

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

MODELAGEM NUMÉRICA EM REGIME TRANSIENTE PARA ESTIMATIVAS DE
RECARGA NO AQUÍFERO RIO CLARO NO *CAMPUS* DA UNESP DE RIO CLARO

Caio Marques Manara

ORIENTADOR: Prof. Dr. Chang Hung Kiang
COORIENTADOR: Prof. Dr. Elias Hideo Teramoto

Rio Claro (SP)

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
CAMPUS DE RIO CLARO

Caio Marques Manara

**MODELAGEM NUMÉRICA EM REGIME TRANSIENTE PARA
ESTIMATIVAS DE RECARGA NO AQUÍFERO RIO CLARO NO
CAMPUS DA UNESP DE RIO CLARO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro (SP)

2023

M266m Manara, Caio Marques
Modelagem numérica em regime transiente para estimativas de recarga no
Aquífero Rio Claro no campus da UNESP de Rio Claro / Caio Marques Manara.
-- Rio Claro, 2023
62 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade
Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
Claro

Orientador: Chang Hung Kiang
Coorientador: Elias Hideo Teramoto

1. Aquífero Rio Claro. 2. Regime transiente. 3. Estimativa de recarga. 4.
FEFLOW. 5. Método de elementos finitos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e
Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

CAIO MARQUES MANARA

MODELAGEM NUMÉRICA EM REGIME TRANSIENTE
PARA ESTIMATIVAS DE RECARGA NO AQUÍFERO RIO
CLARO NO *CAMPUS* DA UNESP DE RIO CLARO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

Comissão Examinadora


Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Dr. Elias Hideo Teramoto (coorientador)

Dr. Miguel Angel Alfaro Soto

Geól. Barbara Panegassi

Rio Claro, 04 de dezembro de 2023.


Assinatura do aluno


Assinatura do orientador

Dedico este trabalho aos meus pais, Djalma e Andréia.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Djalma e Andréia. Sem o apoio incondicional e carinho deles, não teria alcançado este ponto. Embora não tenham me ensinado tudo que sei, tudo que ensinaram eu guardei no coração.

Também sou muito grato à minha namorada, Larissa, por ter me acompanhado nesta jornada de cinco anos de universidade. Sua companhia me motivou a continuar dando o meu melhor, transformando os momentos mais desafiadores da graduação em lembranças memoráveis.

À minha Madrinha, Palmira, sou eternamente grato por sempre ter acreditado em mim.

Agradeço a FUNDUNESP pela bolsa concedida.

Agradeço toda a equipe do LEBAC, com especial gratidão ao Professor Chang pela oportunidade cedida, ao Elias e Bárbara pelo auxílio e paciência ao longo dos “trancos e barrancos” durante a elaboração deste trabalho, ao Miguel e Eduardo pelas correções providenciais, e ao Felipe "Salsicha" pela constante disposição em ajudar.

RESUMO

As águas subterrâneas são cruciais no ciclo hidrológico global, contribuindo para a manutenção dos corpos d'água e representando uma fonte crítica para a segurança hídrica. Sua gestão se tornou essencial para o desenvolvimento de diversas atividades antrópicas. Portanto, as pesquisas hidrogeológicas desenvolvem um papel fundamental na construção do conhecimento para tornar o consumo desse recurso sustentável. A UNESP do município de Rio Claro faz uso principalmente de águas subterrâneas para sua demanda hídrica, sendo considerável parte extraído do aquífero raso presente nas rochas da Formação Rio Claro, que afloram em grande parte do *campus*. O presente estudo empregou simulações numéricas de fluxo em regime transiente construídas no *software* Feflow 8.0. para estimar a recarga do aquífero e avaliar se os volumes atualmente explorados para fins de abastecimento do *campus* são sustentáveis. No período simulado, verificou-se que a recarga representa 13,2% da precipitação. Outro aspecto relevante a ser destacado é que apenas uma pequena parcela (2,14%) da recarga total é extraída pelo poço de abastecimento.

Palavras-chave: Aquífero Rio Claro. Regime transiente. Estimativa de recarga. FEFLOW. Método de elementos finitos.

ABSTRACT

Groundwater plays a crucial role in the global hydrological cycle, contributing to the maintenance of water bodies and representing a critical source for water security. Its management has become essential for the development of various human activities. Therefore, hydrogeological research plays a fundamental role in building knowledge to make the consumption of this resource sustainable. The UNESP in the municipality of Rio Claro mainly relies on groundwater for its water demand, with a significant portion extracted from the shallow aquifer present in the rocks of the Rio Claro Formation, which outcrops over much of the campus. This study employed numerical simulations of transient flow using Feflow 8.0 software to estimate aquifer recharge and assess whether the volumes currently extracted for campus supply are sustainable. During the simulated period, it was found that recharge represents 13.2% of precipitation. Another relevant aspect to highlight is that only a small fraction (2.14%) of the total recharge is extracted by the supply well.

Keywords: Rio Claro Aquifer. Transient regime. Recharge estimation. FEFLOW. Finite elements method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de trabalho na modelagem de águas subterrâneas.	17
Figura 2 - Exemplo de domínio discretizado por diferenças finitas e elementos finitos	18
Figura 3 - Mapa de localização de área de estudo em diferentes escalas, incluindo representações do Brasil (A), Estado de São Paulo (B), Município de Rio Claro (C) e detalhes da área de estudo (D). Cada mapa destaca a localização da área em seu respectivo contexto geográfico.....	19
Figura 4 - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro.	20
Figura 5 - Mapa geológico local com as principais unidades litoestratigráficas.....	23
Figura 6 - Municípios da Bacia do Corumbataí.	25
Figura 7 - Mapa de localização dos 29 poços de monitoramento distribuídos na UNESP.	28
Figura 8 - Mapa de localização de sondagens examinadas.	29
Figura 9 - Sondagem HPTX com 10,80 metros de profundidade na Formação Rio Claro. Em vermelho está o local de amostragem da lente de silte, enquanto o preto está representado os locais de amostragem da areia argilosa.	32
Figura 10 - Curva granulométrica do segmento arenoso.	32
Figura 11 - Curva granulométrica do segmento siltooso.	33
Figura 12 - Variação da carga hidráulica dos poços de monitoramento PM-04, PM- 06, PM-16 e PM-31.	34
Figura 13 - Precipitação mensal no período estudado.	34
Figura 14 - Mapa das condições de contorno.	35
Figura 15 - Mapa de zonas de recarga separadas a partir do uso e ocupação da superfície.....	36
Figura 16 – Modelo geológico tridimensional da área de estudo representando as formações Rio Claro e Corumbataí com sobrelevação de 3x. A) Perspectiva oblíqua do modelo. B) Perspectiva em perfil, salientando o contato entre ambas formações.....	38
Figura 17 - Superfície topográfica do modelo.....	39
Figura 18 - Malha de elementos finitos discretizada utilizando Leapfrog 2021.1 com sobrelevação de 3x. A) Perspectiva oblíqua. B) Em perfil.	40

Figura 19 – Distribuição de carga hidráulica gerado pela simulação do modelo em regime permanente.	42
Figura 20 - Gráfico de dispersão das cargas hidráulicas medidas e calculadas no regime permanente.	43
Figura 21 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-06, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruces vermelhas indicam as cargas medidas. .	44
Figura 22 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-13, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruces vermelhas indicam as cargas medidas. .	44
Figura 23 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-18, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruces vermelhas indicam as cargas medidas. .	45
Figura 24 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-25, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruces vermelhas indicam as cargas medidas. .	45
Figura 25 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-34, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruces vermelhas indicam as cargas medidas. .	46
Figura 26 - Gráfico de dispersão das cargas hidráulicas medidas e calculadas em todos intervalos de tempo do regime transiente.....	47
Figura 27 - Variação de carga hidráulica do PM-09 simulada em cenários com exploração ativa e inativa.	48
Figura 28 - Variação de carga hidráulica do PM-31 simulada em cenários com exploração ativa e inativa.	48
Figura 29 - Variação de carga hidráulica do PM-32 simulada em cenários com exploração ativa e inativa.	49
Figura 30 - Mapa de diferenças de carga hidráulica dos cenários de exploração ativa e inativa referente ao dia 657 simulado.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores mínimos, médio e máximo de K e porosidade do Aquífero Rio Claro compilados da literatura.....	31
Tabela 2 – Profundidade das sondagens e contato entre as Formações Rio Claro e Corumbataí.....	37
Tabela 3 – Comparação dos resultados de recarga e precipitação.....	50
Tabela 4 – Comparação dos resultados de recarga e exploração.....	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.2 Objetivo e Justificativa	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Modelagem Numérica de Fluxo	14
3.2 Método dos Elementos Finitos	18
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
4.1 Geologia Regional	19
4.1.1 Grupo Itararé	20
4.1.2 Formação Tatuí	21
4.1.3 Formação Irati	21
4.1.4 Formação Corumbataí	21
4.1.5 Formação Pirambóia	22
4.1.6 Formação Botucatu	22
4.1.7 Formação Serra Geral	22
4.1.8 Formação Rio Claro	22
4.2 Geomorfologia	23
4.3 Clima	24
4.4 Contextualização Hidrológica e Hidrogeológica Local	24
5. MATERIAIS E MÉTODOS	27
5.1 Revisão bibliográfica	27
5.2 Monitoramento de poços	27
5.3 Modelo Hidrogeológico Conceitual	28
5.4 Modelo e Caracterização Geológica	29
5.5 Simulação Numérica De Fluxo	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31

6.1 Características permo-porosas do Aquífero Rio Claro	31
6.2 Monitoramento do nível d'água e exploração	33
6.3 Modelo conceitual.....	35
6.4 Modelo geológico	37
6.5 Discretização do Modelo	39
6.6 Modelo em regime permanente	41
6.7 Modelo em regime transiente	43
6.8 Recarga e exploração	47
7. CONCLUSÕES	51
BIBLIOGRAFIA	52
ANEXOS.....	58
ANEXO 1 - Variação semanal de carga hidráulica dos poços monitorados.....	59

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas desempenham um papel crucial no ciclo hidrológico da Terra, contribuindo significativamente para a manutenção dos corpos d'água superficiais, seja através do fluxo direto para rios ou por meio de nascentes (Kresic, 2007). Os aquíferos são responsáveis por armazenar cerca de 97% das águas doces e líquidas disponíveis no mundo, tornando-se uma fonte crítica para a segurança hídrica global. Acrescenta-se, ainda, que a água armazenada nos aquíferos compreende a maior reserva acessível e representa um terço de toda a água doce consumida no mundo (Siebert *et al.*, 2010). Além disso, os aquíferos servem como reservas valiosas e estratégicas durante longos períodos de seca, especialmente em regiões áridas ou semiáridas (Famiglietti, 2014). No Brasil, a água subterrânea é um recurso natural amplamente explorado, sendo principalmente utilizado para abastecimento doméstico e agricultura (Hirata *et al.*, 2019). Deste modo, as estimativas da recarga das águas subterrâneas representam um requisito essencial para a adequada gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Dado que a recarga das águas subterrâneas não pode ser medida diretamente, foram propostas numerosas abordagens para estimar a partir de uma vasta gama de métodos que variam em escala e complexidade (Scanlon *et al.*, 2002; Healy e Cook, 2002). Na atualidade, umas das abordagens mais empregadas para estimativas de recarga é o uso de modelos matemáticos numéricos transiente (e.g., Xu *et al.*, 2015; El-Zehairy *et al.*, 2018; Teramoto e Chang, 2018).

O *campus* da UNESP no município de Rio Claro é integralmente abastecido por águas subterrâneas provenientes do Aquífero Rio Claro e o Sistema Aquífero Tubarão. O Aquífero Rio Claro, que é o foco deste trabalho, consiste em um aquífero livre e superficial formado pela Formação Rio Claro. Localmente, esse aquífero entra em contato com a Formação Corumbataí e tem uma espessura que varia entre 13,2 e 21 metros (Teramoto *et al.*, 2021). Já o sistema Aquífero do Grupo Tubarão (Formação Tatuí e Grupo Itararé) é confinado e apresenta profundidades em torno de 200 metros (Oliva, 2006).

Parcela significativa da água que abastece o *campus* da UNESP é proveniente do Aquífero Rio Claro, aflorante em parte do *campus*. No entanto, não se conhece

atualmente os possíveis impactos e muito menos os limites seguros de exploração deste aquífero.

1.2 Objetivo e Justificativa

O propósito deste estudo foi de avaliar os possíveis impactos no Aquífero Rio Claro no *campus* da UNESP em razão da exploração do mesmo, realizando a simulações numéricas de fluxo em regime transiente para estimativas de recarga do Aquífero Rio Claro na área de estudo.

A dependência do *campus* das águas subterrâneas provenientes do Aquífero Rio Claro, aliada à carência de conhecimento sobre os impactos potenciais e os limites seguros de exploração desse aquífero, destaca a necessidade de investigações para a gestão sustentável desse recurso vital para a comunidade universitária.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelagem Numérica de Fluxo

Os modelos, em sua essência, são representações simplificadas da realidade, sendo amplamente utilizados como instrumentos para aprofundar o entendimento de sistemas complexos. A modelagem de águas subterrâneas não é exceção a esse conceito.

Neste contexto, os modelos matemáticos têm a função de criar uma representação utilizando equações matemáticas que governam o fluxo subterrâneo. Na criação do modelo, é essencial ter em mente o objetivo, que normalmente se enquadra em uma das seguintes categorias: previsão e interpretação. Modelos preditivos são usados para compreender as possíveis respostas do aquífero quando submetido a determinadas condições, enquanto os modelos interpretativos têm como objetivo sistematizar informações existentes e explorar o funcionamento do aquífero (Feitosa *et al.*, 2008).

Anderson *et al.* (2015) estabelece uma analogia entre o fluxo de trabalho em modelos hidrogeológicos e o próprio método científico. Esse fluxo se inicia com uma pergunta e segue para testagem sistemática de várias hipóteses até encontrar a resposta que melhor descreve a realidade. É importante ressaltar que a modelagem não deve ser vista como o objetivo em si, mas sim como uma ferramenta utilizada para responder uma ou mais perguntas.

Após a definição do propósito é criado um modelo conceitual, ele consiste na organização de informações de campo sobre o funcionamento do aquífero da área. O modelo conceitual busca capturar as principais interações e processos hidrogeológicos que ocorrem no sistema, como recarga, descarga, geometria do sistema, fronteiras do modelo, condições de contorno, entre outros. (Feitosa *et al.*, 2008).

Os modelos hidrogeológicos podem ser classificados em dois tipos principais: modelos de fluxo e modelos de transporte de massa. Os modelos de fluxo têm como propósito simular o movimento natural da água subterrânea, enquanto os modelos de transporte de massa têm o objetivo de compreender o comportamento de substâncias poluentes na água. Além destes dois tipos, os modelos matemáticos podem ser

classificados de acordo com sua variação no tempo, probabilidade de ocorrência e equações utilizadas.

A equação governante, que representa as leis e princípios que regem um processo em questão, é fundamental para construção de qualquer modelo matemático. No contexto da modelagem hidrogeológica, a equação governante é derivada da combinação da lei de Darcy, que descreve o fluxo através de um meio poroso, com princípio de conservação de massa, que estabelece que a quantidade de água se mantém constante ao longo do processo (Gonçalves, 2016).

Para que seja possível a resolução da equação governante do fluxo, é necessário a especificação das condições de contorno, são elas que restringem o problema, determinando variáveis através de expressões matemáticas no limite do domínio e, conseqüentemente, transformam as soluções em únicas (Wang e Anderson, 1982). Elas desempenham um papel crucial, já que condições mal estabelecidas podem acarretar em erros severos nas soluções das equações. As condições de contorno utilizadas são:

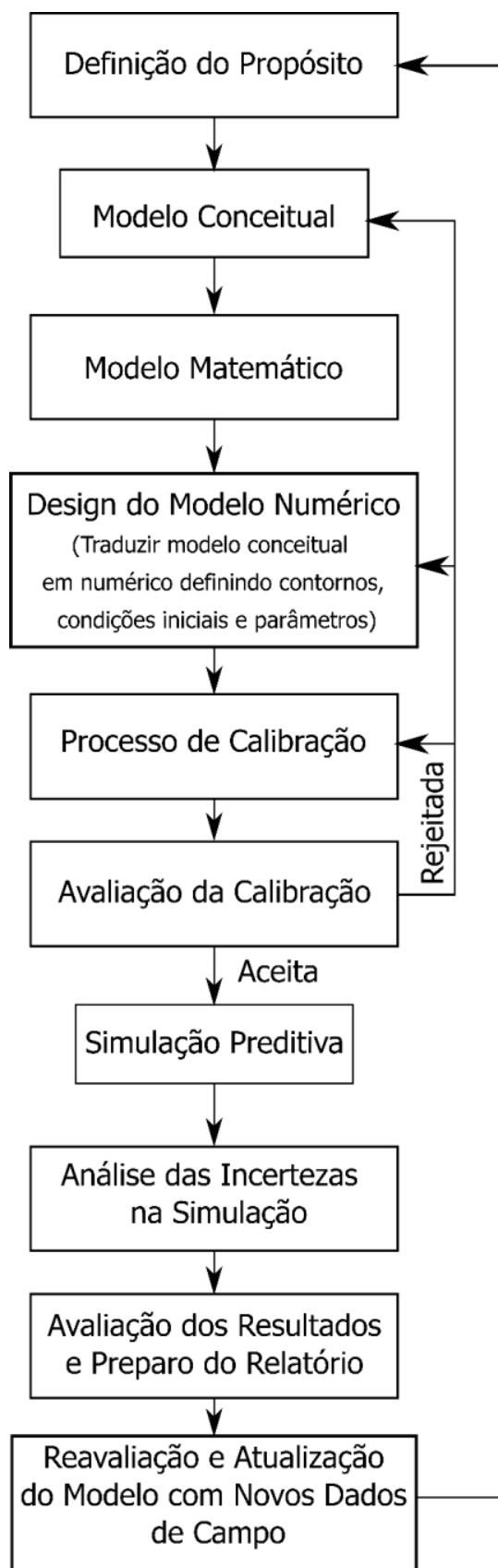
- Condição de Dirichlet (Tipo I): Ocorre quando a carga hidráulica (CH) é especificada. Exemplos desse caso são aquíferos com conexão ao longo de rios ou lagos.
- Condição de Neumann (Tipo II): Quando o fluxo é conhecido, podendo ser nulo ou não. O fluxo nulo é o mais utilizado deste tipo, exemplos dele são os divisores de água ou contatos impermeáveis.
- Condições de Robin ou de Cauchy (Tipo III): São condições mistas que combinam o Tipo I e II. É uma função linear do fluxo e carga hidráulica. Ocorrem tipicamente em contornos semipermeáveis.

No caso de modelos transientes, é também necessário a especificação das condições iniciais. Elas são os valores de carga hidráulica utilizados no início da simulação, são geralmente obtidas através da modelagem permanente do aquífero. Durante a simulação em regime transiente, os valores de carga hidráulica calculados em um determinado momento são dependentes dos valores iniciais definidos. Portanto, as condições iniciais desempenham um papel essencial na simulação transiente, servindo como referência para comparação dos resultados obtidos.

Após estabelecer os parâmetros e condições, inicia-se a etapa de calibração. Anderson *et al.* (2015) e Kresic (2007) definem esta fase como um processo de encontrar os contornos, estresses e parâmetros hidrogeológicos que melhor reproduzem as informações de cargas hidráulicas e fluxos coletados em campo. O modelo é executado diversas vezes com pequenos ajustes em suas variáveis, sendo número de vezes necessárias dependendo da quantidade e qualidade dos dados disponíveis, bem como da precisão desejada para o modelo.

Calibração e análise de sensibilidade são partes essencialmente interligadas. O processo de calibração revela quais parâmetros são mais sensíveis a mudanças e têm maior impacto nos resultados finais do modelo. Ao documentar e analisar as alterações feitas durante a calibração, a análise de sensibilidade está sendo realizada (Kresic, 2007).

As simulações de numéricas de fluxo, em princípio, seguem o Protocolo de Aplicação de Modelos Matemáticos (PAMM), conforme ilustrado na Figura 1, ele consiste num fluxograma que exemplifica as etapas da metodologia a ser seguida para criação do modelo numérico.

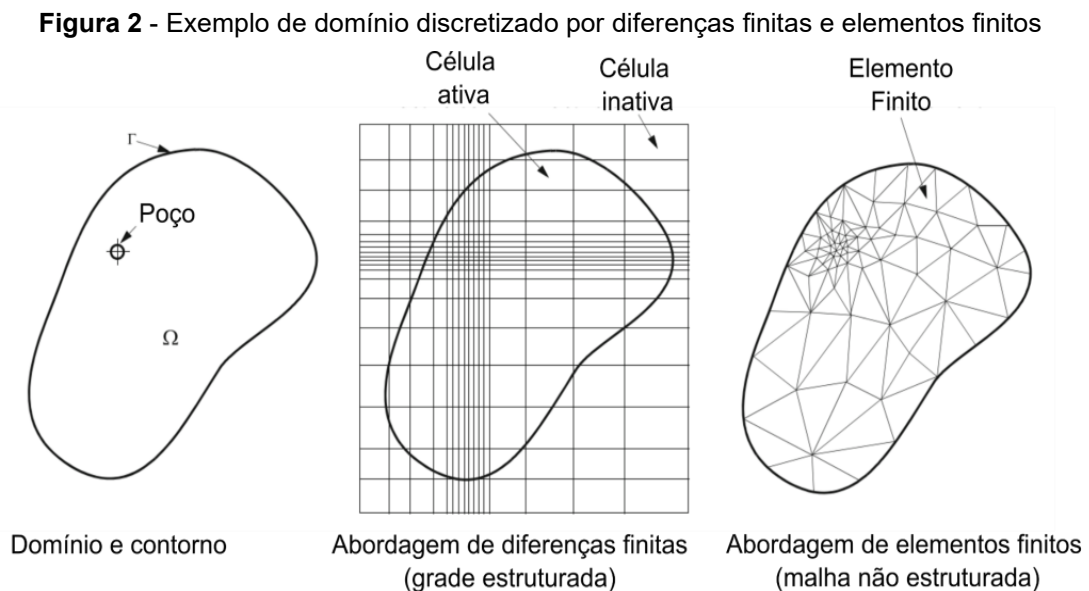
Figura 1 - Fluxo de trabalho na modelagem de águas subterrâneas.

Fonte: Modificado de Anderson *et al.* (2015).

3.2 Método dos Elementos Finitos

Os modelos numéricos utilizam uma aproximação da equação governante para calcular a carga hidráulica em pontos discretos que representam células individuais (Anderson *et al.*, 2015; Kresic, 2007). Há diversas abordagens possíveis para se realizar a modelagem numérica, os dois métodos mais conhecidos atualmente são de diferenças finitas (MDF) e por elementos finitos (MEF).

Ambos os métodos se diferenciam na maneira que se aproximam da equação governante, como também na maneira que constroem suas células. No MDF, os nós são posicionados usando índices para atribuir localizações relativas dentro de uma grade retangular, fazendo uso de diferenciação para se aproximar da equação de fluxo. Já no MEF, as localizações de nós são designadas usando coordenadas espaciais em uma malha (Figura 2), se aproximando por integração da equação. Apesar desses métodos diferirem em conceito, eles são capazes de produzir resultados similares se o espaçamento de células for suficientemente pequeno (Anderson *et al.*, 2015).



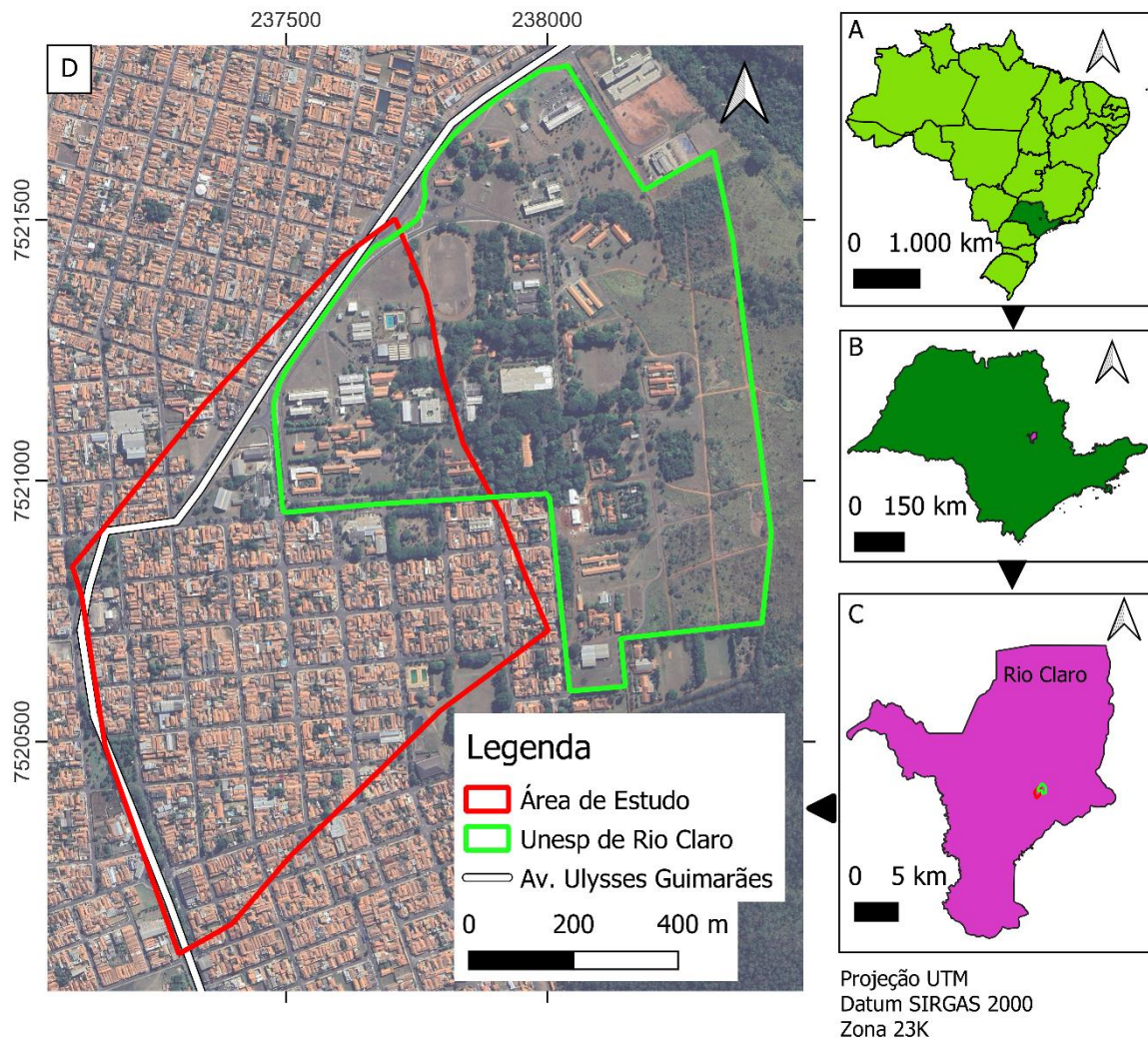
Fonte: Modificado de Diersch (2014).

Em princípio, a matemática usada no MEF é mais sofisticada, porém, esse método permite maior flexibilidade para resolução de diferentes tipos de problemas, permitindo a modelagem de geometrias e contornos complexos, e meios heterogêneos com mais facilidade.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área estudada localiza-se nos arredores do *campus* da UNESP de Rio Claro. Possui formato losangular, com seu limite oeste acompanhando a Avenida Ulysses Guimarães, e cobre parte da porção oeste do *campus* (Figura 3).

