

UNIVERSIDADE FERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia

Arthur de Souza Rodrigues

**AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM POÇOS
TUBULARES NA REGIÃO DE ENTORNO DA ÁREA DE PROTEÇÃO
AMBIENTAL CARSTE DE LAGOA SANTA**

Belo Horizonte

2023

Arthur de Souza Rodrigues

**AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM POÇOS
TUBULARES NA REGIÃO DE ENTORNO DA ÁREA DE PROTEÇÃO
AMBIENTAL CARSTE DE LAGOA SANTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula
Coorientadora: Profa. Dra. Leila Nunes Menegasse Velasquez

Belo Horizonte

2023

R696a
2023

Rodrigues, Arthur de Souza.

Avaliação do monitoramento de água subterrânea em poços tubulares na região de entorno da área de proteção ambiental carste de Lagoa Santa [manuscrito] / Arthur de Souza Rodrigues. – 2023.

103 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Coorientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 98-103.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Carste – Lagoa Santa (MG) – Teses. 3. Aquíferos – Lagoa Santa (MG) – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 556.3(815.1)



FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM POÇOS TUBULARES NA REGIÃO DE ENTORNO DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL CARSTE DE LAGOA SANTA


ARTHUR DE SOUZA RODRIGUES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA do IGC-UFMG, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre(a) em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

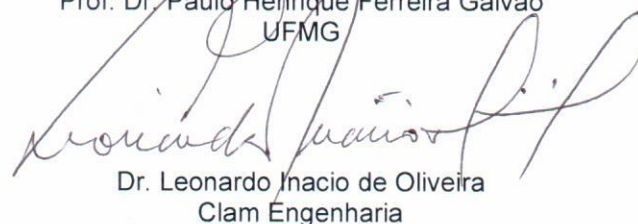
Aprovada em 17 de novembro de 2023, pela banca constituída pelos membros:



Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador
UFMG



Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão
UFMG



Dr. Leonardo Inacio de Oliveira
Clam Engenharia

Belo Horizonte, 17 de novembro de 2023.

Dedico esta dissertação aos meus pais Maria Piedade e José Olegário, aos meus irmãos Pietra e Thomás e a minha noiva Tays. Meus maiores incentivadores.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por ter me dado força e coragem para superar os desafios.

Ao meu orientador Rodrigo, por ser mais que um orientador e por muitos momentos fazer um papel de irmão mais velho, aconselhando em aspectos que vão muito além da academia, a minha orientadora Leila Menegasse pela confiança, carinho e bondade e, por acima de tudo, ter me dado a oportunidade de realizar algo que eu não acreditava ser possível.

Aos meus pais, Piedade e Olegário, que são amor, paciência e segurança, durante essa jornada e por entenderem minha ausência em alguns momentos.

Aos meus irmãos Pietra e Thomas, por serem uma eterna fonte de inspiração e amizade.

À Tays, por ter estado ao meu lado em cada momento durante essa caminhada.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade/Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - ICMBio/CECAV, pelo financiamento do Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais, processo FUNDEP/GERDAU/UFMG Nº 22.317, coordenado pela Profa. Dra. Leila Velásquez.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, ao Instituto Mineiro de Gestão de Água – IGAM e ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos bolsistas, mestrandos, doutorandos do projeto pela parceria, principalmente, Mateus, Gabriela, Gabi, Pedro, Caio, Ricardo e Paula.

À Pró-reitoria de Pós-graduação (PRPg) da UFMG e ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências e seus professores que contribuíram com minha formação e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação, em especial William, que sempre esteve disponível para nos apoiar.

Ao CNPQ e CAPES por sempre apoiarem e fomentarem a pesquisa no nosso país.

A CLAM e todos os meus amigos que fazem parte desse time, especialmente Luiza, Joana, Marcos, Guilherme e Armando pelo suporte em diversos momentos desta jornada.

Aos meus amigos de Belo Horizonte que sempre me apoiaram, incentivaram e cobraram, com destaque para o Yuri, que, por muitas vezes, me trouxe novas perspectiva sobre minha pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições.

EPÍGRAFE

Brindo a casa, brindo a vida, meus amores minha família.
Marcelo Falcão.

RESUMO

A dissertação apresentada tem como objetivo apresentar o monitoramento do comportamento dos níveis de água subterrânea nas compartimentações hidrogeológicas da região de entorno da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, a qual possui uma significativa importância ambiental. A área de estudo abrange parte de diversos municípios, incluindo Vespasiano, Pedro Leopoldo, Confins, Lagoa Santa, Matozinhos, Funilândia e Prudente de Morais, cobrindo integralmente a APA Lagoa Santa. A região possui uma complexa rede de condutos subterrâneos, controlados estruturalmente, que despertam grande interesse espeleológico e hidrogeológico. A partir da instalação de 16 transdutores de pressão total e 5 transdutores de pressão barométrica, este estudo monitorou dezesseis poços tubulares inativos e avaliou as variações nos níveis de água subterrânea com o propósito de compreender o comportamento das superfícies potenciométricas das compartimentações hidrogeológicas existentes na área de interesse. O monitoramento ocorreu durante três anos hidrológicos, período que foi de abril de 2018 até maio de 2021. Os levantamentos de dados foram realizados mensalmente, sempre que possível. Os poços monitorados encontram-se em rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas e rochas do embasamento do Complexo Belo Horizonte. Os resultados evidenciam que os níveis de água subterrânea na área de estudo são influenciados por diversos fatores, tais como precipitação, evapotranspiração e atividades naturais e antrópicas, tais como a exploração de água subterrânea para abastecimento de indústrias, propriedades rurais e consumo humano. As superfícies potenciométricas das compartimentações hidrogeológicas existentes na área de estudo foram mapeadas, revelando que existem distintos fluxos de água subterrânea, os quais ocorrem predominantemente de oeste para leste na área de estudo. O estudo destaca a importância de monitorar os níveis de água subterrânea para subsidiar a gestão dos recursos hídricos na região e sugere a necessidade de pesquisas adicionais visando uma melhor compreensão dos fatores que afetam os níveis de água subterrânea e o desenvolvimento de estratégias para mitigar os impactos das atividades humanas sobre os recursos hídricos subterrâneos. A pesquisa fornece informações valiosas sobre o comportamento dos níveis de água subterrânea nas compartimentações hidrogeológicas da área de estudo, as quais podem ser empregadas para apoiar a gestão dos recursos hídricos na região.

Palavras Chaves: cárste; monitoramento de águas subterrâneas; hidrogeologia.

ABSTRACT

The presented dissertation aims to monitor the behavior of groundwater levels in the hydrogeological compartments of the Environmental Protection Area of Karst of Lagoa Santa region, which is of great environmental importance. The study area is located in several municipalities, including Vespasiano, Pedro Leopoldo, Confins, Lagoa Santa, Matozinhos, Funilândia, and Prudente de Morais, and covers the entire APA Lagoa Santa. The region has a complex network of underground conduits, structurally controlled, which are of great speleological interest. By installing 16 total pressure transducers and 5 barometric pressure transducers, this study monitored 16 inactive monitoring wells and assessed variations in groundwater levels with the purpose of comprehending the behavior of potentiometric surfaces within the hydrogeological compartments present in the area of interest. The monitoring spanned three hydrological years, from April 2018 to May 2021. Data surveys were conducted on a monthly basis, whenever feasible. The monitored wells are situated in carbonate rocks of the Sete Lagoas Formation and rocks from the basement of the Belo Horizonte Complex. The study monitored sixteen tubular wells and evaluated the variations in groundwater levels to understand the behavior of the potentiometric surfaces of the hydrogeological compartments. The results show that the groundwater levels in the study area are influenced by several factors, such as rainfall, evapotranspiration, and human activities. The potentiometric surfaces of the hydrogeological compartments were mapped, and it was observed that the groundwater flow direction is from the west to the east of the study area. The study highlights the importance of monitoring groundwater levels to support the management of water resources in the region and suggests the need for further research to better understand the factors that influence the groundwater levels and to develop strategies to mitigate the impacts of human activities on the groundwater resources. The study provides valuable information about the behavior of groundwater levels in the hydrogeological compartments of the study area, which can be used to support the management of water resources in the region.

Keywords: karst; groundwater monitoring; hydrogeology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo desta pesquisa, destacada pelo polígono em vermelho. O polígono amarelo é referente a localização da área definida para a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa. (Fonte: Autor)	16
Figura 2: Dado pluviométricos estação ANA Lagoa Santa Codigo: 1943049– período de 1991 a 2022.	18
Figura 3: Gráfico com o balanço hídrico médio mensal para a região, criado a partir do método proposto por NURMA (2003), com os dados da série histórica de 1991 a 2020 (estação Sete Lagoas).	19
Figura 4: Mapa hipsométrico com destaque para feições geomorfológicas como maciços calcários e depressões mapeadas na área de estudo. (Fonte: Autor)	21
Figura 5: À esquerda, é observada dolina (depressão) identificada na área de estudo enquanto, à direita, observa-se um maciço rochoso, também identificado na área de estudo. (Fonte: Fotos cedidas por Joana Souza).....	22
Figura 6: Mapa com a delimitação das principais bacias hidrográficas localizadas na área de estudo. (Fonte: Autor)	25
Figura 7: Mapa Geológico da Área de Estudo com destaque para a cessão esquemática composto para porção central da área interesse. Fonte: Adaptado de Ribeiro <i>et al.</i> (2003). ...	31
Figura 8: Comparação entre as unidades litoestratigráficas, as unidades hidrogeológicas clássicas, os compartimentos definidos por De Paula (2019) e as atualizações propostas por Dantas <i>et al</i> (2023). Fonte: Modificado de Dantas <i>et al</i> (2023).	35
Figura 9: Poços tubulares inoperantes selecionados para o monitoramento do nível d'água, totalizando 16 poços monitorados na Área de Estudo. (Fonte: Autor)	38
Figura 10: Instalação dos transdutores de pressão (loggers) em poços tubulares inoperantes. E medição de nível manualmente com o uso de medidor de nível analógico. (Fonte: Autor)	39
Figura 11: Gráfico gerado a partir dos dados de monitoramento para um dos poços tubulares monitorados (N10). Nota-se a elevada coerência entre os valores medidos manualmente e medidos de forma automatiza. (Fonte: Autor).....	41
Figura 12: Execução das atividades de perfilagem ótica em campo durante o desenvolvimento do estudo. (Fonte: acervo próprio).	41
Figura 13: Distribuição espacial dos 16 poços monitorados, dos quais três não foram perfilados. (Fonte: Autor).....	43

Figura 14: Exemplo de Perfil construtivo esquemático de poço instalado no compartimento aquífero cárstico com as informações obtidas durante as operações de perfilagem dos poços monitorados. (Fonte: Autor).....	44
Figura 15: Mapa de isolinhas preliminar gerado com a espacialização da média dos três anos de monitoramento da diferença entre carga hidráulica mínima e máxima medida nos poços monitorados. (Fonte: Autor).....	50
Figura 16: Demonstração da distribuição dos poços em relação ao mapa de Thiessen (1911) objetivando-se apresentar a influência das estações pluviométricas monitoradas na área de estudo. Modificado de De Paula(2019).	52
Figura 17: Mapa Geológico com a localização dos 16 poços monitorados em relação aos compartimentos aquíferos onde as estruturas foram construídas de acordo com a perfilagem ótica. (Fonte: Autor).	55
Figura 18: Representação esquemática fora de escala dos níveis de água mínimos e máximos monitorados em cada poço em relação a entrada de água superior identificada nessas estruturas. (Fonte: Autor).	58
Figura 19: Mapa com a localização dos poços tubulares monitorados no compartimento aquífero cárstico, com destaque para fotos retiradas durante o processo de perfilagem ótica. (Fonte: Autor).....	59
Figura 20: Séries históricas do monitoramento do nível de água subterrânea dos poços tubulares localizados no compartimento aquífero cárstico.....	63
Figura 21: Variação por ano hidrológico do nível de água subterrânea de cada poço no compartimento aquífero cárstico, em metros.	63
Figura 22: Mapa com a localização dos poços tubulares monitorados no compartimento aquífero cárstico-fissural, destaque para fotos obtidas durante o processo de perfilagem dos poços.....	65
Figura 23: Séries históricas do monitoramento do nível de água subterrânea dos poços tubulares localizados no compartimento aquífero cárstico-fissurais.....	68
Figura 24: Série histórica do monitoramento do nível de água subterrânea dos poços tubulares localizados no compartimento aquífero cárstico-fissurais.....	69
Figura 25: Variação por ano hidrológico do nível de água subterrânea de cada poço no compartimento aquífero cárstico-fissural, em metros	70

Figura 26: Mapa com a localização dos poços tubulares monitorados no compartimento aquífero fissural, com destaque para foto retirada do poço C-03-CP durante o processo de perfilagem do poço, único perfilado nesse compartimento aquífero.....	71
Figura 27: Séries histórica da variação do nível de água dos poços monitorados localizados no compartimento aquífero fissural.....	73
Figura 28: Variação por ano hidrológico do nível de água subterrânea de cada poço no compartimento aquífero fissural, em metros	74
Figura 29: Gráfico <i>boxplot</i> com destaque a distribuição das cotas de entrada de água variações do nível de água nos sistemas aquíferos monitorados.....	77
Figura 30: Resumo do tempo de necessário para se observar uma oscilação do nível de água em poços localizados no aquífero cárstico. (Fonte: Autor).....	78
Figura 31: Resumo do tempo de necessário para se observar uma oscilação do nível de água em poços localizados no aquífero cárstico fissural. (Fonte: Autor)	79
Figura 32: Resumo do tempo de necessário para se observar uma oscilação do nível de água em poços localizados no compartimento aquífero fissural. (Fonte: Autor)	80
Figura 33: Mapa de isolinhas com destaque para a distribuição espacial dos valores de acreção positivos medidos durante o período de monitoramento hidrogeológico.....	82
Figura 34: Mapa de isolinhas com destaque para a distribuição espacial dos valores da amplitude entre os níveis de água máximos e mínimos medidos durante o período de monitoramento hidrogeológico.....	84
Figura 35: Mapa de isolinhas com destaque para a distribuição espacial dos poços tubulares e vazões captadas na área do projeto.....	86
Figura 36: Mapa de isolinhas com destaque para a distribuição espacial dos somatórios de todas as variações de nível de água observadas durante o monitoramento hidrogeológico.....	87
Figura 37: Mapa de distribuição da condutividade hidráulica com destaque para a espacialização dos poços monitorados (Adaptado de De Paula, 2019).....	91
Figura 38: Modelo esquemático do sistema de recarga e circulação de água subterrânea nos compartimentos aquífero da área de estudo, com destaque para o processo de pressurização nesses compartimentos. Adaptado de Ribeiro (2019).	93
Figura 39: Mapa de potencialidade hídrica do compartimento cárstico-fissural inferior (Fonte: De Paula, 2019).	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros utilizados para a elaboração dos modelos lineares generalizados.	46
Tabela 2: Apresentação dos modelos estáticos elaborados para avaliação das séries históricas obtidas.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	17
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	17
3.1	Clima.....	17
3.2	Geomorfologia	19
3.3	Hidrografia.....	23
3.4	Geologia.....	26
3.4.1	Complexo Belo Horizonte	27
3.4.2	Formação Sete Lagoas.....	28
3.4.3	Formação Serra de Santa Helena.....	29
3.4.4	Coberturas Cenozoicas	30
3.5	Hidrogeologia	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	Monitoramento do Nível de Água Subterrânea	35
4.1.1	Automatização e medição de nível de água subterrânea	35
4.1.2	Perfilagem Ótica	41
4.2	Análise dos dados de monitoramento	45
4.2.1	Análises Estatísticas	45
4.2.2	Espacialização dos dados de monitoramento	49
4.3	Validação da Rede de Monitoramento.....	53
5	Resultados	53
5.1	Monitoramento do Nível de água Subterrânea	53
5.1.1	Perfilagem Ótica	54
5.1.2	Medição do Nível de Água Subterrânea.....	59
5.2	Análise dos dados de monitoramento	74
5.2.1	Análise Estatística	74
5.2.2	Espacialização dos dados de Monitoramento.....	81
5.3	Validação da Rede Monitoramento	88
6	Conclusões	96
7	Referências	98

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência à rápida evolução e desenvolvimento de centros urbanos, polos industriais e expansão agrícola na região ao entorno da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa (APACLS), há uma crescente pressão quanto à demanda hídrica para suprir os usos inerentes à essa expansão. Como forma de ordenar e compatibilizar o zoneamento ecológico-econômico, se fazem necessários o planejamento e a gestão aplicados ao monitoramento e disponibilidade hídrica da região.

Criada pelo Decreto Federal nº 98.881 de 25 de janeiro de 1990, a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa foi, inicialmente, atribuída a uma área de 330 km², porém, no ano de 1996, pelo decreto nº 1.876 de 25 de abril, houve um novo zoneamento dessa área de proteção ambiental, a qual passou a ter uma extensão de 377,36 km². Localizada 30km a norte da capital mineira, Belo Horizonte, a APACLS compreende parcialmente ou a totalidade de áreas dos municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Confins, Vespasiano, Capim Branco, São José da Lapa e Funilândia, no estado de Minas Gerais.

Além de garantir a conservação do conjunto paisagístico e da cultura regional, a unidade tem como objetivo proteger e preservar as cavernas e demais formações cársticas, sítios arqueológicos e paleontológicos e seus recursos hídricos naturais, cuja preservação é de fundamental importância para a região. Como destaque do valor arqueológico dessa região, destacam-se sítios com componentes da megafauna pleistocênica extinta e vestígios muito importantes da ocupação humana pré-histórica no Brasil, entre os quais, ossos de cerca de 12 mil anos descritos por Peter Lund como o “Homem de Lagoa Santa” (Berbert-Born, 1998). Ainda, nesse sentido, Charles Darwin mencionou a importância paleontológica da região em seu muito reconhecido livro nomeado de “*A Origem das Espécies*”.

Desta forma, entendendo-se a importância da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, foi destinado um investimento para pesquisa nessa área no ano 2015. Esse investimento originou-se devido a um acordo de Cooperação Técnica firmado entre a GERDAU AÇOMINAS e a Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP). Desse acordo surgiu o “Projeto de Adequação e Implantação de uma rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais” o qual foi executado pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e fiscalizado pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV). Ainda, durante o desenvolvimento das atividades realizadas no projeto supracitado, houve o apoio Companhia de Desenvolvimento de Recursos Naturais (CPRM) e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

Assim, para se conhecer a dinâmica das águas subterrâneas disponíveis, os fatores que controlam os volumes de água que entram (recarga) e os volumes de água que saem (descarga), avaliar o comportamento local da superfície potenciométrica na área do projeto e, desta forma, se propor a implementação de uma rede de monitoramento hidrogeológica capaz de auxiliar na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, desenvolveram-se diversos estudos na área de interesse. A produção científica do projeto desenvolvido na região da APACLS resultou inicialmente, no trabalho de caracterização geológica e geoquímica desenvolvido por Vieira (2015), enquanto Ribeiro *et al.* (2016) realizou levantamentos geológicos estruturais na área para compreender os fluxos de água subterrânea nas unidades cársticas da Formação Sete Lagoas. A geologia da região de entorno da Área de Proteção Ambiental Carte de Lagoa Santa foi mais bem detalhada nas quadrículas mapeadas nos trabalhos de graduação de Andrade & Amorim (2018) e Magalhães & Silva (2018). Amaral (2018) utilizou de ferramentas de geoprocessamento para verificar o dimensionamento e a orientação das depressões cársticas existente na área do projeto, enquanto Vieira (2018), Aragão (2019) e Ribeiro (2019) realizaram trabalhos para compreender as características hidroquímicas das águas subterrâneas nas rochas calcárias da área do projeto. Ainda, destaca-se o trabalho de Teodoro (2020), no qual se aplicaram técnicas de lançamento de traçadores corantes para se mapear as direções de fluxo de água subterrânea nas rochas da Formação Sete Lagoas, bem como os trabalhos de De Souza (2020) e Silva (2022), nos quais se utilizaram técnicas distintas para se quantificar a vulnerabilidade dos aquíferos localizados na região da APACLS. O modelo hidrogeológico do projeto foi apresentado por De Paula (2019), tese na qual propuseram-se os compartimentos hidrogeológicos conformados pelos sistemas aquíferos locais, tal modelo foi posteriormente refinado por Dantas *et al.* (2023), trabalho no qual foi construído um modelo numérico para a área de interesse.

Neste contexto, o gerenciamento de uma bacia hidrogeológica parte da junção de diversas informações qualitativas e quantitativas dos recursos hídricos provenientes deste meio. A região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa apresenta uma interação complexa no que se remete à dinâmica de fluxos de entrada e saída de água, onde as rochas carbonáticas exercem o controle da direção, volume e qualidade desses fluxos.

As rochas carbonáticas, exibidas na região de interesse fazem parte do Grupo Bambuí, e são correlacionadas à Formação Serra de Santa Helena, caracterizada por rochas pelíticas que estão sobrepostas à Formação Sete Lagoas, composta pelos membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, os quais, em suma, são separados de acordo com o teor calcita presente em

sua constituição. Enquanto o Membro Pedro Leopoldo é descrito como um calcário impuro, com presença de quartzo e sericita, o Membro Lagoa Santa tem um teor de calcita superior a 90% de sua constituição (Pessoa, 2005). Essas rochas carbonáticas estão sobrepostas ao embasamento local que é constituído por granito-gnaisses-migmatitos do Complexo Belo Horizonte. Observam-se, também, distribuídas em drenagens e planícies de inundação, coberturas aluvionares e detrito lateríticas terciárias e quaternárias.

As condições morfológicas e estruturais, aplicadas no contexto de terrenos cársticos, cársticos-fissurais e fissurais, são ditadas por processos naturais de dissolução e erosão de rochas carbonáticas como calcários e dolomitos por águas naturais (Kohler, 1989; Auler, 1994). A densidade, abertura, gênese e orientação das fraturas e falhas, foliações, bem como as estruturas sedimentares de acamamento controlam os caminhos da dissolução das rochas carbonáticas. A disponibilidade de CO₂ e a pureza da rocha são associadas à capacidade de dissolução desses carbonatos. Todavia, para o sistema aquífero composto por rochas do Complexo Belo Horizonte, a disposição, extensão e volume de discontinuidades controlam a dinâmica hídrica subterrânea, cuja circulação tem direção de oeste para leste e ocorre principalmente no contato com as formações geológicas sobrepostas ao embasamento e, nos primeiros 60 m de espessura dessa formação, onde é identificado um certo grau de fraturamento (De Paula, 2019). Assim, a caracterização desses tipos de sistemas aquíferos, implica no entendimento dessas condições peculiares de circulação das águas subterrâneas.

O presente trabalho tem seu escopo desenvolvido em uma área de estudo de 769,2 km², na qual a APACLS encontra-se completamente inserida, extrapolando sua extensão a oeste, noroeste e norte (Figura 1).

Ao todo foram monitorados 16 poços tubulares existentes na área de estudo, os quais conformam a rede de instrumentos estudada nesta pesquisa. As variações dos níveis de água subterrânea observadas nesses poços foram medidas e avaliadas, para que, assim, fosse possível se entender o comportamento das superfícies potenciométricas dos compartimentos hidrogeológicos onde esses instrumentos encontram-se instalados. Isto posto, são apresentados nesta dissertação métodos, resultados e conclusões acerca do monitoramento de nível de água subterrânea durante período de abril de 2018 a maio de 2021.

