



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PPGESA

RECARGA DO AQUÍFERO LIVRE NA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO PARÁ, CAMPUS BELÉM

ENGº SALIM RODRIGUES DA SILVA

ORIENTADOR PROF.DR GIOVANNI CHAVES PENNER

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL



BELÉM (2023)



SALIM RODRIGUES DA SILVA

**RECARGA DO AQUÍFERO LIVRE NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, CAMPUS BELÉM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará – PPGESA/UFPA, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de Concentração: Hidráulica e Saneamento.

Linha de Pesquisa: Planejamento, Monitoramento, Operação e Controle de Sistemas de Saneamento.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Orientador: Dr. Giovanni Chaves Penner

BELÉM – PA

2023



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

R696r Rodrigues, Salim Rodrigues da Sivla.
Recarga do aquífero livre na Universidade Federal do Pará,
campus Belém / Salim Rodrigues da Sivla Rodrigues. — 2023.
117 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Giovanni Chaves Penner Chaves
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental, Belém, 2023.

1. Água Subterrânea. 2. WTF. 3. Precipitação. 4. Recarga
de aquífero. I. Título.

CDD 620



SALIM RODRIGUES DA SILVA

**RECARGA DO AQUÍFERO LIVRE NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, CAMPUS BELÉM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará – PPGESA/UFPA, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de Concentração: Hidráulica e Saneamento.

Linha de Pesquisa: Planejamento, Monitoramento, Operação e Controle de Sistemas de Saneamento.

Orientador: Dr. Giovanni Chaves Penner

Data de aprovação: 06/02/2023

Conceito: Aprovado

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



GIOVANNI CHAVES PENNER

Data: 23/03/2023 11:55:34-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Professor Dr. Giovanni Chaves Penner – Orientador

PPGESA/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente



HOMERO REIS DE MELO JUNIOR

Data: 28/03/2023 19:12:24-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Geólogo Ms. Homero Reis de Melo Junior

CPRM

Documento assinado digitalmente



MANOEL JOSE DOS SANTOS SENA

Data: 27/03/2023 16:26:47-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Professor Dr. Manoel José dos Santos Sena

PPGESA/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente



MURILO CESAR LUCAS

Data: 25/03/2023 10:23:19-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Professor Dr. Murilo Cesar Lucas

UTFPR



A Deus, que nos criou e foi criativo nesta tarefa.
Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e
me deu coragem para questionar realidades
propor sempre um novo mundo de
possibilidades.



AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a bom porto sem o precioso apoio de várias pessoas.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Giovanni Chaves Penner, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientou neste trabalho. Muito obrigado por me ter corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar.

Quero agradecer à minha família pelo apoio incondicional que me deram, especialmente aos meus pais, que me deram valores e um lar cheio de amor, a minha esposa que foi paciente e me deu forças em momentos de dúvidas, e ao meu filho que foi minha fonte de inspiração em momentos que pensei em desistir.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do Mestrado Profissional em Engenharia Sanitária e Ambiental, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos.



“É necessário hidratar a cultura, mudando a percepção sobre a água, reduzir a hidroalienação e tornar a sociedade e os indivíduos hidroconscientes”.

(Andrés, 2012).



RESUMO

No Brasil o abastecimento urbano, abastecimento rural, indústria, mineração, termelétrica, animal e irrigação consomem, aproximadamente, 61,46 bilhões de m³/ano de água doce, sendo a maior demanda do abastecimento urbano (25%). Em Belém, a captação de água subterrânea para alimentação do Sistema de Abastecimento de Água vem aumentando. Apesar disso a baixa qualidade na sua distribuição, acaba estimulando a captação de água sem nenhum critério, contribuindo para a exploração excessiva de aquíferos. No campo da pesquisa científica, no Estado do Pará, o quantitativo de trabalhos para estimativa da recarga subterrânea é incipiente tornando premente o desenvolvimento de novas pesquisas. Para tanto, este trabalho tem como objetivo estimar a recarga do aquífero livre de porosidade primária localizado em depósito aluvionar, subjacente a Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Belém. A estimativa de recarga foi realizada através do método *Water-Table Fluctuation* (WTF) em 8 poços de monitoramento distribuídos nos setores denominados saúde e profissional da Universidade Federal do Pará. A média da variação do nível de água na área de estudo apresentou-se entre 0,76 e 2,27 m (monitoramento discreto e contínuo). Um rendimento específico (S_y) foi determinado através de um teste de bombeamento, o qual forneceu dados que foram analisados no *software* AQTESOLV Demo, utilizando a solução analítica de Tartakovsky-Neuman. O resultado de S_y do teste de bombeamento foi de 0,1 (10%). A recarga estimada para o monitoramento discreto ficou entre 101,40 mm e 371,60 mm (ano de 2020), entre 75,50 mm e 552,60 mm (ano de 2021) e entre 19,50 mm e 140,50 mm (ano de 2022), com média de 583,51 mm, o qual representa 6,93% da precipitação do período de estudo (8.419,14 mm) e para o monitoramento contínuo, ficou entre 40,00 mm e 87,90 mm (ano de 2020) e entre 19,30 mm e 218,80 mm (ano de 2021), com média de 539,45 mm, que corresponde a 38,86% da precipitação do período de estudo (1.338,10 mm). Sendo assim, a partir dos dados do monitoramento discreto e contínuo, a recarga média para área de estudo corresponde a, aproximadamente, 22,89% da precipitação total. Os resultados referentes a correlação entre a flutuação de nível freático e a precipitação pluviométrica apresentaram um coeficiente de determinação médio de 22,49%. Tanto a recarga como a correlação mostraram-se condizentes com as demais pesquisas realizadas no Brasil. Conforme exposto, recomenda-se a avaliação contínua da recarga aquífera para a utilização sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, com a finalidade de assegurar seus usos múltiplos.

Palavras-chave: Água subterrânea; WTF; Precipitação; Recarga de aquífero.



ABSTRACT

In Brazil urban supply, rural supply, industry, mining, thermoelectric, animal and irrigation consume approximately 61.46 billion m³/year of fresh water, with the greatest demand being urban supply (25%). In Belém, groundwater collection to feed the Water Supply System has been increasing. Despite this, the low quality of its distribution ends up stimulating the capitation of water without any criteria, contributing to the overexploitation of aquifers. In the field of scientific research, in the State of Pará, the amount of work to estimate underground recharge is incipient, making the development of new research urgent. Therefore, this work aims to estimate the recharge of the aquifer free of primary porosity located in an alluvial deposit, underlying the Federal University of Pará (UFPA), Belém campus. The recharge estimate was carried out using the Water-Table Fluctuation (WTF) method in 8 monitoring wells distributed in the so-called health and professional sectors of the Federal University of Pará. The mean water level variation in the study area was between 0.76 and 2.27 m (discrete and continuous monitoring). A specific yield (Sy) was determined through a pumping test, which provided data that were analyzed in the AQTESOLV Demo software, using the Tartakovsky-Neuman analytical solution. The Sy result of the pumping test was 0.1 (10%). The estimated recharge for discrete monitoring was between 101.40 mm and 371.60 mm (year 2020), between 75.50 mm and 552.60 mm (year 2021) and between 19.50 mm and 140.50 mm (year 2022), with an average of 583.51 mm, which represents 6.93% of the precipitation in the study period (8,419.14 mm) and for continuous monitoring, it was between 40.00 mm and 87.90 mm (year 2020) and between 19.30 mm and 218.80 mm (year 2021), with an average of 539.45 mm, which corresponds to 38.86% of the precipitation of the study period (1,338.10 mm). Thus, based on discrete and continuous monitoring data, the average recharge for the study area corresponds to approximately 22.89% of the total precipitation. The results referring to the correlation between water table fluctuation and rainfall showed an average determination coefficient of 22.49%. Both the recharge and the correlation proved to be consistent with the other surveys carried out in Brazil. As explained above, continuous assessment of aquifer recharge is recommended for the sustainable use of groundwater resources, in order to ensure their multiple uses.

Keywords: Groundwater; WTF; Precipitation; Aquifer recharge.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica da variação do nível de água.....	35
Figura 2 – Localização da área de estudo.....	46
Figura 3 – Geologia do município de Belém.....	47
Figura 4 – Localização de algumas edificações principais na UFPA	48
Figura 5 – Mapa de classe de uso do solo	49
Figura 6 – Mapa Hidrogeológico	50
Figura 7 – Média histórica de chuva em Belém no período de 1949 até 2021	51
Figura 8 – Localização da estação pluviométrica UFPA	53
Figura 9 – Perfil construtivo do PM-01	54
Figura 10 – Localização dos Poços de Monitoramento e Pontos de Referência.....	55
Figura 11 – Infraestrutura dos poços de monitoramento: a) PM-07 e b) PM-06.....	56
Figura 12 – Equipamento para o monitoramento discreto	57
Figura 13 – Equipamento para monitoramento contínuo	57
Figura 14 – Fluxograma do teste de bombeamento realizado na UFPA.....	58
Figura 15 – Etapas do bombeamento	59
Figura 16 – Distância entre os PMs envolvidos no teste de aquífero.....	61
Figura 17 – Análise dos dados de rebaixamento no software AQTESOLV Demo	62
Figura 18 – Corte longitudinal dos PMs 08, 05, 07 e 06.....	67
Figura 19 – Mapa potenciométrico de setembro de 2021	68
Figura 20 – Precipitação pluviométrica da estação UFPA	69
Figura 21 - Dados de posição amostral de nível de água dos poços	70
Figura 22 – Dados de NA para o PM-06 (monitoramentos discreto e contínuo)	72
Figura 23 – Precipitação e carga hidráulica nos PMs 01 e 06.....	73
Figura 24 – Variação do nível de água do PM-01	76
Figura 25 – Variação do nível de água do PM-02	76
Figura 26 – Variação do nível de água do PM-03	77
Figura 27 – Variação do nível de água do PM-05	77
Figura 28 – Variação do nível de água do PM-04	78
Figura 29 – Variação do nível de água do PM-08	78
Figura 30 – Variação do nível de água do PM-06	79
Figura 31 – Variação do nível de água do PM-07	80



Figura 32 – Nível de água do PM–06 no mês de setembro/2020.....	81
Figura 33 – Nível de água do PM–06 no mês de outubro/2020	82
Figura 34 – Nível de água do PM–06 no mês de novembro/2020	82
Figura 35 – Nível de água do PM–06 no mês de dezembro/2020.....	83
Figura 36 – Nível de água do PM–06 no mês de janeiro/2021	83
Figura 37 – Nível de água do PM–06 no mês de fevereiro/2021	84
Figura 38 – Nível de água do PM–06 no mês de março/2021	84
Figura 39 – Nível de água do PM–06 no mês de abril/2021	85
Figura 40 – Nível de água do PM–06 no mês de julho/2021	86
Figura 41 – Nível de água do PM–06 no mês de agosto/2021	86
Figura 42 – Nível de água do PM–06 no mês de setembro/2021.....	87
Figura 43 – Identificação das Curvas de recessão do PM–01	90
Figura 44 – Identificação das curvas de recessão do PM–02.....	90
Figura 45 – Identificação das curvas de recessão do PM–03.....	91
Figura 46 – Identificação das curvas de recessão do PM–04.....	91
Figura 47 – Identificação das curvas de recessão do PM–05.....	91
Figura 48 – Identificação das curvas de recessão do PM–06.....	91
Figura 49 – Identificação das curvas de recessão do PM–07.....	92
Figura 50 – Identificação das curvas de recessão do PM–08.....	92
Figura 51 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (setembro/2020).....	93
Figura 52 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (outubro/2020).....	93
Figura 53 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (novembro/2020).....	94
Figura 54 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (dezembro/2020)	94
Figura 55 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (janeiro/2021)	94
Figura 56 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (fevereiro/2021).....	94
Figura 57 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (março/2021)	95
Figura 58 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (abril/2021).....	95
Figura 59 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (julho/2021).....	95
Figura 60 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (agosto/2021).....	95
Figura 61 – Identificação das curvas de recessão do PM–06 (setembro/2021).....	96
Figura 62 – Curva de recuperação dos PMs 01 e 03, curva Theis para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.	97



Figura 63 – Curva de recuperação dos PMs 01 e 03, curva Neuman para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.	98
Figura 64 – Curva de recuperação dos PMs 01 e 03, curva de Moench para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.	98
Figura 65 – Curva de recuperação dos PMs 01 e 03, curva de Tartakovsky-Neuman para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.	99
Figura 66 – Recarga aquífera anual dos 8 poços de monitoramento.....	100
Figura 67 – Recarga aquífera mensal do PM–06 para os anos de 2020 e 2021	102



LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Métodos utilizados na estimativa da recarga subterrânea	29
Quadro 2 – Associação de métodos para estimativa da recarga subterrânea	33



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acervo bibliográfico utilizado na pesquisa	27
Tabela 2 – Resultados de rendimento específico por material	40
Tabela 3 – Dados preliminares dos poços	60
Tabela 4 – Poços perfurados próximos a área de estudo	66
Tabela 5 – Classes de aquífero contidas nas unidades geológicas	66
Tabela 6 – Dados de dispersão amostral de nível de água dos poços	71
Tabela 7 – Dados de dispersão amostral de nível de água – monitoramento contínuo	72
Tabela 8 – Coeficiente de determinação dos PMs.....	74
Tabela 9 – Precipitação para elevação do NA e tempo de resposta do aquífero	88
Tabela 10 – Valores de rendimento específico para cada solução analítica.....	99
Tabela 11 – Recarga média na área de estudo – monitoramento discreto.....	101
Tabela 12 – Recarga aquífera anual do PM-06.....	102
Tabela 13 – Recarga média do PM-06 – monitoramento contínuo	103
Tabela 14 – Recarga média do PM-06 com dados do monitoramento discreto e contínuo...	103



LISTA DE ABREVIATURAS

Cód.

Código



LISTA DE SIGLAS

UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
MEC	Ministério da Educação
WTF	<i>Water Table Fluctuation</i>
WTFR	<i>Water Table Fluctuation Regression</i>
VNA	Variação do Nível de Água
BH	Bacia Hidrográfica
CMB	Complexo Metamórfico do Bação
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
AQTESOLV	<i>Software Aquifer Tests</i>
PM	Poço de Monitoramento
PR	Ponto de Referência
NA	Nível de Água
RIMAS	Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas
SAG	Sistema Aquífero Guarani
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFRA	Universidade Federal Rural da Amazônia
SEPRO	Serviço Federal de Processamento de Dados
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FACFAR	Faculdade de Farmácia
FENAV	Faculdade de Naval
CEAMAZON	Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia
EETEP	Escola de Ensino Técnico do Estado do Pará
LAESA	Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental
CAPACIT	Centro de Capacitação
RMB	Região Metropolitana e Belém
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITV	Instituto Tecnológico Vale



SNIRH	Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastre Naturais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas



LISTA DE SÍMBOLOS

R	Recarga
m	Metros
T	Transmissividade
K	Condutividade Hidráulica
S_y	Rendimento Específico
L	Litros
h	Hora
K_v	Condutividade Hidráulica Vertical
K_H	Condutividade Hidráulica Horizontal
cm/s	Centímetros por segundo
mm	Milímetros
Q_1	Quartil 1
Q_3	Quartil 3
mm/dia	Milímetros por dia
mm/ano	Milímetros por ano
%	Porcentagem
R^2	Coefficiente de Determinação
m^2/s	Metros ao quadrado por segundo



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
2 OBJETIVOS.....	25
2.1 Geral.....	25
2.2 Específicos.....	25
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3.1 Recarga Subterrânea	27
3.2 Estimativa de recarga	29
3.3 Método de estimativa de recarga em aquífero não confinado	32
3.3.1 Outras aplicações do método WTF.....	36
3.3.2 Variáveis hidrodinâmicas do solo	38
3.4 Fatores que influenciam na variação do nível freático	40
4 ÁREA DE ESTUDO	46
4.1 Localização	46
4.2 Solo	46
4.3 Hidrogeologia	49
4.4 Clima	51
4.5 Relevo	51
4.6 Vegetação	52
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
5.1 Precipitação pluviométrica.....	53
5.2 Poços de Monitoramento.....	54
5.3 Localização dos Poços de Monitoramento.....	55
5.4 Equipamentos para o monitoramento.....	56
5.5 Determinação dos parâmetros de aquífero.....	58
5.6 Estimativa de recarga direta.....	62
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
6.1 Hidrogeologia	65
6.1.1 Caracterização Hidrogeológica da área de estudo	65
6.1.2 Fluxo de água subterrânea na área de estudo	67
6.2 Regime Pluviométrico na área de estudo.....	68
6.3 Análise estatística dos dados de nível de água dos poços de monitoramento	69



6.3.1 Monitoramento discreto	70
6.3.2 Monitoramento contínuo.....	71
6.4 Relação entre flutuação do nível de água e a precipitação.....	73
6.5 Análise das oscilações de nível de água	75
6.5.1 Monitoramento discreto	75
6.5.2 Monitoramento contínuo.....	81
6.5.3 Precipitação para elevação do nível de água e tempo de resposta do aquífero.....	88
6.6 Recarga aquífera	89
6.6.1 Variação do nível de água (Δh) com dados do monitoramento discreto	89
6.6.2 Variação do nível de água (Δh) com dados do monitoramento contínuo	92
6.6.3 Rendimento específico	96
6.6.4 Estimativa de recarga na área de estudo	99
6.6.4.1 Monitoramento discreto	99
6.6.4.2 Monitoramento contínuo.....	101
7 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES.....	104
REFERÊNCIAS.....	106
APÊNDICE A – Perfil litológico dos poços: UFPA, CPRM e PMs.....	115
APÊNDICE B – Tabelas com valores de recarga aquífera.....	116



1 INTRODUÇÃO

O movimento da água pelos oceanos, continente e atmosfera é influenciado por dois fatores, gravidade e energia. A água que evapora dos oceanos forma as nuvens, as quais precipitam sobre a hidrosfera e litosfera. Na litosfera ela acaba abastecendo os rios, lagos, lagoas e aquíferos (BRAGA, 2014).

As parcelas de água salina e doce são tratadas na maior parte em valores percentuais, o que não deixa claro, em termos quantitativos, o volume de água existente, aliás, os volumes não são tão simples de serem determinados, em razão de apresentarem certo grau de imprecisão devido as suposições arbitrárias. Mesmo assim, diversos especialistas no assunto tentam estimar o volume de água doce no planeta Terra. Um modelo empírico bastante conhecido no meio científico é a estimativa de Garmonov, publicada em 1974, a qual foi destacada no estudo de Shiklomanov e Rodda (2003). A estimativa de Garmonov prevê um volume global de água doce líquida de 10,6 milhões de km^3 , este valor representa apenas 1% de toda a água doce no planeta Terra nos três estados de agregação molecular (sólido, líquido e gasoso). Outras estimativas mais contemporâneas foram realizadas com o intuito de aumentar a compreensão sobre o volume global de água doce, ou seja, em 2009, Kotwicki estimou um volume total de 11,1 milhões de km^3 e no ano de 2021 as estimativas de Ferguson apontaram um volume de água doce subterrânea de 15,9 milhões de km^3 (UNESCO, 2022).

Olhando para os continentes, observa-se que existem diferenças na participação de cada um em relação a produção de água doce líquida no mundo, tais variações são causadas em parte pelo tamanho territorial, apesar de que existe diferenças significativas na taxa de renovação. Neste contexto, a Ásia é o continente com o maior volume estimado entre todos os continentes (3.691.000 km^3) e em último lugar encontram-se a Austrália e Oceania com 324.000 km^3 . A América (representada apenas pelas Américas do Norte e Sul) é o segundo continente, com um volume total de água doce líquida de 3.370.000 km^3 , onde 39% concentram-se nos países que compõem a América do Sul (UNESCO, 2022).

A disponibilidade hídrica subterrânea refere-se àquele volume de água que pode ser explorado sem que haja prejuízo da vazão de manutenção dos mananciais superficiais (vazão de base). No Brasil, estima-se que esta disponibilidade hídrica seja, aproximadamente, 14.000 m^3/s , sendo que a indústria pecuária e consumo humano são os setores que mais demandam água subterrânea (ANA, 2021).



A demanda global por água subterrânea provém de diversos setores da economia. Os três principais setores que demandam grandes quantidades de água são três: agricultura, doméstico e industrial. As maiores parcelas de água doce subterrâneas exploradas em 2017 ocorreram na Ásia, onde o setor que mais consumiu água subterrânea foi o da agricultura (UNESCO, 2022).

Bierkens (2019) descreve que o aumento populacional implicou no aumento do consumo de água doce e no crescimento do risco de degradação da qualidade ambiental. A crescente demanda por alimentos acabou promovendo a rápida expansão da agricultura, principalmente da irrigada que é comumente utilizada em áreas semiáridas, onde a precipitação de chuva é irregular durante o ano todo. O prognóstico determina um consumo cada vez maior nos países emergentes, onde as taxas de crescimento populacional não estão estabilizadas. Além disso, tem-se que nos últimos 100 anos o consumo octuplicou, chegando a um volume de água subterrânea na ordem de $4 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{ano}$.

No Brasil a irrigação é o setor que mais consome água doce superficial e subterrânea. Todavia, com o avanço da agricultura irrigada, o volume de água explorado dos aquíferos tende a ser cada vez maior. Estima-se em duas décadas um aumento significativo de água extraída dos mananciais, chegando a 42% ($2.770 \text{ m}^3/\text{s}$). Esse aumento é liderado pelas bacias hidrográficas de São Francisco, Paraná, Uruguai, Tocantins-Araguaia e Paranaíba, as quais apresentam um setor agropecuário bem desenvolvido (ANA, 2021).

O segundo setor que mais consome água subterrânea no Brasil e no mundo é o doméstico. Este setor faz referência ao conglomerado de pessoas que moram em grandes centros urbanos, onde os serviços de captação, tratamento, reservação e distribuição de água para consumo humano não atendem com eficiência as expectativas da demanda. No Brasil, 2.500 cidades são abastecidas exclusivamente com água subterrânea, esse número representa 15% da população brasileira. Este abastecimento dá-se por um prestador de serviço. Devido as deficiências neste setor do saneamento, há uma grande procura por perfuração de poços para exploração de água subterrânea, mesmo que os mananciais superficiais sejam a fonte predominante de obtenção de água bruta para tratamento e consumo. A grande consequência da elevação no número de poços perfurados sem nenhum critério é o aumento do risco de contaminação dos aquíferos confinados e não confinados e o uso não sustentável dos recursos hídricos subterrâneos ou o esgotamento do aquífero (ANA, 2021; BIERKENS, 2019).

Richey et al. (2015) descreve que a mudança climática é outro fator de ordem natural, que impacta na disponibilidade hídrica subterrânea. No Brasil, o maior consumo de água



subterrânea sucede às regiões de clima semiárido, em que os recursos hídricos superficiais são intermitentes e não conseguem suprir a demanda pela irrigação bem como pelo consumo humano. Devido à baixa ocorrência de chuvas e de disponibilidade de mananciais superficiais, a perfuração de poços torna-se cada vez mais atrativa. Não obstante, por conta da grande profundidade em que se encontram os aquíferos produtivos, o uso deste recurso acaba sendo um privilégio das pessoas com maior poder aquisitivo.

A baixa eficiência na distribuição de água potável nos municípios brasileiros, a efemeridade dos recursos hídricos superficiais e a dificuldade de captação em poços profundos fazem com que as populações procurem alternativas mais viáveis para captação de água, por isso comunidades que possuem acesso deficitário a água estão recorrendo aos aquíferos rasos, como aqueles localizados em solo aluvionar. No estado do Ceará, Distrito de São Francisco, o aquífero aluvionar possui grande importância, onde 90% das captações são realizadas em cacimbões até 10 m de profundidade (VASCONCELOS; SILVA; SANTIAGO, 2002). Aquíferos aluvionares localizados nas margens da foz do rio Bero, Província de Namibe, Angola, são intensamente explorados através de furos públicos de profundidade até 12 m, uma vez que este rio apresenta um regime sazonal a efêmero (AZEVEDO et al., 2015).

Apesar de apresentarem grande importância ao abastecimento de populações que possuem acesso deficitário a água para consumo humano, os aquíferos aluvionares são bastante vulneráveis a poluição, visto que apresentam profundidades reduzidas e elevada permeabilidade (MIRANDA, 2021). Na bacia Hidrográfica do Rio Mondego, Lopo (2000) realizou um estudo para quantificar a vulnerabilidade e o risco à contaminação de um aquífero aluvionar localizado entre Coimbra e Montemor-o-Velho. O autor constatou que a Vulnerabilidade e o risco a contaminação do aquífero não confinado eram elevados ocupando grande parcela da área sobrejacente ao aquífero aluvionar.

A sustentabilidade das águas subterrâneas depende de um avanço contínuo da política de proteção aos recursos hídricos subterrâneos, para que impactos sejam minimizados na tríade do desenvolvimento sustentável. Para que isso aconteça, é preciso que haja um equilíbrio entre a exploração de água subterrânea e o tempo necessário para a sua renovação. Este só é bem definido a partir de pesquisas sobre o limite de retirada de água dos aquíferos (LUCAS, 2012).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, que esclarece o monitoramento da quantidade e qualidade dos mananciais superficiais e subterrâneos, é um dos instrumentos que devem ser utilizados à implementação de programas dentro da bacia hidrográfica. A quantificação dos recursos hídricos permite aos órgãos de gestão e controle, estabelecer e fiscalizar legalmente os



limites de produção de água subterrânea nos aquíferos. Neste contexto a estimativa das reservas renováveis dos aquíferos por meio da recarga subterrânea mostra-se relevante (BRASIL, 1997).

Observa-se, portanto, que os recursos hídricos subterrâneos são determinantes para o desenvolvimento político, social e ambiental de uma região. No estado do Pará o estudo sobre recarga subterrânea ainda é incipiente, o que justifica as iniciativas em procurar caracterizar o funcionamento de aquíferos em nível local. Sobretudo, o uso didático do projeto nas disciplinas de climatologia e hidrologia, tópicos sobre águas subterrâneas e água, da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental (FAESA). Neste sentido, este trabalho se propõe a estimar a recarga do aquífero livre, subjacente a Universidade Federal do Pará, campus Belém.



2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral desse estudo é a estimativa da recarga do aquífero não confinado, subjacente à Universidade Federal do Pará, campus Belém, através do método *Water-Table Fluctuation* (WTF).

2.2 Específicos

- I. Avaliar a variação do nível de água do aquífero livre através de dados de monitoramento discreto e contínuo;
- II. Determinar parâmetros do aquífero livre através de teste de aquífero;
- III. Estimar o percentual de recarga em relação a precipitação pluviométrica;
- IV. Avaliar a relação entre a variação do nível de água do aquífero e a precipitação.



3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A lista de obras consultadas para o desenvolvimento deste trabalho científico ocorreu de forma sistematizada. A busca ocorreu no Portal de Periódico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Ministério da Educação (MEC) e *software Publish or Perish*.

As buscas nas bases de dados ocorreram através de descritores (palavras-chave) pertinentes ao assunto, tais como: recarga, aquífero, freático, livre, Variação do Nível de Água, VNA e variação do lençol freático. Posteriormente foram utilizados descritores em inglês, nomeadamente: *recharge, aquifer, phreatic, Water-Table Fluctuation, water level variation* e WTF. O critério para utilização das palavras-chave em inglês está associado a disponibilidade de material no banco de dados, a qual é maior neste idioma.

A partir destas palavras-chave foram construídas linhas de busca (string), por exemplo: *recarga AND aquífero AND Water-Table Fluctuation*; *Recarga AND Aquífero AND freático AND variação do lençol freático AND variação do nível de água*; *Recarga AND Aquífero AND Variação do Nível de Água*; *recharge AND aquifer AND phreatic AND Water-Table Fluctuation AND water level variation*; *recharge AND aquifer AND Water-Table Fluctuation*.

No *software Publish or Perish*, a busca foi limitada para 1000 resultados. Sendo assim, a combinação de descritores obteve os seguintes resultados: *Recarga*; *Aquífero*; *Variação do Nível de Água* com 1000 resultados, os quais somaram 3.384 citações por outros artigos; *Recarga, Aquífero, Water-Table Fluctuation, WTF*, com 170 resultados, os quais somaram 1.045 citações por outros artigos; *Recarga Aquífero Freático Variação do Lençol Freático Variação do Nível de Água* com 999 resultados, os quais somaram 2.785 citações por outros artigos e *recharge, aquifer, phreatic, Water-Table Fluctuation, water level variation* com 999 resultados, que somaram 30.425 citações por outros artigos. O montante de documentos científicos encontrados neste *software* foram de 3.169, os quais compreenderam seção de livro, dissertação, tese, revistas e artigos.

No portal CAPES/MEC a combinação dos descritores obteve os seguintes resultados: *recharge AND aquifer AND phreatic AND Water-Table Fluctuation AND water level variation* foram obtidos 669 resultados, já a segunda combinação *recharge AND aquifer AND Water-Table Fluctuation* foram encontrados 4.619 resultados. O montante de documentos científicos encontrados foi de 5.288 artigos.



Após elaboração e aplicação das *strings* no CAPES/MEC e *software Publish or Perish*, foram aplicados os filtros, a fim de selecionar apenas aqueles que mais se relacionavam com o tema deste trabalho. Os filtros empregados foram: ano de publicação entre 2010 e 2022, relevância científica (apenas trabalhos científicos com pelo menos 1 citação pelos demais), periódicos revisados por pares, artigos em português com os termos (recarga, freático, livre, variação do nível de água, variação do lençol freático, VNA) e artigos em inglês com os termos *groundwater, aquifers, water, hydrology, recharge e water table*.

Após aplicação dos filtros, foi realizada a análise de conteúdo em quatro etapas: leitura do Tema, Resumo, Metodologia. Na leitura do tema buscou-se avaliar a presença de palavras pertinentes ao objeto de estudo, como recarga, freático, livre, variação do nível de água, variação do lençol freático, VNA, WTF, *water table-fluctuation, groundwater, aquifers, water, recharge*, etc. Na análise do Resumo, buscou-se identificar o objetivo do trabalho e no exame da metodologia objetivou-se verificar o método empregado na estimativa da recarga (considerou-se apenas os trabalhos que utilizaram o método WTF ou VNA), a classificação do aquífero estudado e a escala temporal (no mínimo um ano completo de monitoramento).

Após aplicação dos filtros e análise de conteúdo, o arcabouço teórico deste trabalho apresentou um quantitativo de 96 trabalhos científicos relevantes na área, objeto de estudo, representados por artigos internacionais, nacionais, dissertações e teses, conforme Tabela 1. Apesar disso, ao longo do desenvolvimento da pesquisa, novos trabalhos foram sendo incorporados, segundo o processo acima descrito.

Tabela 1 – Acervo bibliográfico utilizado na pesquisa

Fonte	Filtros	Análise de conteúdo
<i>Publish or Perish</i>	3.169 (inglês e português)	61 (inglês e português)
CAPES/MEC	5.288 (inglês)	35 (inglês)

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

3.1 Recarga Subterrânea

Recarga subterrânea é uma componente do ciclo hidrológico que se refere ao volume de água que penetra em uma unidade hidrogeológica provocando a elevação do seu nível freático (SANTOS, 2012). Apesar do conceito supramencionado ser generalista, existem conceitos mais específicos, os quais atribuem sua causa exclusivamente à infiltração de água na zona não saturada do solo. Este conceito corrobora para a ideia de que a precipitação pluviométrica é a



principal fonte de abastecimento dos aquíferos (BORTOLIN, 2018; COELHO, 2016; SANTOS, 2012).

A água apresenta diferentes vias de entrada em um aquífero, sendo a infiltração no solo apenas mais um dos vários mecanismos de recarga. Neste entendimento a recarga ganha duas classificações, como recarga natural e artificial. A recarga natural pode originar-se de fluxos de água descendentes através da zona não saturada (originados através da precipitação pluviométrica), fluxos de água laterais entre aquíferos e fluxo de água provenientes dos mananciais superficiais. Já a recarga artificial é a introdução de água na zona saturada por processos não naturais, como irrigação, urbanização, bacias de infiltração e poços de injeção de água (BORTOLIN, 2018; SANTOS, 2012).

Quando a recarga é originada da precipitação pluviométrica pode ainda ser dividida em difusa e direta. A recarga difusa se processa em uma grande extensão de área, onde a água percolada na superfície do solo e começa a infiltrar-se até a zona portadora de água. Em contrapartida a recarga proveniente de mananciais superficiais é definida como concentrada ou indireta, além da recarga concentrada, existe recarga localizada, que se processa em regiões pontuais do aquífero, tais como vales, depressões, etc. O modo como o processo de recarga ocorre denomina-se mecanismo de recarga (BORTOLIN, 2018; MARTELLI, 2012).

Os termos recarga localizada e difusa são comumente utilizados em regiões de clima húmido, uma vez que a taxa de precipitação é maior que a de evapotranspiração (COELHO, 2011, 2016).

Existe ainda uma outra classificação de recarga, a qual está relacionada a possibilidade de alcançar ou não o lençol freático. Quando a água infiltra na zona vadosa espera-se que esta recarregue o lençol freático. Todavia, existem processos químicos, físicos e biológicos nesta região que impedem em alguns casos a recarga direta. Portanto, na recarga potencial há a possibilidade de a água infiltrada não atingir a zona saturada. Na recarga real, observa-se que a água percolada no solo, torna-se recarga permanente (SOARES, 2012).

A recarga instantânea refere-se a um evento demasiado de chuva. A recarga sazonal diz respeito àquela recarga que acompanha as estações definidas do ano (período seco e chuvoso). A recarga histórica é aquela que se refere ao volume de água que adentra na zona saturada em uma escala de tempo considerável, cerca de milhões de anos (FERNANDES, 2017; SILVA, 2019).



3.2 Estimativa de recarga

O método de estimativa de recarga subterrânea, que se baseia na Variação do Nível de Água do lençol freático (WTF), vem sendo utilizado a mais de um século em diversas pesquisas que almejam quantificar o volume de água que recarrega um aquífero. No entanto, existem outros métodos que pretendem o mesmo objetivo (PARK, 2012).

Os diversos métodos de estimativa da recarga subterrânea são divididos em três grupos: Superficial, Não-Saturada e Saturada. Métodos que buscam determinar a recarga na zona saturada apresentam mecanismos diferentes de estimativa da recarga. Como exemplo, pode ser citado a diferença entre os objetivos dos métodos: Variação do Nível Freático e Balanço Hídrico, enquanto o primeiro busca relacionar a recarga aquífera a variação do nível de água, o segundo analisa as variáveis do ciclo hidrológico (FERNANDES, 2017). No quadro 1 estão listados alguns métodos existentes segundo a zona hidrológica, seu mecanismo de avaliação da recarga e o clima ideal para a aplicação de cada metodologia:

Quadro 1 – Métodos utilizados na estimativa da recarga subterrânea

Zona Hidrológica	Método	Descrição	Clima
Água Superficial	Balanço hídrico do canal	Analisa variáveis de entrada e saída de um determinado sistema e oscilações no armazenamento	Árido e úmido
	Medidores de seepage	Instrumento utilizado para quantificar as medidas de troca entre o rio e o aquífero	Árido e úmido
	Traçadores de calor	Utiliza a variação da temperatura no solo para estimativa de recarga	Árido
	Traçadores isotópicos	Isótopos utilizados no delineamento e avaliação do perfil de infiltração	Árido e úmido
	Modelos de bacia	Modelos matemáticos hidrogeológicos conceituais com variáveis como precipitação e deflúvio para estimativa de recarga.	Árido e úmido
Zona não saturada	Lisímetros	Instrumento utilizado para medir evapotranspiração ou taxa de infiltração potencial.	Árido e úmido
	Plano de fluxo nulo	Modelo simplificado de balanço hídrico abaixo do solo, na zona de fluxo nulo	Árido e úmido
	Lei de Darcy	Aplicação da Lei de Darcy através de métodos numéricos	Árido e úmido



Quadro 1 – Métodos utilizados na estimativa da recarga subterrânea

			(conclusão)
	Traçadores históricos	Os traçadores (^{36}Cl e ^3H) são utilizados para estudar atividades ocorridas no pretérito	Árido
	Traçadores ambientais	Estimativa da massa de cloreto (Cl) na água de chuva e no solo	Árido
	Traçadores aplicados	Aplicados diretamente no local de recarga	Árido e úmido
	Modelagem Numérica	Utiliza a equação de Richards para simulação do fluxo na zona não saturada	Árido e úmido
Zona Saturada	Variação do nível freático (WTF)	Utiliza a variação do nível de água do aquífero para estimar a recarga	Úmido
	Lei de Darcy	Aplicação da Lei de Darcy	Úmido
	Traçadores ambientais	São utilizados Cl e ^{14}C para determinar a idade média das águas subterrâneas e caracterização do fluxo e recarga subterrânea	Árido e úmido
	Traçadores históricos	A presença histórica de traçadores CFC's, $^3\text{H}/^3\text{He}$ na água subterrânea como medida para estimativa da recarga	Árido e úmido
	Modelagem numérica	Recarga derivada a partir do modelo de fluxo de água subterrânea.	Úmido e árido

Fonte: Adaptado de Coelho (2011), Lucas (2012), Soares (2012) e Fernandes (2017).

