



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA

JULIA CALAZANS MACHADO

**ESTIMATIVA DE RECARGA DO AQUÍFERO BAURU NOS MUNICÍPIOS DE
ARAGUARI E TUPACIGUARA, MINAS GERAIS**

MONTE CARMELO

2021

JULIA CALAZANS MACHADO

**ESTIMATIVA DE RECARGA DO AQUÍFERO BAURU NOS MUNICÍPIOS DE
ARAGUARI E TUPACIGUARA, MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia do Instituto de Geografia da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Liliane Ibrahim (UFU)

MONTE CARMELO

2021

ESTIMATIVA DE RECARGA DO AQUÍFERO BAURU NOS MUNICÍPIOS DE
ARAGUARI E TUPACIGUARA, MINAS GERAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia do Instituto de Geografia da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Geologia.

Monte Carmelo, 26 de outubro de 2021.

Banca Examinadora:

Liliane Ibrahim – Orientadora

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Didier Gastmans

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Marco Antônio Delinardo da Silva

Universidade Federal do Uberlândia (UFU)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo o que Ele me proporciona e por estar sempre presente na minha vida, me dando força nos momentos difíceis.

À toda minha família, especialmente aos meus pais, Marcos e Kênia, por todo o amor, carinho, apoio e incentivo em todos os momentos. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao Fabrício, que sempre esteve comigo todos esses anos, sendo meu companheiro de vida e de profissão. Obrigada por sempre me acalmar, apoiar e estar disposto a me ajudar em tudo.

Ao meu amigo/irmão Raul, por estar comigo em todos os momentos, desde o primeiro ao último dia da graduação. Sem você seria difícil.

À minha orientadora Liliane, pela orientação e por todos os ensinamentos. Além de orientadora, sempre esteve disposta a me ajudar, seja no TCC, estágio e em qualquer assunto referente à universidade. Que sorte ter tido uma professora tão atenciosa e dedicada aos alunos!

Aos meus amigos e colegas que se fizeram presente em cada fase da minha vida, sou muito grata por ter vocês.

Aos professores da geologia que não mediram esforços para repassar todos os seus conhecimentos. Obrigada por contribuírem para a minha formação!

RESUMO

As águas subterrâneas constituem 97% das águas doces disponíveis no planeta e têm fundamental importância na manutenção das reservas hídricas superficiais, como lagos, rios, mangues e pântanos, além de servir como abastecimento das cidades e campos, sendo indispensáveis em várias atividades econômicas. A Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Rio Paranaíba concentra a maior parte das áreas de conflito declaradas pelo uso da água do estado de Minas Gerais. O presente trabalho propõe a avaliação de recarga do Aquífero Bauru nos municípios de Araguari e Tupaciguara por meio da aplicação do método da Variação do Nível D'Água (VNA), e desta maneira contribuir para a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. O método VNA, usado para calcular a recarga do Aquífero Bauru na região se baseia no princípio de que as elevações nos níveis de água subterrânea são decorrentes da recarga aquífera. As estimativas de recarga foram obtidas a partir da análise dos dados de quatro poços de monitoramento pertencentes à plataforma Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) e dos dados de duas estações pluviométricas disponíveis no Portal HidroWeb. Os resultados se mostraram condizentes com estudos anteriores realizados na região de Araguari, com valores de 2847,60 mm e 2917,20 mm de recarga, correspondendo a taxas de 26% e 23,59% da precipitação total, analisadas no período de 2011 a 2021 no município. Na cidade de Tupaciguara, no mesmo período, os valores de recarga obtidos foram de 1485,60 mm e 2800,80 mm, chegando a taxas de 11,43% e 24,20% da precipitação total.

Palavras-chave: Água subterrânea. Aquífero Bauru. Recarga. Variação do Nível d'Água. Gestão integrada de recursos hídricos.

ABSTRACT

Groundwater constitutes 97% of the fresh water available on the planet and is of fundamental importance in maintaining surface water reserves, such as lakes, rivers, mangroves and swamps, in addition to serving as a water supply for cities and fields, being indispensable in various economic activities. The Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Rio Paranaíba concentrates most of the areas of conflict declared for the use of water in the state of Minas Gerais. The present work proposes the evaluation of recharge of the Bauru Aquifer in the municipalities of Araguari and Tupaciguara through the application of the Water Table Flutuation (WTF) method, and in this way contribute to the integrated management of ground and surface water resources in the Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. The WTF method used to calculate the recharge of the Bauru Aquifer in the region is based on the principle that elevations in groundwater levels are due to aquifer recharge. Recharge estimates were obtained from the analysis of data from four monitoring wells belonging to the Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) platform and from data from two rainfall stations available on the Portal HidroWeb. The obtained results are consistent with previous studies carried out in the region of Araguari, with values of 2847.60 mm and 2917.20 mm of recharge, corresponding to rates of 26% and 23.59% of the total required, analyzed in the period from 2011 to 2021 no municipality. In the city of Tupaciguara, in the same period, the recharge values were recovered from 1485.60 mm and 2800.80 mm, reaching rates of 11.43% and 24.20% of the total data.

Keywords: Grownwater. Bauru Aquifer. Recharge. Water Table Flutuation. Integrated water resources management.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Rio Paranaíba (PN). Sendo: PN1 - Bacia dos Afluentes Mineiros do Alto Paranaíba (cor azul claro), PN2 - Bacia do Rio Araguari (cor verde), PN 3 - Bacia dos Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba (cor cinza). Em detalhe a articulação dos municípios de Araguari e Tupaciguara.....	12
Figura 2 - Representação do ciclo hidrológico. E: evaporação; ET: evapotranspiração; I: infiltração; R: escoamento superficial (deflúvio).	14
Figura 3 - Ilustração expondo os conceitos de transmissividade (T) e Condutividade hidráulica (K).....	17
Figura 4 - Mapa da Bacia Bauru evidenciando sua extensão pelos estados do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, São Paulo, Goiás e Minas Gerais e sua divisão em Grupo Bauru e Grupo Caiuá.	20
Figura 5 - Carta cronoestratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru.	21
Figura 6 - Representação das sequências deposicionais, dos tratos de sistemas e das discordâncias relacionados com a Bacia Bauru.....	22
Figura 7 - Mapa de localização dos municípios de Araguari e Tupaciguara.	25
Figura 8 - Mapa da pluviosidade média anual da Mesorregião do Triângulo Mineiro/ Alto Paranaíba.	28
Figura 9 - Exemplo de variação do nível d'água em um poço. Δh corresponde à diferença entre o pico na subida e o ponto mais baixo da curva antecedente extrapolada até o momento do pico.	32
Figura 10 - Perfis construtivos dos poços de monitoramento utilizados. A) PM 1 e PM 2 no município de Araguari - MG. B) PM 3 e PM 4 no município de Tupaciguara – MG.	36
Figura 11 - Mapa de localização dos poços de monitoramento e das estações pluviométricas utilizadas.....	37
Figura 12 - Dados do Poço RIMAS 3100020036 - PM 1: profundidade dos níveis d'água e valores de precipitação obtidos na Estação Pluviométrica Araguari 1848010 - Estação 1, de 2011 a 2021. Os índices R_n representam o quociente de variação dos níveis freáticos analisados (Δh).	39
Figura 13 - Dados do Poço RIMAS 3100020037 - PM 2: profundidade dos níveis d'água e valores de precipitação obtidos na Estação Pluviométrica Araguari 1848010 - Estação 1, de 2011 a 2021. Os índices R_n representam o quociente de variação dos níveis freáticos analisados (Δh).	41

Figura 14 - Dados do poço rimas 3100020113 - PM 3: profundidade dos níveis d'água e valores de precipitação obtidos na Estação Pluviométrica Tupaciguara 1848006 - Estação 2, de 2011 a 2021. Os índices Rn representam o quociente de variação dos níveis freáticos analisados (Δh). 43

Figura 15 - Dados do Poço RIMAS 3100020429 - PM 4: profundidades dos níveis d'água e valores de precipitação obtidos na Estação Pluviométrica Tupaciguara 1848006 - Estação 2, do ano de 2012 a 2021. Os índices Rn representam o quociente de variação dos níveis freáticos analisados (Δh). 45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de localização dos poços de monitoramento e estações pluviométricas analisadas no trabalho.....	34
Tabela 2 - Valores das variações dos níveis d'água (Δh) obtidos no PM 1 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.	39
Tabela 3 - Valores anuais das precipitações identificadas na Estação 1, em Araguari.	40
Tabela 4 - Valores das variações dos níveis d'água (Δh) obtidos no PM 2 e respectivos valores de recarga para cada curva de recessão traçada.....	41
Tabela 5 - Valores anuais das precipitações identificadas na Estação 1, em Araguari.	42
Tabela 6 - Valores das variações dos níveis d'água (Δh) obtidos no PM 3 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.	43
Tabela 7 - Valores anuais das precipitações identificadas na Estação 2, em Tupaciguara.	44
Tabela 8 - Valores das variações dos níveis d'água (Δh) obtidos no PM 4 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.	45
Tabela 9 – Valores anuais das precipitações identificadas na Estação 2, em Tupaciguara.....	46
Tabela 10 - Resumo dos valores de precipitação, recarga, taxas relativas às chuvas e variação do nível estático nos poços analisados.	47
Tabela 11 – Dados de profundidade dos poços e profundidades dos filtros dos poços analisados.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Aquíferos e principais propriedades	13
2.2. Aspectos sobre recarga dos aquíferos livres.....	17
3. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA REGIONAL	19
3.1. Aspectos Gerais	19
3.2. Grupo Caiuá.....	22
3.3. Grupo Bauru.....	23
3.4. Hidrogeologia Regional	24
4. ÁREA DE ESTUDO	24
4.1. Localização	24
4.2. Caracterização física.....	26
4.2.1. Geomorfologia	26
4.2.2. Pedologia	27
4.2.3. Clima e precipitação	27
4.3. Geologia local	28
4.4. Hidrogeologia Local.....	30
5. METODOLOGIA	31
5.1. Método da Variação do Nível d'Água (VNA)	31
5.2. Revisão bibliográfica	33
5.3. Aquisição dos dados.....	34
5.4. Tratamento dos dados	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
6.1. PM 1 - Poço de monitoramento RIMAS 3100020036.....	38
6.2. PM 2 - Poço de monitoramento RIMAS 3100020037	40
6.3. PM 3 - Poço de monitoramento RIMAS 3100020113	42

6.4. PM 4 - Poço de monitoramento RIMAS 3100020429	44
6.5. Análise dos valores de recarga.....	46
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE A – Poço de monitoramento PM 1	54
APÊNDICE B – Poço de monitoramento PM 2.....	58
APÊNDICE C – Poço de monitoramento PM 3	62
APÊNDICE D – Poço de monitoramento PM 4	66

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O abastecimento hídrico para a população brasileira é realizado por águas superficiais e subterrâneas, em quantidades variáveis, que dependem das demandas, das qualidades e das quantidades regionais e/ou locais disponíveis.

No Brasil, a disponibilidade hídrica total de águas superficiais é da ordem de 78.600 mil m^3/s , considerando-se resultado dos escoamentos contribuintes de todas as regiões hidrográficas, sendo um dos países mais ricos em águas superficiais (ANA, 2019). A distribuição territorial dos recursos hídricos superficiais no Brasil, decorrente da grande variabilidade climática do país, apresenta-se em grande desigualdade: a Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental apresenta a maior escassez de água, com disponibilidade hídrica inferior a 100 m^3/s ; a Região Hidrográfica Amazônica possui disponibilidade hídrica extremamente alta, com vazões próximas a 65.617 mil m^3/s . A Região Hidrográfica Amazônica, composta pelos estados do Amazonas, Acre, Amapá, Roraima e Rondônia, detém 83% da disponibilidade de recursos hídricos brasileiros superficiais, restando menos de 20% para as outras regiões hidrográficas (ANA, 2019).

A disponibilidade de água subterrânea no Brasil atinge em torno de 14.650 m^3/s (ANA, 2019). As águas subterrâneas representam 97% das águas doces e líquidas do planeta, tornando os aquíferos o maior reservatório de águas potáveis, distribuídos em diferentes domínios como aquíferos fraturado-cárstico, fraturado, fraturado vulcânico e poroso (Hirata et al., 2019).

Essenciais para a vida, as águas subterrâneas são responsáveis por sustentar diversos sistemas hídricos, como lagos, rios, mangues e pântanos, servindo como abastecimento das cidades e campos, o que as tornam indispensáveis em várias atividades econômicas (Hirata et al., 2019). Muitas vezes a ausência de boas práticas de gerenciamento dos recursos hídricos promove a degradação da maioria dos cursos d'água, mananciais superficiais e subterrâneos, causando poluição e contaminação em muitos municípios brasileiros (ANA, 2019).

Segundo dados da ONU (2021), nas últimas décadas houve um avanço significativo no número de habitantes do mundo, o que levou a demanda total de água aumentar em seis vezes no último século e continuar a avançar a uma taxa de 1% ao ano, sendo utilizada em indústrias, uso doméstico e principalmente agrícola (Rebouças, 2001).

A expansão da agricultura irrigada no território brasileiro tem intensificado o uso das águas subterrâneas e das fontes superficiais, com destaque para as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste (ANA, 2017). Segundo dados da FAO (2020), o Brasil ocupa a sexta posição na relação de países com as maiores áreas equipadas para irrigação do mundo, possuindo área de 8,2 milhões de hectares (ANA, 2021).

Em 2018, a demanda de água no Brasil, tanto superficial quanto subterrânea, para irrigação foi de 1019,9 m³/s e para abastecimento público de 500,6 m³/s, correspondendo a 49,8% e 24,4%, respectivamente, do total de água retirado no país (ANA, 2019). No estado de Minas Gerais, a retirada de água corresponde a 59,5% para irrigação e 16,4% para abastecimento urbano (IGAM, 2019), sendo o principal estado na utilização de águas subterrâneas para o uso agrícola do Brasil (CPRM, 2018).

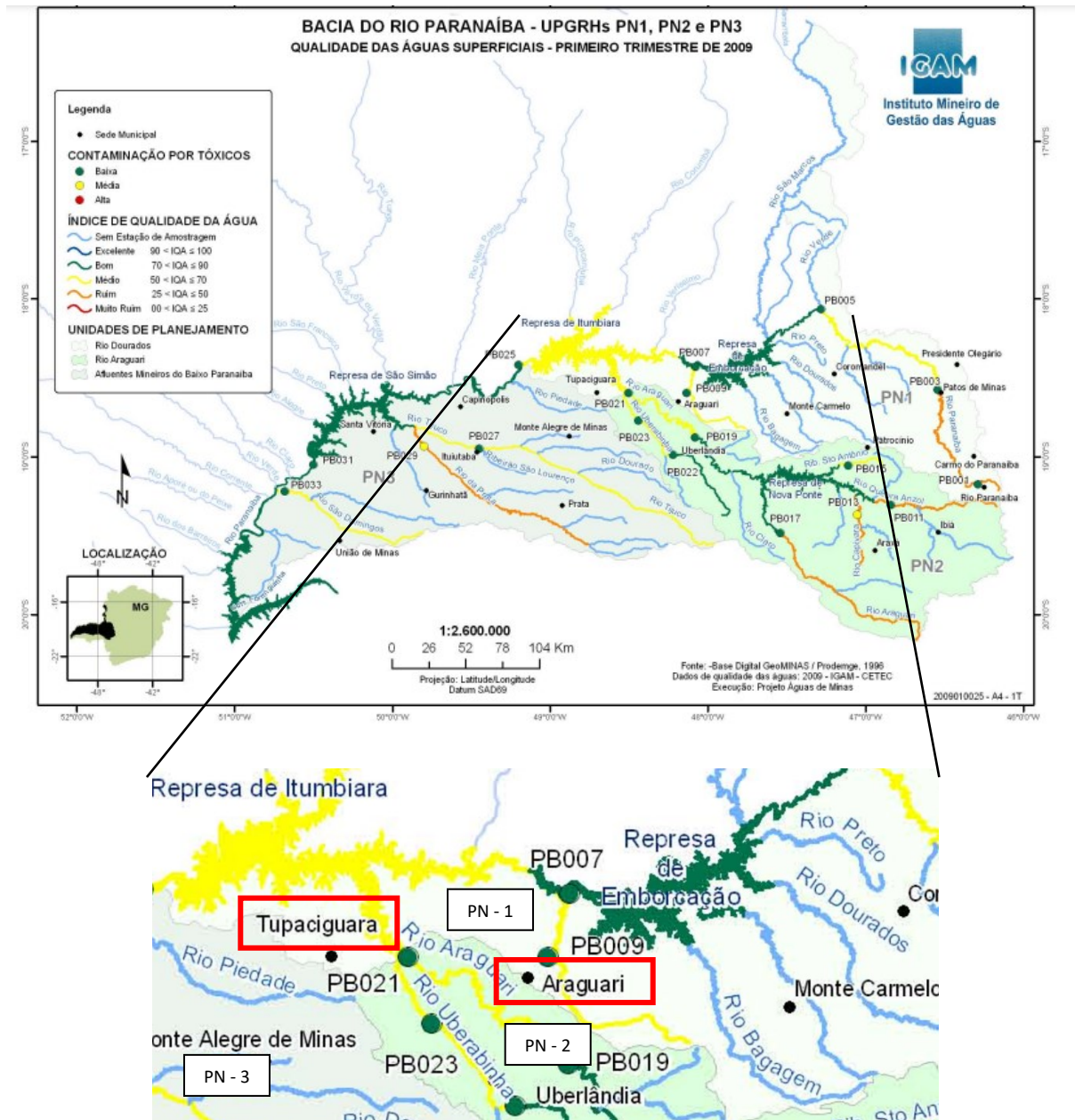
Segundo Landau & Guimarães (2011), cerca de 40% do total de pivôs centrais (equipamento de irrigação utilizado na agricultura) do estado de Minas Gerais estão concentrados na bacia hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Rio Paranaíba (PN), onde se localizam os municípios de Tupaciguara e Araguari, que constituem as áreas de estudo deste trabalho.

Ambos municípios integram a Unidade de Planejamento de Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) dos Afluentes Mineiros da Bacia do Rio Paranaíba (Deliberação Normativa nº 6, 04 de outubro de 2002), com partes de seus territórios inseridos nas 3 sub unidades da bacia: Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Alto Paranaíba (PN1) (Figura 1), Bacia do Rio Araguari (PN2) e Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba (PN3). A Bacia do Rio Paranaíba no estado de Minas Gerais concentra 41 das 65 áreas de conflito declaradas (DAC) oficialmente pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), caracterizadas por possuírem demandas superiores às vazões outorgáveis.

As áreas de conflito pelo uso dos recursos hídricos em Minas Gerais são declaradas pelo IGAM desde 2005, sendo conceituadas, de acordo com o Decreto Estadual nº 47.705/2019, como:

“Situação de indisponibilidade hídrica aferida pelo balanço hídrico de vazões outorgadas, em que a demanda pelo uso dos recursos hídricos de uma porção hidrográfica seja superior à vazão outorgável” (IGAM, 2020a).

Figura 1 - Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Rio Paranaíba (PN). Sendo: PN1 - Bacia dos Afluentes Mineiros do Alto Paranaíba (cor azul claro), PN2 - Bacia do Rio Araguari (cor verde), PN 3 - Bacia dos Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba (cor cinza). Em detalhe a articulação dos municípios de Araguari e Tupaciguara.



Fonte: IGAM, 2020b.

Os municípios de Tupaciguara e Araguari são supridos exclusivamente por águas subterrâneas, sendo o Aquífero Bauru o mais utilizado para o abastecimento público, irrigação e uso industrial. O aproveitamento das águas subterrâneas na região é intensa, necessitando de maior conhecimento hidrogeológico para auxiliar na implementação de estratégias de gestão dos recursos hídricos (Velásquez et al., 2008).

O estudo das recargas dos aquíferos é imprescindível para a manutenção tanto das águas subterrâneas quanto das águas superficiais, pois trata-se de um importante componente na regulação do nível de base das bacias hidrográficas.

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a contribuição da pluviosidade na recarga do Aquífero Bauru em Araguari e Tupaciguara, através do método de Variação do Nível d'Água (Healy & Cook, 2002) aplicado aos dados disponíveis de quatro poços de monitoramento pertencentes à plataforma RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas) da CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e aos dados de duas estações pluviométricas disponíveis no Portal HidroWeb, da Agência Nacional de Águas (ANA). Como objetivo secundário, o estudo visa contribuir para o avanço das discussões sobre a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais na Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aquíferos e principais propriedades

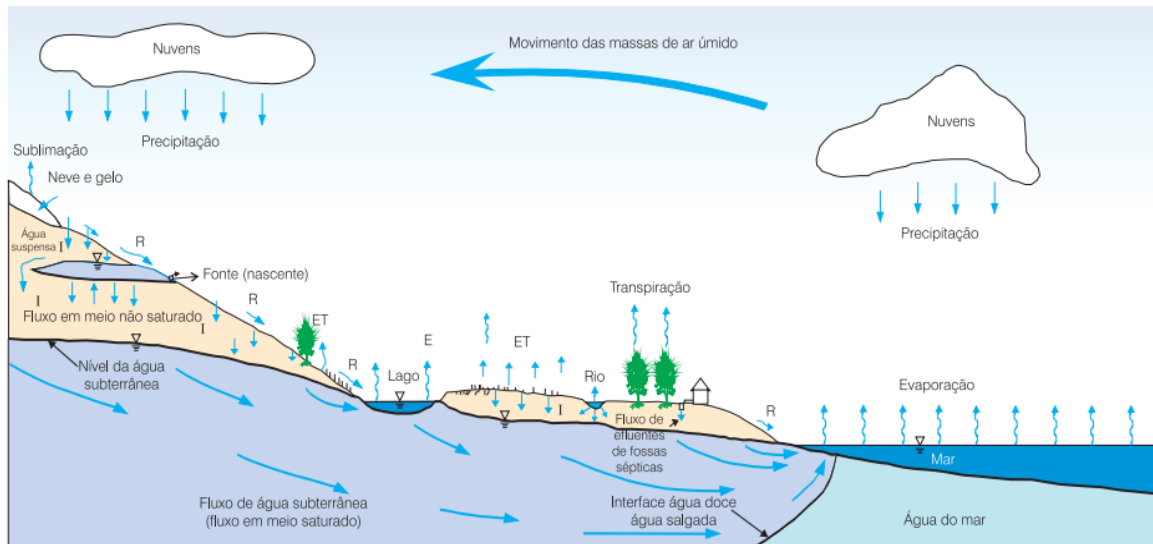
As águas subterrâneas são compreendidas como aquelas que ocorrem abaixo do nível freático ou nível de saturação, contidas nos solos e nas formações geológicas totalmente saturadas (Freeze & Cherry, 1979).

O ciclo hidrológico é responsável por quase toda a água subterrânea existente na Terra, onde a natureza estabelece a circulação da água do oceano para a atmosfera e da atmosfera para os continentes (Figura 2), onde retorna ao oceano superficialmente ou subterraneamente. Este ciclo possui alguns fatores que viabilizam o processo de circulação de água, como a ação da gravidade e o tipo da cobertura vegetal, responsáveis pelo processo no solo e subsolo, assim como os fatores climáticos são responsáveis pela atmosfera e superfícies líquidas, representadas pelos lagos, rios, mares e o oceanos (Feitosa et al., 2008).

De acordo com Freezy & Cherry (1976), um aquífero pode ser definido como uma unidade geológica permeável, saturada, capaz de transmitir água em quantidades significativas sob gradientes hidráulicos naturais. As unidades aquíferas mais comuns são

compostas por areias não consolidadas e cascalhos, rochas sedimentares permeáveis como arenitos e calcários, e rochas cristalinas e vulcânicas fortemente fraturadas.

Figura 2 - Representação do ciclo hidrológico. E: evaporação; ET: evapotranspiração; I: infiltração; R: escoamento superficial (deflúvio).



Fonte: Feitosa et al. 2018; modificado de Bear & Verruijt (1987).

Os aquíferos podem ser classificados segundo a pressão das águas em suas superfícies limitrofes (topo e base), sendo denominados confinados ou livres. Nos aquíferos confinados, a pressão de água em seu topo é maior que a pressão atmosférica. Os aquíferos livres, também conhecidos por freáticos, tem como seu limite superior a superfície freática ou de saturação, a partir do qual todos os pontos estão sob a pressão atmosférica (Feitosa et al., 2008). Os aquíferos confinados ocorrem em profundidade e os aquíferos livres ocorrem próximos à superfície.

A recarga dos aquíferos livres ocorre pela infiltração descendente através da zona não saturada, também chamada de recarga direta. Já a recarga nos aquíferos confinados acontecem nas áreas onde os aquíferos afloram ou pela lenta infiltração através de camadas semi confinantes (Fetter, 2001).

A circulação das águas subterrâneas relaciona-se com algumas propriedades dos aquíferos, como porosidade, condutividade hidráulica, transmissividade e armazenamento. As definições destas propriedades são essenciais para a compreensão dos processos de recarga dos aquíferos e da metodologia apresentada.