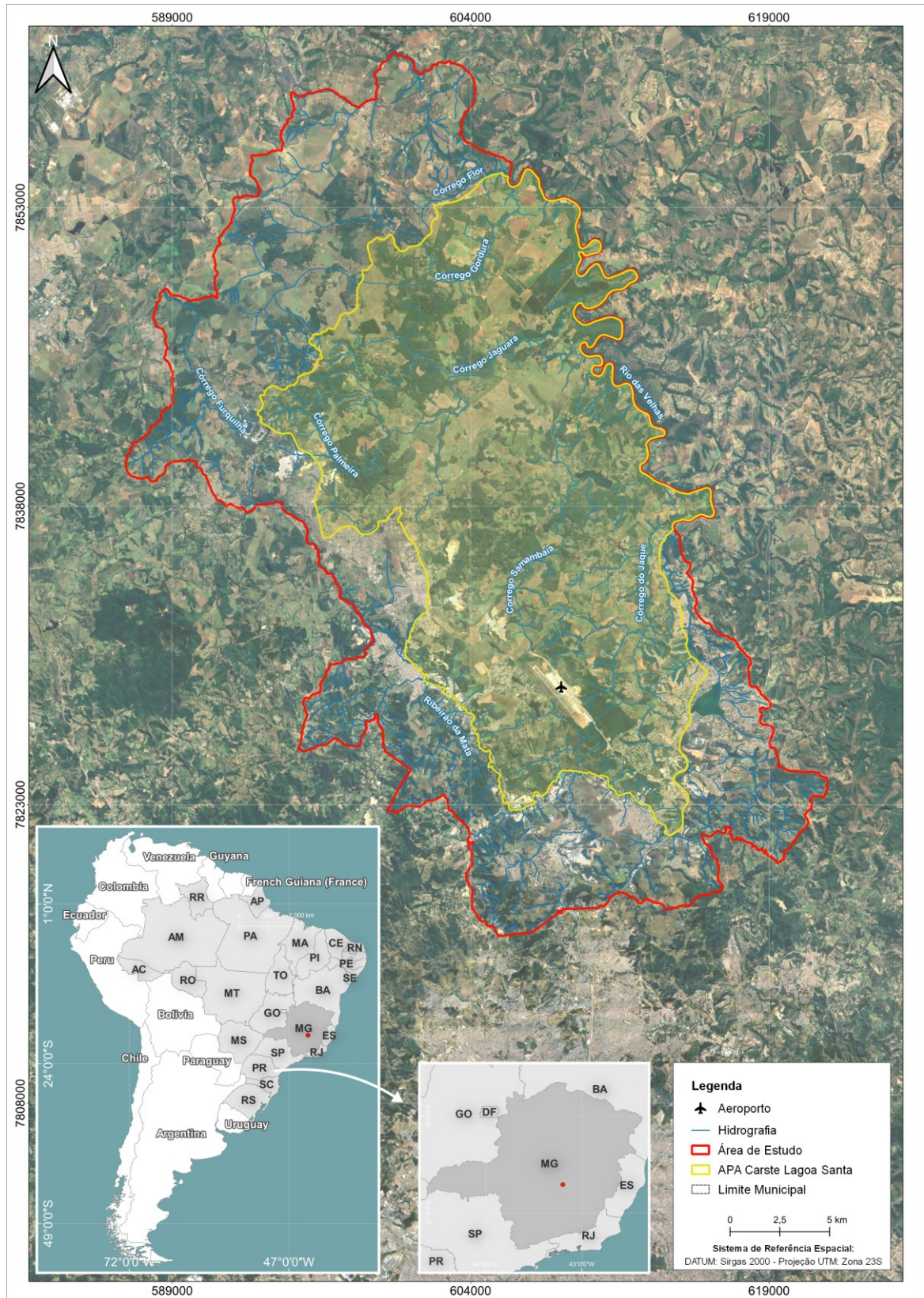


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo desta pesquisa, destacada pelo polígono em vermelho. O polígono amarelo é referente a localização da área definida para a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa. (Fonte: Autor)

2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O objetivo geral desta dissertação é:

Registro da variação do nível de água subterrâneo nos compartimentos hidrogeológicos cárstico, cárstico-fissural e fissura, com o intuito de se avaliar o comportamento sazonal da potenciometria de cada uma dessas unidades, evidenciando as principais diferenças entre elas.

Os dados gerados foram analisados e detalhados para atender aos objetivos específicos descritos abaixo:

- Observar os níveis de influência dos fatores geológico, hidrogeológico e pluviométrico na hidrodinâmica de cada tipo de aquífero;
- Detectar, espacialmente, potenciais regiões com interferências antrópicas; e
- Avaliar a rede de poços monitorada quanto à sua funcionalidade no monitoramento das unidades hidrogeológicas estudadas, considerando as informações produzidas na área desde o ano de 2018.

Este trabalho se justifica, pois, além de toda a riqueza, cultural, arqueológica, espeleológica da área de estudo, a produção hídrica dos aquíferos bem como sua disponibilidade podem ser determinadas seguindo um correto planejamento e gestão, que são subsidiadas a partir dos dados de monitoramento dos níveis freáticos. O monitoramento da água disponível em um aquífero possibilita diagnosticar o atual estado do aquífero, em relação a estados passados, para tomar as devidas medidas em relação às modificações causadas por efeitos naturais e/ou antrópicos. Assim, esta pesquisa poderá auxiliar na tomada de decisões na gestão dos recursos hídricos em zonas da área de estudo.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

3.1 *Clima*

Conforme a classificação Köppen-Geiger (Kottek *et al.*, 2006), a área de estudo se insere em uma zona de climas megatérmicos, onde sua classe é descrita pela sigla Aw. O “A” simboliza o clima geral da região, que nesse caso é tropical, e o “w” descreve as peculiaridades pluviométricas da região, que é a de possuir um inverno seco. A região é, portanto, descrita por um clima tropical de estação seca ou de Savana (Cardoso *et al.*, 2014)

Para análise do clima foram selecionados os dados da estação meteorológica e estação pluviométrica mais próximas da área de estudo, com, pelo menos, os dados de monitoramento

dos últimos 30 anos. Portanto, para análise das normais climatológicas da região, foram utilizadas as informações da estação INMET Sete Lagoas (código: 8670) e a pluviometria da estação ANA Lagoa Santa (Código: 1943049). A temperatura média, local, é igual ou ultrapassa os 22,1 °C (Normal Climatológica 1991-2020; estação INMET Sete Lagoas – código: 8670) ao longo do ano. As máximas são bem elevadas, atingindo até 29,1 °C, e as mínimas não ficam abaixo de 15 °C. O tempo mais seco, atribuído à estação fria, é gerado pela estabilidade criada pela influência do anticiclone subtropical do Atlântico Sul (Costa *et al.* 2016; Carpenedo & Ambrizzi, 2020). Já a espacialidade das chuvas, mais concentradas no verão, é condicionada pela Frente Polar e pelas Linhas de Instabilidade Tropical (Rodrigues & Castro, 2008). A precipitação média acumulada anual, que incide sobre a área de estudo, é de 1178,0 mm (Normal Climatológica 1991-2021; estação pluviométrica ANA Lagoa Santa Codigo: 1943049), sendo que, de novembro a março, ocorrem os maiores índices de chuvas, chegando ao pico de 265,0 mm em dezembro (Figura 2). Esses cinco meses somam 82% da precipitação anual da área, o que é associado a um período de recarga dos aquíferos e de maiores riscos geológicos como enchentes e deflagração de processos de dinâmica superficial. A região apresenta média de 88 dias chuvosos por ano, com pelo menos 5 dias de chuvas potencialmente torrenciais, com volumes diários acumulados acima de 50 mm/dia.

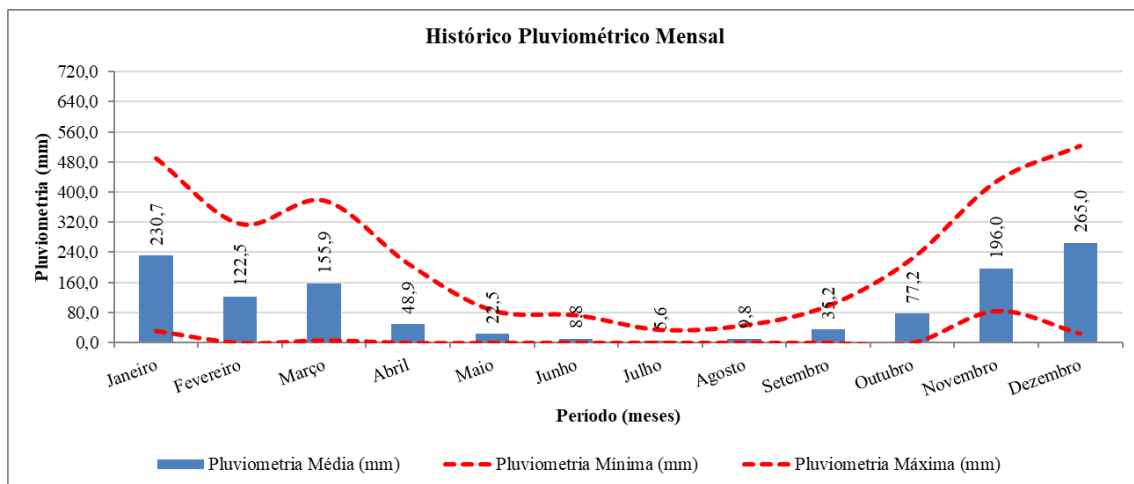


Figura 2: Dado pluviométricos estação ANA Lagoa Santa Codigo: 1943049– período de 1991 a 2022.

Com relação às taxas de insolação, essas são diretamente influenciadas pela precipitação, já que variam de acordo com a presença de nuvens. Apesar dos dias serem mais curtos no inverno, a insolação diária é maior, devido à baixa precipitação e consequente “céu limpo”.

A evapotranspiração está diretamente correlacionada a taxa de insolação e regime de chuvas. Nos meses de abril a outubro, a evapotranspiração supera a taxa de precipitação engendrando

um cenário de déficit hídrico. Na Figura 3, obtida por meio da normal climatológica (período de 1991 a 2020), é bem ilustrado esse cenário. O cálculo do balanço hídrico da região foi realizado pelo método proposto por Thornthwaite & Mather (1955), atualizado em uma planilha do Microsoft Excel elaborada Rolim *et al.* (1998) e disponibilizada pelo Núcleo de Monitoramento Agroclimático (NURMA) da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP) em 2003.

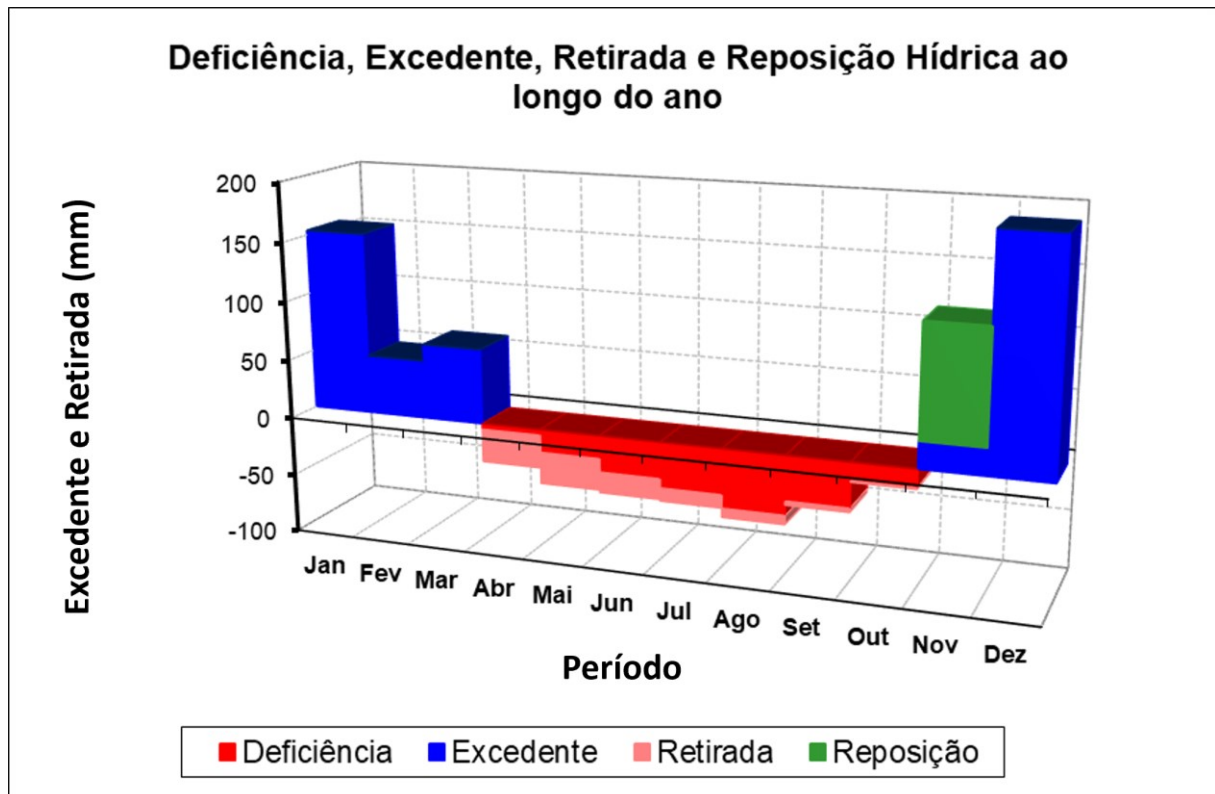


Figura 3: Gráfico com o balanço hídrico médio mensal para a região, criado a partir do método proposto por NURMA (2003), com os dados da série histórica de 1991 a 2020 (estação Sete Lagoas).

3.2 Geomorfologia

A região de estudo apresenta terrenos cársticos, desenhados sob uma superfície de relevos acidentados do tipo côncavo-convexo, com formas superficiais próprias que resultam da dissolução das rochas carbonáticas e da estruturação hidrográfica que exhibe importantes componentes subterrâneos. Essas feições particulares lhes são distintas tanto na superfície (exorcaste), quanto em profundidade, devido à existência de uma trama de condutos de proporções morfológicas variadas, compondo o denominado “endocarste” (Piló, 2000; Berbert-Born, 2002). Além dessas duas feições, conforme Piló (1998; 2000), existe um terceiro

domínio descrito pela interface rocha-solo, chamado de “epicarste”, que é, em especial, relevante na configuração da paisagem de Lagoa Santa.

Pode-se, portanto, dizer que a geomorfologia de interesse para o presente estudo reflete uma estratigrafia marcada pela sucessão de duas unidades (discutidas no item 3.4): formação Sete Lagoas, composta por rochas carbonáticas (Compartimento Cárstico e Cárstico-Fissural); e, Formação Serra de Santa Helena, constituída por rochas siliciclásticas muito finas (Compartimento não Cárstico). Além disso, não menos importante, as coberturas detrito-lateríticas elúvio-coluvionares do cenozoico promovem papel na estruturação do relevo cárstico como superfícies residuais, posteriores aos estágios de aplainamento (Berbert-Born, 2002).

O compartimento não cárstico, normalmente se localiza em cotas acima de 800 m, sendo caracterizado por colinas com topos alongados e convexos entalhados por um padrão de drenagem dendrítico (Meneses, 2003). Esse relevo, esculpido sob as rochas metapelíticas, da Formação Serra de Santa Helena, raramente apresenta feições típicas de carste, como dolinas, uvalas, paredões e vertentes com rugosidades, o que atesta o desenvolvimento da carstificação em profundidade (Herrmann *et al.*, 1998).

Já o compartimento cárstico, situa-se na área central, entre as cotas de 650 m e 850 m, onde observam-se mudanças hipsométricas bruscas (Figura 4), consequência do desenvolvimento de feições cársticas, exocársticas e endocársticas, que, na maior parte das vezes, estão intimamente ligadas entre si. Nessa unidade são observados desfiladeiros e abismos com altos paredões e grandes maciços rochosos, uma elevada concentração de cavernas, dolinas, uvalas, colinas convexas, vales fechados, depressões largas de fundo aplainado (poljés), depressões formadas por dissolução e ou por colapso, com formas amebóides, côncavas (tigela), cônicas (funil), cilíndricas (caldeirão) grandes ou pequenas, podendo apresentar água perene ou intermitente ou mesmo podem estar secas (Kohler, 1989; Ribeiro *et al.*, 2003).

Muitas das estruturas mencionadas seguem padrões geológicos, como sistemas de fraturas ou falhas, o que aponta para um influente controle estrutural no processo de formação do carste. Por exemplo, Amaral (2018) observou que o desenvolvimento e a ampliação das depressões cársticas coincidem com as direções das estruturas de deformação geradas em eventos geotectônicos, principalmente nas direções NE e NW.

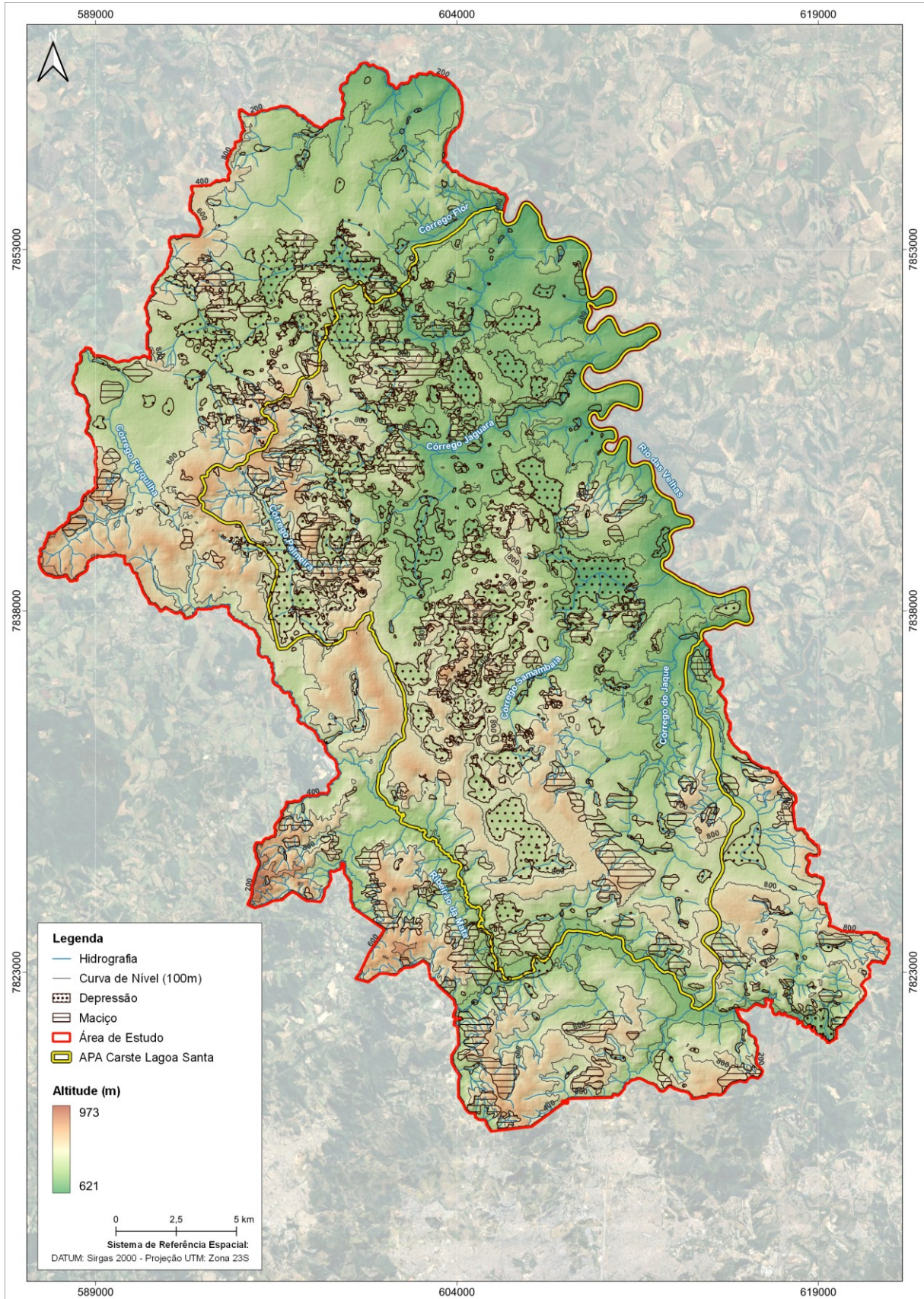


Figura 4: Mapa hipsométrico com destaque para feições geomorfológicas como maciços calcários e depressões mapeadas na área de estudo. (Fonte: Autor)

Auler (1994) divide os domínios cársticos (Compartimentos Cársticos) entre Planaltos cársticos, Depressão Mocambeiro e Superfícies cársticas encobertas. Os planaltos ocorrem na topografia cárstica mais desenvolvida da região, ocupando a área central e noroeste, com cotas que variam de 700 a 860 m. É um domínio bastante permeável com desenvolvimento de feições cársticas tropicais e drenagens subterrâneas. A Depressão Mocambeiro é descrita pelo relevo dissecado que ocupa a região norte, com altitudes inferiores a 700 m e marcada por uma feição fluvio-cárstica com a presença de nascentes, rios e lagos. Já o último, estende-se em uma faixa de largura variável de noroeste a sudeste e apresenta feições cársticas pouco evidentes devido ao espesso manto de intemperismo que as recobre.

O mesmo autor, cita, ainda, outras três formas de relevo para o compartimento não cárstico: Superfícies filíticas; Planícies fluviais; e, Domínio ígneo metamórfico. As Superfícies filíticas ocorrem de forma mais expressiva a sudeste da área e são formadas em áreas de relevo suave e cotas superiores a 800 m. As planícies fluviais representam o domínio dos rios da região. Por fim, o Domínio ígneo metamórfico ocorre em uma pequena porção a sul, sendo descrito por formas arredondadas com diques de rochas básicas associados.

Amaral (2018), em seu estudo morfométrico, dividiu o compartimento cárstico em depressões cársticas e maciços calcários rochosos (Figura 5). No total, na área de estudo, foram mapeadas 467 depressões, das quais, 84% possuíam área menor que 147 m² e 60% apresentavam profundidade entre 3,0 e 12,9 m. Além disso, a grande maioria possuía declividade de até 10°, em seu interior.



Figura 5: À esquerda, é observada dolina (depressão) identificada na área de estudo enquanto, à direita, observa-se um maciço rochoso, também identificado na área de estudo. (Fonte: Fotos cedidas por Joana Souza)

Recobrando boa parte desse relevo, são encontrados 4 tipos de solo: Argissolos Vermelhos; Cambissolos háplicos; Gleissolos Háplicos; e, Latossolos Vermelhos. Conforme Shinzato (1998) e Meneses (2003), os solos regionais são profundos e o principal tipo é o Latossolo. Subordinadamente, ocorrem os Cambissolos que, apesar de comumente apresentar características distintas dos Latossolos, na área de estudo apresentam uma relação intrínseca com essa outra classe (Souza & Sampaio, 2021).

3.3 Hidrografia

Na esfera regional, a rede hidrográfica da área de estudo está situada na porção central da bacia do rio das Velhas, que, embora sob jurisdição estadual, é parte integrante da bacia do rio São Francisco, com relevância de âmbito federal, abrangendo seis estados brasileiros (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2021). Descrita por sistemas, tanto exorréico quanto criptorréico, a área de estudo localiza-se na depressão do Alto-Médio rio São Francisco, integrando a sub-bacia do rio das Velhas (IBGE, 2006).

O rio das Velhas nasce a aproximadamente 1.300 m de altitude, no Parque Natural Municipal das Andorinhas – município de Ouro Preto (MG). Sua extensão é de cerca de 700 km até sua foz, onde desagua no rio São Francisco e constitui um de seus principais tributários. Constituindo um dos principais afluentes do rio das Velhas, por sua vez, cita-se o ribeirão da Mata, que nasce a leste da área de estudo e segue na zona limítrofe à essa (Figura 6).