Apesar de existir vários métodos disponíveis para estimar a recarga subterrânea, nota-se nos projetos de pesquisa que a escolha do modelo está condicionada a determinados fatores que devem ser analisados na área de estudo, como o contexto climatológico, fisiográfico, geológico, hidrológico, geomorfológico, tempo e espaço (BORTOLIN, 2018; DAMBRÓS, 2011; SANTOS, 2012).

O erro associado a cada método deve ser levado em consideração no instante em que for dimensionar a recarga. O método WTF apresenta um erro associado, classificado como moderado. Este erro equipara-se aos do Balanço Hídrico (Superficial), Traçadores Históricos e Ambientais (Não-Saturada), Traçadores Aplicados (Não-Saturada) e Traçadores Históricos (Saturada) (SANTAROSA, 2016).

Carmo (2014) descreve que o erro associado depende de vários fatores. Por exemplo, o método WTF apresenta resultados mais consistentes (erro associado diminui) quando aplicado em clima úmido.

Uma nova alternativa para determinação da recarga através da produção de mapas temáticos foi adotada por Coelho (2016), cujo objetivo foi extrair dados de variáveis do balanço



hídrico levando em conta os mapas temáticos, dispensando outras fontes de dados hidrológicos comumente utilizadas em outras pesquisas. O estudo procedeu-se na bacia hidrográfica do rio Ipanema, localizado na região Nordeste do Brasil, em uma área de transição entre clima úmido e seco, onde há déficit de água em boa parte do ano. A recarga estimada pelo método do balanço hídrico (BH) na Zona do Sertão foi comparada àquela aferida pelo método WTF, a qual se processou em uma porção da bacia hidrográfica (Zona da Mata), onde a precipitação era mais regular. Neste caso, ambas apresentaram resultados aproximados, onde a taxa de recarga a partir do método BH foi de 14,89 % e WTF foi de 13,12 %, nesta ordem.

Izady et al. (2017) realizou a estimativa de recarga na região de Al-Buraimi, de clima árido à semiárido com pouca ou nenhuma chuva em grande parte do ano. A região está localizada na porção noroeste de Omã, Emirados Árabes Unidos. Os métodos utilizados para estimativa de recarga foram flutuação do lençol freático combinado ao modelo de balanço hídrico. O WTF combinado apresentou resultados consistentes aos de calibração apresentados na pesquisa.

Somarathne; Smettem e Frizenschaf (2014) apresentaram três processos para avaliar a eficiência dos métodos de estimativa de recarga (WTF, modelagem numérica, lei de Darcy e BH) em quatro bacias hidrográficas no sul da Austrália (Bacia Robinson, Bacia Uley South, Lente Coffin Bay A e Bacia do Para Wurlie). Os processos avaliaram a confiabilidade da recarga, método aplicado, a disponibilidade de dados para modelagem e dimensão espacial através de atributos, os quais possuíam diferentes pesos. Dentre os métodos testados, o de flutuação do lençol freático, modelagem numérica de água subterrânea, lei de Darcy e BH foram mais confiáveis em bacias onde a recarga ocorre em pontos específicos ou em grandes áreas, todavia os resultados deste método dependem de um banco de dados consistente, atualizado e confiável.

Se comparado aos demais métodos contemporâneos, o WTF ainda constitui-se como um método simples de ser executado disponibilizando resultados satisfatórios (COELHO, 2011; LUCAS, 2012). Ainda que exista uma predileção e um erro associado a cada método, não existe um modelo com conceito e matemática universal, com certo grau de precisão satisfatório. O que se pode ter é um número considerável de combinações de dois ou mais métodos de estimativa de recarga (SANTOS, 2012).



3.3 Método de estimativa de recarga em aquífero não confinado

Os primeiros estudos acerca do método que estima a recarga de um aquífero a partir da variação do nível de água na zona saturada começam a surgir na década de 1920. Um dos precursores foi o norte americano Oscar Edward Meinzer, através de seu livro intitulado *The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles*. Este livro discute ocorrência, origem, descarga, quantidade, movimento, carga, qualidade, recuperação, uso e províncias de águas subterrâneas. O método é conhecido entre a comunidade científica internacional como *Water-Table Fluctuation* (Flutuação do Lençol Freático ou da Superfície Livre). No Brasil o WTF é conhecido como Variação do Nível de Água – VNA (CARMO, 2014).

O método WTF é o mais utilizado em pesquisas científicas que almejam quantificar a recarga subterrânea de forma direta. Sua aplicação está condicionada a alguns aspectos, como a classe de aquífero (aquífero livre) e tipo de clima (clima úmido) (MARTELLI, 2012).

Por outro lado, este método apresenta incertezas, que são atribuídas a carência de dados, limitação de modelos matemáticos e complexidade dos sistemas hidrogeológicos (relevo, classe de solo, clima, tipo de vegetação, etc.) (DE MELO; ALVES; DA SILVA, 2014; LUCAS, 2012).

Somarathne; Smettem e Frizenschaf (2014) destacam que a maior parte dos pesquisadores escolhem utilizar múltiplos métodos ou aperfeiçoar os já existentes para estimativa da recarga subterrânea, essa escolha está associada capacidade de oferecerem resultados na mesma ordem de grandeza e a minimização das incertezas quando são utilizados de forma combinada ou aperfeiçoada, à vista disso, quanto mais métodos utilizar ou mais aperfeiçoado estiverem, menores serão os erros associados a estimativa de recarga. Em resumo, a confiabilidade dos modelos de estimativa da recarga está associada a consistência dos dados disponíveis e área de cobertura do aquífero.

Um século de aplicação do método WTF faz com que o modelo esteja consagrado no cenário da pesquisa científica brasileira e internacional (FARIAS, 2011). No Quadro 2 são observadas algumas das combinações possíveis do método WTF com demais métodos e os pesquisadores que a aplicaram.



Quadro 2 – Associação de métodos para estimativa da recarga subterrânea

Combinação de métodos	Autor
Separação do fluxo de base, VNA e BH	Cambráia; Rodrigues (2020)
BH e WTF	Magnoni; Silva; Manzione (2020), Izady et al. (2017), Albuquerque et al. (2015), Silva (2019)
WTF e CMB	Hagedorn et al. (2011), Carlos et al. (2012) e Braga (2014)
WTF e BH subterrâneo	Silva et al. (2012)
WTF e modelo matemático hidrológico	Teramoto; Chang (2018)
WTF e modelo transiente de fluxo	Melo; Wendland; Guanabara (2015)
WTF, lei de Darcy e método hidrológico	De Melo; Alves; Da Silva (2014)
VNA e fluxo de base	Freitas; Bacellar (2013)
Recessão sazonal, fluxo de base, WTF e BH	Soares; Velásquez (2013)
VNA e separação de escoamentos	Santos (2014)
WTF, RCDM e CMB	Lucas (2012)
BH, Meyboom, Fluxo de base, WTF, APLIS	Soares (2012)
Modelagem numérica da zona saturada, modelagem hidrológica distribuída de zona vadosa, WTF, separação de escoamentos e modelagem acoplada dos processos da zona vadosa e saturada	Santos (2019)
4 variações de BH, 12 variações de separação do escoamento superficial e subterrâneo, modelo matemático SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure), técnicas de regressão e VNA	Bortolin (2018)
VNA e Recarga Potencial Direta	Penner; Martins; Gonçalves (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

As variações no nível de água de um aquífero são ocasionadas por diversos fenômenos que permitem a entrada e saída de água neste sistema hidrogeológico. Aliás, as mudanças no armazenamento de água subterrânea podem ser atribuídas à recarga, ao fluxo de água subterrâneo entre bacias ou até mesmo dentro da própria bacia, como fluxo de base (vazão de água que sai do aquífero para abastecer os riachos, nascentes e rios) e evapotranspiração (HEALY; COOK, 2002).

Apesar de existirem várias possibilidades de associação de diferentes métodos de estimativa de recarga, existe uma preferência, em razão da simplicidade e clareza do modelo matemático frente a outras técnicas de estimativa da recarga, o que acaba trazendo resultados mais confiáveis. A estimativa da recarga subterrânea a partir dos níveis de água do aquífero foi amplamente discutida por Meinzer e, posteriormente, por Healy & Cook (SANTAROSA, 2016; SOLDERA, 2013):



No método WTF, a água infiltrada deve alcançar a zona saturada imediatamente sem qualquer impedimento ao longo desse trajeto, uma vez que o método não leva em consideração possíveis interferências na zona saturada, ocasionadas por mecanismos de recarga que redirecionam os fluxos para outros locais. Para que seja bem sucedido em sua aplicação é preciso que os poços de monitoramento apresentem um nível de água variando acentuadamente ao longo do período de monitoramento, por exemplo, tal método é mais bem sucedido em aquíferos raso, onde a variabilidade do nível de água é maior, se comparado a um aquífero profundo, além disso, sem a camada confinante no topo do aquífero, as variações são mais assinaladas, por isso é mais correto aplicar o método em aquíferos não confinados. O método WTF precisa ser precedido de um bom planejamento na perfuração dos poços de monitoramento, uma vez que há variação espacial na recarga subterrânea e o método precisa ser representativo. Deve-se ainda identificar as elevações de nível de água que estão ligadas diretamente a precipitação, identificando instantes do monitoramento onde as elevações não apresentam relação a um evento de precipitação, visto que existem inúmeras causas das flutuações do lençol freático (HEALY; COOK, 2002). Desta forma a recarga pelo método *Water-Table Fluctuation* pode ser estimada pela Equação 1.

$$R = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

No qual Δh é a variação do nível de água ocasionada pela precipitação, Δt é o tempo decorrido da variação do nível de água e S_y é o rendimento específico.

A determinação do rendimento específico através de testes de aquífero e simulação de cenários em ambiente computacional torna-se uma alternativa cada vez mais utilizada por pesquisadores e profissionais da área. Por exemplo, através dos dados de rebaixamento é gerada a curva de campo, sobre a qual ajusta-se as curvas selecionadas pelo operador de um determinado *software*, a título de exemplo, o AQTESOLV Demo (NASCIMENTO, 2021).

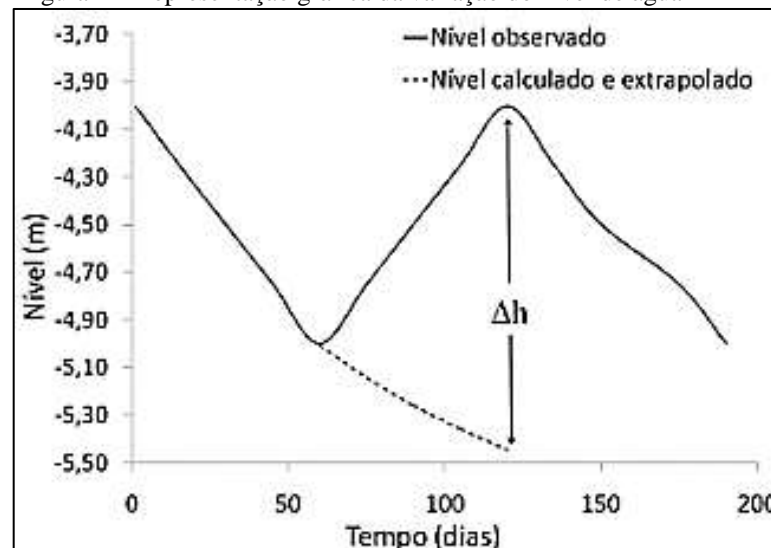
A aplicação do *software* AQTESOLV Demo para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos (S , S_y e K) pode ser verificado no trabalho de Shapoori et al. (2015), onde a curva de Theis em aquíferos confinados foi a que melhor se ajustou aos dados de teste de bombeamento de curto prazo (menor que 2 dias). Todavia, em bombeamentos longos, com duração até 8 dias, observou-se que o modelo de Neuman obteve uma eficiência maior de ajuste, este fato foi associado a drenagem retardada da zona não saturada.

Assim como Shapoori et al. (2015), Fernandes (2017) utilizou esse mesmo *software* para determinar o coeficiente de armazenamento, a transmissividade e o rendimento específico de um aquífero livre em 7 poços tubulares. Os dados de rebaixamento foram obtidos por meio de bombeamentos de curta duração, onde cada poço tubular apresentou o melhor modelo que se ajustasse a sua curva campo, ao final obteve-se 7 dados de rendimento específico (0,05 até 0,10), transmissividade ($1,18 \times 10^{-4}$ até $9,51 \times 10^{-4}$ m²/s) e coeficiente de armazenamento (0,0004 até 0,37).

De acordo com Martelli (2012) e Fernandes (2017) a determinação da elevação do nível freático (Δh) é obtida por meio da diferença entre o valor mais elevado do nível de água e o menor valor da curva de recessão antecedente, a qual deve ser extrapolada até o tempo correspondente ao valor mais elevado do nível de água.

Segundo Dambrós (2011) e Farias (2011) a curva de recessão antecedente extrapolada refere-se ao cenário onde um poço não apresente elevação do nível de água com o passar do tempo devido ao déficit hídrico e sua obtenção é subjetiva apresentando diferentes ajustes matemáticos (os ajustes mais comuns são os lineares e exponenciais). Na Figura 1, pode-se observar a extrapolação da curva de recessão para o nível máximo de água assistido durante o monitoramento do poço.

Figura 1 – Representação gráfica da variação do nível de água



Fonte: Fernandes (2017).

Barreto (2006) e Lucas et al. (2012) utilizaram uma função potência para determinar a variação do nível de água de um aquífero livre, onde a denominou de função de recessão do



poço. A referida função foi obtida no *software* Excel[®]. A Equação 2 apresenta a função da curva de recessão que foi identificada pelo autor em sua pesquisa.

$$N_{aq} = a \cdot (p - p_0)^b \quad (2)$$

Sendo N_{aq} o nível de água calculado e extrapolado até o nível máximo de água observado, p é o número de dias contados a partir do primeiro dia de medição do nível de água, p_0 , a e b são parâmetros a serem determinados na calibração da equação 2, sendo que cada curva de recessão deverá apresentar um valor de p_0 , a e b .

3.3.1 Outras aplicações do método WTF

Baum, Mancuso e Fritzen (2018) realizaram a estimativa da recarga direta em área urbana utilizando o método WTF. O estudo ocorreu na cidade de Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul (RS), onde o percentual de água infiltrada no solo, que alcançou a zona saturada, foi de 11,57 % do total da média histórica da precipitação na região. Os resultados mostraram uma taxa de recarga coerente com pesquisas anteriores naquela área de estudo, que utilizaram outros métodos.

Rama et al. (2018) realizaram a estimativa de recarga em um aquífero raso, localizado na Fazenda Experimental Ressacada, que integra o Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina, na porção sul da Ilha de Santa Catarina. Neste estudo utilizaram a abordagem de séries temporais em 10 anos de dados discretos de nível de água. O método utilizado foi o WTF. A taxa de recarga determinada representou, aproximadamente, 43 % da precipitação total anual nesta região.

Yang et al. (2018) realizaram a estimativa de recarga do aquífero Dagu, localizado na porção leste da China, por meio de uma variação do método WTF, denominada *Water-Table Fluctuation Regression*, WTFR. Esta metodologia possibilitou estimar a recarga utilizando variações do nível de água ocasionadas pela percolação e exploração de água no aquífero.

Delottier et al. (2018) estimou a recarga da água subterrânea através do WTF baseado em eventos de chuva, a fim de minimizar os impactos decorrentes da dinâmica do fluxo na zona não saturada. Este autor avaliou ainda a incerteza da aplicação simultânea entre um teste de aquífero e o método *Water-Table Fluctuation*. Neste caso, foi determinada a elevação efetiva do lençol freático, a qual compensava fatores que poderiam influenciar os resultados, como



aprisionamento de bolhas de ar na franja superior do lençol freático. Os resultados permitiram inferir uma recarga média de 335 mm.

Simon et al. (2017) realizaram a estimativa da recarga em diferentes unidades hidroestratigráficas, pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani – SAG, por meio de 5 poços de monitoramento pertencentes a rede de poços de monitoramento do projeto RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas). O método utilizado foi o WTF e a recarga variou de 417 mm até 730,7 mm, correspondendo a um valor médio de 13,82 % da precipitação média total.

Fernandes (2017) estimou a recarga de um aquífero não confinado pelo método WTF na bacia hidrográfica do rio Gramame e baixo curso do Rio Paraíba. O monitoramento teve duração de 1 ano hidrológico e foi realizado em 39 poços, sendo 20 cacimbões e 19 tubulares. Os resultados apresentaram uma recarga correspondente a 11,70% da precipitação média na região, que foi de 1.579,73 mm.

Park (2012) realizou a estimativa de recarga por meio do método WTF modificado em aquíferos permeáveis. Neste método o autor substituiu o rendimento específico S_y pela variável porosidade preenchível transitória, sob o argumento de que o rendimento específico é temporalmente invariante e não reflete as características de drenagem da zona não saturada. A recarga média foi, aproximadamente, 37,8 % da precipitação ocorrida em 1 ano hidrológico.

Callahan et al. (2012) realizaram um estudo sobre a recarga de aquíferos localizados em regiões próximas aos cursos de água superficiais, na bacia hidrográfica de Turkey Creek, Carolina do Sul, EUA. Este estudo analisou a variação do lençol freático em função de episódios de intensa precipitação pluviométrica através de uma nova abordagem sobre a análise da curva de ressecção. Na análise da curva, os dados horários de posição do lençol freáticos foram comparados em cada evento de tempestade possibilitando a quantificação da curva de recessão, neste caso não houve análise gráfica da variação do nível de água. A estimativa da recarga nesta bacia hidrográfica variou de 39 até 107 mm ao ano, representando valor, em média, 10% da precipitação anual.

Lucas, Guanabara e Wendland (2012) realizaram a estimativa da recarga subterrânea na bacia do Ribeirão da Onça, a qual está localizada no Sistema Aquífero Guarani – SAG, utilizando o método WTF. A estimativa levou em consideração o tipo de uso do solo, sendo que as atividades agrícolas levantadas foram: cana-de-açúcar, laranja, eucalipto, área de várzea e cultura de alta rotatividade (soja e amendoim). A área de cada cultura analisada foi utilizada como peso na determinação da média ponderada da recarga nesta região. A recarga média



aproximada foi de 13,5 % da precipitação total, onde a menor taxa evidenciada foi na cultura de eucalipto, onde as taxas de evapotranspiração foram as maiores.

Coelho, Almeida e Silans (2012) realizaram a estimativa da recarga do aquífero localizado na bacia do rio Gramame. Para isso, utilizaram o método *Water-Table Fluctuation* em 27 poços contidos ao longo desta bacia. Tais poços foram agrupados em três categorias, segundo o comportamento do nível freático. As maiores recargas ocorreram nas regiões mais planas (48,5 %) ao passo que nas regiões mais íngremes a média foi de 9,7 %.

Martelli e Silva (2011) utilizaram o método WTF para analisar a influência dos poços de abastecimento público, geridos pela Companhia Riograndense de Saneamento e Abastecimento (CORSAN). Os resultados permitiram verificar que a variação do nível de água não apresentava correlação com o regime de chuva.

Dambrós (2011) realizou um estudo sobre a relação da recarga com a sazonalidade da precipitação pluviométrica, utilizando o método WTF, em duas sub-bacias, uma de vegetação nativa e outra de reflorestamento, ambas localizadas em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani – SAG, município de Rosário do Sul, Rio Grande do Sul. A determinação da recarga foi realizada através de 5 poços de monitoramento com série histórica de 2 anos e a correlação entre as variáveis hidrológica foi através de dados diários. Na sub-bacia hidrográfica de campo o percentual de recarga foi de 3,97%, ao passo que na sub-bacia hidrográfica florestada a taxa de recarga foi 3,20% da precipitação total.

Farias (2011) estimaram a recarga subterrânea através do método WTF em duas microbacias hidrográficas denominadas Rancho do Amaral e Rincão do Soturno, ambas localizadas na região central do Estado do Rio Grande do Sul. A estimativa de recarga direta envolveu o monitoramento automático e séries históricas de variação do nível de água em 3 poços. Durante 2 anos de monitoramento horário, ao final observou-se uma recarga média de 341 mm/ano.

3.3.2 Variáveis hidrodinâmicas do solo

A infiltração e o armazenamento de água nas camadas não saturadas dependem de algumas propriedades do fluido e do solo, as quais estão representadas pela viscosidade e massa específica, respectivamente. Com relação as características do meio, a porosidade e a velocidade de escoamento tornam-se fundamentais para entender como a água é armazenada e transmitida e seu impacto sobre a condutividade hidráulica. Em relação às propriedades do solo,



fluidos mais densos e viscosos tendem a fluir mais lentamente pelo meio poroso que fluidos menos densos, o que acaba gerando diferentes valores de condutividade hidráulica em um mesmo cenário hidrogeológico (COELHO, 2011; SILVA, 2019).

Fernandes (2017) descreve que a condutividade hidráulica é um dos parâmetros hidráulicos utilizados para quantificar o volume de água que pode infiltrar no solo, esta variável depende da porosidade do solo (distribuição e tamanho). Neste sentido a condutividade hidráulica refere-se à água que se desloca em sentido perpendicular à área porosa da unidade hidrogeológica. Quanto maior o valor da condutividade hidráulica, mais rápido a água fluirá pelo meio poroso. A variável hidrodinâmica pode ser determinada por ensaio de campo, laboratorial ou modelos matemáticos.

Os ensaios em meio natural frequentemente adotados pelos pesquisadores são: anéis concêntricos, *open and hole*, permeâmetros, piezômetro escavado de Casagrande, furos de sondagem e *slug-test* (PENNER; MARTINS; GONÇALVES, 2020; PINHEIRO; NUMMER; RAUBER, 2017).

Nos ensaios em laboratório os parâmetros umidade e densidade da amostra, granulometria e humidade higroscópica servem de dados de entrada para aplicação em modelos matemáticos de determinação da condutividade hidráulica, como a equação de Beerkan, a qual determina a curva de retenção de água no solo (COELHO, 2011).

Outro procedimento bastante utilizado para determinação das propriedades hidrodinâmicas do aquífero é a combinação do teste de bombeamento com programas computacionais, tais como: AQTESOLV, Modflow 2010 e Aquifer Test Pro.

A combinação fornece gráficos de rebaixamento pelos métodos de Theis, Neuman, Moench e Tartakovsky-Neuman e dados de transmissividade, coeficiente de armazenamento, rendimento específico e condutividade hidráulica (DE MELO; ALVES; DA SILVA, 2014; FERNANDES, 2017; TERAMOTO; CHANG, 2018).

Com relação ao rendimento específico, existem três formas de sua determinação. Ou seja, o rendimento específico pode ser determinado de forma teórica (consulta de literaturas), em laboratório (ensaios laboratoriais) ou em campo (teste de aquífero) (OBUOBIE et al., 2012).

Na Tabela 2 estão arrolados os intervalos para o rendimento específico segundo cada tipo de material.



Tabela 2 – Resultados de rendimento específico por material

Material	Rendimento específico (Sy)
Arenito	0,02 até 0,41
Areia	0,01 até 0,46
Cascalho	0,13 até 0,44
Argila	0,01 até 0,39
Xisto	0,22 até 0,33
Rocha calcária	0,00 até 0,36

Fonte: Silva (2019), adaptado de Morris e Johnson (1967).

Neto e Rodrigues (2020) com vista a analisar o impacto que o rendimento específico ocasiona nos resultados de recarga, estimou este parâmetro através de duas metodologias. O primeiro método determinou o rendimento específico a partir da curva de retenção de água no solo, a qual foi obtida a partir dos dados de porosidade e retenção específica. Na segunda abordagem, o rendimento foi calculado em função dos valores de condutividade hidráulica. Os valores de rendimento específico variaram de 0,14 até 0,17.

Delottier et al. (2018) instalaram uma estação de monitoramento composta por dois poços em uma região localizada em Bordeaux (França), em aquífero não confinado, cuja a zona não saturada era composta por areia grossa e cascalhos heterogêneos, a zona saturada era composta por areia fina que cobria uma camada espessa de argila. Neste contexto utilizaram um poço para medições de flutuação do lençol freático e o outro poço para estimativa do rendimento específico por teste de aquífero. A utilização exclusiva de um poço para estimativa do rendimento específico diminuiu ruídos nos resultados, neste caso os valores de Sy variaram entre 0,10 e 0,17.

Silva et al. (2012) descrevem que o rendimento específico faz parte das formulações matemáticas que buscam explicar a recarga a partir da variação do nível de água. Portanto esta variável, em alguns casos, pode ser substituída pela porosidade efetiva e coeficiente de armazenamento, uma vez que todos fazem referência a porosidade das unidades hidrogeológicas.

3.4 Fatores que influenciam na variação do nível freático

A variação do lençol freático é influenciada por alguns fatores, tais como: geologia do local, dinâmica hidrológica e fisiográfica da bacia hidrográfica, clima, espessura da zona não saturada, uso do solo, etc.



Aquíferos freáticos e próximos às zonas de drenagem apresentam forte sensibilidade ao regime sazonal da precipitação pluviométrica. Geralmente as elevações do nível freático ocorrem nos meses de precipitação intensa. Em contrapartida, o rebaixamento do nível freático inicia-se no período de baixa precipitação. Estudos têm mostrado que a variação do lençol freático ocorre a partir de determinados valores de precipitação, este efeito retardado pode estar ligado a diversos fatores, tais como espessura da zona não saturada, geologia do solo, etc. (CALLAHAN et al., 2012; CAMBRAIA NETO; RODRIGUES, 2020; LOBLER, 2015; NOWREEN et al., 2020; PARK, 2012; SOMARATNE; SMETTEM; FRIZENSCHAF, 2014).

Penner, Martins e Gonçalves (2020) descreveram que existem uma relação direta entre recarga e precipitação, apesar disso as elevações do nível de água nem sempre ocorrem imediatamente após o fim deste evento. O tempo entre a precipitação e variação do lençol freático pode ser melhor evidenciado em poços localizados em cotas elevadas, onde a profundidade do lençol freático é maior, conseqüentemente com maior capacidade de armazenamento, apesar disso existem outros fatores, como a classe de solo, porosidade, condutividade hidráulica, etc., que podem aumentar esse tempo de resposta.

Brito et al. (2019) utilizaram a correlação de Pearson para determinar a associação entre precipitação pluviométrica e aumento do nível freático nos aquíferos Alter do Chão e Trombetas. Os resultados de R^2 mostraram uma correlação variando de 40 % até 90 % em toda a extensão da bacia hidrográfica, demonstrando que em algumas regiões a recarga não era exclusivamente provocada pela precipitação pluviométrica. Mas, por outros mecanismos de recarga.

Carretero e Kruse (2012) realizaram a estimativa de recarga em uma região costeira do Oceano Atlântico, localizada na província de Buenos Aires. A área de estudo compreende uma barreira de dunas com solos arenosos, excessivamente drenados e instáveis, onde o escoamento superficial é desconsiderado. Neste caso, a variação do nível de água no solo é instantânea após um evento de chuva, apesar disso foi verificado que o lençol freático no período seco e chuvoso apresenta resposta quando a precipitação acumulada atinge valores de 53 mm/mês e 97 mm/mês, respectivamente. O período seco proporciona maior taxa de água infiltrada, uma vez que neste clima a exigência por água é menor, todavia no período chuvoso a evapotranspiração é elevada nesta região, o que desfavorece o armazenamento de água no solo arenoso, contribuindo para maiores valores de precipitação acumulada.

Andrade et al. (2014) estimou a recarga em um aquífero aluvial do Ribeirão Mimoso localizada na bacia hidrográfica do Rio Ipanema. Nesta região, foi observado que apenas



precipitações acumuladas equivalentes a 100 mm, no período chuvoso, ocasionavam elevação no lençol freático. Este fator está associado a distribuição de chuvas ao longo do ano e constituição do solo, que é argiloso. A profundidade dos poços escolhidos para o estudo foi, aproximadamente, 5 m.

Muitas pesquisas explicam, através de mapas (altimétricos, espessura da zona saturada ou nível potenciométrico), que a topografia exerce forte influência no fluxo de água de uma bacia hidrográfica, direcionando-a de regiões de topografia elevadas para as baixas. Poços localizados nos divisores de água subterrânea possuem correlação forte com a precipitação, ao passo que poços localizados em regiões de drenagem, acabam tendo correlação fraca com a chuva, uma vez que os cursos de água exercem influência mais significativa em seus níveis freáticos em relação aos eventos de precipitação; (BAUM; MANCUSO; FRITZEN, 2018; HAGEDORN et al., 2011; IZADY et al., 2017; XU; BEEKMAN, 2019).

Baum, Mancuso e Fritzen (2018b) elaboraram um mapa potenciométrico e de espessura da zona não saturada no *software* ArcGIS 10.1, a partir dos níveis potenciométricos dos poços de monitoramento e da espessura da zona não saturada. Os produtos tiveram como resultado final a descrição dos fluxos de água subterrânea, apontamento de zonas de recarga e descarga e distribuição espacial das regiões onde se obteve maior variação do nível de água. Sobretudo, observaram que as águas subterrâneas corriam para regiões de drenagem, tais como nascente e cursos de água, onde as variações de nível freático foram discretas. Em contrapartida, poços localizados nas cotas elevadas, próximos aos divisores de água, estavam sujeitas as maiores variações no nível freático, constituindo as regiões de recarga da bacia hidrográfica do Rio da Várzea, no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

De Melo, Alves e Da Silva (2014) observaram que as cargas hidráulicas são maiores no período chuvoso e menores no período seco. Na bacia hidrográfica, as cargas hidráulicas maiores estão situadas nas regiões planas e elevadas, à medida que o fluxo de água se aproxima das regiões de drenagem, esta carga vai decaindo até os menores valores. O mapa potenciométrico mostra que o fluxo subterrâneo segue em direção ao mar ou às áreas de drenagem.

Silva et al. (2012) a partir dos dados de nível de profundidade de 26 poços da sub-bacia Ribeirão Lavrinhas e 17 poços da sub-bacia Ribeirão Marcela, foram confeccionados os mapas altimétricos, os quais permitiram analisar que a vazão das nascentes dependia do fluxo de água drenada dos aquíferos freáticos, bem como de sua habilidade de transmitir essa água.



Carretero e Kruse (2012) para descrever o fluxo de água subterrânea no aquífero subjacente às dunas, foram coletados dados de nível de água de 43 poços de monitoramento, os quais foram inseridos em um Sistema de Informação Geográfica para confecção de mapas de altimetria. O mapa potenciométrico permitiu inferir que as maiores profundidades do lençol freático se concentravam próximo as dunas de areia, ao passo que as menores profundidades se localizaram nas áreas de descarga a leste e oeste do aquífero, compreendendo zonas de água salobra e salina.

A geologia é outra variável que influencia diretamente na porcentagem de recarga do aquífero, uma vez que o rendimento específico (S_y) é alterado pelas classes de solo existentes. Estudos realizados em aquíferos livres localizados em um mesmo sistema de aquífero têm mostrado diferentes resultados de recarga.

Simon et al. (2017) realizou um estudo sobre recarga em três unidades geológicas portadoras de água, as quais se diferenciavam pela sua constituição geológica, em outros termos, a pesquisa foi desenvolvida nos aquíferos Sanga do Cabral, Piramboia e Botucatu/Guará. As recargas nestas três unidades hidrogeológicas acompanharam os eventos de precipitação, apesar disso apresentaram taxas de recarga heterogêneas, devido as particularidades geológicas, pedológicas e hidrogeológicas presentes em cada solo próximo aos poços de monitoramento. No geral, poços de monitoramento com elevadas taxas de recarga foram classificados como Latossolo (elevada taxa de infiltração, porosidade, permeabilidade, transmissividade e condutividade hidráulica). Em contrapartida, poços de baixas taxas de recarga estavam situados em áreas de solo argiloso (menor taxa de drenagem, porosidade, permeabilidade, transmissividade e condutividade hidráulica).

Freitas e Bacellar (2013) avaliaram as taxas de recarga em duas sub-bacias hidrográficas denominadas CSV E FAZ. Na microbacia CSV predominava o solo Complexo Metamórfico do Bação (CMB) e na microbacia FAZ, o solo Grupo Nova Lima (GNL). As bacias apresentaram características fisiografias semelhantes, todavia como estavam inseridas em solos distintos, acabaram se diferenciando em suas características hidrodinâmicas (granulometria, limites de consistência, porosidade, estabilidade dos agregados e condutividade hidráulica).

Sousa e Rodrigues (2014) encontraram na bacia hidrográfica do alto rio dos bois quatro tipos de solo: Argissolo, Latossolo (granito e alcalinas) e Cambissolo, sob os quais estavam inseridos os aquíferos, objeto de estudo. Para cada tipo de solo foram realizados ensaios de condutividade hidráulica superficial (método dos anéis concêntricos) e condutividade hidráulica profunda (método *open end hole*). Os resultados permitiram inferir que a maior parte



da extensão da bacia apresentava baixa capacidade de drenagem, pois era formada por Neossolos, Litólicos e Cambissolos. A pequena porção desta área era formada por solos com elevada capacidade de drenagem, sendo formada por Latossolo, Argissolo e Cambissolo Alcalino.

Soares e Velásquez (2013) realizaram um estudo sobre a capacidade de produção dos poços perfurados ao longo da bacia, o qual mostrou que esta variável era influenciada pelas classes de solo existentes, ou seja, nas regiões próximas ao divisor de águas as taxas de infiltração de água eram maiores, uma vez que o litotipo encontrado foram calcários puros, todavia nas regiões de topografia menor as taxas de recarga diminuía devido a diversificação das classes de solo.

Nowreen et al. (2020) o mecanismo de recarga e a condutividade na bacia de Bengala, em Bangladesh, sofrem forte influência do litotipo presente no solo. Regiões da bacia hidrográfica que apresentavam sedimentos não consolidados do Holoceno (camada permeável) apresentavam recarga difusa, todavia depósitos do Plio-Pleistoceno (camada impermeável) apresentavam recarga pontual, que provinha dos cursos de água influentes. Os depósitos de terraço do Plio apresentavam-se como uma camada confinante que impedia a recarga direta.

Neto e Rodrigues (2020) identificaram três classes de solo (latossolo vermelho, cambissolo e gleissolo) na bacia hidrográfica do rio Buriti, serrado brasileiro. Dentre as classes, o latossolo vermelho foi o litotipo que apresentou maior taxa de infiltração de água para a zona saturada.

Outra variável que influencia significativamente na variação do nível de água de um aquífero é o uso e ocupação do solo. Dependendo do tipo de uso, há um impacto positivo ou negativo na flutuação do nível freático do aquífero. Em cidades onde a impermeabilização do solo é plausível, as taxas de recarga ficam severamente comprometidas, uma vez que a água que precipita, não infiltra no solo e escoar em direção as regiões de drenagem ou curso de água. Em atividades de pecuária, o pisoteio diário do gado acaba compactando o solo, tornando-o um obstáculo a infiltração de água de chuva à zona saturada.

Na agricultura, cada tipo de cobertura vegetal apresenta uma demanda por água, a qual é governada pela profundidade das radículas presentes no subsolo, entretanto estudos têm mostrado que poços localizados em uma mesma cultura, podem apresentar uma diferença na variação do lençol freático. Tal diferença, pode ser ocasionada pela espessura da zona vadosa (MANZIONE; TANIKAWA; WENDLAND, 2011).



Uma variável bastante utilizada no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica é denominada de evapotranspiração. Esta variável hidrológica diz respeito a parcela de água que retorna para a atmosfera através de dois processos: evaporação da água na superfície do solo e transpiração dos vegetais. Neste sentido, a energia solar, o tipo de vegetal, a umidade do ar e o suprimento de água no solo para atender a demanda da vegetação são fatores limitantes da evapotranspiração. Esta variável pode ser quantificada através de diferentes métodos, os quais estão agrupados em 5 tipos: Lisímetro, Empírico, Micrometeorológico, combinado e orbital (PONTON, 2017).