A porosidade (n), também denominada porosidade volumétrica ou porosidade total, é um parâmetro físico expresso pela razão do volume de vazios de uma rocha ou solo pelo volume total dos mesmos (Freezy & Cherry, 1976). A porosidade é expressa por:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo: n a porosidade;

V_v o volume de vazios;

V_t o volume total.

Existem dois tipos de porosidade, que dependem dos mecanismos deposicionais dos sedimentos inconsolidados e rochas sedimentares, e dos processos geológicos que atuaram nas rochas ao longo de sua evolução geológica. A porosidade primária é relativa à existência de vazios inerentes à matriz da rocha ou solo, formada durante sua gênese, já a porosidade secundária é formada por fenômenos subsequentes que afetaram a rocha, como fraturas e/ou dissoluções controladas por estruturas regionais (Freezy & Cherry, 1976).

A porosidade é a propriedade mais importante que possibilita o armazenamento e a circulação da água subterrânea, influenciando diretamente a permeabilidade e condutividade hidráulica dos materiais. De modo geral, a velocidade da água subterrânea depende da forma, quantidade, distribuição e sobretudo, da interconectividade dos poros (Kresic, 2007).

A porosidade efetiva (n_e) é a porosidade disponível para o fluxo da água e corresponde apenas aos poros que são interconectados (Fetter, 2001). Porosidade efetiva é frequentemente comparada ao rendimento específico em aquíferos porosos livres, que corresponde ao volume de água dos espaços porosos que pode ser facilmente drenado por gravidade devido à mudança da carga hidráulica, conforme citado abaixo. Uma diferença importante entre os conceitos de rendimento específico e porosidade específica é que o primeiro está relacionado ao volume de água que pode ser extraído do aquífero, enquanto a porosidade efetiva se relaciona à velocidade da água subterrânea e fluxo através dos espaços dos poros interconectados (Kresic, 2007).

A condutividade hidráulica corresponde à facilidade que o aquífero possui de efetuar a condução hidráulica, levando em consideração as características do meio poroso, como porosidade, distribuição, tamanho, arranjo e forma das partículas, além das propriedades do fluido que está em movimento, como a massa específica e a viscosidade (Feitosa et al., 2008).

Pode ser compreendida numericamente, em um meio isotrópico, igual à vazão que passa em uma área unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário. A condutividade hidráulica pode ser expressa da seguinte forma:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{kg}{v} \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo: K a condutividade hidráulica;

k a permeabilidade intrínseca do meio poroso;

ρ a massa específica do fluido,

g a aceleração da gravidade;

μ a viscosidade absoluta;

v a viscosidade cinemática = μ/ρ .

A transmissividade representa a quantidade de água que pode ser transportada horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero (Figura 3), podendo ser considerada como a taxa de escoamento de água por uma faixa vertical do aquífero com largura unitária sujeita a um gradiente hidráulico unitário (Feitosa et al. 2008). Segundo Freeze & Cherry (1979), a transmissividade para um aquífero livre não é muito bem definida como para o aquífero confinado, mas é determinada pela mesma equação:

$$T = Kb \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo: T a transmissividade;

K a condutividade hidráulica;

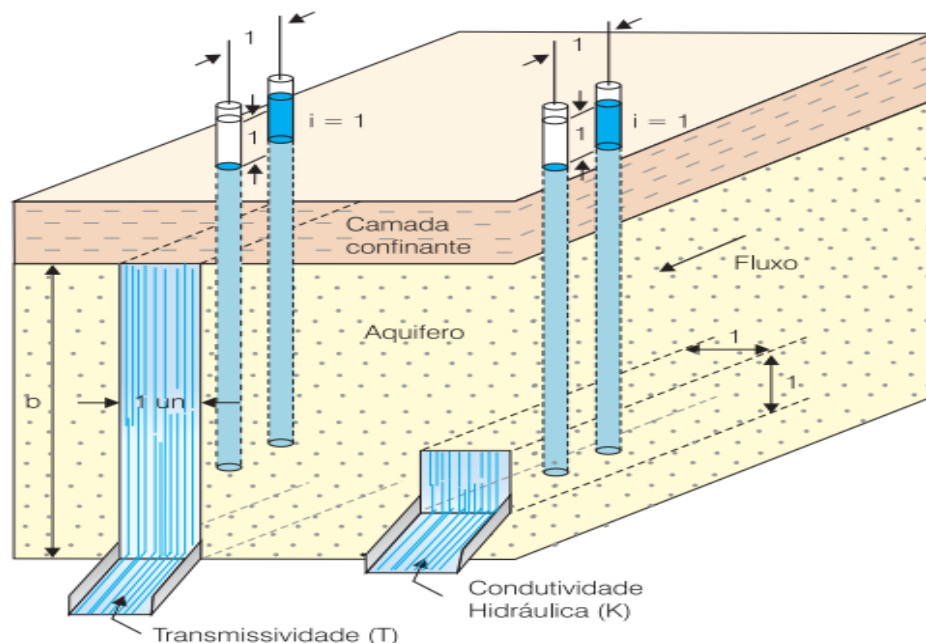
b a espessura saturada do aquífero.

O armazenamento específico é definido como o volume de água que um aquífero libera por um volume unitário de área do aquífero submetido a um declínio unitário de carga hidráulica, sendo dependente das propriedades do meio poroso e da água (Feitosa et al. 2008). A liberação de água nos aquíferos livres, em que a água é drenada para poços ou fontes em função do escoamento dos poros, é distinta da liberação de água nos aquíferos confinados. Para os aquíferos livres, o termo armazenamento é conhecido como rendimento específico (Sy) ou armazenamento livre, caracterizado pelo volume de água que a formação libera do

armazenamento por unidade de área da formação por unidade de redução no nível freático (Freeze & Cherry, 1979).

O volume de água acumulado sazonalmente acima do lençol freático mínimo em um aquífero livre é conhecido como reserva renovável. Esta reserva varia de um ano para outro, em função dos períodos chuvosos e de estiagem (Feitosa et al., 2008). A aplicação do método VNA para o cálculo desta recarga é possível, pois o volume desta reserva está diretamente relacionado à capacidade que o aquífero livre tem de armazenar a água, tornar-se saturado e drenar esta água por gravidade. Esta capacidade de armazenamento é o rendimento específico ou porosidade efetiva do aquífero livre.

Figura 3 - Ilustração expondo os conceitos de transmissividade (T) e Condutividade hidráulica (K).



Fonte: Feitosa et al. (2008), modificado de Driscoll (1986).

2.2. Aspectos sobre recarga dos aquíferos livres

Segundo Healy (2010), a recarga é compreendida como a afluência de água atingindo o lençol freático e adicionada ao armazenamento de água subterrânea. A definição não inclui o fluxo de água de outros aquíferos adjacentes, sendo referida apenas a um fluxo entre o mesmo aquífero, expressa em termos de volume por unidade de tempo (L^3/T) como m^3/dia .

As águas subterrâneas recebem fluxos de recargas difusa e/ou localizada, sendo a primeira decorrente da infiltração da precipitação na superfície do solo e sua percolação

através da zona não saturada, alcançando o lençol freático. A entrada de água na subsuperfície, reconhecida como infiltração, pode se tornar uma recarga potencial ou voltar à atmosfera pelo processo de evapotranspiração, da mesma forma que também pode permanecer retida na zona não saturada por período de tempo indeterminado. Já a recarga localizada, compreende a infiltração de águas superficiais, como lagos, rios e canais, nos aquíferos (Healy, 2010).

O nível d'água nos aquíferos livres varia como resposta à recarga e descarga da água subterrânea. O nível aumenta se a recarga exceder seu consumo e abaixa se a evaporação e os fluxos horizontais consomem a água armazenada. Considerando fluxos de água subterrânea constantes, as flutuações do nível freático expressam a recarga de água subterrânea nos aquíferos livres (Seiler & Gat, 2007).

O clima, assim como a frequência, duração, intensidade dos eventos de precipitação são, portanto, os fatores mais importantes dos processos de recarga dos aquíferos livres. Também podem ser considerados o relevo, vegetação e tipo do solo, pois influenciam diretamente o mecanismo de infiltração (Healy, 2010). Também estão sendo consideradas as alterações climáticas globais que ocorrem na atualidade.

A atividade antrópica também pode ser considerada como elemento de intervenção nos processos de recarga, modificando a interação entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Rabelo, 2006). Essa interferência ocorre por meio da alteração da redistribuição espacial de recarga e das condições de permeabilidade do solo, como atividades e construções nas áreas urbanas, de desmatamentos ou modificação de cobertura vegetal nativa por outra incomum, e, do uso de irrigação, seja por águas subterrâneas ou superficiais (Leduc et al., 2001 apud Rabelo, 2006).

Apesar de ser um dos elementos mais importantes nos estudos das águas subterrâneas, a recarga é um dos componentes menos compreendidos, pois apresentam alta variabilidade no espaço e no tempo, dificultando a sua quantificação. De suma importância para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, juntamente com a quantificação do suprimento das águas subterrâneas, as taxas de recarga, bem como o tempo e o local, são de grande relevância também em áreas de contaminação, uma vez que o fluxo de contaminantes aumenta conforme a taxa de recarga cresce (Healy, 2010).

Segundo Barreto (2006), o gerenciamento dos recursos hídricos possui como pré-requisito a quantificação da recarga das águas subterrâneas, principalmente em regiões

semiáridas e/ou áreas onde há a superexploração de águas. A identificação de áreas e mecanismos de recarga são fundamentais para a gestão das águas, pois tais recursos são essenciais para o abastecimento populacional e desenvolvimento econômico, principalmente pela crescente demanda atual por água.

3. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA REGIONAL

3.1. Aspectos Gerais

A área de estudo, localizada na região do Triângulo Mineiro, insere-se na porção nordeste da Bacia Bauru, entidade de idade neocretácea, próxima ao limite com a unidade neoproterozoica denominada Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967). A Bacia Bauru (Figura 4) situa-se na região Sudeste, compreendendo porções do nordeste do Mato Grosso do Sul, sudeste do Mato Grosso, centro-oeste de São Paulo, sul de Goiás e a porção oeste de Minas Gerais, ocupando aproximadamente 330.000 km² (Batezelli, 2003).

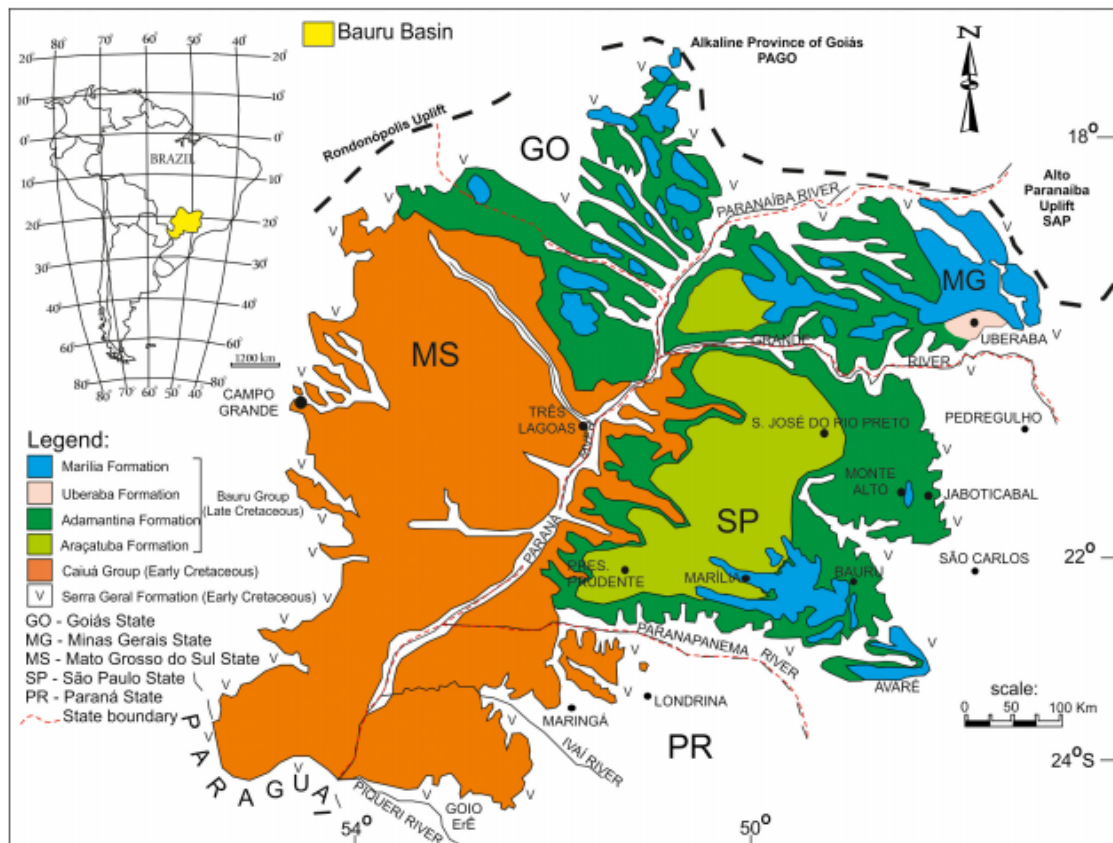
O desenvolvimento da Bacia Bauru ocorreu durante o Cretáceo Superior, em decorrência da separação Brasil-África, a partir das imposições dos processos tectônicos de abatimento de camadas sobre a região centro-norte da Bacia do Paraná. A Bacia Bauru, estabelecida sobre o substrato basáltico da Formação Serra Geral e sobre as rochas arenosas do Grupo Caiuá, possui formato alongado na direção N/NE (Batezelli, 2003).

Embora não haja estudos específicos sobre os mecanismos tectônicos responsáveis por sua origem, alguns autores atribuem a gênese da Bacia Bauru à subsidência termal da porção meridional da Plataforma Sul-Americana, após os eventos magmáticos que resultaram na Formação Serra Geral (Riccomini 1997; Fernandes & Coimbra 2000). Batezelli (2015) sugere que a bacia se formou por processos flexurais adjacentes ao Soerguimento do Alto Paranaíba e Serra do Mar. O contexto deposicional da bacia ocorreu em clima árido a semiárido, entre o Cretáceo Superior e seu preenchimento se deu por sedimentos fluviais e eólicos, sobre o substrato basáltico da Formação Serra Geral (Milani et al. 2007).

A Bacia Bauru, em semelhança com a Bacia do Paraná, possui limites tectônicos e/ ou erosivos, evidenciados a leste pelos lineamentos São Carlos-Leme e Ibitinga-Botucatu, a sul e sudeste pelo lineamento Paranapanema, o Soerguimento do Alto Paranaíba/ Arco do

Paranaíba ao norte e nordeste, e a noroeste pela Antéclise de Rondonópolis (Fernandes & Coimbra, 1996; Riccomini, 1997). Esses limites erosivos possuem relação com o evento que sucedeu na reconstrução do ambiente tectônico no Terciário, identificado nas bordas pelo Soerguimento do Alto Paranaíba e a estruturação da Serra do Mar (Batezelli, 2003).

Figura 4 - Mapa da Bacia Bauru evidenciando sua extensão pelos estados do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, São Paulo, Goiás e Minas Gerais e sua divisão em Grupo Bauru e Grupo Caiuá.



Fonte: Batezelli (2017); modificado de Batezelli (2003).

Os primeiros trabalhos sobre a Bacia Bauru, segundo Fernandes & Ribeiro (2015), começaram no início do século XX com os trabalhos de Gonzaga de Campos em 1905, Hussak em 1906, e, conseqüentemente, a descoberta dos primeiros fósseis por Ihering em 1911. A primeira elaboração do mapa geológico da bacia foi realizada por Florence & Pacheco em 1929, que propuseram a subdivisão em duas unidades: Caiuá e Bauru.

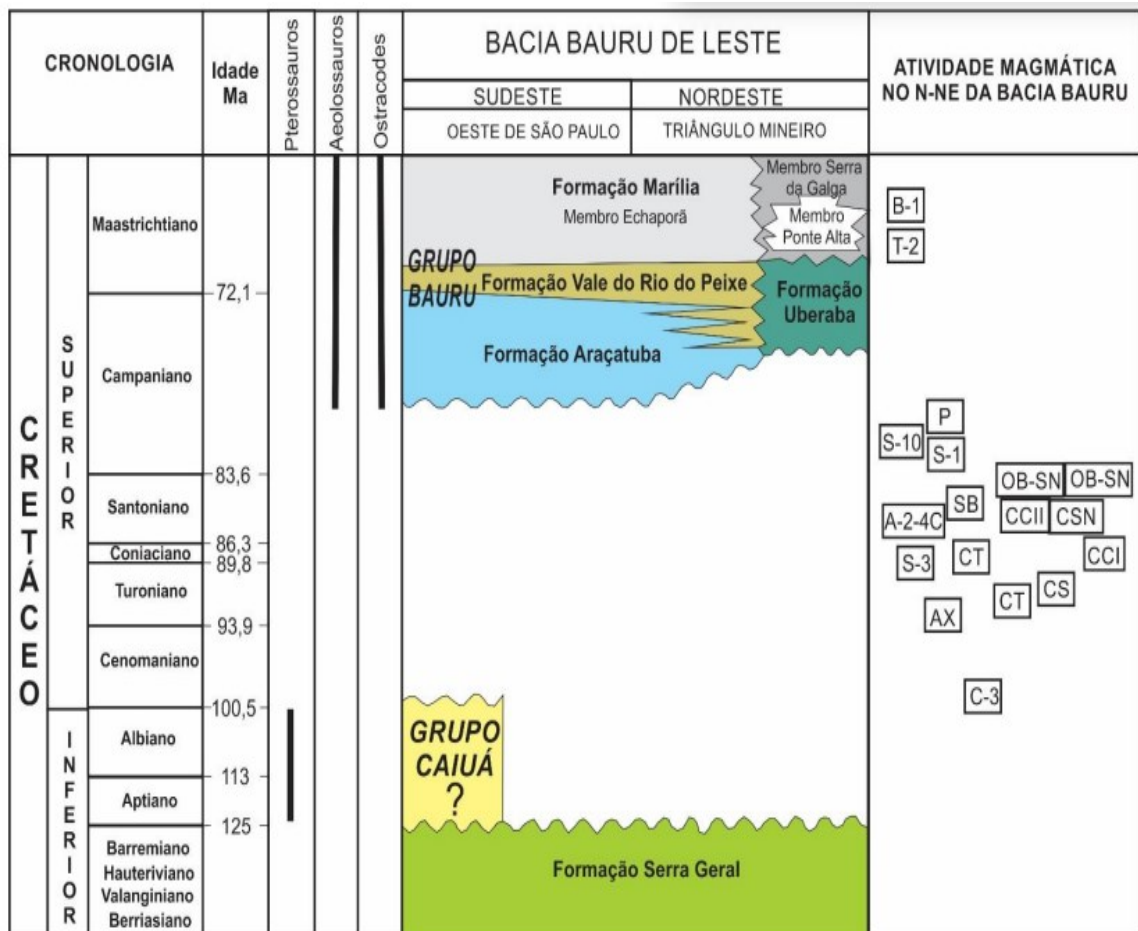
A partir da década de 1940, Setzer, Almeida & Barbosa e Mezzalira & Arruda estabeleceram as primeiras tentativas para definir as subdivisões estratigráficas do Grupo Bauru em São Paulo. Em Minas Gerais, foi alvo de estudos e mapeamentos a partir da década de 1960 por Hasui, Barbosa et al., Ladeira et al. e Saad et al. Já nos estados de Mato Grosso e Goiás, os estudos vieram anos mais tarde, em 1984 por Souza Jr. As primeiras propostas

estratigráficas da bacia foram sugeridas por Almeida et al. e Soares et al. em 1980, sendo utilizadas nas décadas seguintes (Fernandes & Ribeiro, 2015).

A clássica publicação, pioneira na caracterização estratigráfica do Grupo Bauru foi proposta por Soares et al. (1980), onde os autores diferenciam o arcabouço em quatro unidades: Formação Caiuá, Formação Adamantina, Formação Santo Anastácio e Formação Marília. Mais tarde, Fernandes & Coimbra (1994) propuseram uma nova distribuição para o arranjo estratigráfico das unidades, segmentando a bacia em dois diferentes grupos: Bauru e Caiuá.

As concepções estratigráficas aqui admitidas para a Bacia Bauru são aquelas baseadas em Soares et al. (1980) e adaptadas por Batezelli (2015). Nela, o Grupo Bauru é constituído pelas formações Araçatuba, Uberaba, Adamantina (também conhecida por Vale do Rio do Peixe) e Marília e o Grupo Caiuá, composto pelas Formações Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio (Figura 5).

Figura 5 - Carta cronoestratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru.



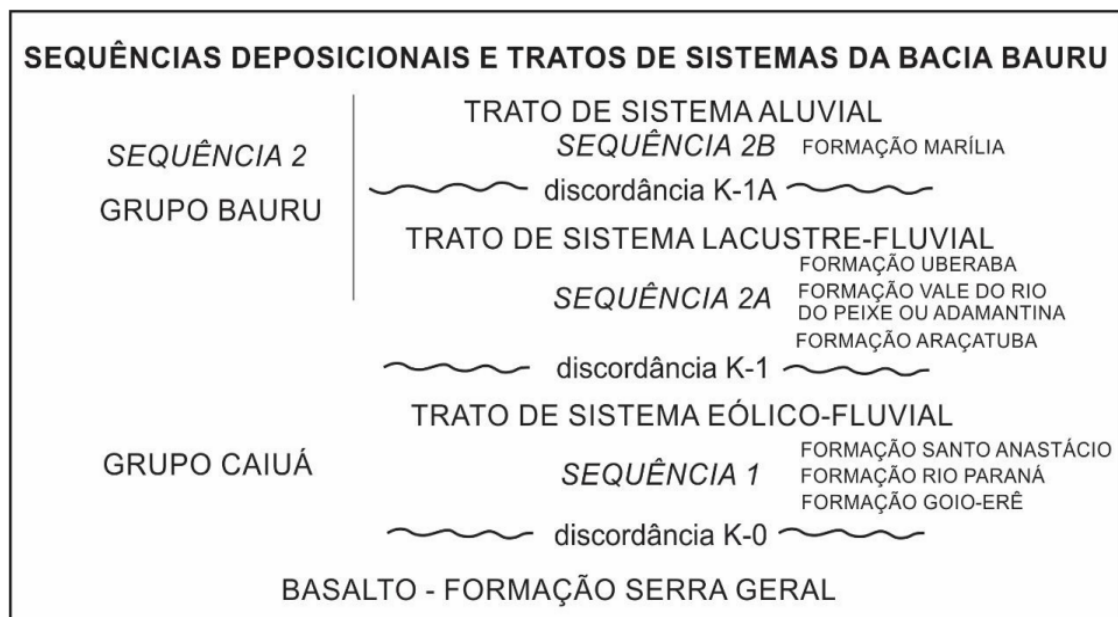
Fonte: Batezelli (2015).

3.2. Grupo Caiuá

O Grupo Caiuá é caracterizado como uma sequência deposicional de trato de sistema eólico-fluvial (Figura 6), compreendendo fácies de dunas, interdunas e paleossolos. As Formações Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio, correspondentes ao Cretáceo Inferior, são integrantes desse grupo, sendo assentados em discordância erosiva sobre as rochas basálticas da Formação Serra Geral (Batezelli, 2015).

A Formação Rio Paraná é caracterizada por arenitos finos a muito finos, dispostos em lâminas bimodais, com coloração vermelha a castanho, e presença de estratificação cruzada de médio a grande porte (Fernandes & Coimbra, 1994). Os arenitos desta unidade possuem estratificações cruzadas acanaladas tangenciais, que possibilitam a interpretação como arenitos eólicos.

Figura 6 - Representação das sequências deposicionais, dos tratos de sistemas e das discordâncias relacionados com a Bacia Bauru.



Fonte: Seer & Moraes (2017).

A Formação Goio Erê é representada por arenitos quartzosos com estratificação cruzada de médio a pequeno porte, dispostos em estratos tabulares, de granulometria fina a muito fina, apresentando coloração cinza-arroxeadada a marrom-avermelhada (Fernandes & Coimbra, 1994).

Já a Formação Santo Anastácio é composta por arenitos finos, com coloração amarelo-avermelhada, apresentando marcas de dissolução e de raízes que ocorrem no topo das fácies de dunas. A unidade é interpretada como solos originados em clima úmido e desenvolvido ao longo período de aquiescência tectônica, marcado pelo término do primeiro ciclo de sedimentação da Bacia Bauru (Fernandes & Coimbra, 1994).

3.3. Grupo Bauru

O Grupo Bauru compreende duas sequências deposicionais, sendo tratos de sistema lacustre-fluvial e sistema aluvial (Figura 6). O trato de sistema lacustre-fluvial é composto pelas Formações Araçatuba, Adamantina e Uberaba, e o trato de sistema aluvial é representado pela Formação Marília (Batezelli, 2015).

A Formação Araçatuba é composta por arenitos muito finos, siltosos e siltitos arenosos, geralmente maciços, de coloração cinza-esverdeada, ocasionalmente apresentando estratificações plano-paralelas e cruzadas acanaladas de pequeno porte, sugerindo ambiente deposicional do tipo lacustre (Batezelli et al., 2003).