Figura 3 - Mapa de localização de área de estudo em diferentes escalas, incluindo representações do Brasil (A), Estado de São Paulo (B), Município de Rio Claro (C) e detalhes da área de estudo (D). Cada mapa destaca a localização da área em seu respectivo contexto geográfico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Geologia Regional

Na região de Rio Claro aflora o flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, ela está localizada na porção centro-sul da América do Sul, com uma área de aproximadamente 1.600.000 km², abrangendo a maior parte do território brasileiro

meridional, parte do Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai (Rostirolla *et al.*, 2000; Milani, 2007).

Na região, a Bacia apresenta unidades litoestratigráficas das eras Paleozoica (Grupo Itararé; Formações Tatuí, Irati e Corumbataí), Mesozoica (Formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral) e Cenozoica (Formação Rio Claro) (Figura 4) (Zaine, 1994).

Figura 4 - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ NA REGIÃO DE RIO CLARO/LIMEIRA/PIRACICABA (SP)							
ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Aprox. (metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO
CENOZOICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRE. COLUVIÕES
	TERCIÁRIO		ITAQUERI		100	ARENITOS CONGLOMERÁTICOS E ARENITOS SILICIFICADOS / FERRICRETES	CONTINENTAL: LEQUES ALUVIAIS FLUVIAL E LACUSTRE
MEZOZOICA	CRETÁCEO	SÃO BENTO	SERRA GERAL		100	DERRAMES DE BASALTOS COM LENTES DE ARENITO NA BASE, DIQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO	MAGMATISMO FISSURAL
	JURÁSSICO		BOTUCATU		100	ARENITOS BEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E BEM ESFÉRICOS, POUCA ARGILA	CONTINENTAL: DESÉRTICO
	TRIÁSSICO		PIRAMBÓIA		150	ARENITOS COM GRÃOS ARREDONDADOS E ESFÉRICOS. DIVERSOS NÍVEIS DE LAMITOS	CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
			CORUMBATAÍ		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS E COQUINAS <i>(Argilitos = matéria-prima para a indústria cerâmica da região de Rio Claro)</i>	CONTINENTAL: LACUSTRE TRANSICIONAL: PLANÍCIE DE MARE
PALEOZOICA	PERMIANO	PASSA DOIS	IRATI		40	FOLHELHOS, SILTITOS, FOLHELHOS PIROBETUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS	TRANSICIONAL: LAGUNA MARINHO RASO: PLATAFORMA
			TATUÍ		50	SILTITOS E SILTITOS ARENOSOS	TRANSICIONAL: PLANÍCIE COSTEIRA MARINHO RASO: PLATAFORMA
			Grupo ITARARÉ (indiviso no Estado de São Paulo)		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS TILITOS)	CONTINENTAL (GLACIAL): ALUVIAL - LEQUES E FLUVIAL; LACUSTRE TRANSICIONAL: DELTAS MARINHO (GLACIO-MARINHO): PLATAFORMAL
	CARBONIFERO						
Pré-Cambriano			EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS	

Fonte: Perinotto e Zaine, 2008.

4.1.1 Grupo Itararé

O Grupo Itararé é composto por depósitos sedimentares siliciclásticos, que registram um período glacial permocarbonífero na Bacia do Paraná. O controle glacial na sedimentação, a tectônica sinsedimentar e as oscilações do nível de base conferem à unidade um arcabouço estratigráfico complexo, com expressivos pacotes de diamictitos, siltito cinza, folhelho, ritmito e, fácies arenosas de granulação variável

(Schneider *et al.*, 1974; Saad, 1977; Fúlfaro *et al.*, 1980; Vesely e Assine, 2004; Vesely, 2006).

O grupo registra uma deposição inicial de caráter continental, de alta energia, transgredindo para um ambiente marinho a partir de uma instalação gradativa de lobos deltaicos e fácies pelíticas plataformais, com alternância de fluxos de massas subaquosos e turbiditos (Zaine, 1994).

4.1.2 Formação Tatuí

A Formação Tatuí, de idade permiana, é caracterizada como uma unidade pós-glacial sotoposta à Formação Irati. Soares (1972) subdividiu a Formação Tatuí em dois membros, superior e inferior. Segundo Fúlfaro *et al.* (1984), a porção inferior da Formação Tatuí é constituída por siltito e arenito muito fino de coloração avermelhada, de acamamento fino a espesso e apresenta intercalações de arenito fino com estratificação plano-paralela, possuindo também camadas finas de calcário e sílex.

O membro superior da formação, é caracterizado por siltito cinza-esverdeado carbonoso, com intercalações de arenito fino maciço e concreções calcárias. As fácies sedimentares do membro superior marcam a transição de depósitos aluviais passando para depósitos de mar raso com barras de maré e depósitos plataformais de sedimentação pelito-carbonática (Fúlfaro *et al.*, 1984; Stevaux *et al.*, 1986; Assine *et al.*, 2003).

4.1.3 Formação Irati

A Formação Irati possui idade permiana e pode ser subdividida em duas porções, sendo a sequência basal composto por folhelhos e siltitos (Membro Taquaral), e a porção superior formada por intercalações de folhelhos com calcários (Membro Assistência), representam ambientes marinho calmos e ambientes marinhos rasos, respectivamente (Schneider *et al.*, 1974).

4.1.4 Formação Corumbataí

A Formação Corumbataí é caracterizada por argilito, siltito arenoso e argiloso finamente laminado de coloração avermelhada ou arroxeada (porções média e superior) e, siltito maciço de coloração cinza esverdeada a azulada (porção inferior), com laminação plano-paralela (Landim, 1967).

Segundo Schneider *et al.* (1974), as características e litológicas basais da formação indicam deposição marinha, que gradacionam para ambientes cada vez mais rasos para o topo.

4.1.5 Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia é formada por uma sucessão de espessas camadas arenosas de granulação fina a média, possuindo maior proporção de fração argilosa em sua porção inferior, exibem estratificação cruzada tabular, acanalada ou planoparalela, intercalando camadas de lamitos arenosos de cores que variam de tons claros a amarelo, roxo, vermelho e verde (Landim *et al.*, 1980). O ambiente deposicional interpretado para a formação é majoritariamente eólico, com alguns depósitos fluviais subordinados (Caetano-Chang e Wu, 1995).

4.1.6 Formação Botucatu

A Formação Botucatu consiste em uma sequência de arenitos avermelhados, de granulometria fina a média, com estratificações cruzadas de diferentes tamanhos. Grande parte desses arenitos apresenta silicificação e aspecto fosco. Essa unidade é composta por sucessivas deposições monótonas de dunas eólicas em um ambiente desértico que se estendeu por toda a Bacia do Paraná (Schneider *et al.*, 1974)

4.1.7 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral consiste em espessos derrames basálticos, toleíticos, afaníticos, de coloração cinza escuro a preta. Na folha de Rio Claro e região, a Formação Serra Geral ocorre na forma de diques e soleiras de diabásio com coloração cinza escuro a preta, presentes principalmente nos leitos dos rios Corumbataí e Passa Cinco (Zaine, 1994; Soares, 1975). Corresponde às sequências de rochas vulcânicas geradas por um intenso magmatismo fissural associado a uma série de episódios magmáticos durante a abertura do Oceano Atlântico Sul.

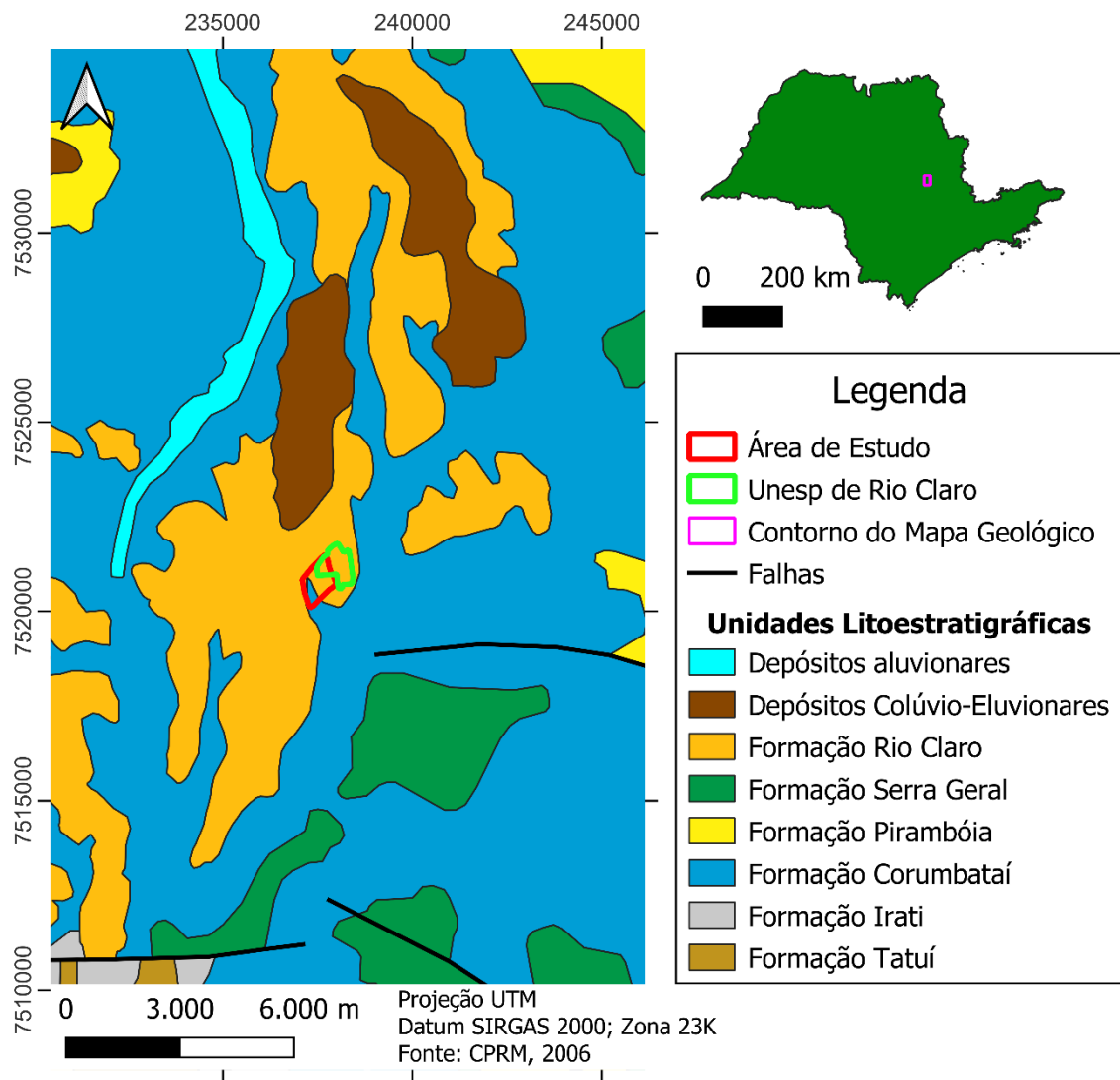
4.1.8 Formação Rio Claro

A Formação Rio Claro foi definida por Björnberd e Landim em 1966, trata-se de uma unidade muito heterogênea, composta por litologias variadas pouco litificadas de arenitos, arenitos conglomeráticos e argilitos. São interpretados como depositados em um ambiente de clima semiárido. Segundo Zaine (1994), a formação apresenta-se restrita à folha de Rio Claro 1:50.000, tendo uma relação de contato discordante com

as demais formações da Bacia do Paraná, fazendo contato principalmente com a Formação Corumbataí.

Segundo o mapa geológico do estado de São Paulo de escala 1:750.000 produzido pela CPRM (2006), localmente a Formação Rio Claro é a principal Unidade aflorante na área de estudo, acompanhada pela Formação Corumbataí (Figura 5).

Figura 5 - Mapa geológico local com as principais unidades litoestratigráficas.



Fonte: Modificado de CPRM (2006).

4.2 Geomorfologia

O estado de São Paulo pode ser dividido em cinco grandes províncias geomorfológicas: Província Costeira, Depressão Periférica, Planalto Ocidental, Planalto Atlântico e Cuestas Basálticas.

Deffontaines (1935) subdividiu a Depressão Periférica em três subzonas: Depressão de Moji-Guaçu, Depressão do Médio Tietê e Depressão do Paranapanema. Freitas (1953) descreve a Depressão Periférica Paulista como uma faixa deprimida entre escarpas de diabásio e arenito-basálticas na sua porção ocidental, com o Planalto Cristalino Atlântico delimitando sua borda oriental. Segundo Vieira (1982), a porção norte da Depressão Periférica é delimitada pelo alinhamento Araxá-Rio Grande, enquanto ao sul é delimitada pelo rio Paranapanema. A cidade de Rio Claro está inserida na subzona do Médio Tietê, no contexto da Depressão Periférica.

4.3 Clima

Segundo Monteiro (1973; apud Zaine, 1994), o clima da região de Rio Claro é considerado tropical, com características de alternância entre períodos secos e úmidos. É influenciado por massas tropicais e equatoriais, apresentando duas estações bem definidas. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é categorizado como Cwa. Isso significa que a região possui um período seco durante o inverno (indicado pela letra "w") e o mês mais quente tem uma temperatura média superior a 22°C (indicado pela letra "a").

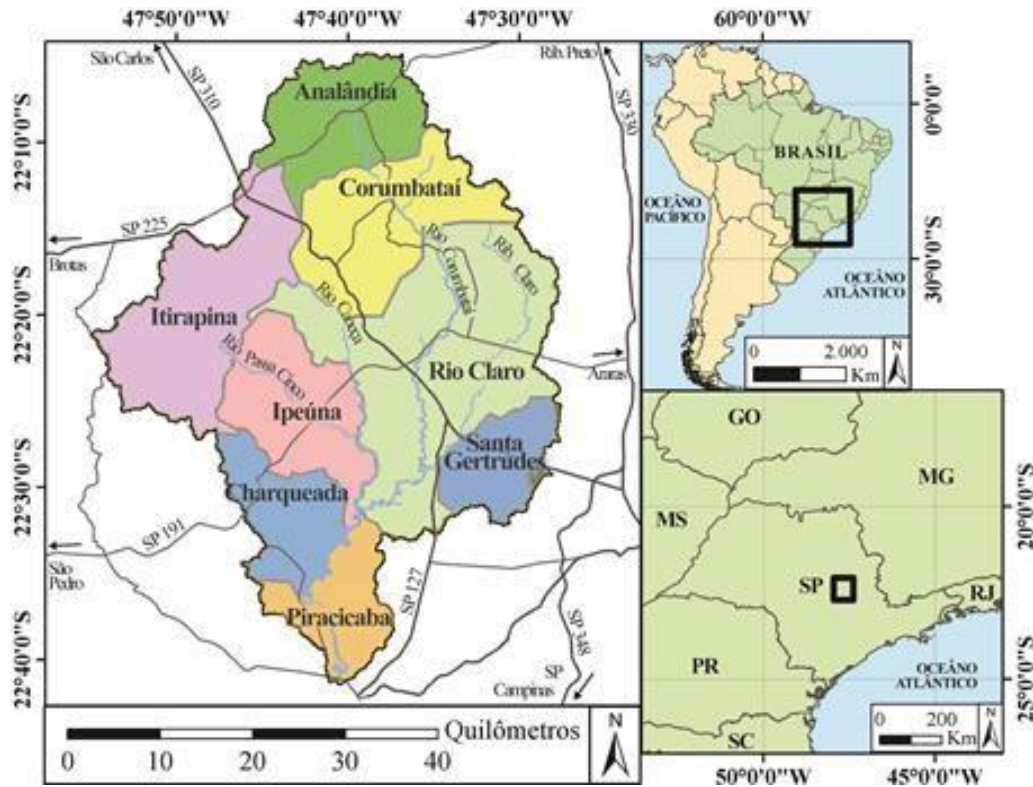
Em relação à distribuição anual das chuvas em Rio Claro, observam-se duas estações distintas. O período seco ocorre entre abril e setembro, com uma duração de 15 a 20 dias de chuva e uma precipitação média de 180 mm a 200 mm. Já o período chuvoso ocorre de outubro a março, com uma duração de 55 a 60 dias de chuva e uma precipitação média de 1200 mm. Esse período chuvoso responde por mais de 80% das precipitações anuais na região. A média anual de precipitação em Rio Claro é de aproximadamente 1400 mm (Zaine, 1994; Ferrari, 2012).

4.4 Contextualização Hidrológica e Hidrogeológica Local

O local de estudo encontra-se inserido no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí (Figura 6). A área total desta bacia hidrográfica abrange 171.050 hectares e, além de Rio Claro, inclui partes dos municípios de Analândia, Itirapina, Corumbataí, Santa Gertrudes, Ipeúna, Charqueada e também Piracicaba (Oliva, 2006). O Rio Corumbataí é o corpo de água que dá nome a bacia, com cerca de 120 km de extensão, tem suas nascentes na Serra de Santana e deságua no Rio

Piracicaba, sendo seus principais afluentes os rios Passa Cinco, Cabeça e Ribeirão Claro (Zaine,1994).

Figura 6 - Municípios da Bacia do Corumbataí.



Fonte: Kolya (2018).

O Município de Rio Claro possui dois principais sistemas de águas subterrâneas. O primeiro é um aquífero livre pouco profundo, com uma vazão entre 17 m³/h e 25 m³/h, composto pelos materiais pouco consolidados da Formação Rio Claro. O segundo sistema é constituído pelas rochas da Formação Tatuí e do Grupo Itararé, formando o Aquífero Tubarão confinado com profundidades em torno de 200 m e vazão entre 20 m³/h e 37 m³/h (Oliva *et al.*, 2005; Oliva 2006)

Em relação à espessura da Formação Rio Claro, Oliva (2006) observou que essa oscila consideravelmente de um local para outro. Em uma escala municipal apresentou variação de 5 metros a aproximadamente 45 metros, com uma predominância de espessuras entre 25 metros e 35 metros.

Utilizando a técnica de simulação Monte Carlo, Oliva *et al.* (2010) estimou a reserva permanente do Aquífero Rio Claro em 23,213 x 10⁷ m³. Além disso, o cálculo da reserva reguladora resultou em 2,462 x 10⁷ m³. Ao somar as reservas permanente

e reguladora, obteve-se uma reserva total com um valor médio esperado de $25,675 \times 10^7 \text{ m}^3$.

Teramoto *et al.* (2021) compilaram dados sobre o Aquífero Rio Claro no *campus* da UNESP de Rio Claro, e constataram que a espessura do Aquífero varia entre 13,2 metros e 21,0 metros, com a predominância de quatro litofácies: areia fina a média argilosa, areia fina a média limpa, argila arenosa e argila siltosa, essas litofácies apresentaram condutividade hidráulica (K) média de $1,75 \times 10^{-5}$; $2,10 \times 10^{-4}$; $3,90 \times 10^{-6}$ e $3,39 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, respectivamente.

Estimativas de recarga para o Aquífero Rio Claro foram conduzidas por Neto e Chang (2008) através do método de WTF. Adotando uma porosidade específica (S_y) medida por Alfaro Soto e Chang (2008) de 0,17, eles obtiveram taxas de recarga total de 538 mm, 636 mm e 298 mm para os anos de 2003, 2004 e 2005, respectivamente. Em um período de 2002 a 2009, Gonçalves *et al.* (2020) estimou a recarga por meio de simulações em regime transiente, determinando a recarga média de 217,3 mm, equivalente a 16% da água precipitada no mesmo período.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do presente trabalho se baseará nas atividades descritas nas etapas de trabalho no fluxograma PAMN (Figura 1).

5.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica consistiu de uma compilação e organização de informações pré-existentes que auxiliaram na caracterização geológica, construção dos modelos conceitual, geológico, caracterização climática e obtenção dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Rio Claro.

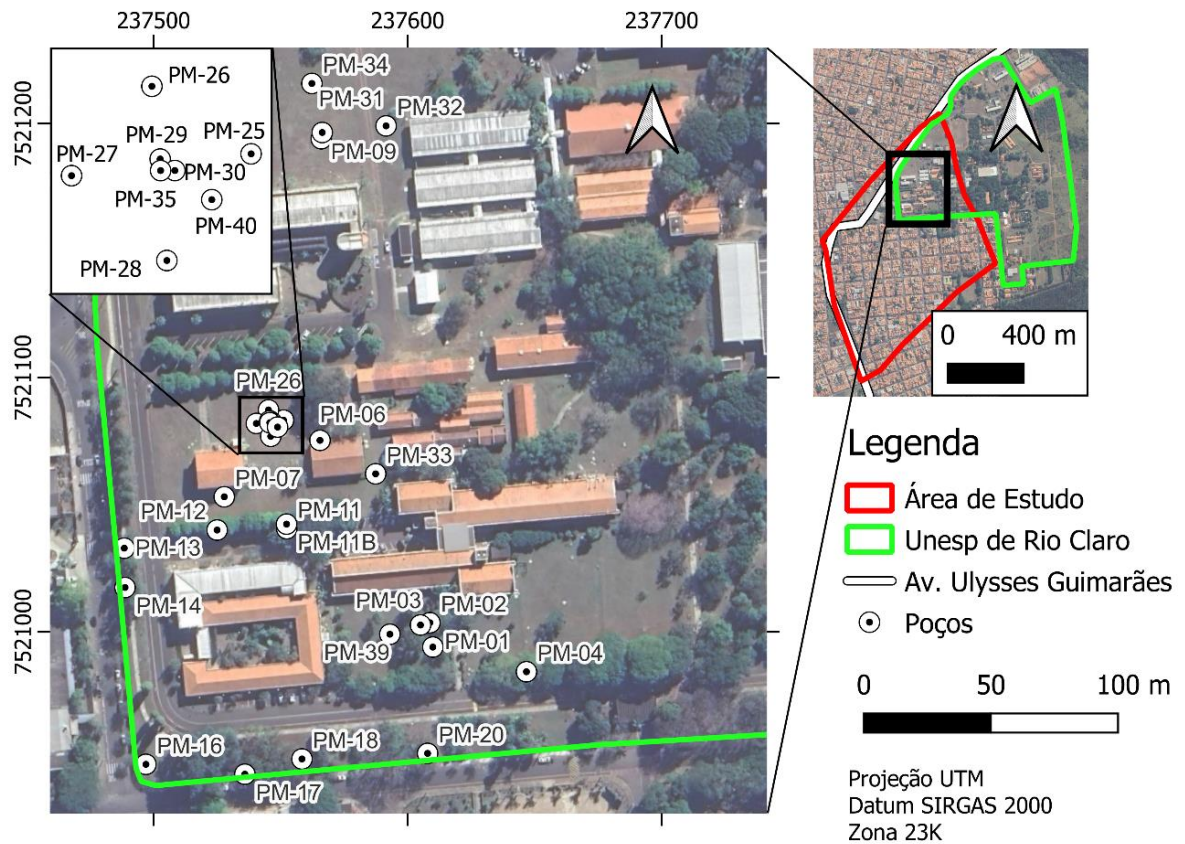
5.2 Monitoramento de poços

Os poços utilizados para o monitoramento da dinâmica de fluxo do Aquífero Rio Claro estão localizados exclusivamente no *campus* da UNESP. As medidas foram realizadas de forma regular, em intervalos semanais, a partir de novembro de 2021 até o término do desenvolvimento do trabalho, com o objetivo de auxiliar na calibração do modelo numérico.

Um total de 29 poços foram monitorados, e suas localizações podem ser observadas na Figura 7. O poço de extração para abastecimento de água da UNESP corresponde ao PM-09, localizado ao norte da universidade e ao lado do poço de monitoramento PM-31. O PM-09 dispõem também de um hidrômetro, tornando possível o monitoramento da vazão.

As medições periódicas consistiram na obtenção do nível d'água, permitindo avaliar as variações de carga hidráulica do aquífero.

Figura 7 - Mapa de localização dos 29 poços de monitoramento distribuídos na UNESP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Modelo Hidrogeológico Conceitual

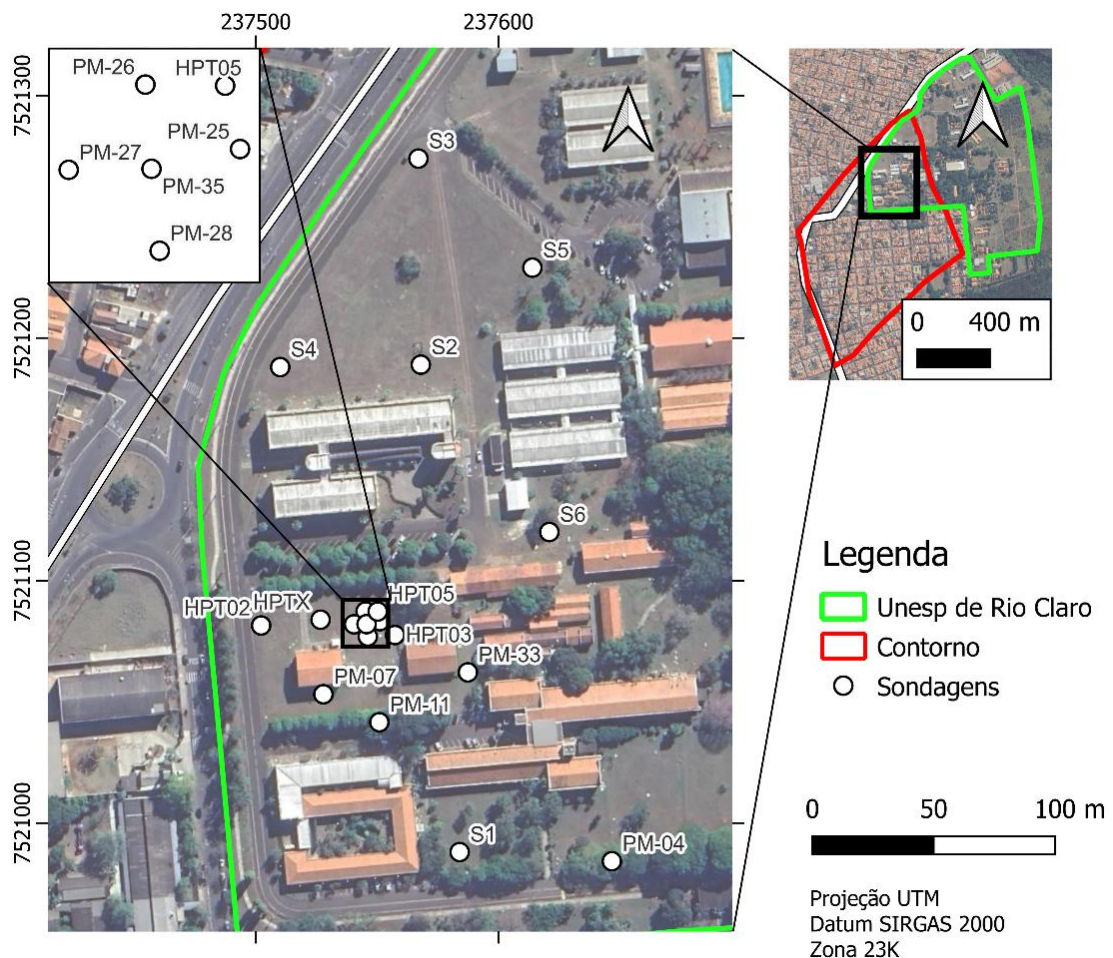
No processo de elaboração do modelo conceitual, busca-se definir os limites, geometrias, recarga e conexões do aquífero. Esse é um meio de reunir e sintetizar as informações disponíveis sobre o sistema de águas subterrâneas, apresentando-as de maneira fiel à realidade, mesmo que algumas simplificações sejam necessárias para viabilizar a aplicação do modelo numérico (Feitosa *et al.*, 2008).