Localmente, o rio das Velhas desempenha o papel de nível base predominante, recebendo a maior parte do escoamento de diversas drenagens, como o Ribeirão da Mata. A região de estudo é caracterizada pela identificação de 10 sub-bacias (Figura 6), cujos principais cursos d'água incluem os córregos do Retiro, Jaque, Bom Jesus, Samambaia, Palmeiras e Jaguará, Furquilha, Escrivânia e Gordura, Flor e Ribeirão da Mata. Essas sub-bacias correspondem a compartimentos hidrogeológicos já definidos e retificados em estudos anteriores no contexto da APACLS (Velásquez *et al.*, 2018; De Paula, 2019; e Teodoro *et al.*, 2019).

A hidrografia da área de estudo apresenta uma combinação de elementos fluviais e cársticos (Berbert-Born, 2002). É importante notar que nas regiões onde o calcário aflora, observa-se uma menor densidade de redes de drenagem de superfície devido à presença de elementos como dolinas, depressões cársticas e cavernas, que frequentemente direcionam o

fluxo de água para o ambiente subterrâneo (Ribeiro *et al.*, 2016; e, Teodoro *et al.*, 2019). Além disso, a área é caracterizada por uma abundância de lagoas cársticas perenes e intermitentes, formadas devido à presença de emergências e ressurgências de alto volume. Em ambientes cársticos, é comum que os cursos d'água de superfície não estejam diretamente conectados aos sistemas de drenagem subterrânea (Palmer, 1991).

O padrão criptorréico, encontrado na área de estudo, ocorre em função das características cársticas existentes. Segundo Guerra (1993), esses sistemas de drenagens subterrâneos, por fim, surgem em fontes/nascentes ou, então, integram-se a rios subaéreos. Os fluxos de água subterrânea e superficial, na área do projeto, se emaranham, caracterizando um terreno fluviocárstico. Por vezes, as drenagens aéreas são interrompidas por formações cársticas, engendrando desvios do escoamento superficial para o subterrâneo (Darnault, 2008). Além disso, ocorrem várias lagoas na região, geralmente, intermitentes, associadas a esse sistema.

Não incomum, vários dos principais cursos d'água encontrados na área, são oriundos de surgências em afloramentos de calcário, podendo, também, drenar para condutos subaéreos, ressurgindo a jusante (Souza, 2020). Conforme Viana *et al.*, 1998, grande porção das águas pluviais que atingem as dolinas e sumidouros da área são captadas e transportadas por esses condutos, de forma não muito bem conhecida, até aflorarem novamente.

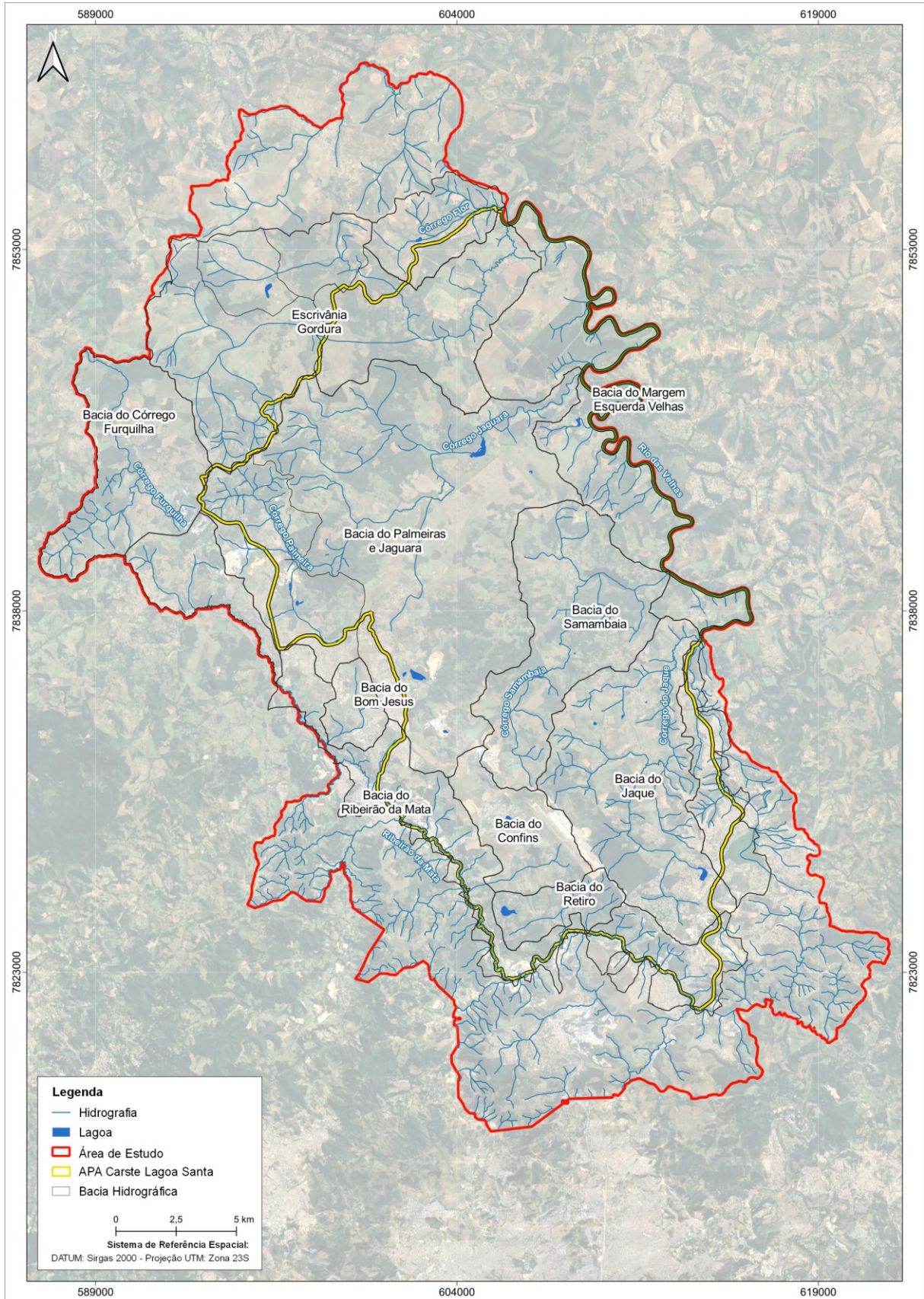


Figura 6: Mapa com a delimitação das principais bacias hidrográficas localizadas na área de estudo. (Fonte: Autor)

3.4 Geologia

A área de estudo encontra-se no contexto da Bacia do São Francisco, mais especificamente na porção sul do Cráton homônimo. O cráton São Francisco (CSF) foi definido por Almeida (1977) como uma porção da plataforma Sul-Americana, consolidada como segmento litosférico no arqueano e moldada pela orogênese Brasileira (650-450 Ma). Alkmim & Martins-Neto (2001) consideram a Bacia do São Francisco como a porção sul do cráton homônimo, que atuou como bacia em pelo menos quatro estágios distintos no tempo posterior a 1,8 Ga.

A Bacia do São Francisco, de embasamento arqueano, tem como principais unidades de preenchimento os Supergrupos Espinhaço e São Francisco, de idades, respectivamente, Paleo/Mesoproterozóica e Neoproterozóica. Essa megaestrutura comportou-se de forma estável à sedimentação, o que possibilitou o seu recobrimento por, principalmente, material carbonático argilo-arenoso (Ribeiro *et al.* 2003; Tuller *et al.* 2010). O Supergrupo São Francisco, de interesse para o presente estudo, é representado, localmente, pelo Grupo Bambuí, com foco nos componentes da Formação Sete Lagoas e Formação Serra de Santa Helena oriundos da carbonática, os quais encontram-se sobrepostos às rochas do Complexo Belo Horizonte.

Esse complexo granito-gnáissico-migmatítico indiferenciado serviu de base para a deposição das supracrustais e, conseqüentemente, para a formação da bacia do Grupo Bambuí. As feições cársticas foram desenvolvidas em litótipos neoproterozóicos do Grupo Bambuí, componentes da Formação Sete Lagoas, aflorantes no extremo sudeste da extensa bacia sedimentar pré-cambriana do Bambuí (Berbet-Born, 2002).

O Grupo Bambuí é descrito por um pacote litológico, de rochas carbonáticas, de sedimentação química, alternadas com terrígenos. Além disso, a sedimentação do Grupo Bambuí ocorre normalmente sobre uma crosta continental orientada na direção N-S, por falhas antigas do escudo cristalino (Viana *et al.*, 1998). O movimento tectônico que afetou esse grupo geológico desenvolveu famílias de fraturas variadas no pacote pelítico-carbonático. Essa deformação, ao que tudo indica, está relacionada com os esforços compressivos advindos das faixas orogênicas externas ao CSF – Faixa Brasília, a oeste, e a Faixa Araçuaí, a leste (Silva, 1986 apud Cabral, 1994). Dessa forma, pode-se dizer que as rochas do Grupo Bambuí funcionaram como um anteparo rígido, que assimilou os esforços

compressivos refletidos em dobramentos acentuados encontrados próximos às bordas e que diminuem ou desaparecem para o interior da bacia (Souza, 2020).

A estratigrafia do Grupo Bambuí, considerada no presente trabalho, e atribuída para a formação Sete Lagoas, é aquela definida por Schöll (1976) e ampliada por Tuller *et al.* (1991) com o reconhecimento de sete fácies deposicionais compondo os dois membros carbonáticos da formação, a saber: membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa. Em suma, conforme descrito por Viana *et al.* (1998) tais membros correspondem a calcissiltito e/ou microespatitos/espatitos, micritas, subordinadamente calcarenitos muito finos e margas (Membro Pedro Leopoldo) e calcarenito, espatitos e calcilutitos subordinados (Membro Lagoa Santa). As características desses metassedimentos sugerem a existência de um mar epicontinental raso à época de suas deposições, cobrindo o paleorelevo, constituído pelas rochas granito-gnáissicas-migmatíticas (Cabral, 1994). Sobrepostas as rochas da Formação Sete Lagoas encontram-se os pelitos da Formação Serra de Santa Helena. A estratigrafia da área de estudo será melhor descrita nos itens a seguir.

3.4.1 COMPLEXO BELO HORIZONTE

As rochas do embasamento, conforme descrito por Ribeiro *et al.* (2003), apresentam grande diversidade, contudo, são essencialmente granito-gnáissicas e migmatíticas, com contados, comumente, transicionais. Normalmente, leucocráticos, os litotipos do embasamento apresentam granulação média a grossa, não sendo incomum a presença de minerais estirados e orientados, como biotita e anfibólio, *shear bands* e *boudins*. O metamorfismo, retratado pela migmatização, é de fácies anfíbolito e a foliação é preferencialmente de baixo ângulo (Viana *et al.*, 1998; Ribeiro *et al.*, 2003). Entretanto, a paragênese definida pelo retrometamorfismo, caracterizado pela saussuritização, sericitização, uralitização e cloritização, é típica de fácies xisto verde, em que, apresentam-se bandas muito dobradas, veios de quartzo-feldspáticos e pegmatóides, além de presença de fraturas preenchidas por calcita e epidoto (Vieira *et al.*, 2018).

A idade atribuída a essas rochas gnáissicas apesar da divergência entre autores, são admitidas como arqueana. As determinações de idades para as rochas desse complexo indicam de 2000 a 500 M.a., segundo Hasui & Almeida (1970), Cordani & Hasui (1975) e Hasui *et al.* (1980). Outros autores como Danni & Fuck (1979), Teixeira & Danni (1979),

Marini et al. (1979), Berbert (1980) e Danni et al. (1982) admitem uma idade arqueana para a maior parte da região recoberta por essas rochas.

3.4.2 FORMAÇÃO SETE LAGOAS

A sequência carbonática da Formação Sete Lagoas é composta, na base, pelo Membro Pedro Leopoldo, constituído por calcários chamados “impuros” ou silicosos onde predominam calcissiltitos e calcilutitos finamente laminados com frequentes intercalações argilosas terrígenas delgadas (Tuller *et al.* 1991). Esse membro pode atingir até 80 m de espessura (Campos, 1994; Tuller *et al.*, 1991), cujo teor de carbonato de cálcio apresenta-se abaixo de 90%, podendo chegar a 60% (Campos, 1994; Piló, 1998).

Durante a deposição da Formação Sete Lagoas, um mar epicontinental cobria vastas áreas continentais, sendo extremamente raso e com declives suaves. Isso resultou na restrição da circulação da água e na conseqüente hipersalinização, conforme indicado por Patrus (1998).

Essa formação geológica é subdividida em dois membros, o Membro Pedro Leopoldo na base e o Membro Lagoa Santa (Figura 7) no topo (Patrus, 1998 e Ribeiro *et al.*, 2003). No Membro Pedro Leopoldo, devido à limitada circulação de água em várias partes da bacia, a hipersalinidade levou à precipitação de calcário de qualidade inferior, de textura fina e coloração clara. Por outro lado, o Membro Lagoa Santa é caracterizado pela deposição de calcários mais puros, de textura grosseira e coloração escura, durante um ciclo regressivo, à medida que o nível do mar recuava (Cabral, 1994)

O Membro Pedro Leopoldo se encontra tipicamente em contato abrupto e discordante com as rochas do embasamento, devido a falhas de descolamento. Esta unidade é composta por metacalcários calcíticos cristalinos de granulação variando de muito fina a média, com impurezas e recristalização parcial a completa. A presença de lâminas filossilicáticas ricas em sericita e clorita, concordantes com os estratos e a foliação, contribui para a impureza dessa unidade (Ribeiro *et al.*, 2003 e Ribeiro *et al.* 2016). Sua composição principal consiste em calcita, sericita e quartzo, com a presença subordinada de sulfetos disseminados, conforme relatado por Vieira (2018). O teor de carbonato de cálcio na unidade, de acordo com Campos (1994), geralmente está abaixo de 90%, podendo atingir 60%, enquanto a espessura da

unidade pode chegar a 80 m. Além disso, a presença de MgO nos metacalcários, especialmente nesse membro basal, ocorre sob a forma de clorita e, em menor proporção, talco (Ribeiro *et al.* 2003).

O Membro Lagoa Santa possui maior representatividade aflorante e sobrepõe-se, comumente, sobre o Membro Pedro Leopoldo por meio de falha de descolamento abrupta. Tal membro é encontrado variavelmente deformado com baixo grau de metamorfismo, onde predominam estruturas sub-horizontais, podendo alcançar até 200 m de espessura. Com teor de CaCO₃ superior a 94%, essa é a unidade mais sujeita à carstificação (Tuller *et al.* 1991). Conforme Tuller *et al.*, 1991 e Viana *et al.* 1998, acima dessa formação, ocorrem os siltitos e argilitos da Formação Serra de Santa Helena, geralmente em contato tectônico (falha de descolamento basal).

A transição da sequência, preteritamente descrita, para a sequência pelítica da Formação Serra de Santa Helena, pode ocorrer, além de discordante, também, de forma transicional com presença de camadas margosas intermediárias a ambas (Campos, 1994). Essa formação ocorre tipicamente na serra homônima, em Sete Lagoas. Apresenta-se por meio de uma grande mancha, que recobre de forma contínua a formação sotoposta. Predominam, nessa formação, litotipos de origem siliciclástica, predominantemente muito finos, correspondentes a siltitos e argilitos e, mais raramente, carbonatitos (Viana *et al.* 1998 e Ribeiro *et al.* 2003).

3.4.3 FORMAÇÃO SERRA DE SANTA HELENA

A Formação Serra de Santa Helena é principalmente composta por folhelho siltico, com uma presença menor de calcário, que se manifesta sob a forma de lentes de margas e calcarenitos muito finos. De acordo com Berbert-Born *et al.* (2002) e Ribeiro *et al.* (2016), essa formação apresenta contato com a sequência carbonática inferior de forma transitória, incluindo camadas margosas intermediárias ou conexões discordantes. O folhelho é frequentemente referido como ardósia, devido à sua fissilidade, que resulta em placas uniformemente espessas. Essa formação é caracterizada por sedimentos epicontinentais depositados em um ambiente marinho sublitorâneo relativamente profundo, caracterizado por condições redutoras e baixa energia. Isso levou à formação de estratos plano-paralelos, uma característica distintiva dos seus metapelitos e metargilitos, que foram depositados durante

um ciclo transgressivo sobre os sedimentos que deram origem à Formação Sete Lagoas (Viana; Kohler; Tavares, 1998)

3.4.4 COBERTURAS CENOZOICAS

Na área, além do supracitado, há a ocorrência de coberturas recentes, do terciário e quaternário. Essas se dividem em duas tipologias: coberturas detrítico-lateríticas e depósitos aluvionares. São oriundas de processos erosivos de rochas mais antigas e constituídas por cascalhos finos, areias, materiais silto-argilosos e porções limonitizadas (Ribeiro *et al.*, 2003)

Com relação aos depósitos aluvionares, o mesmo autor divide essa unidade em aluviões recentes e terraços aluviais. São depósitos relacionados às drenagens atuais, porém, os mais antigos apresentam níveis distintos, situando-se abaixo dos depósitos aluviais recentes e encontrados nos arredores do Rio das Velhas. Esses depósitos são constituídos por cascalhos, areias, argilas e siltes. O mapa geológico da área de estudo pode ser observado na Figura 7.

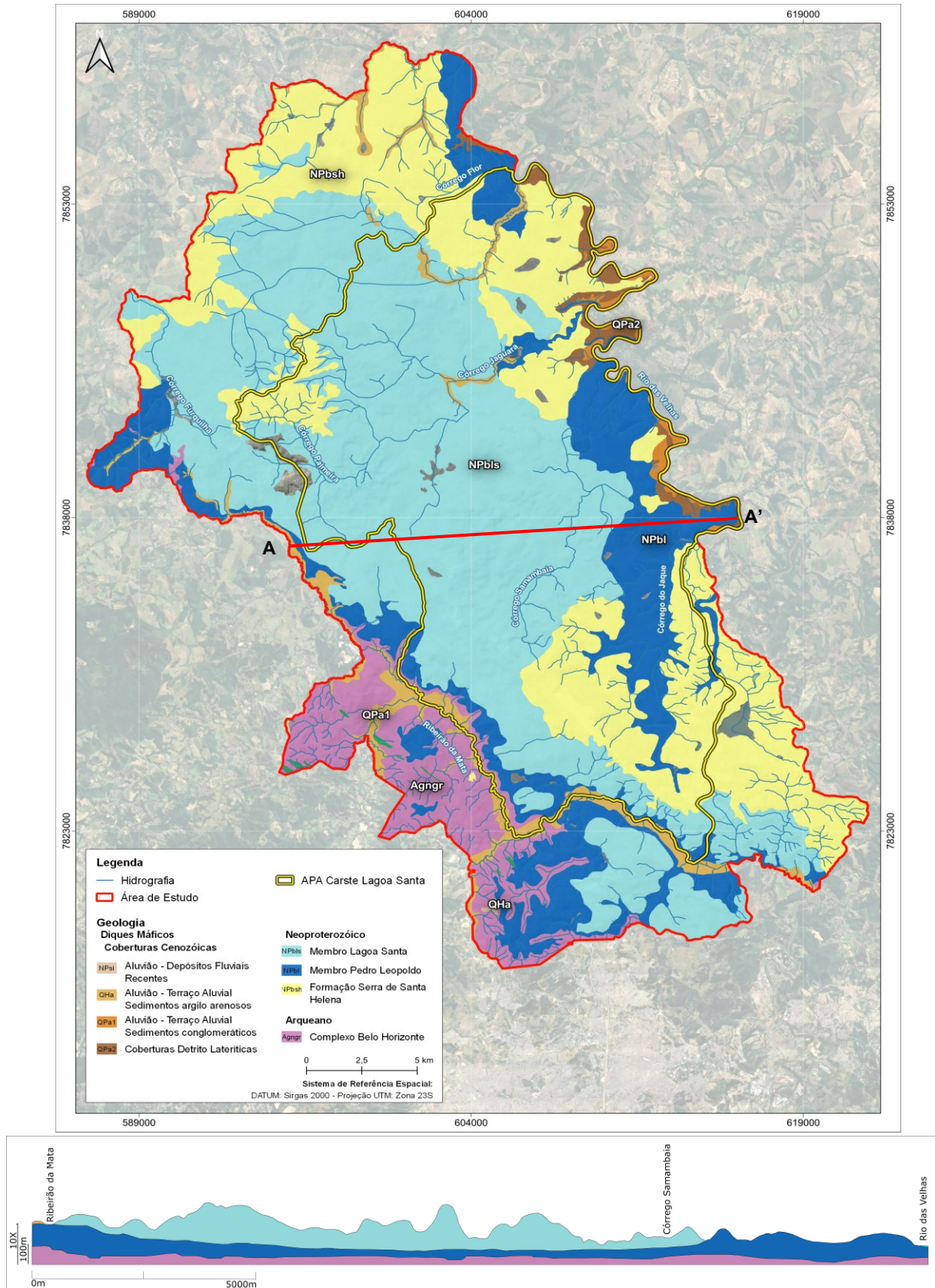


Figura 7: Mapa Geológico da Área de Estudo com destaque para a cessão esquemática composta para porção central da área interesse. Exagero vertical de 10 x. Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.* (2003).

3.5 Hidrogeologia

Como mencionado no item de geologia, a área de pesquisa está situada na Bacia do São Francisco, particularmente na porção meridional do Cráton São Francisco. Caracterizada por sua alta complexidade hidrogeológica, essa região apresenta uma variedade de aquíferos, incluindo os sedimentares, fraturados e cársticos, condição associada, também, à complexa geologia da área.

Na escala local, que abrange o escopo deste estudo, encontram-se distintas unidades aquíferas que desempenham um papel fundamental na compreensão da hidrogeologia da região. Dentre essas unidades, destacam-se: Aquífero Fissural; Aquífero Cárstico-Fissural; Aquífero Granular e Aquitardo pelítico.

O aquífero pelítico é caracterizado por sua natureza argilosa e sua associação com os pelitos da Formação da Serra de Santa Helena. Esse aquífero apresenta baixa permeabilidade e porosidade de fraturas pouco desenvolvidas.

Outra unidade descrita é o Aquífero Granular das coberturas, formado por depósitos recentes não consolidados que exibem alta permeabilidade (Shinzato, 1998). Esses depósitos desempenham um papel crucial como zona de recarga para os compartimentos aquíferos subjacentes (De Paula, 2019).

No contexto hidrogeológico da área de estudo, destaca-se o Aquífero Cárstico-Fissural como a principal unidade aquífera, atribuído aos membros da Formação Sete Lagoas em que o Membro Lagoa Santa se distingue por seu maior potencial hídrico em comparação com o Membro Pedro Leopoldo, conforme observado por Pessoa & Mourão (1998). O processo de dissolução e alargamento das fraturas ocorrem principalmente nas interseções entre o acamamento N-S e a foliação com orientação O-E, o que faz com que os condutos e porções dissolvidas tenham uma orientação também O-E (De Paula, 2019; Ribeiro *et al*, 2019).

Por fim, a região também abriga o Aquífero Fissural, uma unidade de baixo potencial hidrogeológico, conforme indicado por De Paula (2019). Este aquífero, alocado no embasamento cristalino, é caracterizado por uma produtividade primária reduzida ou inexistente, com porosidade secundária relacionada à presença de descontinuidades.

De interesse para o presente estudo, o Aquífero Fissural-Cárstico (correlacionado à unidade geológica da Formação Sete Lagoas), foi dividido em dois compartimentos por De Paula (2019): Compartimento Aquífero Cárstico e Compartimento Aquífero Cárstico-Fissural. O compartimento superior, denominado Cárstico, apresenta maior carstificação e possui uma capacidade específica média de $5,9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, condutividade hidráulica de 10^{-3} m/s e uma espessura estimada de 78 m, delimitado entre as altitudes de 638 m e 716 m. Já o compartimento inferior, cárstico-fissural, foi caracterizado com uma capacidade específica de $2,6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, condutividade hidráulica de 10^{-7} m/s e uma espessura estimada de 122 m, delimitado a 638 m de altitude.