A Formação Uberaba é caracterizada por arenitos com feições de corpos lenticulares, havendo a presença de níveis centimétricos de siltito, lamito e conglomerados subordinados, além da presença de níveis de cimentação e nódulos carbonáticos. As estruturas sedimentares características da unidade são as estratificações cruzadas tabulares e acanaladas de pequeno a médio porte, estratificação plano-paralela e estruturas deformacionais e de injeções de argila (Batezelli, 2003).

A Formação Adamantina, proposta formalmente por Soares et al. (1980), é caracterizada por lamitos alternados com arenitos finos a médios, com coloração avermelhada, estratificações plano-paralelas e cruzadas de pequeno a médio porte, que possibilita interpretar a deposição por processos eólicos (Batezelli, 2003).

A Formação Marília está presente em porções dos estados de Goiás, São Paulo, e Minas Gerais (Triângulo Mineiro), designada inicialmente por Almeida & Barbosa (1953 apud Fernandes & Coimbra, 2000), em referência à unidade de topo do Grupo Bauru. A unidade foi descrita por Soares et al. (1980) como uma sucessão formada essencialmente por arenitos grossos e conglomeráticos, apresentando grãos angulosos e mal selecionados, com ocorrências de minerais pesados e “matriz variável”, com ocorrências subordinadas de frações silte.

3.4. Hidrogeologia Regional

A região de estudo é caracterizada pela ocorrência das unidades aquíferas Serra Geral e Bauru, sendo que mais de 90% dos poços para abastecimento de água estão inseridos no Aquífero Bauru (Oliveira, 2002).

O Aquífero Serra Geral é pertencente à Bacia do Paraná, constituindo um dos aquíferos mais conhecidos e explotados desta bacia. O aquífero é do tipo fraturado, apresenta-se com padrão de fraturamento complexo, e está associados às rochas basálticas da formação homônima, possuindo espessuras entre 200 e 250 metros (Velásquez et al. 2008). Nos locais em que os basaltos não são aflorantes, o aquífero é sobreposto por um pacote de sedimentos arenosos da Formação Marília, com espessura média de 50 a 60 metros, e das coberturas colúvio-eluvionares lateríticas (Velásquez et al., 2008).

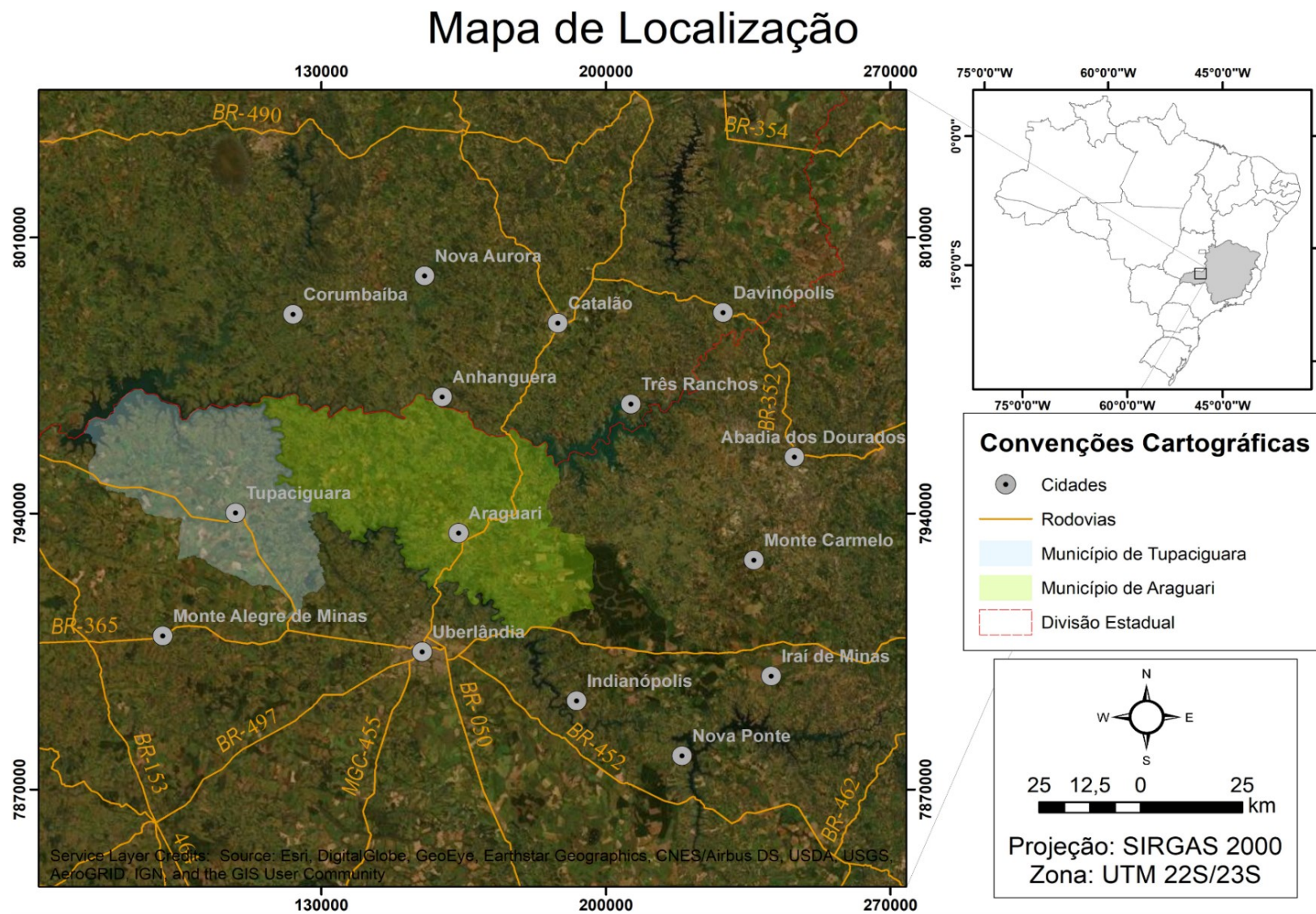
Segundo dados de Feitosa & Manoel Filho (2000, apud Velásquez et al., 2008), a vazão média obtida a partir de 715 poços no Aquífero Serra Geral é de 26,6 m³/h e a capacidade específica média dos poços é de 3,29 m³/h/m. Apesar de ser uma importante fonte de abastecimento de água na Bacia do Paraná, Fiumari (2004) pontua que na região do município de Araguari, o aquífero apresenta baixa produtividade, entre 5 m³/h e 10 m³/h, com exceção de locais sob condições de maior adensamento fissural.

O Aquífero Bauru, pertencente à Bacia Bauru, compreende as rochas sedimentares dos Grupos Bauru e Caiuá, sobrepostas aos basaltos da Formação Serra Geral, caracterizando relevos aplainados. Em Minas Gerais aflora em toda a região do Triângulo Mineiro, onde faz divisa com os estados de São Paulo e Goiás (Lima & Almeida, 2012). O detalhamento do Aquífero Bauru encontra-se no item 4.4. Hidrogeologia local.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1. Localização

A área de estudo compreende as cidades de Araguari e Tupaciguara, municípios do interior de Minas Gerais, inseridos no norte do Triângulo Mineiro e na região imediata de Uberlândia (Figura 7).



Fonte: a autora.

4.2. Caracterização física

4.2.1. Geomorfologia

Segundo o projeto Radam Brasil (1983), a região do Triângulo Mineiro está inserida na subunidade Planalto Setentrional da Bacia do Paraná, sendo constituída por um conjunto de formas de relevo denominado de Domínio dos Planaltos e Chapadas da Bacia do Paraná e Chapadões Tropicais do Brasil Central.

Baccaro (1991) pontua as distinções na geomorfologia da região, definindo-as em quatro compartimentos geomorfológicos, baseadas na geologia, no nível de dissecação e nas formas apresentadas. As quatro categorias de relevo propostas são: área de relevo intensamente dissecado, área de relevo medianamente dissecado, área de relevo residual e áreas elevadas de cimeira entre 950 e 1050m, com topos planos, amplos e largos.

A área de relevo intensamente dissecado corresponde à borda da Chapada Araguari-Uberlândia, expandindo-se até os rios Grande e Paranaíba, sendo intensamente dissecada e entalhada pelos seus afluentes. Esse compartimento possui feições morfológicas associadas aos basaltos da Formação Serra Geral e pelas rochas do Grupo Araxá, com pouca presença dos arenitos do Grupo Bauru e dos sedimentos cenozoicos.

A área de relevo medianamente dissecado é constituída de topos com cotas altimétricas entre 750 e 900 metros, apresentando formatos convexos e vertentes com declividades entre 3° e 15°. A Formação Adamantina, sobreposta às rochas basálticas da Formação Serra Geral, é a mais significativa dessa feição, sendo recoberta em grande parte pelos sedimentos inconsolidados cenozoicos.

A área de relevo residual é composta por bordas escarpadas e erosivas de até 150 metros, com contornos irregulares e declividades que podem atingir até 45°, correspondendo às porções mais elevadas, em topos de divisores de água das principais bacias, entre 800 e 900 metros de altitude. Os relevos são intensamente dissecados, vinculados aos arenitos da Formação Marília, apresentam formas convexas nas vertentes e bordas escarpadas, sendo sustentadas pelas rochas cimentadas por carbonato de cálcio.

Por fim, as áreas elevadas de cimeira entre 950 e 1050 m, com topos planos, amplos e largos apresentam pouca quantidade de drenagens, vales com pouca ramificação de drenagem

e vertentes com declividades entre 3° e 5° graus. Tais áreas são sustentadas pelos arenitos da Formação Marília e recobertas pelos sedimentos do Cenozoico.

4.2.2. Pedologia

Na região do Triângulo Mineiro ocorre o predomínio dos latossolos vermelhos associados às áreas da Chapada Araguari-Uberlândia, relacionados ao Grupo Bauru. Na área urbana de Araguari, nas cotas acima de 955 metros os latossolos possuem espessuras superiores a 40 metros, diminuindo em direção às encostas e desaparecendo em 900 metros de altitude. Os cambissolos ocorrem localmente nas áreas do embasamento, representado pelo Grupo Araxá (EMBRAPA, 1980; 1999 apud Oliveira, 2002).

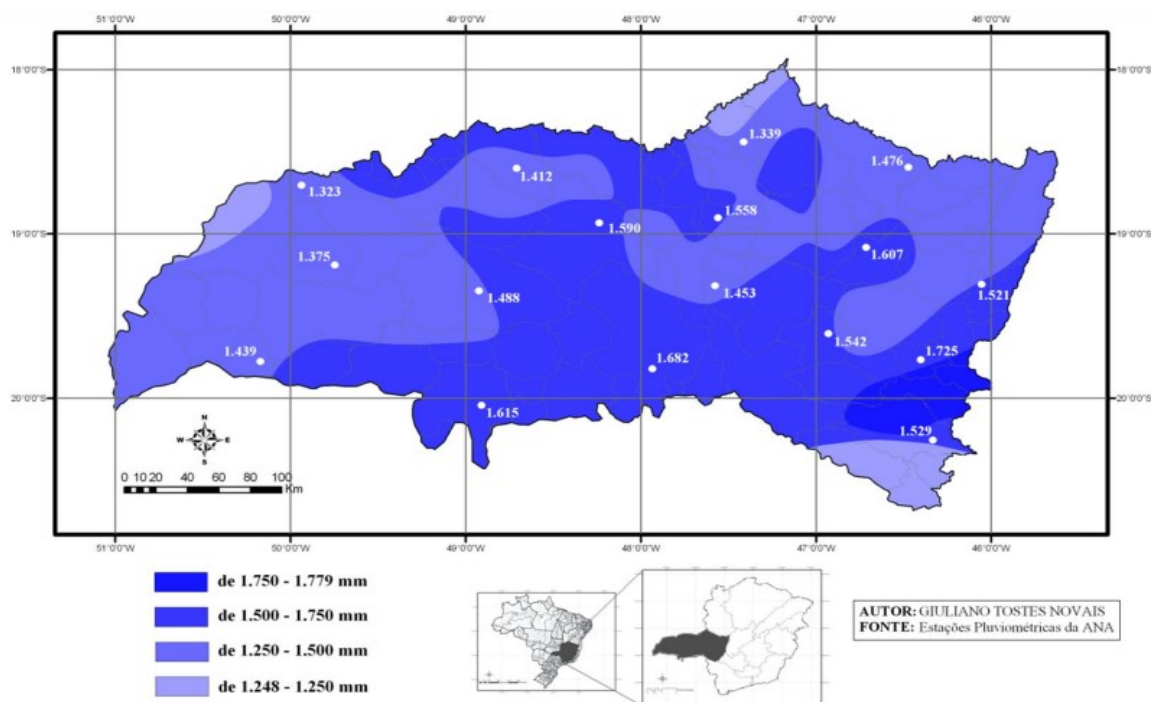
As áreas de ocorrência dos basaltos são caracterizadas pelos perfis de solos muito espessos, atingindo espessuras de 20 a 30 metros, de natureza argilosa, coloração vermelha escura a arroxeada, conhecidos na região pelo nome de “terra roxa” (Fiumari, 2004).

A alteração antrópica na região é intensa, com grandes porções utilizadas para a agricultura e pastagens, com a predominância de latossolos vermelhos e presença de argissolos (Pacheco et al., 2017).

4.2.3. Clima e precipitação

As condições climáticas da região de estudo são bem definidas em duas estações, caracterizadas pelo verão chuvoso, compreendendo os meses de outubro a março, e pelo inverno seco, nos meses de abril a setembro (Velásquez *et al.* 2008), sendo o clima predominante o Tropical Quente e Úmido (IBGE, 2002). Segundo Novais (2011), a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba possui pluviosidade média entre 1300mm e 1700mm por ano (Figura 8).

Figura 8 - Mapa da pluviosidade média anual da Mesorregião do Triângulo Mineiro/ Alto Paranaíba.



Fonte: Novais (2011).

4.3. Geologia local

A geologia da área onde estão localizados os municípios de Araguari e Tupaciguara é caracterizada na base pelo Grupo Araxá, que constitui o embasamento cristalino neoproterozoico, seguido pelos basaltos da Formação Serra Geral, de idade Mesozoica, sendo o topo composto pela Formação Marília, representante do Grupo Bauru, que constitui a unidade mais significativa da região

Grupo Araxá

Segundo Fiumari (2004), no município de Araguari o Grupo Araxá aflora em cotas inferiores a 700 metros, constituindo em geral o substrato rochoso dos rios Paranaíba e Araguari. As rochas metassedimentares do grupo são representadas por muscovita-quartzo xisto, mica xisto calcífero, muscovita-clorita xisto, estauroлита xisto, granada-biotita xisto e xistos feldspáticos, com ocorrências locais de camadas de mármore cristalinos de granulação grossa.

Formação Serra Geral

Na região de Araguari, a espessura do basalto atinge até 250 metros entre os extremos de NW e SE, aflorando entre as cotas de 880 e 900 metros. A Formação Serra Geral sobrepõe, discordantemente, os xistos do Grupo Araxá.

Grupo Bauru

O Grupo Bauru na área de estudo, representado pela Formação Marília, aflora em cotas superiores a 880 metros, com espessura média de 55 metros (Fiumari, 2004), composta por conglomerados, arenitos grossos e conglomeráticos, com teor de matriz variável e grãos angulosos (Soares et al., 1980). A unidade insere-se na porção superior do Grupo Bauru, conforme a Figura 5.

Segundo Batezelli (2003), os arenitos do Grupo Bauru são maciços ou possuem acamamento incipiente, sub-paralelo e descontínuo, com níveis de siltitos subordinados. Na região do Triângulo Mineiro, a Formação Marília apresenta alto conteúdo de cimento carbonático (CaCO_3), presente como cimento micrítico disperso na rocha ou em concentrações nas zonas de fratura (Batezelli, 2003).

A Formação Marília foi subdividida em três membros, segundo a proposta de Barcelos (1984, apud Batezelli, 2003), sendo eles Ponte Alta, Serra da Galga e Echaporã. Os membros Ponte Alta e Serra da Galga afloram na parte leste do Triângulo Mineiro, enquanto o Membro Echaporã fica restrito à porção oeste.

O Membro Ponte Alta é composto pela intercalação de arenitos conglomeráticos e conglomerados com clastos de quartzo e quartzitos milimétricos a centimétricos, intensamente cimentados por carbonato de cálcio, com associação lateral e vertical de silcretes e calcretes (Alves, 1995 apud Batezelli, 2003).

O Membro Serra da Galga possui contexto deposicional característico de leques, sendo composto por arenitos imaturos de granulação fina a grossa, por vezes conglomeráticos, e por lamitos, ocasionalmente compostos por clastos distribuídos na matriz (Fernandes & Coimbra, 1996).

O Membro Echaporã é caracterizado por arenitos de granulação fina a grossa, com alternâncias conglomeráticas, abundantes em cimentação carbonática, possuindo coloração bege, cinza claro e, quando intemperizados, vermelha. A sedimentação desse membro é

interpretada como decorrente da deposição rápida e de alta energia, em formas de leques aluviais (Barcelos, 1984 apud Batezelli, 2003).

4.4. Hidrogeologia Local

O Aquífero Bauru, também conhecido como Bauru-Caiuá, compreende as rochas sedimentares dos grupos homônimos, pertencentes à Bacia Bauru e cobrem toda a região do Triângulo Mineiro (Lima & Almeida, 2012).

O Aquífero Bauru é do tipo poroso granular, podendo se comportar como aquífero livre a semiconfinado. Os poços perfurados no Aquífero Bauru na região do Triângulo Mineiro possuem vazões que variam de 0,46 a 112 m³/h e média de 20 m³/h (Lima & Almeida, 2012).

Fiumari (2004) observou valores de condutividade hidráulica média de $2,13 \times 10^{-3}$ m/s e coeficiente de armazenamento (rendimento específico) de 0,12. Batezelli (2003) pontua que as condições de permo-porosidade são diminuídas em razão da cimentação por carbonato de cálcio nas fácies arenosas do Grupo Bauru.

O Sistema Aquífero Bauru é heterogêneo, apresentando fácies distintas quanto a granulometria, litotipo, porosidade e condutividade hidráulica. A distinção dessas características levou à divisão do Sistema Aquífero Bauru em dois subsistemas: Aquífero Bauru Superior e Inferior (Oliveira, 2002). O Aquífero Bauru Superior apresenta variação nas espessuras das fácies de acordo com a posição no relevo, sendo mais espessas nas porções internas da chapada, diminuindo a espessura em direção às bordas da chapada e desaparecendo nas áreas de encostas. As espessuras no Aquífero Bauru Inferior são condicionadas pelo relevo e pela paleogeografia irregular do basalto Serra Geral, definida pela intercalação de cristas e vales, onde a amplitude entre pontos mais elevados e mais baixos podem chegar até 15 metros.

O Aquífero Bauru Inferior é caracterizado por fácies areníticas e conglomeráticas, onde encontram-se entre as cotas topográficas de 880 a 900 metros de altitude, possuindo espessuras variáveis, que podem chegar aos 20 metros. As fácies areníticas não são encontradas em toda a extensão do Sistema Aquífero Bauru, se restringindo a ocorrências

localizadas, dispostas em blocos de arenitos maciços bastante silicificados por precipitação de sílica, em variação para formas intemperizadas. Em contrapartida, as camadas conglomeráticas podem ser encontradas em toda a área de extensão do Aquífero Bauru (Oliveira, 2002).

O Aquífero Bauru Superior compreende os solos lateríticos e os latossolos, sendo os lateríticos compostos na base por concreções ferruginosas em meio a matriz areno-argilosa, e no topo pelas couraças lateríticas. Os latossolos são profundos, atingindo espessuras máximas de 45 metros, onde afloram nas cotas topográficas acima de 915 metros (Oliveira, 2002).

Segundo Oliveira (2002), o nível estático dos poços inseridos nas porções mais altas, entre 950 e 955 metros de altitude, variam de 8 a 27 metros, cuja camada que corresponde aos latossolos fica dividida entre as zonas saturada e vadosa, e os solos lateríticos mantêm-se saturados. Na parte mediana do relevo, aproximadamente 930 metros de altitude, os solos lateríticos compõem a porção vadosa ou saturada, e os latossolos fazem parte da zona vadosa, variando o nível estático em 20 a 36 metros.

As águas subterrâneas em toda a região do Triângulo Mineiro são de boa qualidade para consumo humano, agrícola e industrial, e apresentam pH básico, com valores de 7 a 10 (Lima & Almeida, 2012).

5. METODOLOGIA

5.1. Método da Variação do Nível d'Água (VNA)

A estimativa de recarga dos aquíferos pode ser realizada por diferentes métodos, sendo os mais utilizados aqueles baseados em medições das variações dos níveis de água subterrânea ao longo do espaço e tempo. A abundância de dados de nível de água disponíveis em bancos de dados públicos, juntamente com a simplicidade da aplicação destes métodos, possibilita a estimativa de recarga (Healy, 2010).

O método de Variação do Nível d'Água (VNA) é aplicável somente à aquíferos livres e é baseado na utilização das flutuações dos níveis de água subterrânea (ou lençol freático)

para a estimativa de recarga de aquíferos, partindo do pressuposto de que as elevações são decorrentes das águas que chegam ao lençol freático (Healy & Cook, 2002).

Para o método VNA, a recarga pode ser calculada a partir de:

$$R = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad \text{Equação (4)}$$

Sendo: R a recarga (mm);

S_y o rendimento específico;

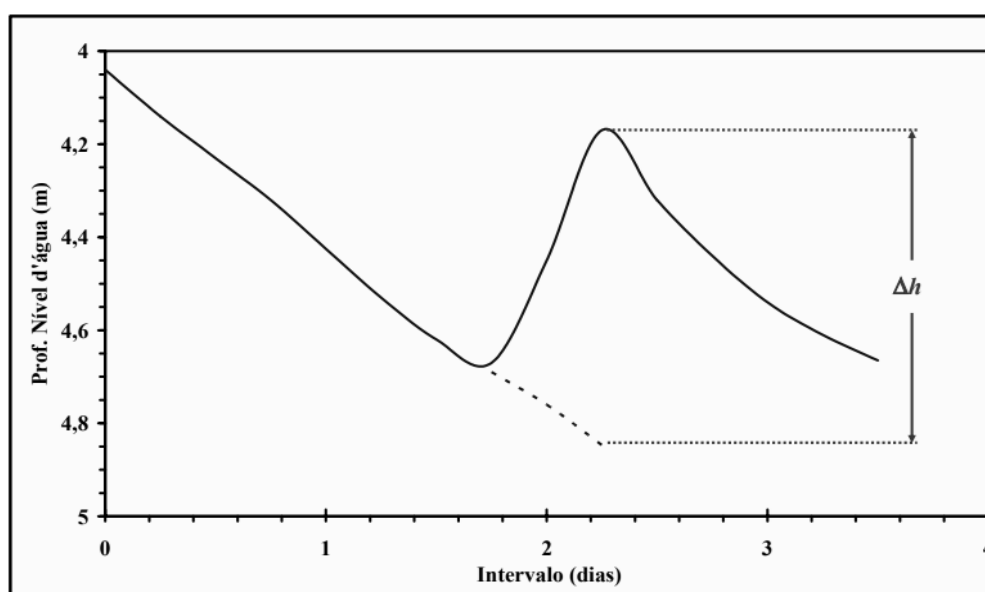
Δh a variação da altura do nível d'água (m);

Δt a variação do período escolhido para estimativa (meses).

Para a equação acima, cada flutuação positiva de nível d'água individual gera uma estimativa de recarga. A variação da altura do nível d'água (Δh) pode ser calculada pela diferença entre o valor máximo do nível d'água (pico) e o ponto mais baixo da curva de rebaixamento antecedente, estendida até o momento do pico. Entende-se como curva de rebaixamento antecedente, a continuação do traço do hidrograma do poço caso não tivesse ocorrido o pico subsequente, podendo ser desenhado manualmente (Figura 9) (Healy & Cook, 2002).

As variações do nível d'água foram traçadas manualmente, assim, para cada um dos poços analisados foram estimadas as recargas episódicas dos anos de 2011 a 2021, conforme dados disponíveis.

Figura 9 - Exemplo de variação do nível d'água em um poço. Δh corresponde à diferença entre o pico na subida e o ponto mais baixo da curva antecedente extrapolada até o momento do pico.



Fonte: Maziero & Wendland (2005); modificado de Healy & Cook (2002).

Para a obtenção das recargas episódicas, cada valor de Δh foi multiplicado pelo rendimento específico do Aquífero Bauru na região. Os valores de Δh estão expressos em metros e as respectivas recargas em milímetros.

A maior dificuldade do método VNA é a estimativa do rendimento específico (S_y) do aquífero na profundidade da zona de flutuação do nível d'água. Segundo Healy (2010), o rendimento específico pode ser utilizado de acordo com a literatura ou ser estimado por equações matemáticas, métodos laboratoriais ou métodos de campo.

O rendimento específico utilizado neste trabalho foi obtido a partir da literatura científica da região, no qual Fiumari (2004) considera o coeficiente de armazenamento ou rendimento específico médio de 0,12 do Aquífero Bauru no município de Araguari. Este valor também foi utilizado para os poços de Tupaciguara.