Nesta etapa foram reunidas informações preexistentes sobre o Aquífero Rio Claro localmente, aliados às informações obtidas durante o monitoramento para a elaboração do modelo conceitual. Além disso, zonas de recarga dentro da área de estudo foram determinadas através da análise de imagens de satélite, sendo zonas de menor recarga presentes em espaços asfaltados e preenchidos por edifícios, e maior em regiões planas cobertas por vegetação rasteira.

5.4 Modelo e Caracterização Geológica

A caracterização foi conduzida utilizando de dados provenientes de diversas sondagens realizadas na área de estudo (Figura 8) para a elaboração do modelo geológico tridimensional por meio do software Leapfrog 2021.1. Adicionalmente, efetuou-se a análise granulométrica da sondagem HPTX em distintos níveis de profundidade, empregando o método de análise de imagem dinâmica por meio do equipamento QICPIC.

Figura 8 - Mapa de localização de sondagens examinadas.



Fonte: *Elaborado pelo autor.*

5.5 Simulação Numérica De Fluxo

As simulações numéricas de fluxo foram conduzidas com o emprego do aplicativo Feflow 8.0, que faz uso do Método de Elementos Finitos (MEF). Inicialmente realizou-se a simulação e calibração do modelo em regime permanente para obtenção das condições iniciais do modelo. Segundo Anderson *et al.* (2015), é apropriado que um modelo permanente seja gerado primeiro para ser utilizado como condições iniciais na criação do modelo transiente.

Em seguida, foi calibrado o modelo em regime transiente, considerando-se as variações sazonais de recarga do aquífero, bem como a exploração de água subterrânea. A etapa de calibração consistiu na comparação dos resultados gerados pelo modelo de regime transiente com os dados de campo, o que frequentemente exigiu ajustes nos parâmetros do modelo numérico.

Por fim, para avaliação dos impactos das taxas atuais de exploração no Aquífero Rio Claro, foram simulados cenários com e sem exploração. Também foram realizadas análises comparativas de recarga e exploração.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Características permo-porosas do Aquífero Rio Claro

A partir da compilação dos resultados de diversos trabalhos prévios (e.g., Oliva, 2006; Alfaro Soto, Kumayama e Chang, 2007; Alfaro Soto *et al.*, 2015; Gonçalves, 2016) visando a identificação das propriedades permo-porosas do Aquífero Rio Claro, foram identificados os valores de condutividade hidráulica (K) e porosidade relacionados à esta unidade hidroestratigráfica.

A Tabela 1 apresenta os valores mínimos, médios (média geométrica) e máximos de condutividade hidráulica e porosidade compilados de trabalhos prévios.

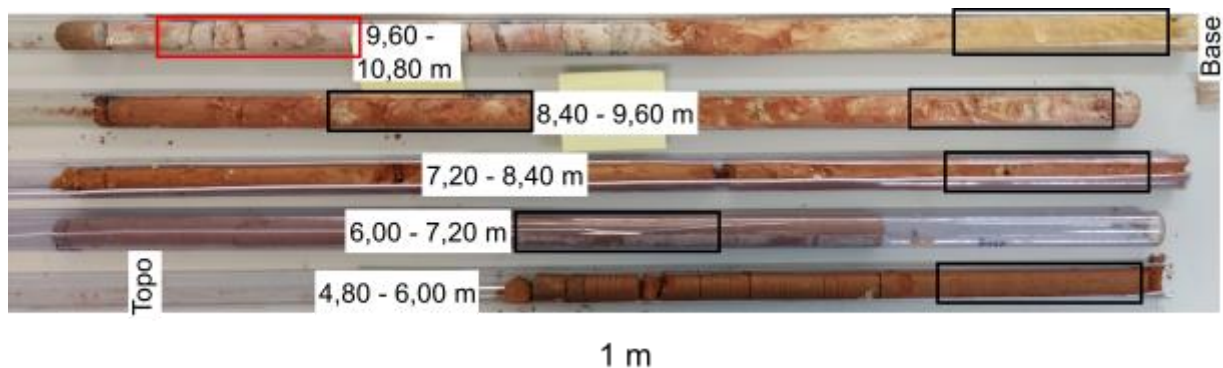
Tabela 1 - Valores mínimos, médios e máximos de K e porosidade do Aquífero Rio Claro compilados da literatura.

Valor	Porosidade (%)	K (m/s)
Mínimo	5	$1,23 \times 10^{-7}$
Médio	26,2	$9,57 \times 10^{-6}$
Máximo	49,5	$1,17 \times 10^{-4}$

As sondagens indicam que o franco predomínio de areias finas a médias argilosas, enquanto lentes descontínuas de argila siltosas são observadas em diversos intervalos de profundidade sem aparentar continuidade lateral. São ainda observadas lentes de areia fina a média com baixa porcentagem de silte e argila, que possuem espessuras com espessuras que variam de 0,20 a 5,0 m.

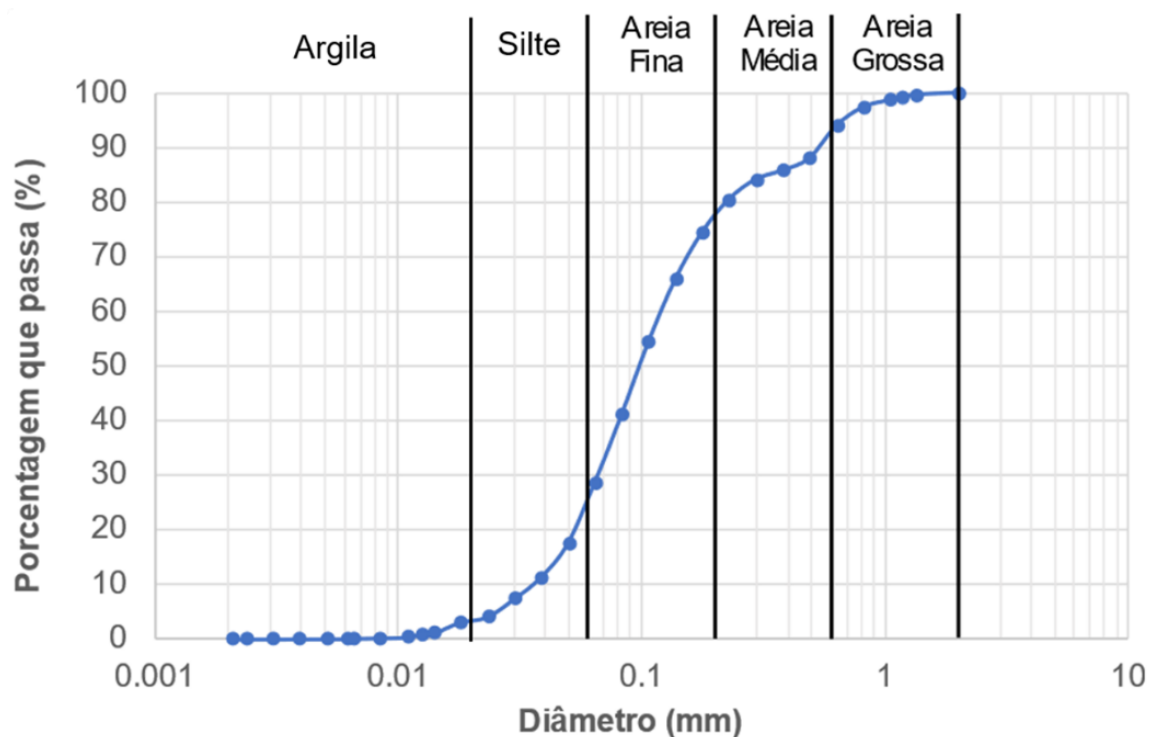
O testemunho produzido pela sondagem HPTX (Figura 9) amostrado para análise granulométrica demonstrou forte variação de coloração, porém apresentou apenas duas fácies distintas. A mais predominante é classificada como areia siltosa, composta em média de 75% de areia fina à grossa, e 25% de finos (Figura 10). A segunda é referente as lentes não contínuas de material fino, apresentando composição majoritariamente de silte (Figura 11).

Figura 9 - Sondagem HPTX com 10,80 metros de profundidade na Formação Rio Claro. Em vermelho está o local de amostragem da lente de silte, enquanto o preto está representado os locais de amostragem da areia argilosa.



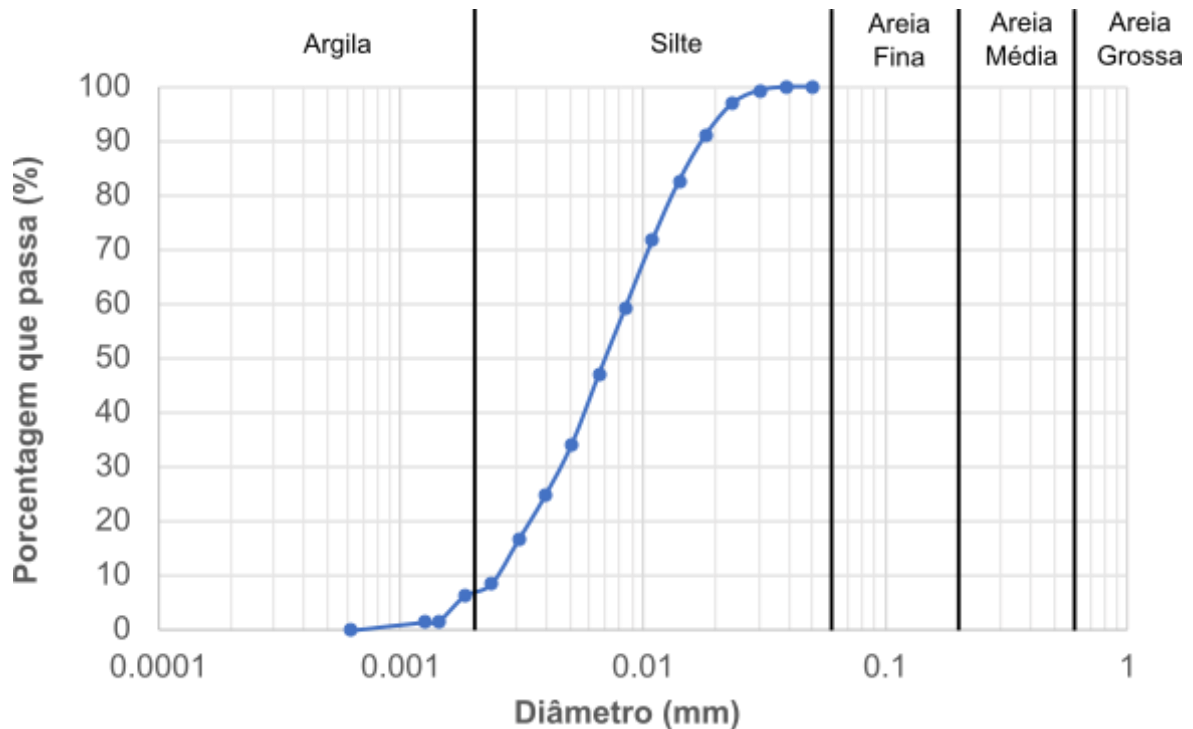
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Curva granulométrica do segmento arenoso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Curva granulométrica do segmento silto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

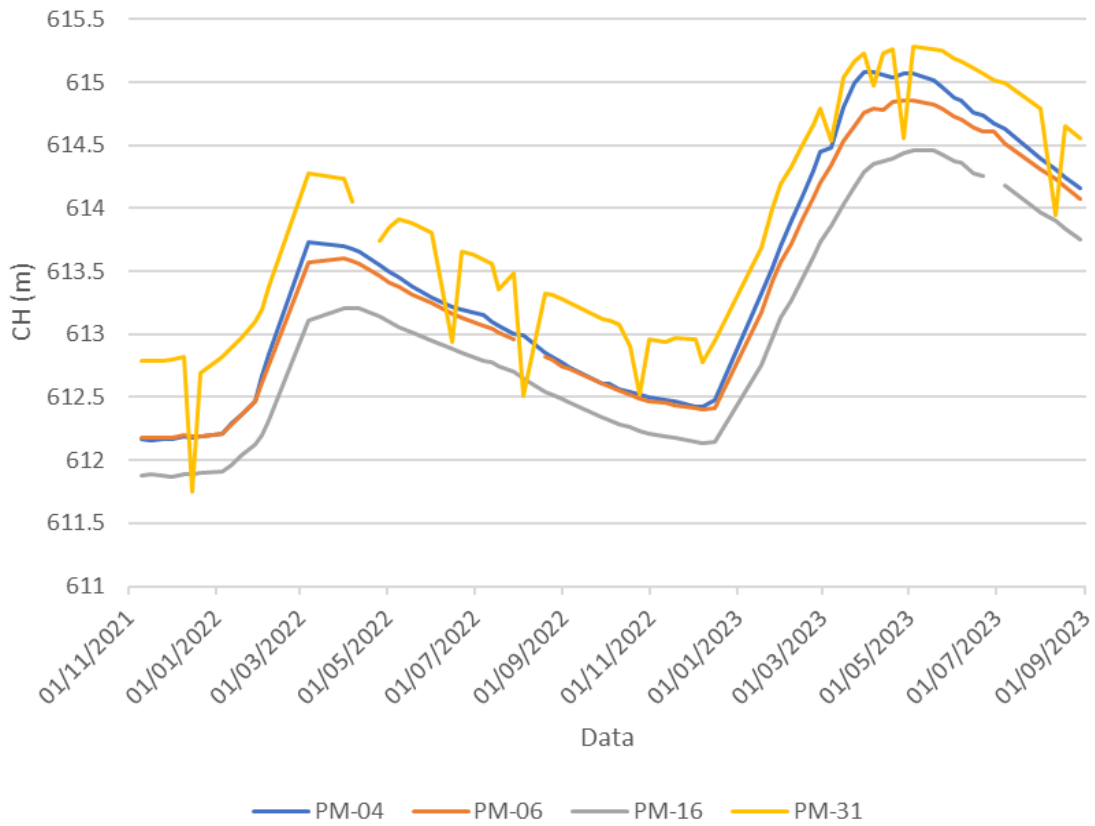
6.2 Monitoramento do nível d'água e exploração

A Figura 12 apresenta as variações de carga hidráulica nos poços de monitoramento PM-04, PM-06, PM-16 e PM-31 entre novembro de 2021 e agosto de 2023. Todos os poços monitorados apresentaram a mesma tendência de variação sazonal de nível d'água, como pode ser visto no Anexo 1.

Nota-se que o nível d'água inicia sua ascensão próximo a dezembro até atingir o ápice por volta do mês de abril, quando o nível d'água inicia um período de queda que se prolonga até o mês de dezembro, como observado nos trabalhos prévios de Neto *et al.* (2016).

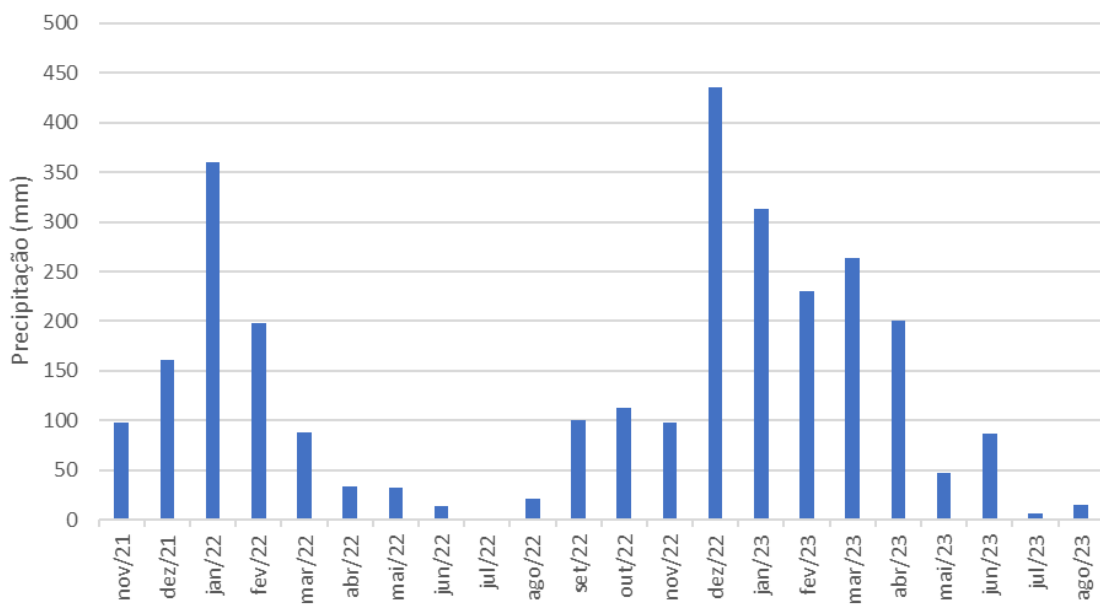
Os dados de precipitação da estação meteórica pertencente ao Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA) da UNESP (Figura 13) permite inferir que este comportamento reflete a precipitação local, ocorrendo a inflexão para ascensão logo após os meses mais chuvosos e o oposto ocorre nos meses de seca. Também é evidente que as diferenças dos picos na Figura 11 são resultado da maior quantidade e distribuição de chuva durante a segunda metade do monitoramento.

Figura 12 - Variação da carga hidráulica dos poços de monitoramento PM-04, PM-06, PM-16 e PM-31.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Precipitação mensal no período estudado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

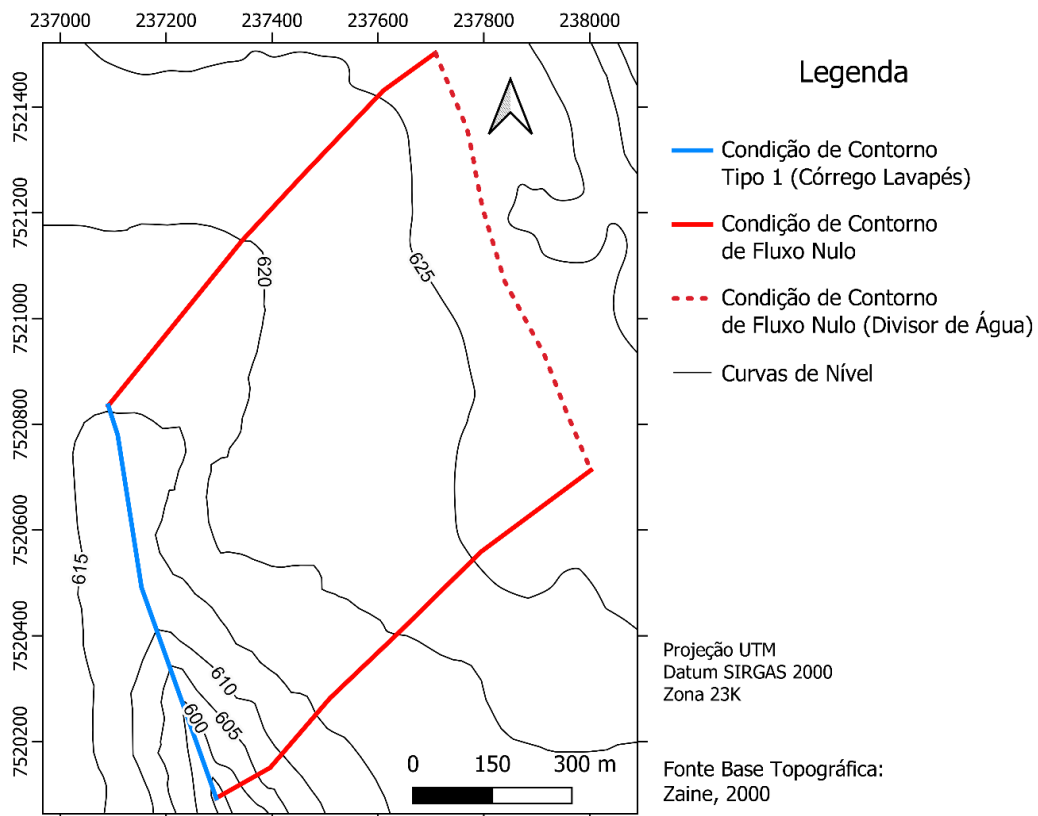
Observando o comportamento da CH dos poços PM-31, PM-32 e PM-34 é perceptível as quedas bruscas das suas cargas hidráulicas em períodos irregulares, elas podem ser atribuídas à proximidade destes com o poço de extração (PM-09).

A extração da água é feita de forma automática, ou seja, o poço PM-09 apenas começa seu funcionamento quando o nível nas caixas da água da universidade chega a certo ponto. Esse comportamento dificulta a determinação de uma taxa de extração exata, já que ela será proporcional a ao consumo da água, portanto, após o monitoramento do hidrômetro presente no poço por um período de agosto de 2022 à outubro de 2023 foi atribuído uma vazão média de $9,838 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

6.3 Modelo conceitual

A área de estudo é limitada lateralmente pelas condições de contorno do tipo 1 (Condição de Dirichlet) à sudoeste, representando Córrego Lavapés, e tipo 2 (Condição de Neumann) nas porções noroeste, nordeste e sudeste (Figura 14).

Figura 14 - Mapa das condições de contorno.

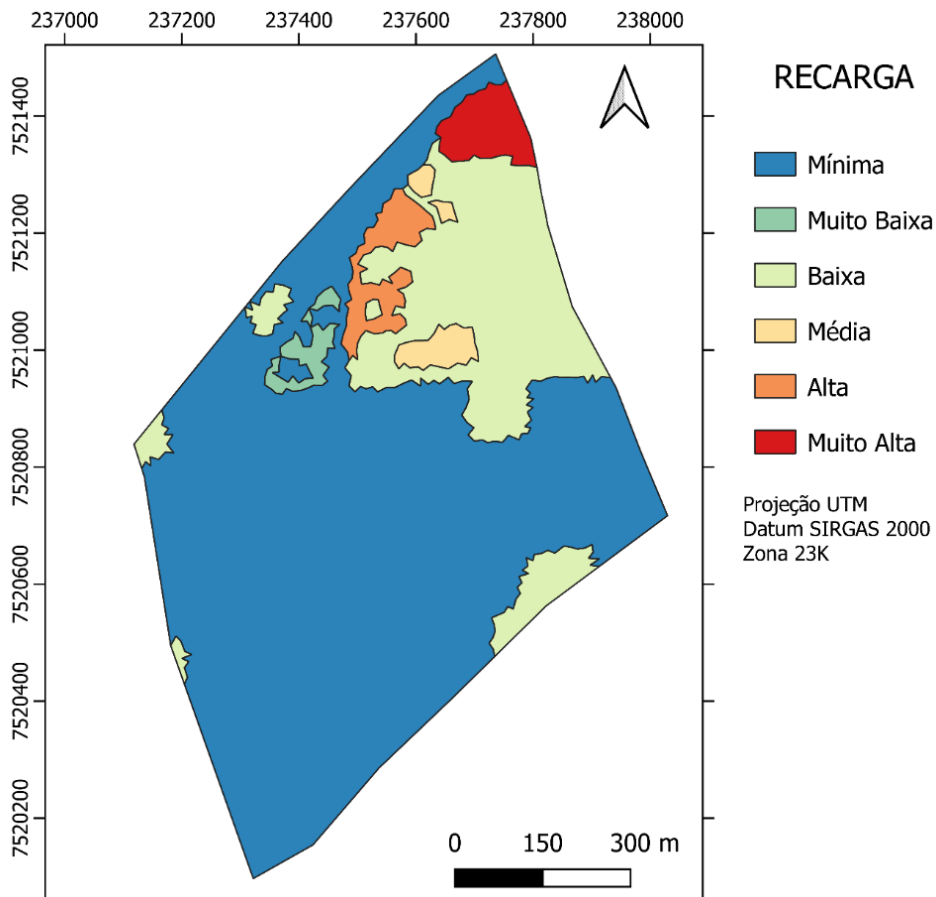


Fonte: Elaborado pelo autor.

Localmente, o Aquífero Rio Claro é classificado como livre, estabelecendo contato na base com a Formação Corumbataí. Nas proximidades dessa interface, é possível observar evidências de intemperismo na Formação Corumbataí, resultando na formação de uma fina camada permeável com espessura média de 2 metros pertencente ao sistema aquífero. Entretanto, a porção não intemperizada da formação consiste em siltitos e argilitos, com uma condutividade hidráulica consideravelmente menor do que a Formação Rio Claro, sendo classificada como uma base impermeável e, portanto, uma condição de contorno de fluxo nulo.

A recarga do aquífero é feita através de toda sua superfície, tendo diferentes taxas dependendo do tipo de cobertura local (Figura 15). A drenagem da água subterrânea ocorre ao limite sudoeste e no poço de extração PM-09.

Figura 15 - Mapa de zonas de recarga separadas a partir do uso e ocupação da superfície.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 Modelo geológico

O modelo geológico foi desenvolvido utilizando dados construtivos dos poços de monitoramento e informações de sondagem disponíveis indicados na Figura 8. Essas fontes auxiliaram na definição do contato das formações presentes (Tabela 2) e caracterização da Formação Rio Claro no local de estudo.

Embora a Formação Rio Claro seja naturalmente heterogênea, predomina-se uma litologia arenosa com alto teor de silte, e para simplificação na escala deste estudo, optou-se por modelar a Formação Rio Claro como um meio homogêneo. O modelo geológico 3D foi criado utilizando o *software Leapfrog 2021.1* (Figura 16A), a sua superfície apresenta aproximadamente 683.513 m² e um volume total de 17.705.871 m³, estendendo-se até 900 metros para norte/sul, 2.000 metros em leste/oeste e 32,5 metros verticalmente.

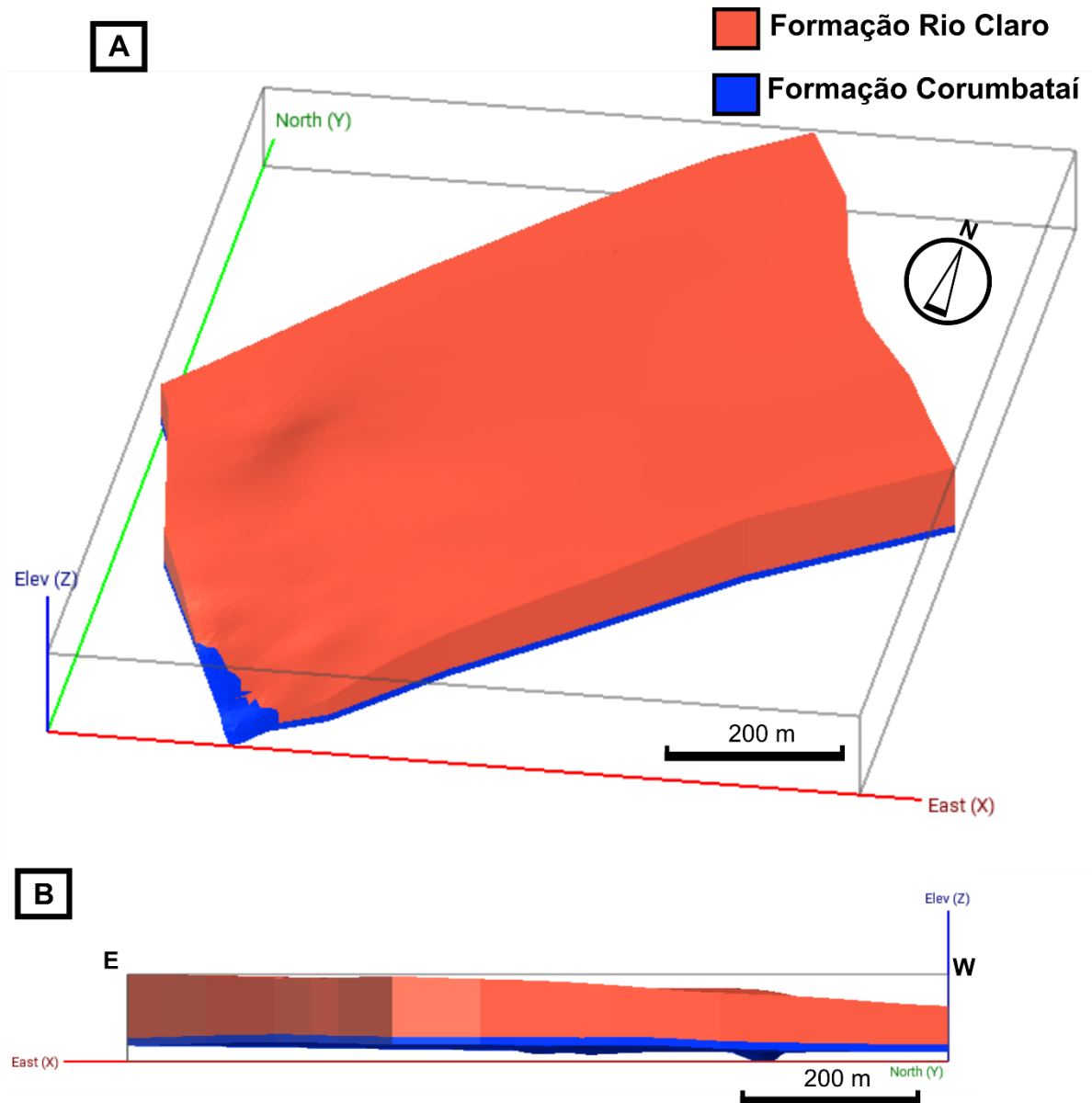
Tabela 2 – Profundidade das sondagens e contato entre as Formações Rio Claro e Corumbataí.