Ainda, neste contexto, De Paula (2019) compartimentalizou os sistemas aquíferos da área de interesse com base na vazão, resultando em três níveis de potencial hídrico. A primeira categoria inclui áreas com alto potencial hídrico ($S > 5,0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), abrangendo partes das bacias do Palmeiras, Jaguará, Samambaia e bacias adjacentes, caracterizadas por sistemas cársticos bem desenvolvidos e feições geomorfológicas como cavernas, dolinas e dutos de dissolução. A segunda categoria engloba áreas de potencial hídrico intermediário ($1,0 < S < 5,0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), que predominam na maior parte da região de estudo e circundam áreas de alto e baixo potencial, refletindo variações locais. A terceira categoria corresponde às áreas com baixo potencial hídrico ($S < 1,0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), identificadas no nordeste e na parte alta da bacia do Jaque, relacionadas a metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, e na parte alta da bacia do Ribeirão da Mata, associadas a granitos do complexo Belo Horizonte e à menor espessura dos calcários depositados nessa região.

De acordo com De Paula (2019), o compartimento cárstico é marcado pela alta produtividade dos poços tubulares que atravessam esse compartimento, abastadas nascentes e feições geomorfológicas características de um carste bem evoluído, ainda, observados valores significativos de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, principalmente, quando nas porções do membro.

Com relação ao compartimento aquífero cárstico, superior, o autor ainda delimitou essa unidade pelos altos hidrográficos e pelos resultados, obtidos por Teodoro *et. al.* (2019), das conexões hidráulicas comprovadas mediante ensaios com injeção de traçadores corantes. Dessa forma, dividiram-se quatro regiões distintas: Norte, formado pelas bacias Escrivania-Gordura e pela bacia do córrego Flor; Central, formado pelas bacias do Palmeiras-Jaguará e bacia do córrego Samambaia; Sudoeste, constituída pelas bacias de Confins, Retiro e do

córrego Jaque; e, Bacias marginais, a leste representada pela bacia da margem esquerda do Rio das Velhas e a oeste pela bacia da margem esquerda do Ribeirão da Mata.

Em 2023, Dantas *et al.* refinou a compartimentação apresentada no modelo hidrogeológico de De Paula (2019), o que resultou em uma nova compartimentalização horizontal do aquífero cárstico e na compartimentalização vertical dos aquíferos cárstico-fissurais e fissurais compostos pelos carbonatos da Formação Sete Lagoas e pelas unidades migmatíticas-graníticas-gnaisses do embasamento cristalino. A ideia desse estudo foi demonstrar de forma empírica que o comportamento hidrogeológico não está restrito às unidades litoestratigráficas, mas que pode variar dentro de uma mesma unidade litológica ou desenvolver características intrínsecas à combinação de duas litologias distintas.

Já a compartimentalização vertical dos aquíferos cárstico-fissurais e fissurais, proposta (Dantas *et al.*, 2023) foi conduzida de forma a aprimorar as estratificações previamente estabelecidas por outros pesquisadores, levando em consideração a variação hipsométrica da área de estudo e a espessura do solo e do material transportado.

Conforme Dantas *et al.* (2023), a cobertura superior funciona como aquífero granular nas partes mais grosseiras dos sedimentos não consolidados e depósitos aluviais; já os pelitos da Formação Serra de Santa Helena atuam como um aquífero. O aquífero cárstico dos carbonatos possui uma zona mais carstificada nos primeiros 30 m de profundidade, onde o próprio aquífero cárstico se encontra e onde presume-se que a maioria das cavidades, condutos e poços mais produtivos estejam localizados. Abaixo dessa profundidade, encontra-se o aquífero cárstico-fissural, com cavidades menores e menos frequentes e menos descontinuidades produtivas.

Por fim, ainda conforme os autores em tela, o domínio do granito-gnaisse-migmatito apresenta comportamentos hidrogeológicos distintos, consistindo em uma zona de transição nas áreas de contato profundo com a Formação Sete Lagoas e um aquífero fissural nos primeiros 60 m de profundidade, onde as entradas de água e a produtividade dos poços estão associadas à presença de descontinuidades. Abaixo dessa profundidade, há a "base impermeável" do sistema, onde praticamente não há mais entradas de água nos poços, sendo classificada como um aquífero. Assim, para se facilitar a compreensão da evolução da compartimentação hidrogeológica da área de estudo, é ilustrado na Figura 8 a proposta de De Paula (2019) e as atualizações propostas por Dantas *et al.* (2023).

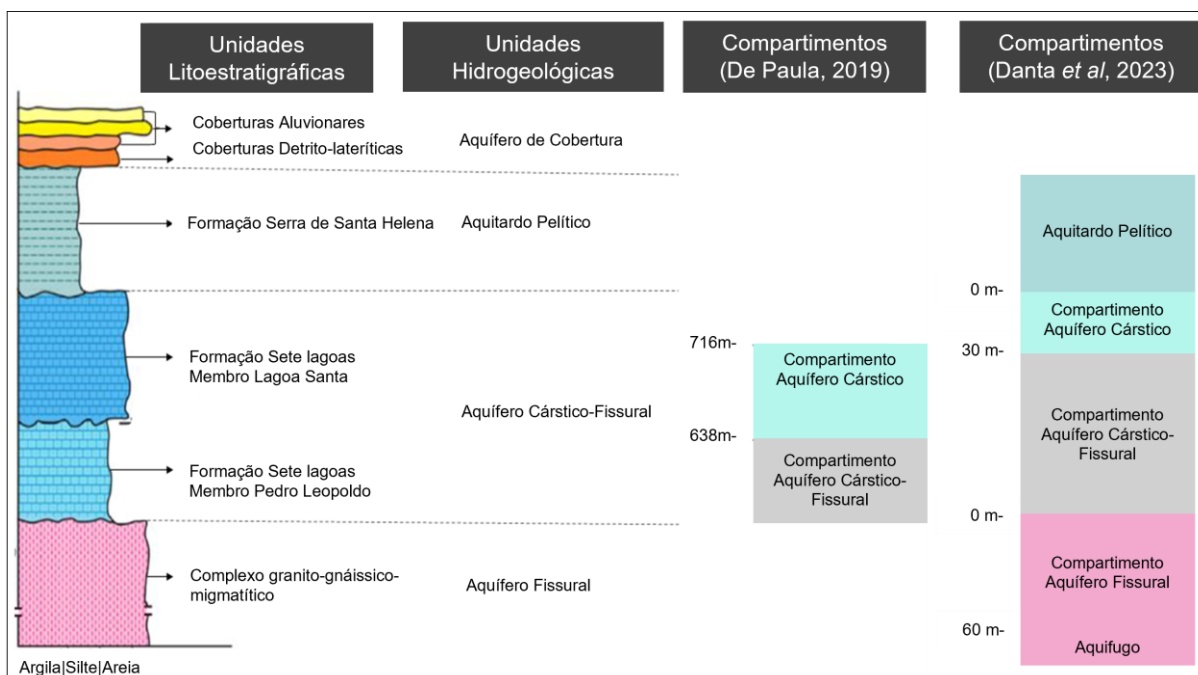


Figura 8: Comparação entre as unidades litoestratigráficas, as unidades hidrogeológicas clássicas, os compartimentos definidos por De Paula (2019) e as atualizações propostas por Dantas *et al* (2023). Fonte: Modificado de Dantas *et al* (2023).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Monitoramento do Nível de Água Subterrânea

4.1.1 AUTOMATIZAÇÃO E MEDIÇÃO DE NÍVEL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A rede automatizada experimental de monitoramento, implementada em 2018, possibilitou coletar dados de nível d'água estático em poços, obtendo-se dados representativos da área de estudo. Esses dados foram tratados e fundamentaram os estudos hidrogeológicos em escala temporal, consolidando informações e comportamentos do meio subterrâneo, que possibilitarão a concepção de uma rede de monitoramento definitiva.

O entendimento das interações existentes entre águas pluviais e os recursos hídricos subsuperficiais e subterrâneas que fluem através das litologias no complexo sistema hidrogeológico investigado, foi analisada a partir dos dados quantitativos obtidos em uma rede de monitoramento composta por poços tubulares inoperantes, já existentes,

A partir de dados disponibilizados na plataforma digital SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/visualizar_mapa.php), do registro de poços outorgados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, disponibilizados na Superintendência Regional de Meio Ambiente – SUPRAM Metropolitana, e de dados

disponibilizados pela Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais – COPASA MG, foi realizado um cadastramento de poços inoperantes na área do projeto, os quais seriam selecionados para compor uma rede de monitoramento hidrogeológica. Os critérios dessa seleção foram a existência de informações descritivas como litologia, entrada d'água, proprietário, propriedade, município, profundidade, níveis estáticos e/ou dinâmicos e vazão.

No ano de 2018 o trabalho referente ao inventário de poços se concentrou na consistência das informações e na implementação da rede automática de monitoramento dos poços tubulares selecionados, na adição de novos dados e na checagem de informações de todos os poços contidos no cadastro.

Diante da necessidade de se monitorar o nível estático, tornou-se necessário que os poços estivessem inoperantes. Dentre os poços inoperantes, 16 foram selecionados para a conformação desse sistema de monitoramento hidrogeológico. Os critérios utilizados para a seleção desses poços foram, em ordem de importância decrescente: poço inoperante, poço com perfil geológico, poço com informação de entrada d'água, acessibilidade geográfica e autorização do proprietário. Esses poços selecionados foram revisitados para obtenção de maior detalhamento de informações básicas, tais como, nível d'água, presença de tampa, diâmetro e comprimento do tubo de boca acima do terreno, e para adquirir autorizações e sanar dúvidas dos proprietários. Em suma, as atividades de monitoramento ocorreram de abril de 2018 a maio de 2021. Salienta-se que 02 (dois) desses poços estão com série histórica reduzida a aproximadamente dois anos: em um dos poços houve uma falha no equipamento de monitoramento enquanto no outro ponto ocorreu a retomada da operação de captação de água subterrânea através do poço por parte do proprietário dessa estrutura (Figura 9).

A composição da rede de poços de monitoramento do nível d'água contou com a instalação de 16 transdutores de pressão total (marcas Heron® e Solinst®) que suportam até 30 m de coluna d'água e de 05 (cinco) barômetros. Transdutores de pressão total são equipamentos que ficam submersos na água medindo as oscilações de pressão ao longo de um intervalo de tempo. Barômetros são equipamentos que medem as oscilações de pressão atmosférica no meio ambiente em determinado tempo. A instalação dos barômetros nos poços levou em consideração um raio máximo de 10 km em relação aos transdutores de pressão total, distância imposta para que seja possível associar os dados dos dois equipamentos de forma precisa.

Previamente à instalação dos equipamentos de medição automática do nível d'água, foram verificadas as condições construtivas de cada poço, e posteriormente realizada a instalação dos dispositivos de monitoramento nos poços. Para o monitoramento manual do nível d'água dos poços, realizado a cada campanha de descarga dos dados automaticamente armazenados, foi utilizado um medidor de profundidade de nível de água manual (Figura 10).

Outrossim, informações de perfis litológicos e de entradas d'água dos poços, apesar de serem relevantes no momento da avaliação dos dados, foram escassas, levando a uma ação posterior não inicialmente planejada, que foi a perfilagem ótica dos poços. Tal perfilagem será tratada adiante.

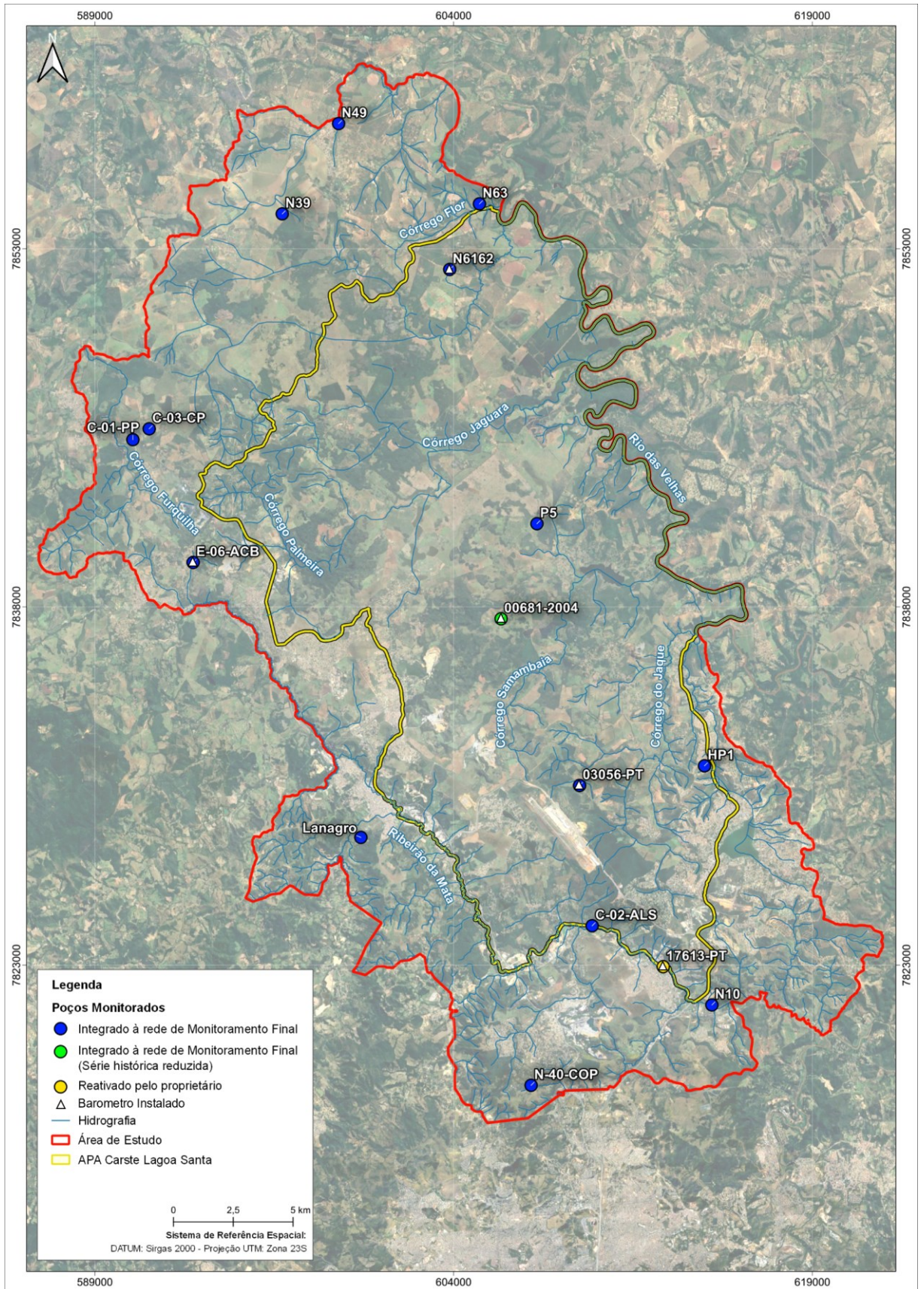


Figura 9: Poços tubulares inoperantes selecionados para o monitoramento do nível d'água, totalizando 16 poços monitorados na Área de Estudo. (Fonte: Autor)



Figura 10: Instalação dos transdutores de pressão (loggers) em poços tubulares inoperantes. E medição de nível manualmente com o uso de medidor de nível analógico. (Fonte: Autor)

O monitoramento dos poços tubulares contempla o período entre abril de 2018 e maio de 2021, período que contempla três ciclos hidrológicos completos. As medidas automáticas das pressões de água por transdutores de pressão foram realizadas a cada hora e posteriormente convertidas em dados diários de nível d'água. A coleta dos dados

armazenados foi realizada a cada dois meses, aproveitando-se para realizar o monitoramento manual do nível d'água visando a conferência e controle dos dados.

Os transdutores de pressão são instalados abaixo do nível d'água a uma profundidade segura de modo que sempre haverá uma coluna de água acima do dispositivo. Os transdutores de pressão utilizados registram a pressão total exercida sobre eles, isto é, a pressão da água mais a atmosférica. Assim, para que fosse obtida a pressão real da coluna de água acima do *logger* em cada poço, foi necessário eliminar a pressão atmosférica, medida pelos barômetros posicionados em porções específicas da área de estudo. De posse dos dados de cota de referência, gerou-se a planilha eletrônica com os dados de potenciométricos registrados continuamente.

A profundidade real do nível de água medida manualmente é utilizada como referência para o tratamento das pressões armazenadas no *datalogger* dos transdutores de pressão absoluta, de acordo com a *Equação 1* abaixo:

$$WL \text{ (real)} = DL + P(t) - P(\text{atm}) \text{ Equação 1}$$

WL (Water Level): Profundidade real do Nível d'água (m)

DL (Device Level): Profundidade do *datalogger* (m)

P(t) (Absolute Pressure): Pressão total medida no *datalogger* (kPa – kiloPaskal).

P (Atmospheric Pressure): Pressão atmosférica (atm). 1 atm = 101.325 Pa

A verificação da qualidade da medição dos níveis de água assim como a análise da série histórica calculada para o período monitorado entre as campanhas foi realizada tanto para os dados brutos, para que fossem identificadas falhas no processo de medição dos transdutores, quanto na avaliação das curvas gráficas geradas a partir dos dados medidos automaticamente. Os níveis d'água medidos manualmente foram plotados sobre as curvas geradas para representar a variação do NA (nível d'água) calculada a partir das oscilações de pressão de coluna d'água medidas nos transdutores e, desta forma, se verificar a coerência entre os métodos de aferição de nível (Figura 11).

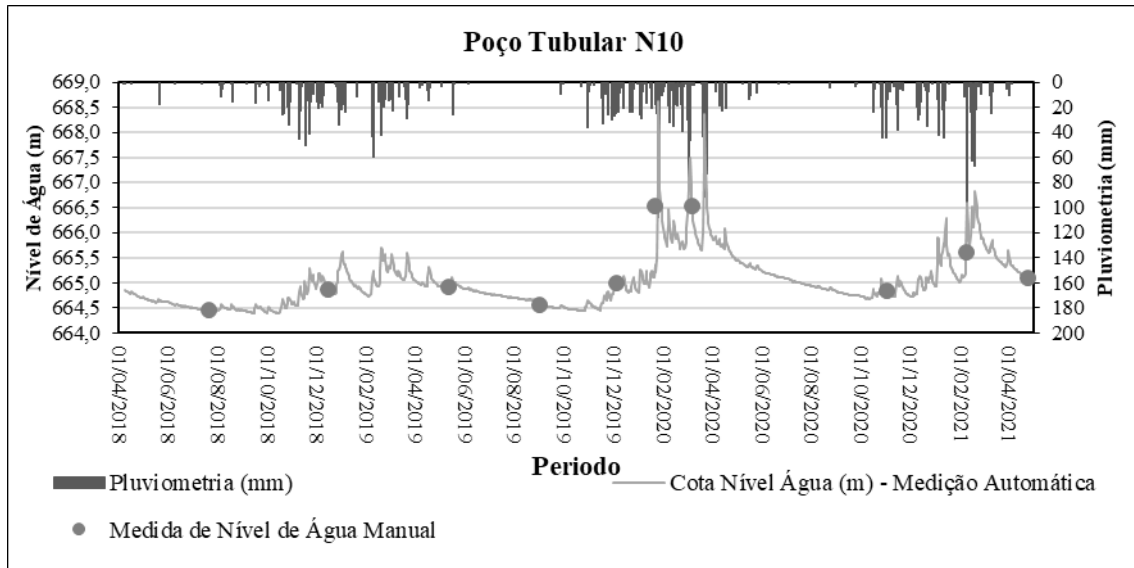


Figura 11: Gráfico gerado a partir dos dados de monitoramento para um dos poços tubulares monitorados (N10). Nota-se a elevada coerência entre os valores medidos manualmente e medidos de forma automatizada. (Fonte: Autor)

4.1.2 PERFILAGEM ÓTICA

Visto que os poços inoperantes disponíveis para o monitoramento não dispunham de perfis litológicos e nem construtivos, foram então realizadas perfilagens óticas nesses poços utilizando o perfilador óptico da marca *Laval Underground Surveys* e modelo *R-CAM TLE Level*, adquirido pelo projeto (Figura 12). A perfilagem foi realizada em 12 poços dos 16 poços monitorados, usando-se esse perfilador; em 1 poço a perfilagem foi realizada em conjunto com a CPRM SUREG Belo Horizonte, ocasião em que se utilizou outro perfilador óptico.



Figura 12: Execução das atividades de perfilagem ótica em campo durante o desenvolvimento do estudo. (Fonte: acervo próprio).

Antes do início da perfilagem foi verificada a condição de turbidez da água em cada poço, constatando-se, assim, condições seguras para se performar a atividade, ou seja, com visibilidade suficiente e ausência de materiais que pudessem prejudicar a descida da câmara.

As perfilagens permitiram se obter as informações diretas dos poços monitorados, tais como:

- i) litologias penetradas;
- ii) espessuras dos compartimentos hidrogeológicos;
- iii) localização e grau de faturamento;
- iv) profundidade, dimensão e posição (vertical, inclinada, horizontal) das entradas d'água; v) situação de pressurização (coluna de água acima da entrada de água);
- v) profundidade do revestimento.

Na Figura 13 podem ser observadas as localizações dos poços perfilados já na Figura 14 é ilustrado um exemplo de perfil esquemático elaborado com as informações adquiridas na perfilagem.