Para a determinação do valor da porosidade efetiva, Fiumari (2004) empregou a metodologia do rebaixamento de NEUMAN em teste de bombeamento realizado em um poço de monitoramento em Araguari. A metodologia consiste na comparação gráfica dos dados de rebaixamento vs. tempo obtidos em campo, com a curva típica de NEUMAN. Fiumari (2004) reitera que o valor de 0,12 foi compatível com estudos realizados na região de Araguari pelo IGAM em 2001 e Oliveira em 2002, que resultaram em valores de rendimento específico de 0,15.

A partir da obtenção dos valores de recarga nos poços analisados, foi possível realizar a estimativa das taxas de recarga totais relacionadas às chuvas, dividindo a recarga total pela precipitação total acumulada no mesmo período. Assim, realizou-se a estimativa para cada poço estudado.

Devido a algumas limitações do método VNA, pelo fato das taxas de recarga terem uma grande variação em função da superfície topográfica, composição da zona não saturada e vegetação, entre outros fatores, é recomendável que os poços analisados sejam representativos das condições da bacia como um todo (Healy, Cook, 2002).

5.2. Revisão bibliográfica

A pesquisa bibliográfica incluiu consultas a artigos científicos, assim como teses de doutorado, dissertações de mestrado, e não menos importante, os trabalhos de conclusão de curso realizados na região, acerca dos conteúdos referentes ao contexto geológico e hidrogeológico regional e local.

5.3. Aquisição dos dados

Foram utilizados dados de variação do nível d'água de dois poços de monitoramento instalados no município de Araguari: poço 3100020036 (PM 1) e poço 3100020037 (PM 2) e dois poços de monitoramento em Tupaciguara: poço 3100020113 (PM 3) e 3100020429 (PM 4), todos monitorados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (Tabela 1). Estas informações estão disponibilizadas na Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) da CPRM (disponível em <http://rimasweb.cprm.gov.br>).

Os poços de monitoramento selecionados estão inseridos no Aquífero Bauru, tanto os poços de Araguari quanto os poços de Tupaciguara. Os perfis litológicos (Figura 10) mostram a predominância de sedimentos argilo siltosos nas porções superiores dos poços PM 1, PM 2 e PM 4, seguidos por camadas de areia fina a média. No poço PM 3 ocorrem intercalações entre porções silto argilosas e arenosas ao longo do perfil.

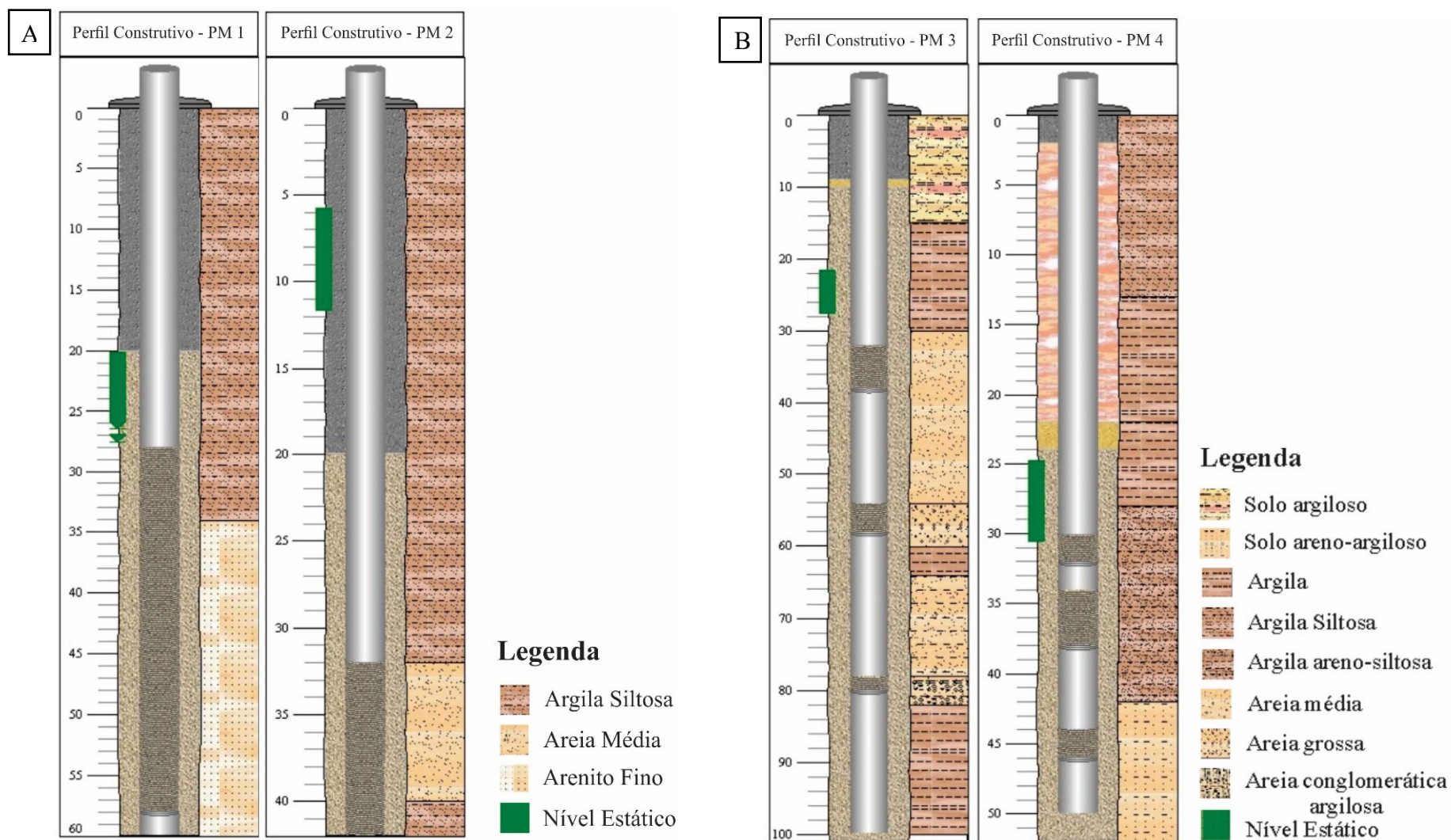
Tabela 1 - Dados de localização dos poços de monitoramento e estações pluviométricas analisadas no trabalho.

	Código	Localidade	Município	UTM (Norte/Sul)	UTM (Leste/Oeste)
Poço de monitoramento PM1	3100020036	Avenida Minas Gerais – Sede	Araguari	7934493	796180
Poço de monitoramento PM2	3100020037	Distrito de Amanhece	Araguari	7948318	795888
Poço de monitoramento PM3	3100020113	Estação de Tratamento de Água – ETA	Tupaciguara	7939418	744220
Poço de monitoramento PM4	3100020429	Distrito Industrial	Tupaciguara	7941152	740639
Estação pluviométrica Estação 1	1848010	Araguari	Araguari	7935482	794431
Estação pluviométrica Estação 2	1848006	Tupaciguara	Tupaciguara	7941862	743755

Fonte: RIMAS, HidroWeb.

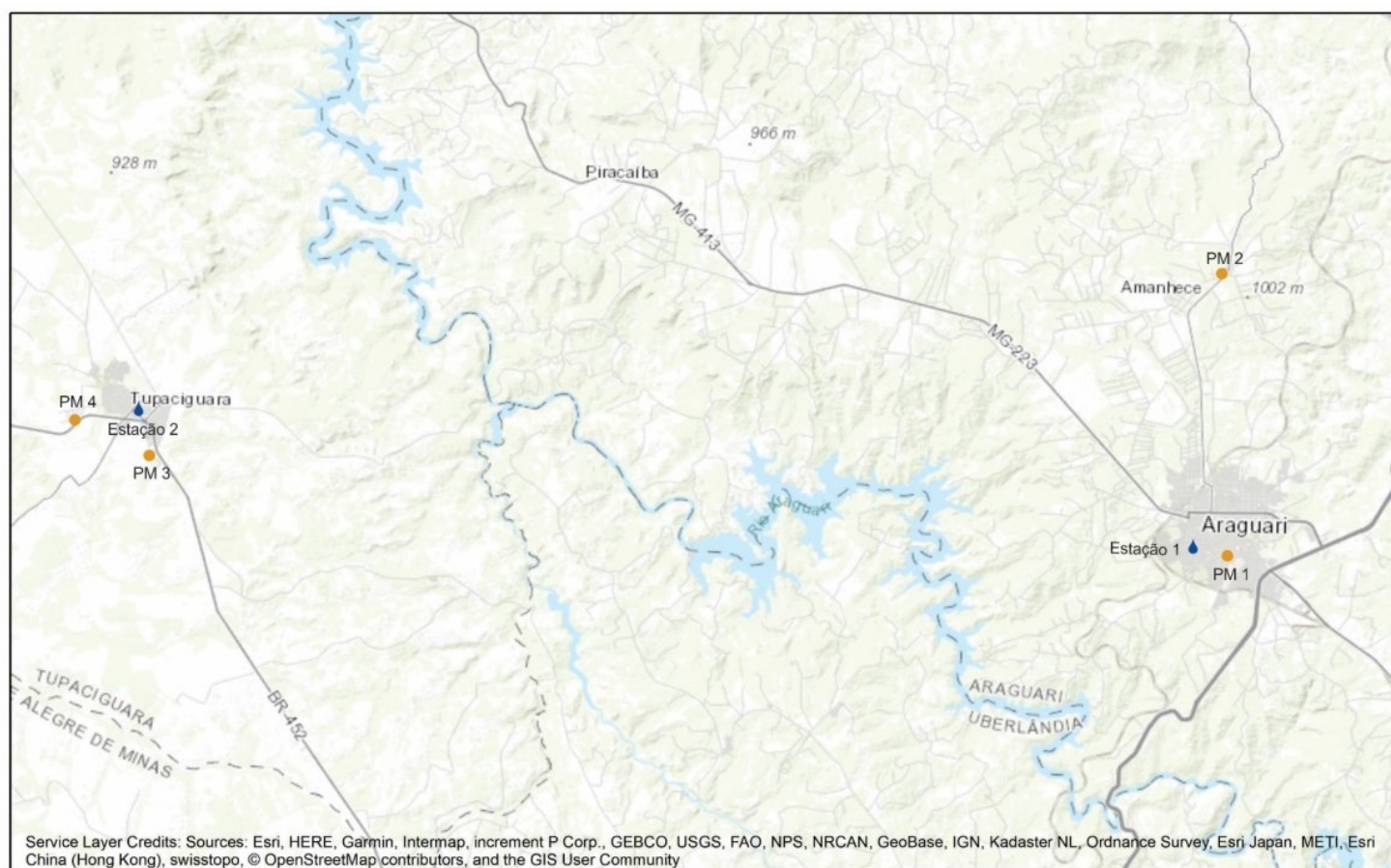
Para os dados de pluviosidade na área de estudo, foram escolhidas as estações pluviométricas mais próximas dos poços analisados (Figura 11). Assim, da estação 1848010 (Estação 1), no município de Araguari, foram obtidos os dados para integração com os poços de monitoramento PM 1 e PM 2. Para os poços PM 3 e PM 4, instalados em Tupaciguara, foram integrados os dados da estação 1848006 (Estação 2), ambas operadas pela CPRM, tendo a ANA como órgão responsável (disponível em: www.snirh.gov.br/hidroweb).

Figura 10 - Perfis construtivos dos poços de monitoramento utilizados. A) PM 1 e PM 2 no município de Araguari - MG. B) PM 3 e PM 4 no município de Tupaciguara – MG.



Fonte: RIMAS.

Figura 11 - Mapa de localização dos poços de monitoramento e das estações pluviométricas utilizadas.



Legenda

● Poço de monitoramento RIMAS

● Estação Pluviométrica

8 4 0 8 km



Fonte: a autora.

5.4. Tratamento dos dados

Inicialmente, os dados de profundidade de nível d'água e pluviométricos adquiridos foram organizados em tabelas individualizadas por ano. Após a organização dos dados, foi confeccionado um gráfico anual combinado pelo *software* Excell para cada poço analisado, conforme apresentados no Apêndices A ao D. Os gráficos possibilitaram a identificação dos hidrogramas referentes a cada estação do ano, sendo possível traçar as curvas de rebaixamento pelo *software* CorelDRAW, e assim, quantificar cada variação do nível d'água. Nos resultados, optou-se pela apresentação do gráfico que abrange o período de 2011 a 2021, relacionando a variação do nível d'água e a precipitação para cada poço.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados das variações do nível d'água nos quatro poços de monitoramento analisados, os valores de precipitação nas duas estações pluviométricas escolhidas, os cálculos das taxas de recarga nos quatro poços e a relação entre recarga total e precipitação total no período de janeiro de 2011 a janeiro de 2021.

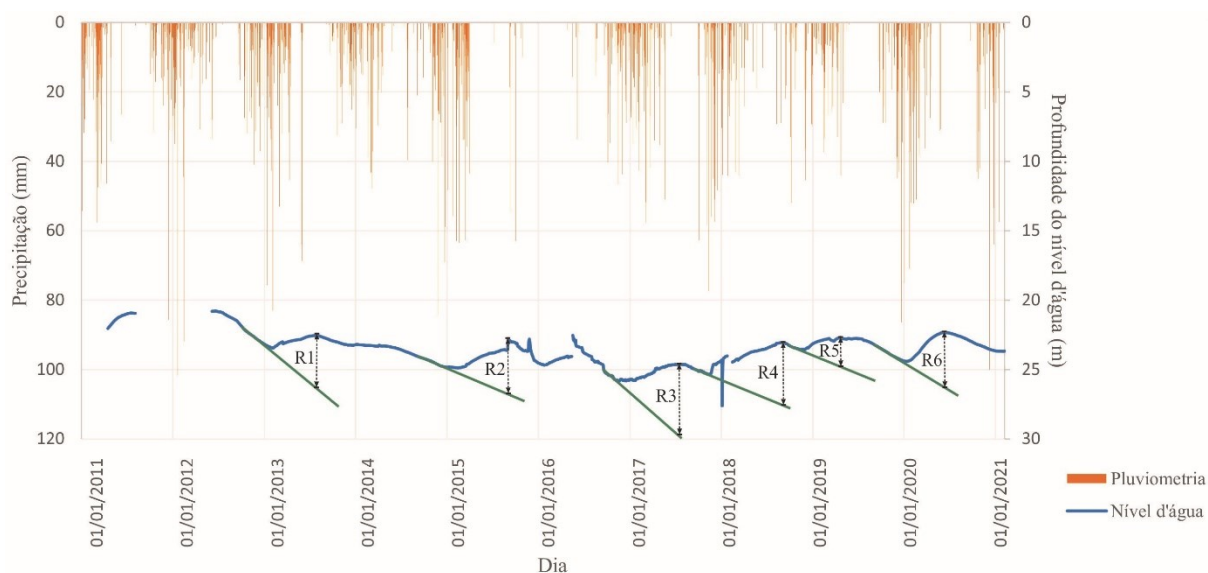
6.1. PM 1 - Poço de monitoramento RIMAS 3100020036

Os dados das profundidades do nível d'água e valores de precipitação foram plotados em gráfico (Figura 12), permitindo relacionar o incremento na recarga do aquífero com a precipitação, ambos na mesma escala temporal. O gráfico também apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, que permitem a quantificação das variações do nível d'água (Δh), identificadas como R1, R2, R3, R4, R5 e R6. Os valores de Δh obtidos estão representados na Tabela 2, juntamente com os respectivos valores de recarga, calculados para cada variação de nível d'água.

Foram analisados dados de profundidade do nível d'água a partir de abril de 2011, sendo ausentes nos meses de agosto a dezembro de 2011, janeiro a junho de 2012 e início de fevereiro de 2018.

Os valores de pluviosidade, obtidos na Estação 1, também foram analisados de janeiro de 2011 a fevereiro de 2021, porém faltam dados no período de abril a junho de 2015, novembro de 2015 a março de 2016 e no mês de novembro de 2018.

Figura 12 - Dados do Poço RIMAS 3100020036 - PM 1: profundidade dos níveis d'água e valores de precipitação obtidos na Estação Pluviométrica Araguari 1848010 - Estação 1, de 2011 a 2021. Os índices Rn representam o quociente de variação dos níveis freáticos analisados (Δh).



Fonte: RIMAS; HidroWeb.

Tabela 2 - Valores das variações dos níveis d'água (Δh) obtidos no PM 1 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

ΔH	Valor do ΔH (m)	Recarga (mm)
R1	3,95	474,00
R2	4,10	492,00
R3	5,25	630,00
R4	4,71	565,20
R5	1,60	192,00
R6	4,12	494,40
TOTAL	23,73	2847,60

Fonte: RIMAS; HidroWeb.

O evento de recarga com maior valor identificado foi o R3, no ano de 2017, somando 630,00 mm, e o menor foi o R5, no início de 2019, com recarga de 192,00 mm. Os anos com maiores precipitações foram de 2017, 2020 e 2013.

A recarga total do PM 1, de 2011 a 2021, foi de 2847,60 mm, e a precipitação total do período de 12363,80 mm. Para o cálculo da porcentagem da precipitação em relação ao valor de recarga, não foi considerado o ano de 2011, devido à ausência dos dados de variação do nível d'água, sendo considerado o valor de 10952,00 mm de precipitação total (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores anuais das precipitações identificadas na Estação 1, em Araguari.

Ano	Precipitação (mm)
2012	1328,60
2013	1411,10
2014	1287,90
2015	1001,80
2016	588,20
2017	1540,40
2018	1029,30
2019	1114,30
2020	1519,20
2021	131,20
TOTAL	10952,00

Fonte: HidroWeb.

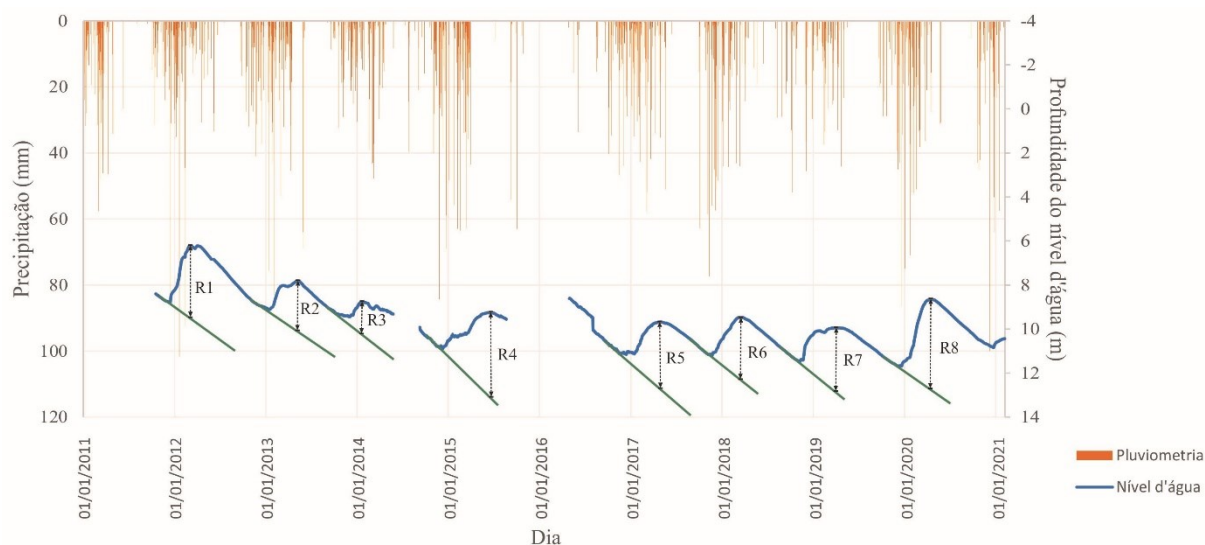
Considerando os valores totais de recarga de 2847,60 mm e de precipitação de 10952,00 mm, para o mesmo período, o valor da recarga corresponde a 26% da precipitação total.

Vale ressaltar que os cálculos podem ser imprecisos, em decorrência da falta de alguns dados de pluviometria e de profundidades dos níveis d'água no poço analisado.

6.2. PM 2 - Poço de monitoramento RIMAS 3100020037

Os dados de profundidade do nível d'água e precipitações foram plotados em gráfico (Figura 13), permitindo relacionar o incremento na recarga do aquífero com a precipitação, ambos na mesma escala temporal. O gráfico também apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível d'água (Δh), identificadas como R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 e R8. Os valores de Δh obtidos estão representados na Tabela 4, juntamente com os valores de recarga, calculados para cada variação de nível d'água.

Figura 13 - Dados do Poço RIMAS 3100020037 - PM 2: profundidade dos níveis d'água e valores de precipitação obtidos na Estação Pluviométrica Araguari 1848010 - Estação 1, de 2011 a 2021. Os índices Rn representam o quociente de variação dos níveis freáticos analisados (Δh).



Fonte: RIMAS; HidroWeb.

Foram utilizados dados de profundidade do nível d'água de outubro de 2011 até fevereiro de 2021, sendo ausentes em alguns dias de maio de 2012 e janeiro de 2013, de maio a setembro de 2014, de agosto a dezembro de 2015 e de janeiro a abril de 2016.

Os valores de pluviosidade analisados correspondem ao período de janeiro de 2011 a fevereiro de 2021, com ausência de dados de abril a junho de 2015, novembro de 2015 a março de 2016 e no mês de novembro de 2018.

Tabela 4 - Valores das variações dos níveis d'água (Δh) obtidos no PM 2 e respectivos valores de recarga para cada curva de recarga traçada.

ΔH	Valor do ΔH (m)	Recarga (mm)
R1	3,36	403,20
R2	2,37	284,40
R3	1,54	184,80
R4	3,91	469,20
R5	3,11	373,20
R6	2,88	345,60
R7	3,00	360,00
R8	4,14	496,80
TOTAL	24,31	2917,20

Fonte: RIMAS.

A recarga total do PM 2, de 2011 a 2021, é de 2917,20 mm. Os eventos de recarga com maiores valores identificados foram o R8, no ano de 2020, somando 496,80 mm, e o R4, no ano de 2015, com 469,20 mm. O menor foi o R3, no final de 2013, com recarga de 184,80 mm. Os anos com as maiores precipitações foram 2017 e 2020 (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores anuais das precipitações identificadas na Estação 1, em Araguari.

Ano	Precipitação (mm)
2011	1411,8
2012	1328,60
2013	1411,1
2014	1287,9
2015	1001,80
2016	588,2
2017	1540,40
2018	1029,30
2019	1114,30
2020	1519,20
2021	131,20
TOTAL	12363,8

Fonte: HidroWeb.

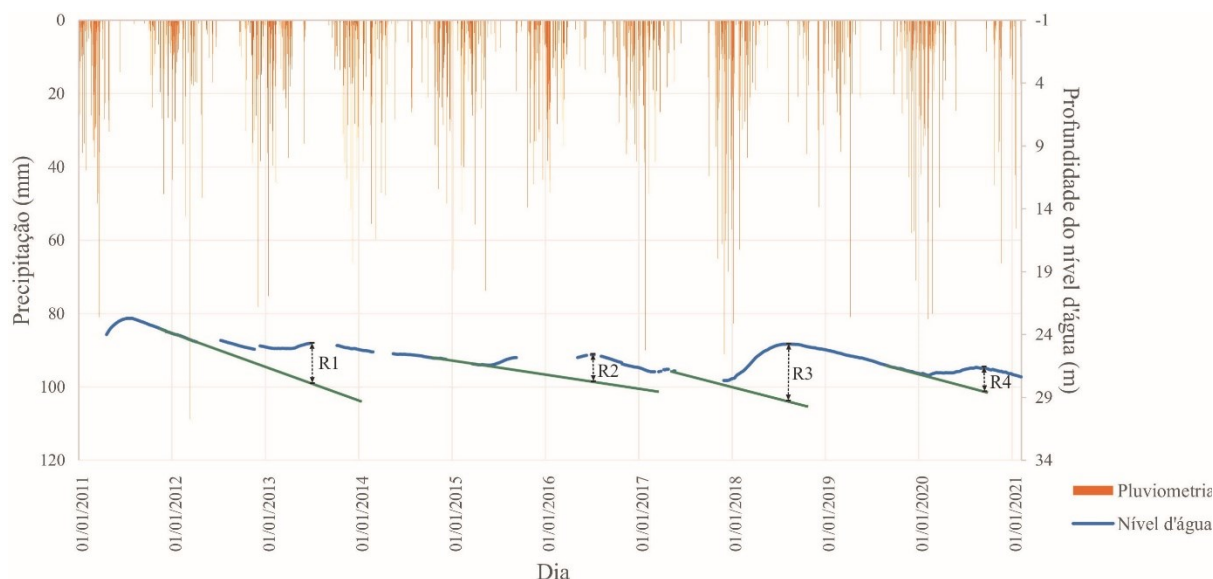
Considerando os valores totais de recarga do PM 2 de 2917,20 mm, entre 2011 e 2021, e de precipitação de 12363,8 mm, para o mesmo período, o valor da recarga corresponde a 23,59% da precipitação total.