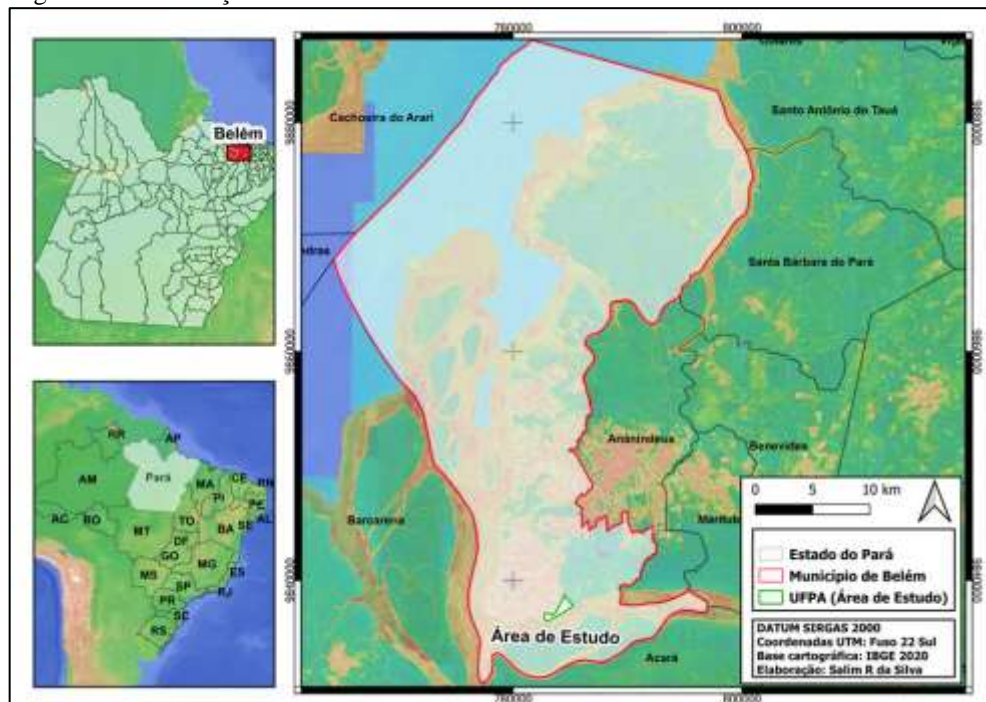
Lucas e Wendland (2016) utilizaram o método empírico Penman-Monteith alterado pela FAO-56 para determinação da evapotranspiração real diária a partir da evapotranspiração potencial diária. Neste estudo foi verificado que na cultura de cana-de-açúcar a recarga ficou em 248 mm/ano e nas florestas de eucalipto foi de 135 mm/ano, estes dois tipos de uso da terra demandaram mais água que as demais tipos estudados, uma vez que a recarga nas áreas cítricas foi de 296 mm/ano e na pastagem foi de 401 mm/ano. Desta forma foi evidenciado neste estudo que a evapotranspiração é uma variável que deve ser considerada em estudos de recarga sob solo com diferentes usos.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

O estudo para a estimativa da recarga subterrânea foi realizado em 8 poços de monitoramento localizados no espaço territorial da Cidade Universitária Prof. José da Silveira Neto, onde está localizada a Universidade Federal do Pará. Tal instituição situa-se as margens do rio Guamá, próximo aos exutórios da Bacia Hidrográfica do Tucunduba e Sapucajuba, sendo delimitada pelas coordenadas geográficas $1^{\circ}28'9.94''S$ latitude e $48^{\circ}26'47.91''O$ longitude, como pode ser observado na Figura 2 (COSTA; LOPES, 2021; MONTEIRO, 2021; NASCIMENTO, 2021; SOUTO et al., 2019).

Figura 2 – Localização da área de estudo



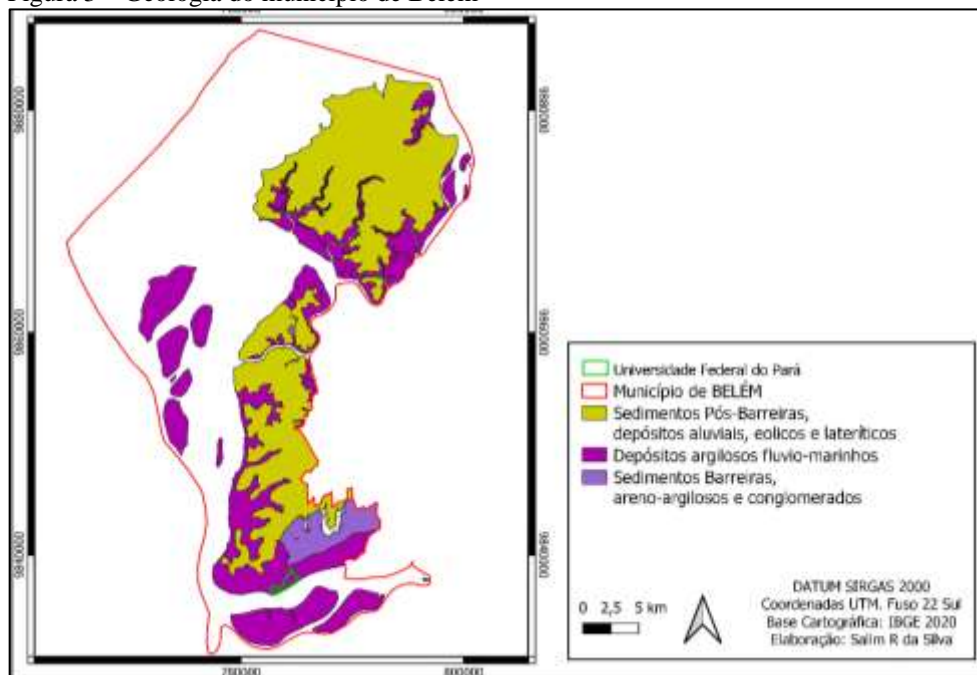
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

4.2 Solo

A cidade de Belém apresenta diferentes tipos de solo, os quais compõem o seu extrato geológico, como os latossolos amarelos distróficos, situados na região central de Belém e os Gleissolos Háplicos, situados em toda a extensão do litoral e região metropolitana. Em termos gerais os tipos de solos encontrados na cidade paraense são: Latossolos Amarelos, Plintossolos

Háplicos distróficos, Plintossolos Pétricos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos. Com relação as características do Latossolo amarelo, observa-se elevado índice de infiltração de água, permeabilidade e porosidade. Os Gleissolos Háplicos são caracterizados por adsorver volumes de água em excesso, esta condição o coloca como um solo característico de aquíferos freáticos. Tais classes de solo estão contidas nas formações Pirabas, Barreiras, Pós-Barreiras e Sedimentos modernos (ALMEIDA et al., 2004; ANA, 2018a; SANTOS et al., 2018). Belém apresenta regiões de menor cota (abaixo de 5 m), onde o solo fica boa parte do ano alagado, esses solos apresentam a argila como principal litotipo constituinte, sendo denominados de solo de igapó. Em contrapartida, observa-se que existem regiões com elevados índices de infiltração, estas áreas apresentam em seu extrato rochoso predominância da areia (MATOS, 2010; MATOS et al., 2011). Na Figura 3 consta o mapa geológico do município de Belém.

Figura 3 – Geologia do município de Belém



Fonte: Adaptado de ANA (2018).

O município de Belém foi marcado pelo uso e ocupação do solo sem nenhum planejamento, provocando diversos impactos ambientais. Ao longo dos anos foram sendo construídas edificações do tipo horizontal, vertical e especial, sendo que as edificações do tipo horizontal são as mais frequentes neste lugar.

As edificações verticais referem-se aos edifícios e as especiais dizem respeito aos órgãos públicos, tais como UFRA, UFPA, SERPRO, EMBRAPA e Escola de Aplicação da UFPA. A Figura 4 ilustra a área especial onde está inserida a UFPA, campus Belém, bem como alguma de suas principais edificações existentes.

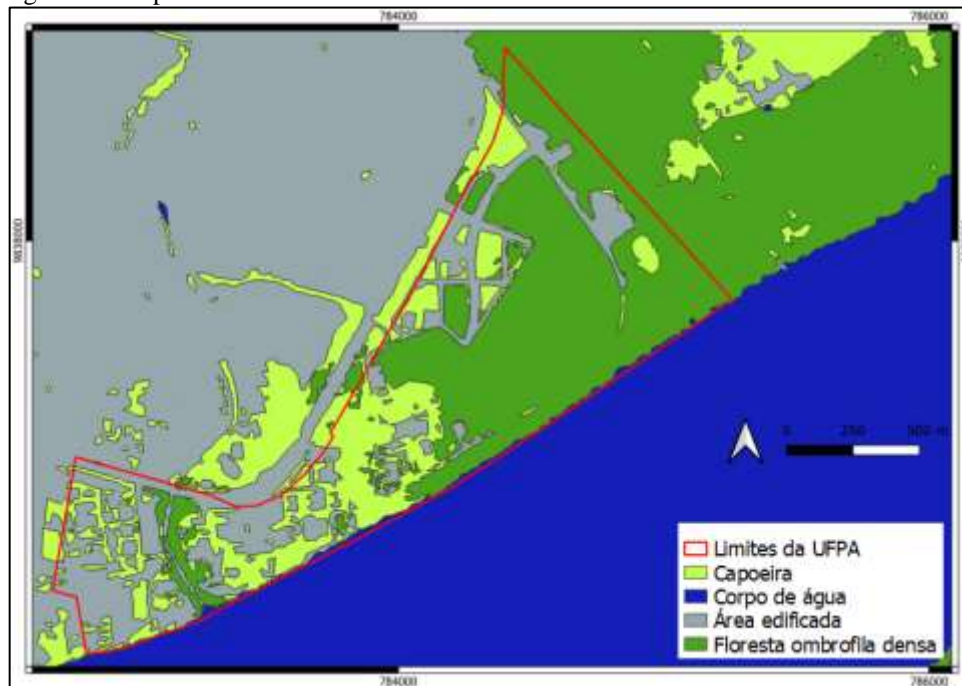
Figura 4 – Localização de algumas edificações principais na UFPA



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A Universidade Federal do Pará apresenta três classes de uso dos solos, são eles: área edificada, floresta secundária e floresta densa. Na porção sudeste da UFPA, nas margens dos igarapés Tucunduba e Sapucajuba, há edificações da Faculdade de Farmácia (FACFAR), Faculdade de Engenharia Naval (FENAV), Hospital Bettina Ferro, Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), Espaço Inovação, ETEPA Dr. Celso Malcher e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), etc. Apesar disso grande parte da área edificada concentra-se mais a sudoeste da referida instituição federal de ensino superior, sendo representada pelo setor profissional e básico, os quais englobam edificações como Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LAESA), o Centro de Eventos Benedito Nunes, o Ginásio Poliesportivo, a Reitoria, o Mirante do Rio, a Diretoria de Capacitação e Desenvolvimento (CAPACIT), Prefeitura do Campus, Restaurante Universitário (RU básico), Mirante do Rio, etc. (ANA, 2018a). A classe de uso do solo existente na UFPA pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5 – Mapa de classe de uso do solo



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

4.3 Hidrogeologia

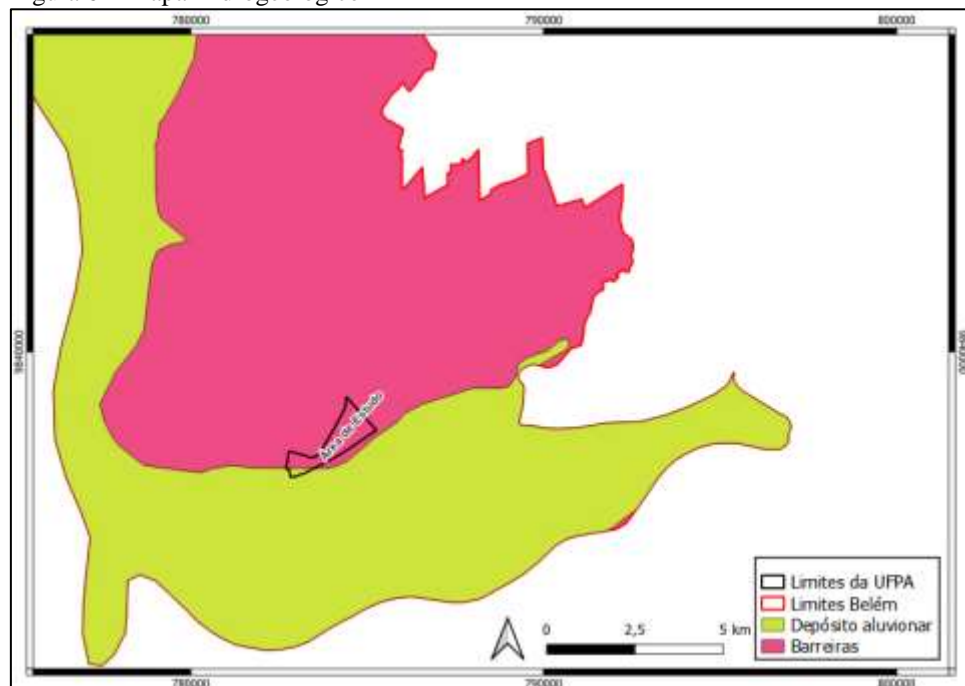
Matta (2002) apontou 5 unidades hidrogeológicas presentes em uma porção da Região Metropolitana de Belém (RMB) que compreende os municípios de Belém e Ananindeua, essas unidades são denominadas de Aluviões, Pós-Barreiras, Barreiras, Pirabas Superior e Pirabas Inferior. Apesar disso, trabalhos mais recentes associados aos estudos hidrogeológicos realizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) em 2018 e pelo Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do Município de Belém, em 2019, têm definido que o Sistema Barreiras (Figura 6) e o Sistema Pirabas são os dois principais pacotes sedimentares que acumulam água subterrânea na Região Metropolitana de Belém. O Sistema Barreiras é formado pelas Coberturas recentes (aluviões, colúvios e elúvios), Pós-Barreiras e Barreiras, enquanto que o Sistema Pirabas é formado pelo Pirabas Superior e Pirabas Inferior (ANA, 2018b; ARBEL, 2020).

A Formação Barreiras apresenta a sua lito-estratigrafia sobreposta a Formação Pirabas, além disso, é caracterizada por sedimentos clásticos de expressões litológicas variadas. A unidade hidrogeológica Barreiras apresenta uma espessura da camada não saturada variando de 25 a 90 m e contém os aquíferos de natureza livre a semiconfinada. Já a unidade Pós-Barreiras é composta pelos depósitos de latossolos amarelados e arenosos, sendo que em alguns contextos

geológicos recoberta por alúvios e colúvios. Esses depósitos estão acima da Formação Barreiras. Os aquíferos compreendidos nessa unidade geológica, apresentam uma profundidade variando de 25 a 30 m, tornando-os as unidades hidrogeológicas mais vulneráveis às contaminações, além disso, são caracterizados pela baixa vazão e água de menor qualidade, necessitando de um sistema de tratamento para posterior consumo humano, apesar de que o tratamento é imprescindível à água que é captada de qualquer profundidade. Devido a espessura da camada não saturada, esses aquíferos apresentam ocorrência não confinada a semiconfinada e concentram o maior número de perfurações no município de Belém (ANA, 2018c; MATTA, 2002a).

A composição geológica da Formação Pirabas é marcada por alternâncias nas estruturas carbonáticas, onde predominam os argilitos negros a esverdeados e arenitos amarelados. Não há uma estratigrafia definida e tão pouco uma área de maior ou menor ocorrência para essas subdivisões. Nesta unidade geológica estão inseridos os aquíferos confinados, onde a espessura da zona não saturada varia em um intervalo de 70 a 180 m. Por estarem localizados em grandes profundidades, a exploração de água desses aquíferos requer equipamentos especializados e mão-de-obra capacitada (MATTA, 2002a).

Figura 6 – Mapa Hidrogeológico



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.



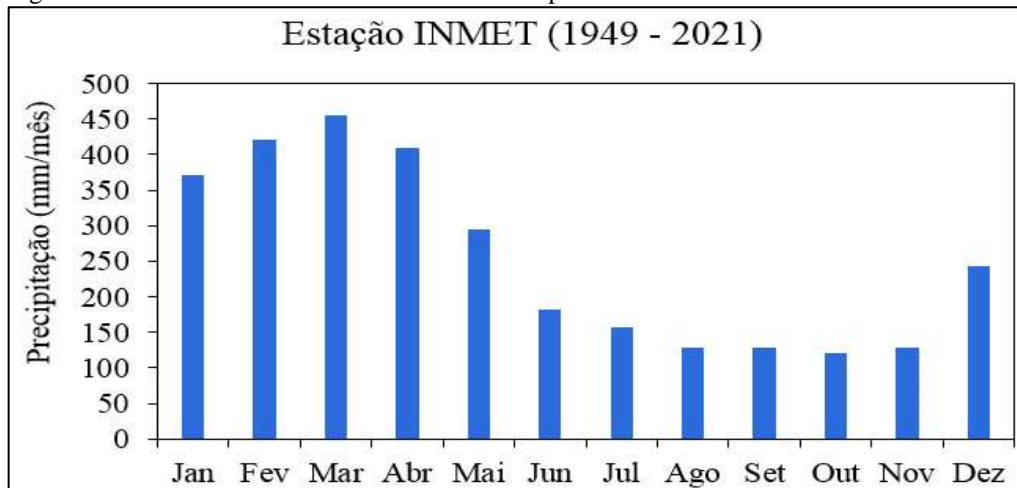
4.4 Clima

Segundo Matos (2010), ANA (2018b) e Júnior e Silva (2021) a classificação climática da cidade de Belém, segundo a categorização de Köppen-Geiger, apresenta um clima equatorial quente e úmido, com temperatura maior que 18 °C em todos os meses do ano. Apesar de apresentarem um regime constante ao longo dos anos, as temperaturas elevadas em Belém são ocasionadas pela intensidade da radiação solar e proximidade com a Linha do Equador.

De acordo Matos (2010), ANA (2018b) e Júnior e Silva (2021) nos meses de elevada precipitação pluviométrica, Belém apresenta umidade relativa do ar próxima de 91 %. A capital do Pará não apresenta estação climática bem definida, como em alguns estados brasileiros, todavia exibe dois períodos sazonais estabelecidos, que é o período chuvoso e menos chuvoso. Este regime é influenciado pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

O período de elevado índice pluviométrico, observado no município de Belém, começa em dezembro e termina em maio, após esse período os índices pluviométricos diminuem, tendo duração de 6 meses, ou seja, de junho até novembro (Figura 7).

Figura 7 – Média histórica de chuva em Belém no período de 1949 até 2021



Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Meteorologia (2022).

4.5 Relevo

Segundo Matos (2010) e Almeida et al. (2004) a topografia do município de Belém é apresentada por terra firme na região metropolitana e por planícies com várzeas em áreas mais afastadas. O território é marcado por superfície acidentada, todavia com um relevo plano, compreendendo o topo da formação barreiras, os terrenos da cobertura Detrítica Pleistocênica



e Planície de Inundação, os quais apresentam uma topografia relativamente plana, onde as maiores cotas varia de 10 até 25 m, enquanto que as menores cotas chegam no máximo até 5 m, respectivamente.

Cristo e Luz (2011) utilizaram a metodologia de classificação taxonômica de Ross (2010) para caracterização das unidades geomorfológicas existentes na Bacia urbana do Tucunduba, neste sentido foram identificadas duas unidades morfológicas: Tabuleiro Continental e Planície Aluvial (Várzea do Tucunduba). Através do mapa de unidades de relevo na Bacia do Tucunduba o pesquisador identificou as unidades de relevo: Topo de Terraço, Terraço, Vertentes e Planície. O topo de terraço apresenta maior cota (12 até 16 m) e as áreas de planície apresentam as menores cotas (até 4 m), sendo que as áreas de planície de inundação são marcadas pela ocupação desordenada do espaço. As planícies de inundação estão presentes ao sul da bacia, estendendo-se até a sua região central. Ao sul da BH do Tucunduba está localizado o bairro universitário, onde está inserido o campus da Universidade Federal do Pará.

4.6 Vegetação

A classe de uso do solo predominante no município de Belém é a Floresta Ombrófila Densa, a qual apresenta ocorrência frequente ocupando, aproximadamente, 47 % da Região Metropolitana, dentro deste percentual despontam os municípios de Belém e Santa Izabel do Pará. (ANA, 2018c; MITOSO; DINIZ, 2011).

Apesar disso Belém apresenta vegetação variada em função da cota topográfica, água e solo. A floresta de igapó está situada nos menores níveis topográficos, constituindo as regiões alagadas, por exemplo, o Igarapé do Tucunduba concentra mais de 20 % das áreas alagadas no município de Belém. Até a década de 70 o uso predominante do solo na Bacia Hidrográfica do Tucunduba era para atividades agropastoris, todavia com o avanço dos anos esse território foi pouco a pouco sendo ocupado de forma desorganizada, culminando na supressão aproximada de 30% da vegetação nativa, como aquelas que margeavam as nascentes.

O processo de urbanização da bacia culminou no surgimento de habitações ao lado do Igarapé do Tucunduba, eliminando pouco a pouco as matas ciliares. Na década de 90, a supressão vegetal da bacia do Tucunduba chegou a 85 %. Apesar disso, o processo de urbanização nesta bacia vem se estabilizando. Sobretudo, os diversos programas ambientais, bem como órgãos competentes na proteção das florestas, acabam contribuindo para frear as consequências do processo de urbanização (MATOS, 2010).

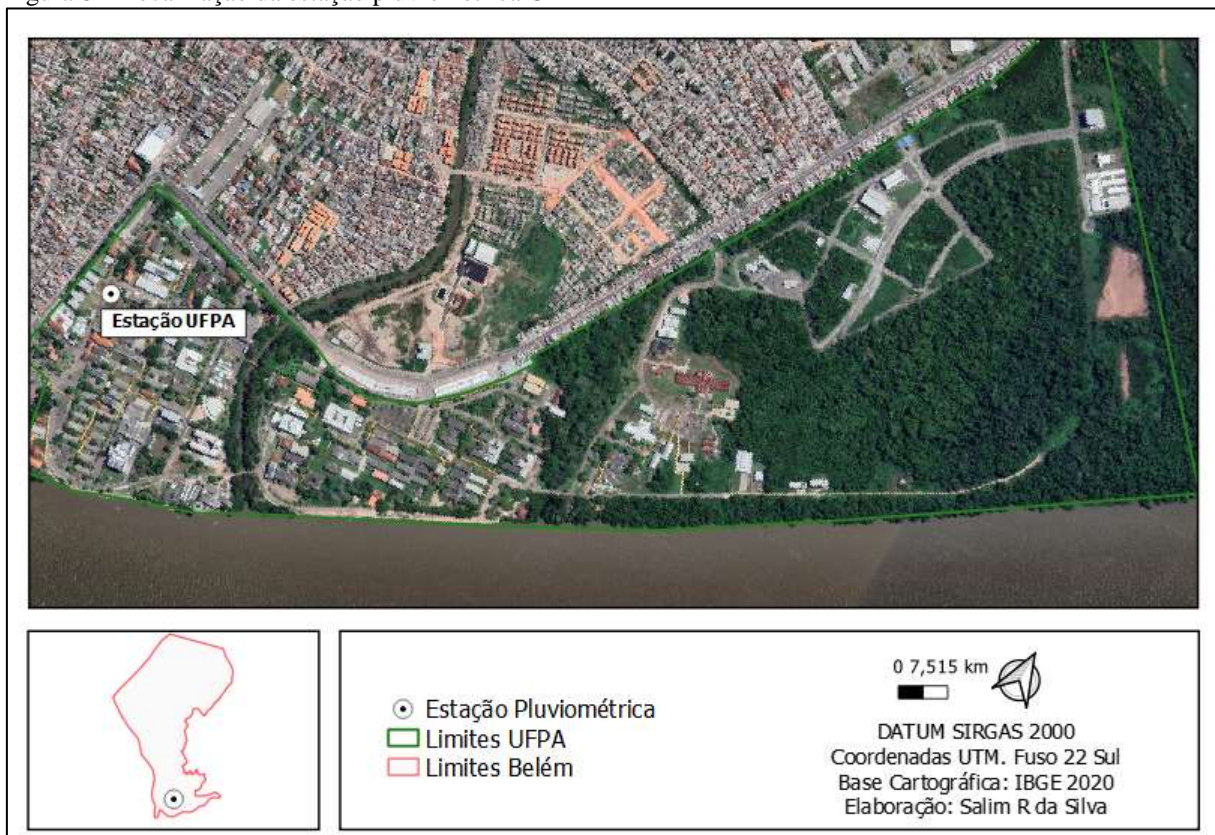
5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Precipitação pluviométrica

Para a caracterização da precipitação pluviométrica na área de estudo foi selecionada a estação pluviométrica ITV/UFPA, a qual encontra-se nas coordenadas Latitude $1^{\circ}28'26,66''$ S e Longitude $48^{\circ}27'30,27''$ O. Esta estação foi selecionada devido a sua proximidade à área de estudo, como pode ser observado na Figura 8.

Apesar disso, a estação selecionada não se encontrava no banco de dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (SNIRH), uma vez que ela é o resultado de um convênio entre UFPA e o Instituto Tecnológico Vale desde 2015, sendo que sua operação está sendo realizada pela Universidade, até o presente momento. A série histórica de dados dessa estação pluviométrica, para o desenvolvimento da pesquisa, compreendeu o período entre 19/03/2020 e 15/04/2022. Este recorte na série histórica considerou o período de monitoramento dos níveis de água dos PMs e valores de precipitação diária.

Figura 8 – Localização da estação pluviométrica UFPA



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

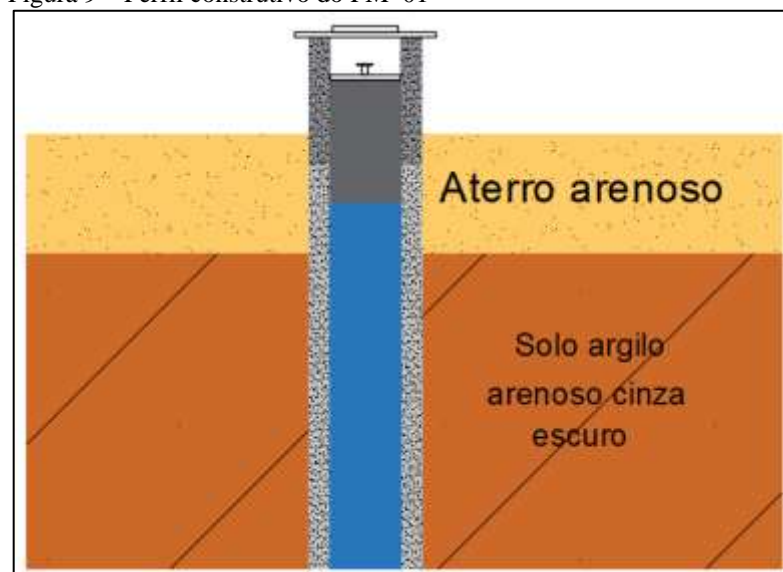
5.2 Poços de Monitoramento

As atividades do projeto de pesquisa para estimar a recarga no campus da UFPA Belém foram realizadas por uma empresa especializada e iniciaram-se com a perfuração de 8 poços de monitoramento (PM) distribuídos na área da universidade, sendo que a perfuração ocorreu com trado mecanizado no período de 12 até 16 de março de 2020. As estruturas dos poços de monitoramento foram feitas segundo o que dispõe os procedimentos definidos pela norma NBR 15495-1:2007, versão corrigida 2:2009 – Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares – Parte 1: Projeto e construção, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009).

Os poços apresentam uma profundidade média de 5,5 m, diâmetro de perfuração de 6” (0,1524 m), diâmetro de revestimento de 2” (0,0508 m) e seção filtrante de 2 e 3 m. Durante a etapa de perfuração do solo nos pontos pré-estabelecidos, foi identificado dois extratos (Figura 9), o primeiro encontrava-se mais superficialmente, sendo constituído predominantemente por areia até 1,5 m de profundidade, aproximadamente. Após essa profundidade até 5,5 m, foi identificado um material de coloração escura, constituído por argila arenosa.

Os 8 poços de monitoramento, exceção dos PMs: 02, 06 e 08 apresentam tampa com cadeado, onde cada tampa possui uma placa de identificação com a numeração do poço. Os PMs: 02, 06 e 08 estão protegidos em caixa de concreto sobreposta a uma laje de concreto e tampa metálica com cadeado.

Figura 9 – Perfil construtivo do PM-01



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho

As variáveis envolvidas no perfil construtivo dos poços de monitoramento foram utilizadas para o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, que serão melhor detalhados nas seções posteriores.

5.3 Localização dos Poços de Monitoramento

Como pode ser observado, a distribuição dos PMs e PRs na área de estudo e a infraestrutura dos poços é apresentada nas Figuras 10 e 11.

A distribuição dos poços de monitoramento foi estabelecida da seguinte forma: os PMs: 01, 02 e 03 foram locados próximos ao Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LAESA), o PM-04 foi localizado próximo a Faculdade de Engenharia Naval (FENAV), os PMs: 05 e 07 foram construídos próximos a Faculdade de Farmácia (FACFAR), o PM-06 ficou próximo ao leito do Igarapé Sapucajuba e o PM-08 foi perfurado próximo ao Hospital Universitário Bettina Ferro de Souza.

Figura 10 – Localização dos Poços de Monitoramento e Pontos de Referência



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Além dos poços de monitoramento, foram estabelecidos três pontos de monitoramento do nível de água dos mananciais Sapucajuba e Tucunduba, denominados de Ponto de Referência (PR), sendo distribuídos da seguinte forma: PR-01 foi localizado na Ponte de acesso sobre o Igarapé Sapucajuba e PRs: 02 e 03 foram posicionados em duas pontes sobre o Igarapé do Tucunduba.

Figura 11 – Infraestrutura dos poços de monitoramento: a) PM-07 e b) PM-06



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho

Esses pontos de referência foram utilizados no trabalho de Costa e Lopes (2021) para auxiliar na elaboração dos mapas potenciométricos com objetivo de identificar o direcionamento do escoamento da água subterrânea na área de estudo. O fluxo subterrâneo apontava um direcionamento do escoamento no sentido dos igarapés supramencionados, provável descarga do aquífero livre.

5.4 Equipamentos para o monitoramento

O monitoramento da variação do nível de água foi realizado com o medidor eletrônico de nível de água comercializado pela Geoesfera Ambiental. Este medidor é composto por um cabo com sonda de 30 m de comprimento, montado em carretel fabricado com plástico de engenharia, suporte de alumínio e painel de controle com sinal sonoro e luminoso. (Figura 12).

Figura 12 – Equipamento para o monitoramento discreto

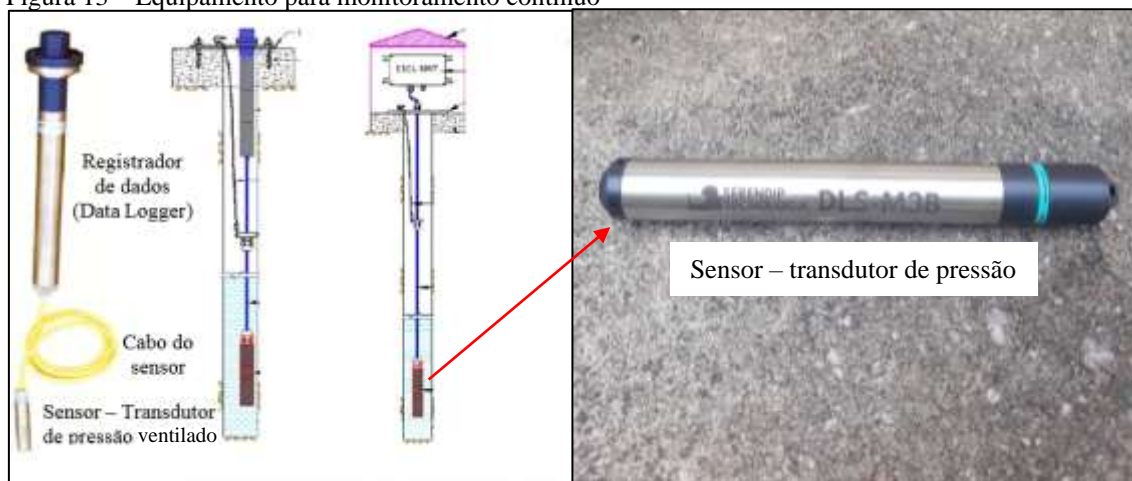


Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

O monitoramento automático do nível de água foi realizado com um transdutor de pressão da coluna de água (Figura 13). Este transdutor é dotado de cabo ventilado e amplitude de 5 m, sua precisão é $\pm 0,1\%$ F.E. Portanto os transdutores corrigem automaticamente as medições por pressão, ao ser ventilado, e por desvio de temperatura, com um algoritmo de linearização de dois pontos conhecidos, sendo o erro total máximo resultante na ordem de ± 2 mm. As informações do sensor foram programadas para armazenar os dados a cada 15 minutos.

Os PMs: 02, 06 e 08 contaram com os transdutores, base de concreto, tampa de PVC, trava de ferro e cadeado, os demais poços apresentam apenas a base de concreto e tampa de PVC com cadeado.

Figura 13 – Equipamento para monitoramento contínuo



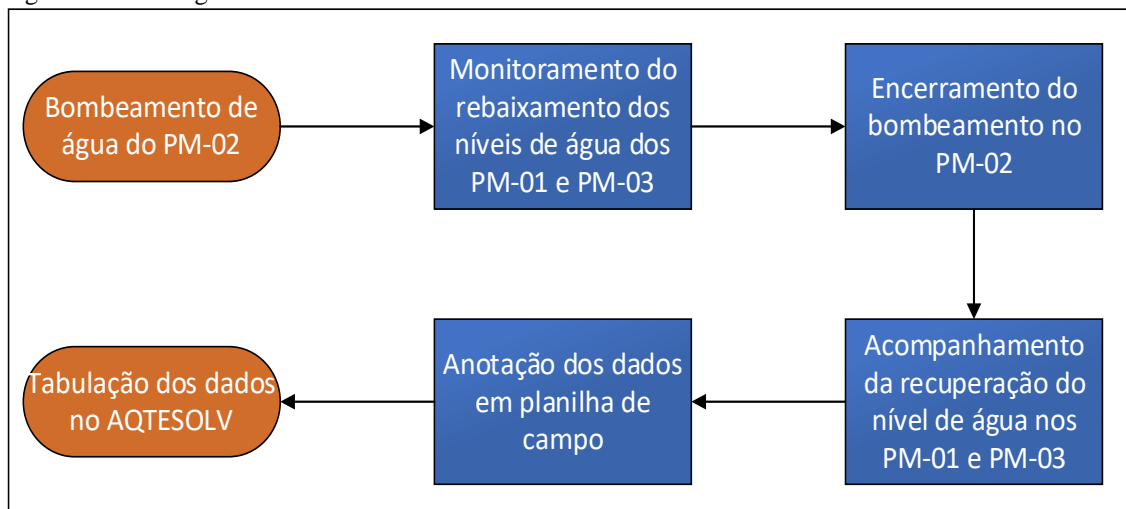
Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

5.5 Determinação dos parâmetros de aquífero

Um teste de aquífero foi conduzido utilizando três poços de monitoramento denominados de PMs 01, 02 e 03. Esse teste forneceu os dados de rebaixamento e recuperação, os quais foram utilizados para determinar as variáveis hidrodinâmicas, tais como Transmissividade (T), Coeficiente de Armazenamento (S), Rendimento Específico (S_y) e Condutividade Hidráulica (K). Apesar disso, neste estudo, utilizou-se apenas o rendimento específico para determinação da recarga subterrânea.

Pela configuração dos poços, o PM-02 foi utilizado como poço de bombeamento e os poços PMs: 01 e 03 foram definidos como poços de observação do rebaixamento ou recuperação da coluna de água. Os procedimentos em campo seguiram algumas orientações de Severgnini, Bortolin e Reginato (2021), observadas no fluxograma da Figura 14.