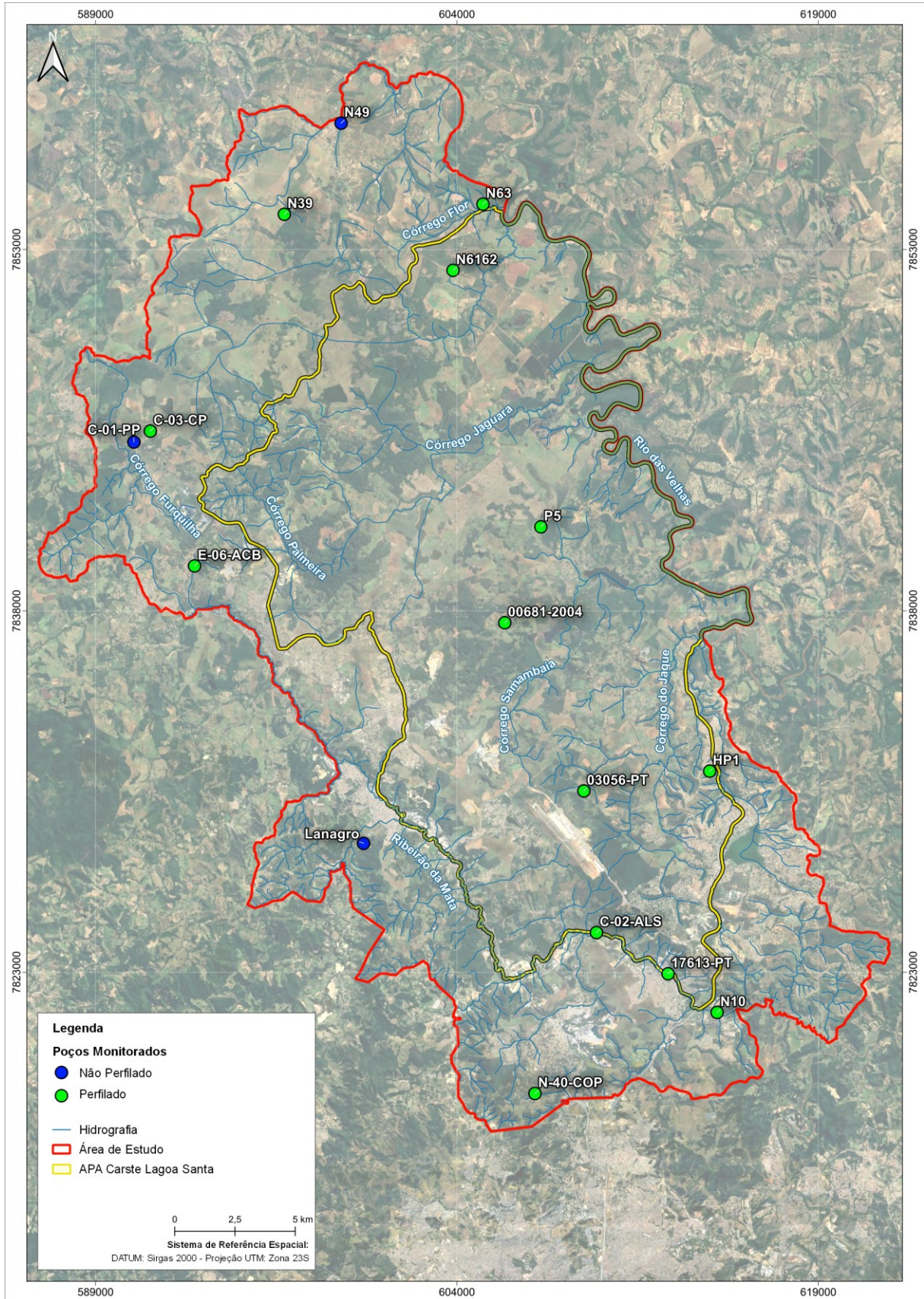


Figura 13: Distribuição espacial dos 16 poços monitorados, dos quais três não foram perfilados. (Fonte: Autor)

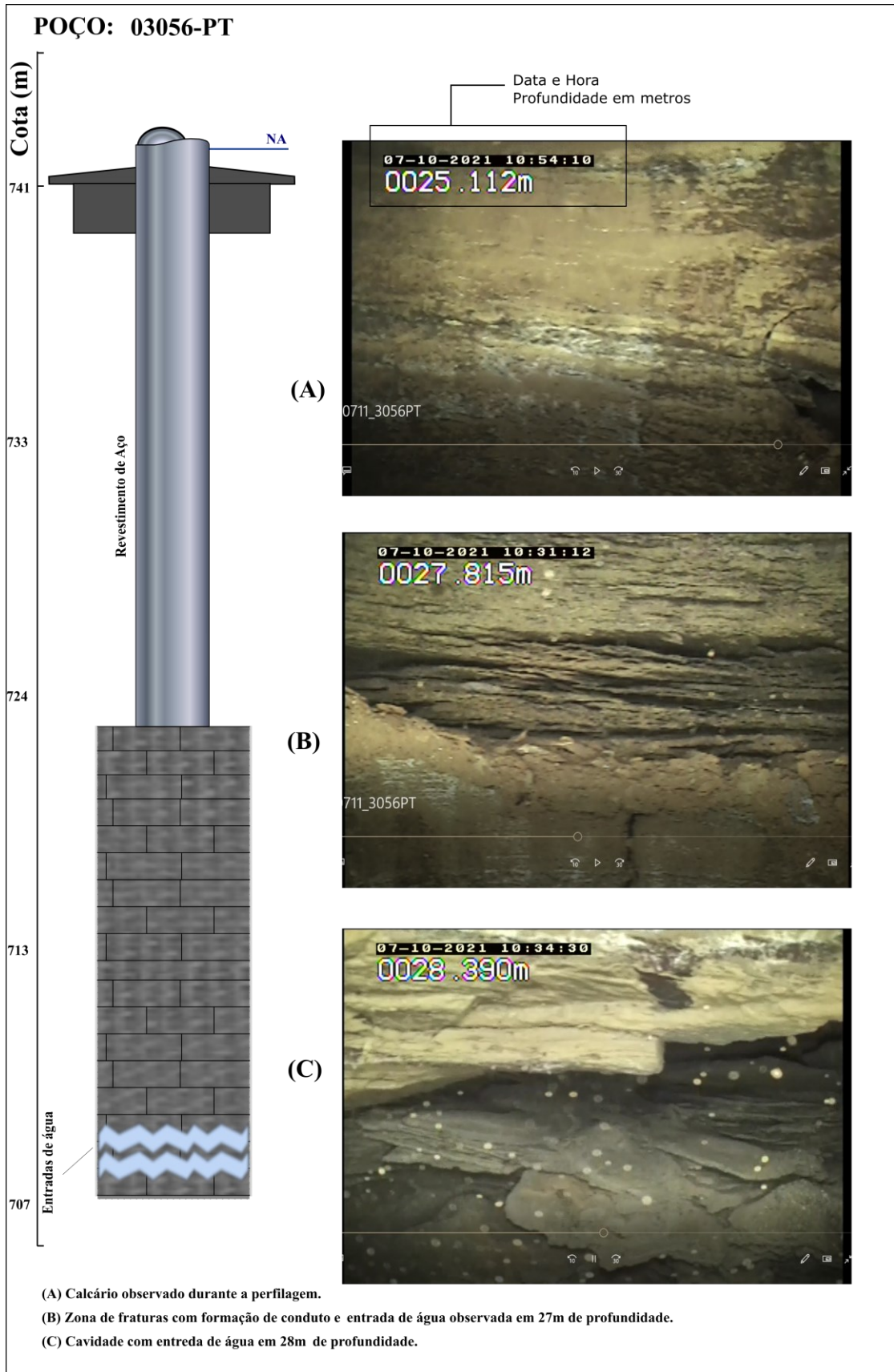


Figura 14: Exemplo de Perfil construtivo esquemático de poço instalado no compartimento aquífero cárstico com as informações obtidas durante as operações de perfilagem dos poços monitorados. (Fonte: Autor)

4.2 *Análise dos dados de monitoramento*

4.2.1 *ANÁLISES ESTATÍSTICAS*

4.2.1.1 Modelos Lineares Generalizados (MLG)

Desta forma, foi iniciada a etapa de tratamentos estatísticos dos dados monitorados, inicialmente com a aplicação de modelos lineares generalizados (MLG) e em seguida com a aplicação de correlação cruzada para verificação da influência da pluviometria nas variações dos dados de nível de água.

Isto posto, um modelo linear generalizado é descrito como uma ferramenta estatística que amplia a aplicação das regressões lineares clássicas e, por consequência, permite modelar uma ampla variedade de relações entre variáveis, lidando com diferentes tipos de dados e distribuições (Nelder, & Wedderburn, 1972). Neste contexto, o MLG pode ser aplicado a dados que não seguem uma distribuição normal, assim, podendo ser utilizado para avaliar os dados obtidos nesse estudo. Essas análises foram realizadas buscando o entendimento da influência dos atributos geológicos e hidrogeológicos, obtidos na perfilagem dos poços, nas variações dos níveis de água medidos para a composição das séries históricas dos poços.

Para cada um dos poços foram alavancados os parâmetros relacionados ao ponto monitorado e ao comportamento do NA resultante dos três anos hidrológicos monitorados, os quais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros utilizados para a elaboração dos modelos lineares generalizados.

Parâmetros utilizados	Definição
Cota do terreno	Nível do solo
Cota de entrada de água	Primeira entrada de água observada
Compartimento aquífero	Descrito durante a perfilagem
Variação do nível de água ao longo do tempo	Dados da série histórica completa
Nível de água médio -	Calculado para cada ano hidrológico (Ano 1: 2018/2019; Ano 2: 2019/2020; Ano 3: 2020/2021)
Nível de água máximo (MAX);	Calculado para cada ano hidrológico
Nível de água mínimo (MIN)	Calculado para cada ano hidrológico
Somatório das Variações Diárias (SVAR) –	Calculado a partir do somatório das diferenças de nível (crescente ou decrescente) entre dois dias subsequentes para cada ano hidrológico
Somatório das oscilações positivas diárias de nível de água (SPO)	Calculado a partir do somatório das diferenças de nível entre dois dias subsequentes, quando esse valor é maior do que zero, para cada ano hidrológico. Está associado à recarga aquífera
Diferença entre nível de água máximo e mínimo (MAXMIN);	Calculado para cada ano hidrológico
Pluviometria mensal –	Valor referente ao acumulado pluviométrico mensal para cada ano hidrológico
Pluviometria anual	Valor referente ao acumulado pluviométrico anual para cada ano hidrológico

(Fonte: Autor)

Inicialmente, para se definir o método estatístico que deveria ser empregado nas análises das séries temporais verificou-se a distribuição dos dados amostrais a partir do teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Em termos simples, o teste de Shapiro-Wilk avalia a probabilidade de os seus dados terem sido amostrados de uma população normal (Shapiro & Wilk, 1965). Encontraram-se distribuições não normais para todos os dados amostrais e por esse motivo optou-se por constatar quais eram os fatores de causa e efeito observados nos dados de monitoramento a partir de modelos lineares generalizados – MLG. Estes modelos indicam o grau de significância da correlação para um valor $p < 0,05$ entre uma variável explicativa e uma variável resposta. Para verificar as diferenças do comportamento do nível de água ao longo dos anos hidrológicos foram construídos 11 modelos lineares generalizados.

Nesses 11 modelos, a variável explicativa foi o TIPO DE AQUÍFERO e as variáveis respostas foram o NA MÁX, o NA MÍN, MAXMIN, SVAR, SPO e a cota da entrada de água. Essas análises foram feitas com auxílio do software Rstudio. É importante ressaltar que se escolheram para a análise estatística apenas os 13 poços instalados em rochas carbonáticas, devido ao pequeno grupo de amostras localizadas em rochas cristalinas, apenas 3 poços, essa pequena quantidade de pontos monitorados não fornece um banco de dados robusto o suficiente e com um amplo volume de repetições de dados, para que se possa confiar nos resultados obtidos para esses poços.

Assim, os modelos estatísticos compostos foram empregados visando responder às seguintes questões:

- O tipo de aquífero influencia na variação da cota do nível de água ao longo do tempo, utilizando-se, nesse caso, os múltiplos valores obtidos para a série histórica de cada ponto?
- Qual é a influência da pluviometria na amplitude MAXMIN em relação a cada tipo de aquífero?
- A cota da entrada de água é influenciada pelo tipo de aquífero?
- Há influência da pluviometria na recarga em relação a cada tipo de aquífero?
- Há influência do tipo de aquífero no valor do aporte pluvial percebido, ou seja, no Somatório das Oscilações Positivas Diárias de Nível De Água (SPO)?
- Qual é a influência do tipo de aquífero no balanço hídrico de água nos poços?
- Qual é influência da cota de entrada de água no balanço hídrico dos poços, ou seja, Somatório das Variações Diárias (SVAR)?
- Qual é a influência do tipo de aquífero no nível de água MAX?
- Qual é a influência do tipo de aquífero no nível de água MIN?
- Qual é a influência do tipo de aquífero na maior variação, ou seja, diferença Entre Nível de Água Máximo e Mínimo (MAXMIN)?
- Qual é influência do tipo de aquífero na maior depleção, ou seja, Nível de Água Mínimo (MIN)?

4.2.1.2 Correlação Cruzada e Avaliação do Tempo de Reação dos Compartimentos Aquíferos à Pluviometria

Em paralelo à composição dos modelos lineares generalizados executou-se um trabalho de mensuração da variação do nível dos compartimentos aquíferos em relação a um aporte de água pluvial específico. Assim, em um estudo para a verificação da velocidade de

resposta ao aporte de água pluvial em cursos d'água na área da Área de Proteção Ambiental do Carste de Lagoa Santa, De Paula (2019) aplicou o método de correlações cruzadas para análises de séries temporais em aquíferos cársticos apresentados por Ferrari & Karmann (2008). Durante o trabalho realizado por De Paula (2019), o autor constatou que essa metodologia apresentou bons resultados ao ser utilizada para córregos e rios situados sobre rochas carbonáticas. Tal comprovação foi obtida ao se confrontarem os resultados obtidos no córrego Gordura a partir dos testes de correlação com resposta para o tempo de trânsito obtido com o uso de traçadores corantes, técnica utilizada por Teodoro (2019) na bacia homônima. Isto posto, adotou-se a mesma metodologia para avaliar, a partir das variações dos níveis de água medidos nos poços que compõem a rede monitoramento estudada, o tempo de resposta para que o nível freático calculado para um determinado poço seja alterado pela recarga de água para os sistemas aquíferos locais.

Ferrari & Karmann (2008) salientam que o entendimento do tempo de *delay* entre os *inputs* e *outputs* de água em um aquífero cárstico auxilia na quantificação do tempo de trânsito de uma partícula dentro de um sistema hidrogeológico, para que o processo de recarga altere positivamente a carga hidráulica desse sistema, ou seja, é possível avaliar qual o momento que um aporte de água para o sistema aquífero é percebido em um ponto monitorado.

Define-se r_{xy} como o coeficiente de correlação, k é o tempo de transito em dias para que o nível de água em um poço monitorado responda a um evento de precipitação; ainda, C_{xy} é o correlograma cruzado, σ_x, σ_y os desvios padrões das duas séries de tempo; “C” a correlação cruzada da série; “n” o comprimento da série; “ x_t ” é o valor medido de uma variável e \bar{x} a média desses valores medidos; e y_t o valor de uma variável observada; e \bar{y} a média desses valores observados.

Assim, para $r_{xy}(k) > 0$ se $k > 0$, o *input* (pluviometria) influencia o *output* (variação de nível água medida em um poço). Quando há uma função simétrica centralizada em $k = 0$, para as variáveis x e y , não existe influência do *input* no *output*. O índice de *delay* k (dias) é caracterizado pelo tempo de trânsito entre $k = 0$ e o k em que $r_{xy}(k)$ seja um valor observado entre 0,1 e 0,2 (equações 2 e 3) (Ferrari & Karmann, 2008).

$$r_{xy}(k) = C_{xy}(k) / \sigma_x \sigma_y \quad \text{Equação 2}$$

$$C_{xy}(k) = (1/n) \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}) \times (y_{t+k} - \bar{y}) \quad \text{Equação 3}$$

Foram utilizados como dados de recarga as primeiras chuvas (*input*) observadas após um período de pelo menos 15 dias sem nenhum evento pluviométrico, de modo a aumentar a probabilidade de que as alterações no nível de água medidas nos poços fossem realmente ocasionadas pelo aporte proporcionado pelos ditos eventos pluviométricos. Entende-se que 15 dias sem chuvas são suficientes para que o evento pluviométrico escolhido seja efetivamente o causador das variações no nível freático dos poços, visto que De Paula (2019) e Teodoro (2020) encontraram tempos de resposta menores do que 5 dias para a variação dos NA's em relação a um aporte pluvial. No Ano 01 hidrológico mediu-se esse tempo de resposta entre os meses de setembro e outubro, no Ano 02 o período avaliado foi entre outubro e novembro e no terceiro ano entre setembro e outubro, isto é, na transição entre o final da estiagem e o início das chuvas. Para esses mesmos períodos também foram verificadas as variações diárias dos níveis de água para que se pudesse, de forma conceitual, validar quantos dias após a incidência das chuvas haveria uma acreção ao nível de água de um determinado poço.

4.2.2 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO

A partir da compreensão da variação do nível de água em cada poço ao longo do tempo, pôde-se realizar uma comparação entre os aportes e descargas de água identificados em cada um dos pontos de monitoramento e, por consequência, elencaram-se os poços onde houve decréscimos ou acréscimos de água ao fim do período monitorado, bem como obtiveram-se os somatórios de variações observadas em cada um dos pontos monitorados. De posse desses dados, foram gerados mapas temáticos com apoio da ferramenta IDW (*Inverse Distance Weighted* – Ponderação do Inverso da Distância) incluída no software Arcgis 10.1® para a espacialização das informações inerentes aos principais parâmetros referentes as séries históricas compostas para os pontos de monitoramento. O IDW é uma técnica utilizada para interpolar pontos distribuídos espacialmente, calculado a partir da combinação linear ponderada dos pontos amostrados. Atribui-se um peso a cada ponto monitorado em função do inverso da distância entre as amostras. O uso do método IDW dá-se visto que essa forma de modelagem não extrapola valores verificados nos pontos monitorados, desse modo, os limites dos valores, tanto superiores, quanto inferiores são realistas e correlacionados aos dados obtidos de forma direta. Ainda, a aplicação deste método para terrenos cársticos, cársticos-fissurais e fissurais pôde ser realizada visto que, ao se observar o elevado grau de conectividade entre fraturas e condutos, é admissível considerar o sistema aquífero como um equivalente poroso (conforme atestado por Anderson & Woessner, 1992; Ford & Williams,

1989; e Dantas *et al*, 2023), o que fundamenta sua aplicabilidade. Neste contexto, pode-se citar o trabalho desenvolvido por Teixeira *et al.* (2023), que empregou essa metodologia no aquífero cárstico da região da APACLS, objetivando especializar a recarga calculada a partir de dados de monitoramento do nível de água de poços tubulares profundos.

Na Figura 15 é apresentado, como exemplo, um mapa preliminar composto para o espacializar a diferença entre os níveis de água máximo e mínimo observados nos poços tubulares monitorados durante o desenvolvimento da pesquisa.

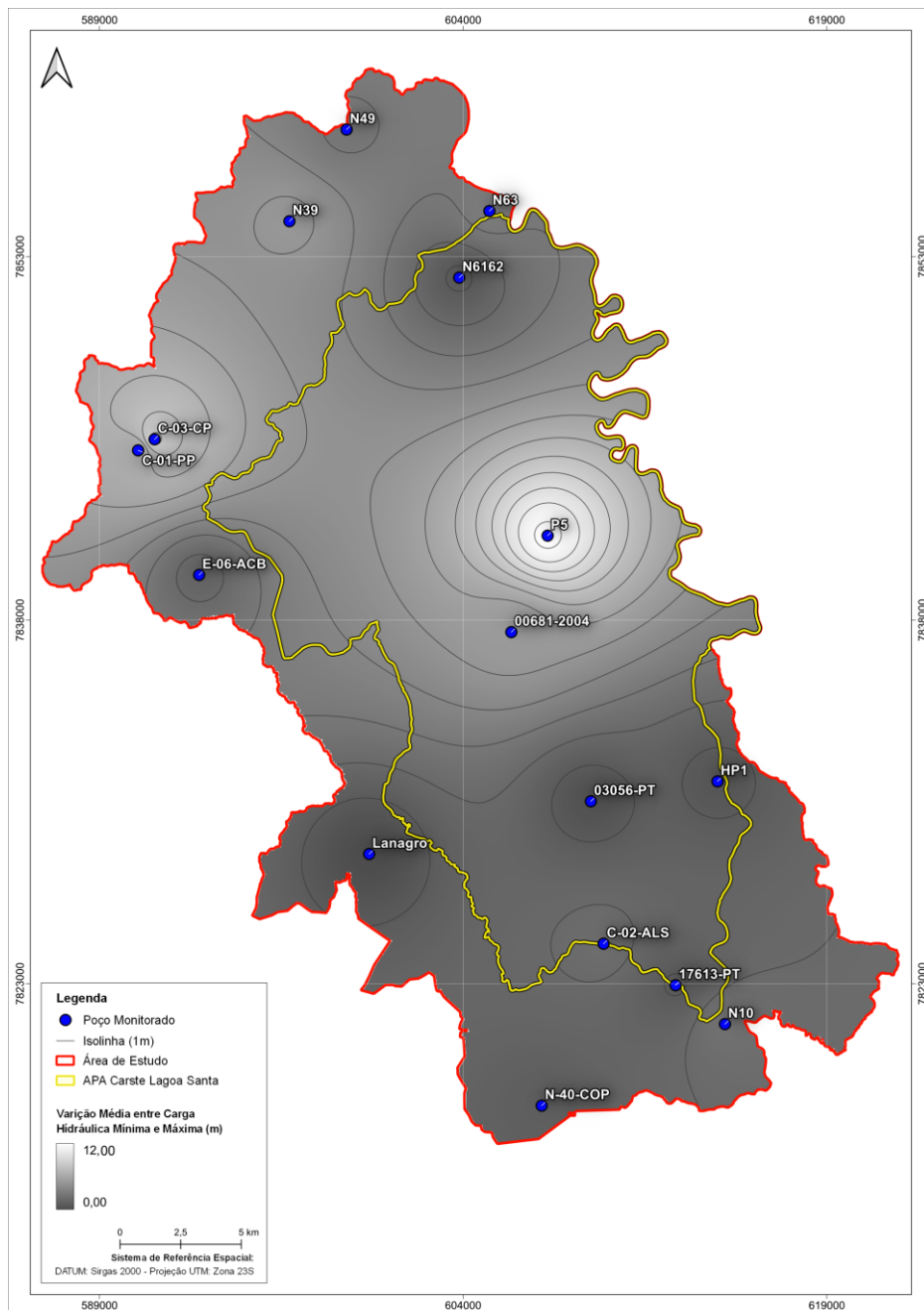


Figura 15: Mapa de isolinhas preliminar gerado com a espacialização da média dos três anos de monitoramento da diferença entre carga hidráulica mínima e máxima medida nos poços monitorados. (Fonte: Autor)

Para avaliar a espacialização do comportamento da superfície potenciométrica na área de estudo, ao longo de todo o período de monitoramento, quatro mapas temáticos foram produzidos, que sejam:

- i) Mapa com apresentação do somatório de todas as variações positivas no nível de água medidas ao longo do período de monitoramento;
- ii) Mapa com a apresentação dos valores obtidos a partir do cálculo da média dos três anos de monitoramento da diferença entre o nível máxima (maior carga hidráulica) e nível de água mínimo (menor carga hidráulica) medidos em cada poço;
- iii) Mapa com a apresentação das vazões passíveis de serem explotadas em diversos poços localizados na área de estudo, cujas vazões foram obtidas a partir do banco de dados composto durante o desenvolvimento da tese de De Paula (2019);
- iv) Mapa com o somatório de todas as variações de nível de água observadas ao longo dos anos das séries históricas construídas para cada um dos poços monitorados.

Os dados de precipitação empregados no estudo são os disponibilizados na plataforma Hidroweb-ANA (CPRM) referentes às estações pluviométricas de Pedro Leopoldo (1944009), Lagoa Santa (1943049), Vespasiano (1943009) e Sete Lagoas (1944052). As variações dos NA's dos poços foram comparadas às variações pluviométricas, visando se obter a relação entre essas variáveis. Os valores de pluviometria utilizados para cada poço foram os definidos pela estação influente sobre cada polígono de Thiessen (De Paula, 2019), no qual o poço se encontrava inserido. Na Figura 16 são apresentados os poços que foram monitorados e a respectiva estação pluviométrica associada a eles

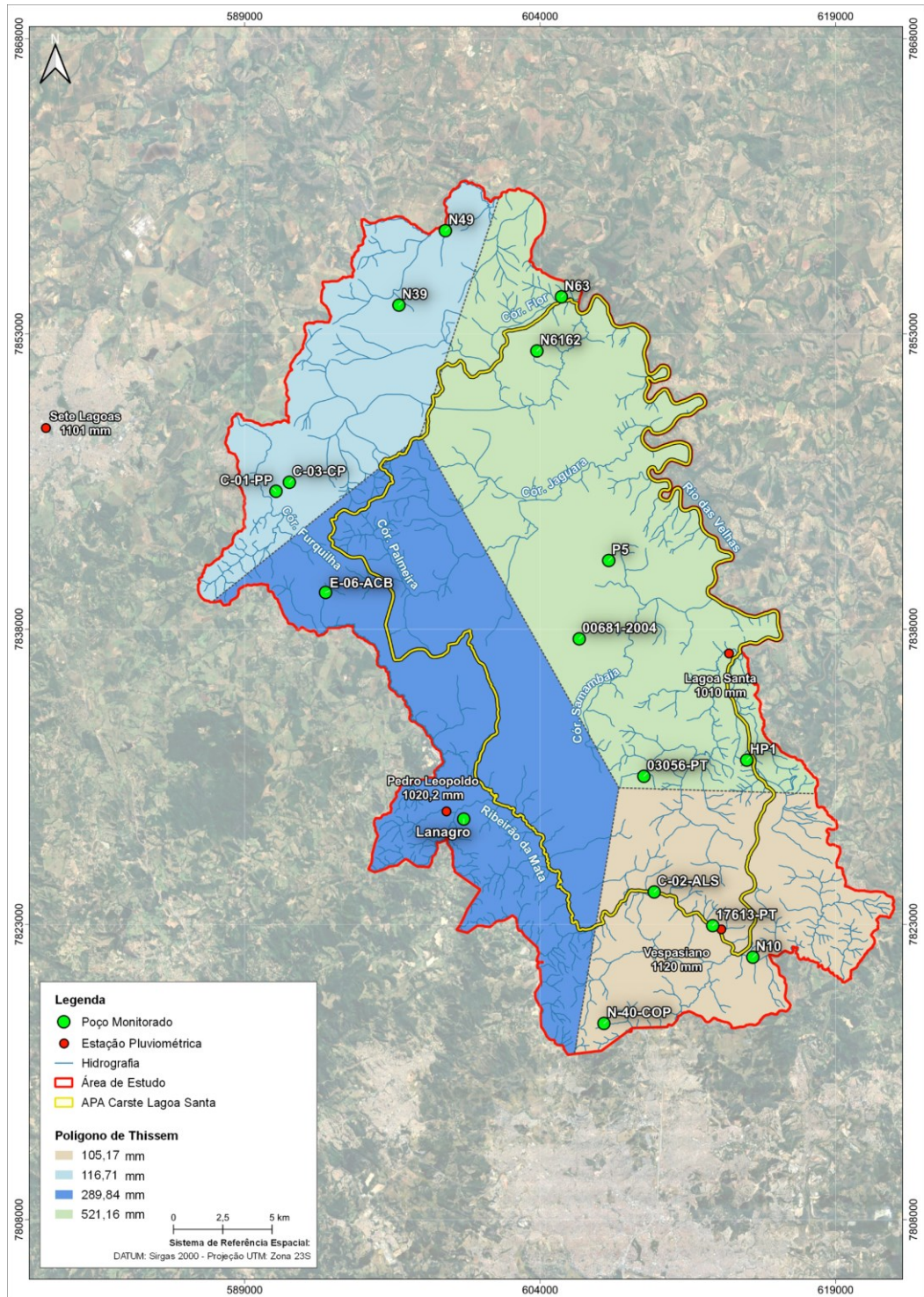


Figura 16: Demonstração da distribuição dos poços em relação ao mapa de Thiessen (1911) objetivando-se apresentar a influência das estações pluviométricas monitoradas na área de estudo. Modificado de De Paula (2019).