Vale ressaltar que os cálculos podem ser imprecisos, em decorrência da falta de alguns dados de pluviometria e de profundidades dos níveis d'água no poço analisado.

6.3. PM 3 - Poço de monitoramento RIMAS 3100020113

Os dados de profundidade do nível d'água e precipitações foram plotados em gráfico (Figura 14), permitindo relacionar o incremento na recarga do aquífero com a precipitação, ambos na mesma escala temporal. O gráfico também apresenta as curvas de rebaixamento traçadas manualmente, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível d'água (Δh), identificadas como R1, R2, R3 e R4. Os valores de Δh obtidos estão representados na Tabela 6, juntamente com os valores de recarga, calculados para cada variação de nível d'água.

Figura 14 - Dados do poço rimas 3100020113 - PM 3: profundidade dos níveis d'água e valores de precipitação obtidos na Estação Pluviométrica Tupaciguara 1848006 - Estação 2, de 2011 a 2021. Os índices Rn representam o quociente de variação dos níveis freáticos analisados (Δh).



Fonte: RIMAS; HidroWeb.

Os dados de profundidade do nível d'água utilizados são quantificados a partir de abril de 2011 até fevereiro de 2021, sendo ausentes de abril a julho e novembro a dezembro de 2012, junho a outubro de 2013, fevereiro a maio e dezembro de 2014, janeiro a março e setembro a dezembro de 2015, janeiro a maio de 2016 e maio a novembro de 2017.

Os valores de pluviosidade, obtidos na Estação 2, correspondem ao período de janeiro de 2011 a fevereiro de 2021, com ausência de dados no mês de novembro de 2018.

Tabela 6 - Valores das variações dos níveis d'água (Δh) obtidos no PM 3 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

ΔH	Valor do ΔH (m)	Recarga (mm)
R1	3,31	397,20
R2	2,26	271,20
R3	4,60	552,00
R4	2,21	265,20
TOTAL	12,38	1485,60

Fonte: RIMAS.

O evento de recarga com maior valor identificado foi o R3, no ano de 2018, somando 552,00 mm, e o menor foi o R4, no final de 2016, com recarga de 265,20 mm.

A Tabela 7 indica todos os dados pluviométricos, evidenciando no ano de 2017 as maiores taxas de precipitação.

Tabela 7 - Valores anuais das precipitações identificadas na Estação 2, em Tupaciguara.

Ano	Precipitação (mm)
2011	14163,00
2012	1274,60
2013	1497,20
2014	1309,20
2015	1337,70
2016	1263,80
2017	1584,50
2018	1033,60
2019	977,30
2020	1138,60
2021	154,20
TOTAL	12986,70

Fonte: HidroWeb.

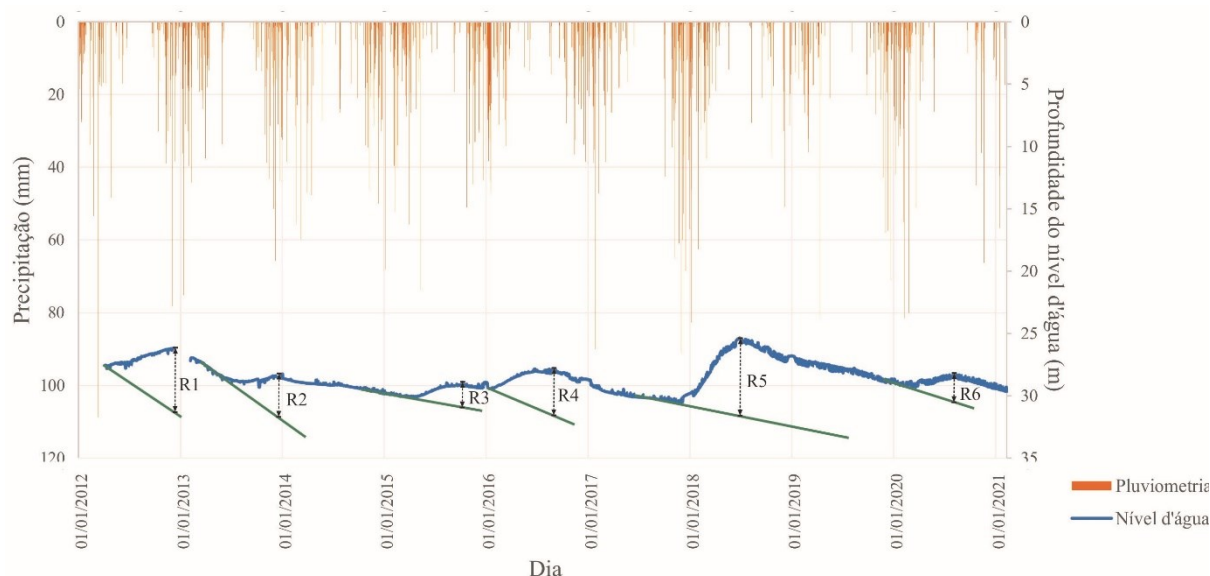
Considerando os valores totais de recarga do PM 3, de 2011 a 2021, de 1485,60 mm, e precipitação de 12986,70 mm para o mesmo período, o valor da recarga corresponde à 11,43% da precipitação total.

Vale ressaltar que os cálculos podem ser imprecisos, em decorrência da falta de alguns dados de pluviometria e de profundidades dos níveis d'água no poço analisado.

6.4. PM 4 - Poço de monitoramento RIMAS 3100020429

Os dados de precipitações e de profundidade do nível d'água foram plotados em gráfico (Figura 15), permitindo relacionar o incremento na recarga do aquífero com a precipitação, ambos na mesma escala temporal. O gráfico também apresenta as curvas de recessões traçadas manualmente, que permitem a quantificação de cada variação da altura do nível d'água (Δh), identificadas como R1, R2, R3, R4, R5 e R6. Os valores de Δh obtidos estão representados na Tabela 8, juntamente com os valores de recarga, calculados para cada variação de nível d'água.

Figura 15 - Dados do Poço RIMAS 3100020429 - PM 4: profundidades dos níveis d'água e valores de precipitação obtidos na Estação Pluviométrica Tupaciguara 1848006 - Estação 2, do ano de 2012 a 2021. Os índices Rn representam o quociente de variação dos níveis freáticos analisados (Δh).



Fonte: RIMAS; HidroWeb.

Os dados de profundidade do nível d'água utilizados são quantificados a partir de abril de 2012 até fevereiro de 2021, sendo ausentes de dezembro de 2012 a fevereiro de 2013.

Os dados pluviométricos analisados correspondem ao período de janeiro de 2012 a fevereiro de 2021, com ausência de dados no mês de novembro de 2018.

Tabela 8 - Valores das variações dos níveis d'água (Δh) obtidos no PM 4 e respectivos valores de recarga para cada curva de rebaixamento traçada.

ΔH	Valor do ΔH (m)	Recarga(mm)
R1	5,08	609,60
R2	3,58	429,60
R3	2,08	249,60
R4	3,87	464,40
R5	6,33	759,60
R6	2,40	288,00
TOTAL	23,34	2800,80

Fonte: RIMAS.

O evento de recarga com maior valor identificado foi o R5, no ano de 2018, somando 759,60 mm, e o menor foi o R3 com recarga de 249,60 mm, no final de 2015.

A Tabela 9 indica todos os dados pluviométricos, evidenciando no ano de 2017 as maiores taxas de precipitação.

Tabela 9 – Valores anuais das precipitações identificadas na Estação 2, em Tupaciguara.

Ano	Precipitação (mm)
2012	1274,60
2013	1497,20
2014	1309,20
2015	1337,70
2016	1263,80
2017	1584,50
2018	1033,60
2019	977,30
2020	1138,60
2021	154,20
TOTAL	11570,70

Fonte: HidroWeb.

Considerando os valores totais de recarga do PM 4, de 2012 a 2021, de 2800,80 mm, e precipitação de 11570,70 mm para o mesmo período, o valor da recarga corresponde à 24,20 % da precipitação total.

Vale ressaltar que os cálculos podem ser imprecisos, em decorrência da falta de alguns dados de pluviometria e de profundidades dos níveis d'água no poço analisado.

6.5. Análise dos valores de recarga

De acordo com os gráficos obtidos, as recargas foram maiores nos períodos chuvosos, que correspondem aos meses de novembro a março, onde foram identificados os picos dos níveis freáticos. Os menores valores de recarga ocorreram nos meses de junho a setembro, correspondendo aos intervalos de menores precipitações.

Os valores das recargas analisadas no período de 2011 a 2021 no município de Araguari, obtidos nos PM 1 e PM 2 foram, respectivamente, 2847,60 mm e 2917,20 mm, correspondendo a taxas de 26% e 23,59% da precipitação total. Na cidade de Tupaciguara, no mesmo período, os valores de recarga obtidos no PM 3 e PM 4 foram, respectivamente,

1485,60 mm e 2800,80 mm, chegando a taxas de 11,43% e 24,20% da precipitação total (Tabela 10).

Tabela 10 - Resumo dos valores de precipitação, recarga, taxas relativas às chuvas e variação do nível estático nos poços analisados.

Poço	Período (anos)	Precipitação (mm)	Recarga (mm)	Recarga/Precipitação (%)	Variação do nível estático (m)
<i>PM 1</i>	2012 - 2021	10952,00	2847,60	26	20,77 – 27,60
<i>PM 2</i>	2011 - 2021	12363,8	2917,20	23,59	6,21 – 11,68
<i>PM 3</i>	2011 - 2021	12986,70	1485,60	11,43	22,70 – 27,66
<i>PM 4</i>	2012 - 2021	11570,70	2800,80	24,20	25,35 – 30,56

Fonte: RIMAS; HidroWeb.

Os níveis freáticos no PM 1 variaram entre 20,77 m e 27,60 m (média de 24,18 m), valores semelhantes aos poços PM 3, que variaram entre 22,70 m e 27,66 (média de 25,18 m) e PM 4, cuja variação foi de 25,35 m a 30,56 m (média de 27,95 m). Os níveis freáticos do PM 2 variaram de 6,21 m à 11,68 m (média de 8,94 m).

As recargas podem ser determinadas por um conjunto de condições iniciais, como as características físicas do meio, assim como o tipo e uso de solo. Desta forma, a elevação do nível d'água relaciona-se com as taxas de recarga, sendo maior em níveis d'água rasos do que em níveis d'água profundos (Freeze & Cherry, 1979). As diferentes taxas de recarga obtidas podem estar relacionadas com a profundidade dos poços analisados e as profundidades de instalação dos filtros (Tabela 11).

Tabela 11 – Dados de profundidade dos poços e profundidades dos filtros dos poços analisados.

Poço	Profundidade (m)	Filtros (m)
<i>PM 1</i>	60	28 a 58
<i>PM 2</i>	42	32 a 42
<i>PM 3</i>	101	32 a 38
		54 a 58
		78 a 80
<i>PM 4</i>	52	30 a 32
		34 a 38
		44 a 46

Fonte: RIMAS.

A partir das tabelas 10 e 11, foi possível observar que os poços que possuem as maiores taxas de recarga relativa à precipitação são aqueles cujos filtros foram instalados mais próximos da superfície, sendo eles PM 1, PM 2 e PM 4, com taxas de 26%, 23,59% e 24,20%, respectivamente. Esses poços apresentaram uma resposta mais rápida à recarga, ao contrário do PM 3, cuja taxa foi de 11,43%, provavelmente devido às maiores profundidades de instalação dos seus filtros, imprimindo uma resposta tardia da recarga em relação à precipitação.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método de Variação do Nível d'água (VNA) demonstrou-se eficaz e prático nas estimativas de recarga do Aquífero Bauru na Bacia dos Afluentes Mineiros do Alto Paranaíba. Os resultados se mostraram satisfatórios, sendo condizentes com estudos anteriores realizados na região de Araguari, como Bertol (2007), que obteve taxas de 23 a 51% de infiltração da chuva na recarga do aquífero nos anos de 2003 a 2006.

A utilização do método VNA deve ser acompanhada pelo estudo detalhado dos fatores que influenciam a capacidade e o volume de infiltração na zona não saturada, como variações de declividade do terreno, tipos de solos, variabilidade climática, tipos de uso e ocupação do solo, intenso uso de irrigação, entre outros fatores.

A disponibilidade dos dados da plataforma RIMAS, do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), foi imprescindível para a estimativa de recarga do Aquífero Bauru nos municípios estudados, sendo de grande relevância também para a ampliação dos conhecimentos e estudos hidrogeológicos dos aquíferos do país.

Apesar da obrigatoriedade por lei do registro e/ou de autorização de extração de água subterrânea no Brasil, 88% dos poços tubulares existentes são desconhecidos pelo poder público, não sendo incluídos em nenhuma base de dados. Considerando-se que a quantidade de água extraída ou o seu valor são encobertos por essa condição de clandestinidade, a base de dados disponíveis na plataforma RIMAS possibilita estudos de grande relevância aos aquíferos, como os de monitoramento e impactos às águas subterrâneas, além daqueles que visam a estimativa da disponibilidade dos recursos hídricos, uma vez que as unidades aquíferas se tornam mais vulneráveis à superexploração e ao risco de contaminação (ITB, 2019).

Pelo fato da Bacia do Paranaíba na região do Triângulo Mineiro concentrar grande parte das áreas declaradas de conflito pelo uso da água do estado de Minas Gerais, recomenda-se que sejam desenvolvidos estudos que priorizem o monitoramento integrado dos recursos superficiais e subterrâneos da bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. *Origem e evolução da Plataforma Brasileira*. Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão Geologia Mineralogia, Rio de Janeiro, Boletim 216, 96 p. 1967.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil*. Brasília. 2007.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada*. Brasília. 2017.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual*. Brasília. 2019.

ANA – Agência Nacional de Águas. *Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada*. 2 ed. Brasília. 2021.

BACCARO, C. A. D. *Unidades Geomorfológicas do Triângulo Mineiro: Estudo Preliminar*. Sociedade & Natureza, Uberlândia (MG), v.3, n.o 5 e 6, p. 37-42, 1991.

BATEZELLI, A. et al. *Análise estratigráfica aplicada a Formação Araçatuba (Grupo Bauru - Ks) no Centro-oeste do Estado de São Paulo*. 5-19 p. 2003.

BATEZELLI, A. *Análise da sedimentação cretácea no Triângulo mineiro e sua correlação com áreas adjacentes*. PhD Thesis, Unesp, Rio Claro, 183p. 2003.

BATEZELLI, A. *Continental systems tracts of the Brazilian Cretaceous Bauru Basin and their relationship to the tectonic and climatic evolution of South America*. Journal of South America Earth Sciences, In Press. 2015.

BATEZELLI, A. Continental systems tracts of the Brazilian Cretaceous Bauru Basin and their relationship with the tectonic and climatic evolution of South America. Basin Research 29 (Suppl. 1), 1–25. 2017.

BARRETO, C. E. A. G. *Balanço Hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do Monitoramento Hidrogeológico em Bacia representativa*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

BERTOL, G. A. *Avaliação da recarga anual no Aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. 2007.

BRASIL, Radam. *Levantamento de Recursos Naturais*. Rio de Janeiro (RJ), Folha SE, 22. Goiânia, v. 31. 1983.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. *SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas*. 2018. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout>>. Acesso em: 14 julho 2021.

- FEITOSA, F.A.C. et al. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, LABHID, 2008. 812 p.
- FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*. 4th ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2001. 615 p.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall, 1979. 604 p.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. *O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional*. Brazilian Journal of Geology, v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. *A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil)*. Geociências, v. 93, p. 4524-9, 1996.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. *Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo)*. Revista brasileira de Geociências, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000.
- FERNANDES, L. A.; RIBEIRO, C. M. M. *Evolução e paleoambiente da Bacia de Bauru (Alto Cretáceo, Brasil)*. Journal of South American Earth Sciences, v. 61, p. 71-90, 2015.
- FIUMARI, S. L. *Caracterização do Sistema Hidrogeológico Bauru no Município de Araguari-MG*. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Minas Gerais. 2004.
- FUCK, R.A.; PIMENTEL, M.M.; SILVA, L. J. H. D. *Compartimentação Tectônica na porção oriental da Província Tocantins*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Anais., Balneário Camboriú, SBG. 215-216. 1994.
- HEALY, R. W. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge: Cambridge University Press, 257 p. 2010.
- HEALY, R.W.; COOK, P.G.). *Using groundwater levels to estimate recharge*. Hydrogeology Journal, 1, p. 91-109. 2002.
- HIRATA, R. et al. *Água subterrânea e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil*. 1 ed. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. 2019.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Gestão e situação das águas de Minas Gerais 2019*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2019.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Gestão e situação das águas de Minas Gerais 2020*. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2020a.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Comitê da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros do Alto Rio Paranaíba*. 2020b. Disponível em: <<http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais-mg/pn1-cbh-alto-rio-paranaiba>>. Acesso em: 10 agosto 2021.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa de Clima do Brasil*. 2002. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/porta1.php#mapa784>>. Acesso em: 01 setembro 2021.

ITB – Instituto Trata Brasil. *Estudo de Águas Subterrâneas*. 2019.

KRESIC, N. *Hydrogeology and groundwater modeling*. Boca Raton: CRC Press. 830 p. 2007.

LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. *Análise comparativa entre os modelos digitais de elevação ASTER, SRTM e TOPODATA*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, Brasil. 2011.

LIMA, J. E. S.; ALMEIDA, C. S. C. *Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico sistema aquífero Bauru - Caiuá no estado de Minas Gerais, Bacia Sedimentar do Paraná*. Coleção Diagnóstico dos Aquíferos Sedimentares do Brasil, v.13. Sensoriamento Remoto, 15., Curitiba, Brasil. 2012.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP. In: XIV Edrisncontro Nacional de perfuradores de poços, II Simpósio de hidrogeologia do Sudeste. Anais. 2005.

MILANI E. J. et al. *Bacia do Paraná*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p. 265-287, 2007.

NOVAIS, G. T. *Caracterização climática da mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e do entorno da Serra da Canastra (MG)*. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

ONU - Organização das Nações Unidas. *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021*. Relatório Técnico. Divisão de Ciências da Água, UNESCO, Itália. 2021.

OLIVEIRA, L. A. *O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão*. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Brasília. 2002.

PACHECO, F. E. R. C. et al. *Folha Uberlândia SE.22-Z-B-VI, Escala 1:100.000*. Projeto Triângulo Mineiro, CODEMIG-FUNDEP-UFMG. 1 ed. Belo Horizonte: CODEMIG, v., p. 0-. 2017.

RABELO, J. L. *Estudo de Recarga do Aquífero Guarani no Sistema no Sistema Jacaré-Tiête*. São Carlos: Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2006.

REBOUÇAS, A. da C. *Água e desenvolvimento rural*. Estudos Avançados, 15 (43), 327-344. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Estudos Avançados. 2001.

RICCOMINI, C. *Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo*. Revista Brasileira de Geociências, v. 27, n. 2, pág. 153-162, 1997.

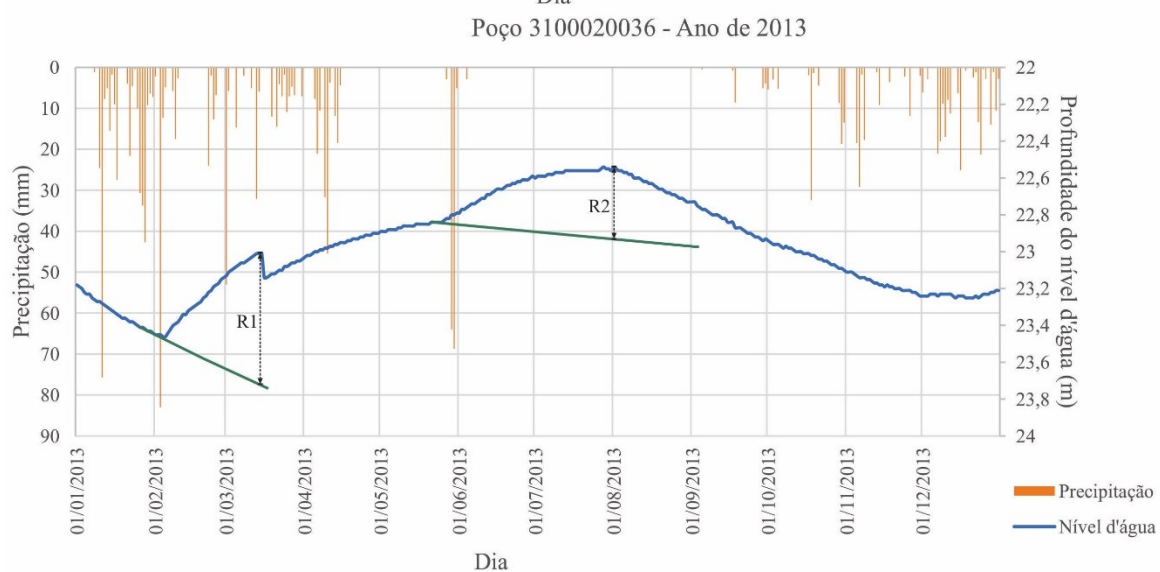
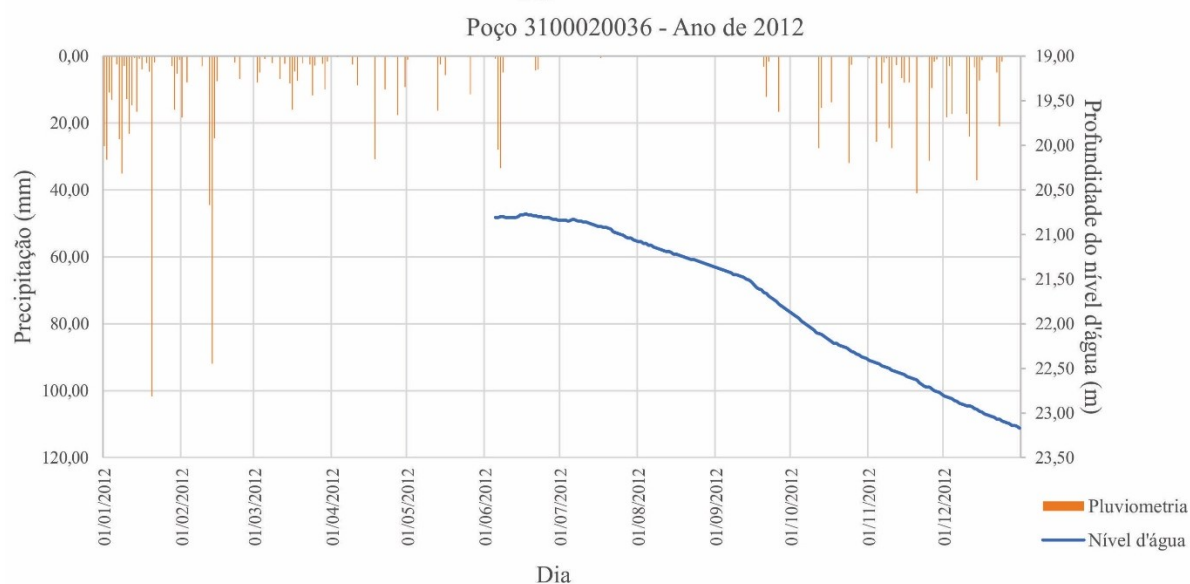
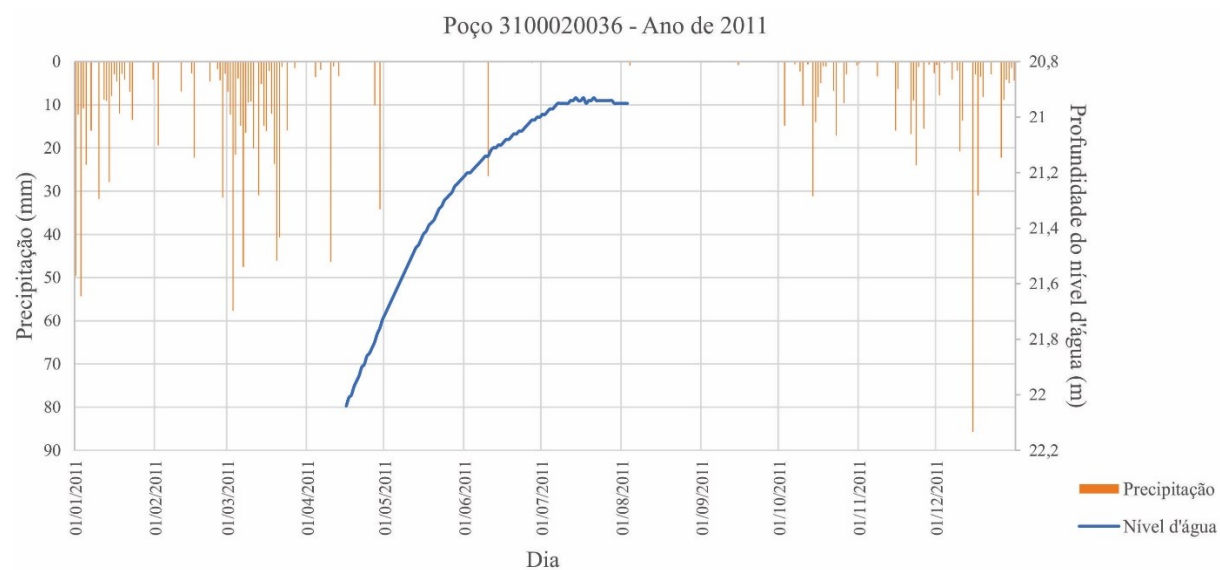
SEILER, K.P.; GAT, J.R. *Groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation*. Netherlands: Springer, 2007. 257 p.