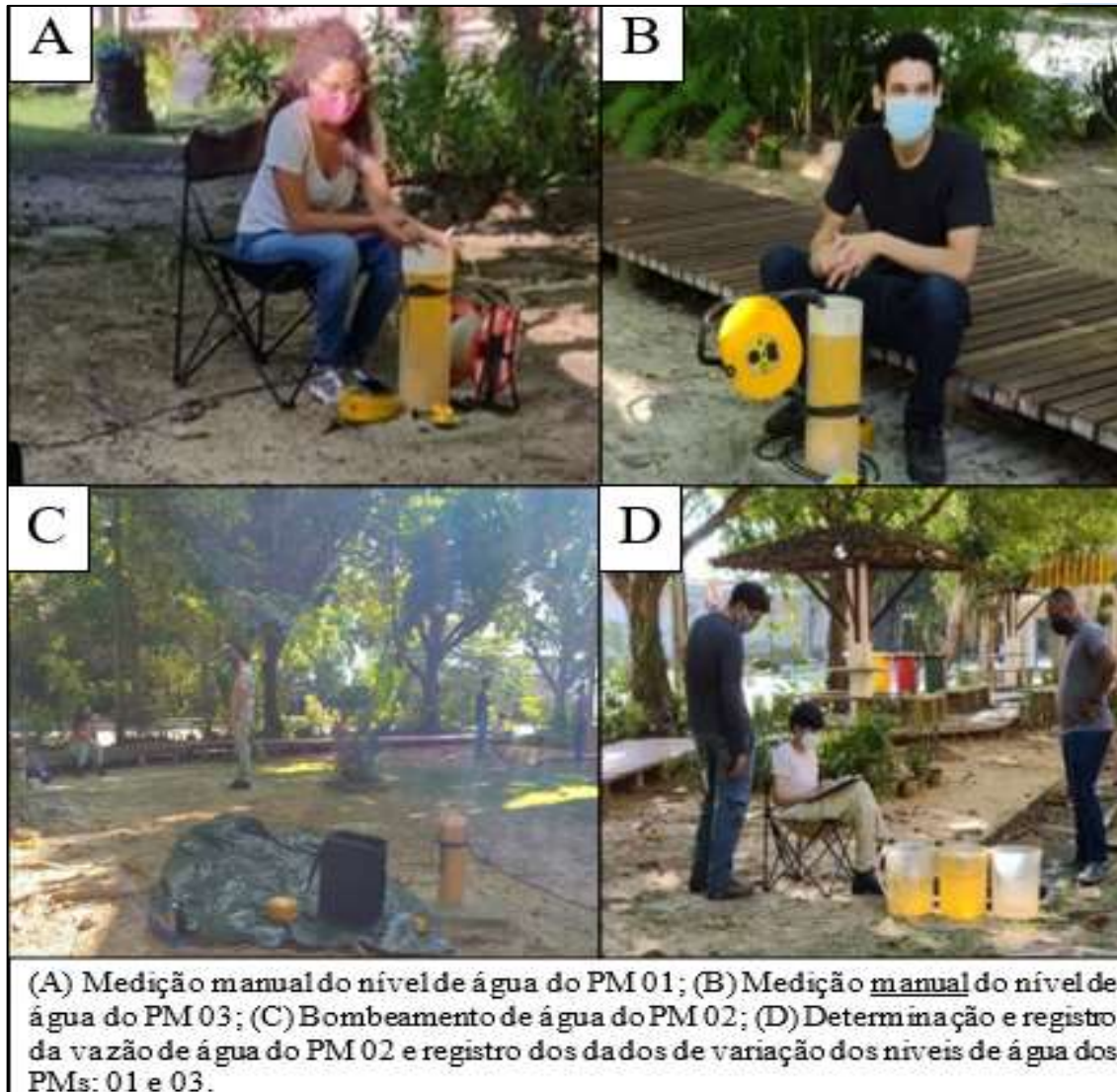
Figura 14 – Fluxograma do teste de bombeamento realizado na UFPA



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

O bombeamento foi realizado com uma bomba submersa *Twister* 12 volts com vazão nominal, aproximada, de 550 L/h. O tempo de leitura do rebaixamento e da recuperação foram registrados a cada minuto com transdutores de pressão. Por garantia, os níveis de água nos poços também foram registrados fisicamente através do medidor de nível manual em intervalos padronizados. A Figura 15 ilustra as etapas do teste de bombeamento realizados pela equipe de alunos envolvida no projeto.

Figura 15 – Etapas do bombeamento



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A análise dos dados do teste de bombeamento é comumente realizada em ambiente computacional, nos *softwares* especializados. Estes programas fornecem distintos cenários e boa precisão nos resultados. A interpretação dos gráficos de rebaixamento e recuperação foi realizada no *software* AQTESOLV Demo (versão demonstrativa), o qual é especializado na interpretação de ensaios hidrogeológicos, tais como: teste de bombeamento, teste de *slug tests* e teste de carga constante. A análise de dados neste *software* permite encontrar a melhor combinação entre curvas de soluções e dados de teste de bombeamento em função do melhor ajuste de curva de mínimos quadrados ponderados não lineares. Desta forma, permite executar correspondência simultânea de qualquer solução de curva tipo para dados de rebaixamento, favorecendo ao operador a visualização do quanto o modelo se ajusta aos dados.



Neste estudo foram testadas 4 soluções analíticas, são elas: Theis (1935), Moench (1997), Neuman (1974) e Tartakovsky-Neuman (2007). Para gerar a representação gráfica dos dados de rebaixamento e estimar os parâmetros hidrodinâmicos no *software* AQTESOLV Demo foi necessário a inserção de um conjunto de dados no programa. Ressalta-se que essas são todas as opções disponíveis para as condições do teste. Na Tabela 3 constam os parâmetros do poço bombeado e dos poços de observação, que serviram como dados de entrada, preliminares. O modelo está disponível para avaliar as características do poço com base no requisito do PM–mais próximo, gerando os resultados automaticamente.

Tabela 3 – Dados preliminares dos poços

Dados Construtivos	PM-02 Bombeamento	PM-01 Observação	PM-03 Observação
Espessura Saturada do Aquífero	18,5 m	18,5 m	18,5 m
Relação de Anisotropia	1	1	1
Coordenadas do poço, X	783278 m	783275,43 m	783273 m
Coordenadas do poço, Y	9836968 m	9836965,36 m	9836970 m
Configuração do poço	Vertical com penetração parcial	Vertical com penetração parcial	Vertical com penetração parcial
Profundidade topo do filtro	3 m	3 m	2,5 m
Comprimento do filtro	2 m	2 m	2 m
Raio do revestimento do poço	0,0254 m	0,0254 m	0,0254 m
Raio de perfuração do poço	0,0762 m	0,0762 m	0,0762 m

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Para interpretação do teste de bombeamento, partindo-se do pressuposto de que a espessura da formação geológica considerada como aquífero livre seja de 20 m, conforme ANA (2018a) e que a espessura da zona não saturada seja de 1,5 m (observado no dia do teste), adotou-se uma espessura de 18,5 m para a zona saturada (b). A condutividade vertical foi igualada a condutividade horizontal por meio da adoção de uma razão de anisotropia igual a 1 (K_v/K_H), esta hipótese foi considerada com base na proximidade entre o poço de bombeamento e os poços de observação. Ressalta-se que a razão de anisotropia é um parâmetro de ajuste do AQTESOLV Demo. Os PMs: 01 e 03 estão a uma distância de 2,53 m e 6,28 m do poço de bombeamento, respectivamente. Na Figura 16 indica-se as distâncias entre os PMs.

Figura 16 – Distância entre os PMs envolvidos no teste de aquífero



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

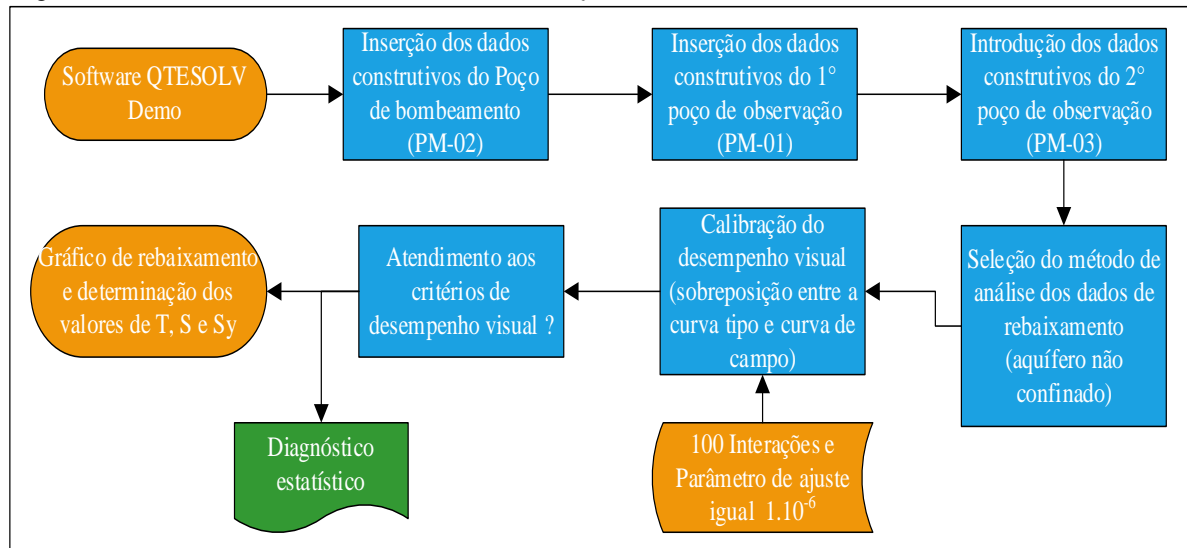
Após inserção dos dados de bombeamento, o método analítico é selecionado e a curva tipo é gerada, por exemplo, a curva de Theis (1935), Moench (1997), Neuman (1974) ou Tartakovsky-Neuman (2007). A correspondência visual de curvas foi realizada de forma automática com o *software* AQTESOLV Demo.

Todavia, antes de executar a correspondência visual automática, foram definidos dois critérios de controle de estimativa de parâmetros hidrodinâmicos dentro de uma faixa associada a hidrogeologia local (K entre $1,087E^{-4}$ e $9,628E^{-5}$ cm/s, S_y entre 10 e 30% e anisotropia entre 0,5 e 1), os intervalos são discutidos nos trabalhos de Penner et al. (2019) e Penner, Martins e Gonçalves (2020).

Para a convergência de cada método analítico foi assumido um número máximo de 100 interações e variação nos parâmetros de ajuste (K , S_y e anisotropia), entre interações inferiores a 1×10^{-6} . O primeiro foi determinado através do número de interações possíveis, a qual ficou em 100 interações, e o segundo foi definido através da variação do parâmetro de ajuste, a qual ficou em $1.E^{-6}$. Ao final da correspondência visual de curvas, analisou-se o valor da Soma dos Quadrados dos Resíduos (da sigla em inglês RRS) parâmetro fornecido por cada método testado e utilizado para avaliar a aderência de uma equação a dados medidos. O melhor ajuste foi definido a partir do menor valor de RRS.

Portanto as etapas descritas acima garantiram e definiram os parâmetros hidrodinâmicos para cada método. Na Figura 17 exemplificam-se as etapas de análise dos dados.

Figura 17 – Análise dos dados de rebaixamento no *software* AQTESOLV Demo



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

5.6 Estimativa de recarga direta

A recarga subterrânea através do método da variação da superfície livre ou *Water-Table Fluctuation (WTF)*, fundamenta-se no princípio de que a elevação do nível de água é ocasionada quando esta água chega ao lençol freático, sendo que qualquer outro componente do balanço hídrico (Equação 1) não é considerado, por exemplo, o fluxo de base e a evapotranspiração, os quais devem ser zero no instante da recarga, então a recarga é calculada conforme Equação 2.

A recarga direta com dados do monitoramento discreto e contínuo é dada pela média aritmética da recarga direta anual, encontrada para os anos de 2020, 2021 e 2022. Posteriormente, a recarga direta para a área de estudo é determinada pela média da recarga com dados do monitoramento discreto e contínuo.

Além da variação do nível de água, outra variável é considerada na aplicação do WTF, esta variável denomina-se rendimento específico e está relacionada a capacidade de armazenamento de água nos poros do subsolo que compreende o aquífero não confinado. A variação do nível de água e o rendimento específicos são detalhados na seção 3.3 (HEALY; COOK, 2002).

A estimativa da recarga do aquífero subjacente a UFPA utilizou os dados de nível de água do monitoramento discreto e contínuo e foi precedida pela análise das oscilações do nível



de água, identificação, extrapolação da curva de recessão e determinação da variação do nível de água (Δh) e rendimento específico (S_y).

A análise das oscilações freáticas consistiu na identificação das ascensões do nível de água que estavam relacionadas a um evento de precipitação, essas ascensões foram denominadas de nível de água observado (NA_{obs}). Posteriormente, as curvas de recessão foram identificadas e extrapoladas até o maior valor de nível de água observado. A extrapolação da curva de recessão ocorre através de uma função potência (Equação 3), a qual fornece valores de nível de água extrapolados (NA_{ex}). Como a variação do nível de água em um poço de monitoramento é a diferença entre os níveis de água observados e extrapolados, a determinação desta variável em um determinado instante do monitoramento pode ser realizada pela Equação 4 (BARRETO, 2006).

$$f(x) = ax^b \Rightarrow NA_{ex} = a(p - p_0)^b \quad (3)$$

$$\Delta h = (NA_{ex} - NA_{obs}) \quad (4)$$

Onde NA_{ex} é o nível de água extrapolado, p é o número de dias contabilizados a partir do início da elevação do nível de água, p_0 é o dia relacionado ao início da elevação do nível de água, NA_{obs} é o nível de água observado, os índices a e b são parâmetros determinados a partir da extrapolação da curva de recessão. Onde cada extrapolação realizada apresentará valores de a e b e Δh é a variação de nível de água observada em cada poço de monitoramento.

A variação do nível de água Δh para cada elevação do lençol freático é calculada pela diferença entre o nível de água observado e extrapolado no instante i e posteriormente, no instante j , sendo que i e j são os momentos onde a recarga se inicia e, posteriormente, encerra-se. Portanto de posse dos valores do rendimento específico obtidos no *software* AQTESOLV foi possível determinar graficamente a recarga direta R_d (Equação 5).

$$\frac{R_d}{S_y} = \Delta h_i - \Delta h_j = (NA_{ex\ i} - NA_{obs\ i}) - (NA_{ex\ j} - NA_{obs\ j}) \quad (5)$$

Sendo:

- R_d a recarga direta;
- S_y o rendimento específico;
- Δh_i a variação de água no instante i ;



- Δh_i a variação de água no instante j ;
- $NA_{ex\ i}$ e o nível de água extrapolado no instante i ;
- $NA_{obs\ i}$ e o nível de água extrapolado no instante i ;
- $NA_{ex\ j}$ e o nível de água extrapolado no instante j ;
- $NA_{obs\ j}$ e o nível de água extrapolado no instante j ;

A determinação do rendimento específico ocorreu através dos dados de rebaixamento e recuperação, que foram determinados através de um teste de aquífero. Os dados obtidos através desse teste foram inseridos em ambiente computacional, *software* AQTESOLV Demo (versão demonstrativa), que gerou gráficos de curvas de rebaixamento e recuperação, as quais foram analisadas junto a 4 soluções analíticas, como Theis (1935), Moench (1997), Neuman (1974) e Tartakovsky-Neuman (2007).

Cada solução gerou um valor de rendimento específico, exceção de Theis (1935). O valor escolhido foi aquele que proporcionou maior congruência entre a curva de campo (proveniente do teste de aquífero) e a curva tipo (proveniente de cada solução analítica). A determinação do rendimento específico é melhor detalhada na seção 6.6.3.



6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são expostos os resultados obtidos a partir de dados de pesquisa coletados desde 19/03/20 até 15/04/22. Tais como, dados hidrogeológicos e hidrodinâmicos característicos do local de estudo e dados de precipitação pluviométrica compreendidos no mesmo intervalo de monitoramento dos dados de nível de água. Posteriormente é apresentado o comportamento do nível de água em cada poço de monitoramento e sua relação com a precipitação, mais adiante é analisado a variação do nível de água do PM-06 a partir dos dados coletados pelo medidor de nível de água (monitoramento discreto) e transdutor (monitoramento contínuo), por fim são apresentados os resultados de recarga e percentual de recarga em relação a precipitação para cada ano de monitoramento.

6.1 Hidrogeologia

6.1.1 Caracterização Hidrogeológica da área de estudo

A Tabela 4 dispõe informações sobre 10 poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM), que captam água de sistemas aquíferos localizados no município de Belém. As duas principais unidades hidrogeológicas apresentadas são basicamente o Sistema Aquífero Barreiras (SAB) e o Sistema Aquífero Pirabas (SAP), sendo que grande parte das captações cadastradas no SIAGAS, ocorrem no SAB.

Conforme ANA (2018a) o Sistema Barreiras é formado por 3 unidades geológicas, denominadas de Coberturas recentes (aluviões, colúvios e elúvios), Pós-Barreiras e Barreiras, já o Sistema Pirabas é formado por Pirabas Superior e Pirabas Inferior.

Em relação as profundidades das formações geológicas SAB e SAP, observa-se que apresentam diferentes profundidades ao longo do município de Belém (Tabela 4), ou seja, a ocorrência da formação Barreiras está compreendida no intervalo médio entre 18 m até 80 m, ao passo que a profundidade onde há ocorrência do sistema Pirabas está contida no intervalo médio entre 88 a 251 m. Tais dados convergem com o que foi mostrado por ANA (2018b), onde as formações Barreiras e Pirabas ocorrem até 78 m e 393 m de profundidade, respectivamente.

A variação da profundidade, aqui apresentada, é apenas uma amostra do total de poços cadastrados no SIAGAS/CPRM para o município de Belém (1.126 poços cadastrados até a data



11/12/2022), todavia fornece uma noção de que a profundidade da unidade geológica, que encerra os sistemas aquíferos, apresenta grande variabilidade espacial. Sendo assim, este fato torna difícil a determinação de um valor que represente a profundidade para essas formações.

Tabela 4 – Poços perfurados próximos a área de estudo

Código SIAGAS/CPRM	Localidade	Natureza do Poço	Condição do aquífero	Profundidade e perfuração (m)	Formação Geológica
1500002099	Belém	Tubular	Não confinado	80	Barreiras
1500002143	Belém	Tubular	Não confinado	18	Barreiras
1500003075	Belém	Tubular	Semiconfinado	28	Barreiras
1500005376	Belém	Tubular	-	188	Pirabas
1500005632	Belém	Tubular	Não confinado	41	Barreiras
1500006175	Belém	Tubular	Não confinado	45	Barreiras
1500007039	Belém	Tubular	Não confinado	24	Barreiras
1500007603	Belém	Tubular	-	251	Pirabas
1500008027	Belém	Tubular	-	40	Barreiras
1500008225	Belém	Tubular	-	18	Barreiras

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Em relação a condição ou classe do aquífero (Tabela 5), Matta (2002) observou que no município de Belém os poços com perfuração menor que 10 m são classificados como não confinados, esses poços localizam-se nos Depósitos Aluvionares. Segundo o mesmo autor, os Depósitos Aluvionares estão contidos nas coberturas recentes, as quais fazem parte do Sistema Aquífero Barreiras.

Apesar disso a classificação de um aquífero não se limita apenas a profundidade, mas a outras variáveis como a litoestratigrafia e estrutura, as quais estão relacionadas ao conhecimento geológico de uma região, nesse contexto um aquífero livre é aquele onde não há a presença da camada limitante impermeável (camada confinante) em sua face superior (FEITOSA et al., 2008).

Tabela 5 – Classes de aquífero contidas nas unidades geológicas

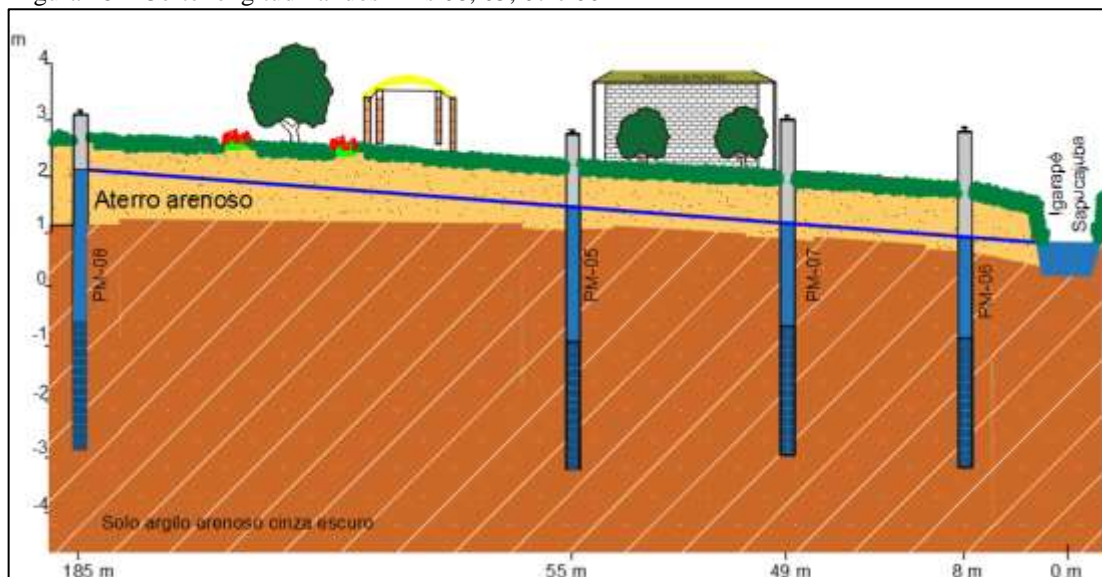
Unidades Hidrogeológicas					
Características	Aluviões	Pós-Barreiras	Barreiras	Pirabas-Superior	Pirabas-Inferior
Profundidade	até 10 m	Até 25 m	25 até 70 m	70 até 180 m	180 até 260 m
Espessura	até 10 m	Até 25 m	70 m	80 m	-
Classificação do aquífero					
	Livre	Livre ou semiconfinado	Semiconfinado ou confinado	Confinado	-

Fonte: Adaptado de Matta (2002).

A litologia das formações Barreiras e Pirabas é discutida por ANA (2018b), Matta (2002) e Penner et al. (2019), sendo que este último pesquisador realiza a caracterização do solo através da condutividade hidráulica em 10 furos de sondagem na Bacia Hidrográfica do Igarapé Sapucajuba, onde o resultado é um perfil litológico composto por areias finas siltosas, argilas e siltes argilosos. A caracterização do Sistema Barreiras é melhor evidenciada no estudo de ANA (2018b), através da perfilagens geofísicas em 39 pontos distribuídos no município de Belém em profundidades correspondentes a formação Barreiras. O estudo permitiu observar que poços contidos no Sistema Barreiras apresentam argila, arenito, areia e o argilito como principais unidades litoestratigráficas, sendo que a argila é o litotipo menos frequente no SAB.

A composição litoestratigráfica dos SAB é semelhante ao que foi observado nos poços de monitoramento, objeto de estudo e poços cadastrados no SIGAS/CPRM, tais como o poço tubular UFPA P4 de codificação SIAGAS n° 1500007603 e o P10_CPRM_BEL/BELÉM de codificação SIAGAS n° 15000075632, conforme Apêndice A. Sendo assim, o aquífero que compreende os 8 poços de monitoramento enquadra-se na classe dos não confinados, onde o seu extrato litológico até 5,5 m de profundidade é composto por areia, silte e argila. A Figura 18 ilustra um corte longitudinal dos PMs 08, 05, 07 e 06.

Figura 18 – Corte longitudinal dos PMs 08, 05, 07 e 06



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

6.1.2 Fluxo de água subterrânea na área de estudo

O fluxo de água subterrânea na área de estudo segue o mesmo conceito de ANA (2018b), a qual faz uma análise da distribuição de carga hidráulica na região metropolitana de Belém,

baseado nas informações de cota do terreno e nível estático de 1.709 poços cadastrados no SIAGAS/CPRM. A superfície freática dos aquíferos não confinados é influenciada pela altitude do terreno, aliais, em regiões de elevada precipitação pluviométrica, a superfície livre dos aquíferos não confinados apresenta a mesma forma da superfície topográfica, ou seja, áreas com elevada topografia apresentam maior potencial de energia sendo denominadas de áreas de recarga, ao passo que regiões de topografia mais baixas possuem menor potencial de energia sendo caracterizadas como áreas de descarga.

Na área de estudo as linhas equipotenciais foram traçadas, a partir dos dados de carga hidráulica dos oito poços de monitoramento e dos pontos de referência, desta forma a diferença de potencial observada na área de estudo direciona os fluxos de água subterrânea das cotas mais elevadas, como aquelas observadas para os PMs 01, 02, 03, 04 e 08 para as cotas mais baixas, que são representadas pelos pontos de referência, Igarapés Tucunduba e Sapucajuba e o Rio Guamá (Figura 19).

Figura 19 – Mapa potenciométrico de setembro de 2021



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

6.2 Regime Pluviométrico na área de estudo

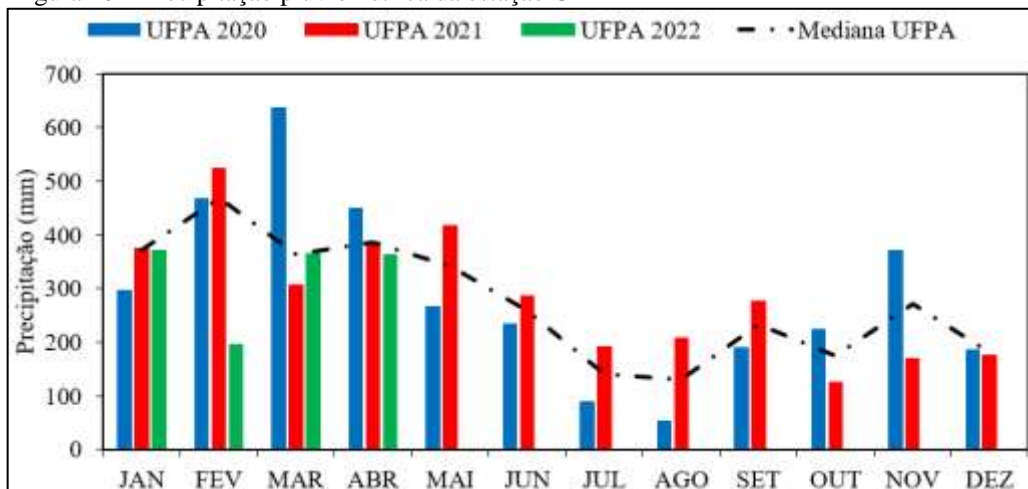
Os dados de precipitação pluviométrica da estação ITV/UFPA são analisados considerando o período de 19/03/20 e 15/04/22, a fim de explicar a relação existente entre a

precipitação e a variação do nível de água do aquífero. Conforme a Figura 20, os anos de 2020 e 2021 apresentam uma precipitação total de 3.462 mm e 3.442 mm, nesta ordem.

O período chuvoso inicia-se em dezembro e vai até maio do ano seguinte, com registros de precipitação máxima nos meses de março 2020 (637,6 mm) e fevereiro de 2021 (524,4 mm). O somatório das precipitações ocorridas no período chuvoso corresponde a 67% e 68% da precipitação total para os anos de 2020 e 2021, nessa ordem.

O período seco inicia-se em junho e termina em novembro. Esses meses são responsáveis por apenas 32% da precipitação total verificada no ano de 2020 e 33% no ano de 2021. O mês de menor precipitação no ano de 2020 é agosto (53 mm) e no ano de 2021 é o mês de outubro (125,4 mm).

Figura 20 – Precipitação pluviométrica da estação UFPA



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

6.3 Análise estatística dos dados de nível de água dos poços de monitoramento

A análise, interpretação e apresentação dos dados de nível de água (discreto e contínuo) são realizados através da estatística descritiva, ou seja, a análise exploratória dos dados que se resume, nesta pesquisa, em algumas medidas, como as medidas de posição (média, quartil 1, mediana, quartil 3 e moda) e dispersão (desvio padrão, variância, coeficiente de variação, mínimo, máximo e amplitude). As medidas de posição, denominadas também de tendência central, são medida que informam sobre a posição típica dos dados. Já as medidas de dispersão indicam o nível de variação de um conjunto de dados em relação à sua média.



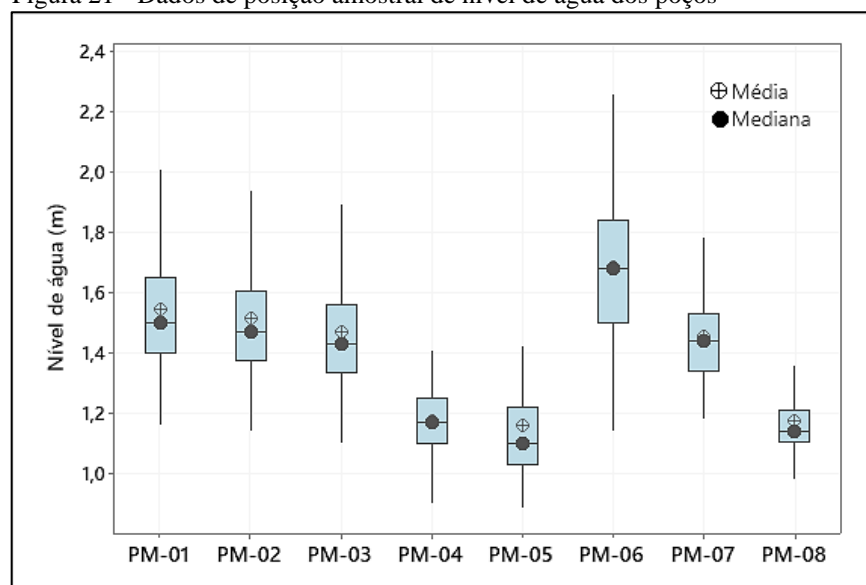
6.3.1 Monitoramento discreto

Com relação às medidas de posição (Figura 21), verifica-se que as médias aritméticas, medianas e modas dos PMs 06 e 05 apresentam dados de nível de água bem diferentes entre si, em contrapartida essas mesmas variáveis estatísticas apresentam valores semelhantes em relação aos PMs 01, 02 e 03. Como a média, mediana e moda são variáveis que estão associadas à distribuição dos dados de nível de água, percebe-se que o conjunto de dados de nível de água do PM-06 apresentam os maiores valores e as maiores oscilações, se comparado ao conjunto de dados do PM-05.

Na distribuição de dados de nível de água, apenas 25% (quartil 1) dos dados do poço de monitoramento 06 são menores ou iguais a 1,50 m, enquanto que no PM-05 grande parte dos dados (75%), quartil 3, são representados por níveis de água menores ou iguais a 1,22 m.

Em Relação aos PMs 01, 02 e 03, observa-se que a curta distância entre eles acaba influenciando nos resultados das variáveis estatísticas (média, moda, mediana, quartil 1 e 2), contribuindo para apresentarem valores de nível de água semelhantes entre si, assim como a distribuição desses dados em torno das médias para cada poço de monitoramento.

Figura 21 - Dados de posição amostral de nível de água dos poços



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Com relação à dispersão amostral dos dados de nível de água dos poços de monitoramento (Tabela 6), observa-se que todos os PMs apresentam valores de desvio padrão bem próximos, estes resultados permitem inferir que os valores de nível de água variam



próximos a suas médias aritméticas. Para esta variável estatística, quanto maior for o valor maior a variabilidade ou as oscilações de nível de água do aquífero.

Quando se compara a dispersão dos valores de nível de água entre os PMs (coeficiente de variação), percebe-se que o PM-04 apresenta o menor grau de dispersão em relação aos demais, este fato pode estar associado à poucas oscilações de nível de água registradas no monitoramento deste poço quando, por exemplo, é comparado ao PM-05, que apresenta a maior variabilidade. Apesar do PM-05 exibir o maior grau de dispersão que os demais poços de monitoramento, seus valores da amplitude, mínimo e máximo são menores que os do PM-06, uma vez que este poço de monitoramento expôs as maiores oscilações.

Poços localizados próximos as áreas de drenagem apresentam as menores variações do nível freático em relação aos poços localizados nas regiões mais afastadas (BAUM; MANCUSO; FRITZEN, 2018b). Todavia o PM-06 foge a essa regra ao apresentar a maior amplitude em relação aos demais poços. Este comportamento pode estar sendo influenciado pelo efeito de maré que ocorre no Igarapé Sapucajuba, o qual não está compreendido nos objetivos dessa pesquisa, sendo uma hipótese a ser discutidas em trabalhos futuros.

Tabela 6 – Dados de dispersão amostral de nível de água dos poços

PM	Desvio padrão (m)	Coefficiente de variação (%)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Amplitude (m)
01	0,23	14,68	1,16	2,17	1,01
02	0,22	14,24	1,14	2,11	0,97
03	0,21	14,26	1,10	2,04	0,93
04	0,10	08,91	0,90	1,41	0,51
05	0,20	17,58	0,89	1,73	0,85
06	0,25	14,63	1,14	2,26	1,12
07	0,15	10,39	1,18	1,86	0,68
08	0,12	10,46	0,94	1,53	0,59

Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

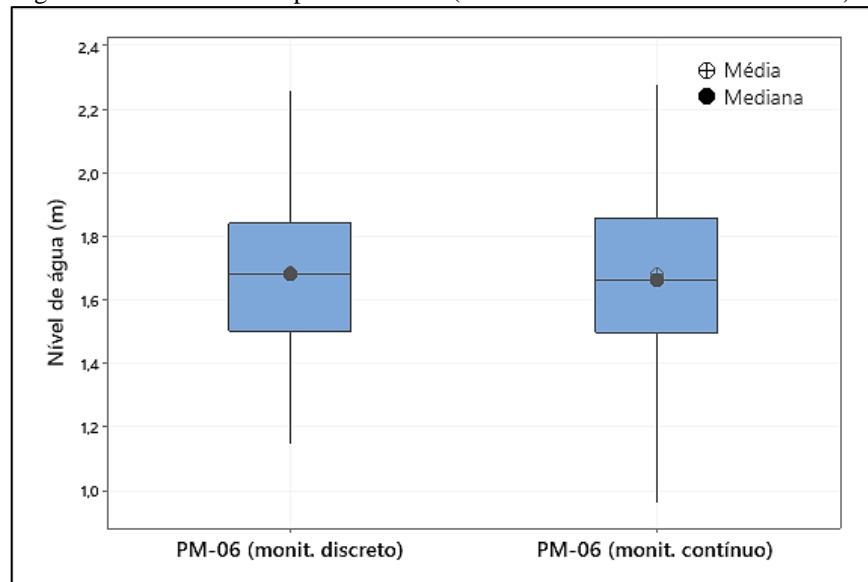
6.3.2 Monitoramento contínuo

Ao se comparar as variáveis estatísticas a partir dos dados discretos de nível de água do PM-06 com os dados contínuos de nível de água deste mesmo poço de monitoramento (Figura 22), nota-se que a média, quartil 1 e mediana apresentam os mesmos valores, ao mesmo tempo que o quartil 3 e a moda apresentam resultados diferentes. Estes valores implicam na distorção da distribuição de dados do PM-06, ou seja, no monitoramento contínuo essa distorção posiciona-se no sentido das maiores oscilações freáticas. Este fato pode estar associado ao



encurtamento da frequência de medição do nível de água ao relacionar os dois métodos de monitoramento adotados para o PM-06. Além disso, verifica-se que o monitoramento contínuo registrou dados de oscilação menores que 1 m, esse registro não foi verificado no monitoramento discreto.

Figura 22 – Dados de NA para o PM-06 (monitoramentos discreto e contínuo)



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Ao relacionar os resultados da Tabela 6, que se referem aos dados contínuos de monitoramento do nível de água do PM-06, com os dados discretos deste mesmo PM, apresentados na Tabela 7, observa-se que somente o desvio padrão ficou constante.

No monitoramento contínuo verifica-se que os dados de nível de água apresentam-se mais dispersos que aqueles do monitoramento discreto, além disso, os valores do mínimo, máximo e amplitude mostram que o monitoramento contínuo registrou maiores oscilações de nível de água se comparado ao monitoramento discreto.

Tabela 7 – Dados de dispersão amostral de nível de água – monitoramento contínuo

Desvio padrão (m)	Coefficiente de variação (%)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Amplitude (m)
0,26	15,52	0,63	2,28	1,65

Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Portanto ao ser comparado o monitoramento discreto com o contínuo, vê-se que há maior sensibilidade na variação dos níveis de água quando há o encurtamento da frequência de



medição, sendo possível identificar variações imperceptíveis com o monitoramento discreto, com intervalo de tempo de 7 dias.

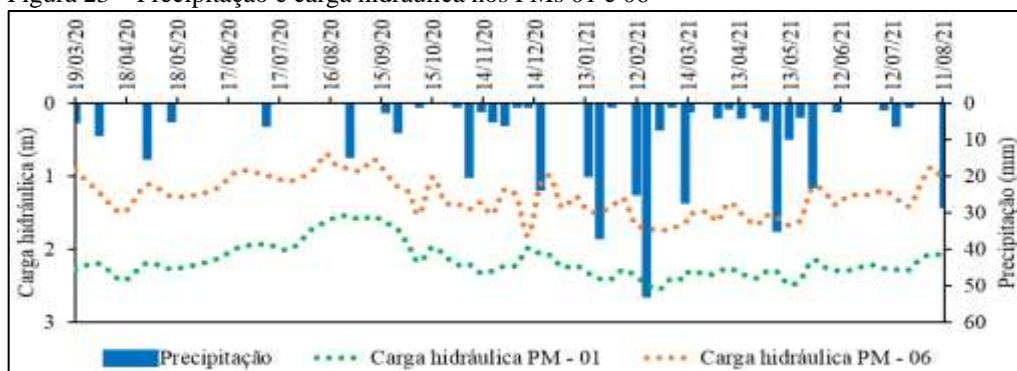
Logo o estabelecimento de um intervalo de observação mais curto pode apresentar cenários diferentes para o comportamento das oscilações freáticas, que envolve a identificação de picos isolados de nível de água, os quais não são perceptíveis pelo monitoramento discreto. Como os níveis de água se elevam com mais frequência e intensidade no período chuvoso, possivelmente os cenários com dados do monitoramento discreto e contínuo se tornam mais discrepantes. Portanto o monitoramento contínuo com frequência de medição a cada 15 minutos torna-se mais adequado a estimativas de recarga na área de estudo.