4.3 *Validação da Rede de Monitoramento*

Após a compreensão do comportamento do nível de águas dos poços monitorados, foram utilizados os mapas temáticos gerados no trabalho de Teixeira, *et.al* (2023) para se verificar as características da recarga intrínseca das áreas de entorno de cada um dos instrumentos monitorados nesta pesquisa. Assim foi possível se avaliar quais são as influências dos aportes de água pluvial discutidos pelos autores, bem como pela variação potenciométrica de cada estrutura individualmente.

De forma análoga ao descrito para a avaliação da influência recarga nas variações de nível de água nos poços, também foram analisadas quais são as interferências que podem ser atribuídas às oscilações potenciométricas dos poços de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Teodoro *et al.* (2020) e Ribeiro (2019). Desta forma, foi realizada de modo qualitativo uma definição de áreas de maior eficiência e representatividade dos dados de monitoramento

5 RESULTADOS

5.1 *Monitoramento do Nível de água Subterrânea*

A partir das informações de perfilagem, os poços monitorados serão agrupados de acordo com o compartimento hidrogeológico que estão inseridos. A compartimentação adotada segue os preceitos descritos De Paula (2019) e as atualizações de Dantas *et al.* (2023). Assim, os poços construídos em rochas calcáreas da Formação Sete Lagoas com entradas de água em profundidades menores do que 30 m e/ou com presença de condutos bem desenvolvidos foram considerados como estruturas localizadas no compartimento cárstico e, ainda, quando para os poços em rochas calcáreas, da formação supra, não se observaram condutos bem desenvolvidos e/ou entradas de água em profundidades menores do que 30 m, entendeu-se que essas estruturas monitoraram o aquífero cárstico-fissural. Já para os poços instalados nas rochas do embasamento, o compartimento hidrogeológico alusivo a esses poços foi o fissural. É válido informar que existem poços onde foram instalados filtros; para esses poços, considerou-se essa seção filtrante como uma entrada de água alusiva ao aquífero granular, unidade correlacionada à cobertura regolítica local.

5.1.1 *PERFILAGEM ÓTICA*

As perfilagens óticas permitiram identificar a unidade aquífera associada a cada poço, em conformidade com o modelo hidrogeológico de De Paula (2019) considerando as modificações propostas por Dantas *et al.* (2023), quais são: Compartimento Aquífera Cárstico (5 poços), Compartimento Aquífera Cárstico-Fissural (8 poços); e Compartimento Aquífero Fissural (3 poços) (Figura 17).

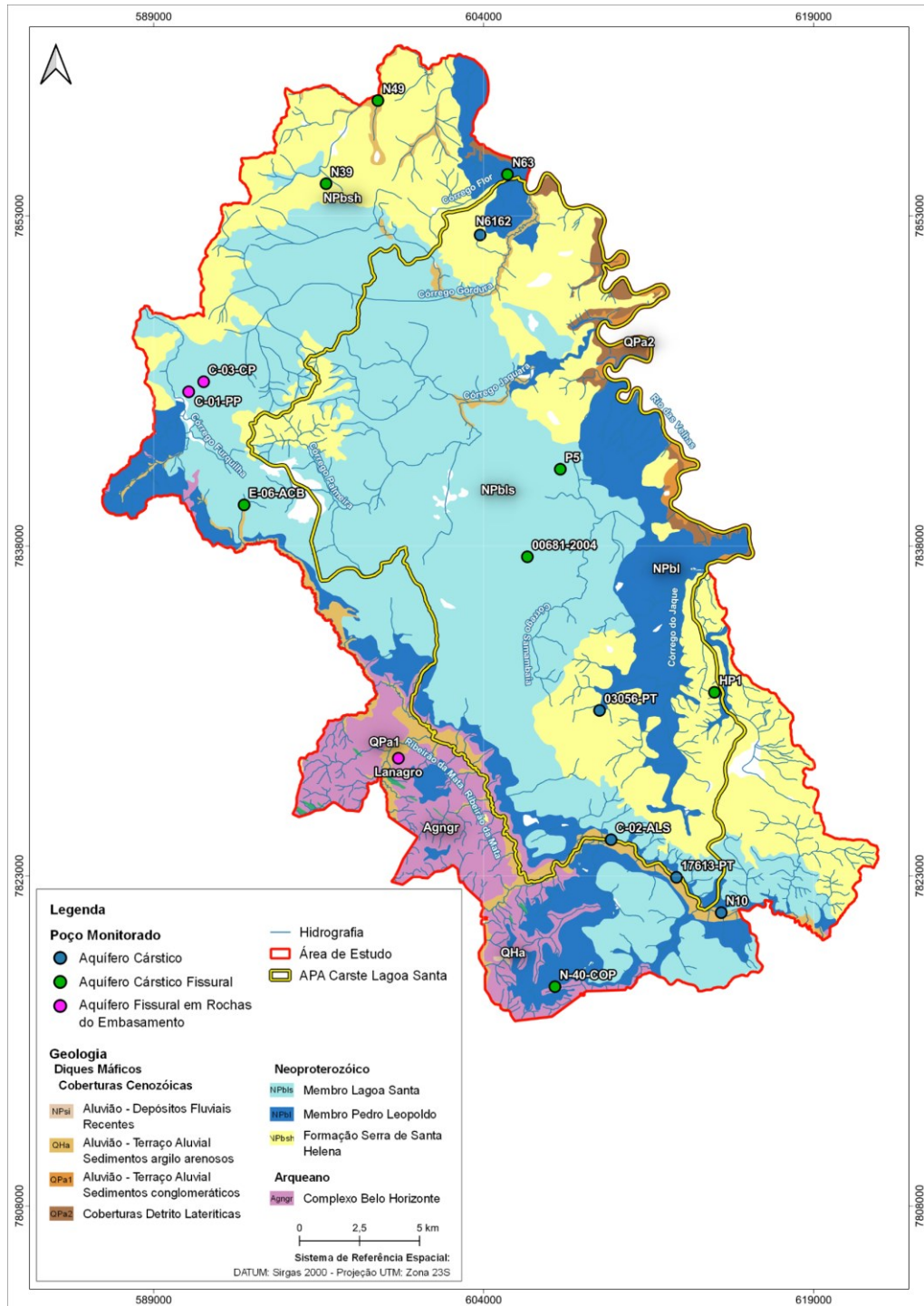


Figura 17: Mapa Geológico com a localização dos 16 poços monitorados em relação aos compartimentos aquíferos onde as estruturas foram construídas de acordo com a perfilagem ótica. (Fonte: Autor).

Para uma interpretação das informações obtidas na perfilagem, entendeu-se que as profundidades do revestimento são representativas das espessuras de solo e saprólito juntas. Quanto ao aspecto construtivo dos poços monitorados, observou-se que as estruturas que foram instaladas nos calcários dos compartimentos aquíferos cárstico, o comprimento do

revestimento, a partir do nível do solo, varia entre de 18,00 m e 26,60 m; no compartimento aquífero cárstico fissural essa variação vai de 26,20 m a 62,00 m. O fato de se encontrar menores profundidades do revestimento no compartimento cárstico está de acordo com o constatado de que as entradas de água superiores nesse compartimento encontram-se em profundidades relativamente rasas, cerca de 20 m a 30 m abaixo do terreno, enquanto que no compartimento cárstico-fissural essas profundidades variam de 40 m a pouco mais de 100 m.

Nos poços construídos no compartimento aquífera fissural, porção correlacionada às rochas do embasamento cristalino, as profundidades dos revestimentos encontrados são de 52 m e 68 m (apenas dois poços possuem essa informação). O topo rochoso do calcário nos poços monitorados varia entre as cotas 617 m e 766 m, enquanto o topo do embasamento entre 674 m e 694 m.

Considerando a entrada d'água superior, isto é, a de cota mais elevada, visto que este é o ponto de aporte de água para o poço mais relevante, premissa estabelecida por Dantas, *et al.* (2023), no compartimento aquífero cárstico as cotas de entradas de água dos poços variam entre 650 m e 713 m (condutos ou fraturas). Em poços instalados no compartimento aquífero cárstico-fissural as entradas de água variam de 618 m a 754 m. Já no compartimento aquífero fissural, as entradas de água ocorrem entre as cotas 689 e 711 m. Em ambos os poços localizados no compartimento aquífero correlacionado ao embasamento, identificaram-se entradas de água tanto no regolito quanto na rocha sã.

Em 14 dos 16 poços monitorados constatou-se que as cotas dos níveis de água mínimo observados durante o monitoramento estiveram mais elevadas do que as cotas das entradas d'água, identificadas nas filmagens (Figura 18). O valor do nível mínimo em cada poço é alusivo à menor carga hidráulica verificada nesse ponto de monitoramento ao longo da pesquisa. A diferença entre essas cotas variou de 9,27 m a 28,60 m no compartimento aquífero cársticos, de 20,73 m a 55,32 m no compartimento aquífero cárstico-fissural e de 6,45 m a 32,86 m no compartimento aquífero fissural, comumente esses níveis foram medidos em profundidade superiores ao ponto de cravação do revestimento na rocha sã, ou seja, em cotas superiores a cota do topo compartimento aquífero monitorado. Tal condição corrobora as informações apresentadas tanto no modelo de De Paula (2019) e no refinamento da compartimentação hidrogeológica realizado por Dantas, *et al.* (2023), onde é descrito que as entradas de água no aquífero cárstico são mais rasa do que as do aquífero cárstico fissural. Todavia, é importante relatar que, como a diferença de profundidade dos níveis de água no

compartimento aquífero cárstico-fissural e da primeira entrada de água mapeada nesses poços, são, de modo geral, bem mais elevados do que as observadas no compartimento aquífero cárstico, há uma maior pressurização nas fissuras presentes no compartimento cárstico-fissural. Essa pressurização se dá, principalmente, pela maior coluna de água acima das entradas de água e, também, devido ao do tempo de trânsito das águas subterrâneas nesse compartimento ser mais elevado (Ribeiro, 2019).

Em relação ao poço de monitoramento perfilado que está instalado em rochas do embasamento cristalino local (C-03-CP), os aportes de água para dentro da estrutura ocorrem na cobertura regolítica desse poço, sob condição de pressão livre. O outro poço (C-01-PP) possui a mesma condição de entrada d'água, cuja informação foi obtida em registro de um perfil durante o cadastramento dos poços. Reitera-se que ambos possuem entradas de água também na rocha sã.

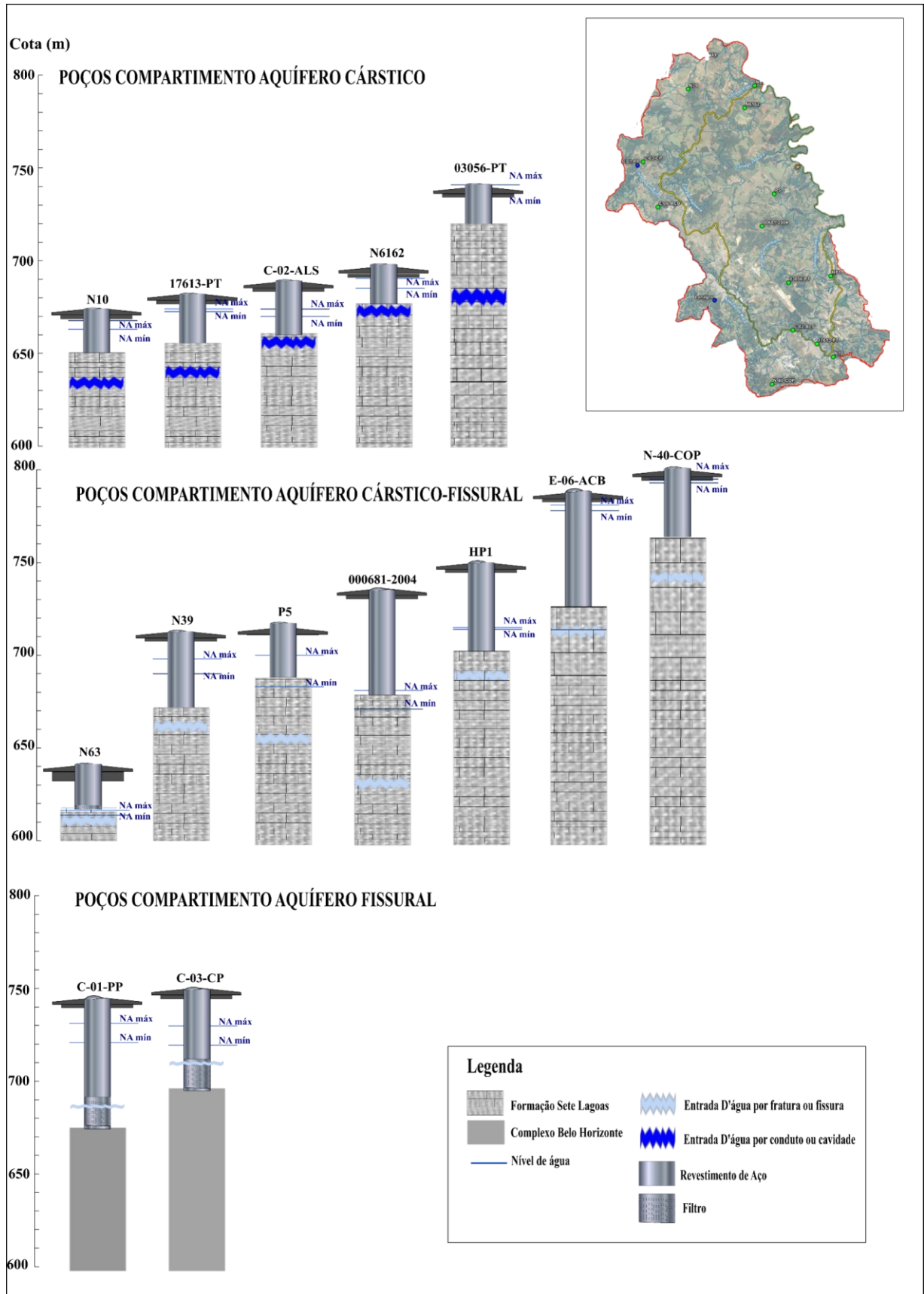


Figura 18: Representação esquemática fora de escala dos níveis de água mínimos e máximos monitorados em cada poço em relação a entrada de água superior identificada nessas estruturas. (Fonte: Autor).

5.1.2 MEDIÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Os gráficos com as representações do nível d'água ao longo do tempo para os poços tubulares monitorados neste estudo são apresentados a seguir, de acordo com a compartimentação hidrogeológica especificada para cada estrutura. Esses gráficos foram representados junto aos registros pluviométricos para comparação com as respostas do nível d'água à precipitação.

5.1.2.1 Series Históricas – Poços localizados no compartimento aquífero cárstico

Os poços localizados na unidade aquífera cárstica (5 poços) estão concentrados na porção sul da área (03056-PT, 17613-PT, C-02-ALS e N10) e na porção norte (N6162) (Figura 19). Um poço (17613-PT) foi monitorado apenas no primeiro ano hidrológico, conforme descrito no item 4.1.1.

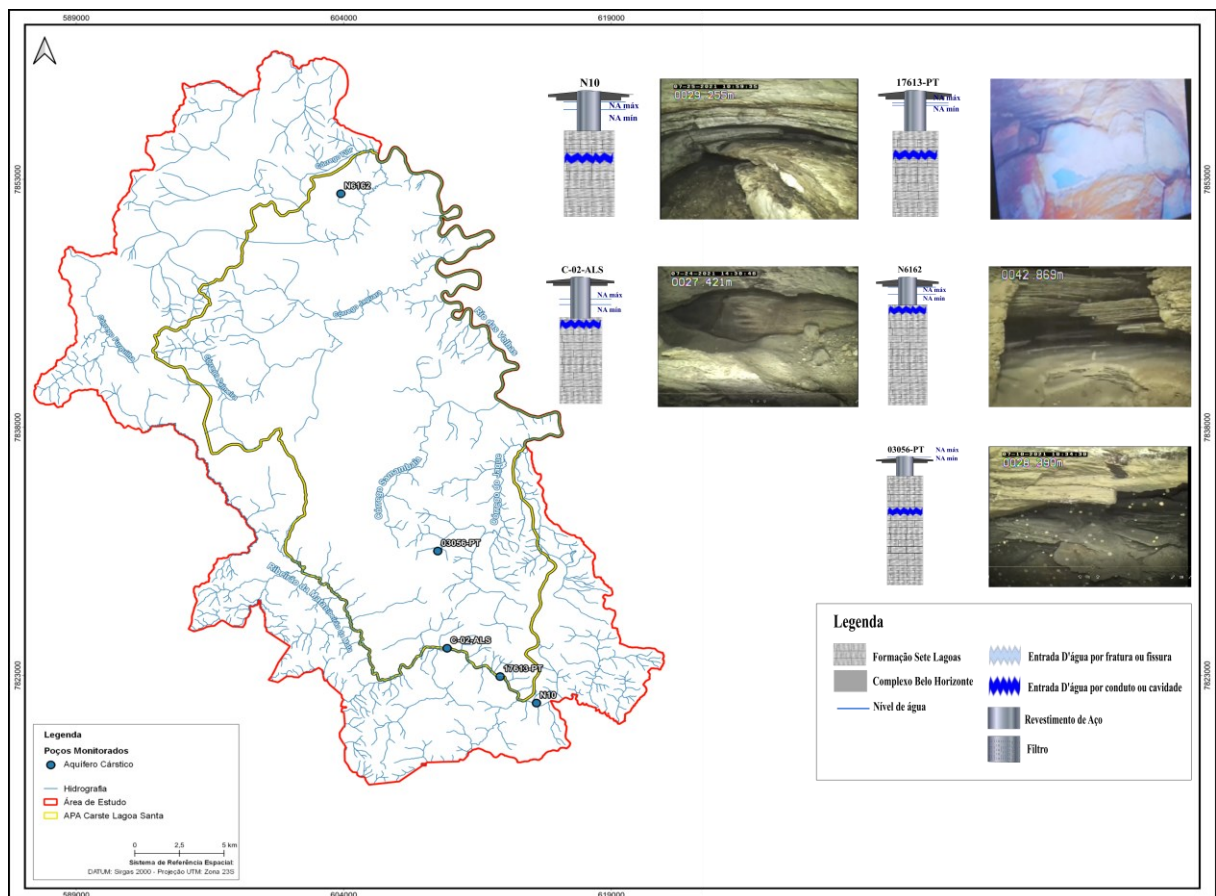


Figura 19: Mapa com a localização dos poços tubulares monitorados no compartimento aquífero cárstico, com destaque para fotos retiradas durante o processo de perfilagem ótica. (Fonte: Autor).

Os gráficos da variação do nível de água em relação ao tempo são bastante similares entre os 4 poços situados na porção sul da área de estudo, cujas curvas de variação do nível de

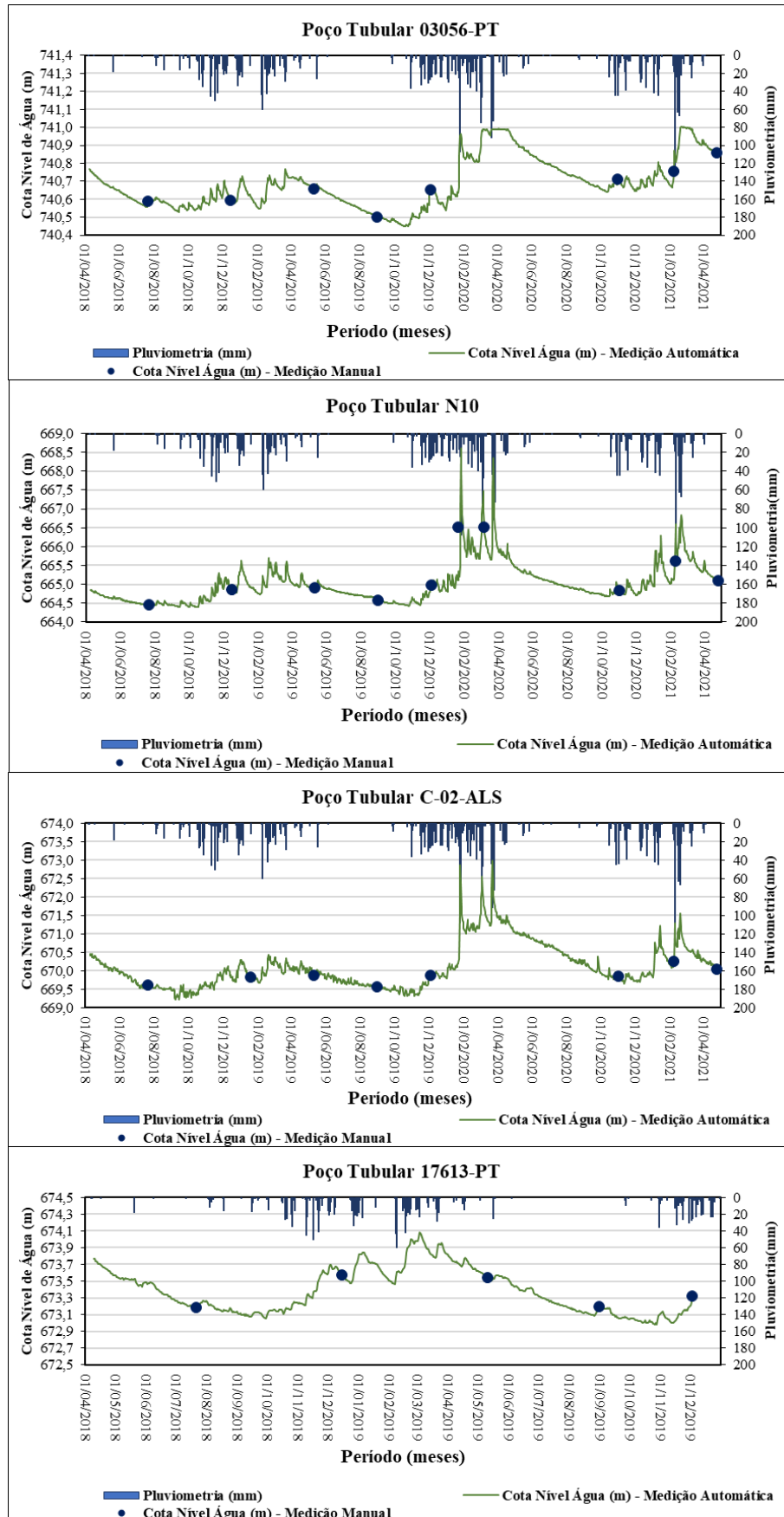
água exibem um comportamento sazonalmente bem definido, com maiores elevações nos períodos chuvosos, que ocorrem entre os meses de outubro a março (Figura 20). São nítidas as rápidas elevações do nível de água em resposta aos episódios de chuva, seguidas das rápidas e significativas depleções, indicando ótimas condições de escoamento nos aportes relacionados à recarga e, também, aos processos de descarga do sistema, inerente ao meio cárstico. Schevenell (1996), destaca que para ambientes cársticos, ao se avaliar os gráficos de NA X Tempo, as inclinações dos trechos de recessão que se sucedem a um período de recarga, podem ser interpretadas da seguinte forma: a primeira e mais íngreme inclinação representa os efeitos dominantes do escoamento em meios de características cársticas, enquanto a segunda inclinação intermediária caracteriza o esvaziamento de fraturas bem conectadas, e possivelmente parcialmente cársticas. Além disso, a terceira inclinação representa o escoamento da porção da matriz do aquífero, que no caso dos calcários da Formação Sete Lagoas é desprezível, como exposto por Galvão (2015) e Peñaranda (2016).