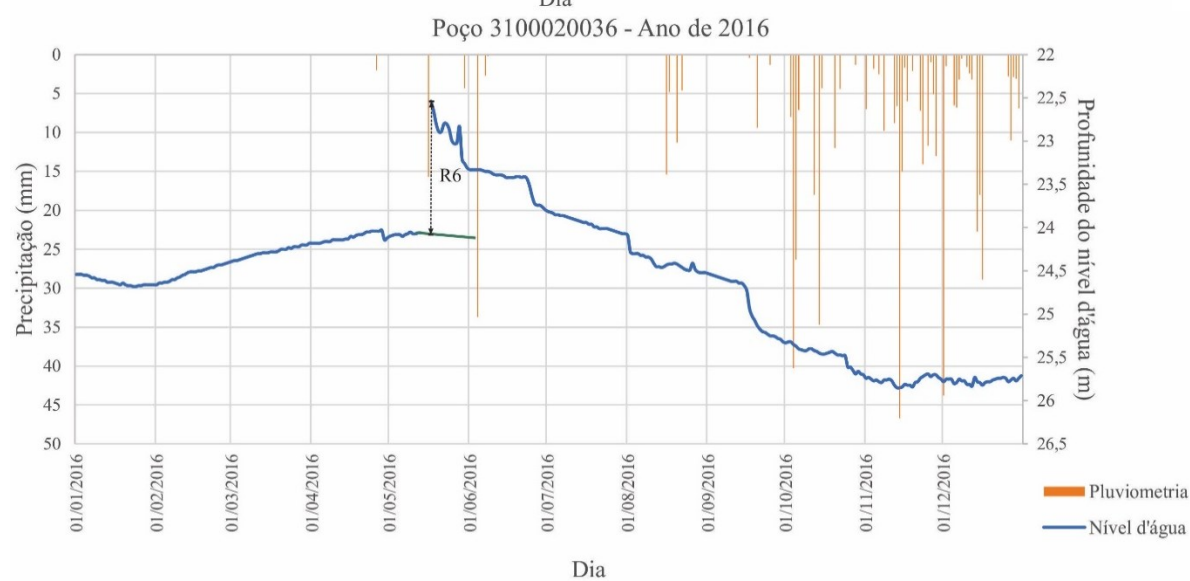
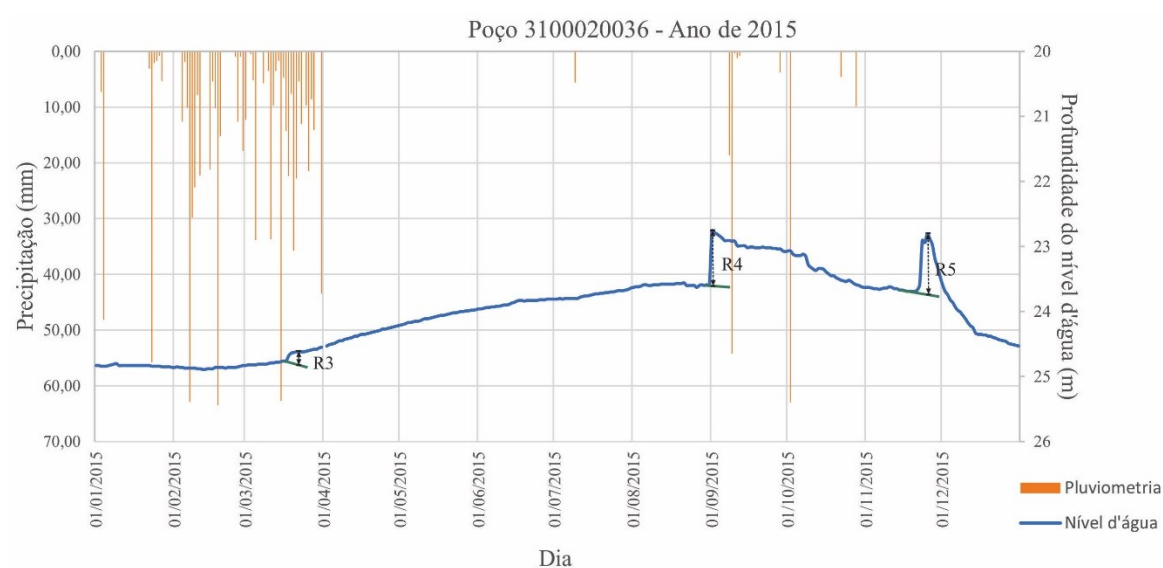
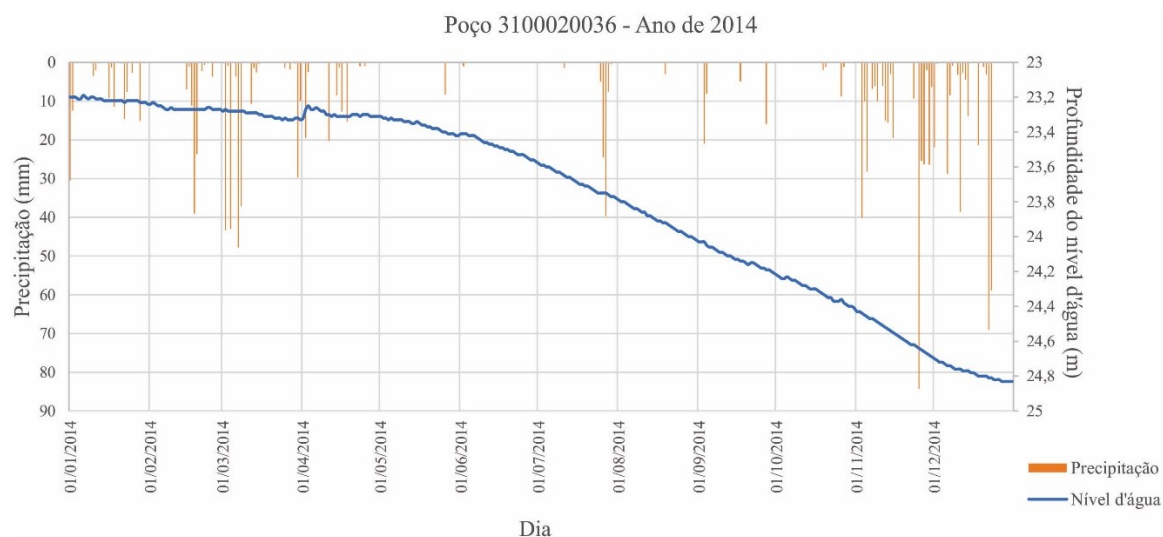
SEER, H. J.; MORAES, L. C. *Geologia Regional do Triângulo Mineiro*. Belo Horizonte: Instituto de Geociências da UFMG, Projeto Triângulo Mineiro, 2017.

SOARES, P. C. et al. *Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no estado de São Paulo: Grupo Bauru*. Revista Brasileira de Geociências, v. 10, n. 3, p. 177-185, 1980.

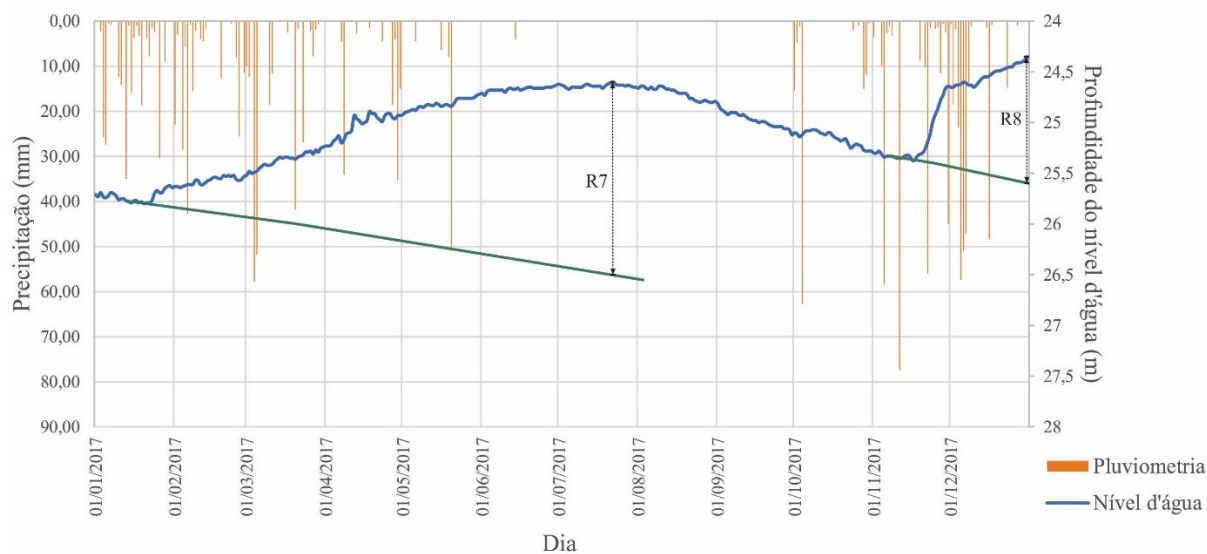
VELÁSQUEZ, L. N. M. et al. *Caracterização hidrogeológica dos Aquíferos Bauru e Serra Geral e avaliação das reservas do Aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais*. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2008.

APÊNDICE A – Poço de monitoramento PM 1

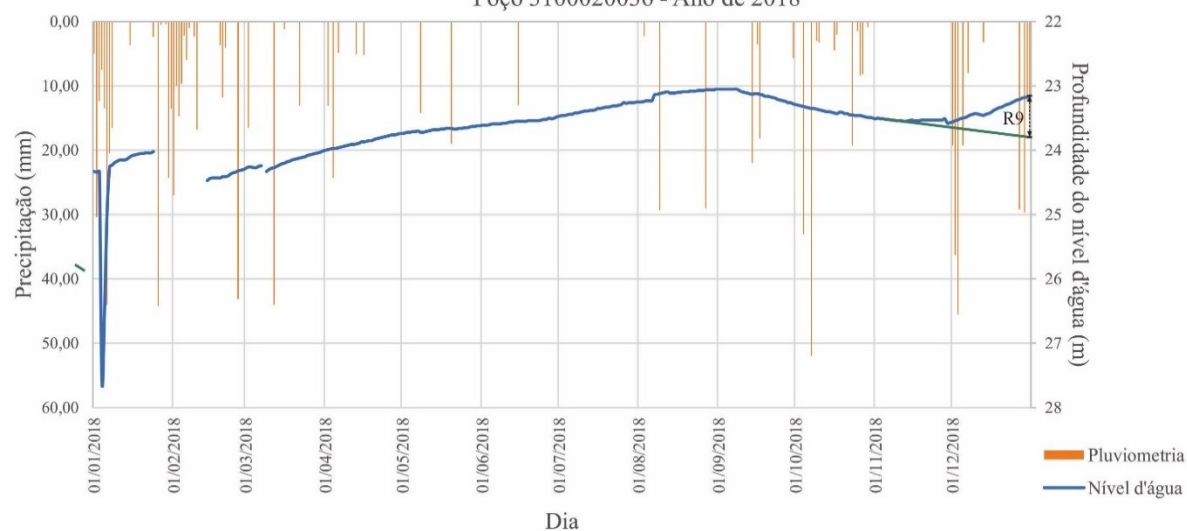




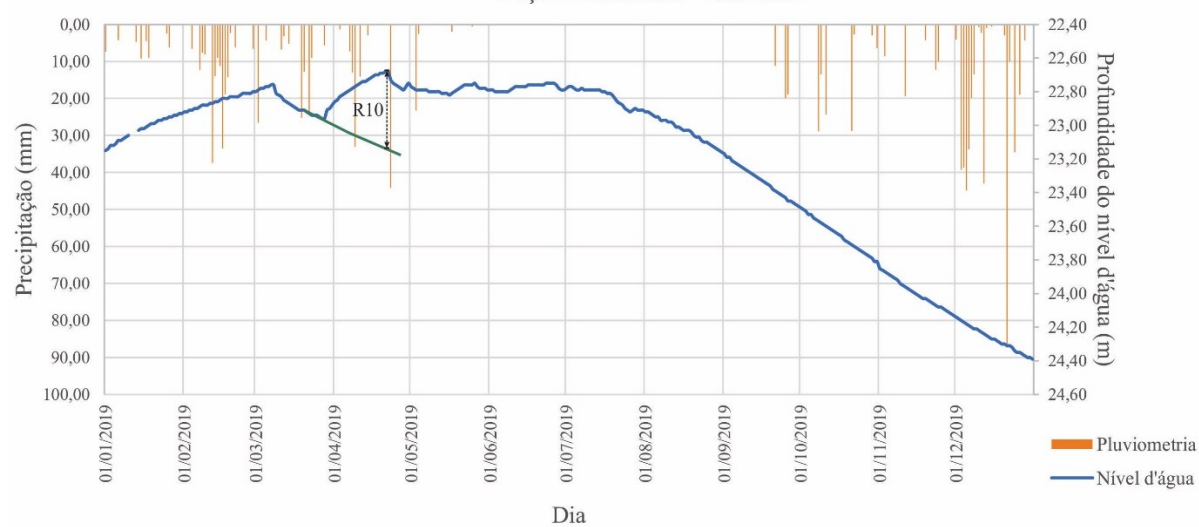
Poço 3100020036 - Ano de 2017



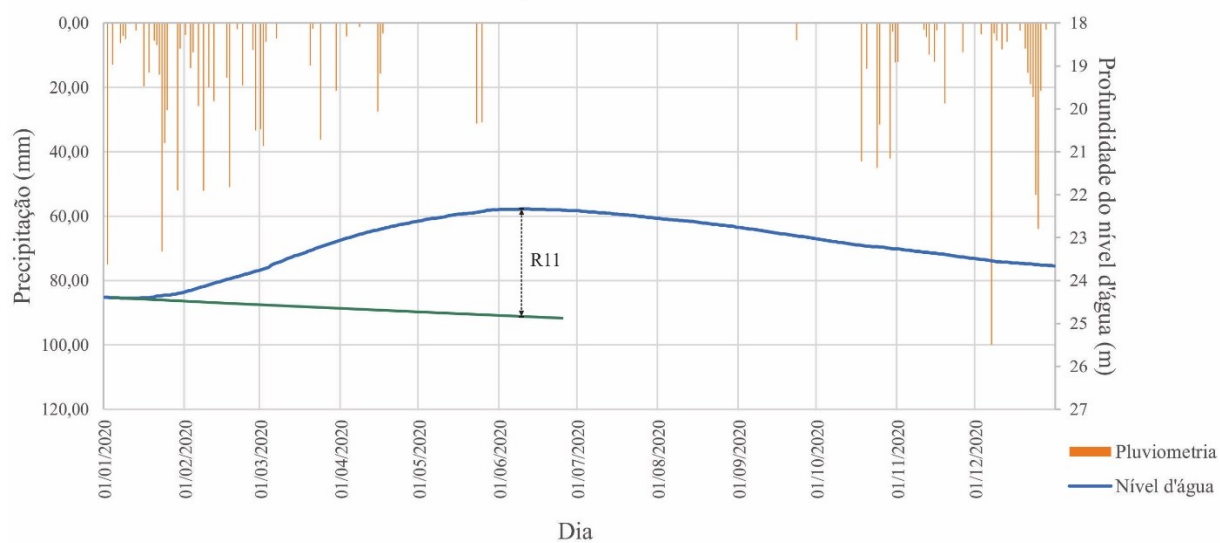
Poço 3100020036 - Ano de 2018



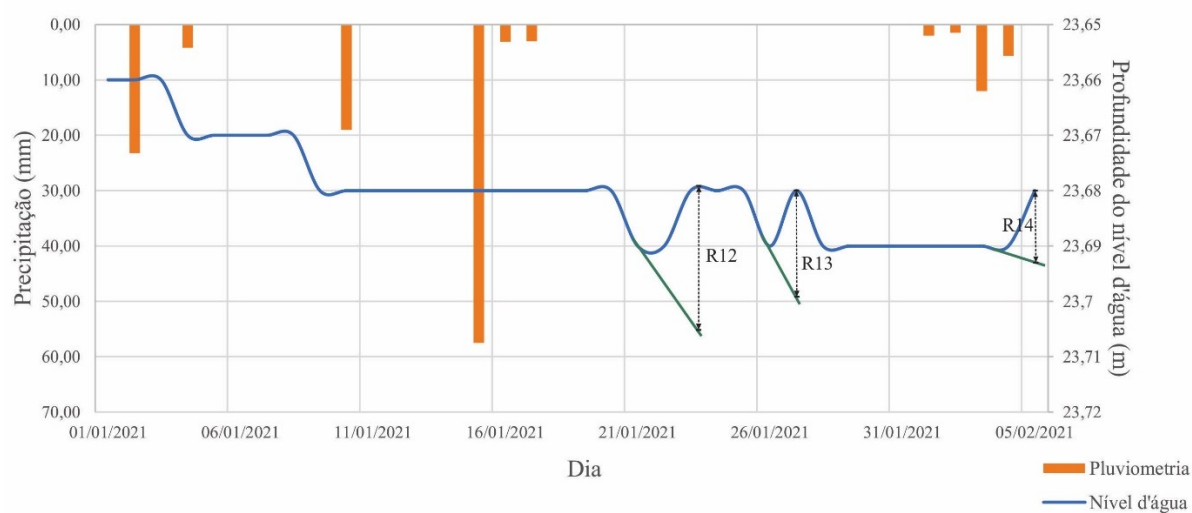
Poço 3100020036 - Ano de 2019



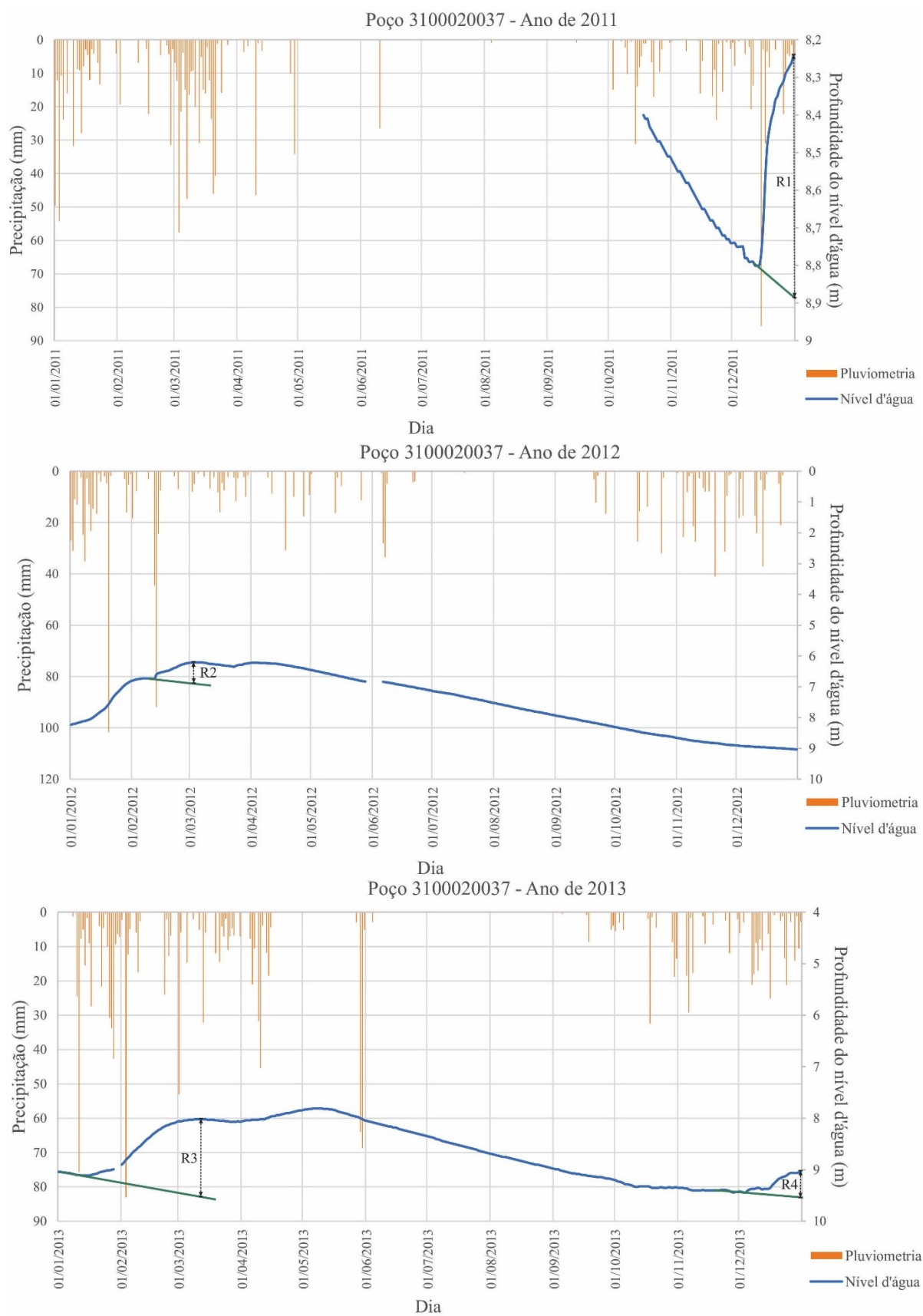
Poço 3100020036 - Ano de 2020

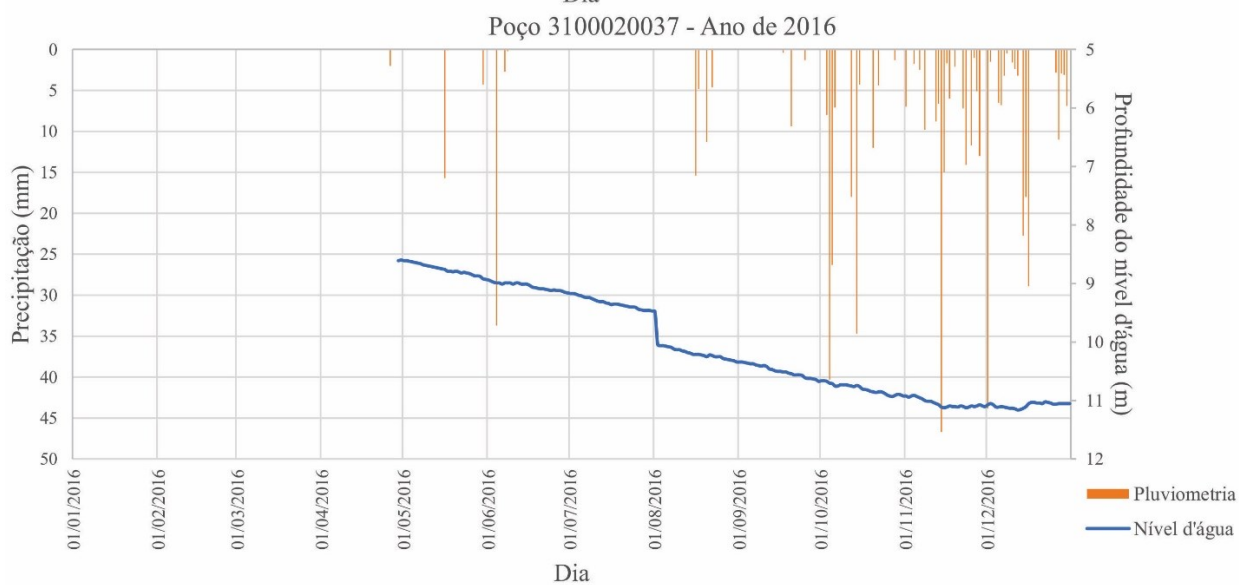
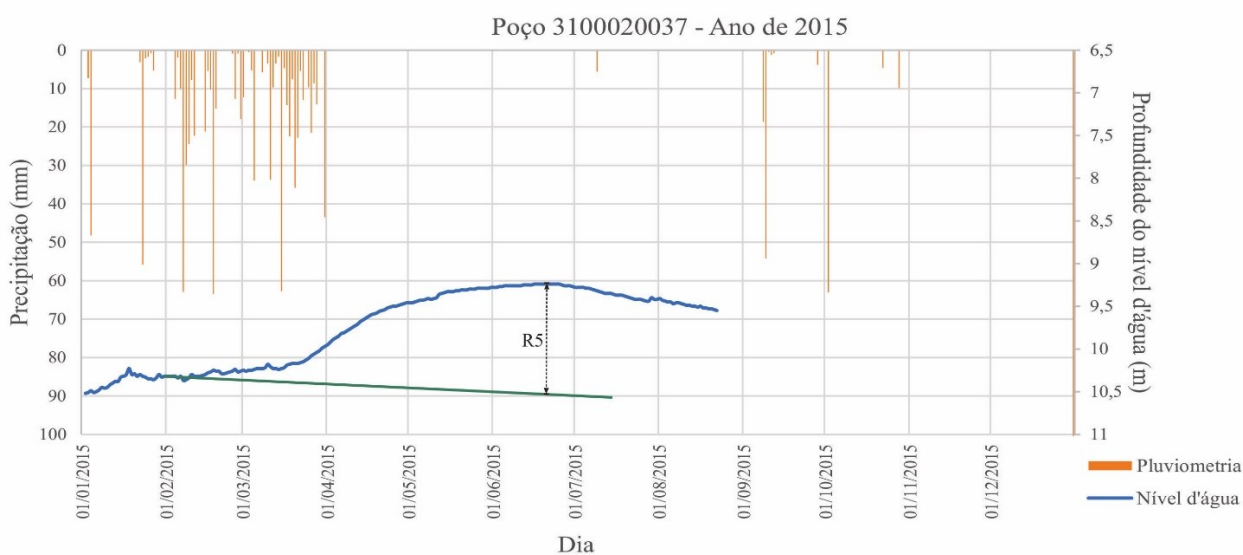
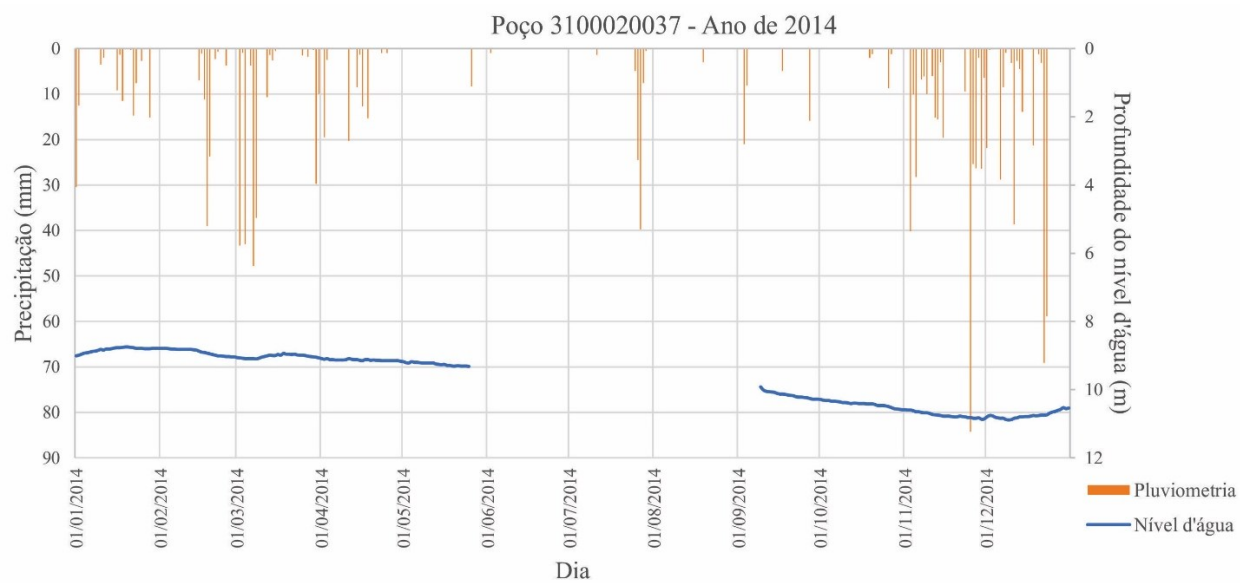