NOME	PROFUNDIDADE (m)	PROF. CONTATO (m) RIO CLARO x CORUMBATAÍ
PM-04	13,51	11,51
PM-07	19,9	17,9
PM-11	16,85	14,85
PM-25	16,51	14,51
PM-26	16,51	14,51
PM-27	16,51	14,51
PM-28	16,51	14,51
PM-33	14	12
PM-35	16,51	14,51
S1	19,6	17,6
S2	17,6	15,6
S3	16,4	14,4
S4	14	12
S5	16,4	14,4
S6	14,38	12,38
HPT02	17,6	15,6
HPT03	14,45	12,45
HPT05	15,73	13,73

Quanto à Formação Corumbataí, foi subdividida em duas partes distintas: uma representando a porção alterada, em contato com a Formação Rio Claro, e a outra

correspondendo à porção sã, desempenhando o papel de limite basal do modelo (Figura 16B).

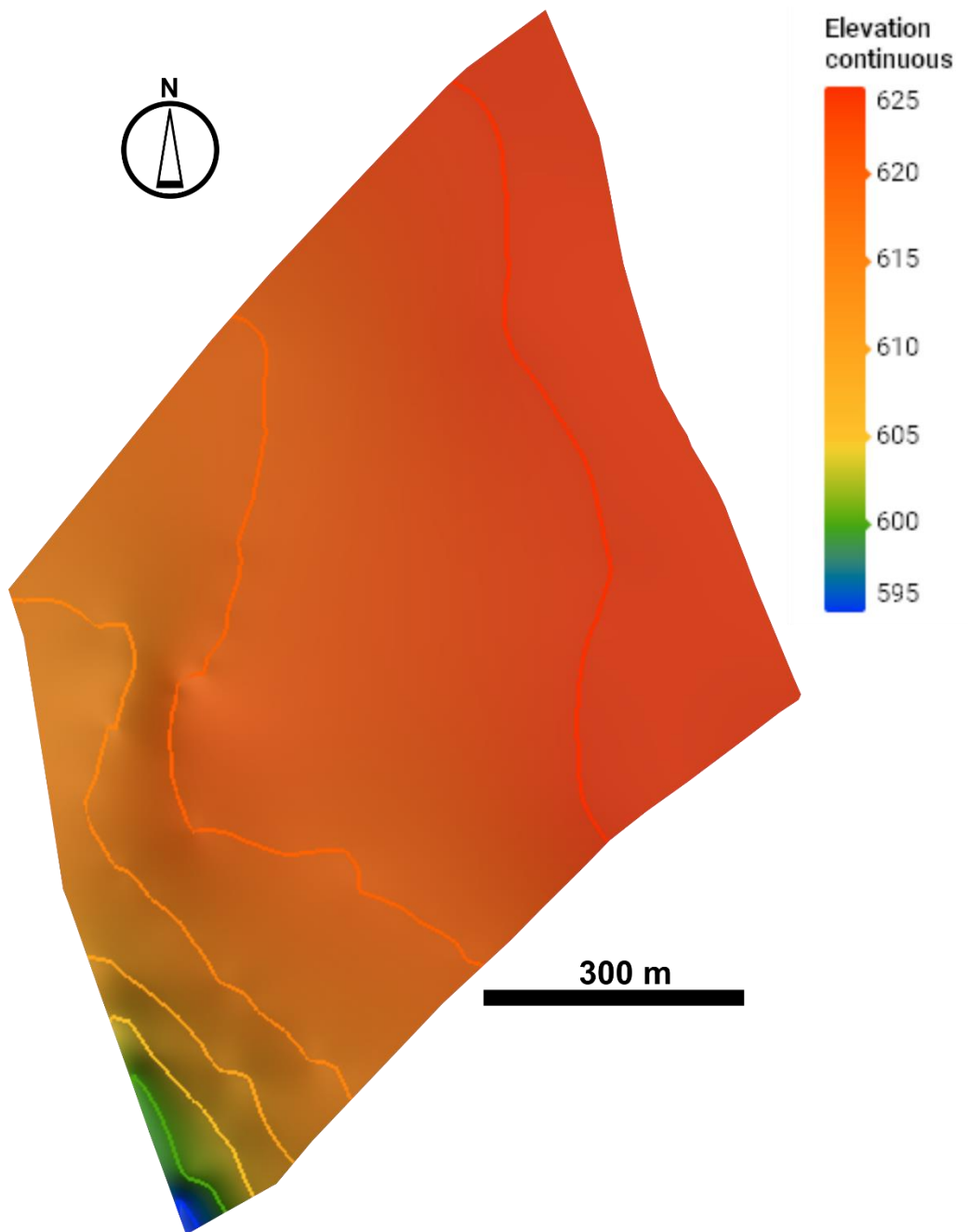
Figura 16 – Modelo geológico tridimensional da área de estudo representando as formações Rio Claro e Corumbataí com sobrelevação de 3x. A) Perspectiva oblíqua do modelo. B) Perspectiva em perfil, salientando o contato entre ambas formações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A topografia disposta na Figura 17 foi interpolada para o modelo tomando como base o Mapa Geológico-Geotécnico de escala 1:25.000 confeccionado por Zaine (2000).

Figura 17 - Superfície topográfica do modelo.



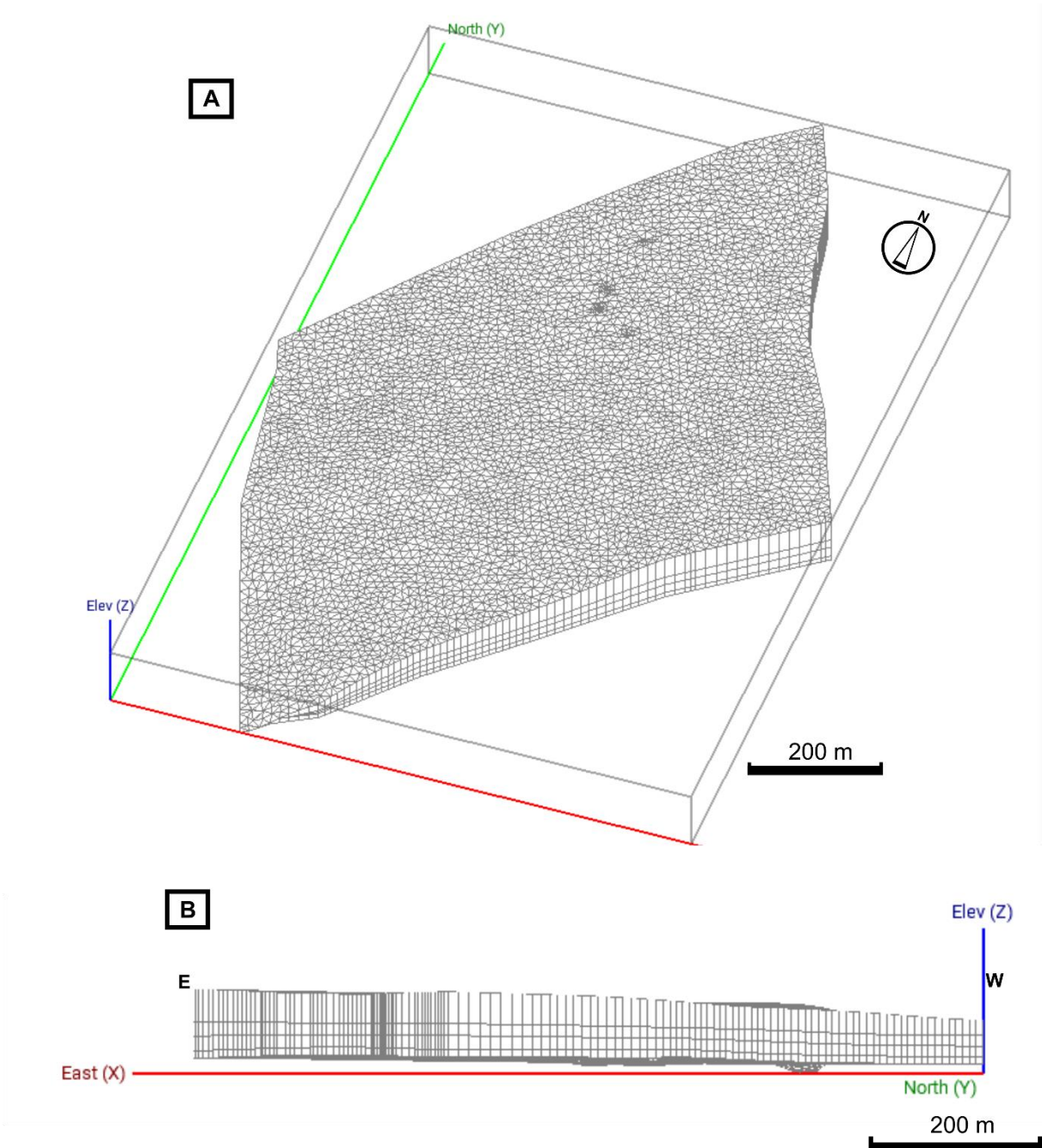
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 Discretização do Modelo

O modelo gerado no Leapfrog 2021.1 através de elementos finitos (Figura 18) possui no total 34.788 elementos triangulares e 22.395 nós, todos distribuídos num total de 5 *slices* e 4 camadas, sendo três camadas representativas da Formação Rio Claro e uma da Formação Corumbataí. A malha foi manualmente alterada para respeitar a lei de Delaunay, minimizando a existência de triângulos finos e compridos

com ângulos obtusos. A malha possui maior refinamento nas proximidades dos poços de monitoramento.

Figura 18 - Malha de elementos finitos discretizada utilizando Leapfrog 2021.1 com sobrelevação de 3x. A) Perspectiva oblíqua. B) Em perfil.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.6 Modelo em regime permanente

A calibração da simulação em regime permanente foi conduzida em relação à primeira medição de carga hidráulica dos poços de monitoramento em novembro de 2021. Nessa fase, o parâmetro de recarga foi ajustado, mantendo as zonas preestabelecidas, com o objetivo de reproduzir os níveis de água medidos.

O valor médio adotado de K para a Formação Rio Claro na simulação foram derivados da média geométrica da condutividade das litologias encontradas na área, resultando em 5×10^{-5} m/s, enquanto que os parâmetros de solo da Formação Corumbataí calculados por Alfaro Soto *et al.* (2015) de 2×10^{-6} passaram a ser os valores iniciais para representação da mesma.

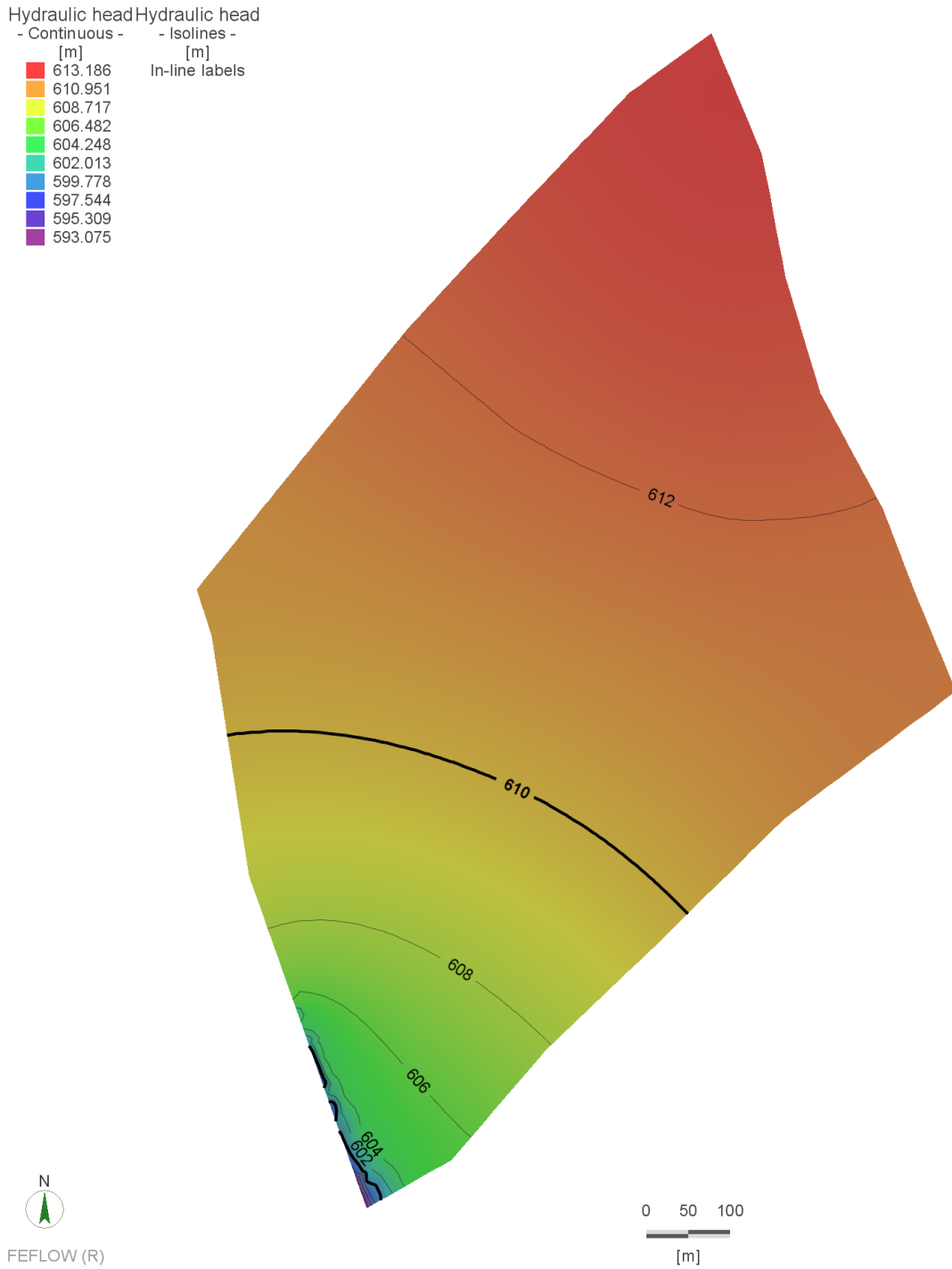
O critério para avaliação das simulações utilizado foi o *Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)*, representado na Formula 1, onde *RMS = Root Mean Square*, *Vmax = Maior valor medido e Vmin= Menor valor medido*.

$$NRMSE = \frac{RMS}{(Vmax - Vmin)} \quad (Eq.1)$$

Na Figura 19 está representada a distribuição de carga hidráulica simulada do regime permanente calibrado. O fluxo da água dirige-se a sul/sudoeste, exibindo maiores valores de carga hidráulica na porção norte.

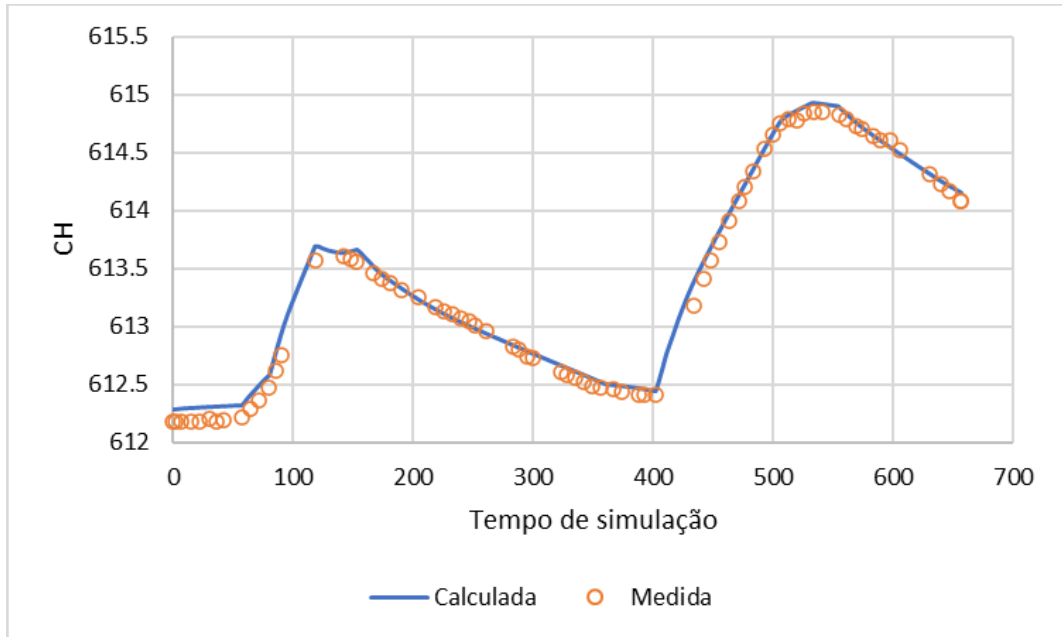
O *RMS* calculado desse modelo é de 0,15 m resultando em um *NRMSE* de 0,149 ou 14,9%. A análise do gráfico de dispersão das cargas hidráulicas de campo e calculadas (Figura 20) permite concluir que, apesar do *NRMSE* ser relativamente alto, não há grandes discrepâncias em termos das diferenças nas cargas hidráulicas. As maiores divergências ocorrem nos poços PM-13 e PM-14, com diferenças de 0,40 metros e 0,43 metros, respectivamente.

Figura 19 – Distribuição de carga hidráulica gerado pela simulação do modelo em regime permanente.



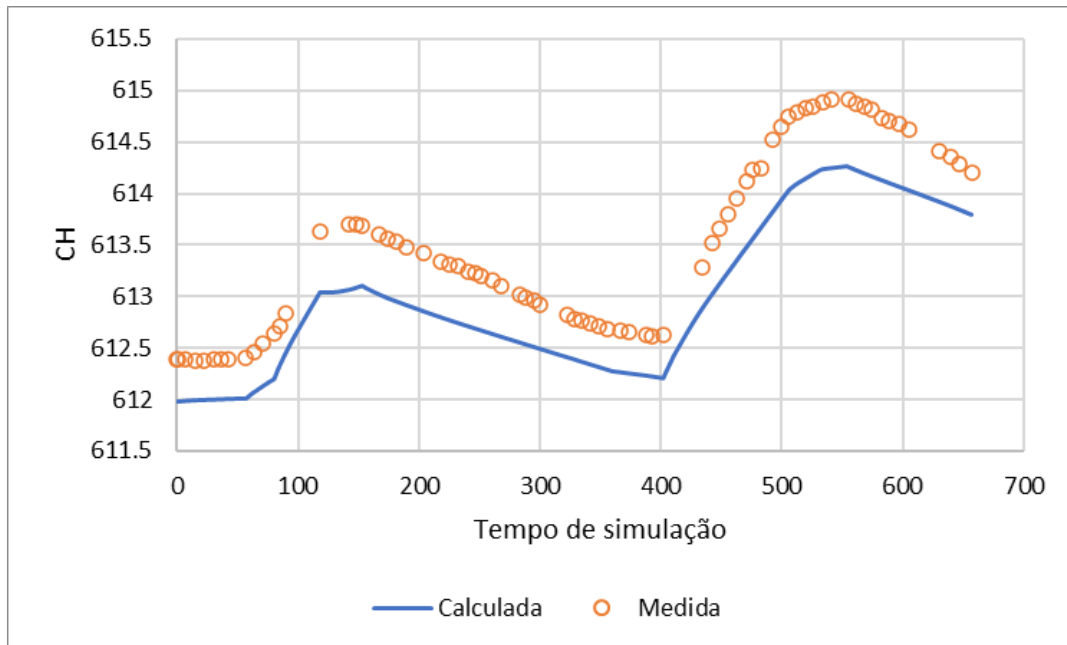
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-06, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruces vermelhas indicam as cargas medidas.



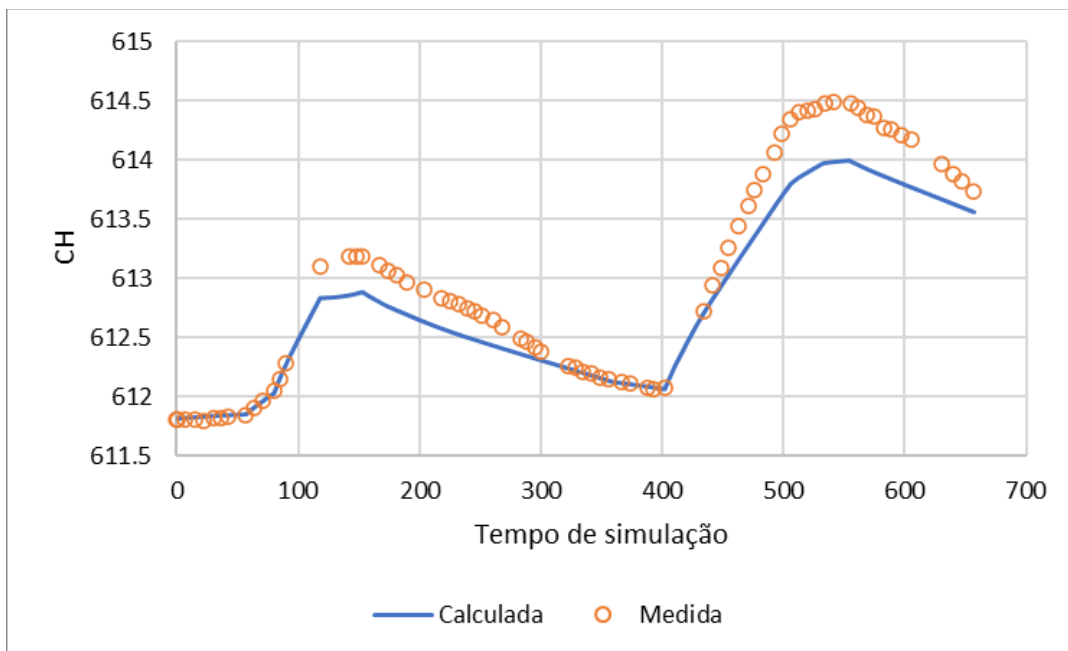
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-13, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruces vermelhas indicam as cargas medidas.



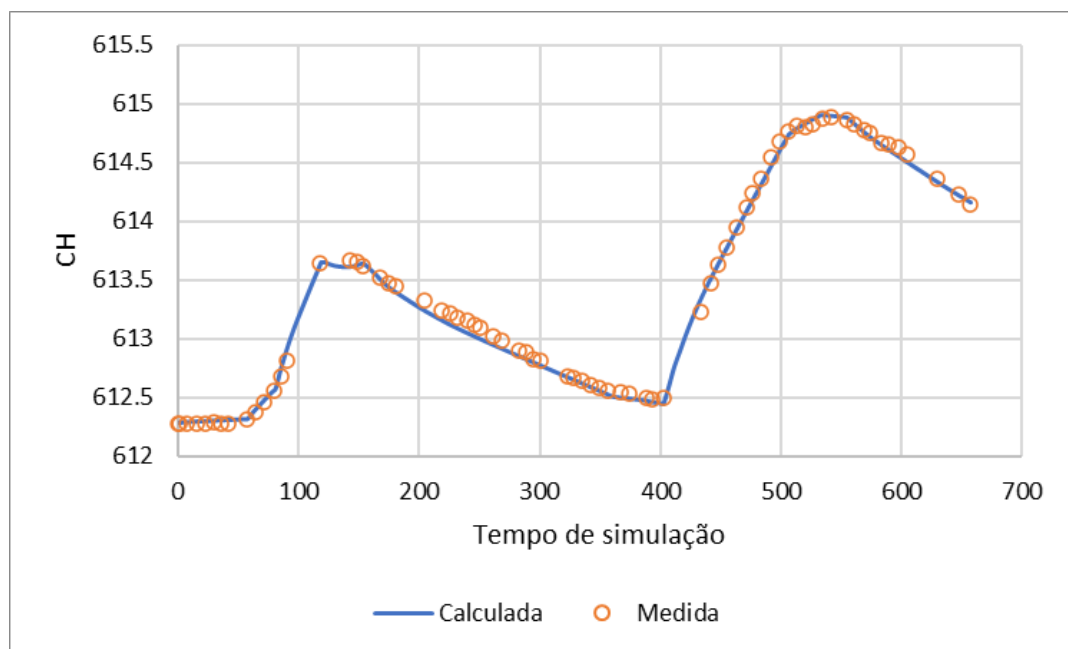
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-18, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruzeis vermelhas indicam as cargas medidas.



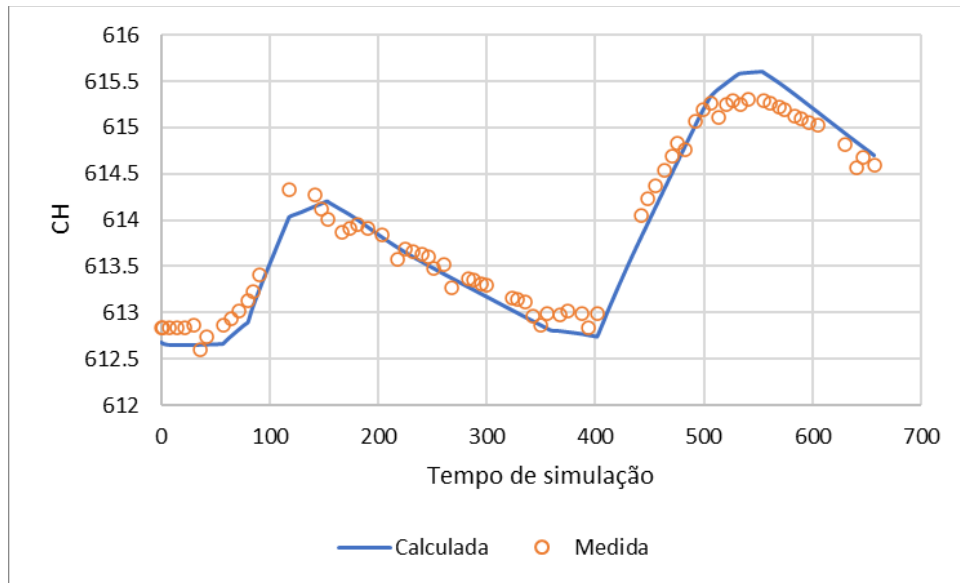
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-25, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruzeis vermelhas indicam as cargas medidas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - Variação de carga hidráulica simulada do PM-34, linha azuis representam as cargas calculadas, enquanto as cruzes vermelhas indicam as cargas medidas.