Além disso, ao se avaliar as séries históricas dos poços monitorados, nota-se que uma leve depleção no nível de base de todos os poços monitorados, nítida ao se avaliar o fim do período de recessão do primeiro ano hidrológico em relação ao fim do período de recessão do segundo ano hidrológico. Posteriormente, entre o segundo e o terceiro ano hidrológico houve um incremento no nível de base dos poços tubulares C-02-ALS, N10 e 03056-PT enquanto no poço N6162 não foi observada essa mesma condição. Entende-se que o maior aporte pluviométrico ocorrido no último ano de monitoramento é um fator condicionador para esse aumento no nível de base observado nessas estruturas. Assim, ao não se observar esse incremento nos dados de monitoramento do poço N6162 e, pelo contrário, uma depleção nesse nível de base, se torna plausível considerar um rebaixamento de nível local ocasionado por ações antrópicas.

No poço N6162, a norte, diferentemente dos demais poços a sul da área, as variações do nível de água em resposta às precipitações têm uma dinâmica mais contínua e mais lenta, sem a formação de picos isolados, e com ínfimas variações diárias, poucos centímetros. Esses fatores, de acordo com os preceitos descritos por Shevenell (1996), apontam para uma condição de carstificação bem menos desenvolvida do que os 4 poços anteriores ou uma maior condição de pressurização. Porém, o comportamento desse poço no último ano hidrológico mostra um rebaixamento mais acentuado, seguido de uma significativa e rápida elevação. Por Healy (2002), flutuações de longo prazo, observadas ao longo de décadas, podem ser atribuídas a mudanças naturais no clima e a atividades antropogênicas (mudanças

no uso e ocupação do solo, bombeamento contínuo, recarga artificial etc.). Já flutuações sazonais nos níveis de água subterrânea são alusivas à sazonalidade da evapotranspiração e precipitação. No entanto, oscilações de curto prazo no nível freático ocorrem em resposta à eventos pluviométricos, bombeamento, flutuações de pressão barométrica dentre outros fenômenos. Alterações severas no nível de água subterrânea, como a identificada no último ano hidrológico de monitoramento da potenciometria do poço, podem ser relacionadas a ações antrópicas que impactem os reservatórios subterrâneos. Esse entendimento se dá, também, pelo distinto comportamento do NA do poço no último ano monitorado, o qual destoa da série histórica observada até esse momento. Tal padrão é indicativo de provável influência de operações de exploração de água subterrânea nas suas imediações nesse período; todavia é preciso identificar e medir tais captações para determinar se realmente existe essa influência.

Dignas de nota são as variações diárias com forte regularidade nesses poços, com valores médios de até 2cm (03056-PT), 10cm (17613-PT), 40cm (C-02-ALS) e 5cm (N10), que podem ser alusivas a captações de água subterrâneas próximas aos poços, visto que essas estruturas se encontram localizadas em áreas contíguas a centros urbanos com grande demanda hídrica.



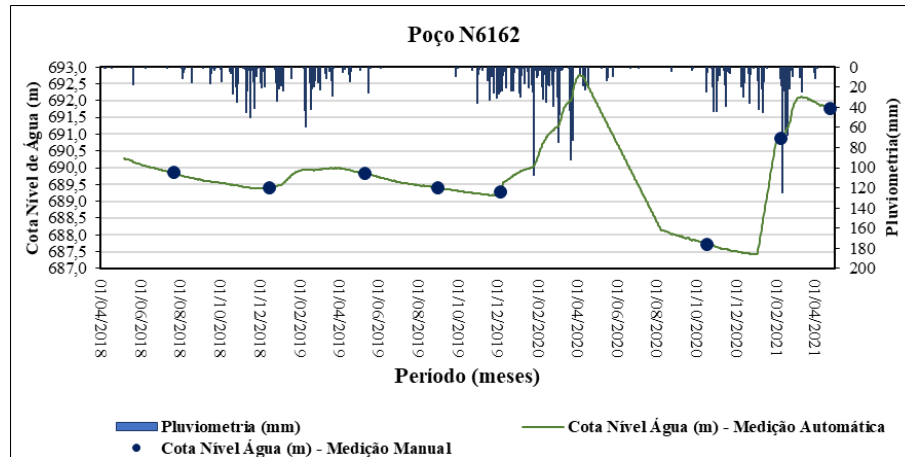


Figura 20: Séries históricas do monitoramento do nível de água subterrânea dos poços tubulares localizados no compartimento aquífero cárstico.

Em geral os poços possuem profundidade do nível de água inferior a 10 m, à exceção do poço N6162, cujo NA varia entre profundidades de 14,32 m a 19,58 m. Ainda, é notório que para esses poços as diferenças entre os níveis de água mais profundos e mais rasos de cada ano hidrológico são inferiores a 5 (cinco) m. Essa diferença se elevou ao longo dos anos hidrológicos, sendo mais acentuada no último ano. As diferenças entre os níveis de água mais profundos e mais rasos podem ser observadas na Figura 21.

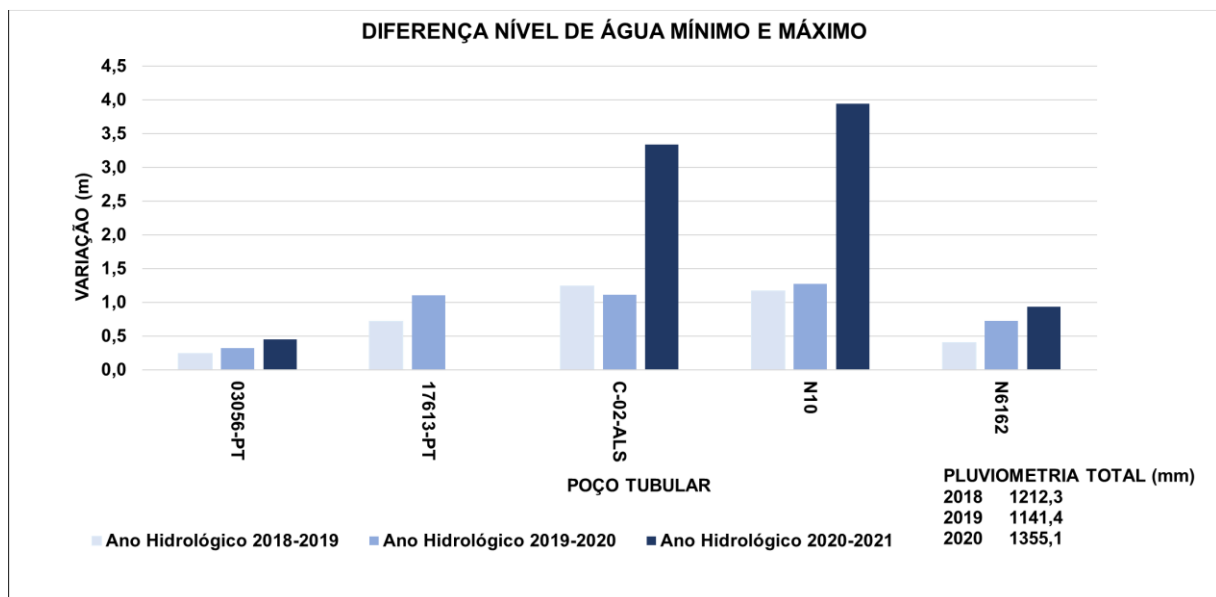


Figura 21: Variação por ano hidrológico do nível de água subterrânea de cada poço no compartimento aquífero cárstico, em metros.

5.1.2.2 Series Históricas – Poços localizados no compartimento aquífero cárstico-fissural

Oito poços compõem o grupo de poços monitorados no compartimento aquífero-cárstico fissural (Figura 22). Visualmente, ao se verificar a amplitude das variações dos níveis freáticos, os comportamentos das séries históricas podem ser divididos em dois grandes grupos:

- i) Grupo 1: N49, P5, E-06-ACB, N40-COP, N63 e 00681-2003; e
- ii) Grupo 2: N39, HP1.

O Grupo 1 é constituído de poços cujas elevações do nível de água responderam de forma sistemática tanto na escala de eventos isolados de chuva quanto na escala sazonal (exceto o Poço N63 para a escala sazonal) e cujas recessões foram notoriamente lentas, o que é concordante com o meio predominantemente fissural, de acordo com as definições de Schevenell, (1996), em conformidade também com o observado nas perfilagens realizadas.

Já o Grupo 2 é constituído de poços cujas variações do nível de água não apresentaram respostas sistemáticas às precipitações, ao contrário, chegaram a se comportar de modo contrastante, podendo ou não estarem sob influência de bombeamentos nas suas imediações. Nota-se também que, no geral, as acreções são mais lentas do que no compartimento aquífero cárstico.

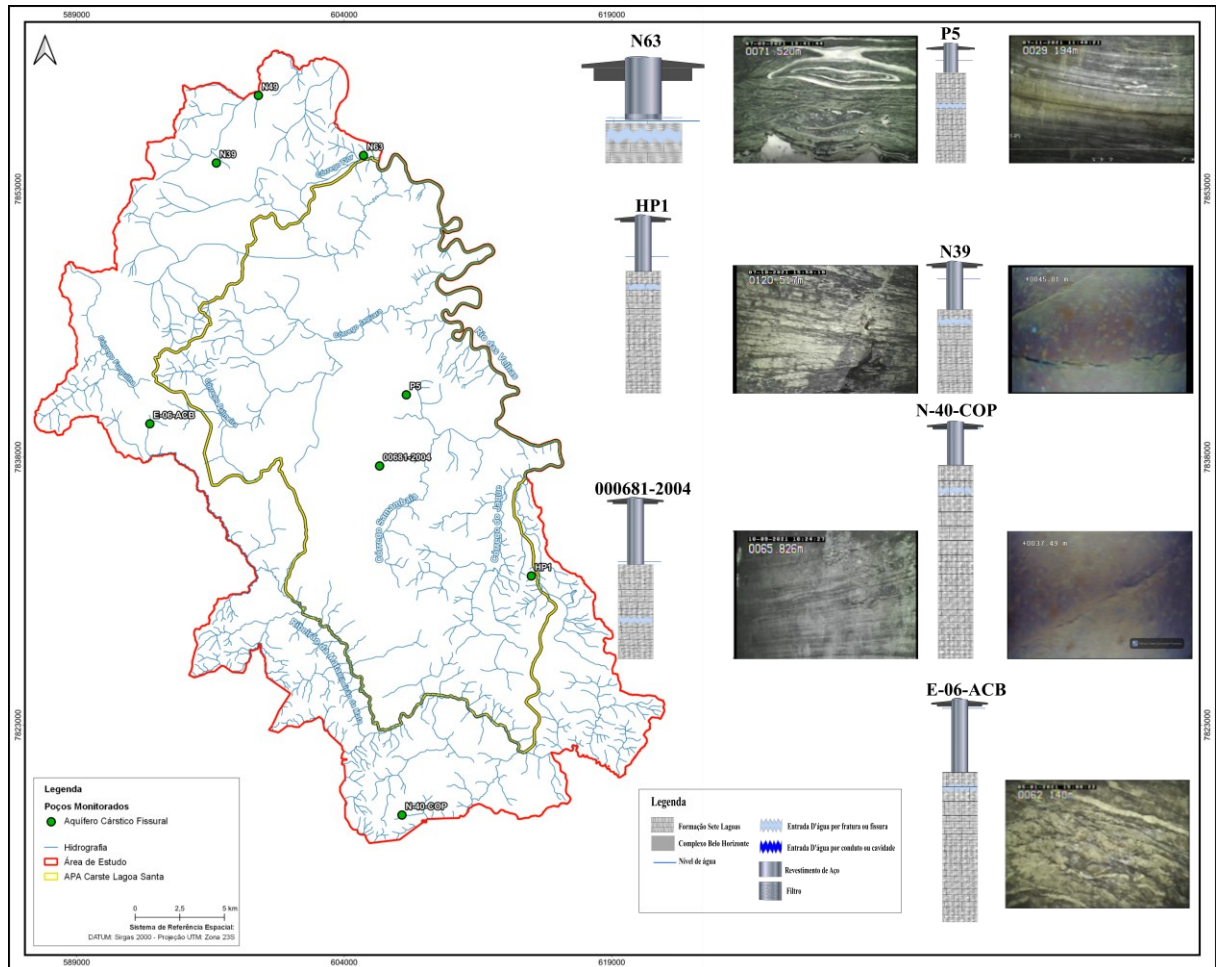


Figura 22: Mapa com a localização dos poços tubulares monitorados no compartimento aquífero cástico-fissural, destaque para fotos obtidas durante o processo de perfilagem dos poços.

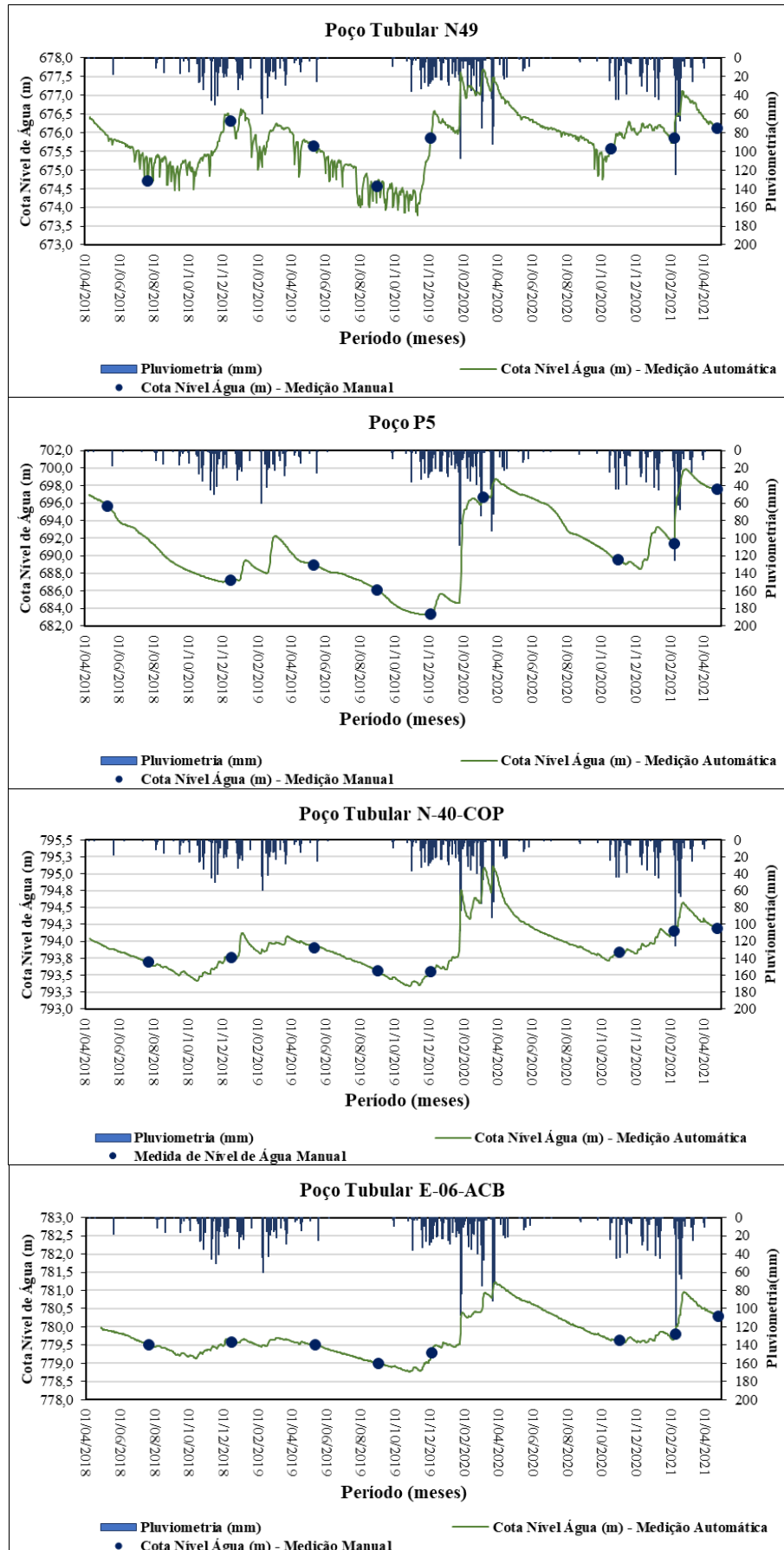
De um modo geral, para os poços pertencentes Grupo 1 (Figura 23), N49, P5, N40-COP, 00681-2003 e E-06-ACB observam-se comportamentos bastante similares, com respostas sistemáticas à sazonalidade e a eventos de pluviométricos isolados. Nota-se uma descarga mais lenta nesses poços comparada aos localizados no compartimento aquífero cástico.

Verificou-se que ao longo do tempo de monitoramento houve uma leve depleção no nível de base de todos os poços monitorados no fim do período de recessão do primeiro ano hidrológico em relação ao fim do período de recessão do segundo ano hidrológico. Na maioria dos poços esse decréscimo no nível de base foi mais acentuado do que nos poços localizados no compartimento aquífero cástico. Posteriormente, entre o segundo e o terceiro ano hidrológico houve um incremento no nível de base desses poços tubulares. Salienta-se que o aporte pluvial mais expressivo no último ano de monitoramento é um condicionador para esse aumento no nível de base verificado nesses poços.

De forma individual, é válido comentar as séries históricas compostas para os poços N49, N63 e 000681-2004, nos quais observaram-se comportamentos distintos dos demais poços. Ao se avaliar o gráfico composto para o poço N49 é possível perceber que as variações anuais e sazonais estão em conformidade com o identificado para os outros poços monitorados, todavia, as oscilações de nível diária, por vezes chegam a 0,5 m. Tais oscilações formam franjas que são observadas em todo o gráfico composto para o monitoramento desse poço. Pela localização do poço, instalado em área residencial, interpreta-se que operações de exploração de água subterrânea devem ocorrer de forma regular no seu entorno.

O Poço N63 encontra-se sob pressão atmosférica, com entradas de água tanto da cobertura regolítica quanto da rocha calcária. Este poço destaca-se no Grupo 1 por sua rápida resposta aos eventos de chuva, porém com recessão sazonal muito lenta. No primeiro ano hidrológico, o nível d'água se elevou modesta e continuamente em resposta ao período chuvoso, seguido de uma recessão bastante lenta durante a estiagem. No segundo ano ocorreu uma significativa acreção, porém, sem a ocorrência da recessão esperada nos meses de estiagem, atingindo patamares cada vez mais elevados até o final do terceiro ano hidrológico. É possível que esse comportamento seja oriundo do caráter misto do poço, que pode estar sendo alimentado com defasagem de tempo entre uma e outra entrada de água (entrada de água superior e inferior).

Ainda, no Grupo 1, observou-se que o nível de água no 00681-2004 é profundo, se comparar com os demais poços monitorados, com profundidade maior do que 50 m. Este poço é marcado por uma inexpressiva elevação do nível d'água no primeiro ano hidrológico, denotando ínfima recarga. Como, nesse grupo de poços, a carstificação é menos desenvolvida, espera-se que as recargas ocasionem maiores variações no nível de água subterrânea. Em seguida, notou-se uma longa resseção até meados de novembro. No segundo ano, com o aumento da precipitação, o nível de água se eleva substancialmente seguido, desta vez, de uma rápida recessão. Assim, uma característica marcante observada no local deste poço, ao contrário dos demais poços do grupo, é uma descarga mais rápida quando a recarga é significativa, é válido correlacionar essas variações ao maior grau de saturação desse compartimento aquífero, bem como a um efeito pistão que causa um aumento da pressurização dessa formação e posteriormente um alívio, quando uma descarga ocorre, condição corroborada pelas hipóteses de Ribeiro (2019).



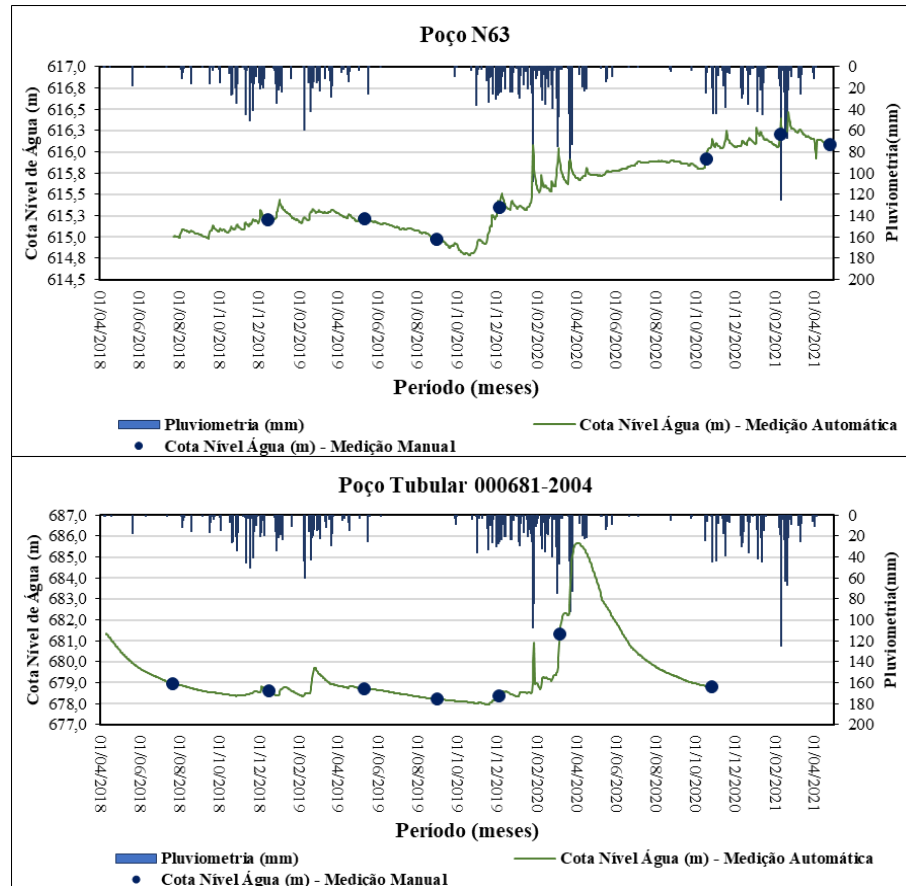


Figura 23: Séries históricas do monitoramento do nível de água subterrânea dos poços tubulares localizados no compartimento aquífero cárstico-fissurais.