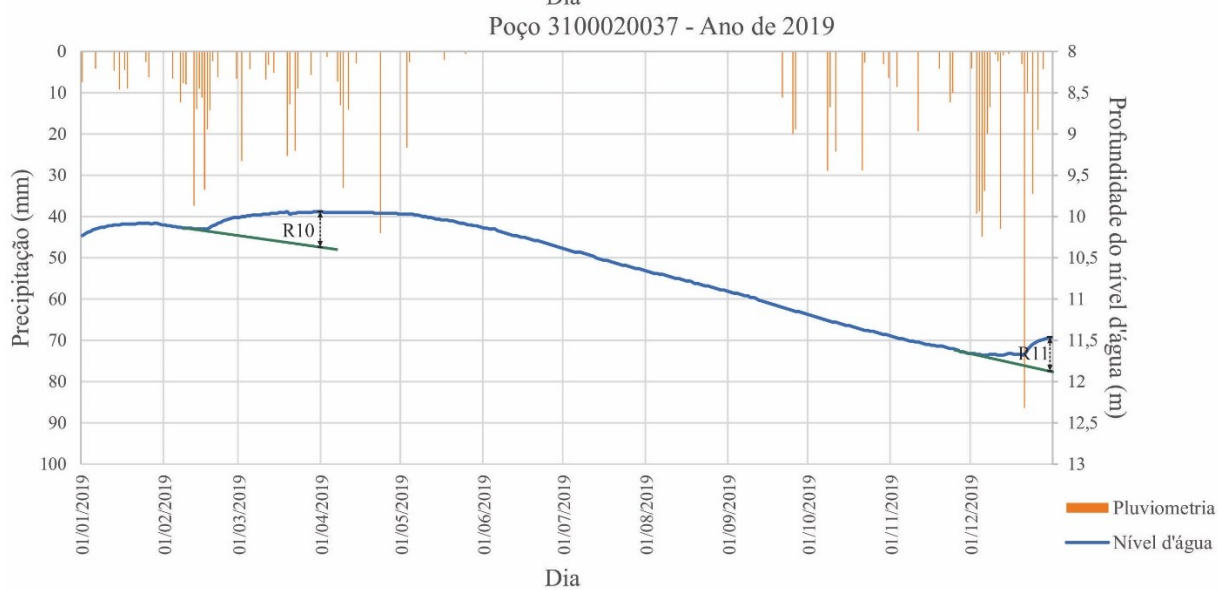
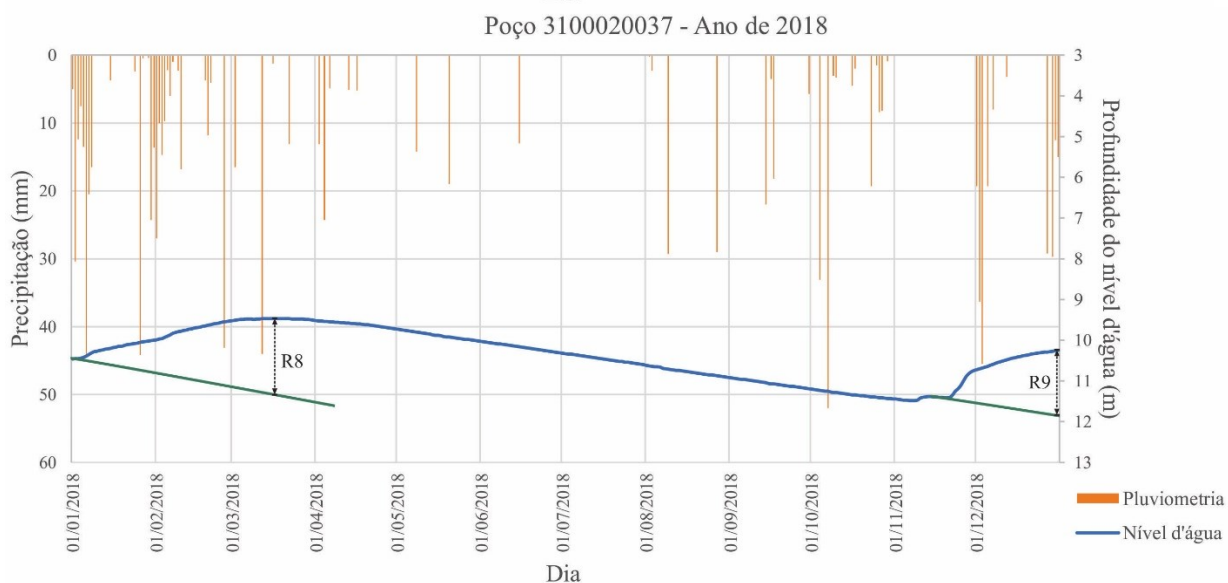
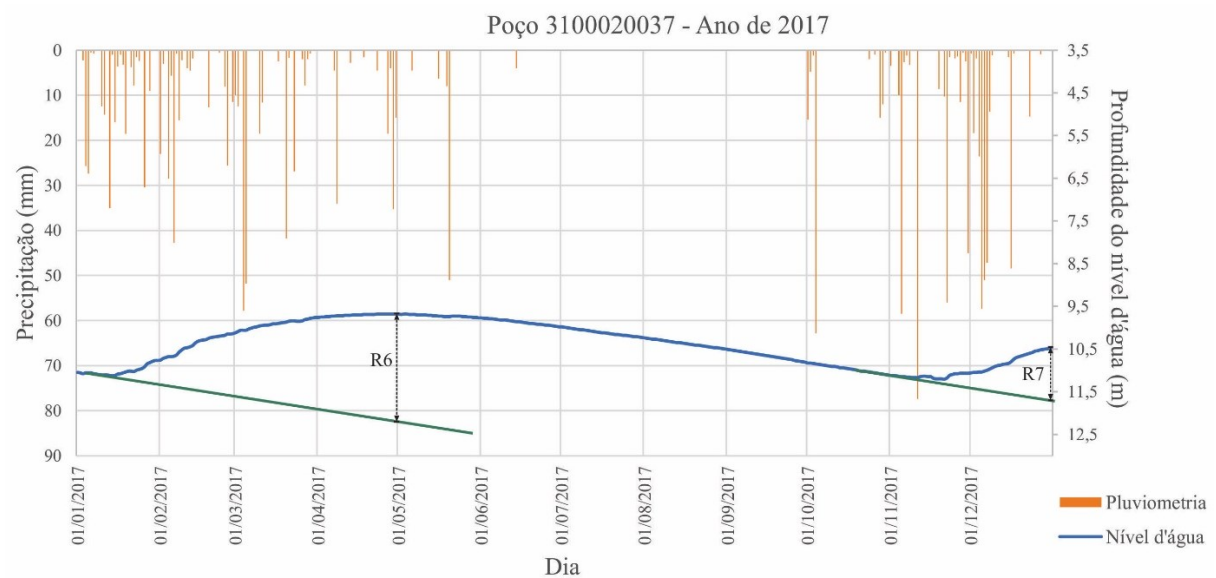
Poço 3100020036 - Ano 2021

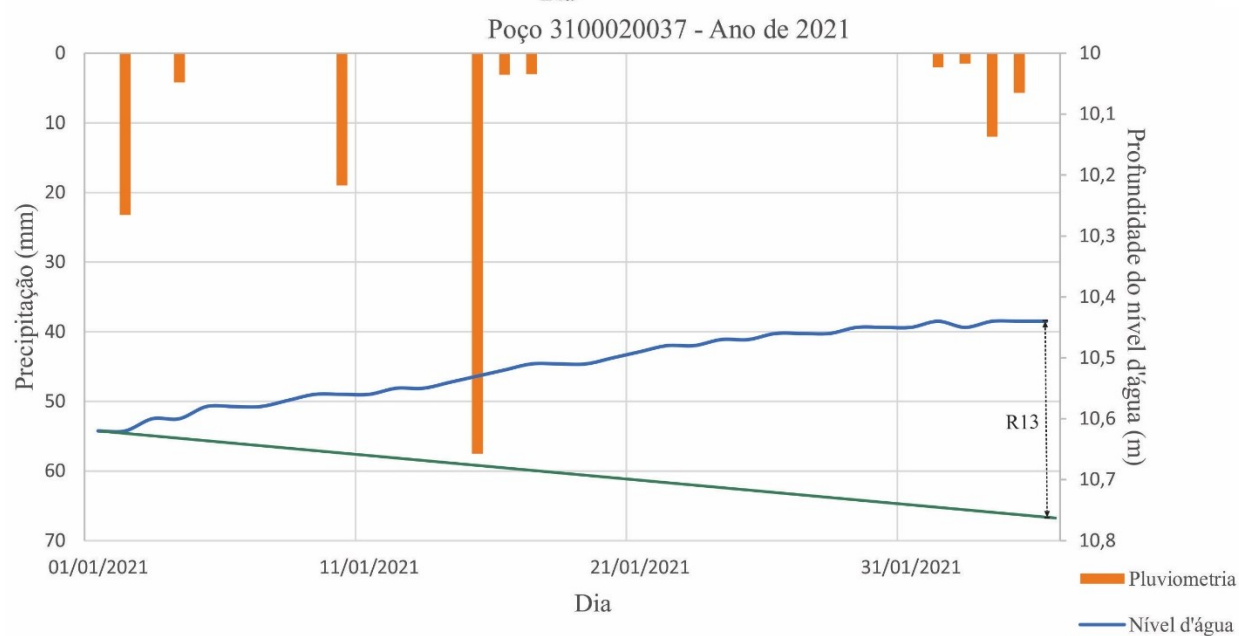
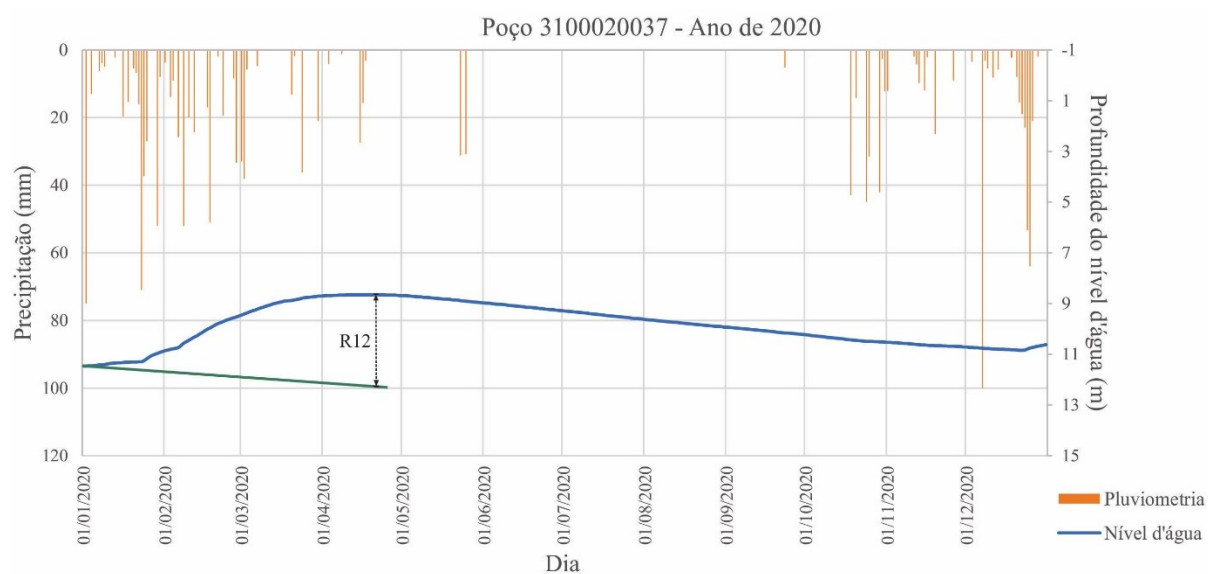


APÊNDICE B – Poço de monitoramento PM 2

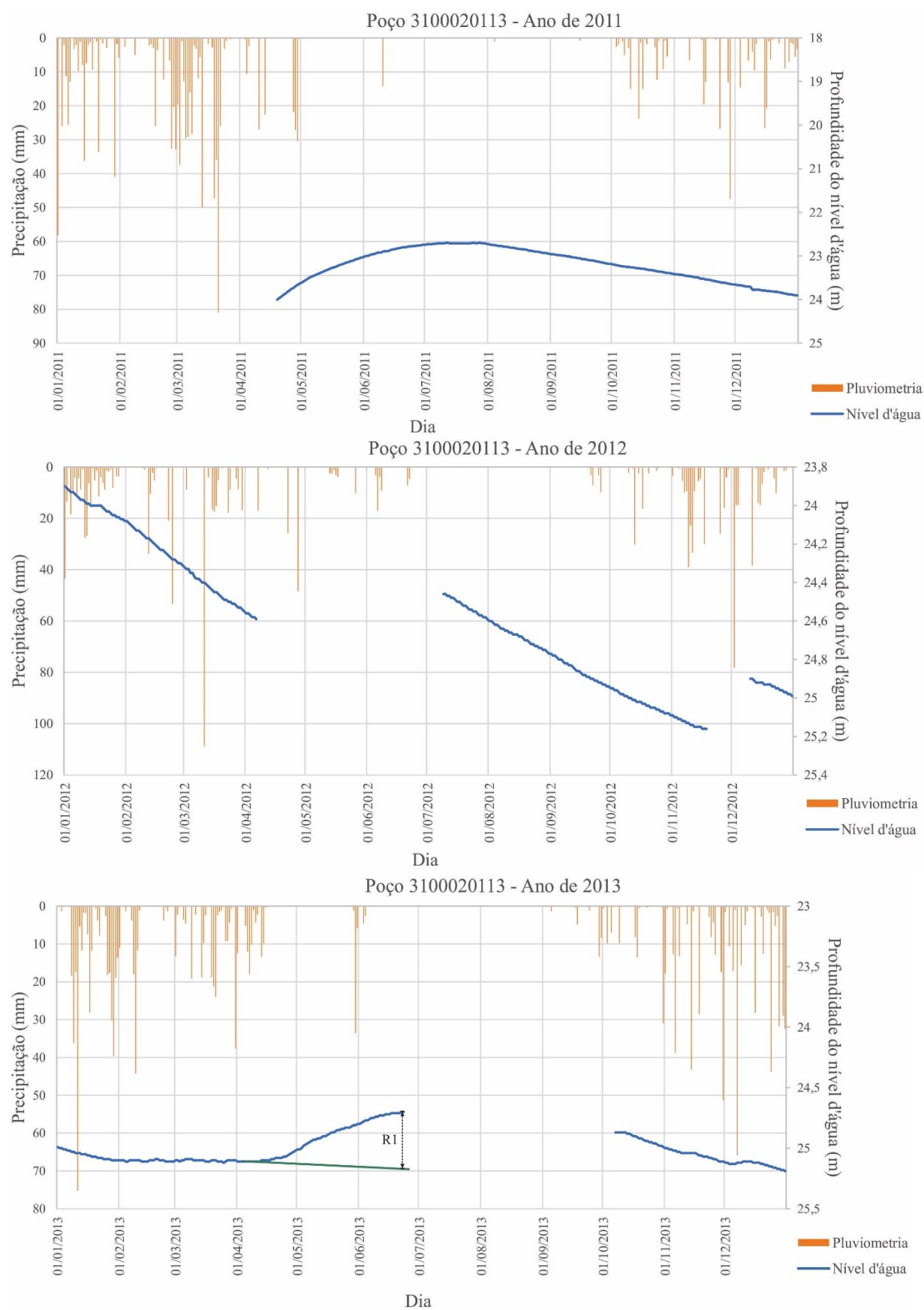


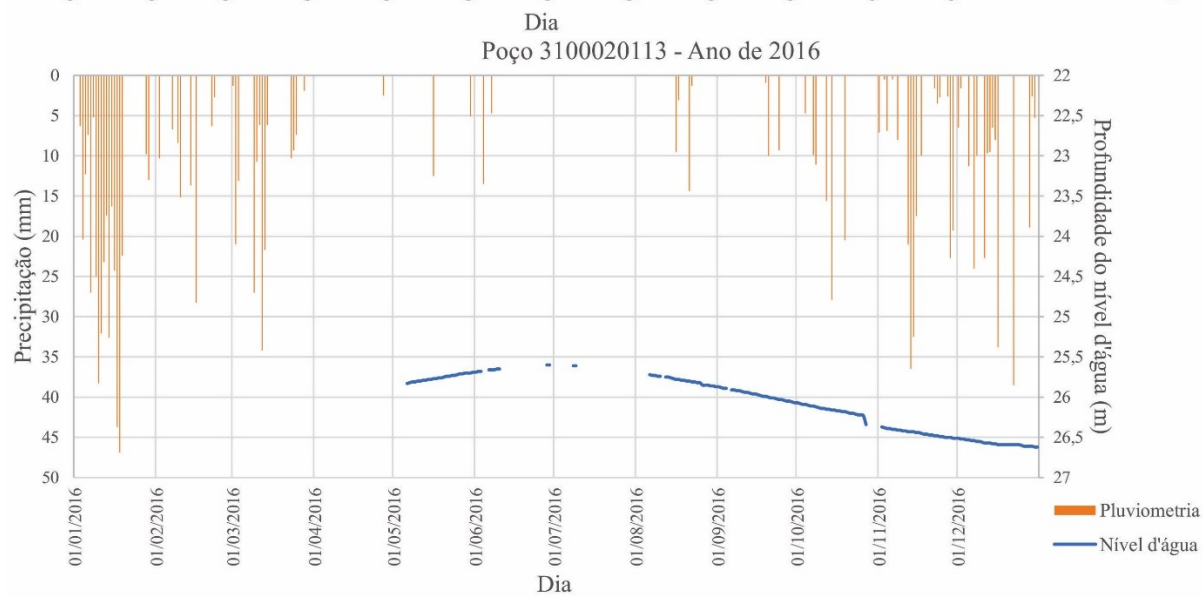
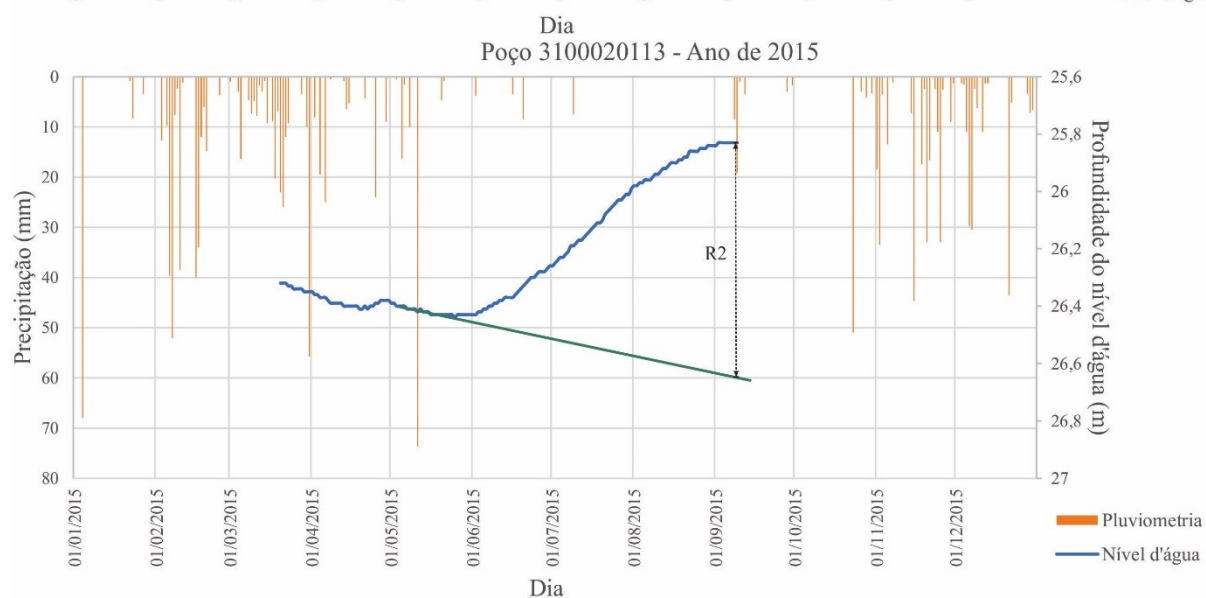
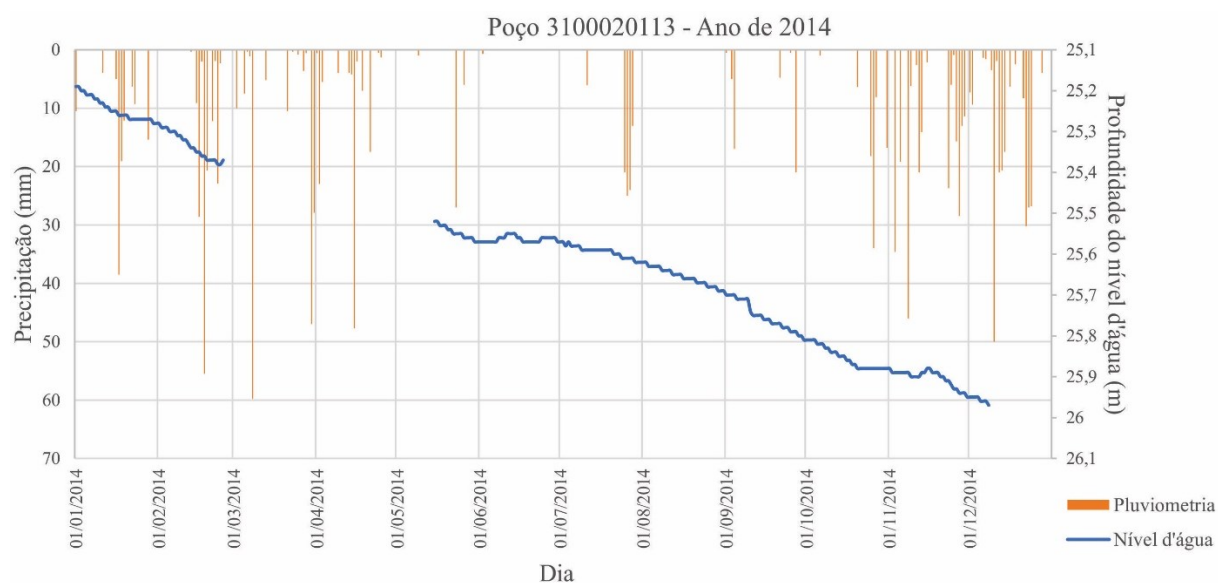