6.4 Relação entre flutuação do nível de água e a precipitação

A Figura 23 contém dados discretos da estação UFPA, onde é realizado um recorte para coincidir com o período de coleta de dados de carga hidráulica na área de estudo. Os dados de carga hidráulica são coletados no período entre 19/03/2020 e 11/08/2021, a cada 15 dias. Desta forma a precipitação de chuva é relacionada à carga hidráulica dos poços de monitoramento 01 e 06 (esses poços foram escolhidos, pois estão afastados entre si e localizados em cotas diferentes). As oscilações de carga hidráulica dos PMs 01 e 06 indicam que os níveis de água desses poços respondem bem a precipitação.

No período de 18/05/20 até 16/08/20, observam-se precipitações menos intensas e isoladas em relação a 2021, que acabam provocando o declínio do nível de água desses poços de monitoramento. Em contrapartida, os níveis de água dos PMs 01 e 06 começam a subir a partir do período onde os eventos de precipitação tornam-se mais frequentes e intensos, este período está compreendido entre 14/11/20 até 13/05/21. A partir de 12/06/21 os eventos voltam a ser menos intensos, ocasionando a diminuição dos níveis de água dos 2 PMs selecionados.

Figura 23 – Precipitação e carga hidráulica nos PMs 01 e 06



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.



Os coeficientes de determinação, referentes a cada poço de monitoramento, a partir dos dados de precipitação e variação do nível de água, para os 8 poços de monitoramento, mostraram-se diferentes (Tabela 8). A determinação dos valores contidos na Tabela 8 considera os dados de monitoramento discretos, contínuos e os períodos onde há a variação do nível de água associada a precipitação pluviométrica. Desta forma, a relação entre essas duas variáveis, apresenta um coeficiente de determinação (R^2) entre 0,1% e 69%. Os PMs 01, 02 e 03 apresentam um R^2 próximo de 16%, a semelhança entre os valores dos PMs está condicionada à proximidade entre esses poços de monitoramento. O PM-04 foi o poço onde a variação do nível de água está menos relacionada a precipitação pluviométrica, apenas 0,1% em contrapartida o PM-08 apresentou forte relação entre a precipitação e a variação do nível de água (69%). Em média, a correlação entre a precipitação e flutuação do nível de água no aquífero é 22,49%. Comparando-se os valores de R^2 entre os dados de monitoramento discreto e contínuo, do PM-06, verifica-se que a relação entre a precipitação e a flutuação do nível de água foi mais forte no monitoramento contínuo, visto que a média do seu coeficiente de determinação foi de 33,29% (um valor 2,7 vezes maior que o monitoramento discreto).

Dambrós (2011) determinou a correlação através da regressão linear obtida entre o nível de água subterrâneo, coletado por monitoramento contínuo, e a precipitação pluviométrica para instantes onde havia eventos de variação do nível de água correspondentes ao aumento da precipitação no período. A correlação média encontrada por este pesquisador foi de 80%.

Portanto se observa, através da Figura 23 e Tabela 8, que há uma associação entre a precipitação e a flutuação do nível de água do aquífero. Apesar disso as oscilações podem estar sendo influenciadas por outras variáveis hidrológicas, como a evapotranspiração e o efeito de maré, os quais serão discutidos em trabalhos futuros.

Tabela 8 – Coeficiente de determinação dos PMs

PM	Coeficiente de determinação percentual R^2 (%)	Tipo de monitoramento
01	16,49	Discreto
02	16,29	Discreto
03	16,59	Discreto
04	0,10	Discreto
05	3,07	Discreto
06	9,05	Discreto
06	33,29	Contínuo
07	38,49	Discreto
08	69,06	Discreto

Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.



6.5 Análise das oscilações de nível de água

As Figuras desta seção ilustram as oscilações do nível de água e os eventos de precipitação para um período compreendido entre 19/03/2020 até 15/04/2022. Os dados de nível de água são representados pela linha pontilhada na cor alaranjada, os dados de precipitação pluviométrica da estação UFPA são representados pelas barras em azul localizado na porção superior do gráfico.

Com relação à coleta dos dados de nível de água dos poços de monitoramento (PMs 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08), ressalta-se que foram realizadas 757 medições de nível de água utilizando medidor de nível manual, com frequência quinzenal até a data 06/08/2020, quando passou a ser semanal. O encurtamento da frequência de medição está relacionado a melhoria na qualidade dos dados de nível de água analisados (maior detalhamento). Durante as coletas de dados, foram enfrentadas limitações impostas pela pandemia do COVID-19 e o ingresso de novos alunos de iniciação científica para esse projeto.

6.5.1 Monitoramento discreto

Nas Figuras 24, 25, 26 e 27 são esboçadas as oscilações freáticas dos PM-01, PM-02, PM-03 e PM-05. Esses 4 poços exibem um comportamento semelhante em relação a variação de nível freático. No período entre 02 e 16/04/20, uma precipitação acumulada de 218,6 mm foi suficiente para elevar o nível de água dos 4 PMs descritos acima em 0,23 m. Apesar disso, após o dia 16/04/20 até o dia 10/09/20, inicia-se um longo período de recessão, mesmo havendo registros de precipitação e períodos curtos de elevação do nível de água.

Durante o longo período de recessão, os PMs 01, 02 e 03 apresentam dois instantes de elevação do nível de água entre os dias 30/04/20 e 28/05/20 e 09/07/20 e 23/07/20, onde tais elevações são de 0,02 m nos dois instantes, sendo ocasionadas por precipitações de 247,4 mm e 68 mm, nesta ordem. O PM-05 apresentou três elevações entre os dias 30/04/20 e 14/05/20, 28/05/20 e 11/06/20 e 09/07/20 e 23/07/20, de 0,03 m, 0,02 m e 0,11 m, nesta ordem, ocasionadas por precipitações de 136 mm, 128,4 mm e 68 mm, respectivamente.

No período entre 15/10/20 e 19/11/20 a elevação do nível freático de 0,27 m (PM-05) e 0,33 m (PMs 01, 02 e 03) respondeu a uma precipitação acumulada de 374,4 mm. Entre os dias 10/12/20 e 31/03/21, os níveis de água dos 4 PMs apresentam uma tendência de elevação do nível de água, mesmo havendo declínios curtos nesse trajeto, a precipitação neste intervalo

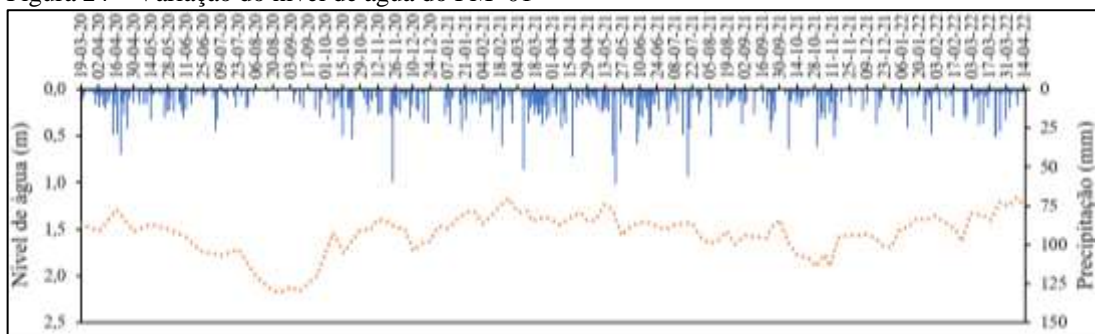


mostra-se frequente com valor acumulado de 138,4 mm, o nível de água oscilou neste período de 0,45 m para os PMs 01, 02, 03 e 05.

Entre os dias 31/03/21 e 05/11/21 os níveis de água dos PMs 01, 02, 03 e 05 apresentam uma tendência de declínio, que é marcado por pequenas elevações do nível freático e chuvas mais frequentes, como aquelas registradas nos dias 18/04/21 (60,8 mm) e 11/06/2021 (55,4 mm).

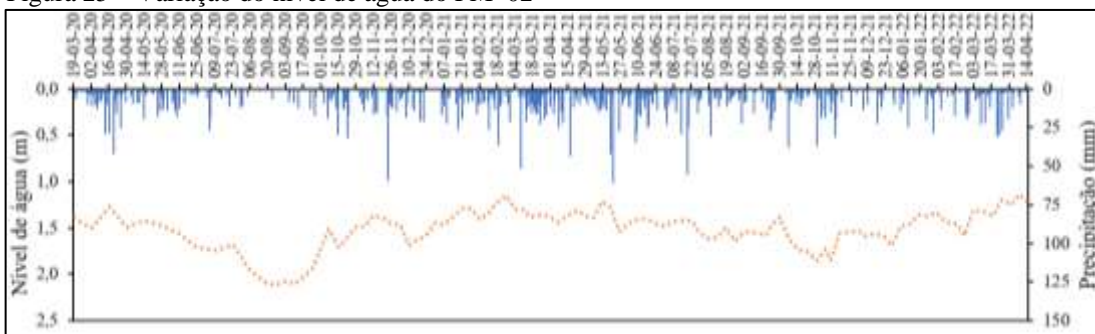
Entre os dias 31/03/21 e 05/11/21, o poço que menos respondeu as precipitações foi o PM-05. De 05/11/21 até 15/04/22 os níveis de água dos PMs 01, 02, 03 e 05 tendem a subir novamente e são marcados por diversos momentos de elevações mais curtas, por exemplo, a elevação ocorrida entre os dias 09 e 16/11/21, que provoca uma elevação do nível de água de 0,31 m nos PMs 01, 02, e 03, é ocasionada por uma precipitação de 48,4 mm e no intervalo entre 28/12/22 e 11/01/22, a precipitação de 123,4 mm provoca uma ascensão do nível freático de 0,45 m no PM-05.

Figura 24 – Variação do nível de água do PM-01



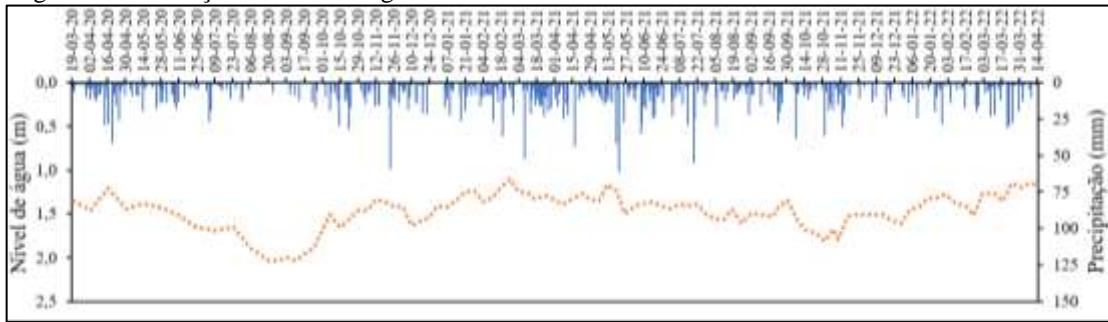
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 25 – Variação do nível de água do PM-02



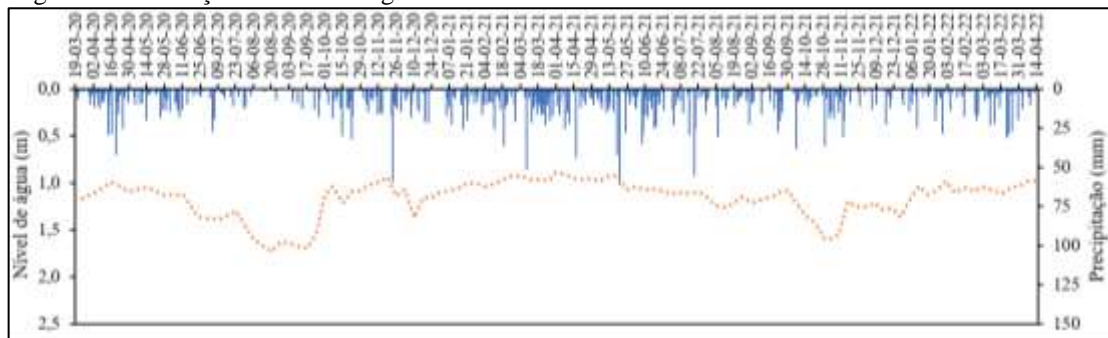
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 26 – Variação do nível de água do PM-03



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 27 – Variação do nível de água do PM-05



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Os poços de monitoramento 04 e 08, apresentam comportamento semelhante para a oscilação do nível freático, conforme Figura 28 e Figura 29, visto que exibem as menores oscilações do nível de água em relação aos demais PMs, diferenciando-se apenas no período compreendido entre 16/04/20 e 17/09/20, onde o PM-08 apresenta um declínio e uma elevação mais acentuados, semelhante ao que foi visto nos PMs 01, 02 e 03. O PM-08 registra oscilações de nível de água curtas no período de 30/12/20 até 30/09/21, as quais são responsáveis por variações no nível de água entre 0,08 e 0,14 m. Neste período observa-se que a precipitação é frequente e mais intensa, como nos dias 09/02/21 (51,6 mm), 17/03/21 (43,4 mm), 18/04/21 (60,8 mm) e 11/06/21 (55,4 mm). Este poço apresenta ascensão do nível de água que se prolonga entre os dias 17/09/20 e 03/12/20, a qual é marcada por precipitação acumulada de 736,6 mm e elevação do nível freático de 0,46 m, esse comportamento foi diferente do que se observou nos PMs 01, 02, 03, 05 e 04, para o mesmo período analisado, onde houve elevações e declínios curtos do nível de água.

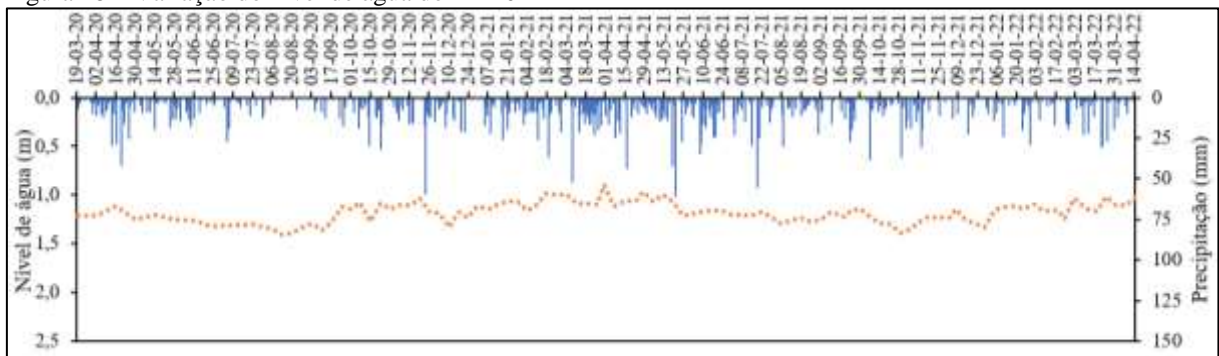
O PM-04 apresenta os declínios e ascensões mais curtos de nível freático que os demais poços de monitoramento. Entre 16/04/20 e 20/08/20, os níveis de água começam a declinar suavemente em relação aos demais PMs. O declínio ocorrido nesse intervalo apresenta ascensões curtas do nível de água, por exemplo, entre os dias 30/04/20 e 14/05/20 há uma



elevação do nível de água de 0,05 m que foi ocasionada por uma precipitação de 136 mm e a do intervalo entre 23/06/20 e 23/07/20, que elevou o nível de água em 0,04 m e foi provocada por uma precipitação de 194,6 mm. Estas oscilações passam a ser maiores e frequentes a partir de 10/09/20, quando começa a haver respostas mais rápidas do nível de água aos eventos de precipitação. A maior elevação do nível de água registrada neste poço ocorre entre 20/08/20 e 07/10/20 (0,33 m) sendo a precipitação associada a este período de 190 mm.

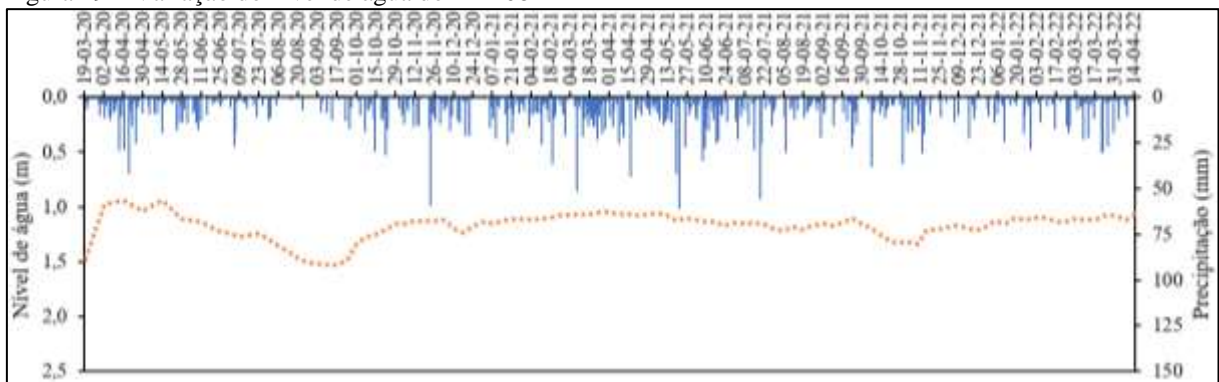
A partir do dia 12/05/21 até o dia 04/08/21 o nível de água do PM-04 apresenta uma tendência de declínio acompanhado por alguns instantes de elevações discretas do nível de água com precipitação mais frequente. Neste intervalo, a precipitação acumulada foi de 711,6 mm, com precipitação mais intensa nos dias 18/04/21 (60,8 mm) e 11/06/21 (55,4 mm). Entre os dias 29/10/21 e 01/04/22 os níveis de água voltam a subir e são marcados por duas oscilações mais significativas: de 05/11/21 até 07/12/21 e 28/12/21 até 01/02/22 que provocam ascensões de 0,21 m (219 mm de chuva) e 0,19 m (400 mm de chuva), respectivamente.

Figura 28 – Variação do nível de água do PM-04



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 29 – Variação do nível de água do PM-08



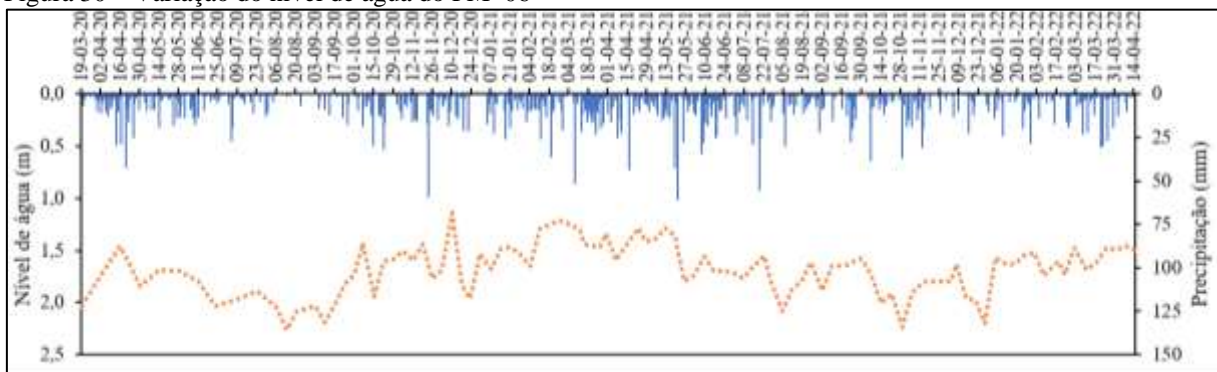
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.



Diferente do que foi visto nos PMs 04 e 08, o PM-06 apresenta as maiores oscilações do nível freático, conforme Figura 30, por exemplo, a elevação entre os dias 10/09/20 e 07/10/20 provocaram uma elevação de 0,76 m no nível de água do poço de monitoramento, onde essa elevação foi provocada por uma precipitação acumulada de 266,6 mm. Outro instante de considerável elevação do nível de água do PM-06 ocorre entre os dias 29/10/21 e 07/12/21, o nível de água deste poço ascendeu 0,59 m, a partir de uma precipitação de 261,8 mm.

De 16/04/20 até 10/09/20 tal poço apresenta um declínio dos níveis de água, o qual é marcado por diversos momentos de ascensão mais curta do nível freático, como aquelas observadas nos dias 14/05/20, 23/07/20 e 30/09/20. Após o dia 30/09/20 os níveis de água se elevam e são marcados por diversos episódios de ascensão do nível de água, onde essas elevações são maiores que aquelas observadas nos demais poços para o mesmo período. As precipitações ocorridas entre os dias 10/09/20 e 07/10/20 e 26/11/20 e 10/12/20, elevam o nível de água em 0,76 m e 0,47 m, respectivamente, e apresentam valores acumulados de chuva, neste período, de 266,6 mm e 65 mm, nesta ordem.

Figura 30 – Variação do nível de água do PM-06



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

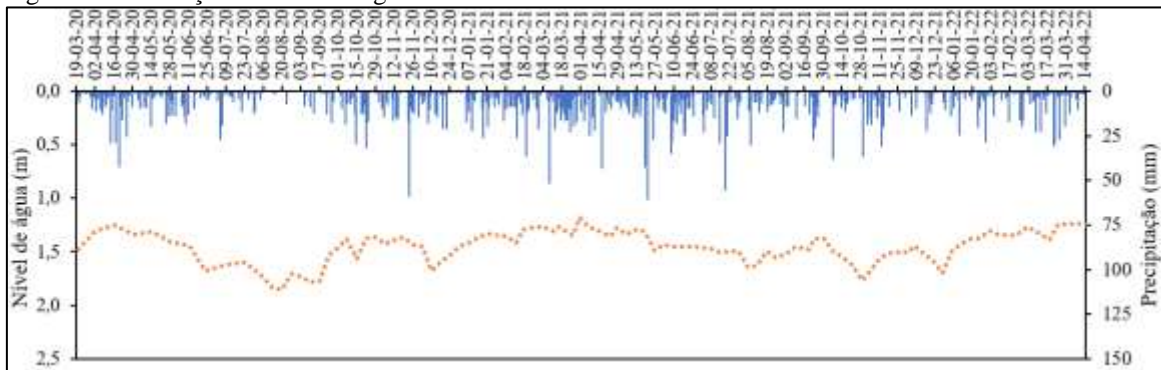
O comportamento do nível de água do PM-07 (Figura 31) é semelhante ao que estar sendo visto nos demais poços, a exceção daqueles onde as variações são curtas (PM-04 e PM08). Entre 16/04/20 e 20/08/20, este poço de monitoramento apresenta uma tendência de queda no nível de água, apesar dessa queda ser acompanhada por elevações curtas do nível de água, observadas nos dias 14/05/20 (elevação de 0,03 m provocada por precipitação de 136 mm) e 11/06/20 (ascensão de 0,1 m provocada por precipitação de 194,6 mm).

A partir do dia 20/08/20, os níveis de água voltam a subir até o dia 19/11/20. Entre os dias 17/09/20 e 07/10/20 o nível de água subiu 0,38 m por ocasião da precipitação de 236,6 m e entre 15/10/20 e 22/10/20 a precipitação de 51,2 mm provocou uma elevação de 0,19 m. Entre

os dias 10/12/20 e 31/03/21 o nível de água sobe sendo marcado por quatro instantes de ascensão do nível de água, a mais significativa neste período foi a do intervalo entre 10/12/20 e 28/01/21, a qual provocou uma elevação de 0,35 m a partir de uma precipitação acumulada neste período de 526,2 mm.

Após o dia 31/03/21 o nível de água do PM-07 começa a declinar, sendo que essa queda cessa no dia 11/08/21. Este período é marcado por precipitações mais intensas e frequentes, que aquelas observadas no intervalo entre 10/12/20 até 28/01/21, as quais não ocasionaram a ascensão contínua do nível de água, todavia se observa neste período apenas pequenas oscilações do nível freático, como aquelas observadas nos dias 28/04/21, 12/05/21 e 09/06/21. Entre os dias 05/11/21 até 15/04/22 a ascensão do nível de água do poço de monitoramento começa a subir continuamente, sendo marcada por 4 instantes de oscilação, tais como 05/11/21 e 07/12/21, 28/12/21 e 08/02/22, 23/02/22 e 02/03/22 e 25/03/22 e 25/03/22, onde o primeiro e segundo instantes proporcionaram as maiores oscilações (0,34 m e 0,36 m, nesta ordem), que foram provocadas por precipitações de 219 mm e 427 mm, respectivamente.

Figura 31 – Variação do nível de água do PM-07



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Os dados de nível de água do monitoramento manual, provenientes dos 8 PMs, mostram que as oscilações freáticas ocorrem de modo diferente e são influenciadas pela precipitação pluviométrica em diversos instantes do período do monitoramento, a diferença entre as oscilações freáticas foi observada nas seções 6.3 e 6.5.

Essa diferença pode ser melhor visualizada ao comparar as Figuras 29 e 30 entre si, todavia observa-se que as oscilações podem ser semelhantes entre poços, como é o caso dos PMs 01, 02 e 03, os quais estão localizados a menos de 7 m de distância um ao outro. Utilizando os dados discretos do monitoramento, foi observado que pode existir um atraso entre a



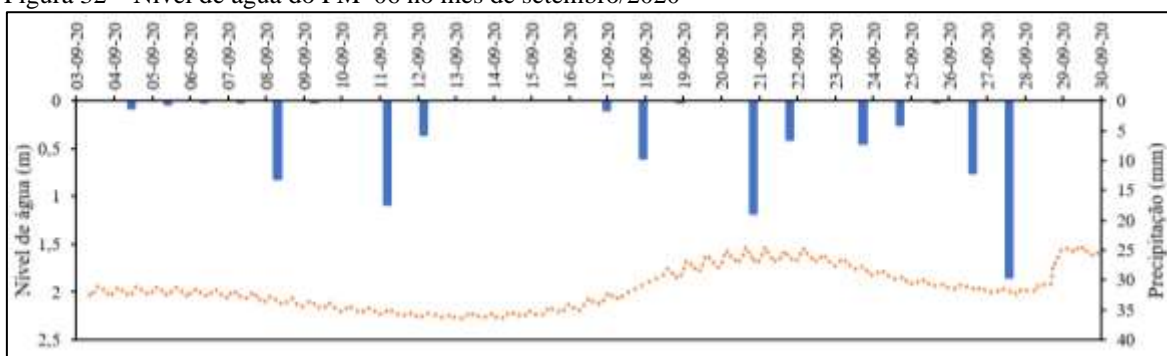
precipitação e a elevação do nível de água, todavia esta hipótese pode ser melhor evidenciada em poços com monitoramento contínuo, como é o caso do PM-06.

6.5.2 Monitoramento contínuo

No mês de setembro/20, o nível de água do PM-06 eleva-se continuamente sem observar oscilações curtas neste período (Figura 30), todavia a partir dos dados de monitoramento automático, para esse mesmo período, observa-se que este PM apresenta dois períodos de recessão (Figura 32).

Entre 15 e 20/09/20 este poço de monitoramento apresenta uma elevação do nível de água de 0,58 m, a qual foi provocada por uma precipitação de 93,2 mm e entre os dias 28 e 29/09/20 o nível de água deste poço eleva-se em 0,33 m sendo ocasionado por uma precipitação acumulada de 120,2 mm.

Figura 32 – Nível de água do PM-06 no mês de setembro/2020

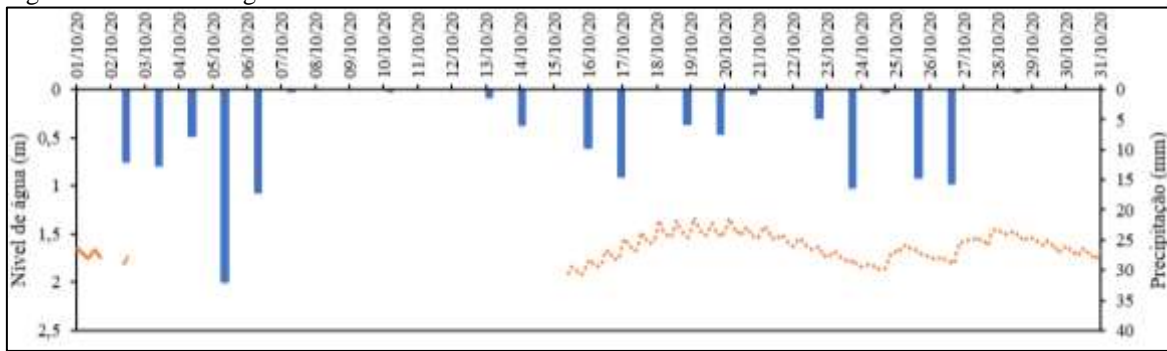


Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

O monitoramento contínuo do mês de outubro/20 (Figura 33) apresenta 3 variações de nível de água relacionadas a precipitação. As elevações entre os dias 24 e 25/10/20, 26 e 27/10/20 e 27 e 28/10/20 são de 0,2 m, 0,2 m e 0,15 m, nesta ordem, e são provocadas por precipitações de 24,6 mm, 26,4 mm e 15,6 mm, respectivamente. O período compreendido entre os dias 15 e 31/10/20 apresenta um comportamento diferente para o nível de água, quando se compara a Figura 30 com a Figura 33. O PM-06 a partir dos dados de monitoramento discreto descreve apenas uma elevação do nível de água neste período, todavia este mesmo poço com os dados do monitoramento contínuo apresenta 3 elevações de nível de água.



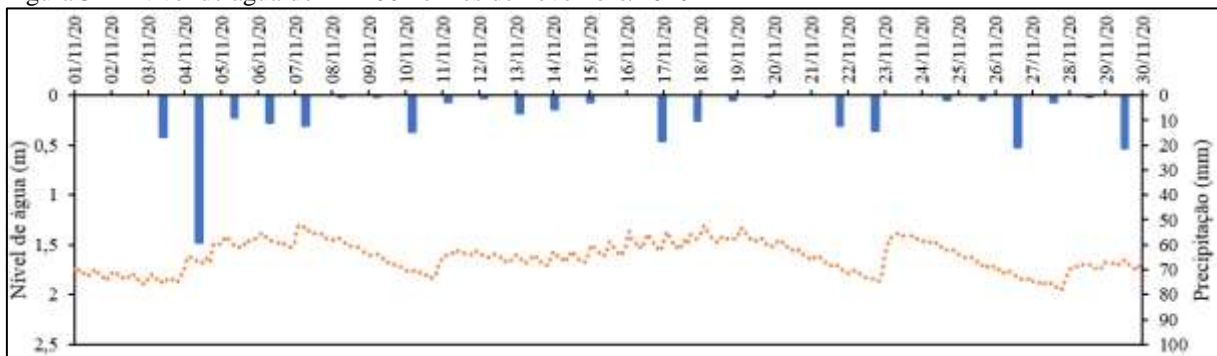
Figura 33 – Nível de água do PM-06 no mês de outubro/2020



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

O mês de novembro/20 (Figura 34) registra 5 elevações de nível de água que estão situadas entre os dias 4 e 7/10/20, 10 e 11/10/20, 13 e 18/11/20, 22 e 23/11/20 e 27 e 28/11/20, tais elevações provocaram um aumento no nível de água de 0,53 m, 0,24 m, 0,29 m, 0,42 m e 0,30 m, nesta ordem, onde as precipitações acumuladas responsáveis por tais elevações foram de 170,4 mm, 23,8 m, 59,8 m, 28,4 m e 31,4 m, respectivamente. No monitoramento discreto do PM-06 é observado duas ascensões do nível de água em novembro (Figura 30), todavia, no monitoramento contínuo há mais elevações do nível de água neste poço (4 elevações).

Figura 34 – Nível de água do PM-06 no mês de novembro/2020

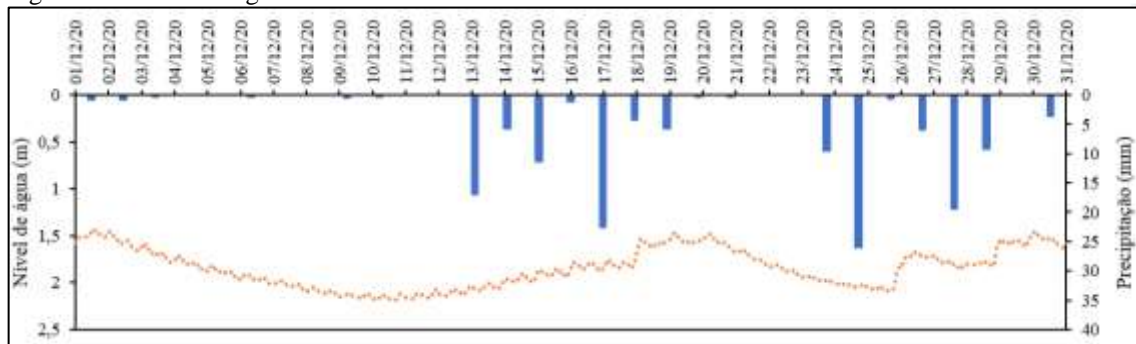


Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

No mês de dezembro/20 (Figura 35), entre os dias 01 até 12, não há precipitação necessária para elevar o nível de água do PM-06. Entre os dias 11 e 19/12/20 ocorre a elevação do nível de água deste poço de monitoramento, que é 0,7 m, sendo provocada por uma precipitação de 92,4 mm, posteriormente ocorre mais duas elevações de nível de água, uma entre os dias 25 e 26/12/20 e a outra no dia 28/12/20, nesses dias o nível de água variou 0,4 m e 0,3 m, na devida ordem. Na Figura 30, o mês de dezembro apresenta duas elevações do nível freático do PM-06, apesar disso a Figura 35 mostra que no monitoramento contínuo esse poço de monitoramento apresentou três ascensões do nível de água.



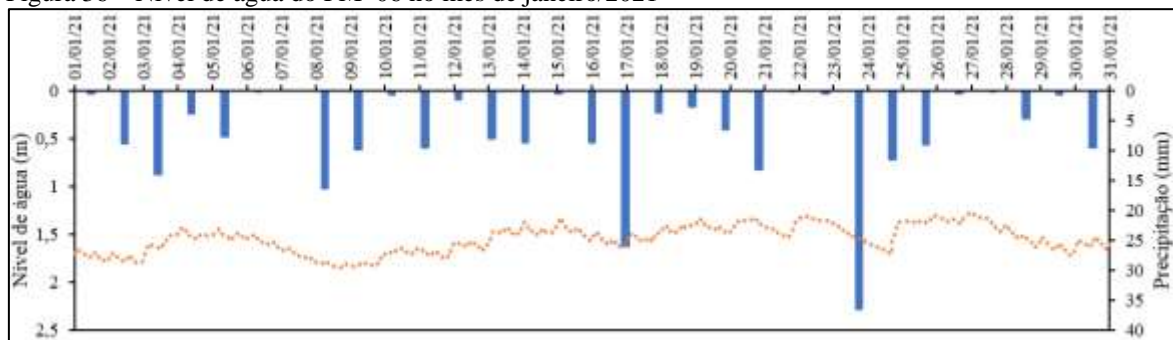
Figura 35 – Nível de água do PM-06 no mês de dezembro/2020



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Na Figura 36, esboça-se uma oscilação de nível de água mais frequente, com seis ascensões ao longo do mês de janeiro/21. A menor ascensão do nível freático (0,07 m) ocorre entre os dias 04 e 05/01/21, a qual é provocada por uma precipitação de 15 mm. A maior ascensão é observada entre os dias 09 e 15/01/21 foi de 0,44 m sendo provocada por uma precipitação de 70,8 mm. O registro de elevações do nível de água do PM-06, observados no monitoramento discreto, são menos frequentes que aqueles observados no monitoramento contínuo (Figura 36), pois se observa que na Figura 36 há cinco registros a mais de elevação do nível de água.

Figura 36 – Nível de água do PM-06 no mês de janeiro/2021



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

O mês de fevereiro/21 (Figura 30) é marcado pela ascensão do nível freático, compreendida entre os dias 03 até 17/02/21, apesar disso, observa-se no monitoramento contínuo que este possui apresenta um declínio constante entre os dias 02 e 09/02/21, quando começa a elevar-se, conforme Figura 37. Entre os dias 9 e 11/02/21 ocorre uma elevação do nível de água no valor de 0,53 m, sob influência de uma precipitação igual a 74 mm.

