hidrogeológicos e hidroquímicos de factores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas- Estudo de caso no Quadrilátero Ferrífero (MG)*. Dissertação de Mestrado. UFOP/EM/DEGEO.147p.
- Delin G.N & Risser, D.W. (2007). *Ground- Water recharge in humid áreas of the United states- A summary of gound-water resources program studies, 2003-06*. USG Factsheet 2007-3007, 4 pp.
- Diamantino, C. (2005). *Metodologia de recarga artificial de aquíferos*. 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Lisboa, Portugal. Disponível em: [http://www.aprh.pt/7\\_silusba/Artigos/68P.PDF](http://www.aprh.pt/7_silusba/Artigos/68P.PDF) acedido aos 25.07.2017.
- Díaz, J.M.M., Gómez, J.A.O., Armayor, J.L & Castano, S.C. (2000). *Recarga Artificial de Acuíferos. Síntesis Metodológica. Estudio*. Actuaciones Realizadas en La Provincia de Alicante.
- Direção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (DNGRH) (2023). Desenho da rede estratégica de monitoramento de águas subterrâneas a Nível Nacional.
- Doble, R. C., & Crosbie, R. S. (2017). *Review: Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater*. Hydrogeology Journal, 25, 3-2.
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for base flow separation. Hydrological processes, v. 19, p. 509-515.
- Eilers, V. H. M. (2002). *The estimation of groundwater recharge by soil water balance in semi-arid regions*. Tese (Doutoramento em Recursos hídricos). Institute of water and Enviroment. Cranfield University, Silsoe, Reino Unido.
- Fetter, C.W. (1994). *Applied Hydrogeology Macmillan*. New York. 586p. 3rd Edition.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M & Paris, M. (2006). *Protecção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais*, São Paulo.
- Freitas, S. M. A. C. (2010). Aplicação e técnicas de quantificação da infiltração e da recarga de aquíferos do Alto Rio das Velhas.

- Fundo de Investimento e Património do Abastecimento de Água [FIPAG] (2012). *Estudos Ambientais e Sociais para o Sistema de Abastecimento de Água do Grande Maputo*. Ministério das Obras Públicas e Habitação, Moçambique.
- Healy, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. RU: Cambridge University Press, 245 p.
- Healy, R.W & Cook, P.G. (2002). *Using groundwater levels to estimate recharge*. Hydrogeology Journal, 1, p. 91-109.
- Hespanhol, I. (2003). *Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos*1 Bahia Análise e Dados Salvador, v. 13, n. Especial, p. 411-437.  
[http://www.mima.gov.br/estruturas/167\\_publicacao28012009044356.pdf](http://www.mima.gov.br/estruturas/167_publicacao28012009044356.pdf) acedido aos 08.04.2017.  
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/90/900131/tde-26052010-100627/publico/PilarVillar.pdf> acedido aos 17.07.2017.
- Instituto Nacional de Estatística (2007). *Censo Populacional 2007: Resultados Definitivos*. Maputo: Instituto Nacional de Estatística (INE).
- Instituto Nacional de Estatística (2012). *Estatísticas do Distrito*.
- Lerner, D.N. (1990). *Groundwater recharge in urban áreas*. Atmos Environ, v.24B, N.1, P.29-33.
- Linhares, F.M. (2009). *Potencial hidrogeológico e a qualidade da água subterrânea do município de brejo do cruz-pb*, UFPB, 92p.
- Loreiro, J. (1967). Bacia Hidrográfica do Rio Tembe. Relatório de Campo, Extinta Direcção Nacional de Água, Maputo.
- Machavate, J. (2008). *Qualidade de Água Subterrânea do Posto Administrativo do Machubo – Distrito de Marracuene*. Tese de Licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia.

Manjate, G. M. A. (2013). *Estudo da Ocorrência dos Eventos Secos na Região Sul de Moçambique Usando o Índice de Precipitação Normalizada (SPI) e Dados do GPCP.*, pp 82.