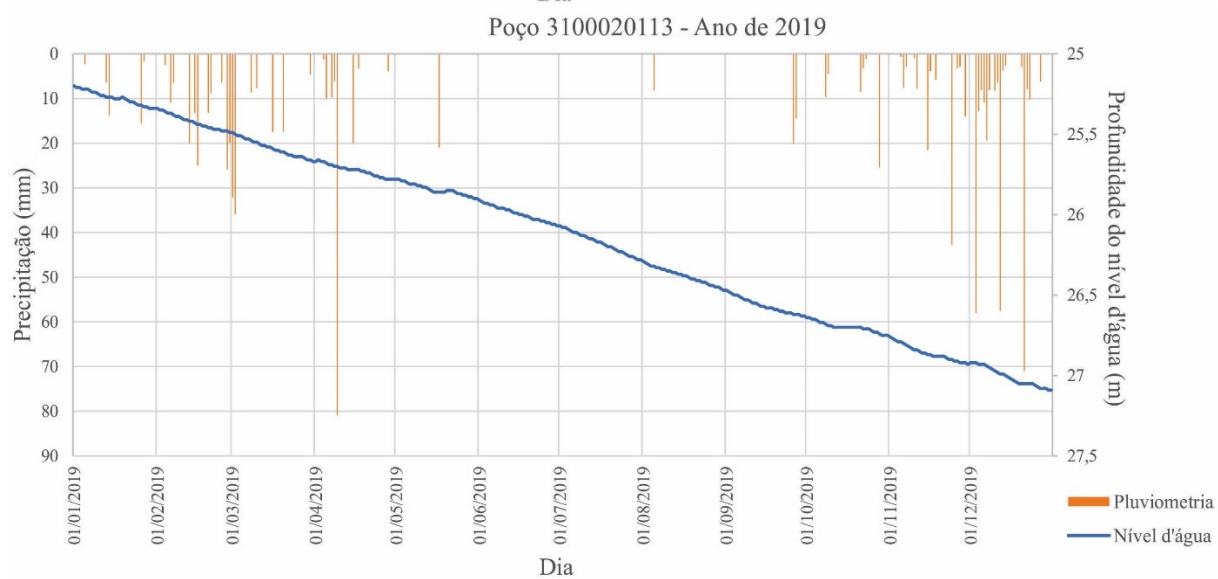
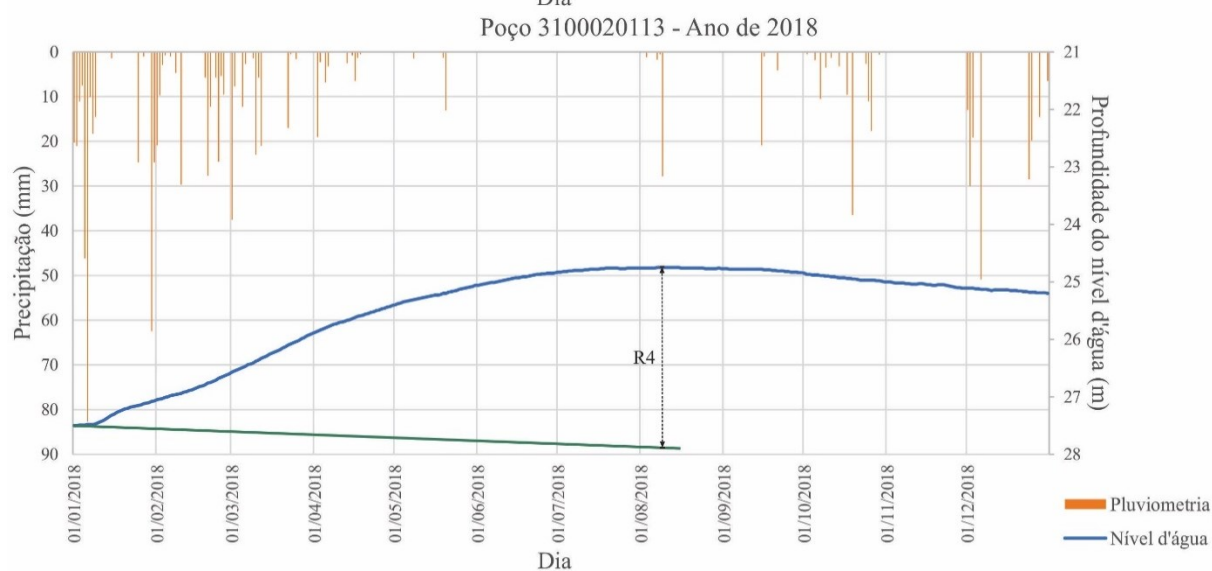
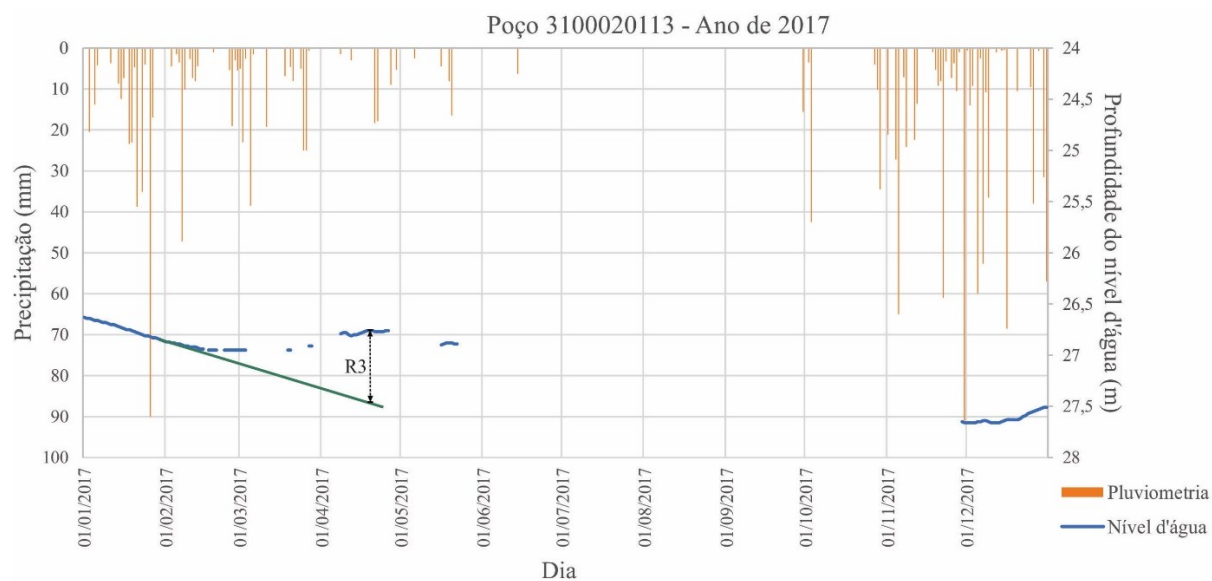


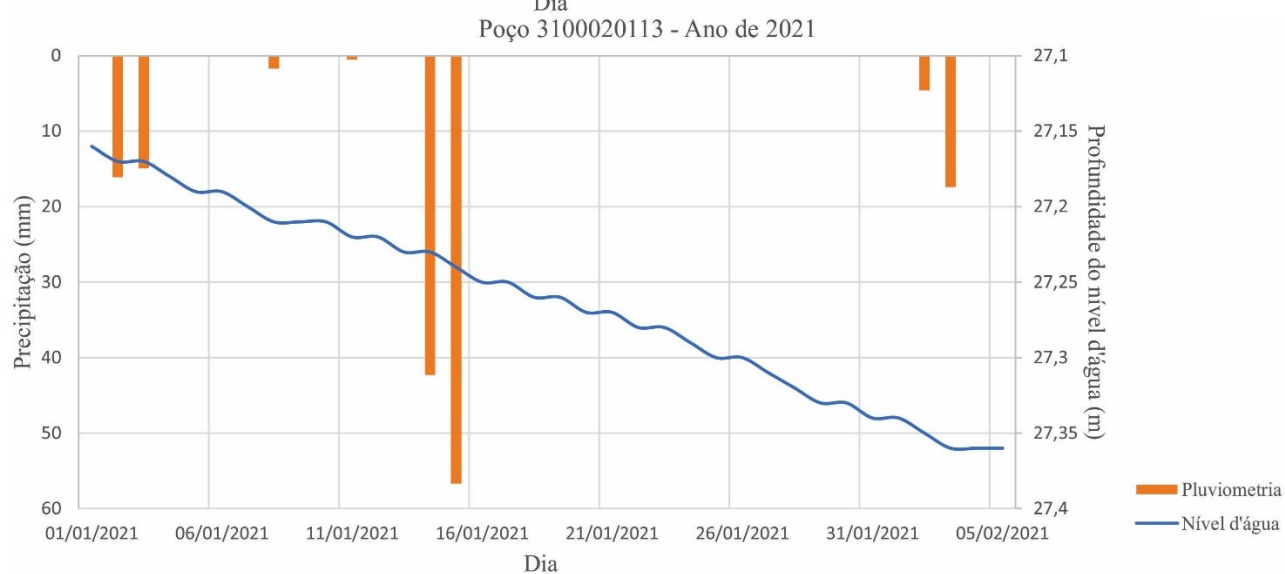
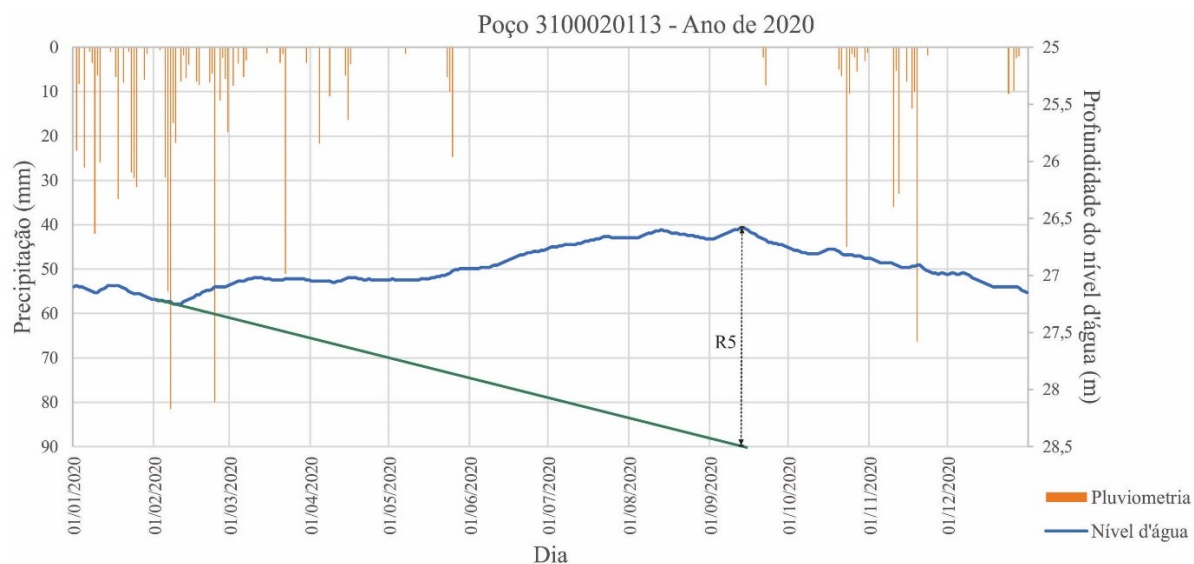


APÊNDICE C – Poço de monitoramento PM 3









APÊNDICE D – Poço de monitoramento PM 4

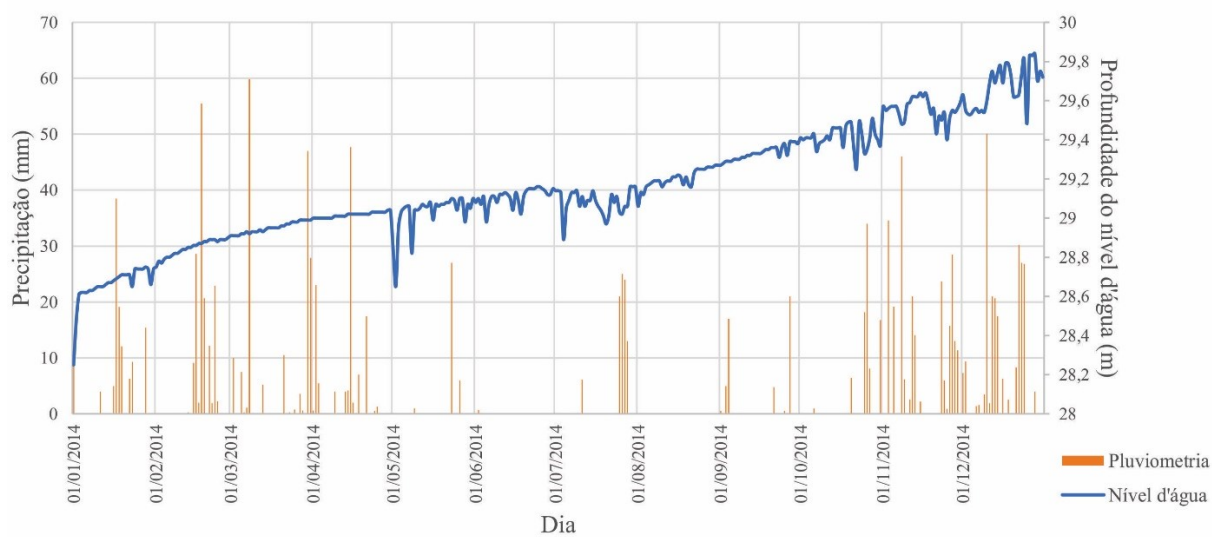
Poço 3100020429 - Ano de 2012



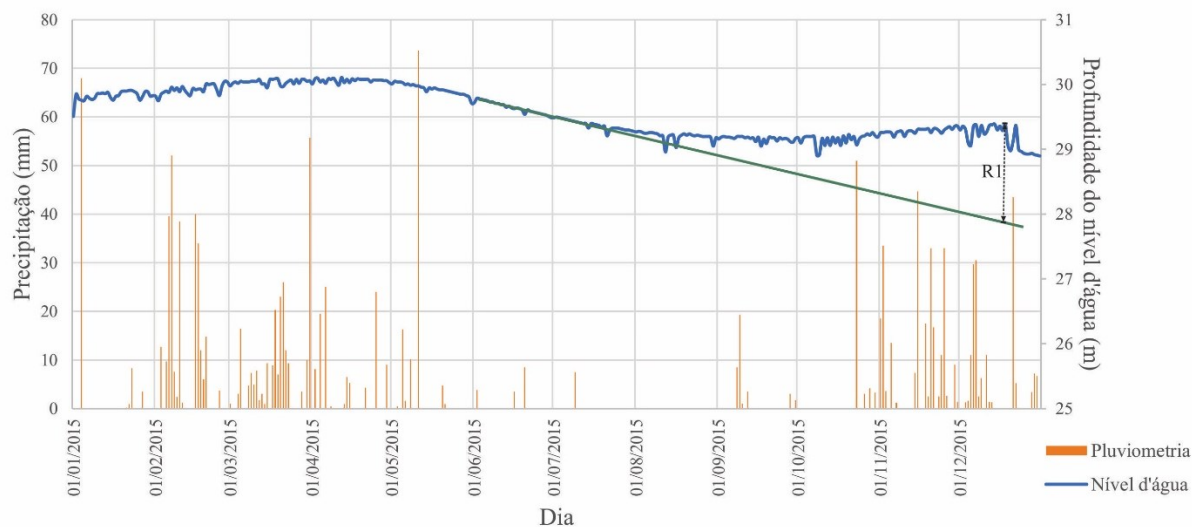
Poço 3100020429 - Ano de 2013



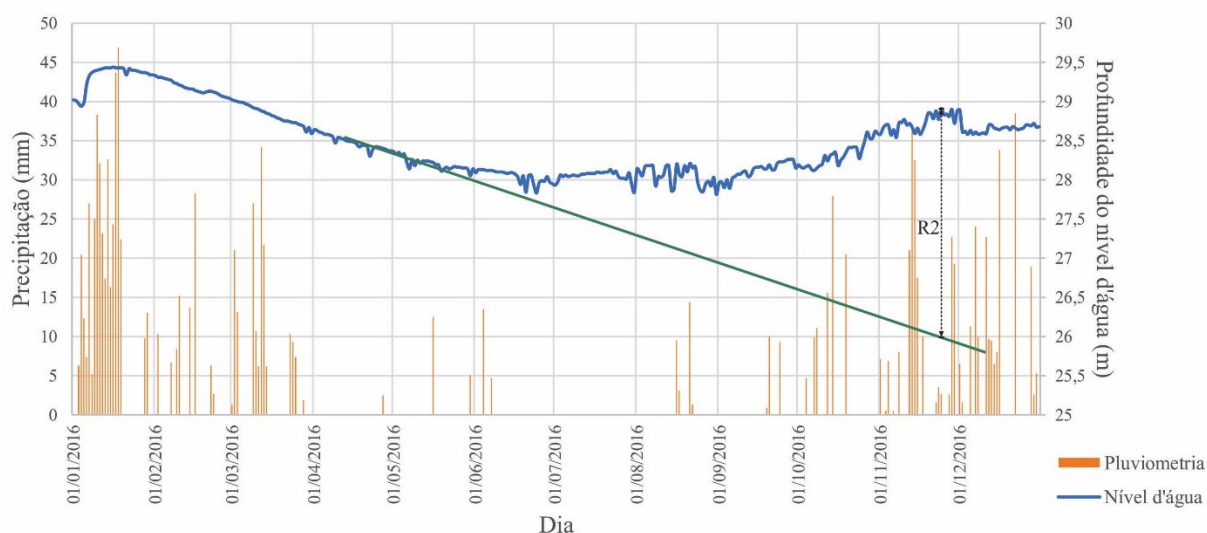
Poço 3100020429 - Ano de 2014



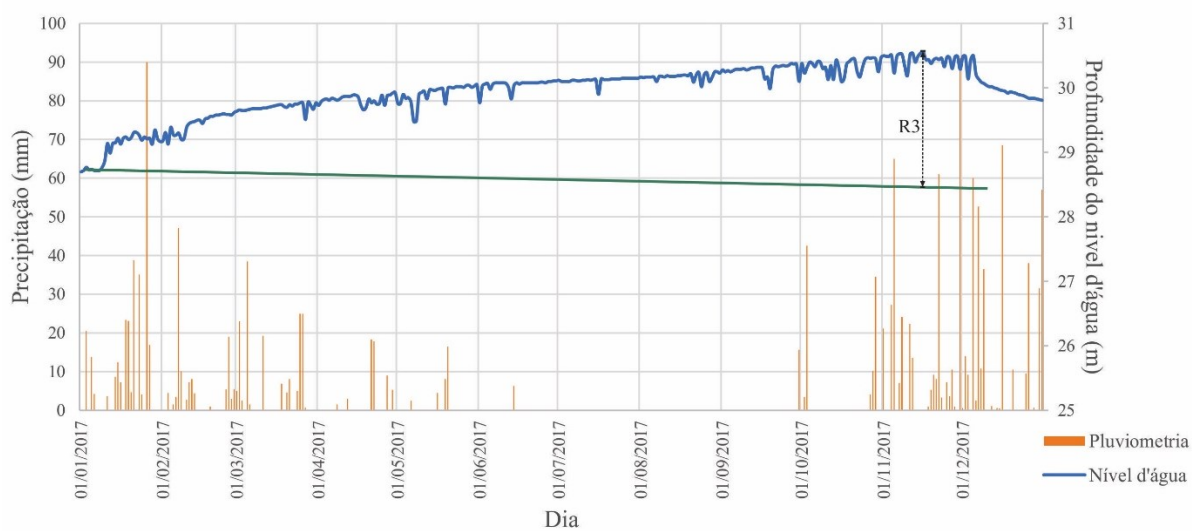
Poço 3100020429 - Ano de 2015



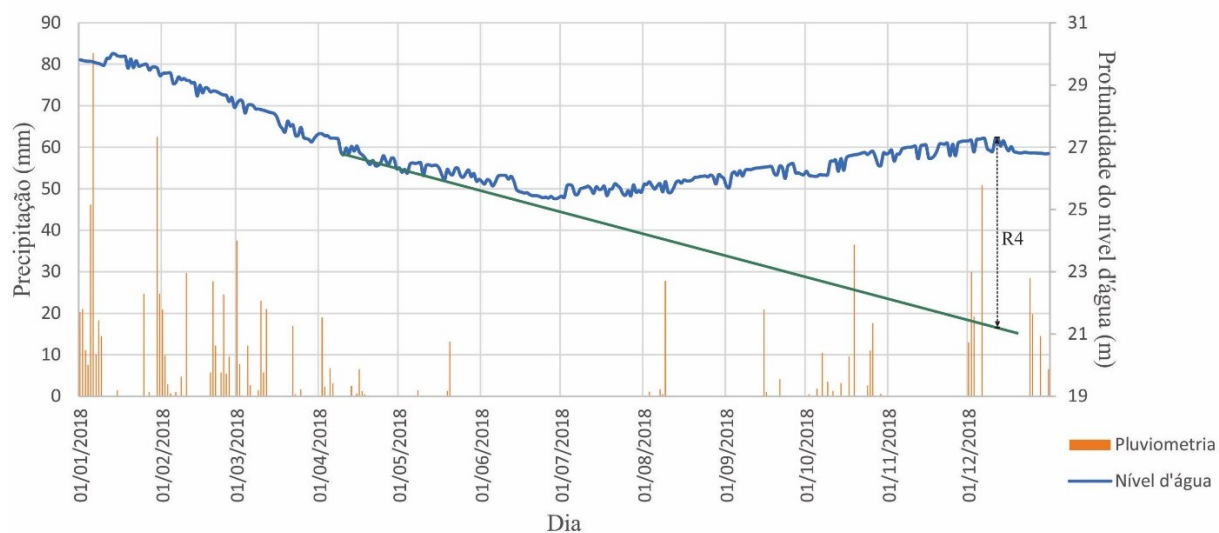
Poço 3100020429 - Ano de 2016



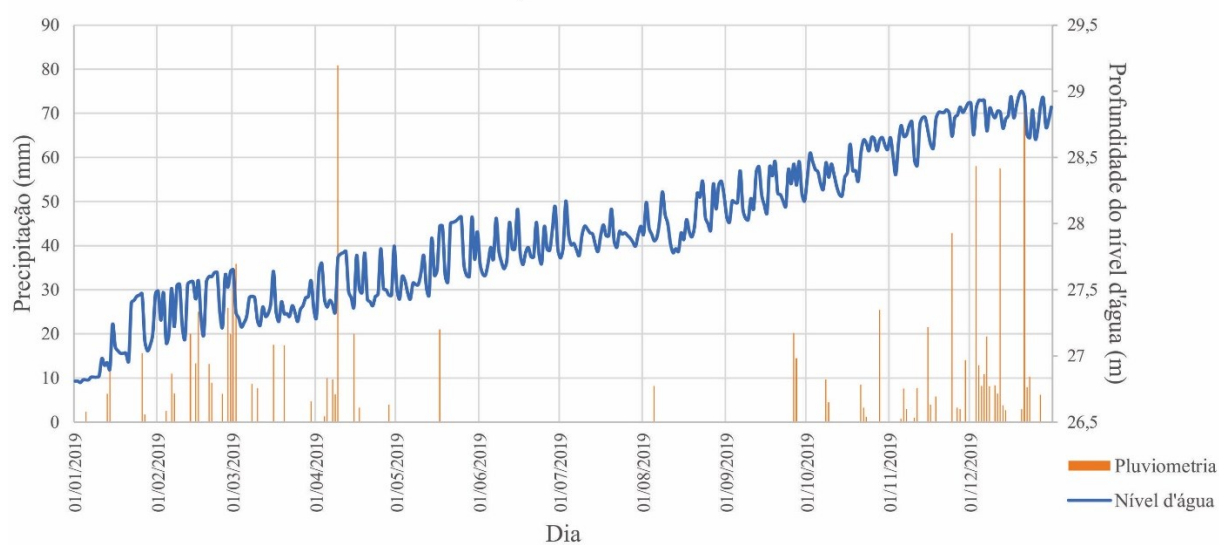
Poço 3100020429 - Ano de 2017



Poço 3100020429 - Ano de 2018



Poço 3100020429 - Ano de 2019



Poço 3100020429 - Ano de 2020