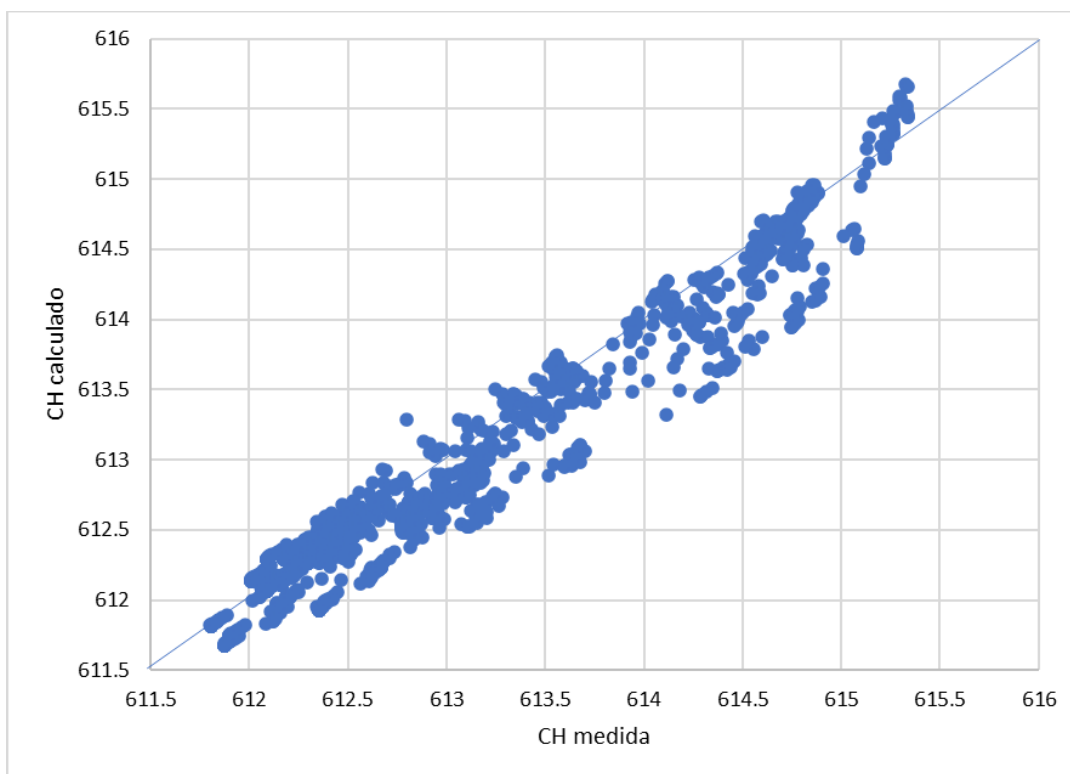


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar as variações, nota-se que os poços localizados no centro da área monitorada apresentaram melhor correspondência com os dados reais, enquanto os poços nas extremidades da UNESP tendem a exibir maiores discrepâncias.

O gráfico de dispersão, elaborado com dados de todos os intervalos de tempo (Figura 26), revela um aumento nas disparidades entre as cargas hidráulicas medidas e calculadas. Entretanto, mesmo com o aumento do *RMS* do modelo para 0,22 m, o *NRMSE* calculado registrou uma redução em comparação com o modelo permanente, alcançando um *NRMSE* de 0,056 ou 5,6%.

Figura 26 - Gráfico de dispersão das cargas hidráulicas medidas e calculadas em todos intervalos de tempo do regime transiente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O balanço de fluxo total de todo período aponta que houve um desequilíbrio positivo ao decorrer dos 657 dias, resultando na entrada de 30.344 m³ de água no sistema quando comparada com o tempo 0.

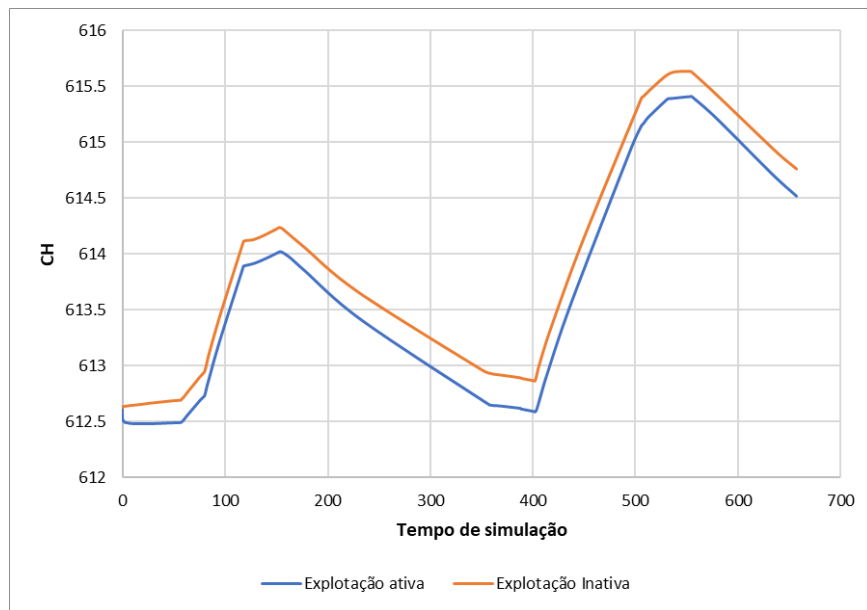
O parâmetro Sy calculado encontra-se abaixo dos medidos diretamente por Alfaro Soto e Chang (2008) para a Formação Rio Claro, porém, pode ser explicado pelo fenômeno de aprisionamento de ar (*entrapped air*), que ocorre em áreas quasi-saturadas de aquíferos livres. Esse fenômeno acontece quando bolhas de ar ficam retidas nos poros durante as variações do nível freático, resultando em uma redução da condutividade hidráulica e porosidade específica nesta região (Faybishenko, 1995; Williams e Oostrom, 2000; Sakaguchi, Nishimura e Kato, 2005; Gonçalves *et al.*, 2020).

6.8 Recarga e exploração

Com o modelo em regime transiente calibrado, foi possível realizar simulações em cenários sem exploração para fins de comparação. As variações da carga

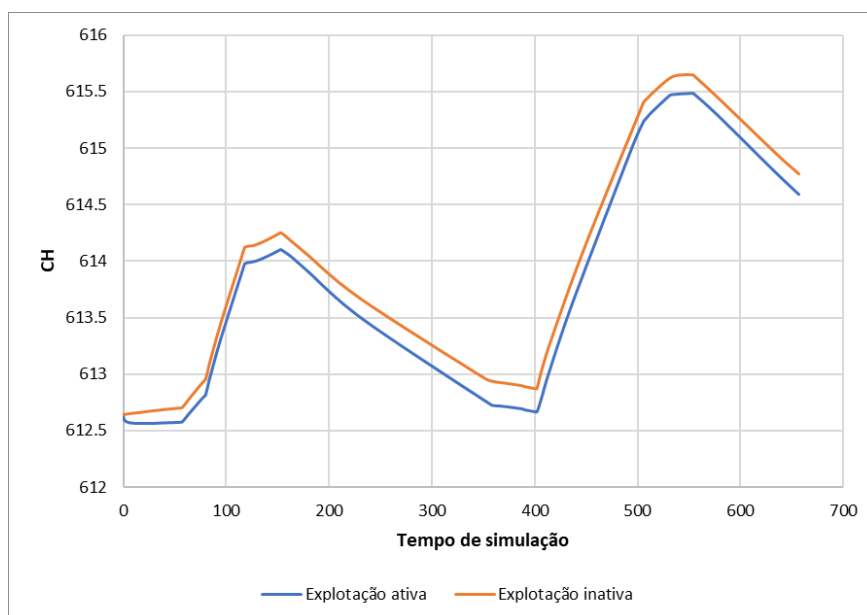
hidráulica em ambos os cenários nos poços PM-09, PM-31 e PM-32 (Figuras 27, 28, 29, respectivamente) indicam maiores discrepâncias nas mudanças de tendência nos pontos de inflexão. Além disso, é perceptível uma rápida redução nas diferenças entre ambas as simulações à medida que a distância do PM-09 aumenta, como pode ser visto no mapa de diferenças de carga hidráulica (Figura 30).

Figura 27 - Variação de carga hidráulica do PM-09 simulada em cenários com exploração ativa e inativa.



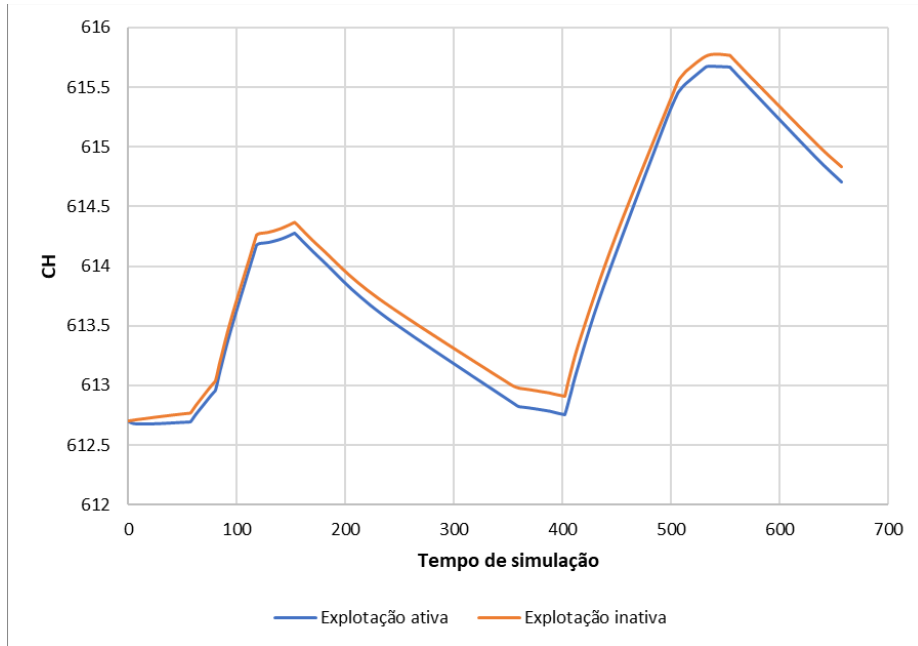
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Variação de carga hidráulica do PM-31 simulada em cenários com exploração ativa e inativa.



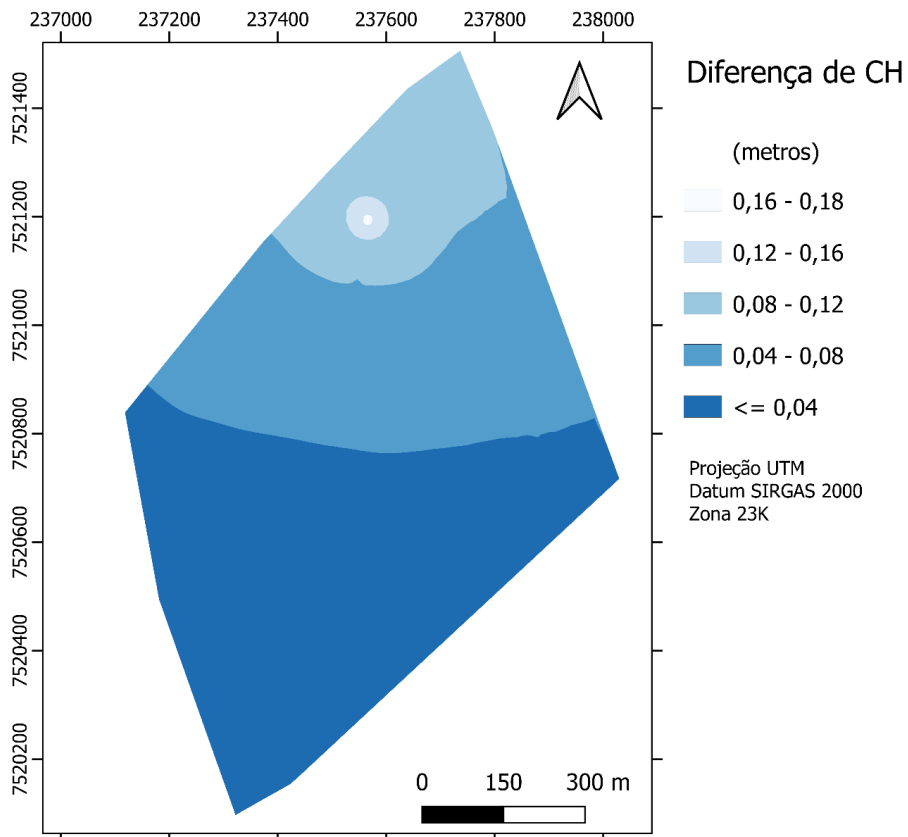
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Variação de carga hidráulica do PM-32 simulada em cenários com exploração ativa e inativa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Mapa de diferenças de carga hidráulica dos cenários de exploração ativa e inativa referente ao dia 657 simulado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A recarga estimada durante o período simulado foi de 382,6 mm, representando apenas cerca de 13,2% de toda a água precipitada. A Tabela 3 evidencia que, em relação aos anos de 2021 e 2022, o ano de 2023 apresentou um aumento de quase 7% na proporção de recarga, provavelmente devido à extensão do período de chuvas nesse ano, permitindo que a precipitação ocorresse ao longo de um intervalo maior de tempo.

Tabela 3 – Comparação dos resultados de recarga e precipitação

Período	Precipitação(P) (mm)	Recarga(R) (mm)	Razão R/P (%)
2021 (a partir de 10/11/2023)	254,9	26,5	10,4
2022	1492,1	156,2	10,5
2023 (até 28/08/2023)	1162,5	200,0	17,2
Total	2909,5	382,6	13,2

Utilizando a média da extração de água do poço PM-09, a razão de extração em relação à recarga do aquífero foi calculada (Tabela 4). Apesar da influência perceptível do poço de extração no nível dinâmico dos poços de monitoramento adjacentes (PM-31, PM-32 e PM-34), a quantidade média de água retirada do sistema representa apenas 2,14% da recarga total, não representando grandes riscos a manutenção do ciclo hidrogeológico local.

Tabela 4 – Comparação dos resultados de recarga e exploração

Período	Recarga(R) (mm)	Exploração(E) (mm)	Razão R/E (%)
2021 (a partir de 10/11)	26,5	0,66	2,49
2022	156,2	4,54	2,91
2023 (até 28/08/2023)	200,0	2,97	1,49
Total	382,6	8,17	2,14

7. CONCLUSÕES

As simulações do modelo de elementos finitos em regime permanente e transiente demonstraram capacidade de reproduzir com precisão satisfatória a variação da carga hidráulica do aquífero medido em campo, apresentando *NRMSE* de 14,9% e 5,6%, respectivamente.

As simplificações geológicas adotadas para a Formação Rio Claro mostraram-se aceitáveis, permitindo concluir que, apesar da natureza heterogênea da formação, não há impactos significativos no fluxo do sistema aquífero na escala do presente trabalho.

O mapa potenciométrico resultante do modelo em regime permanente indica que o fluxo de água subterrânea se direciona para sul/sudoeste, em direção da principal zona descarga de água do sistema, o Córrego Lavapés.

Ao analisar os valores calculados de recarga do aquífero, conclui-se que o poço de extração PM-09 consome apenas 2,14% da água que entra no sistema, não representando grande risco para a sustentabilidade, desde que as atuais condições de precipitação e recarga se mantenham.

O período de monitoramento é ligeiramente inferior a dois anos, o que representa um intervalo relativamente curto para a análise do comportamento do aquífero. Recomenda-se a continuidade do monitoramento para evitar que eventos climáticos atípicos possam interferir nos resultados.

Por fim, a falta de dados, tanto geológicos quanto de carga hidráulica, na porção sul da região simulada introduz grandes incertezas na acurácia do modelo nessa área.

BIBLIOGRAFIA

ALFARO SOTO, M. A.; KUMAYAMA, D. M.; CHANG, H. K. Calibração de um reflectômetro para estudos do fluxo de água em solo não saturado. **Geociências**, v. 26, n. 4, p. 357-368, 2007.

ALFARO SOTO, M.; CHANG, H. K. Estimativa das porosidades efetiva e total em solos brasileiros. **Geotecnia**, n. 112, p. 35-46, 2008.

ALFARO SOTO, M.A.; BASSO, J. B.; CHANG, H. K.; VAN GENUCHTEN, M. T. Simulação de fluxo e transporte de íons de vinhaça através de vertente da formação Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 2, p. 162-174, 2015.

ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W.; HUNT, R.J. **Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic Press, p. 381, 2015.

ASSINE, M.L.; ZACHARIAS A.A.; PERINOTTO, J.A.J. Paleocorrentes, paleogeografia e seqüências deposicionais da Formação Tatuí, centro-leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 1, v. 33, p. 33-40, 2003.

BJÖRNBERG, A. J. S.; LANDIM, P. M. B. Contribuição ao estudo da Formação Rio Claro (Neoceno-zóico). **Boletim Sociedade Brasileira de Geologia**. São Paulo, v. 15, n. 4, p. 43-67., 1966.

CAETANO-CHANG, M.R.; WU F.T. As formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. **Simpósio de Geologia do Sudeste**, v. 4, p. 64., 1995.

Centro de Análise e Planejamento Ambiental. **CEAPLA**. Disponível em: <<https://igce.rc.unesp.br/#!/ceapla>>. Acesso em: onze de outubro de 2023.

Serviço Geológico do Brasil, **CPRM**. Geologia e recursos minerais do Estado de São Paulo. São Paulo, CPRM (2006).

DEFFONTAINES, P. Regiões e paisagens do Estado de São Paulo: primeiro esboço de divisão regional. **Geografia**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 117-160, 1935.

DIERSCH, H.J.G. **FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media**. Springer, p. 996, 2014.

EL-ZEHAIRY, A. A.; LUBCZYNSKI, M. W.; GURWIN, J. Interactions of artificial lakes with groundwater applying an integrated MODFLOW solution. **Hydrogeology journal**, v. 26, n. 1, p. 109-132, 2018.

FAMIGLIETTI, J.S. The global groundwater crisis. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 11, p. 945-948, 2014.

FAYBISHENK, B.A. Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air: Laboratory experiments. **Water Resources Research**, v. 31, n. 10, p. 2421-2435, 1995

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações, 3ªed**. CPRM, UFP, LABHID: Fortaleza,2008.

FERRARI, A.L. **Variabilidade e tendência da temperatura e pluviosidade nos municípios de Pirassununga, Rio Claro, São Carlos e São Simão (SP): estudo sobre mudança climática de curto prazo em escala local**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 156 p, 2012.

FREITAS, R.O. Ensaio sobre o relevo tectônico do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 171-222, 1953.

FULFARO, V.J.; GAMA JR, E.; SOARES, P.C. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. São Paulo: PAULIPETRO, Consórcio IPT/CESP (Relatório 008/80)., 1980.

FULFARO, V.J.; STEVAUX, J.C.; SOUZA, E.E.; BARCELOS, J.H. A Formação Tatuí (P) no Estado de São Paulo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA**, 33., Rio de Janeiro, 1984. Anais... Rio de Janeiro, SBG, v. 2, p. 711- 724.,1984.

GONÇALVES R.D. **Modelagem Numérica e Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Rio Claro**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro (SP). p. 105, 2016.

GONÇALVES, R.D.; TERAMOTO, E.H.; ENGELBRECHT, B.Z.; ALFARO SOTO, M.A.; CHANG, H.K.; VAN GENUCHTEN, M.T. Quasi-Saturated Layer: Implications for

Estimating Recharge and Groundwater Modeling. **Groundwater**, v. 58, n. 3, p.432-440, 2020.

HEALY, R.W. e COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology journal**, v. 10, p. 91-109, 2002.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. Estudo de águas subterrâneas.** Instituto Trata Brasil, 2019.

KOLYA, A., ZAINI, M., ZAINI, J., PERINOTTO, A.; REIS, F. Didática no ensino de geociências: práticas pedagógicas aplicadas à geodiversidade do Projeto Geopark Corumbataí. **VIII EnsinoGeo-Simpósio Nacional de Ensino e História de Ciências da Terra, Campinas, SP, Brasil**, 2018.

KRESIC, N. **Hydrogeology and groundwater modeling.** 2ª edição, CRC press, Boca Raton, Florida, p. 870, 2007.

LANDIM, P. M. B. **O Grupo Passa Dois (P) na Bacia do Rio Corumbataí (SP).** Tese de Doutorado. Faculdade de Filosofia de Ciências e Letras, Rio Claro. 1967.

LANDIM, P. M. B.; SOARES, P. C.; GAMA, J. R. E. Estratigrafia do noroeste da bacia sedimentar do Paraná, p.45 (**Curso** de Especialização: Convênio IPT.- UNESP - Rio Claro). 1980.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências** - Petrobras, n. 2, v. 15, p.265-287, 2007.

NETO, D.C.; CHANG, H. K. Aplicação do método de flutuação de nível d' água para a estimativa de recarga-exemplo do Aquífero Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, v. 22, n. 1, p. 39-48, 2008.

NETO, D.C.; CHANG, H.K.; VAN GENUCHTEN, M.T. A mathematical view of water table fluctuations in a shallow aquifer in Brazil. **Groundwater**, v. 54, n. 1, p. 82-91, 2016.

OLIVA, A. **Estudo Hidrofaciológico do Aquífero Rio Claro no Município de Rio Claro –SP.** (Tese de Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro (SP). 196 p., 2006.

OLIVA, A.; CHANG, H.K.; CHANG, M.R.C., Determinação da condutividade hidráulica da formação Rio Claro: análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro guelph e testes de slug. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, p. 1-17, 2005.

OLIVA, A.; CHANG, H.K.; SEIXAS, W. L. Cálculo de Reservas Hídricas Subterrâneas do Aquífero Rio Claro Utilizando Simulação Monte Carlo, **Revista Águas Subterrâneas**, v.24, n.1, p.13 30, 2010.

PERINOTTO, J.A.J. e ZAINÉ, M. F. Patrimônios naturais e história geológica da região de Rio Claro-SP. **Revista Arquivo Público História do Município de Rio Claro**, v. 1, 2008.

ROSTIROLLA, S. P.; ASSINE, M. L.; FERNANDES, L. A.; ARTUR, P. C. Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná-o exemplo do alto estrutural de Quatiguá. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 639-648, 2000.

SAAD, A. R. **Estratigrafia do Sub-grupo Itararé no centro e sul do Estado de São Paulo.** Tese de mestrado. Universidade de São Paulo. 1977.

SAKAGUCHI, A.; NISHIMURA, T.; KATO, M. The Effect of Entrapped Air on the Quasi-Saturated Soil Hydraulic Conductivity and Comparison with the Unsaturated Hydraulic Conductivity. **Vadose Zone Journal**, v. 4, p. 139-144, 2005.

SCANLON, B.R.; DUTTON, A.R.; SOPHOCLEOUS, M.A. **Groundwater recharge in Texas.** Austin, TX, USA: Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, 2002.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: **XXVIII Congresso brasileiro de Geologia**. p. 41-65., 1974.

SIEBERT, S.; BURKE, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; HOOGEVEEN, J.; DÖLL, P.; PORTMANN, F. T. Groundwater use for irrigation—a global inventory. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 10, p. 1863-1880, 2010.

SOARES, P. C. Arenito Botucatu e Pirambóia no Estado de São Paulo. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**. p. 250-25. 1972.

SOARES, P. C. Divisão Estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 229-251, 1975.

STEVAUX, J. C.; SOUZA-FILHO, E. E.; FÚLFARO, V. J. Trato deposicional da Formação Tatuí (P) na área aflorante do NE da Bacia do Paraná, Estado de São Paulo. SBG, **Congresso Brasileiro de Geologia**. v. 34, p. 219-229, 1986.

TERAMOTO, E. H.; ENGELBRECHT, B. Z.; GONÇALVES R. D.; CHANG, H. K. Probabilistic backward location for the identification of multi-source nitrate contamination. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 35, n. 4, p. 941-954., 2021.

TERAMOTO, E.H.; CHANG, H.K. Métodos WTF e simulação numérica de fluxo para estimativa de recarga—exemplo Aquífero Rio Claro em Paulínia/SP. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 173-180, 2018.

VESELY, F. F. **Dinâmica Sedimentar e Arquitetura Estratigráfica do Grupo Itararé (Carbonífero–Permiano) no Centro-leste da Bacia do Paraná**. Curitiba. 226 p. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná., 2006.

VIEIRA, P. C. Hipótese sobre a origem da Depressão Periférica Paulista. **Revista do Instituto Geológico**, v. 3, n. 2, p. 61-67, 1982.

WANG, H. F. e ANDERSON, M. P. **Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods**. San Diego, California, USA: Academic Press. 237 p., 1982.

WILLIAMS, M.D. e OOSTROM, M. Oxygenation of anoxic water in a fluctuating water table system: an experimental and numerical study. **Journal of Hydrology**, v. 230 p. 70-85, 2000.