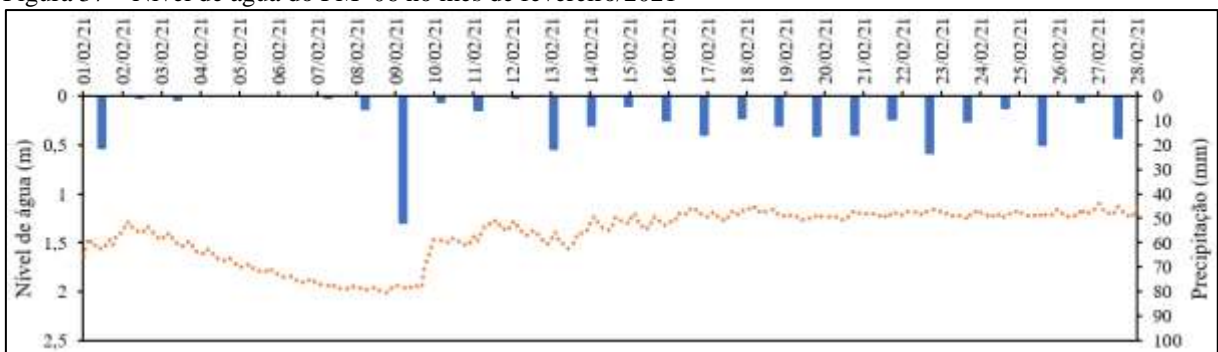
As oscilações de nível de água tornam-se mais frequente nos dias posteriores a 10/02/21. Entre os dias 11 e 13/02/21, o nível de água entra em declínio, todavia logo após o dia 13/02/21 o nível tende a elevar-se até o dia 16/02/21, sendo essa ascensão igual a 0,35 m, a qual é



provocada por uma precipitação de 105,6 mm. Entre os dias 16 e 28/02/21 o nível de água apresenta uma tendência de estabilização, mesmo havendo registros diários de precipitação na área de estudo de diferentes magnitudes.

No monitoramento discreto (Figura 30) o PM-06 apresenta a mesma tendência a estabilização do nível de água que foi observada na Figura 37. Todavia o longo período de recessão, observado entre os dias 02 e 09/02/21 (Figura 37) não foi observado no monitoramento com dados discretos. Na Figura 30, o monitoramento discreto registra uma ascensão do nível de água, ao passo que a Figura 37 há registro de 18 ascensões.

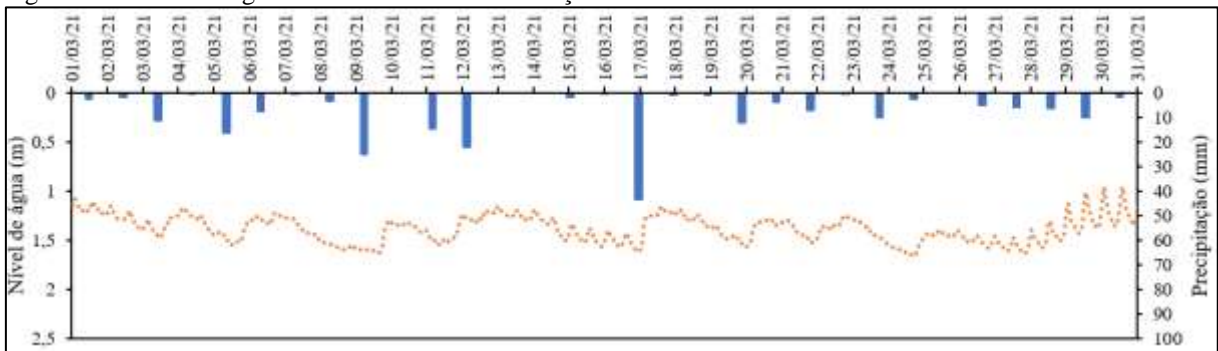
Figura 37 – Nível de água do PM-06 no mês de fevereiro/2021



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

O mês de março/21 é marcado por diversas assinaturas de elevação do nível de água, como pode ser observado na Figura 38. No intervalo entre os dias 3 até 12, observam-se 6 elevações, onde a menor elevação ocorre no dia 06/03/20 no valor de 0,1 m e a maior ocorre no dia 17/03/20 no valor de 0,4 m, sendo que a menor e a menor elevações são ocasionadas por uma precipitação de 12,4 m e 61,4 m, por essa ordem. No monitoramento discreto para o mês de março (Figura 38), é identificada uma ascensão do nível freático, mas com os dados do monitoramento contínuo são registradas 10 ascensões.

Figura 38 – Nível de água do PM-06 no mês de março/2021



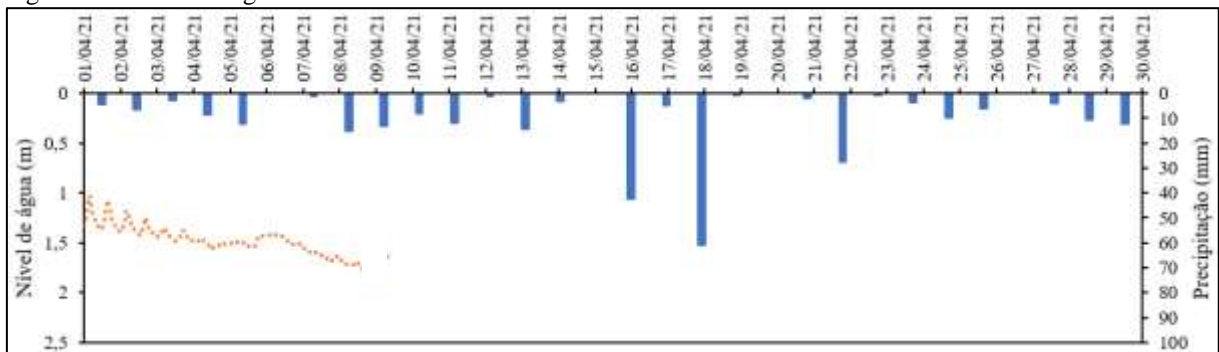
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.



O mês de abril/21 (Figura 39) apresenta o monitoramento incompleto, pois este monitoramento vai até o dia 09/04/21. Apesar disso no dia 05/04/21, há uma variação discreta do nível de água (0,05 m) que é ocasionada por precipitações ocorridas nos dias 4 (10 mm) e 5 (13,2 mm). No dia 8 volta a ter eventos de precipitação, acarretando uma possível elevação do nível de água, todavia não é possível afirmar, uma vez que o monitoramento foi interrompido no dia posterior.

Assim como na Figura 39 há uma tendência de declínio do nível de água compreendida entre os dias 01 a 09/04/21, a Figura 30 também apresenta essa tendência neste mesmo intervalo de tempo. Todavia não se observa na Figura 30 a ascensão do nível de água que ocorre no dia 05/04/21, conforme Figura 39. Em relação ao mês de abril, o número de registro de ascensão do nível freático foi igual entre os monitoramentos discreto e contínuo.

Figura 39 – Nível de água do PM-06 no mês de abril/2021



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

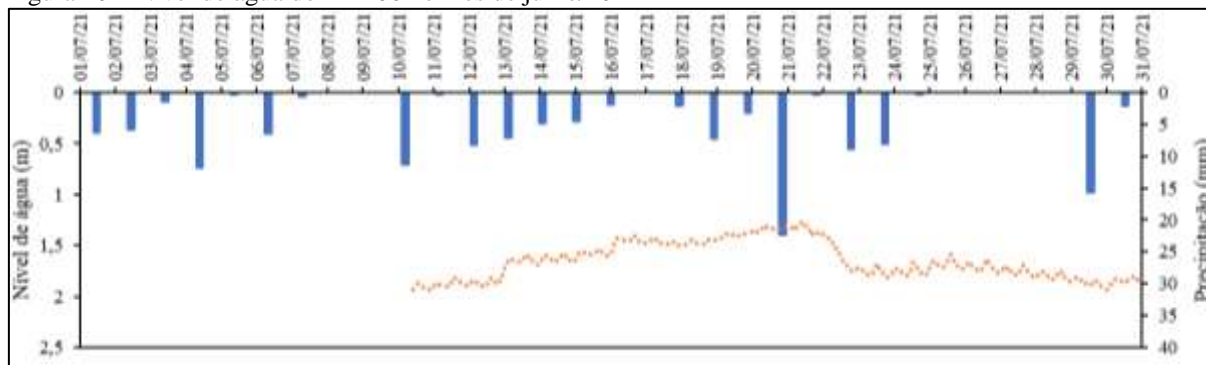
O mês de julho/21 exibe o retorno do monitoramento automático do nível de água do PM-06, Conforme Figura 40. O registro inicia-se no dia 10 apresentando uma leve ascensão do nível de água do aquífero freático acompanhada por dois picos curtos nos dias 13 e 16/07/21, correspondentes a uma variação do nível de água de 0,2 m. Entre os dias 21 e 22/07/21, observa-se um comportamento incomum do nível de água do poço de monitoramento, uma vez que esse nível começa a declinar mesmo tendo um evento de precipitação ocorrido no dia 21/07/21. Entre os dias 23 e 31/07/21, observa-se eventos de precipitação pouco frequentes, que ocorrem apenas nos dias 22/07/21 (8 mm), 23/07/21 (8,8 mm) e 29/07/21 (15,6 mm) e não são suficientes para elevar o nível de água deste poço de monitoramento.

Na Figura 30, observa-se que o nível de água tende a subir entre os dias 10 e 21/07/21, porém a partir do dia 22/07/21 até o final do mês de julho as precipitações registradas não



ocasionam efeito sobre os níveis de água. Tal comportamento foi observado também na Figura 40, ou seja, os monitoramentos discreto e contínuo são semelhantes no mês de julho.

Figura 40 – Nível de água do PM-06 no mês de julho/2021

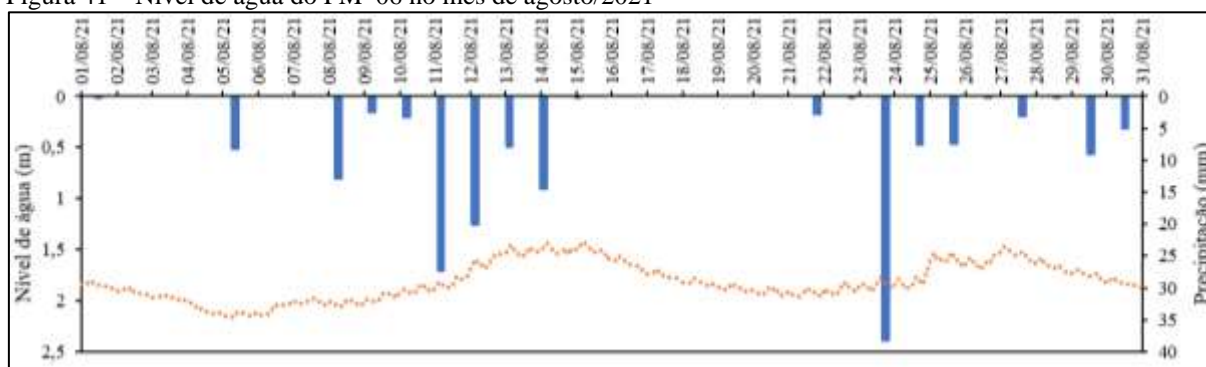


Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

No mês de agosto/21 (Figura 41), observam-se flutuações de nível de água mais espaçadas com oscilações que duram, em média, até 11 dias, como pode ser visto no intervalo entre 5 e 15/08/21 e entre 15 e 27/08/21, as elevações corresponde a 0,7 m e 0,45 m e são ocasionadas por precipitações de 108,8 m e 75,8 mm, na devida ordem.

Os dados do monitoramento discreto (Figura 30) mostram uma elevação freática entre os dias 05 e 25/08/21, todavia não foi registrado a recessão ocorrida entre os dias 15 e 20/08/21, a qual foi registrada no monitoramento contínuo (Figura 41). Enquanto a Figura 30 registra apenas uma ascensão do nível freático neste mês, a Figura 41 registra duas elevações do nível de água.

Figura 41 – Nível de água do PM-06 no mês de agosto/2021



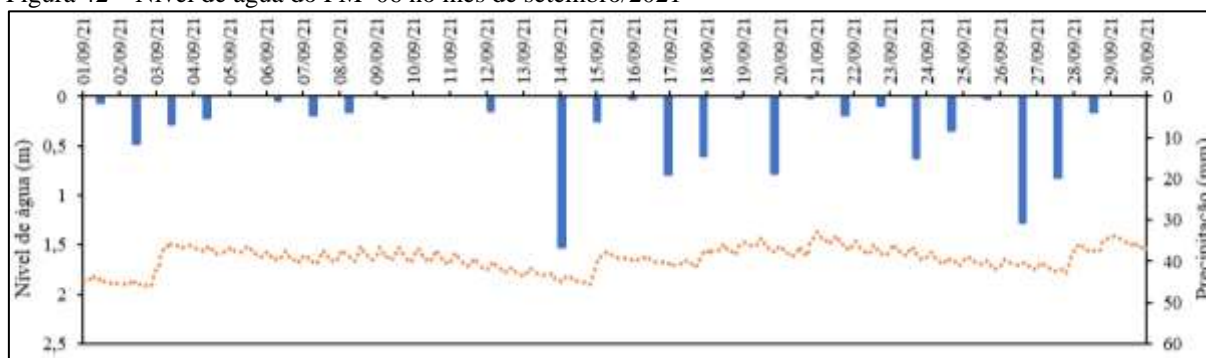
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

O mês de setembro/21 (Figura 42) apresenta uma variação do nível de água entre os dias 2 e 3/09/21 de 0,3 m, correspondente a uma precipitação de 11,4 mm. Um intervalo de 10 dias, compreendido entre os dias 3 e 13 apresenta um declínio do nível de água, o qual voltou a subir

no dia 14/09/21 a partir de uma precipitação de 36,6 mm que ocasiona uma variação do nível de água de 0,2 m, posteriormente, precipitações dos dias 17/09/21 (18,8 mm), 18/09/21 (14,4 mm) e 20/09/21 (18,6 mm) contribuem para discretas variações do nível de água de 0,2 m, 0,1 m e 0,2, respectivamente. As variações dos dias 27/09/21 e 28/09/21, são de 3 m e 2 m, nesta ordem, sendo ocasionadas por precipitações de 30,6 mm e 15,6 mm, respectivamente.

O monitoramento discreto, observado na Figura 30, é marcado por uma elevação do nível freático que se estende por todo o mês de setembro, não obstante se observa que no monitoramento contínuo, Figura 42, os níveis de água elevam-se em diversos instantes, ou seja, cinco ascensões a mais que no monitoramento discreto.

Figura 42 – Nível de água do PM-06 no mês de setembro/2021



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

No monitoramento contínuo, observa-se que o PM-06 apresentou um comportamento diferente do que foi visto no monitoramento discreto, em relação as flutuações de nível de água. Essas diferenças podem ser melhor visualizadas ao se comparar as Figuras 38 e 40. Nesses dois gráficos, observam-se variações curtas (entre 27 e 31/03/21) e variações espaçadas (01 a 31/08/21), na devida ordem.

A partir dos dados do monitoramento contínuo, observa-se que os níveis de água não respondem imediatamente aos eventos de precipitação, por exemplo, precipitações ocorridas entre os dias 27/09/20 e 23/10/20 demoraram 24 horas para elevar o nível de água do poço de monitoramento. Nota-se que esse efeito é predominante no período de estiagem, todavia sua ocorrência é menos frequente no período chuvoso, onde as chuvas são mais frequentes e mais intensas, além disso o tempo de resposta é mais curto.

No monitoramento contínuo existe mais registros de elevação do nível freático em relação aos resultados do monitoramento discreto. Este fato pode estar associado ao



encurtamento da frequência de monitoramento do nível de água, a qual permite registrar elevações que ocorrem em um período inferior ao do monitoramento discreto.

O monitoramento contínuo permite observar elevações do nível de água com duração inferior a 24 horas, por exemplo, uma elevação do nível de água observada no dia 20/03/21 durou, aproximadamente, 17 horas até o início da recessão, esta ascensão não foi registrada no monitoramento discreto. Como no período chuvoso existe um maior número de ascensões do nível de água desse poço, observa-se maior discrepância entre os monitoramentos discreto e contínuo. Desta forma observa-se que o monitoramento contínuo é ideal para registros das ascensões de nível freático que ocorrem em um intervalo inferior a 7 dias.

6.5.3 Precipitação para elevação do nível de água e tempo de resposta do aquífero

Nas seções 6.5.1 e 6.5.2 foi observado que as elevações de nível de água foram ocasionadas por instantes onde houve eventos de precipitação pluviométrica. Elevações no nível de água dos poços de monitoramento responderam bem aos eventos de precipitação menos intensos e mais frequentes, se comparado aos eventos de chuva isolados e mais intensos, este comportamento pode ser observado nos gráficos da variação do nível de água em função da precipitação para os monitoramentos discreto e contínuo.

Na Tabela 9 estão arrolados os valores de precipitação que elevam o nível de água e o tempo médio de resposta do aquífero aos eventos de precipitação, a partir dos dados de monitoramento discreto e contínuo. Levando em conta os dados do monitoramento discreto, a elevação do nível de água do aquífero começa a ocorrer quando há precipitações diárias iguais ou maiores que 12,71 mm (média mensal de 381,3 mm), onde o tempo de resposta do aquífero é, em média, de 47 horas. Em contrapartida no monitoramento contínuo, o aquífero começa a elevar seu nível de água quando há precipitações diárias de 7,87 mm (média mensal de 236,1 mm), sendo o tempo de resposta às precipitações desta magnitude, em média, de 42 minutos.

Tabela 9 – Precipitação para elevação do NA e tempo de resposta do aquífero

Tipo de monitoramento	Precipitação Para provocar variação do nível de água	Tempo de resposta do aquífero
Monitoramento discreto	12,71 mm/dia	47 horas
Monitoramento contínuo	7,87 mm/dia	42 minutos

Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.



A análise dos dados, levando em consideração os monitoramentos discreto e contínuo, forneceram cenários diferentes para o mesmo PM. Este fato está relacionado ao intervalo de observação, que é mais curto no monitoramento contínuo. Os dados de nível de água fornecidos há cada 15 minutos tornam possível observar variações de nível de água que não são identificadas no monitoramento discreto. Neste contexto se observa que o monitoramento contínuo permite trabalhar com eventos de elevação do nível de água na ordem de minutos ou de horas para comparação com os eventos de precipitação de curta duração.

Simon et al. (2017) verificaram que os 5 poços de monitoramento localizados em aquífero livre, pertencente a Bacia Hidrográfica do rio Ibicuí, elevaram seus níveis de água com eventos de precipitação maiores que 100 mm/mês, sendo que as maiores elevações do nível de água ocorreram nos meses chuvosos. Esse mesmo estudo foi realizado por Coelho, Almeida e Silans (2012) em 27 poços de monitoramento, localizados em aquífero livre, pertencente a Bacia Hidrográfica do rio Gramame. Nos meses mais chuvosos, a elevação do nível de água foi ocasionada por precipitações mensais entre 80 e 90 mm.

Na área de estudo, localizada na UFPA, verificou-se que a precipitação mensal responsável pela elevação do nível de água foi de 381,3 mm (monitoramento discreto) e 236,1 mm (monitoramento contínuo) com média de 308 mm. Este valor foi maior que aquele observado na Bacia Hidrográfica do rio Gramame, cujo o clima é semelhante (tropical chuvoso).

6.6 Recarga aquífera

6.6.1 Variação do nível de água (Δh) com dados do monitoramento discreto

Nas Figuras 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 e 50 ilustram-se a identificação das curvas de recessão e sua extrapolação até o nível máximo de água para cada poço de monitoramento, objeto de estudo. Cada curva extrapolada fornece um valor de Δh , que se refere a variação do nível freático em um determinado instante do monitoramento, desta forma a recarga total anual foi determinada através da soma dos valores de variação do nível de água correspondentes a cada ano de monitoramento.

O PM-01 (Figura 43) apresenta vinte e quatro curvas de recessão, onde para cada curva é determinado um valor de Δh , sendo assim a soma de todos os valores de variação do nível de água é 2,567 m, 3,489 m e 1,405 m para os anos de 2020, 2021 e 2022, na devida ordem. O

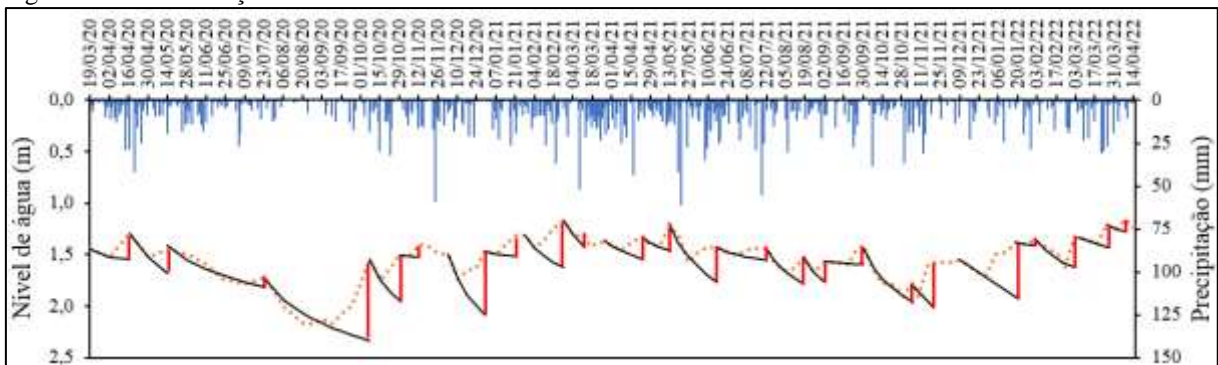


PM-02 (Figura 44) totaliza vinte e seis curvas de recessão, portanto vinte e seis valores de Δh , que representam uma variação total de 2,558 m em 2020, 3,151 m em 2021 e 1,394 m em 2022.

O PM-03 (Figura 45) expõe vinte e quatro curvas de recessão extrapoladas, que fornecem uma soma de Δh igual a 2,692 m em 2020, 2,916 em 2021 e 0,859 m em 2022. O PM-04 (Figura 46) apresenta um conjunto de vinte e quatro curvas de recessão extrapoladas, essas curvas fornecem valores de Δh iguais a 1,457 m (ano de 2020), 1,946 m (ano de 2021) e 0,568 m (ano de 2022). O PM-05 (Figura 47) exhibe vinte e sete curvas de recessão extrapoladas, onde o total de valores de Δh é 2,324 m no ano de 2020, 1,974 m no ano de 2021 e 0,652 m no ano de 2022. O PM-06 (Figura 48) mostra vinte e quatro curvas extrapoladas que fornecem um Δh total de 3,716 m no ano de 2020, 5,526 m no ano de 2021 e 1,288 m no ano de 2022.

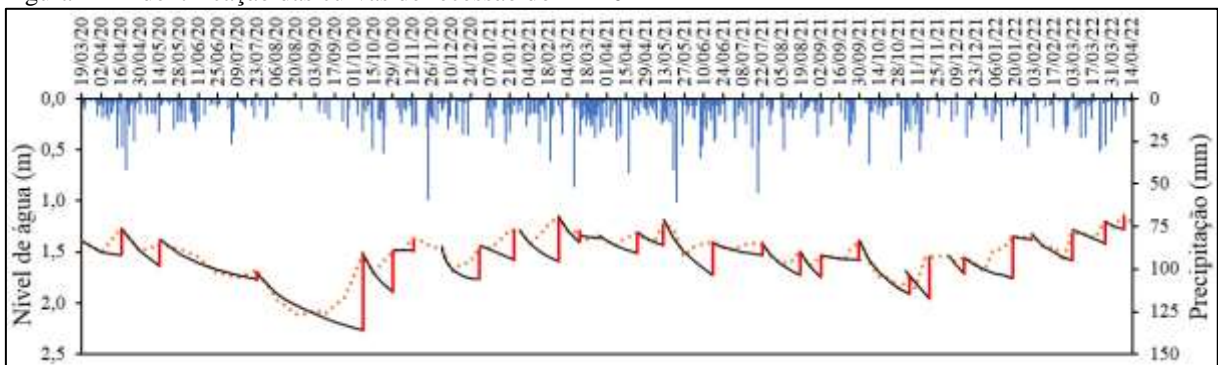
No PM-07 (Figura 49) são totalizadas vinte e três curvas de recessão que somam uma variação de nível de água de 2,410 m para o ano de 2020, 1,416 m para o ano de 2021 e 0,409 m para o ano de 2023. O PM-08 (Figura 50) apresenta vinte e quatro curvas de recessão e um Δh total para o ano de 2020 de 1,014 m, para o ano de 2021 de 0,755 m e para o ano de 2022 de 0,195 m.

Figura 43 – Identificação das Curvas de recessão do PM-01



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

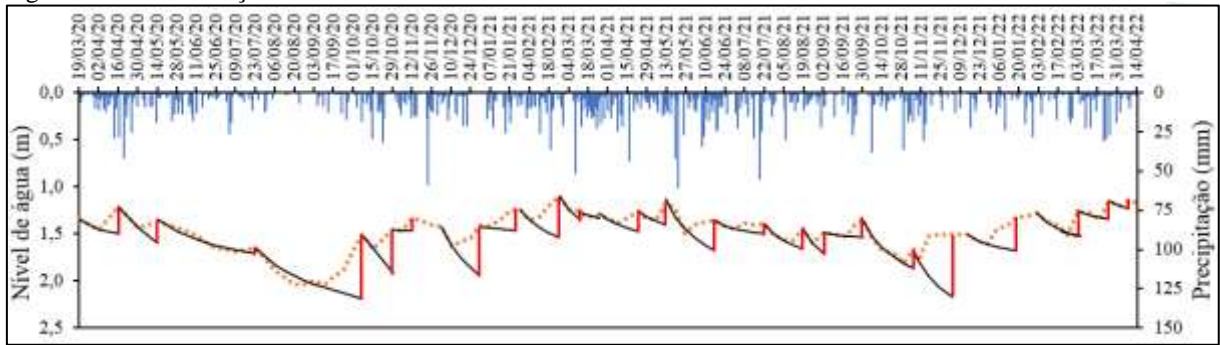
Figura 44 – Identificação das curvas de recessão do PM-02



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

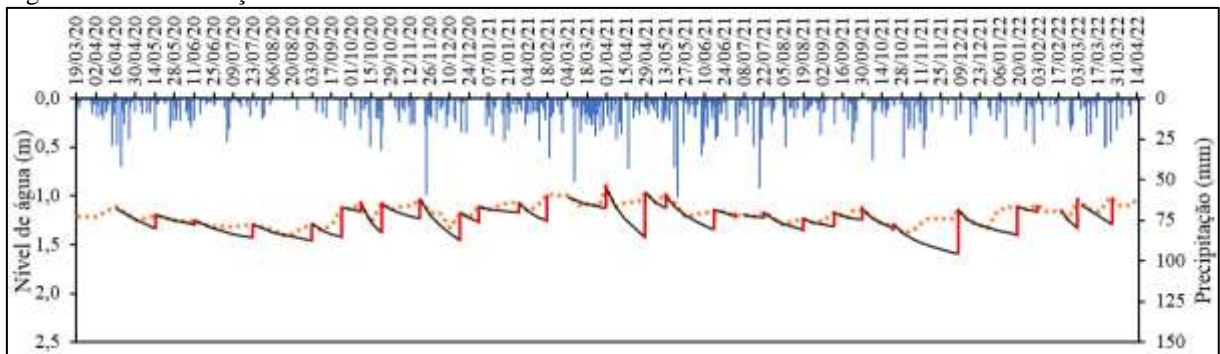


Figura 45 – Identificação das curvas de recessão do PM-03



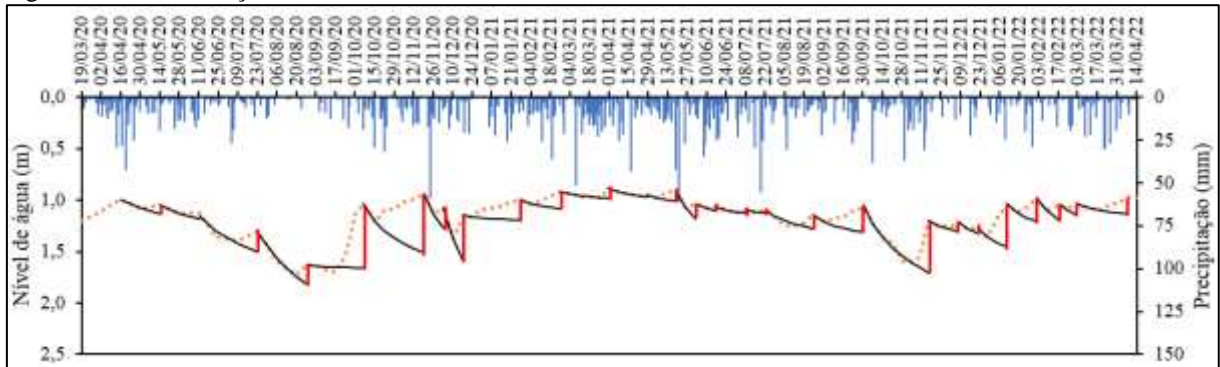
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 46 – Identificação das curvas de recessão do PM-04



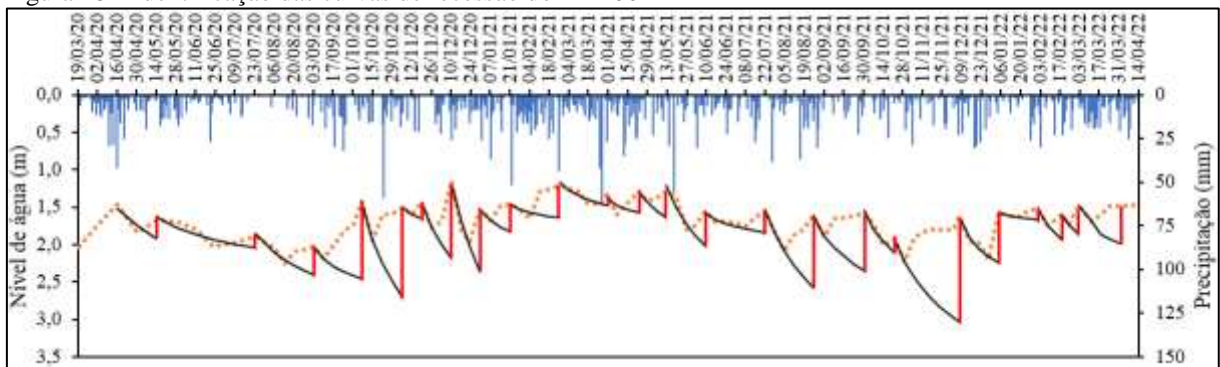
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 47 – Identificação das curvas de recessão do PM-05



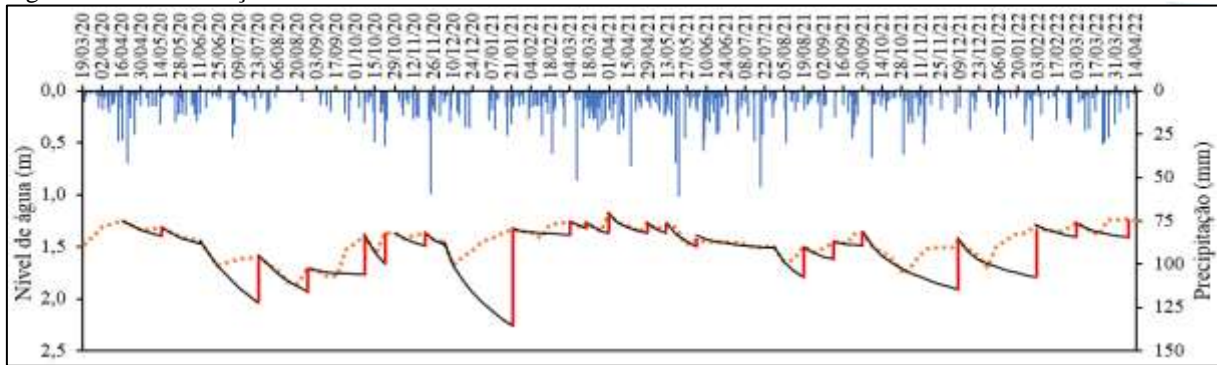
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 48 – Identificação das curvas de recessão do PM-06



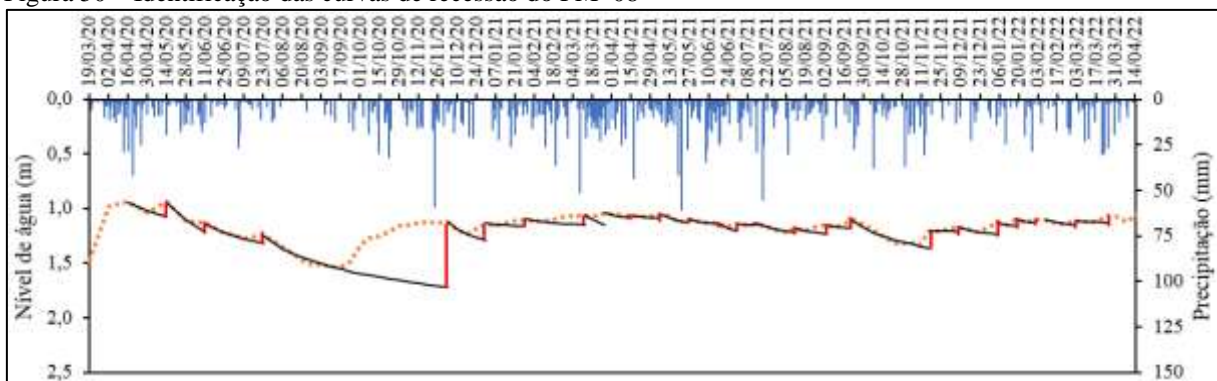
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 49 – Identificação das curvas de recessão do PM-07



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 50 – Identificação das curvas de recessão do PM-08



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

No monitoramento discreto foram identificadas 194 curvas de recessão extrapoladas que, somadas, forneceram um Δh total de 46,68 m, que representa a variação de água ocorrida no aquífero livre durante o período de monitoramento. O poço de monitoramento 06 (Figura 48) apresentou os maiores valores de Δh , os quais são consequência das maiores oscilações freáticas apresentadas por esse poço na seção 6.5. Por outro lado, o PM-08 (Figura 50) foi o poço que exibiu os menores valores de variação do nível de água, pois em boa parte do período de monitoramento deste PM, as oscilações foram muito curtas.

6.6.2 Variação do nível de água (Δh) com dados do monitoramento contínuo

No mês de setembro de 2020 (Figura 51), o PM-06 apresenta apenas uma curva de recessão, a qual fornece um valor de Δh igual a 0,768 m, conforme Figura 51. No mês de outubro de 2020 (Figura 52), mesmo havendo uma interrupção do monitoramento, verificam-se três curvas de recessão que fornecem um Δh igual a 0,400 m. O mês de novembro de 2021 (Figura 53) apresenta cinco curvas de recessão, onde o Δh total foi de 0,860 m. No mês de

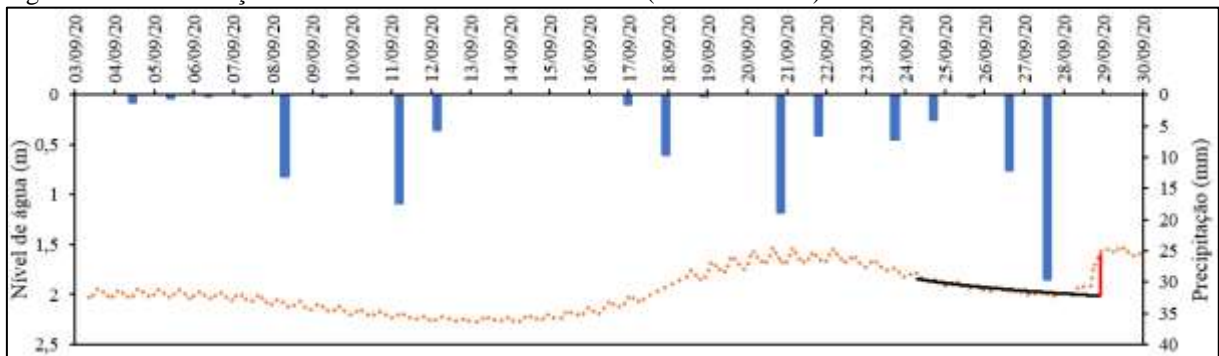


dezembro/2020 (Figura 54), a variação do nível de água foi igual a 0,879 m, o qual corresponde a quatro curva de extrapolação observada.