- Mattiuzi, C. D. P. (2013). *Estimativa de recarga a partir da separação de escoamento de base na bacia hidrográfica do rio Ibicuí/RS*. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Ministério da Saúde [MISAU] (2006). *Vigilância e Controle de Qualidade da água para o consumo humano*. Secretaria de Vigilância em Saúde, Brasília, p. 23.
- Ministério de Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos [MOPHRH] (2019), *Ponto de Situação dos Pequenos Libombos, Balanço e Cenários de Gestão*, 34 slides.
- Ministério do Meio Ambiente [MMA] (2007). *Águas Subterrâneas: Um Recurso a Ser Conhecido e Protegido*. Brasília. Disponível em:
- Nogueira, G. E. H. (2017). *Tracing the hydrochemical water types and salinization mechanisms in the great Maputo area as a function of groundwater recharge, hydrogeological properties and human activities*.
- Nunes, M.D.X. (2017). *Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no distrito federal*.
- Oliveira, M.C., Cáceres, P.S., Santana, D & Costa, J. (2017). *Sistemas de recarga artificial de aquíferos e de aproveitamento de água pluvial no Distrito Federal: um estudo de viabilidades*. In: congresso brasileiro de regulação, 10, Florianópolis.
- Paiva, G. P. (2006). *Estimativa de recarga em uma unidade detrítica de uma microbacia do rio Piranga (MG)*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 137p.
- Pereira, A. R., Angelocci, L. R., e Sentelhas, P. C. (2002). *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária.
  - Rosa, S. F. (2010). *Propriedades Físicas e Químicas de Um Solo Arenoso Sob o Cultivo de Eucalyptus spp.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.
  - Roseiro, C. M.S.D. (2009). *Recarga Artificial de Aquíferos: Aplicação ao Sistema Aquífero da Campina de Faro, Lisboa- Portugal*.



- Salman, G & Abdula, A. (1994). *Development of the Mozambique and Rovuma Sedimentary Basins offshore Mozambique, Sedimentary geology*. Artigo Científico. Vol. 1, p. 96.
- Scanlon, B. R.; Healy, R.; Cook, P. (2002). *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 18–39.
- Silva, R. (2019). *Moçambique: Pior seca dos últimos trinta anos no sul do país*. <https://www.dw.com/pt-002/mo%C3%A7ambique-pior-seca-dos-%C3%BAltimos-trinta-anos-no-sul-do-pa%C3%ADs/a-47712800>.
- Simbe, M. P. T. (2014). *Estudo de Vulnerabilidade natural dos aquíferos do distrito de Jangamo província de Inhambane*. Tese de Licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia.
- Simmers, I. (1997). *Recharge of phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas*. International Contributions to Hydrology, International Association of Hydrologists, Balkema, Rotterdam, 1-18.
- Tembe, L. A. (2015). *Relação Entre a Temperatura do Ar, Precipitação e ENOS na Cidade de Maputo*. Trabalho de Licenciatura em Meteorologia. Maputo.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geograph.Rev.* 38, 55–94.
- Vanier, C.L & Hirata, R. (2009). Nitrogen effect from septic systems in an unconfined aquifer in São Paulo, Brasil. In: *Groundwater and Human Development*, Special Publication ed. Amsterdam: Balkema.
- Vicente, E. M.; Jermy, C. A & Schereiner, H. D. (2006). *Urban Geology of Maputo, Moçambique*. IAEG 2006, Paper number 338.
- Villar, P. C. (2008). *Gestão das Áreas de Recargas do Aquífero Guarani: O Caso do Município de Ribeirão Preto-São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Disponível em;
- Wahnfried, I & Hirata, R. (2005). *Comparação dos Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo)*. In: ABRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos. 15 – 2.

- Wendland, E.; Gomes, L.H; Troeger, U. (2015). *Recharge contribution to the Guarani Aquifer System estimated from the water balance method in representative watershed*. Anais da academia Brasileira de Ciências, v. 87, n.2, p. 595-609.

## 8. ANEXO

### 8.1 Tabelas de dados estatísticos

P2	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez
T média mensal	26.2	25.9	25.2	24.2	21.7	19.4	19.1	20.3	22	23.7	24.7	25.8
Índice de calor	12.28	12.06	11.57	10.89	9.23	7.79	7.61	8.34	9.42	10.55	11.23	11.99
EP	131.55	127.40	118.04	105.45	77.83	56.97	54.55	64.64	80.87	99.50	111.63	126.03
Dias do mês	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
nº de horas luz/dia	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
i	126.96											
a	2.79											
ETr	118.20	104.48	107.12	89.36	66.02	47.06	45.83	57.69	70.86	90.19	94.70	113.19