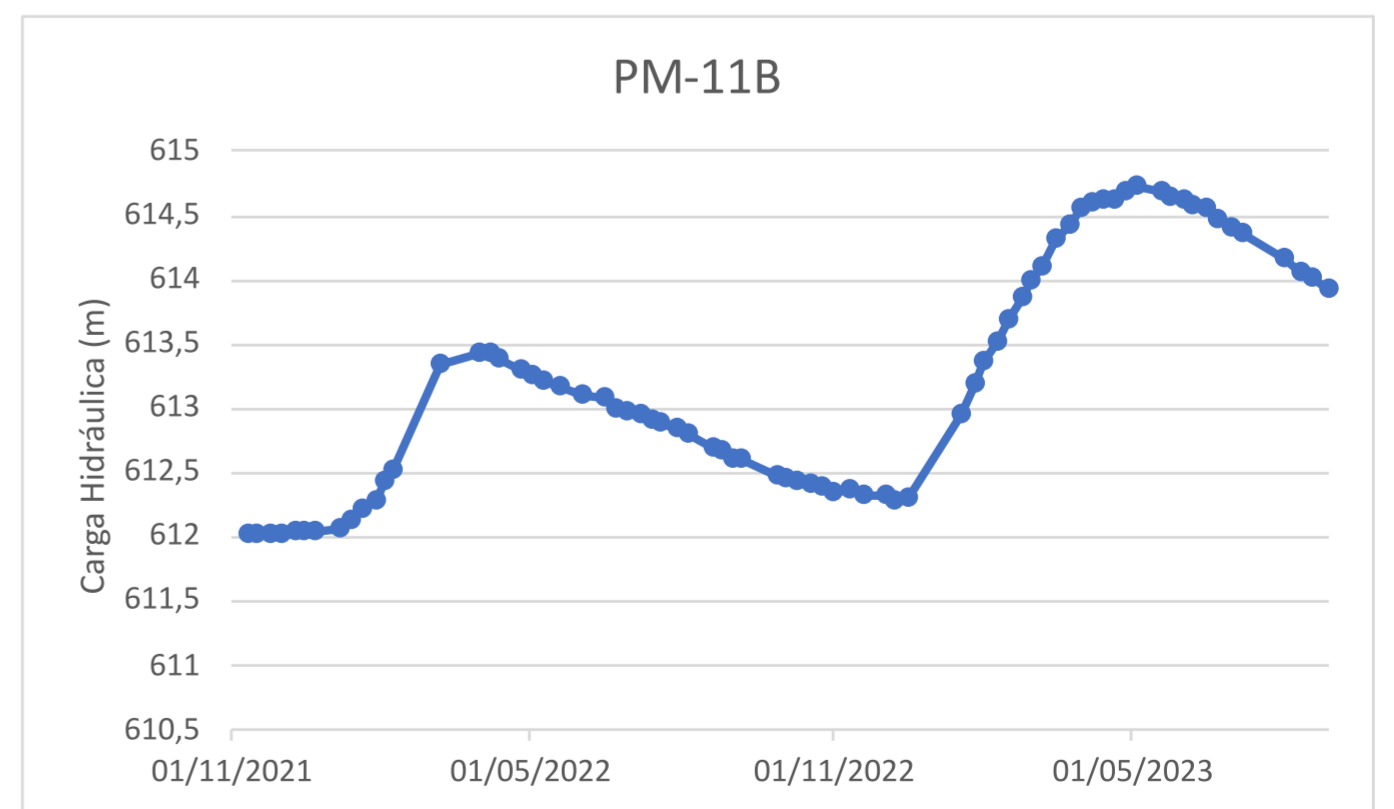
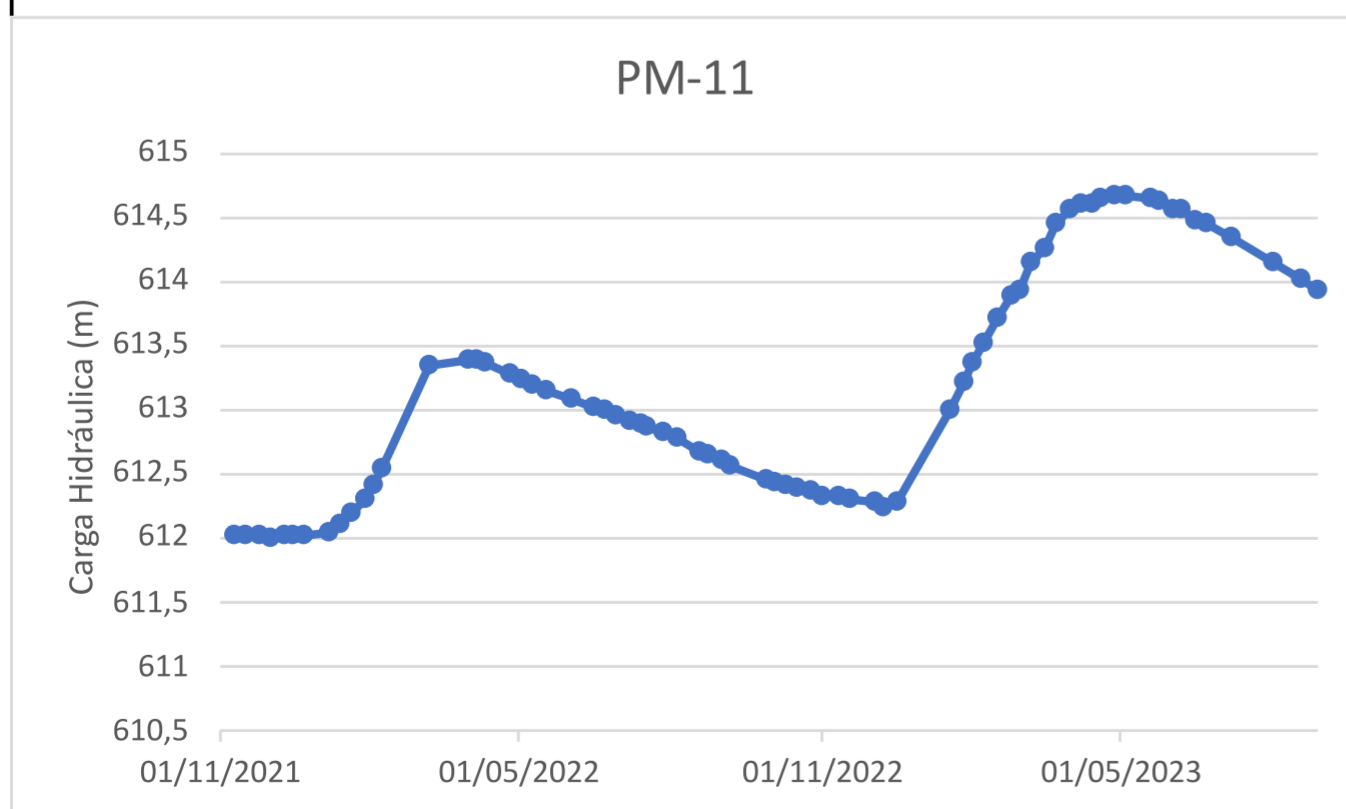
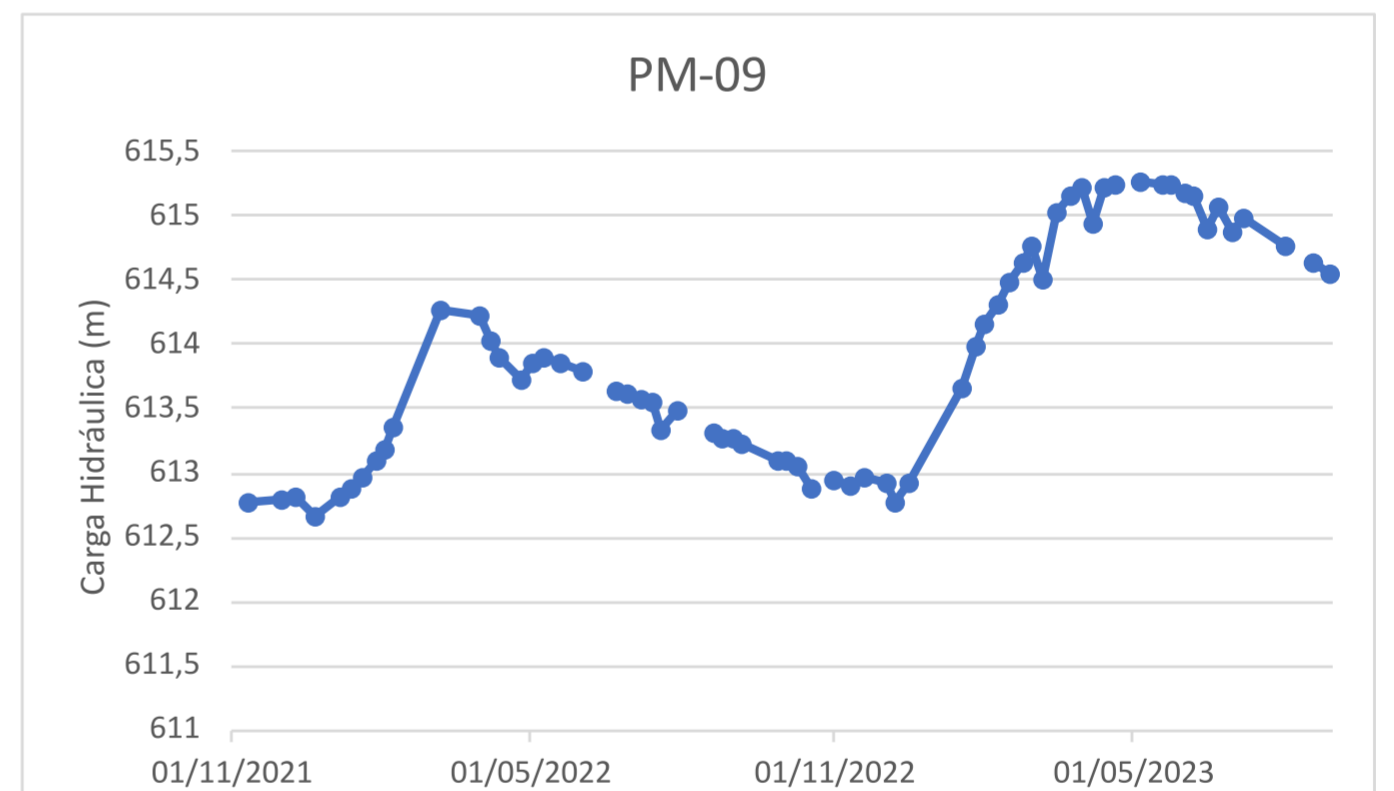
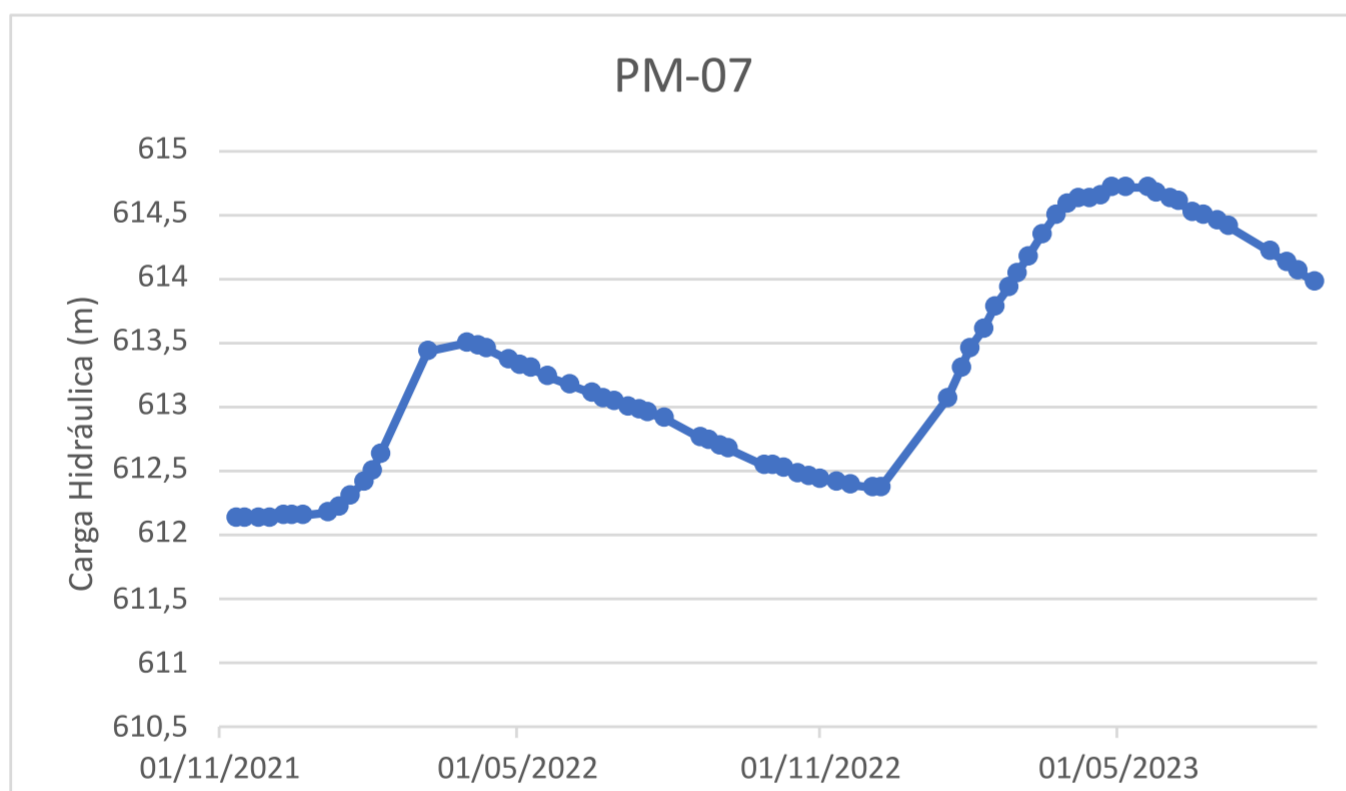
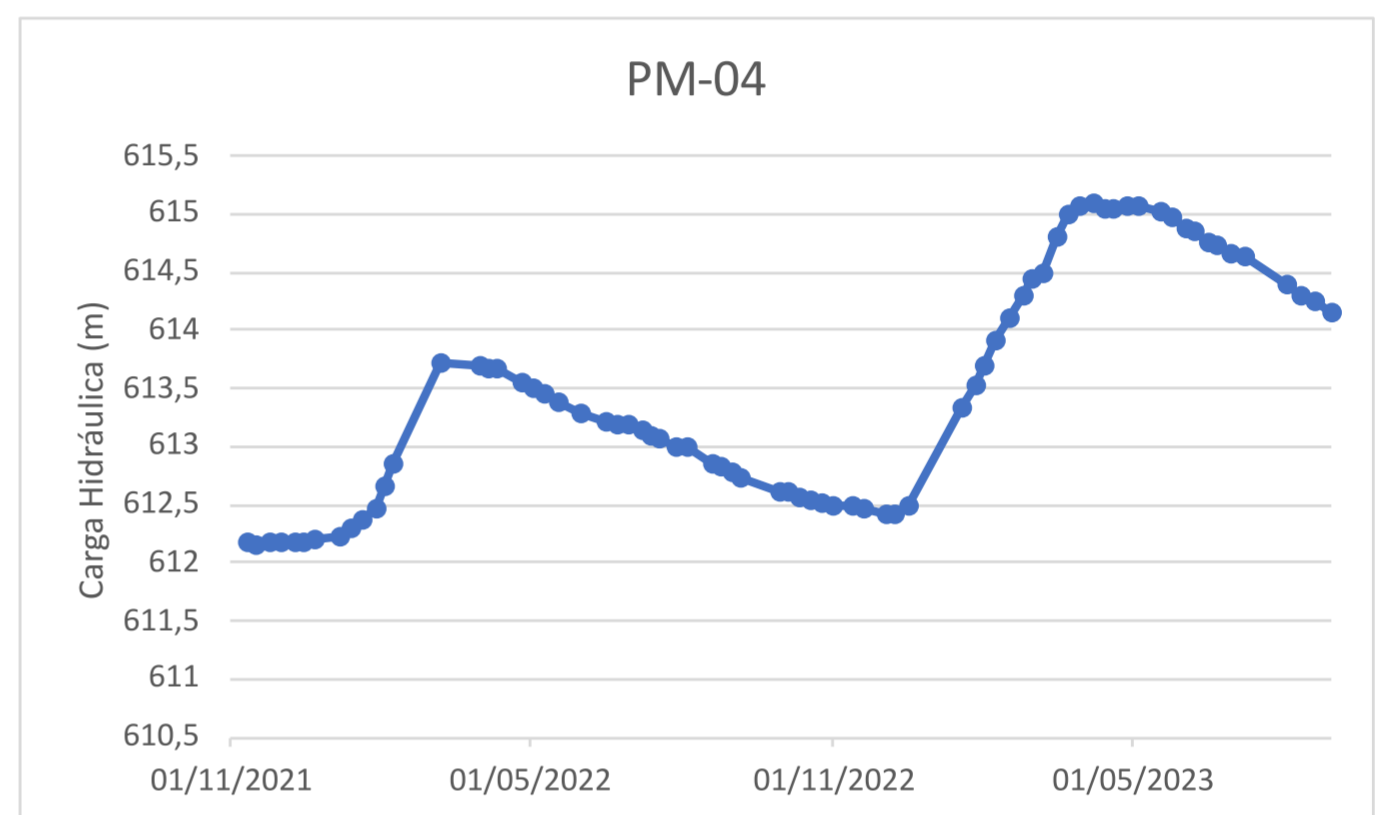
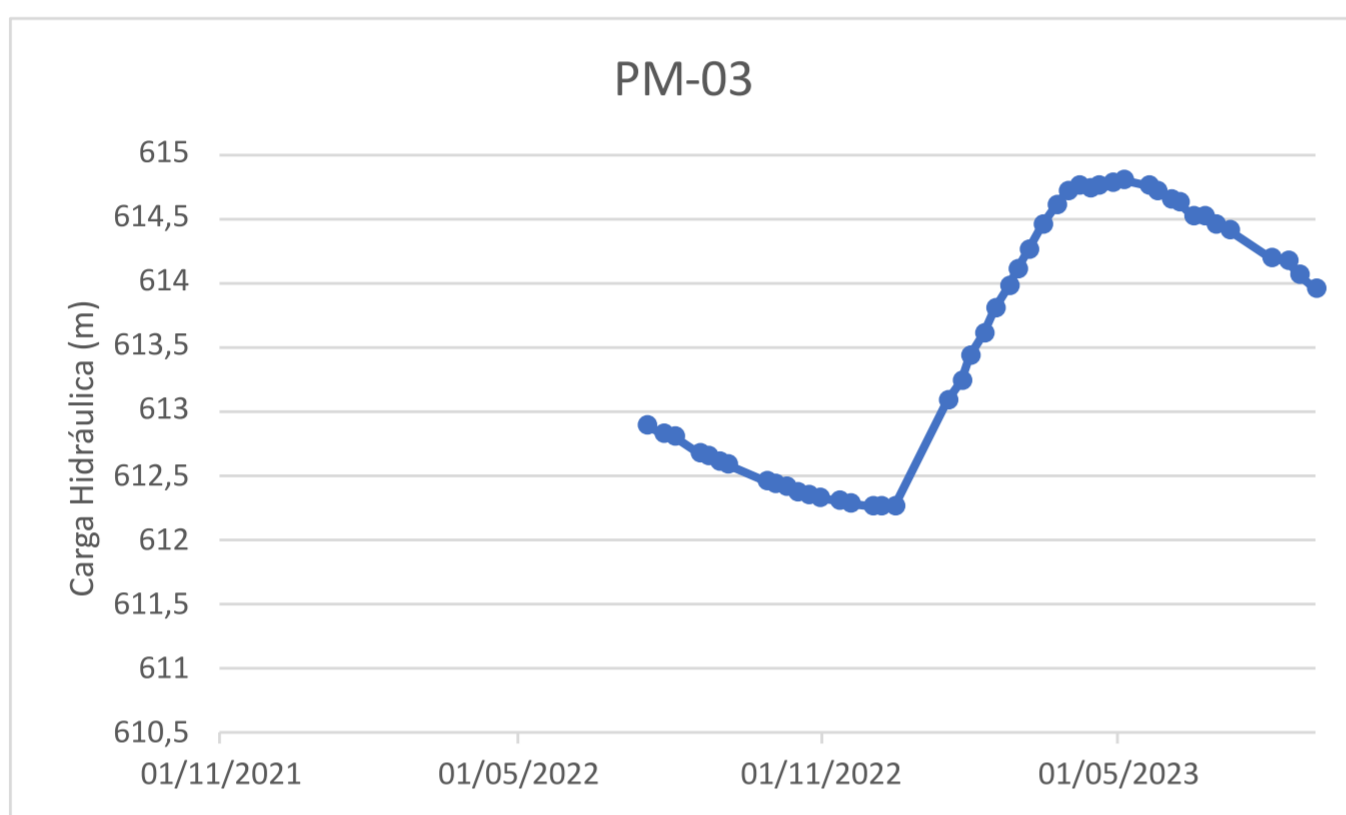
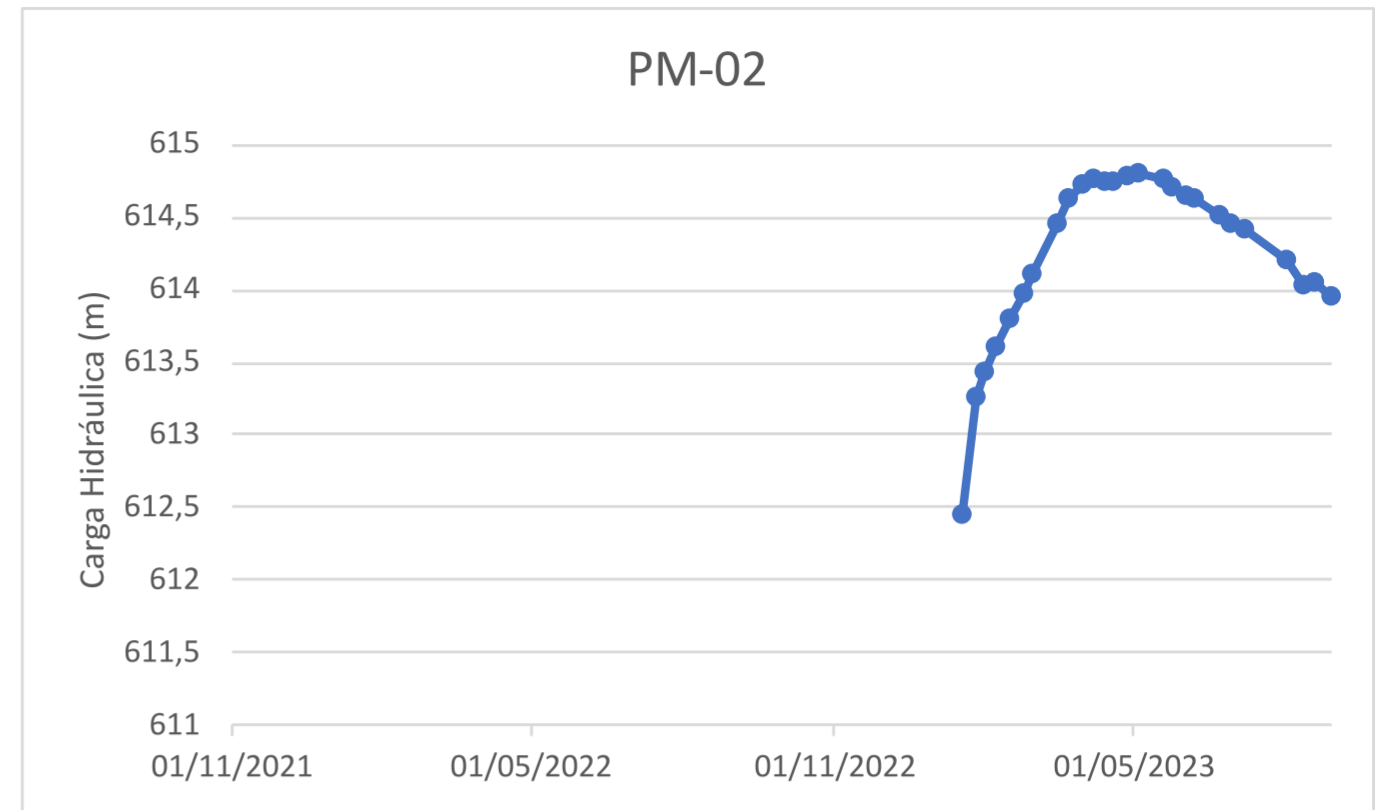
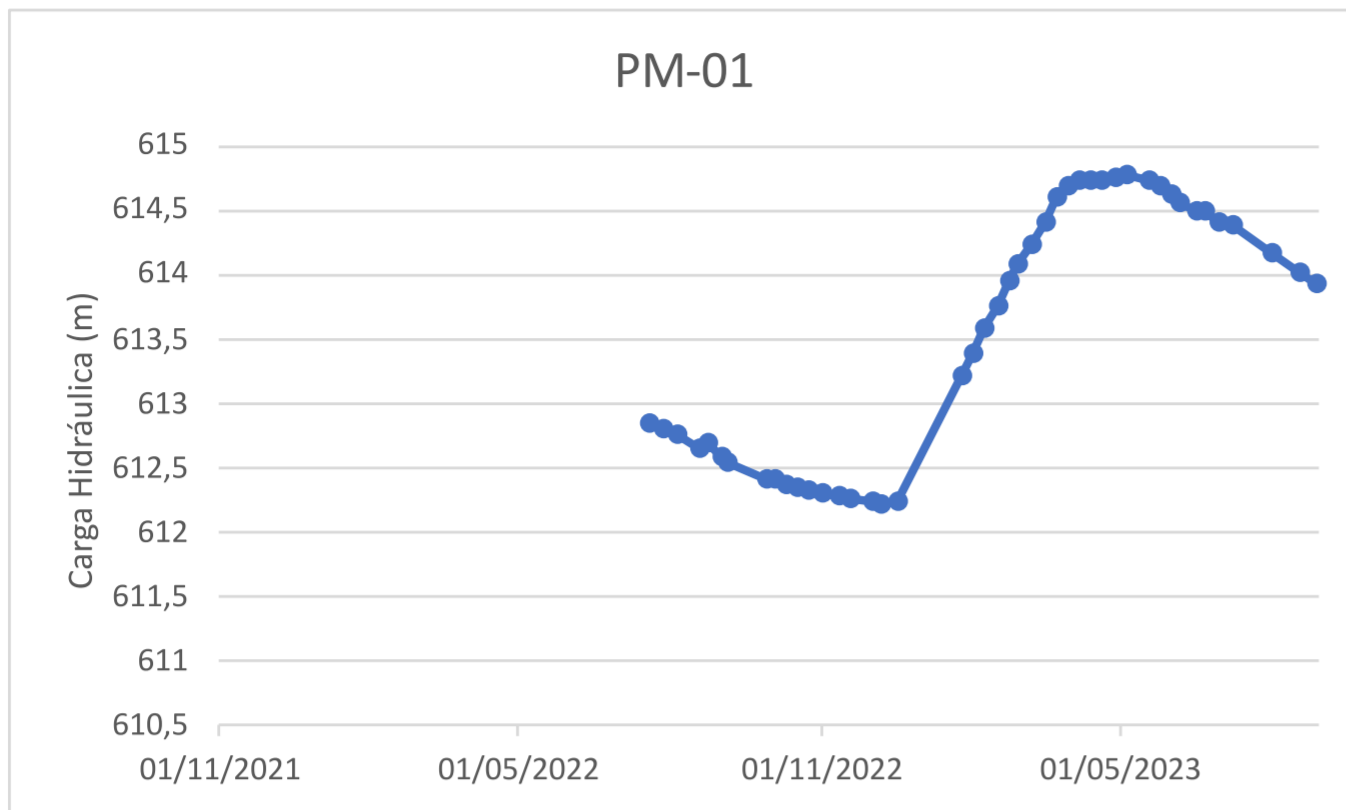
XU, X.; SUN, C.; QU, Z.; HUANG, Q.; RAMOS, T.B., HUANG, G. Groundwater recharge and capillary rise in irrigated areas of the Upper Yellow River Basin assessed by an agro-hydrological model. **Irrigation and Drainage**, v. 64, n. 5, p. 587-599, 2015.

ZAINE, J.E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP)**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências, Rio Claro (SP). 1994.