O mês de janeiro de 2021 (Figura 55) apresentou cinco curvas de recessão, que totalizam uma variação de nível de água de 1,261 m. O mês de fevereiro/2021 (Figura 56) exibe um número maior de curvas de recessão em relação aos meses até aqui descritos, são dezoito no total, as quais totalizam uma variação de nível de água igual a 2,155 m.

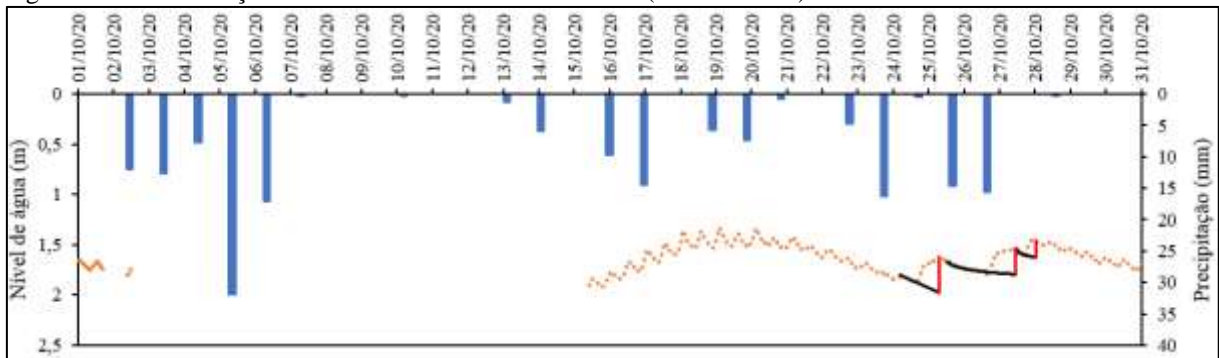
No mês de março/2021 (Figura 57), o poço de monitoramento sinaliza dez curvas de recessão extrapoladas, onde o Δh é igual a 2,188 m e em abril de 2021 (Figura 58), devido ao interrompimento do monitoramento, ocorre apenas duas curvas de recessão extrapoladas e uma variação total do nível de água de 0,193 m. Em julho de 2021 (Figura 59), após o retorno do monitoramento contínuo, são identificadas duas curvas de recessão e um valor de Δh igual a 0,216 m. Em agosto de 2021 (Figura 60), verifica-se o surgimento de três curvas de recessão e um Δh de 0,560 m. Por fim, o mês de setembro de 2021 (Figura 61) apresenta seis curvas de recessão que fornecem um Δh igual a 1,309 m.

Figura 51 – Identificação das curvas de recessão do PM-06 (setembro/2020)



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

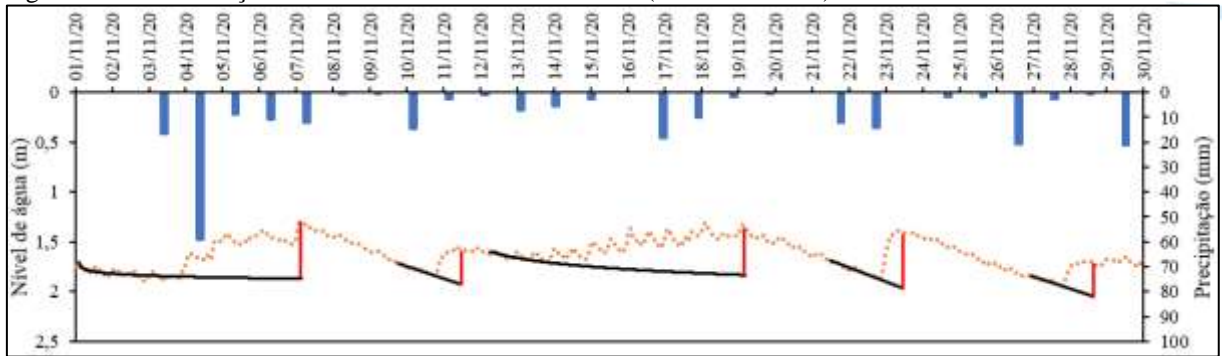
Figura 52 – Identificação das curvas de recessão do PM-06 (outubro/2020)



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

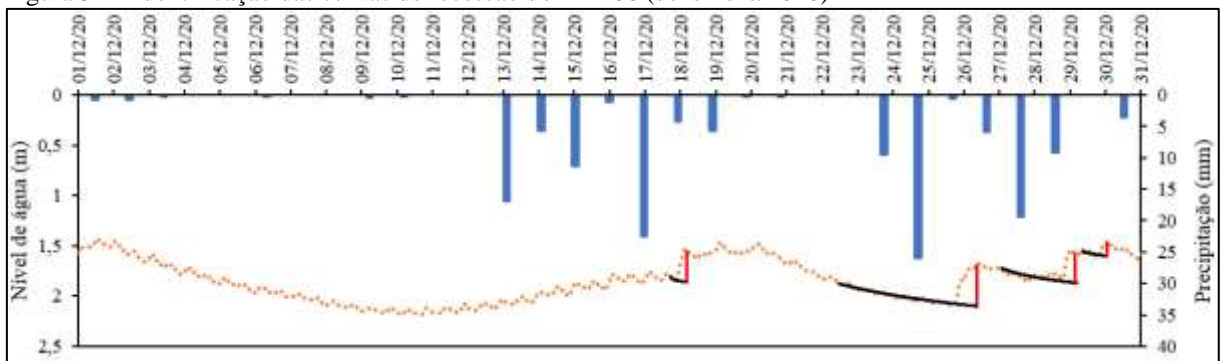


Figura 53 – Identificação das curvas de recensão do PM-06 (novembro/2020)



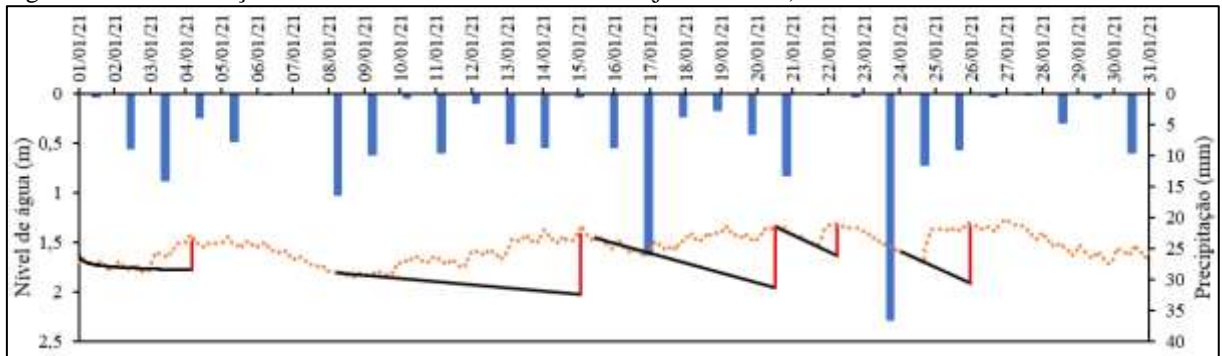
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 54 – Identificação das curvas de recensão do PM-06 (dezembro/2020)



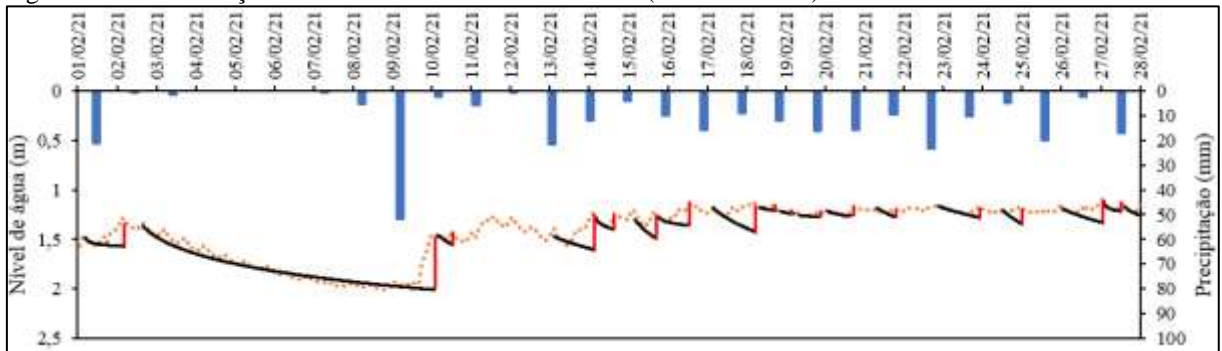
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 55 – Identificação das curvas de recensão do PM-06 (janeiro/2021)



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

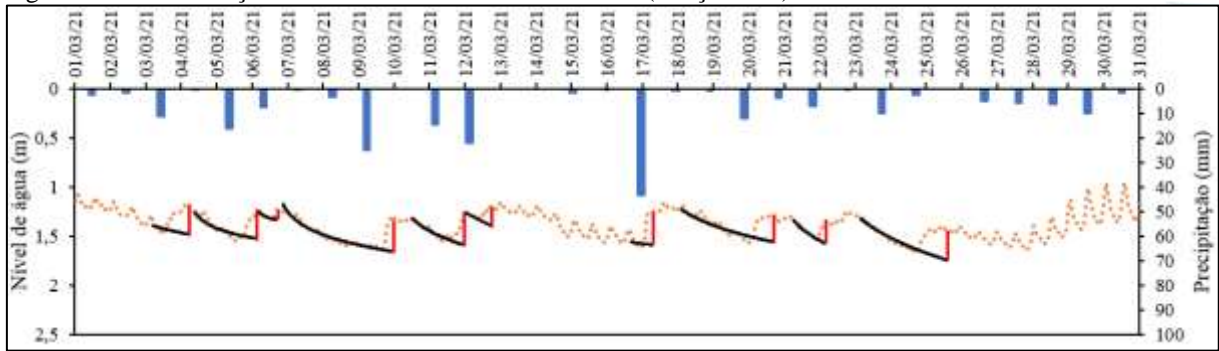
Figura 56 – Identificação das curvas de recensão do PM-06 (fevereiro/2021)



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

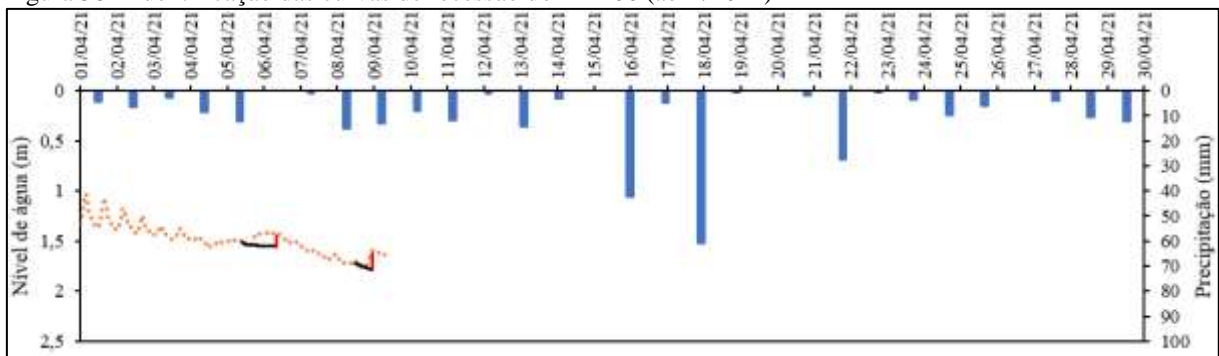


Figura 57 – Identificação das curvas de recessão do PM-06 (março/2021)



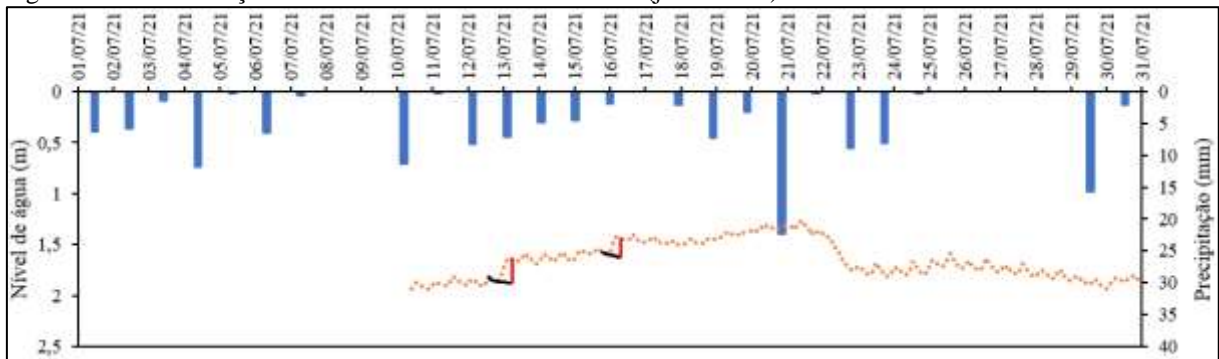
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 58 – Identificação das curvas de recessão do PM-06 (abril/2021)



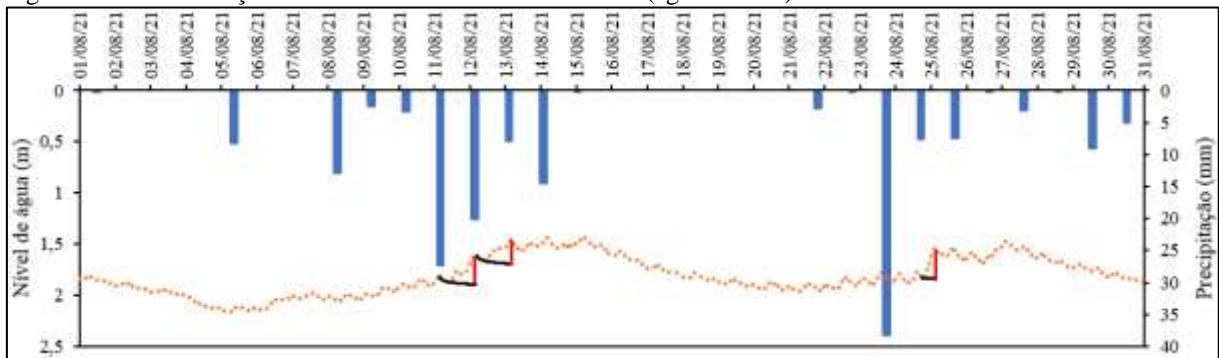
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 59 – Identificação das curvas de recessão do PM-06 (julho/2021)



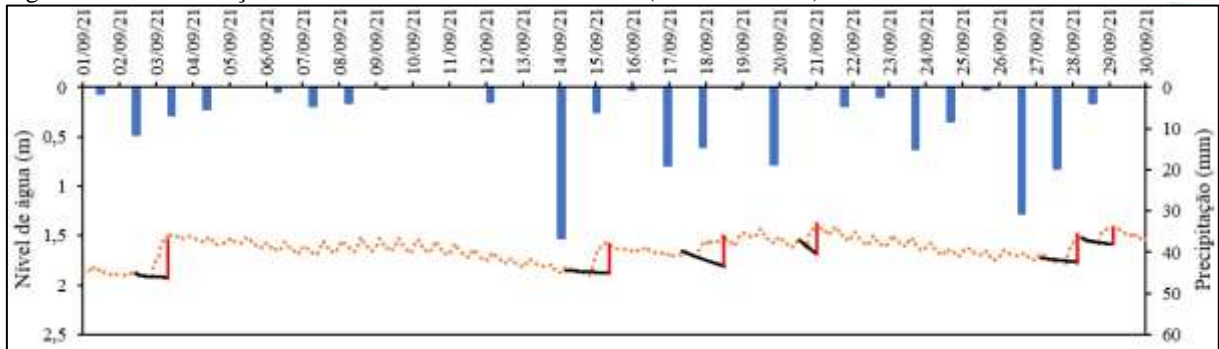
Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 60 – Identificação das curvas de recessão do PM-06 (agosto/2021)



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

Figura 61 – Identificação das curvas de recessão do PM-06 (setembro/2021)



Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

No monitoramento contínuo do PM-06 são identificadas sessenta curvas de recessão que, somadas, fornecem um Δh total de 11 m, esses dados são superiores aos encontrados no monitoramento discreto para este mesmo poço de monitoramento, ou seja, os dados do monitoramento discreto exibem apenas vinte e quatro curvas de recessão e um Δh igual a 8 m para o PM-06, considerando o mesmo período do monitoramento.

No mês de janeiro de 2021 observa-se que o monitoramento discreto registra apenas uma curva de recessão ($\Delta h=0,356$ m) (Figura 46), todavia esse número é maior no monitoramento contínuo, pois são exibidas seis curvas de recessão ($\Delta h_{total}=1,261$ m) (Figura 55). Em setembro de 2021 o monitoramento discreto registra apenas uma curva de recessão ($\Delta h=0,766$ m), conforme Figura 48, todavia nesse mesmo período, segundo a Figura 61, o monitoramento contínuo expõe seis curvas de recessão ($\Delta h= 1,309$ m). Como a recarga é uma variável que tem relação direta com Δh , constata-se que no monitoramento discreto há perda daquelas recargas de curta duração, menor que 7 dias (frequência do monitoramento discreto).

Os valores de Δh mantêm uma relação direta com a precipitação, visto que os maiores valores de variação do nível de água são nos meses chuvosos e os menores valores ocorrem nos meses menos chuvosos, por exemplo, nos meses de janeiro e fevereiro de 2021, os Δh ficam em 1,261 m e 2,155 m, respectivamente, todavia nos meses de julho e agosto do mesmo ano, os Δh são de 0,216 m e 0,560 m, nesta ordem. Portanto se observa que o monitoramento discreto fornece um cenário bem diferente do que é visto no monitoramento contínuo, pois o número de variações do nível de água (Δh) que deixam de ser registradas é maior.

6.6.3 Rendimento específico

O rendimento específico foi determinado através de um teste de bombeamento e recuperação realizado na área de estudo (Figuras 62, 63, 64 e 65), esse teste teve duração de 24



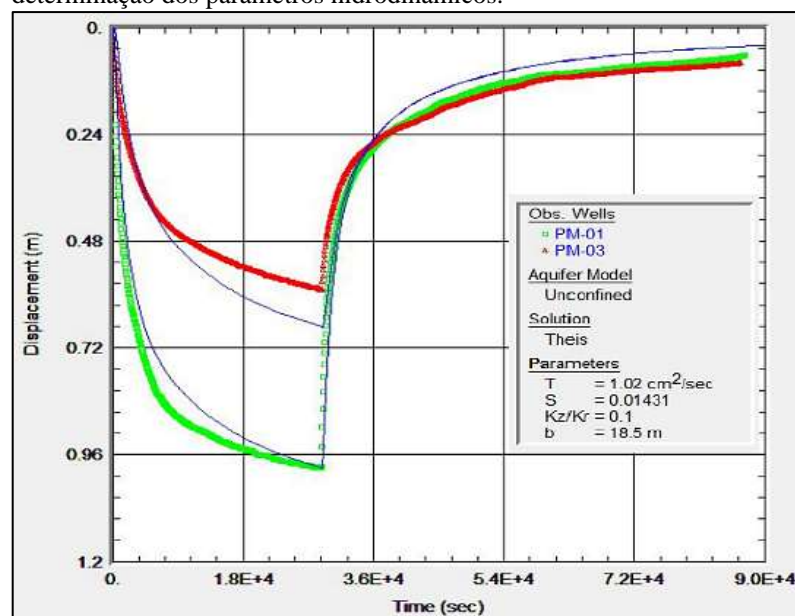
horas, onde nas primeiras 8 horas o bombeamento da água subterrânea foi mantido a uma vazão constante de 6,45 L/s e nas 16 horas finais a recuperação do nível de água foi monitorada.

A frequência de monitoramento do nível de água ocorreu a cada 1 minuto e os dados de nível de água registrados durante esse período foram tabulados no *software* AQTESOLV Demo (versão demonstrativa) e apresentados com seus respectivos ajustes às soluções analíticas teóricas, tais como Theis, Neuman, Moench e Tartakovsky-Neuman, nesta ordem, as quais são melhor detalhadas na seção 5.5.

Após análise visual, verifica-se que o melhor ajuste aos dados ocorre com a solução proposta por Tartakovsky-Neuman, embora o ajuste não tenha apresentado uma aderência perfeita, a qual pode ser explicada, neste caso, pelo esvaziamento lento dos poros do solo compreendido na zona não saturada.

Este esvaziamento duradouro é conhecido em aquíferos não confinados como drenagem retardada. O ajuste das equações correspondentes às soluções analíticas é avaliado a partir da Soma dos Quadrados dos Resíduos (RSS), o qual, neste contexto, se mostra como um parâmetro de avaliação. Neste caso, a solução proposta por Tartakovsky-Neuman apresenta o menor valor (melhor solução), ou seja, $RSS = 3,16$, seguido por Theis, $RSS = 6,41$, Neuman $RSS = 13,4$ e Moench $RSS = 16,3$. Portanto o RSS confirma a descoberta visual de melhor ajuste à solução de Tartakovsky-Neuman. Na Tabela 10 estão arrolados os valores dos rendimentos específicos, determinados para cada uma das soluções analíticas.

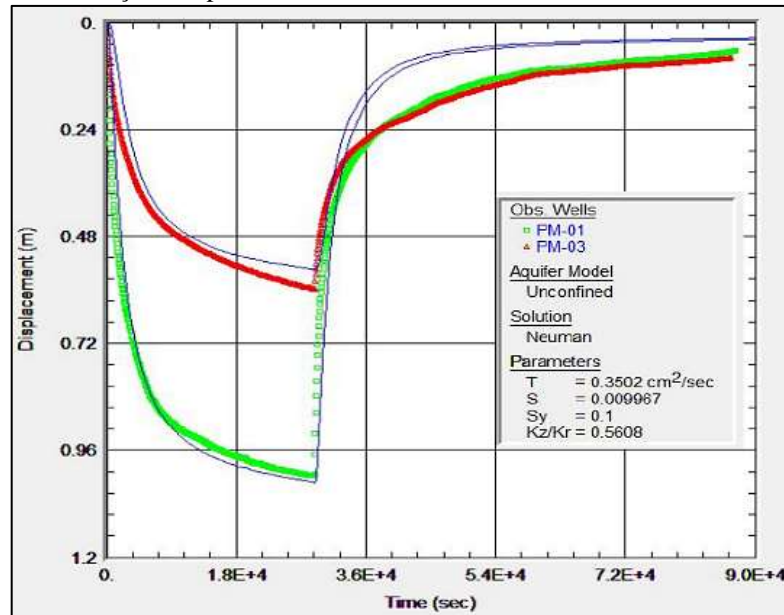
Figura 62 – Curva de recuperação dos PMs 01 e 03, curva Theis para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.



Fonte: Adaptado de Penner et al. (2022).

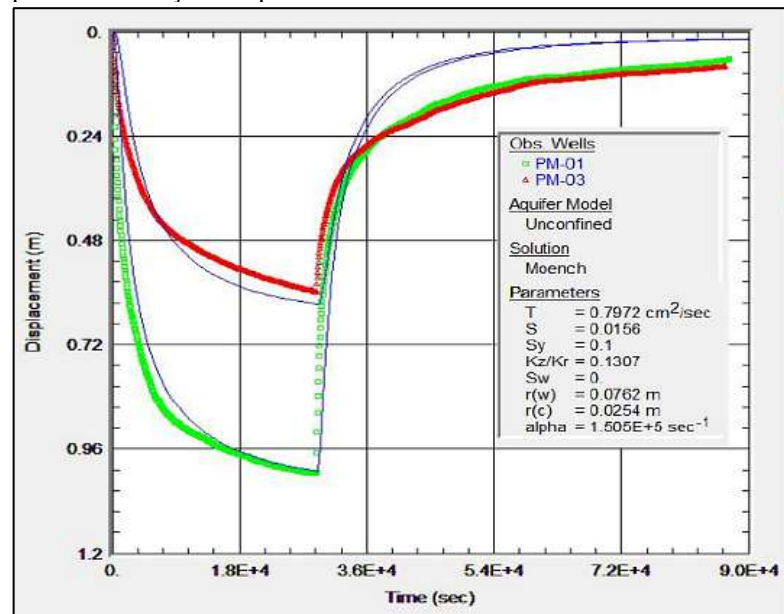


Figura 63 – Curva de recuperação dos PMs 01 e 03, curva Neuman para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.



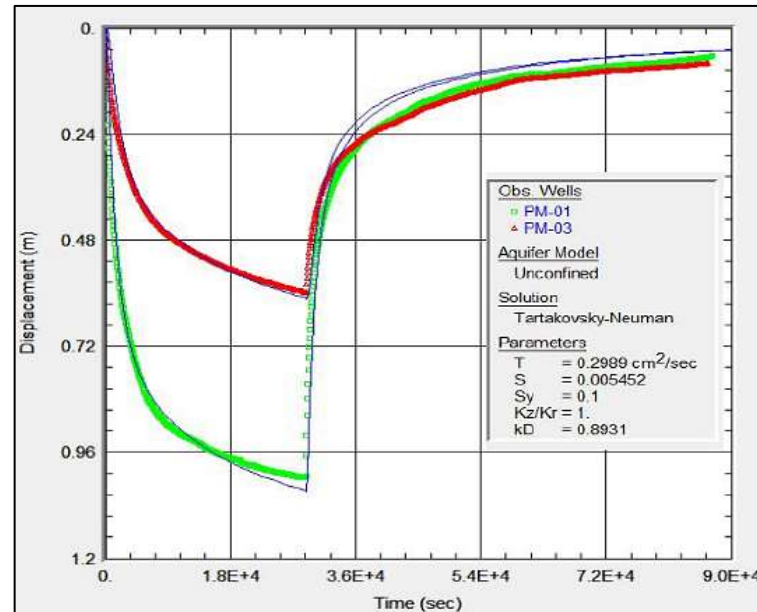
Fonte: Adaptado de Penner et al. (2022).

Figura 64 – Curva de recuperação dos PMs 01 e 03, curva de Moench para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.



Fonte: Adaptado de Penner et al. (2022).

Figura 65 – Curva de recuperação dos PMs 01 e 03, curva de Tartakovsky-Neuman para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos.



Fonte: Adaptado de Penner et al. (2022).

Tabela 10 – Valores de rendimento específico para cada solução analítica

Método	Rendimento específico – S_y	Soma dos Quadrados dos Residuais – RSS
Theis (1935)	0,01*	6,41*
Moench (1997)	0,1	16,30
Neuman (1974)	0,1	13,14
Tartakovsky and Neuman (2007)	0,1	3,16

Fonte: Elaborador pelo autor do trabalho.

* Valores referentes ao coeficiente de armazenamento.

6.6.4 Estimativa de recarga na área de estudo

6.6.4.1 Monitoramento discreto

A recarga do aquífero livre é estimada através do método da Variação da Superfície Livre (WTF), considerando a aplicação da Equação 1. A diferença entre os picos de elevação do nível de água e o ponto mais baixo da curva de recessão (Δh) e o rendimento específico (S_y) foram calculados, conforme seções 6.6.1 e 6.6.3, nesta ordem. O período de monitoramento considerado é 757 dias, os quais estão compreendidos entre 19/03/2020 até 15/04/2022. Sendo que os valores anuais de recarga subterrânea no monitoramento discreto, consideram o ano

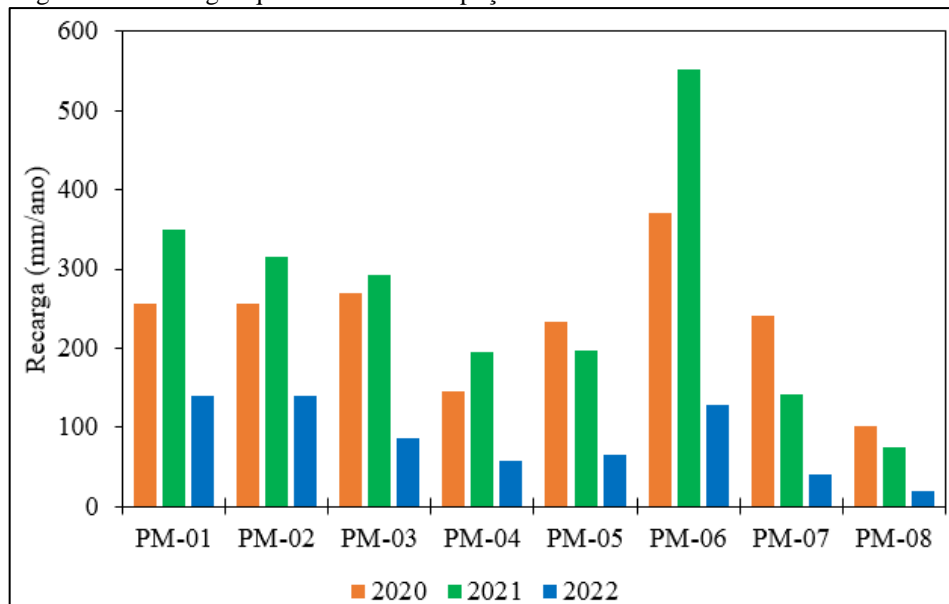
juliano e podem ser consultados no Apêndice B. A Recarga do aquífero livre para os anos de 2020, 2021 e 2022, apresenta variação espacial na área de estudo.

No ano de 2020, o menor valor de recarga observado é 101,40 mm (PM-08) e o maior valor está em 371,60 mm (PM-06). Como neste ano a precipitação acumulada é igual a 3.465,00 mm, observa-se que são convertidos em recarga, no PM-08, apenas 2,93% da precipitação acumulada. Em contrapartida, no PM-06, este percentual chega a 10,72% (maior valor). Portanto neste ano, o PM-06 foi o poço de monitoramento que apresentou maior taxa de recarga em relação aos demais.

O ano de 2021 apresenta um comportamento semelhante ao ano anterior, onde se observa uma precipitação acumulada de 3.442,40 mm, desse total apenas 2,19% (75,50 mm) recarregam o aquífero, como pode ser observado no PM-08. A maior taxa de recarga é registrada no PM-06, a qual é igual a 16,05% (552,60 mm).

No último ano de monitoramento, a precipitação acumulada é igual a 1.512,00 mm, neste ano observa-se que o PM-08 continua sendo o poço a apresentar a menor recarga (19,50 mm) que os demais poços, todavia o PM-01 é o poço com maior valor de recarga (140,50 mm), contrariando os dois anos anteriores, onde o PM-06 foi o poço com a maior taxa de recarga. A Figura 66 esboça as taxas anuais de recarga para cada ano de monitoramento.

Figura 66 – Recarga aquífera anual dos 8 poços de monitoramento



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Coelho (2011) utilizou a média aritmética de 12 poços para estimar a recarga aquífera para a Bacia Hidrográfica do Rio Gramame, porção sul do estado da Paraíba. No presente



trabalho, a recarga média para a área de estudo foi calculada através da média aritmética dos valores referentes aos anos de 2020, 2021 e 2022 (Figura 66).

Desta forma a recarga média na área de estudo ficou em 583,51 mm/ano com uma taxa média de 6,93%. Os resultados da Tabela 11 apresentaram-se inferiores aos encontrados pelo Saghravani et al. (2015) que investigaram a taxa anual de recarga aquífera em uma floresta de clima tropical e úmida, caracterizada por um elevado índice pluviométrico. Esta avaliação ocorreu através de dois métodos: WTF (*Water-Table Fluctuation*) e CMB (*Chloride Mass balance*). Os resultados do monitoramento discreto utilizado para o WTF em sua pesquisa mostraram que a taxa de recarga variou entre 10% e 13%.

Tabela 11 – Recarga média na área de estudo – monitoramento discreto

ΔH (m)	S_y	Recarga (mm/ano)	Precipitação mm/ano	Recarga/Precipitação (%)
5,83	0,1	583,51	8.419,14	6,93

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

6.6.4.2 Monitoramento contínuo

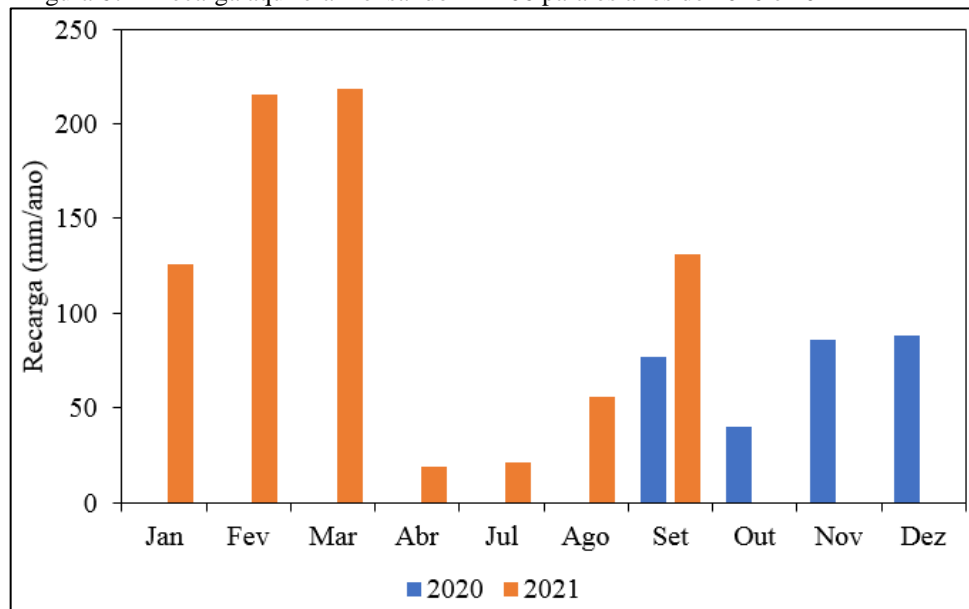
A recarga do aquífero livre subjacente a área de estudo é estimada para o PM-06 a partir dos dados do monitoramento contínuo utilizando o mesmo método que foi discutido na seção 6.6.4.1 (WTF), desta forma a variação do nível freático (Δh) foi determinada na seção 6.6.2 e o rendimento específico (S_y) na seção 6.6.3. No monitoramento automático, o período considerado é 279 dias, os quais estão compreendidos entre 03/09/2020 até 09/11/2021. Sendo que os valores anuais de recarga subterrânea no monitoramento contínuo, consideram o ano juliano e podem ser consultados no Apêndice B.

A recarga aquífera observada no PM-06, para o ano de 2020, apresenta valores mensais variando entre 40,00 mm (33,90% da precipitação acumulada no mês) e 87,90 mm (47,46% da precipitação acumulada no mês). O menor valor corresponde ao mês de outubro, o qual apresenta uma precipitação de 118,00 mm, menor que aquela observada no mês de dezembro, que foi de 185,20 mm, a qual foi responsável pela maior recarga.

No ano de 2021, as maiores recargas são nos meses chuvosos (janeiro, fevereiro e março). O mês de abril é marcado pelo menor valor de recarga (19,30 mm) e menor precipitação (77,20 mm), todavia o maior valor corresponde ao mês de março (218,80 mm), onde a precipitação acumulada corresponde à 307,20 mm. O mês de julho, apesar de apresentar uma

precipitação acumulada maior que a do mês de abril, apenas 15% dessa precipitação é convertida em recarga aquífera, enquanto no mês de abril a taxa de recarga é maior (25%). A Figura 67 esboça as taxas mensais de recarga para cada ano de monitoramento.

Figura 67 – Recarga aquífera mensal do PM-06 para os anos de 2020 e 2021



Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

A Tabela 12 refere-se ao acumulado das recargas mensais para os anos de 2020 e 2021, resultando na recarga anual para esses dois anos. Como pode ser observado o ano de 2021 apresenta o maior valor de recarga, aproximadamente 23% em relação ao ano anterior. Todavia este aumento pode estar associado ao maior número de meses monitorados no ano de 2021, como foi observado na Figura 67.

Tabela 12 – Recarga aquífera anual do PM-06

Ano	ΔH (m)	S_y	Recarga (mm/ano)	Precipitação (mm/ano)	Recarga / Precipitação (%)
2020	2,91	0,10	290,70	864,80	33,61
2021	7,88		788,20	1.911,40	41,23

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho

A recarga média para a área de estudo (Tabela 13) é calculada através da média aritmética dos valores referentes aos anos de 2020, 2021 (Tabela 12). Neste contexto a recarga aquífera é igual a 539,45 mm, que representa, aproximadamente, 38,86% da média da precipitação total (1.388,10 mm).



Tabela 13 – Recarga média do PM-06 – monitoramento contínuo

ΔH (m)	S_y	Recarga (mm/ano)	Precipitação mm/ano	Recarga/Precipitação (%)
5,39	0,1	539,45	1.388,10	38,86

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Em relação ao PM-06, observa-se que a recarga com dados do monitoramento discreto é menor que aquela estimada com dados do monitoramento contínuo (Tabela 14). O monitoramento contínuo apresenta uma recarga 16,7% maior que a do monitoramento discreto (462,10 mm).