**Anexo 1:** Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1940-2000 do ponto 2 (Fonte: Elaborado pela Autora).

P3	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez
T média mensal	26.6	26.4	25.7	24.4	21.7	19.5	19.1	20.7	22.5	24.2	24.9	26.2
Índice de calor	12.56	12.42	11.92	11.02	9.23	7.85	7.61	8.59	9.75	10.89	11.37	12.28
EP	137.27	134.34	124.40	107.23	76.67	56.47	53.22	66.99	85.03	104.73	113.64	131.44
Dias do mês	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da  
Região Metropolitana do Grande Maputo

nº de horas luz/dia	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
i	125.48											
a	2.86											
ETr	118.20	104.48	107.12	89.36	66.02	47.06	45.83	57.69	70.86	90.19	94.70	113.19

**Anexo 2:** Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1940-2000 do ponto 3 (Fonte: Elaborado pela Autora).

P4	Jan.	Fev.	Mar	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez
T média mensal	25.8	24.9	24.7	23.6	20.8	18.8	18.4	19.9	21.8	23.8	24.5	25.6
Índice de calor	11.99	11.37	11.23	10.48	8.66	7.43	7.19	8.10	9.29	10.61	11.09	11.85
EP	126.34	114.88	112.42	99.51	70.95	54.12	51.09	63.02	80.46	101.78	110.00	123.73
Dias do mês	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
nº de horas luz/dia	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
i	119.28											
a	2.68											
ETr	108.79	89.35	96.81	82.92	61.09	45.10	43.99	54.27	67.05	87.65	91.67	106.55

**Anexo 3:** Determinação da evapotranspiração potencial mensal (mm) a partir da temperatura média mensal para o período 1940-2000 do ponto 4 (Fonte: Elaborado pela Autora).

Estudo Comparativo dos Métodos de Cálculo de Recarga no Aquífero Freático da  
Região Metropolitana do Grande Maputo

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
P-1(mm)	152	141	113	58	28	23	18	13	38	58	97	112	851
P-2(mm)	128	132	108	61	29	25	19	17	33	50	95	117	814
P-3(mm)	141	160	135	71	40	38	27	27	38	56	99	112	944
P-4(mm)	123	156	124	67	42	42	32	27	35	49	88	115	900

**Anexo 4:** Precipitação média mensal (Fonte: Elaborado pela Autora).

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
T-1 °C	25.8	24.9	24.7	23.6	20.8	18.8	18.4	19.9	21.8	23.8	24.5	25.6	22.7
T-2 °C	26.6	26.4	25.7	24.4	21.7	19.5	19.1	20.7	22.5	24.2	24.9	26.2	23.5
T-3 °C	26.2	25.9	25.2	24.2	21.7	19.4	19.1	20.3	22	23.7	24.7	25.8	23.2
T-4 °C	26	26	25.1	23.4	21	18.6	18.4	19.8	21.4	23	24.2	25.4	22.7

**Anexo 5:** Temperatura média mensal (Fonte: Elaborado pela Autora).

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
ETP-1	111.07	100.32	101.08	81.09	62.74	43.88	44.05	53.60	63.86	80.02	88.72	104.35	934.79
ETP-2	113.28	99.09	101.65	87.88	67.02	47.48	46.97	55.66	67.39	85.68	93.03	108.53	973.65
ETP-3	118.20	104.48	107.12	89.36	66.02	47.06	45.83	57.69	70.86	90.19	113.19	94.70	1004.69
ETP-4	108.79	89.35	96.81	82.92	61.09	45.10	43.99	54.27	67.05	87.65	91.67	106.55	935.23

**Anexo 6:** Evapotranspiração potencial (Fonte: Elaborado pela Autora).

<i>Piezometros</i>	<i>Lon</i>	<i>Lat</i>	<i>Rmin</i>	<i>Rmax</i>
<i>PZ01</i>	32,58	-25,81	112	144,45
<i>PZ02</i>	32,69	-25,85	74,55	95,85
<i>PZ03</i>	32,61	-25,68	126,5	162,6
<i>PZ04</i>	32,68	-25,76	166,78	215
<i>PZ09</i>	32,79	-25,2	89,25	114,07
<i>PZ10</i>	32,67	-25,34	109,9	141,07
<i>PZ14</i>	32,41	-25,8	49,8	64,12
<i>PZ18</i>	32,64	-25,93	147	189
<i>PZ19</i>	33,02	-25,4	99,75	128,25
<i>PZ20</i>	32,97	-25,29	118	151,8
<i>PZ22</i>	32,9	-25,43	73,5	94,5

**Anexo 7:** Variação da Recarga (mm) (Fonte: ARA Sul, 2021).