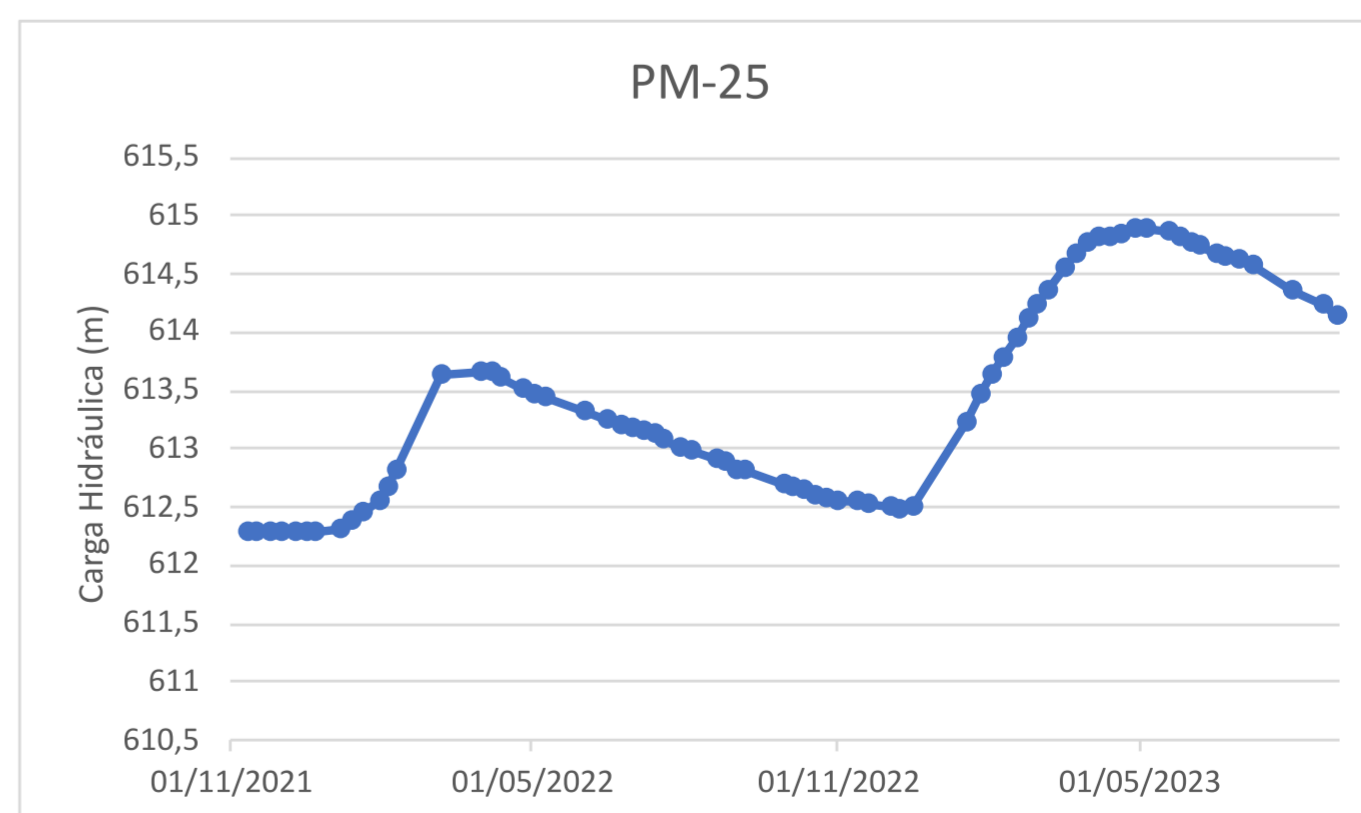
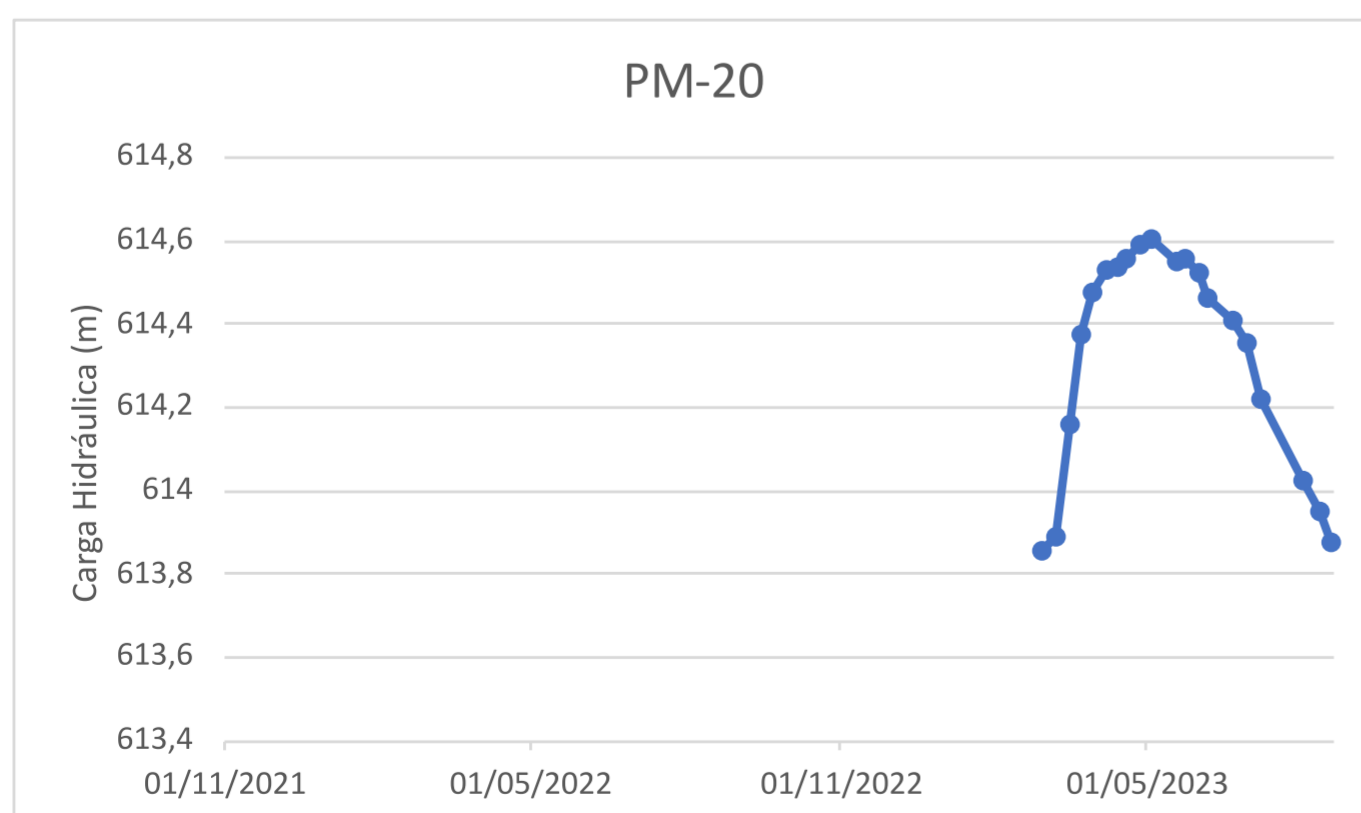
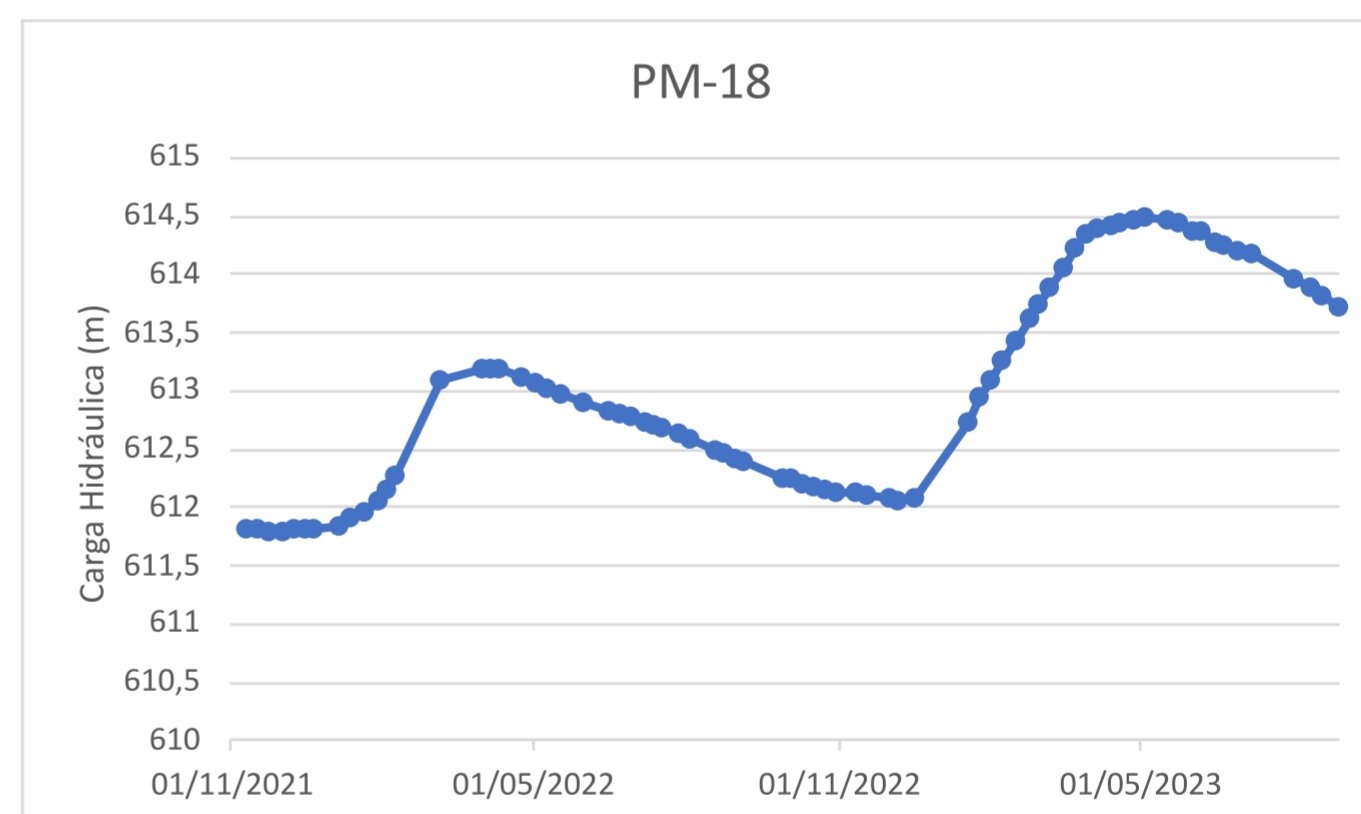
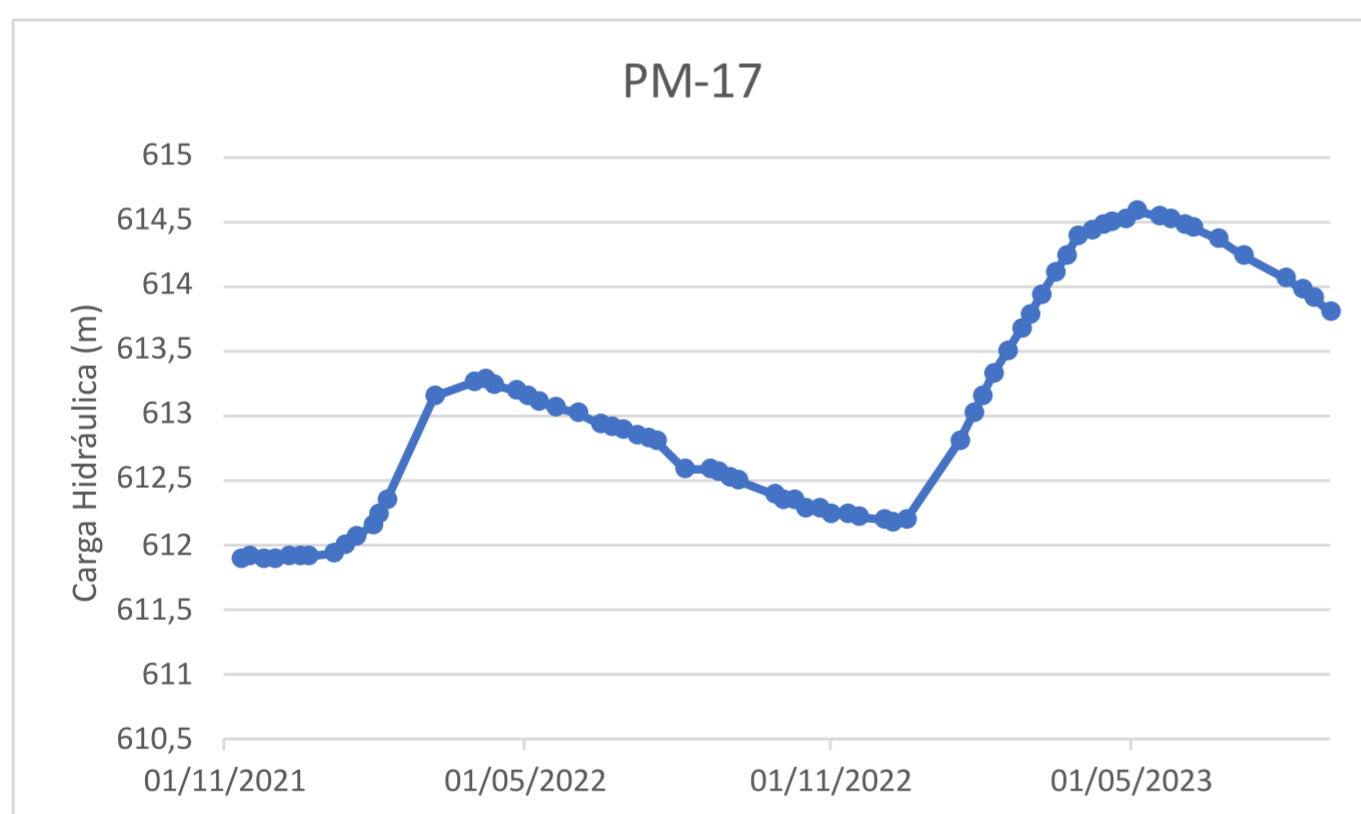
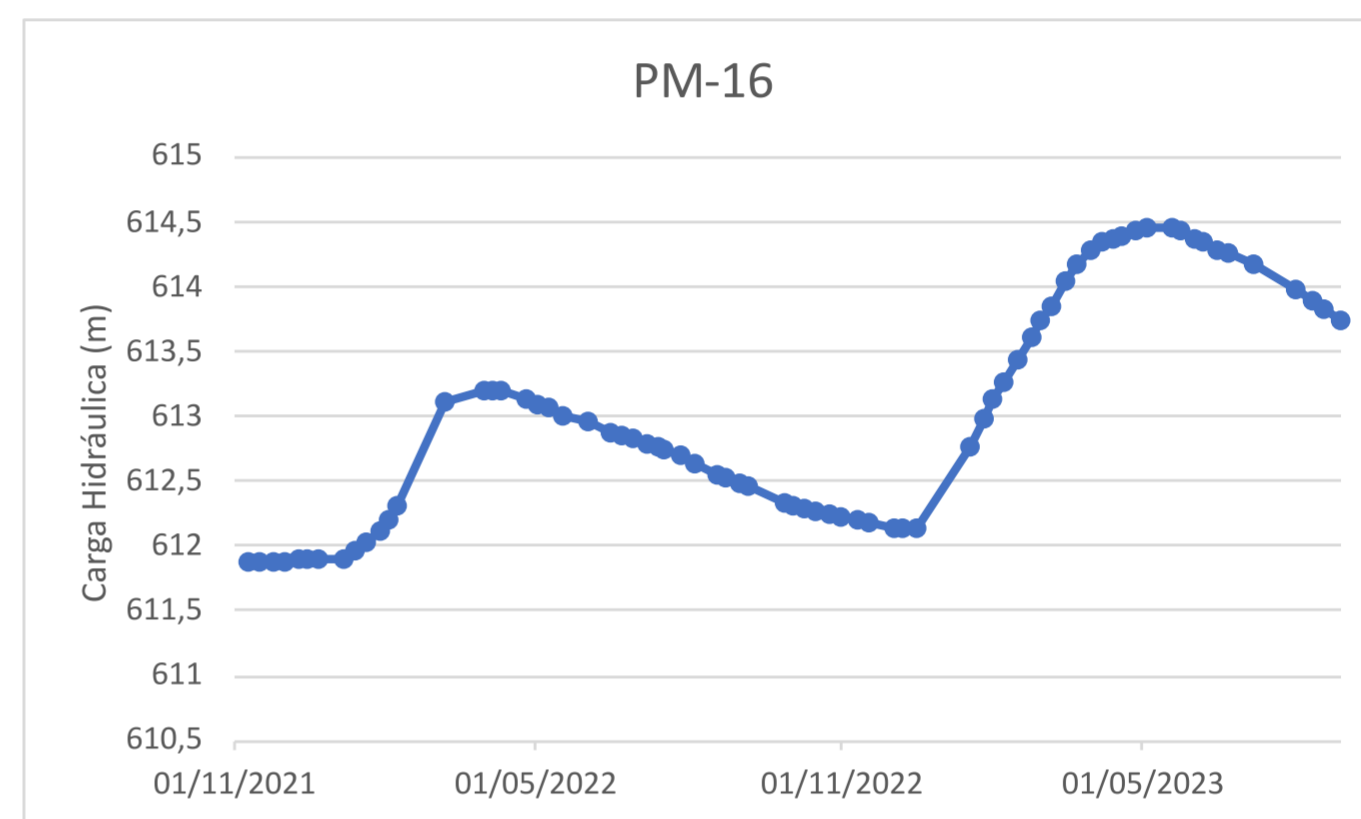
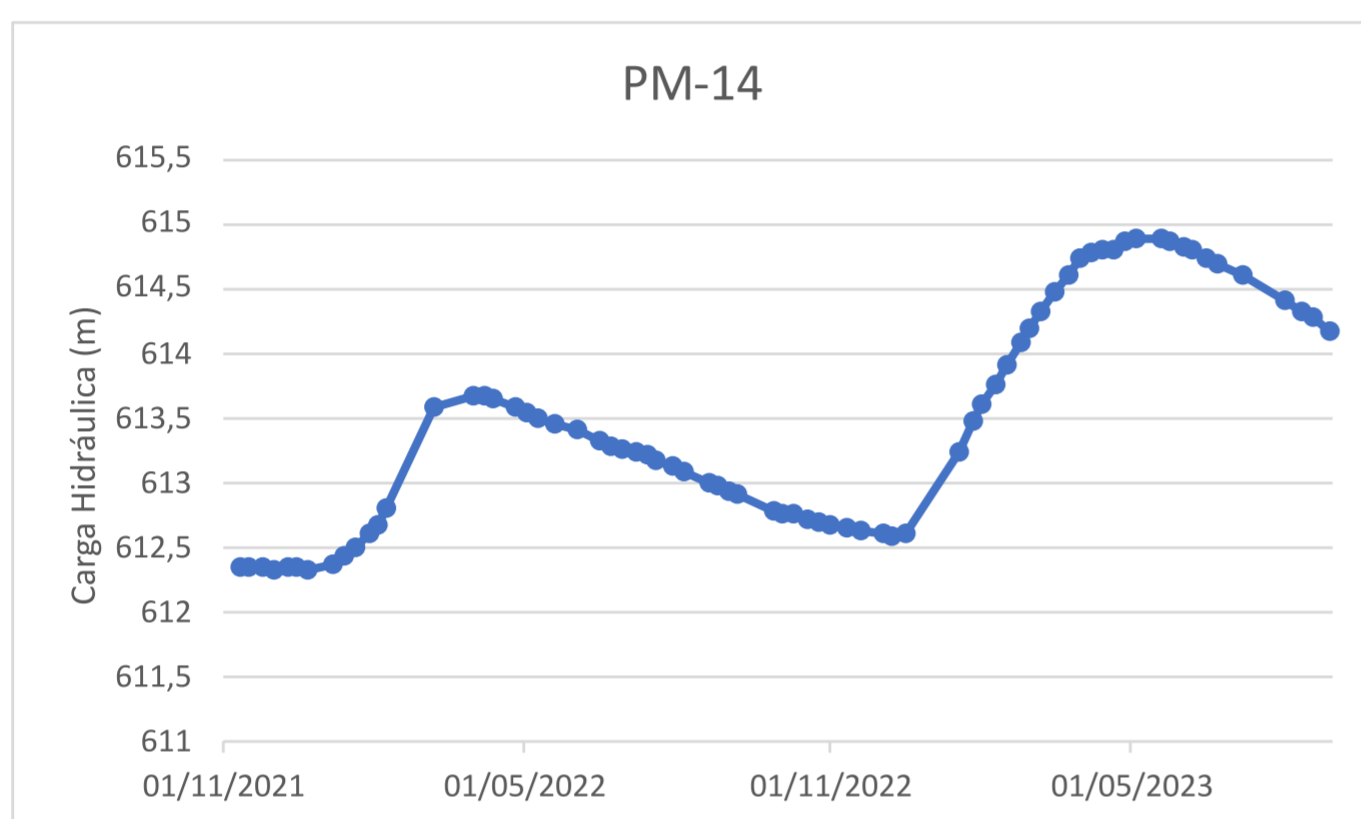
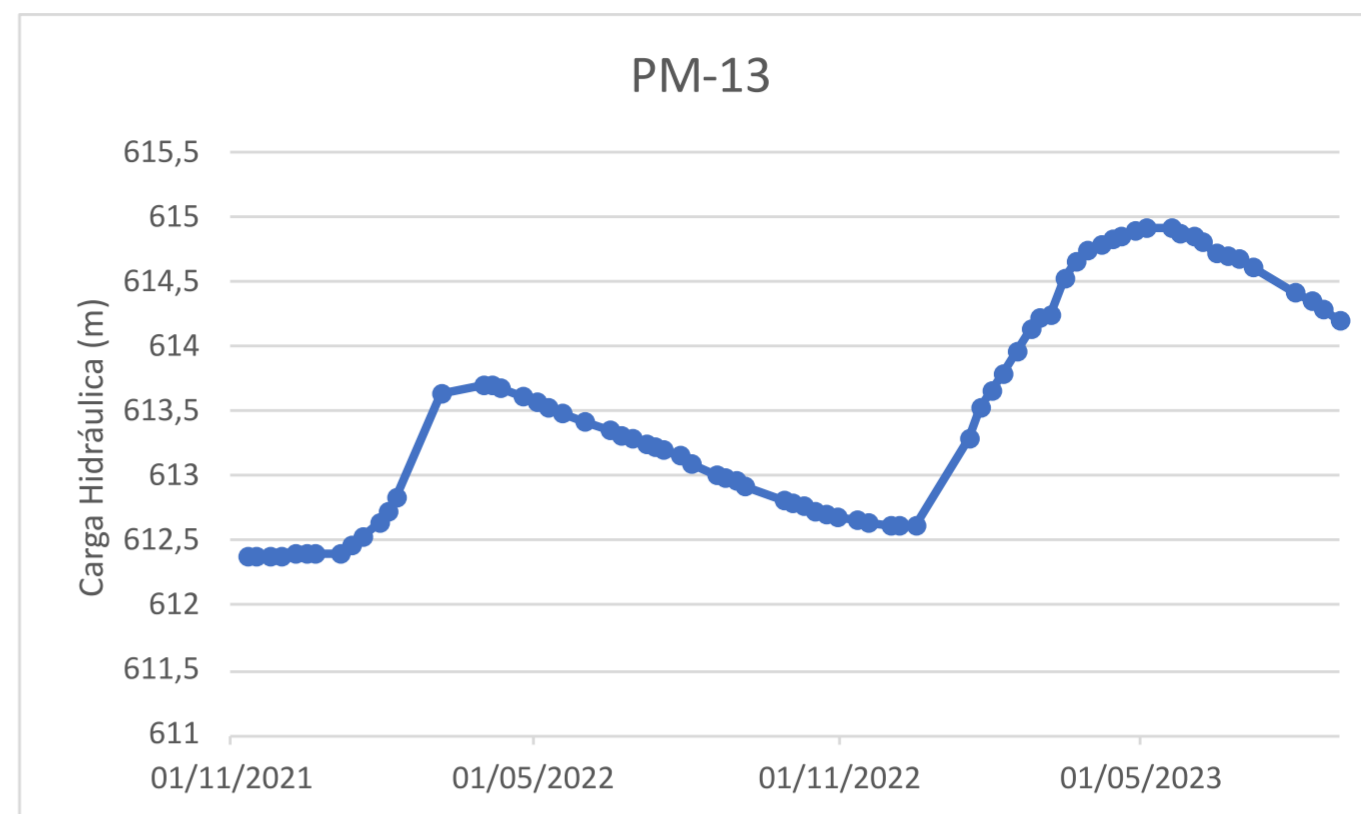
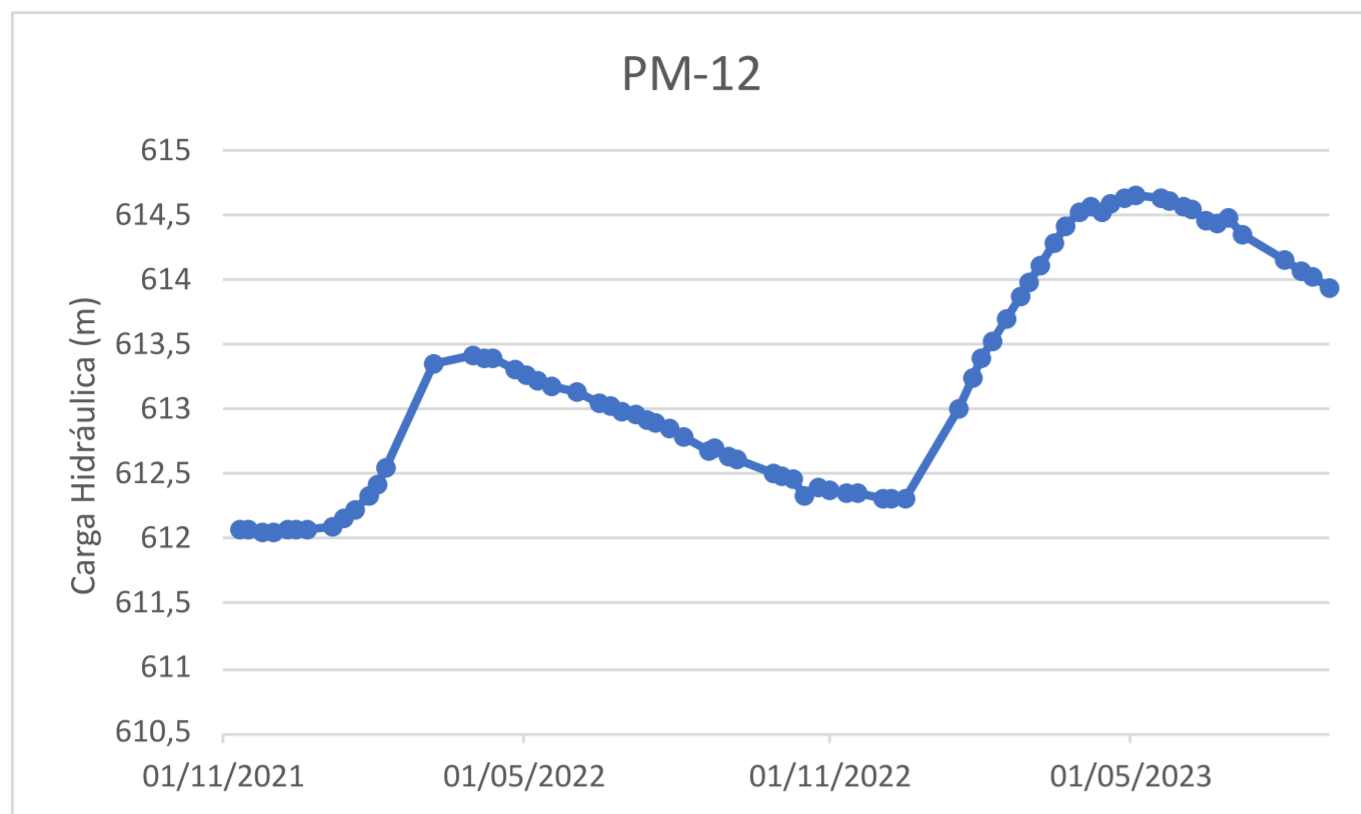
ZAINE, J.E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de rio claro (SP)** Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências, Rio Claro (SP). 2000.