A estimativa de recarga para o cenário em que se utiliza uma frequência mais curta de medição (15 minutos), representa um valor superior àquele com um intervalo de medição de 7 dias. O encurtamento da frequência de medição possibilita aumentar o registro de elevações de nível de água, que ocorrem em intervalos menores que 7 dias, e conseqüentemente as curvas de recessão antecedentes a essas elevações, pois no monitoramento contínuo foram identificadas 60 curvas de recessão (seção 6.6.2), 36 curvas a mais que no monitoramento discreto (seção 6.6.1). Além disso, a recarga com dados do monitoramento contínuo é, aproximadamente, 16,7% maior que aquela com dados do monitoramento discreto.

Tabela 14 – Recarga média do PM-06 com dados do monitoramento discreto e contínuo

PM-06	Recarga (mm/ano)	Precipitação mm/ano	Recarga/Precipitação (%)
Monitoramento Discreto	462,10	3.454,00	13,38
Monitoramento Contínuo	539,45	1.388,10	38,86

Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho.

Os resultados observados na Tabela 13 correspondem àqueles encontrados por Brito et al. (2019) para aquífero livre, o qual utilizou dados de monitoramento contínuo para determinar a recarga aquífera nos aquíferos Alter do Chão e Trombetas, sendo que os dados contínuos corresponderam ao período de monitoramento de 2011 até 2018. No aquífero Alter do Chão a recarga variou entre 21% e 49% e no aquífero Trombetas ela variou de 11% até 36%.

A recarga subterrânea que representa a área de estudo pode ser estimada a partir da média aritmética das recargas com dados do monitoramento discreto (Tabela 11) e contínuo (Tabela 13). Desta forma pode-se dizer que a recarga média do aquífero livre subjacente a Universidade Federal do Pará, é 561,48 mm que corresponde a, aproximadamente, 22,89% da precipitação total.



7 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A estimativa de recarga é um instrumento fundamental para melhorar a gestão e uso dos recursos hídricos subterrâneos. Ela permite que se tenha conhecimento sobre o potencial oferecido pelas reservas hídricas de um aquífero, bem como fornece cenários onde é possível a implementação de planos de controle sobre o uso sustentável desses mananciais subterrâneos. O presente trabalho foi desenvolvido com o propósito principal de estimar a recarga de um aquífero livre subjacente a Universidade Federal do Pará (UFPA) por meio de um modelo de variação dos níveis de água, denominado *Water-Table Fluctuation* (termo em inglês que significa Variação da Superfície Livre).

A aplicação do método ocorreu através do monitoramento frequente dos níveis de água de 8 poços de monitoramento distribuídos na UFPA, o qual ocorreu por meio de medidor de nível manual e transdutor de pressão ventilado, ambos denominados de monitoramento discreto e monitoramento contínuo, respectivamente.

Nesta pesquisa os níveis de água dos 8 poços de monitoramento apresentaram relação direta e responderam bem aos eventos de precipitação. Dependendo do período do ano o intervalo entre a precipitação e o início da elevação do nível de água poderia mudar, ou seja, nos meses chuvosos o intervalo de resposta dos níveis de água do aquífero livre aos eventos de precipitação são mais curtos.

O método WTF foi capaz de caracterizar as diferentes respostas que as oscilações freáticas apresentaram em relação ao tipo de monitoramento (discreto ou contínuo) e sua relação com influências peculiares da área de estudo, tais como características geológicas e hidrodinâmicas. Sobretudo, o WTF mostrou-se satisfatório para estimar a recarga aquífera na área de estudo, uma vez que os resultados alcançados se apresentaram coerentes com os resultados de outras pesquisas realizadas nas mesmas condições climáticas e em aquíferos rasos.

O monitoramento dos poços foi relevante para efetuação das análises, visto que séries temporais longas minimizam o erro e as incertezas em relação a dinâmica dos sistemas hidrológicos presentes na área de estudo. O tipo de monitoramento realizado influencia de maneira decisiva no cenário para estimativa de recarga. O encurtamento da frequência de medição permite detectar oscilações que ocorrem a curto prazo (7 dias), dando maior sensibilidade a observação de recargas pontuais. Por este motivo, o monitoramento automático, por apresentar períodos muito curtos entre uma medição e outra, acaba detectando mais



oscilações de nível freático e conseqüentemente maiores episódios de recarga, por isso é coerente afirmar que deve ser a principal técnica a ser utilizada na obtenção de uma série histórica plausível para estimar a recarga aquífera.

Além disso, é adequado afirmar que a metodologia adotada para estimar a recarga na área de estudo pode ser aplicada em outras áreas do Estado do Pará bem como em outros estados do Brasil, apesar disso, devem ser respeitadas as situações em que não seja possível a aplicação da metodologia, tais como aquíferos com diferente hidráulica de escoamento das águas subterrâneas e hidrogeologia que não permitam a aplicação do método.

Os resultados alcançados nesta pesquisa permitem que seja feitas algumas recomendações para os trabalhos posteriores e para um melhor entendimento da dinâmica da água subterrânea no município de Belém, tais como:

- a) Instalação de sensores de medição de nível de água em todos os poços de monitoramento para medição dos níveis de água a uma frequência mais curta, a fim de identificar os picos de recarga curtos que são perdidos no monitoramento discreto;
- b) Instalação de sensores de medição do nível de água dos Igarapés Tucunduba e Sapucajuba para que se tenha maior precisão entre a variação do nível de água dos Igarapés com as variações do nível de água dos poços de monitoramento;
- c) Avaliação dos efeitos da evapotranspiração na variação do nível freático dos 8 poços de monitoramento e caracterização física do solo da área de estudo;
- d) Ampliação da rede de monitoramento da água subterrânea na área de estudo por meio da instalação de mais poços de monitoramento em locais que onde não haja qualquer interferência que possa comprometer a qualidade dos dados de nível de água, por exemplo, afastados de poços utilizados para bombeamento;
- e) Aplicação conjunta do WTF com outras técnicas de estimativa de recarga, para fins de comparação com outros resultados.



REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15495-1:2007, versão corrigida 2:2009 – Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares – Parte 1: Projeto e construção. 2009.

ALMEIDA, Fabíola Magalhães De; MATTA, Milton Antonio da Silva; DIAS, Erika Regina França; BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento; PRADO, Joyce Brabo Do; FIGUEIREDO, Andrei Batista De. Estudos Hidrogeológicos da Bacia Hidrográfica do Tucunduba-Belém/PA, como base para uma proposta alternativa de abastecimento de água. **Associação Brasileira de Águas Subterrâneas**, [S. l.], p. 1–17, 2004.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**. Brasília. ISSN: 00802107. ISBN: 9788587685360. Disponível em: http://www.rausp.usp.br/busca/artigo.asp?num_artigo=1532.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Estudos hidrogeológicos para a gestão das águas subterrâneas da região de Belém/PA: Relatório Final**. Belém 2018 a. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Diagnóstico do Meio Físico da Região de Belém/PA**. Belém 2018 b. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br>. Acesso em 15 abr. 2021.

ANDRADE, Tafnes S.; MONTENEGRO, Suzana M. G. L.; MONTENEGRO, Abelardo A. D. A.; RODRIGUES, Diogo F. B. Estimation of alluvial recharge in the semiarid. **Engenharia Agrícola**, [S. l.], v. 34, n. 2, p. 211–221, 2014. ISSN: 18084389. DOI: 10.1590/S0100-69162014000200003.

ARBEL, Agência Reguladora de Belém. **Caracterização geral do município de Belém**. Belém. Belém 2020. Disponível em: <https://arbel.belem.pa.gov.br>. Acesso em: 20 mai. 2021

AZEVEDO, José M. M.; RODRIGUES, Nelson E. V.; LÚCIO, Alfredo C. De; DOMINGOS, Florentino C.; MORAIS, Jorge. Aquíferos Aluvionares da Foz do Rio Bero, Namibe, Angola. **Tundavala Revista Angolana de Ciência**, [S. l.], v. 2, 2015. Disponível em: <https://portalpensador.com/index.php/Tdvla/article/view/79>.

BARRETO, Carlos Eduardo Andrade Gomes. **Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. 2006. 271 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br>. Acesso em: 27 maio. 2022.

BAUM, Camila Angélica; MANCUSO, Malva Andrea; FRITZEN, Rafael Renato. Application of the WTF method in the study of recharge variability in urban aquifer. **Geociências**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 85–98, 2018 a. ISSN: 1980900X. DOI: 10.5016/geociencias.v37i1.11903.

BAUM, Camila Angélica; MANCUSO, Malva Andrea; FRITZEN, Rafael Renato. Aplicação do método WTF no estudo da variabilidade da recarga em aquífero urbano. **São Paulo, UNESP**,



Geociências, [S. l.], v. 37, p. 85–98, 2018 b.

BIERKENS, Marc F. P. Non-renewable groundwater use and groundwater depletion : a review Non-renewable groundwater use and groundwater depletion : a review. **IOP Science**, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab1a5f>. Acesso em: 15 out. 2022.

BORTOLIN, Taison Anderson. **Estudo Da Recarga Do Sistema Aquífero Serra Geral Na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas**. 2018a. 1–8 f. [S. l.], 2018. ISSN: 19961073. ISBN: 9781441980731. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1120700020921110%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.reuma.2018.06.001%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.arth.2018.03.044%0Ahttps://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1063458420300078?token=C039B8B13922A2079230DC9AF11A333E295FCD8>. Acesso em: 16 jun. 2021.

BORTOLIN, Taison Anderson. **Estudo da recarga do sistema aquífero serra geral na bacia hidrográfica taquari-antas**. 2018b. 221 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/188220>. Acesso em: 5 mai. 2021.

BRAGA, Letícia Teixeira Palla. **Recarga do tipo Localizada em Ambiente Semiárido: Estudo de Caso em Dolinas da Bacia do rio Verde Grande, Minas Gerais**. 2014. 206 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências - Departamento de Geologia, Belo Horizonte, 2014.

BRASIL. Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de . . 1997.

BRITO, Alderlene Pimentel De; TOMASELLA, Javier; WAHNFRIED, Ingo Daniel; CANDIDO, Luiz Antonio; MONTEIRO, Maria Terezinha. Relação entre precipitação e recarga de águas subterrâneas na Amazônia Central Relationship between precipitation and groundwater recharge in the Central. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], p. 39–49, 2019.

CALLAHAN, Timothy J.; VULAVA, Vijay M.; PASSARELLO, Michael C.; GARRETT, C. Guinn. Estimating groundwater recharge in lowland watersheds. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 26, n. 19, p. 2845–2855, 2012. ISSN: 08856087. DOI: 10.1002/hyp.8356.

CAMBRAIA NETO, Arnaldo José; RODRIGUES, Lineu Neiva. Evaluation of groundwater recharge estimation methods in a watershed in the Brazilian Savannah. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 79, n. 6, p. 1–14, 2020. ISSN: 18666299. ISBN: 0123456789. DOI: 10.1007/s12665-020-8884-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8884-x>.

CARMO, José Astério Rosa Do. **Recarga Subterrânea direta e sua influência sobre a temperatura e a condutividade elétrica e microbacias do rio Vacacaí-Mirim, SR**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental - Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7638>. Acesso em: 14 abr. 2021.

CARRETERO, Silvina C.; KRUSE, Eduardo E. Relationship between precipitation and water-



table fluctuation in a coastal dune aquifer: Northeastern coast of the Buenos Aires province, Argentina. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 20, n. 8, p. 1613–1621, 2012. ISSN: 14350157. DOI: 10.1007/s10040-012-0890-y.

COELHO, VICTOR; ALMEIDA, Cristiano; SILANS, Alain. Análise da Flutuação do Nível D' água para Estimativa da Recarga Subterrânea da Bacia Representativa do Rio Gramame no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 241–252, 2012 a. ISSN: 2318-0331. DOI: 10.21168/rbrh.v17n2.p241-252.

COELHO, VICTOR; ALMEIDA, Cristiano; SILANS, Alain. Análise da Flutuação do Nível D' água para Estimativa da Recarga Subterrânea da Bacia Representativa do Rio Gramame no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 241–252, 2012 b. ISSN: 2318-0331. DOI: 10.21168/rbrh.v17n2.p241-252.

COELHO, Victor Hugo Rabelo. **Monitoramento e análise da variação do nível d água para estimativa da recarga do aquífero livre da bacia do Rio Gramame - PB**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental) - Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2011. Disponível em: <http://tede.biblioteca.ufpb.br:8080/handle/tede/5451>. Acesso em: 8 set. 2021.

COELHO, Victor Hugo Rabelo. **Estimativa da recarga subterrânea em bacia hidrográfica do semiárido pernambucano a partir de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas**. 2016. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 2016.

COSTA, André Lima Da; LOPES, Paulo Victor Nobre. **Adequação de área experimental para monitoramento da recarga do aquífero livre**. 2021. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Instituto de Tecnologia, Belém, 2021. ISBN: 9781626239777.

CRISTO, Laís de Andrade; LUZ, Luziane Mesquita. Morfologia e uso do solo na bacia urbana do Tucunduba, Belém/PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 06, p. 1275–1291, 2011. ISSN: 1984-2295. ISBN: 3358.

DAMBRÓS, Cristiane. **Recarga e flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias com floresta e campo nativo**. 2011a. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7773>. Acesso em: 1 maio. 2021.

DAMBRÓS, Cristiane. **Recarga e Flutuação do Nível da Água Subterrânea**. 2011b. 119 f. Universidade Federal de Santa Maria, [S. l.], 2011.

DE MELO, José Geraldo; ALVES, Rafaela Da Silva; DA SILVA, Jadson Gomes. Estimativa Da Recarga Das Águas Subterâneas Do Sistema Aquífero Barreiras Na Bacia Do Rio Pirangi, Rn. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 68–81, 2014 a. ISSN: 0101-7004. DOI: 10.14295/ras.v28i2.27428.

DELOTTIER, H.; PRYET, A.; LEMIEUX, J. M.; DUPUY, A. Estimating groundwater recharge uncertainty from joint application of an aquifer test and the water-table fluctuation



method. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 26, n. 7, p. 2495–2505, 2018. ISSN: 14350157. DOI: 10.1007/s10040-018-1790-6.

FARIAS, Pedro Vanerci da Cunha. **Flutuação dos níveis de água subterrânea em microbacias hidrográficas do rio Vacacaí-mirim**. 2011. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2011.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, João; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed., Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FERNANDES, Lucila Araújo. **Aplicação do método WTF para estimativa da recarga do aquífero livre da região da bacia do rio gramame e do baixo curso do rio paraíba/PB**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia, Paraíba, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br>. Acesso em: 11 set. 2021.

FREITAS, Suzy; BACELLAR, Luis. Avaliação da Recarga de Aquíferos em Microbacias do Alto Rio das Velhas, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 31–38, 2013. ISSN: 2318-0331. DOI: 10.21168/rbrh.v18n2.p31-38.

HAGEDORN, Benjamin; EL-KADI, Aly I.; MAIR, Alan; WHITTIER, Robert B.; HA, Kyoochul. Estimating recharge in fractured aquifers of a temperate humid to semiarid volcanic island (Jeju, Korea) from water table fluctuations, and Cl, CFC-12 and 3H chemistry. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 409, n. 3–4, p. 650–662, 2011. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.060. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.060>.

HEALY, Richard W.; COOK, Peter G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 91–109, 2002. ISSN: 14312174. ISBN: 1004000101780. DOI: 10.1007/s10040-001-0178-0.

IZADY, Azizallah; ABDALLA, Osman A. E.; JOODAVI, Ata; KARIMI, Akbar; CHEN, Mingjie; TOMPSON, Andrew. Groundwater recharge estimation in arid hardrock-alluvium aquifers using combined water-table fluctuation and groundwater balance approaches. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 31, n. 19, p. 3437–3451, 2017. ISSN: 10991085. DOI: 10.1002/hyp.11270.

JÚNIOR, Antonio Rodrigues da Silva; SILVA, Marilena Loureiro Da. Riscos e educação ambiental na bacia hidrográfica Do Tucunduba:: um estudo sobre o bairro Montese, Belém/PA. **Ambiente & Educação**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 481–510, 2021. ISSN: 2238-5533. ISBN: 0000000296847. DOI: 10.14295/ambeduc.v25i3.9788.

LOBLER, Carlos Alberto. **Avaliação quantitativa da recarga das águas subterrâneas na bacia escola do campus da Universidade Federal de Santa Maria**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7644>. Acesso em: 25 mar. 2021.

LOPO, Mendonça João José. Sistemas Aquíferos Aluvionares da Bacia Hidrográfica do Rio Mondego. **Recursos Hídricos**, [S. l.], p. 63–70, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307466789_ALLUVIAL_AQUIFERS_SYSTEMS_



IN_THE_HYDROGRAPHIC_BASIN_OF_THE_MONDEGO_RIVER. Acesso em: 1 mar. 2023.

LUCAS, M. C.; GUANABARA, R. C.; WENDLAND, E. Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Boletim Geológico y Mineralo**, [S. l.], v. 123, n. 3, p. 311–323, 2012 a. ISSN: 03660176.

LUCAS, Murilo Cesar. **Influência da precipitação e do uso do solo sobre a taxa de recarga em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. 2012. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-31102012-092335/pt-br.php>. Acesso em: 25 fev. 2021.

LUCAS, Murilo; WENDLAND, Edson. Recharge estimates for various land uses in the Guarani aquifer system outcrop area. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 61, n. 7, p. 1253–1262, 2016. ISSN: 21503435. DOI: 10.1080/02626667.2015.1031760. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2015.1031760>.

MANZIONE, Rodrigo Lilla; TANIKAWA, Diego Hiroshi; WENDLAND, Edson Cezar. Análise de tendências nos níveis freáticos de uma bacia hidrográfica em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) auxiliado por imagens de sensoriamento remoto. [S. l.], p. 6896–6902, 2011.

MARTELLI, Guilherme Viana. **Monitoramento Da Flutuação Dos Níveis De Água Em Aquíferos Freáticos Para Avaliação Do Potencial De Recarga Em Área De Afloramento Do Sistema Aquífero Guarani Em Cacequi - Rs**. 2012b. 1–151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2012. Disponível em: http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=4525. Acesso em: 1 jan. 2021.

MARTELLI, Guilherme Viana; SILVA, José Luiz Silvério Da. Monitoramento da flutuação dos níveis de água em aquíferos freáticos em área de retirada de água subterrânea. **XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**, [S. l.], n. 19, p. 1–4, 2011.

MATOS, Fernando Cardoso De. **Caracterização qualitativa dos impactos ambientais causados pela ocupação urbana no igarapé do Tucunduba, Belém, PA**. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2010.

MATOS, Fernando Cardoso De; TARGA, Marcelo dos Santos; BATISTA, Getulio Teixeira; DIAS, Nelson Wellausen. Análise temporal da expansão urbana no entorno do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Biociências**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 7–16, 2011. ISSN: 1415-7411.

MATTA, Milton Antonio da Silva. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua Pará, Brasil**. 2002b. 311 f. Tese (Doutor em Ciências na Área de Geologia) - Centro de geociências, Belém, 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8165>. Acesso em: 20 maio. 2021.



MIRANDA, Afonso Rolo. **Vulnerabilidade e risco do sistema aquífero das aluviões do Mondego no sector Coimbra-Montemor-o-Velho**. 2021. 71 f. Universidade de Coimbra, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/98196>.

MITOSO, Amanda Queiroz; DINIZ, Adenilson Campos. **Análise Do Saneamento Ambiental Na Bacia Do Tucunduba, Belém-Pa**. [S. l.], n. 1, p. 1–4, 2011.

MONTEIRO, Milena Jessica Guimarães. **Acurácia e Interpretação dos dados de ensaios de slug test no campus da UFPA em Belém-PA**. 2021. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Instituto de Tecnologia, Belém, 2021.

NASCIMENTO, Juliana Silva Do. **Determinação dos parâmetros de aquífero por teste de bombeamento em poços de monitoramento no campus da UFPA em Belém-PA**. 2021. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Instituto de Tecnologia, Belém, 2021. ISBN: 9781626239777.

NETO, Arnaldo José Cambraia; RODRIGUES, Lineu Neiva. Evaluation of groundwater recharge estimation methods in a watershed in the Brazilian Savannah. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 79, n. 6, 2020. ISSN: 18666299. ISBN: 0123456789. DOI: 10.1007/s12665-020-8884-x.

NOWREEN, Sara; TAYLOR, R. G.; SHAMSUDDUHA, M.; SALEHIN, M.; ZAHID, A.; AHMED, K. M. Groundwater recharge processes in an Asian mega-delta: hydrometric evidence from Bangladesh. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 28, n. 8, p. 2917–2932, 2020. ISSN: 14350157. ISBN: 1004002002238. DOI: 10.1007/s10040-020-02238-3.

OBUOBIE, Emmanuel; DIEKKRUEGER, Bernd; AGYEKUM, William; AGODZO, Sampson. Groundwater level monitoring and recharge estimation in the White Volta River basin of Ghana. **Journal of African Earth Sciences**, [S. l.], v. 71–72, p. 80–86, 2012. ISSN: 1464343X. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2012.06.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.06.005>.

PARK, Eungyu. Delineation of recharge rate from a hybrid water table fluctuation method. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 48, n. 7, p. 1–6, 2012. ISSN: 00431397. DOI: 10.1029/2011WR011696.

PENNER, Giovanni Chaves; CASANOVA, Erica do Socorro da Silva; GONÇALVEZ, Moisés Marçal; MARTINS, Rubens Takeji Aoki Araújo; CAVALCANTE, Igor Campos da Silva. Avaliação da condutividade hidráulica na zona não saturada do solo na bacia hidrográfica do igarapé sapucajuba (Belém-Pa). **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 5, n. 7, p. 8938–8953, 2019. ISSN: 25258761. DOI: 10.34117/bjdv5n7-098.

PENNER, Giovanni Chaves; MARTINS, Rubens Takeji Aoki Araújo; GONÇALVES, Moisés Marçal. Estudo comparativo de métodos de recarga natural do aquífero livre em uma microbacia hidrográfica. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 283, 2020. ISSN: 1098-6596. ISBN: 9788578110796. Disponível em: [http://www.nostarch.com/javascriptforkids%0Ahttp://www.investopedia.com/terms/i/in_specie.asp%0Ahttp://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35612/1/Trabajo de Titulacion.pdf%0Ahttps://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/GUIA-](http://www.nostarch.com/javascriptforkids%0Ahttp://www.investopedia.com/terms/i/in_specie.asp%0Ahttp://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35612/1/Trabajo%20de%20Titulacion.pdf%0Ahttps://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/GUIA-)



METODOL. Acesso em: 8 set. 2021.

PINHEIRO, Rinaldo Jose Barbosa; NUMMER, Andréa Valli; RAUBER, Ana Carla. Determinação da condutividade hidráulica das principais unidade geológico-geotécnicas de Santa Maria - RS. *[S. l.]*, n. 2, p. 347–363, 2017.

PONTON, Andres Felipe Hatum. **Determinação empírica da evapotranspiração em zona ripária e áreas vizinhas (Cerrado stricto sensu e eucalipto)**. 2017. 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses>. Acesso em: 17 out. 2022.

RAMA, Fabrizio; MIOTLINSKI, Konrad; FRANCO, Davide; CORSEUIL, Henry X. Recharge estimation from discrete water-table datasets in a coastal shallow aquifer in a humid subtropical climate. **Hydrogeology Journal**, *[S. l.]*, v. 26, n. 6, p. 1887–1902, 2018. ISSN: 14350157. DOI: 10.1007/s10040-018-1742-1.

RICHEY, Alexandra S.; THOMAS, Brian F.; LO, Min-Hui; REAGER, John T.; FAMIGLIETTI, James S.; VOSS, Katalyn; SWENSON, Sean; RODELL, Matthew. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. **AGU Publications**, *[S. l.]*, p. 5217–5238, 2015. DOI: 10.1002/2015WR017349. Received. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280043124_Quantifying_Renewable_Groundwater_Stress_with_GRACE. Acesso em: 16 out. 2022.

SAGHRAVANI, Seyed Reza; YUSOFF, Ismail; WAN MD TAHIR, Wan Zakaria; OTHMAN, Zainudin. Comparison of water table fluctuation and chloride mass balance methods for recharge estimation in a tropical rainforest climate: a case study from Kelantan River catchment, Malaysia. **Environmental Earth Sciences**, *[S. l.]*, v. 73, n. 8, p. 4419–4428, 2015. ISSN: 18666299. DOI: 10.1007/s12665-014-3727-2.

SANTAROSA, Lucas Vituri. **Mapeamento de níveis freáticos do Sistema Aquífero Bauru (SAB) em área de proteção ambiental em águas de Santa Bárbara/SP durante o ano hidrológico 2014/15**. 2016. Dissertação (Mestre em Agronomia - Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016. ISBN: 9788521213055. Disponível em: <https://www.infodesign.org.br>. Acesso em: 13 set. 2021.

SANTOS, R. M. **Recarga de águas subterrâneas em ambiente de cerrado: Estudo com base em modelagem numérica e simulação hidrológica em uma bacia experimental (Distrito Federal)**. Brasília 2012 a.

SANTOS, Ronaldo Medeiros. **Recarga de águas subterrâneas em ambiente de cerrado: Estudo com base em modelagem numérica e simulação hidrológica em uma bacia experimental**. 2012b. 220 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Distrito Federal, 2012. ISBN: 9781119130536. Disponível em: <https://repositorio.unb.br>. Acesso em: 10 set. 2021.

SHAPOORI, V.; PETERSON, T. J.; WESTERN, A. W.; COSTELLOE, J. F. Estimating aquifer properties using groundwater hydrograph modelling. **Hydrological Processes**, *[S. l.]*, v. 29, n. 26, p. 5424–5437, 2015. ISSN: 10991085. DOI: 10.1002/hyp.10583.



SILVA, César de Oliveira Ferreira. **Modelamento espacial da recarga das águas subterrâneas sob diferentes usos e coberturas da terra**. 2019. Dissertação (Mestrado em agronomia - irrigação e drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas Botucatu, Botucatu, 2019. ISSN: 20711050. ISBN: 9788578110796. Disponível em: <http://scioteca.caf.com>. Acesso em: 9 set. 2021.

SILVA, Lucas A. Da; SILVA, Antônio M. Da; COELHO, Gilberto; MELLO, Carlos R. De; PEREIRA, Donizete dos R. Groundwater recharge estimate at alto Rio Grande -MG watershed. *[S. l.]*, p. 1097–1108, 2012.

SIMON, Flora Wurth; REGINATO, Pedro Antonio Roehé; KIRCHHEIM, Roberto Eduardo; TROIAN, Guilherme Casarotto. Estimativa de recarga do Sistema Aquífero Guarani por meio da palicação do método de Variação da Superfície Livre na Bacia do rio Ibicuí-RS. **Associação Brasileira de Águas Subterrâneas**, *[S. l.]*, v. 31, p. 12–29, 2017.

SOARES, Lilian Catone; VELÁSQUEZ, Leila Nunes Menegasse. Estimativa Da Recarga Aquífera Na Bacia Do Rio Riachão , Norte De Minas Gerais Recharge Aquifer Estimation in Riachão River Basin , Northern Minas Gerais State. **Águas Subterrâneas**, Belo Horizonte, v. 27, n. 2, p. 104–120, 2013.

SOLDERA, Bruna Camargo. **Modelagem de séries de monitoramento de nível freático em área de afloramento do sistema aquífero guarani (SAG) sob influência de diferentes usos agrícolas da terra**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas Botucatu, Botucatu, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br>. Acesso em: 13 jan. 2021.

SOMARATNE, Nara; SMETTEM, Keith; FRIZENSCHAF, Jacqueline. Three criteria reliability analyses for groundwater recharge estimations. **Environmental Earth Sciences**, *[S. l.]*, v. 72, n. 6, p. 2141–2151, 2014. ISSN: 18666299. ISBN: 1266501431210. DOI: 10.1007/s12665-014-3121-0.

SOUSA, Flávio Alves De; RODRIGUES, Silvio Carlos. Estimativa de recarga do lençol freático em solos sobre granito e gabros alcalinos na alta bacia do rio dos Bois em Iporá-GO. **Ambiência**, *[S. l.]*, v. 10, n. 2, p. 449–463, 2014. ISSN: 1808-0251. DOI: 10.5935/ambiencia.2014.02.02.

SOUTO, Cleyanne Kelly Barbosa; TELES, Ana Isabela Lobato; ANDRADE, Aline Azevedo; XAVIER, Bárbara Valéria Marinho Pismel; TORRES, Elys Evelina Silva Araujo; DIAS, Everton Costa; SILVA, Gabriel Pereira Colares. Fatores antrópicos de poluição hídrica na bacia do tucunduba em Belém-PA. **Brazilian Journal of Development**, *[S. l.]*, v. 5, n. 9, p. 13824–13834, 2019. ISSN: 25258761. DOI: 10.34117/bjdv5n9-014.

TERAMOTO, Elias Hideo; CHANG, Hung Kiang. Métodos WTF e simulação numérica de fluxo para estimativa de recarga – exemplo Aquífero Rio Claro em Paulínia/SP. **Águas Subterrâneas**, *[S. l.]*, v. 32, n. 2, p. 173–180, 2018. ISSN: 0101-7004. DOI: 10.14295/ras.v32i2.28943.

UNESCO. **Making the invisible visible GROUNDWATER**. Paris. ISBN: 9789231005077. Disponível em: <https://www.unesco.org/en>.



VASCONCELOS, Mickaelon Belchior; SILVA, Carla Maria Salgado Vidal; SANTIAGO, Marlúcia Freitas. Aluviões como fonte de suprimentos hídrico de pequenas comunidades: um caso do distrito de São Francisco - Meruoca/CE. **Revista Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22808>. Acesso em: 1 mar. 2023.

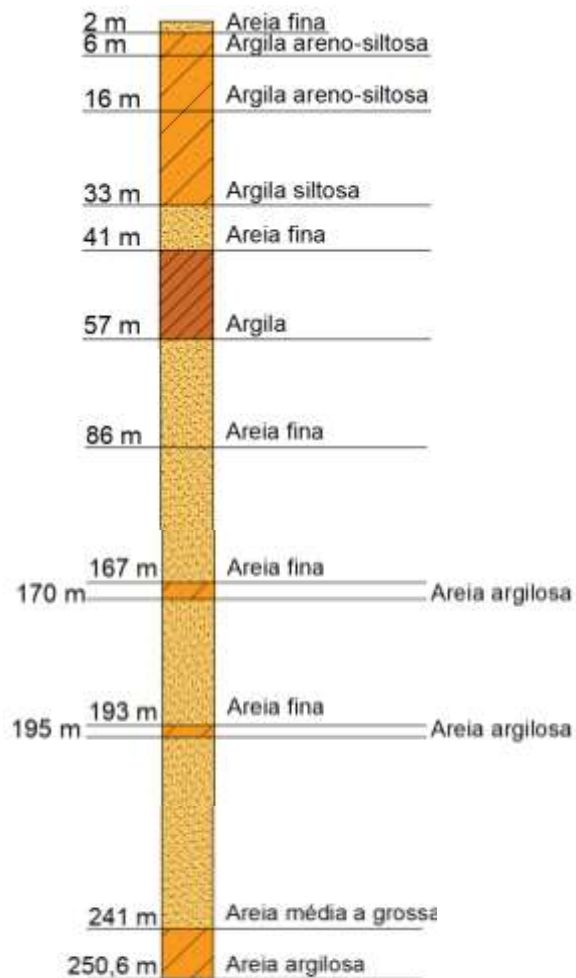
XU, Yongxin; BEEKMAN, Hans E. Review: Groundwater recharge estimation in arid and semi-arid southern Africa. **Hydrogeology Journal**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 929–943, 2019. ISSN: 14350157. DOI: 10.1007/s10040-018-1898-8.

YANG, Lihong et al. A modified water-table fluctuation method to characterize regional groundwater discharge. **Water (Switzerland)**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 1–16, 2018. ISSN: 20734441. DOI: 10.3390/w10040503.

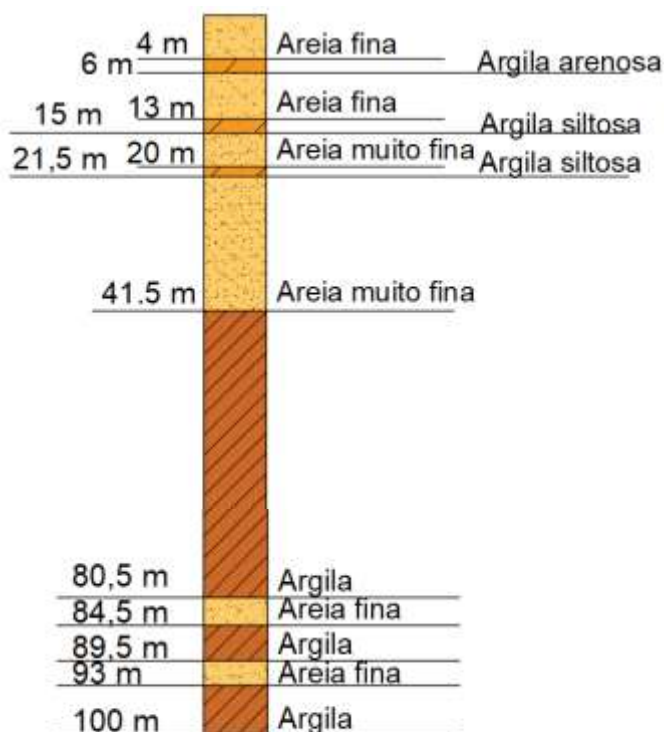


APÊNDICE A – Perfil litológico dos poços: UFPA, CPRM e PMs

Poço tubular UFPA
Cód. SIAGAS/CPRM: 1500007603



Poço de monitoramento CPRM
Cód. SIAGAS/CPRM: 1500007603



Poços de monitoramento
01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08





APÊNDICE B – Tabelas com valores de recarga aquífera

a) Recarga subterrânea com dados do monitoramento discreto para o ano de 2020

PM	ΔH (m)	S_y	Recarga (mm/ano)	Precipitação (mm/ano)	Recarga/Precipitação (%)
PM-01	2,57	0,10	256,70	3465,00	7,41
PM-02	2,56		255,80		7,38
PM-03	2,69		269,20		7,77
PM-04	1,46		145,70		4,20
PM-05	2,32		232,40		6,71
PM-06	3,72		371,60		10,72
PM-07	2,41		241,00		6,96
PM-08	1,01		101,40		2,93

b) Recarga subterrânea com dados do monitoramento discreto para o ano de 2021

PM	ΔH (m)	S_y	Recarga (mm/ano)	Precipitação (mm/ano)	Recarga/Precipitação (%)
PM-01	3,49	0,10	348,90	3442,40	10,14
PM-02	3,15		315,10		9,15
PM-03	2,92		291,60		8,47
PM-04	1,95		194,60		5,65
PM-05	1,97		197,40		5,73
PM-06	5,53		552,60		16,05
PM-07	1,42		141,60		4,11
PM-08	0,76		75,50		2,19

c) Recarga subterrânea com dados do monitoramento discreto para o ano de 2022

PM	ΔH (m)	S_y	Recarga (mm/ano)	Precipitação (mm/ano)	Recarga/Precipitação (%)
PM-01	1,41	0,10	140,50	1512,00	9,29
PM-02	1,39		139,40		9,22
PM-03	0,86		85,90		5,68
PM-04	0,57		56,80		3,76
PM-05	0,65		65,20		4,31
PM-06	1,29		128,80		8,52
PM-07	0,41		40,90		2,71
PM-08	0,20		19,50		1,29



d) Recarga subterrânea com dados do monitoramento contínuo para o ano de 2020

mês	PM	ΔH (m)	S_y	Recarga (mm/mês)	Precipitação (mm/mês)	Recarga/ Precipitação (%)
Set		0,77		76,80	190,00	40,42
Out	PM-06	0,40	0,10	40,00	223,00	17,94
Nov		0,86		86,00	371,60	23,14
Dez		0,88		87,90	185,20	47,46

e) Recarga subterrânea com dados do monitoramento contínuo para o ano de 2021

mês	PM	ΔH (m)	S_y	Recarga (mm/mês)	Precipitação mm/mês	Recarga/ Precipitação (%)
Jan		1,26		126,10	375,20	33,61
Fev		2,16		215,50	524,40	41,09
Mar		2,19		218,80	307,20	71,22
Abr	PM-06	0,19	0,10	19,30	386,60	4,99
Jul		0,22		21,60	192,00	11,25
Ago		0,56		56,00	208,80	26,82
Set		1,31		130,90	275,40	47,53