ANEXOS

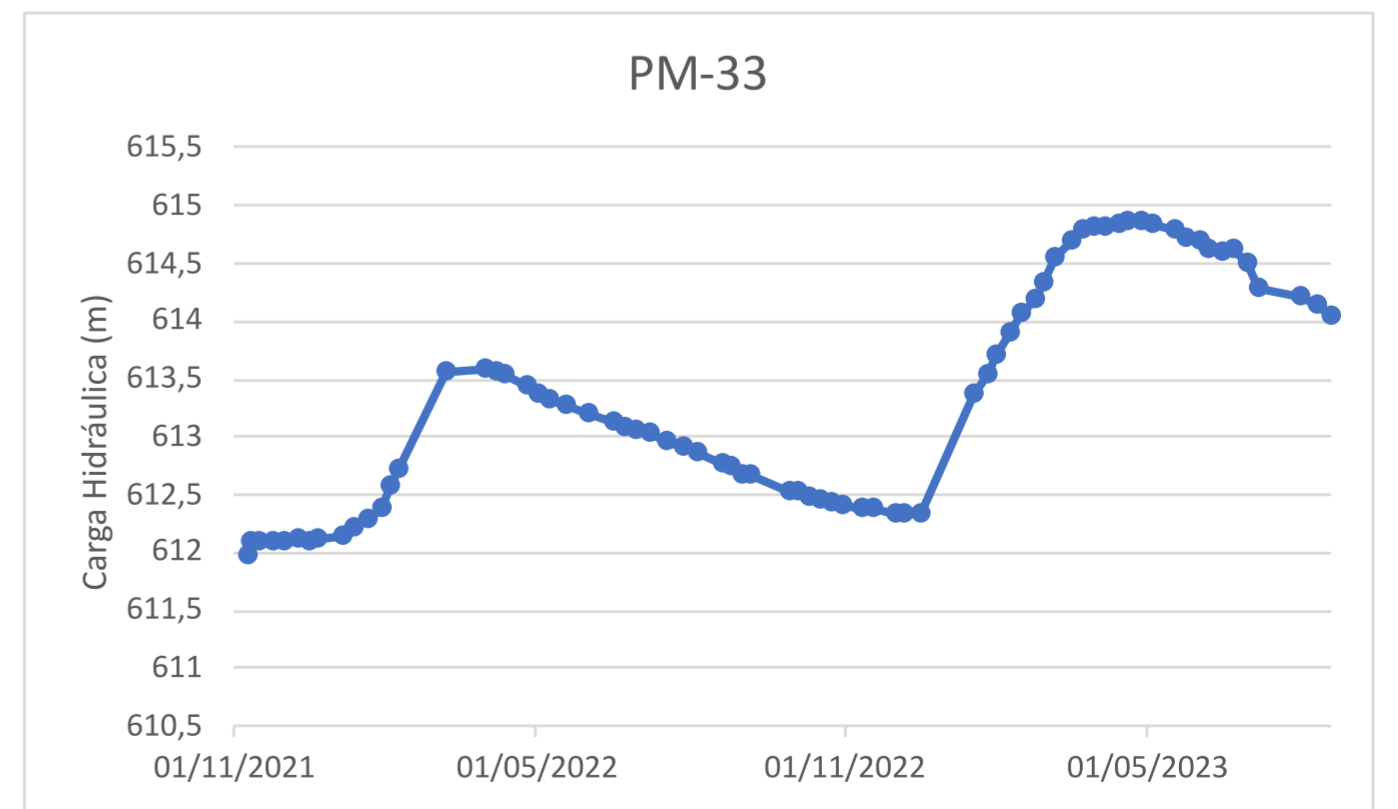
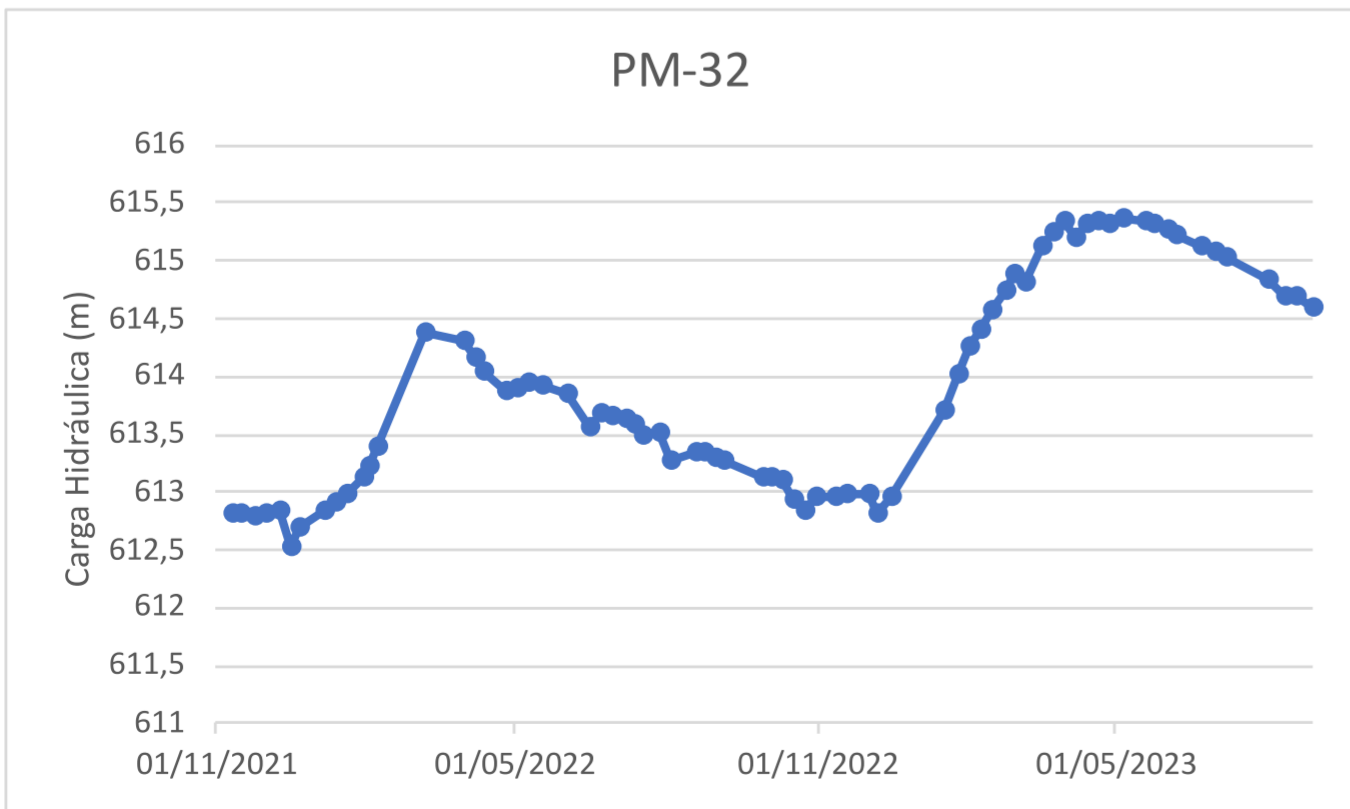
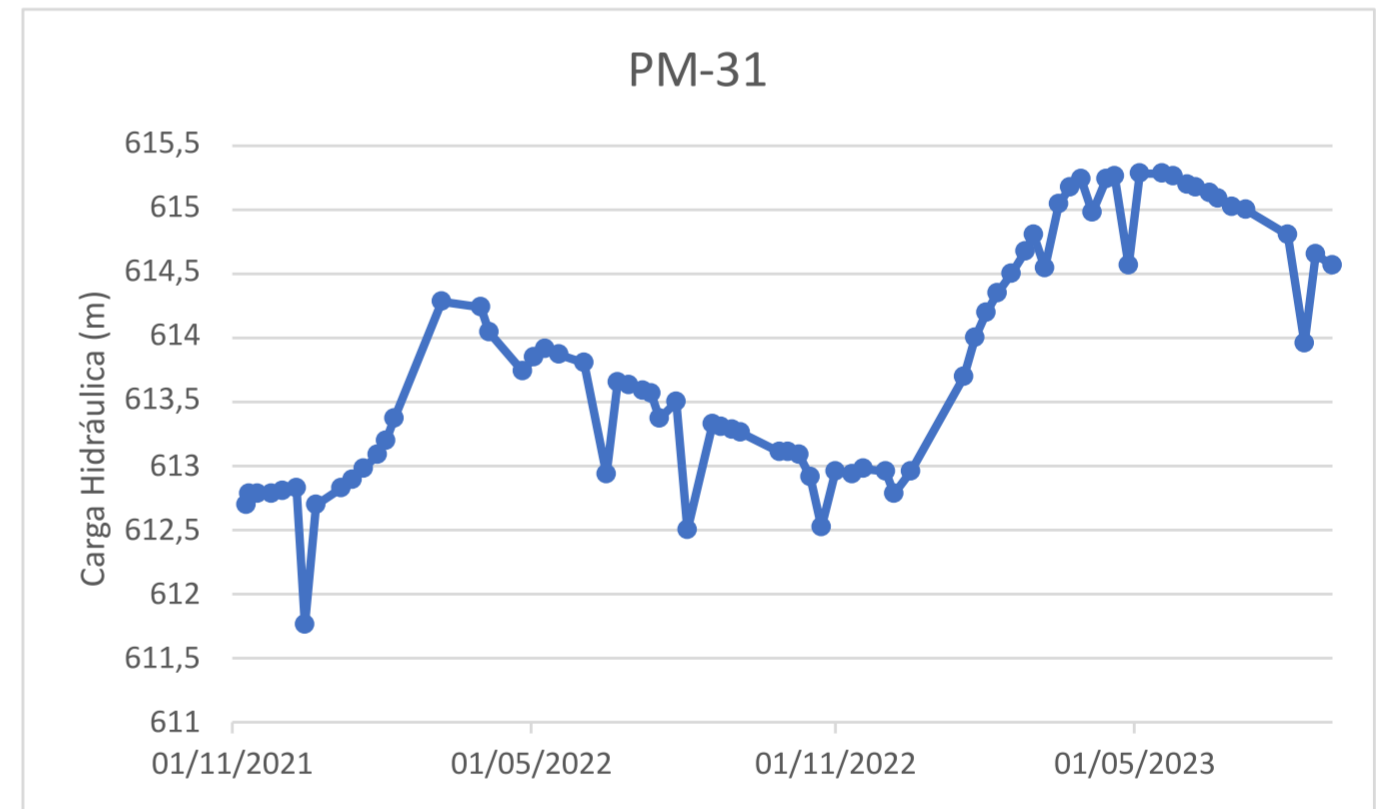
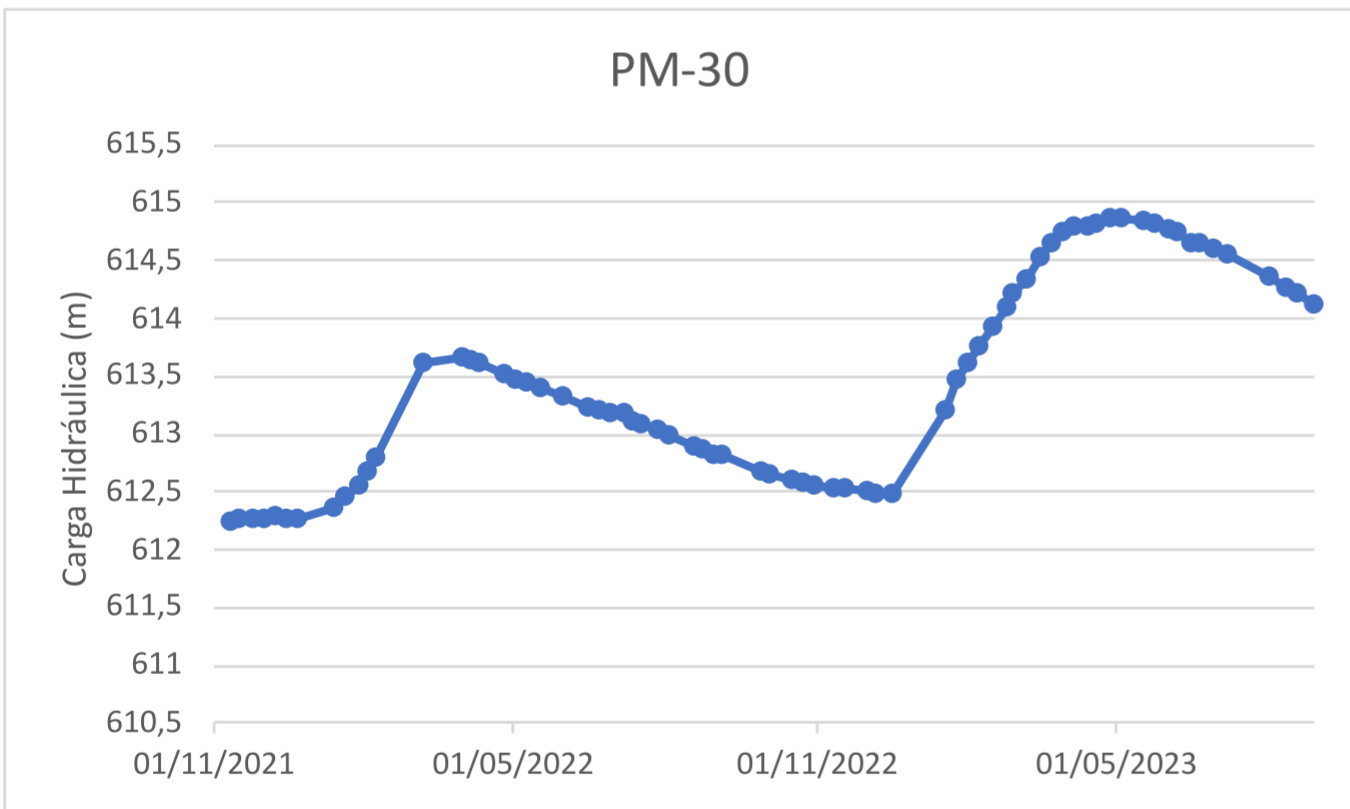
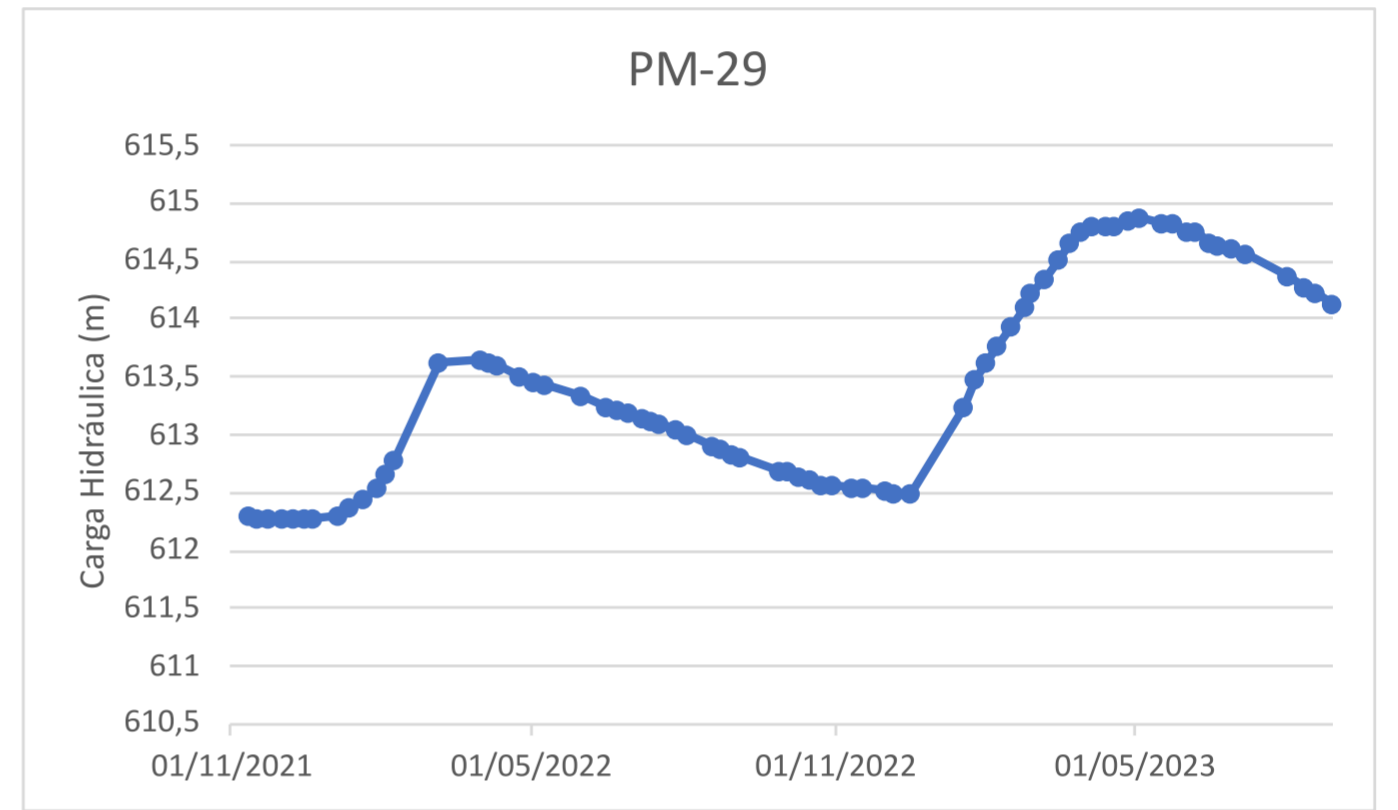
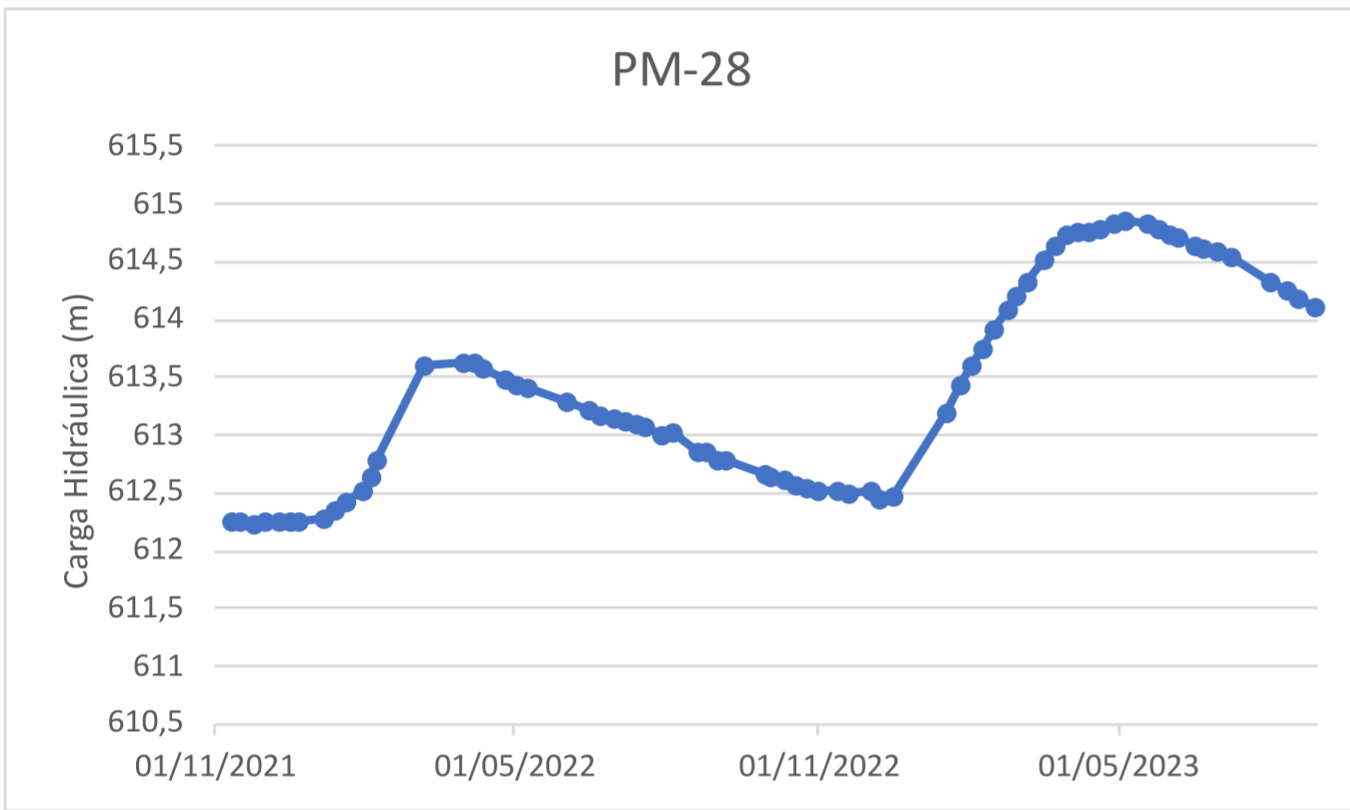
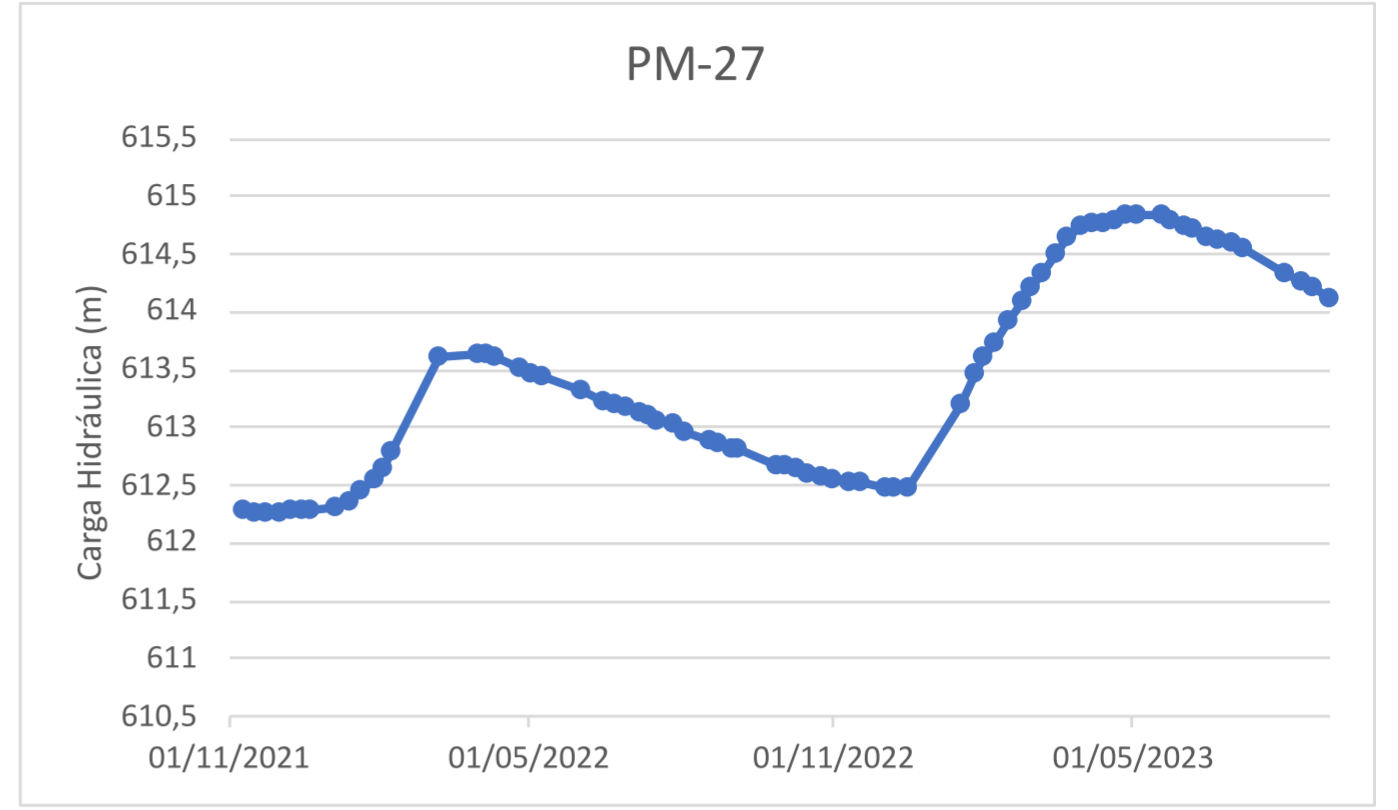
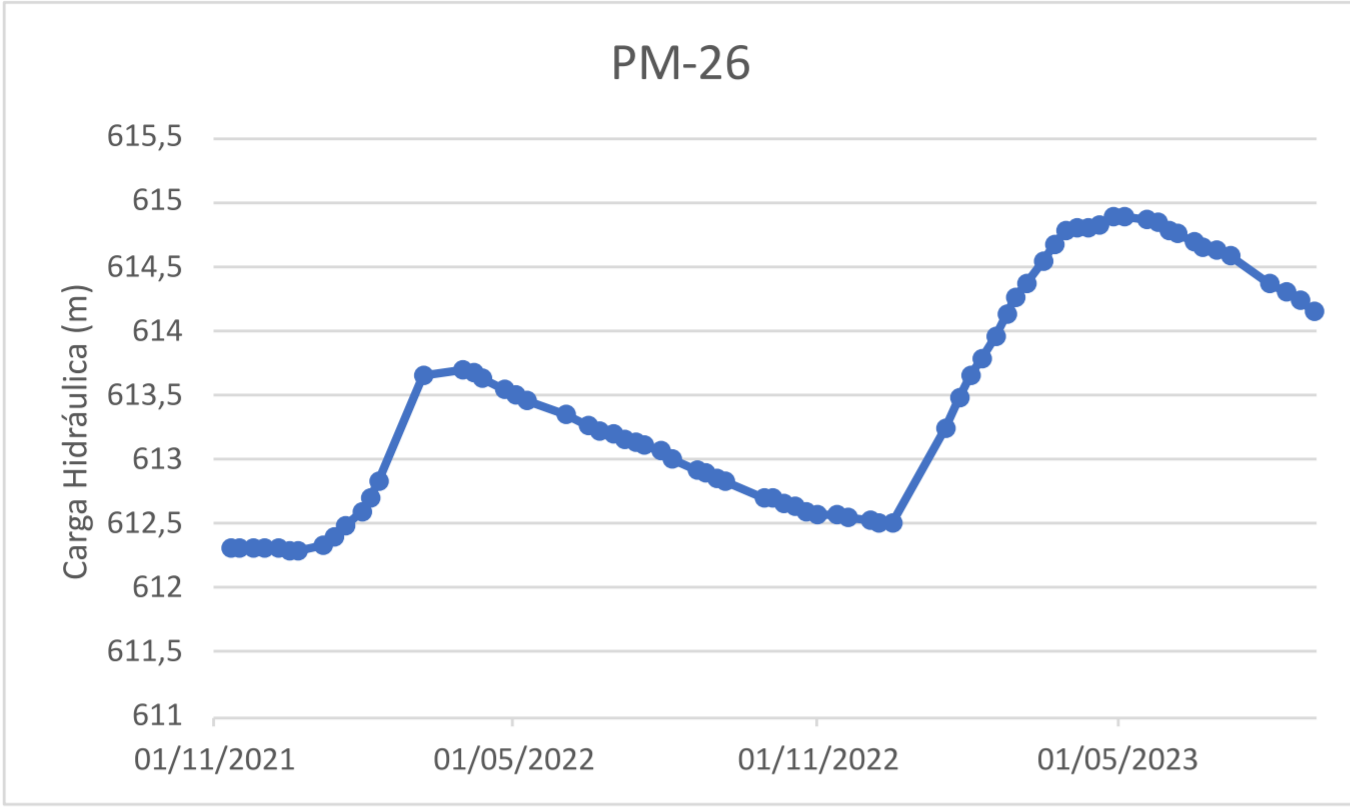
Variação semanal de carga hidráulica dos poços monitorados



Variação semanal de carga hidráulica dos poços monitorados



Variação semanal de carga hidráulica dos poços monitorados



Variação semanal de carga hidráulica dos poços monitorados