Os outros dois poços que compõem o Grupo 2 (HP1 e N39) (Figura 24) possuem elevada profundidade do nível d'água: maior que 34 m e maior que 20 m, respectivamente, o que pode contribuir para o comportamento anômalo do nível d'água em função da precipitação.

Quanto ao poço N39, nos dois primeiros anos hidrológicos, são identificados picos curtos e momentâneos do nível d'água indiferentemente aos eventos de precipitação. Tal comportamento ocorre a despeito de um decréscimo contínuo do nível d'água durante todo esse período, ~1 (um) m no total, provocado por uma descarga continuada até meados de janeiro/2020. A partir daí ocorre uma elevação contínua e significativa do nível d'água de aproximadamente 07 (sete) m, mantendo, de forma incomum, esse nível elevado desde meados de maio/2020 até final do mês de outubro/2020. No terceiro ano, logo no início da precipitação sazonal, todo o ganho de 07 (sete) m é perdido bruscamente em poucos dias. Esse complexo histórico parece refletir a influência da operação de poços nas proximidades do poço N39. Não se descarta também, que seja o resultado da pressurização das raras descontinuidades que acarretariam uma recarga lenta, e, em contrapartida, quando há uma

rápida despressurização proveniente de um período de estresse hídrico haveria também, uma rápida depleção no nível d'água. O fraco grau de fraturamento pode ser constatado na perfilagem ótica realizada.

O poço HP1 possui um comportamento muito semelhante ao poço N39 (Figura 24), com ausência de acreção sazonal no primeiro ano hidrológico a despeito das chuvas incidentes. Ao contrário, houve uma depleção contínua de ~1,4 m até meados de dezembro/2019. A partir daí ocorre uma elevação lenta do nível d'água de aproximadamente 0,8 m, mantendo, este nível desde meados de abril/2020 até meados de julho/2020, isto é, no período de seca e de baixa recarga, seguido de uma descarga lenta. Tal comportamento pode ser o reflexo das fraturas de pouca espessura observadas na perfilagem ótica, com baixa capacidade para condução de água subterrânea, bem como a elevada profundidade do nível d'água, maior que 35 m.

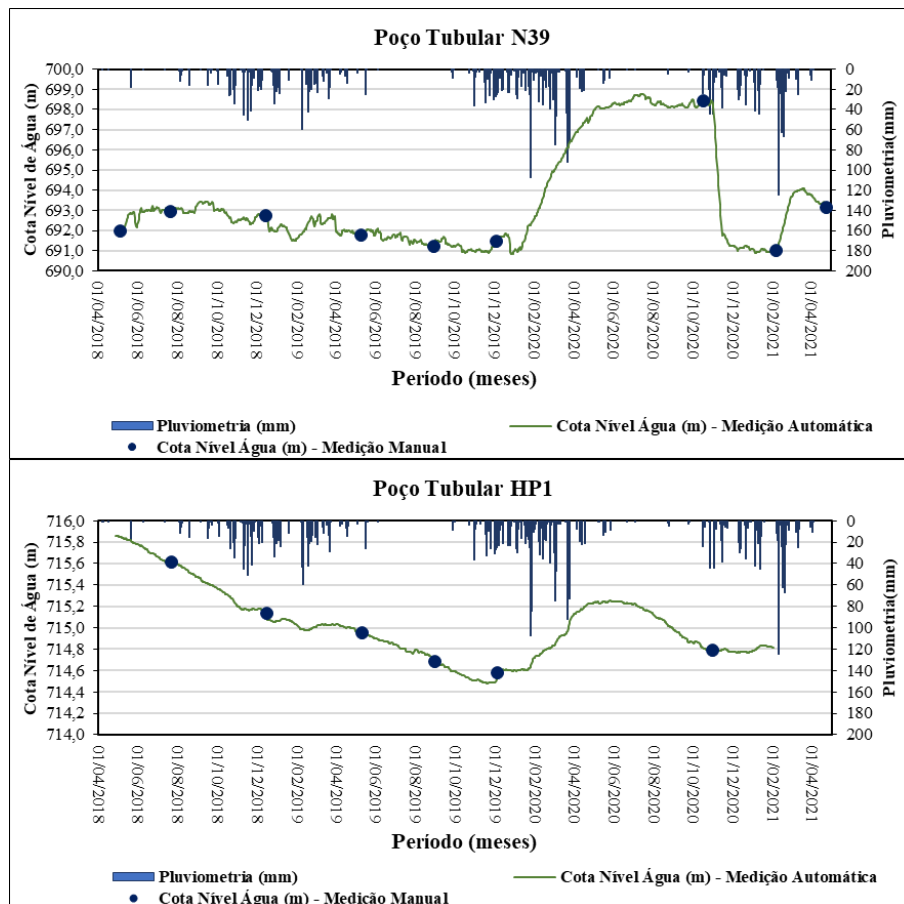


Figura 24: Série histórica do monitoramento do nível de água subterrânea dos poços tubulares localizados no compartimento aquífero cárstico-fissurais.

Em geral, as diferenças entre os níveis d'água são mais elevadas neste compartimento em relação ao compartimento aquífero cárstico. Em 04 (quatro) poços a diferença entre o

nível de água subterrânea mais raso e mais profundo é maior do que 05 m, condição que pode ser atribuída ao maior grau de pressurização observado nesse compartimento (Figura 25). Dito isso, assim como nos poços localizados no compartimento aquífero cárstico, nos poços localizado nesse compartimento identificaram-se maiores diferenças entre os níveis de água mais rasos e mais profundo no último ano de monitoramento, situação ocasionada pelo maior aporte de água pluvial ocorrido durante o período de chuva.

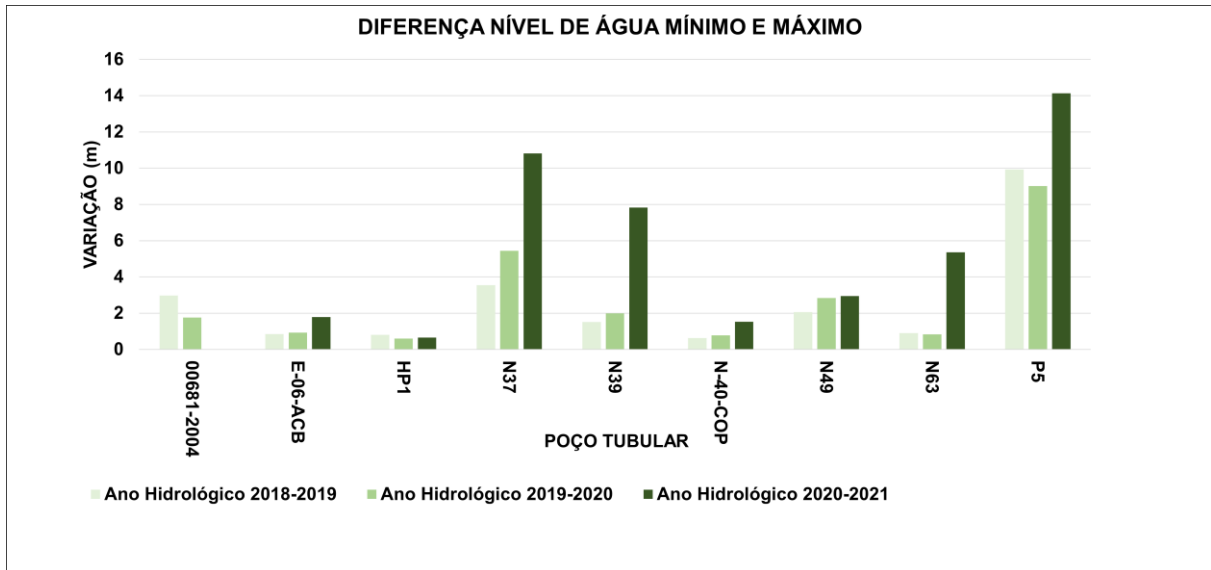


Figura 25: Variação por ano hidrológico do nível de água subterrânea de cada poço no compartimento aquífero cárstico-fissural, em metros

5.1.2.3 Series Históricas – Poços Localizados no Compartimento Aquífero Fissural

Foram monitorados três poços instalados na unidade aquífera fissural das rochas do embasamento cristalino. Trata-se de um aquífero livre com poços do tipo misto, isto é, possuem entradas de água no meio granular e no meio rochoso. Todavia, as entradas de água em rochas do embasamento são escassas e compostas por fraturas de espessura milimétrica a poucos centímetros (Figura 26).

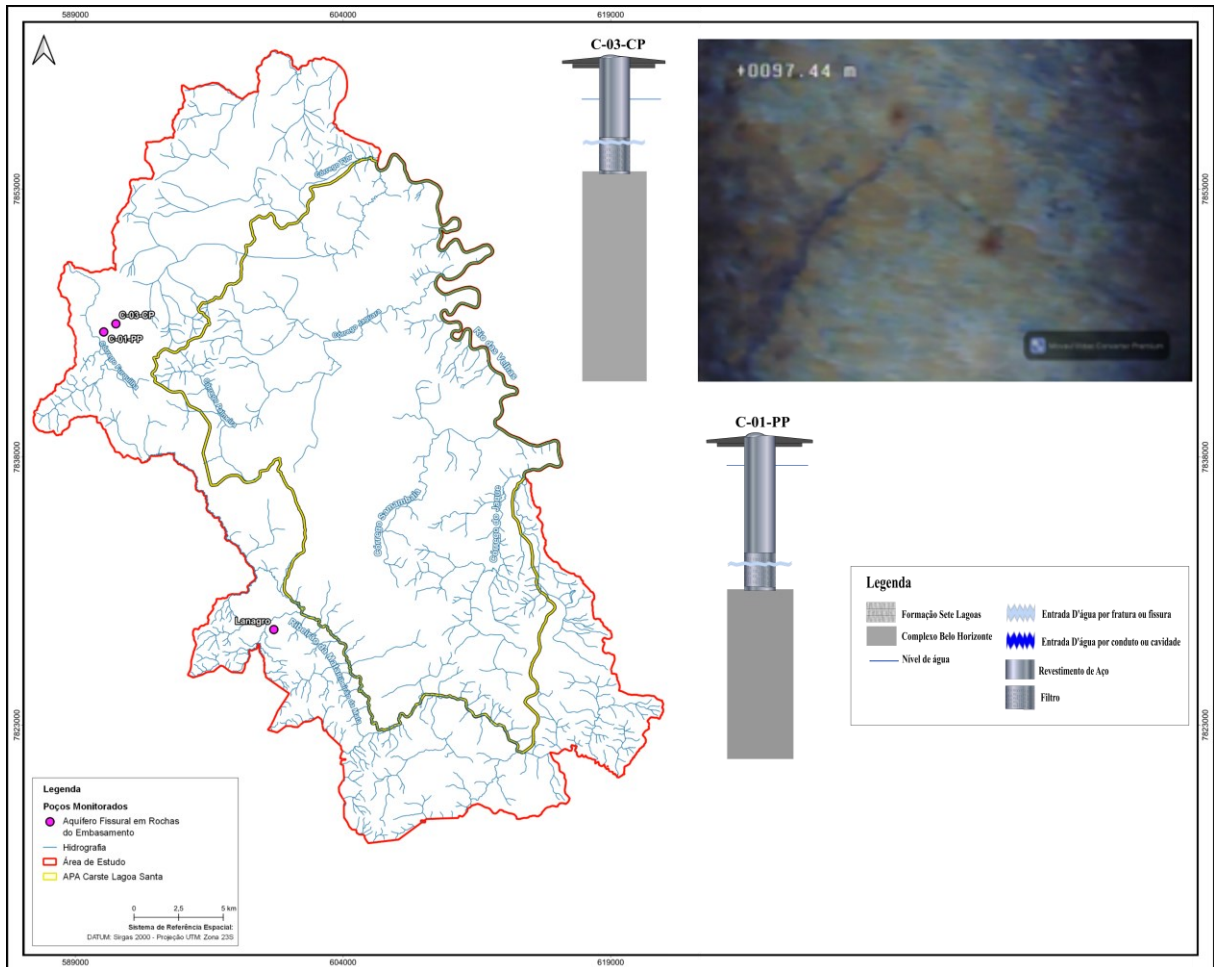


Figura 26: Mapa com a localização dos poços tubulares monitorados no compartimento aquífero fissural, com destaque para foto retirada do poço C-03-CP durante o processo de perfilagem do poço, único perfilado nesse compartimento aquífero.

O gráfico do poço C-01-PP exibe uma nítida variação sazonal do nível d'água (Figura 27), mantendo uma acreção até o mês de julho, seguida de rápida depleção. Todavia, existem frequentes quedas pontuais no nível d'água ao longo de todo o período de monitoramento, tanto nos períodos de recarga quanto de descarga. As boas condições de recarga podem ser observadas também pelas respostas rápidas aos eventos de chuva.

O gráfico do poço C-03-CP (Figura 27) mostra padrão de acreção sazonal rápida e depleção lenta, com nítidas respostas pontuais aos eventos pluviométricos, mostrando boas condições de recarga, sem apresentar as quedas bruscas como no poço C-01-PP, indicando a ausência de pressurização. Este poço aparenta estar sob condições naturais, sem a influência de operações de poços em suas imediações.

O poço Lanagro (Figura 27) teve um monitoramento do nível d'água reduzido apenas ao último ano hidrológico (2020/2021), o que foi tempo suficiente para se constatar a influência

de bombeamento nas suas proximidades, evidenciado por curtas quedas e recuperações ao longo de todo o período monitorado, a despeito da sazonalidade pluviométrica. Apesar disso, constata-se uma acreção sazonal de nível de água com o pico referente à essa acreção bastante retardado (meados de março/2021), muito provavelmente pelo efeito de bombeamento de água subterrânea nas proximidades do poço.

Ainda, pode se visualizar que ao longo do tempo de monitoramento houve uma leve depleção no nível de base dos poços C-01-PP e C-03-CP, identificado no fim do período de recessão do primeiro ano hidrológico em relação ao fim do período de recessão do segundo ano hidrológico. Já, entre o segundo e o terceiro ano hidrológico houve um incremento no nível de base desses poços tubulares. O aporte pluvial mais expressivo no último ano de monitoramento é um condicionador para esse aumento no nível de base medido nesses poços.

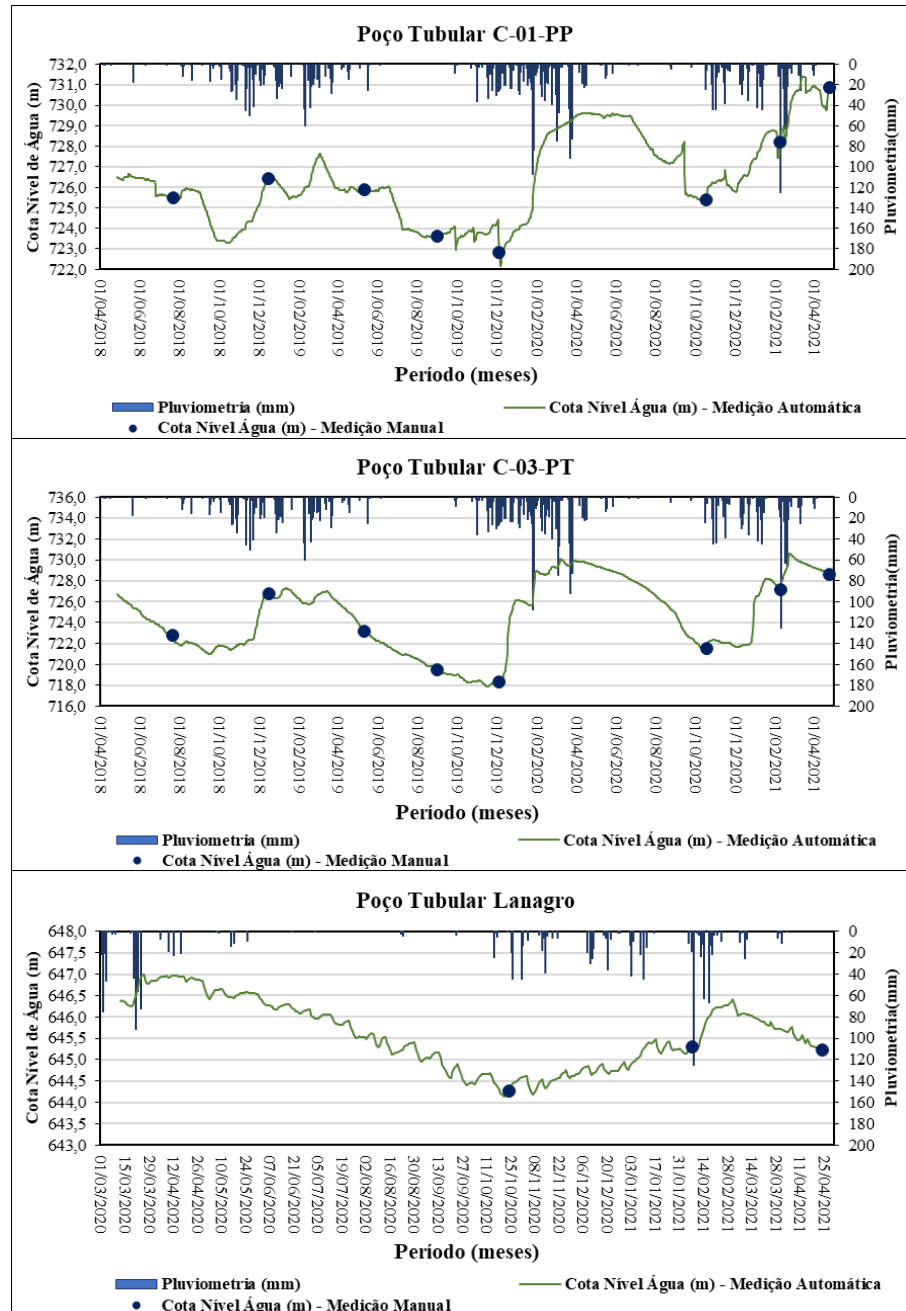


Figura 27: Séries histórica da variação do nível de água dos poços monitorados localizados no compartimento aquífero fissural.

Neste compartimento aquífero, as diferenças entre os níveis d'água são mais elevadas do que nos compartimentos correlacionados às rochas cársticas. Nos dois poços onde se tem uma série histórica maior, a diferença entre o nível de água subterrânea mais raso e mais profundo é maior do que 05 m (cinco) (Figura 28). Além disso, destoando do observado nos poços localizados nos compartimentos aquíferos em rochas calcáreas, nos poços localizado

nesse compartimento identificaram-se maiores diferenças entre os níveis de água mais rasos e mais profundo no poço C-03-CP no segundo ano de monitoramento.

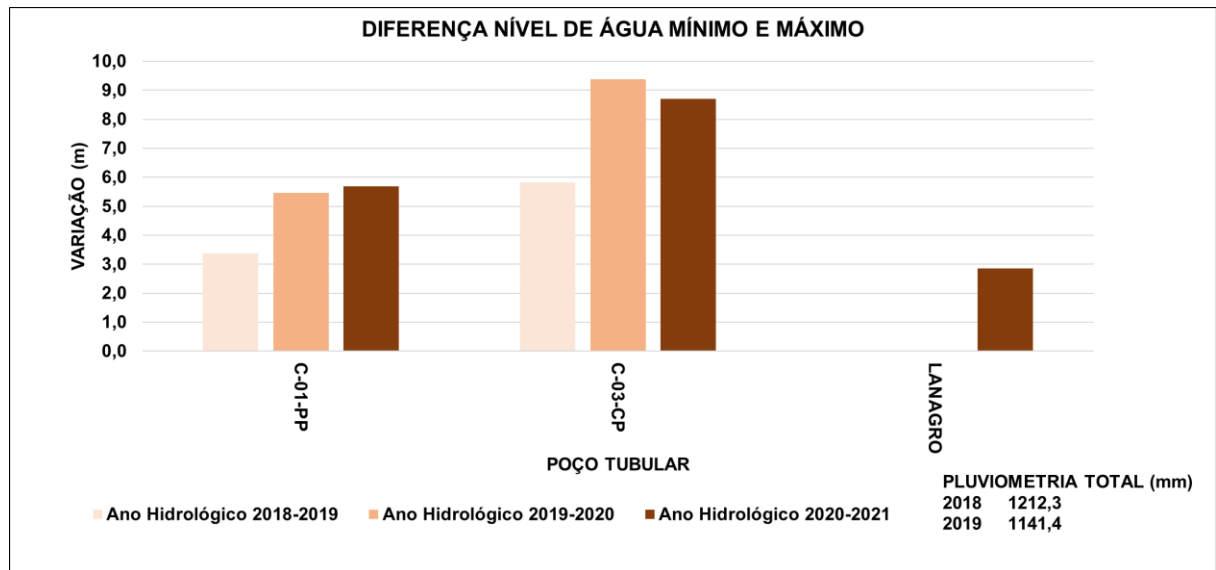


Figura 28: Variação por ano hidrológico do nível de água subterrânea de cada poço no compartimento aquífero fissural, em metros

5.2 *Análise dos dados de monitoramento*

5.2.1 *ANÁLISE ESTATÍSTICA*

Inicialmente, neste item, serão apresentados os resultados alusivos aos modelos MLG elaborados para as séries históricas de monitoramentos dos poços locados nos compartimentos aquífero cárstico e cárstico-fissural. Em seguida serão apresentados os resultados das correlações cruzadas entre os dados de pluviometria e das variações dos níveis freáticos de todos os poços.

5.2.1.1 Modelos Lineares Generalizados (MLG)

Os resultados estatísticos de MLG são apresentados na Tabela 2. Destaca-se que na coluna descrita como “Variável Resposta” encontram-se as variáveis que devem ser influenciadas pela coluna da “Variável Explicativa”.

Tabela 2: Apresentação dos modelos estáticos elaborados para avaliação das séries históricas obtidas

Modelo	Variável resposta	Variável Explicativa	<i>p</i>
1	Diferença entre nível de água máximo e mínimo	Pluviometria	0,001
2	Somatório valores positivos de variação do nível de água	Pluviometria	0,001
3	Cota do nível de água	Compartimento Aquífero	0,001
4	Cota entrada de água	Compartimento Aquífero	0,001
5	Somatório valores positivos de variação do nível de água	Compartimento Aquífero	0,087
6	Somatório de toda variação do nível de água	Compartimento Aquífero	0,94
7	Cota do nível de água máximo	Compartimento Aquífero	0,001
8	Cota do nível de água mínimo	Compartimento Aquífero	0,001
9	Variação máxima do nível de água	Compartimento Aquífero	0,001
10	Variação mínima do nível de água	Compartimento Aquífero	0,001
11	Somatório de toda variação do nível de água	Cota entrada de água	0,981

Se $p < 0,05$ a Variável Explicativa influencia a Variável Resposta

Ao se estruturar um modelo linear não generalizado, busca-se um método estatístico que auxilie no entendimento de se uma variável é capaz de interferir ou alterar uma outra variável. Essas respostas podem ser associadas, assim, ao valor de p apresentado na Tabela 2. Entendendo-se que interações onde o p valor calculado é maior do que 0,05 não correspondem a uma correlação entre as variáveis avaliadas, se tem como resultado que nos modelos 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 e 10 há uma influência da variável explicativa na variável resposta, enquanto nos modelos 5, 6 e 11 essa influência não foi observada. Assim, destacam-se as seguintes condições:

- Em ambos os compartimentos aquíferos monitorados não é observada uma correlação entre a compartimentação hidrogeológica e o somatório de todas as variações de nível de água, bem como essa correlação também não existe quando comparada ao somatório das variações positivas do nível freático. Observa-se que a pluviometria é a variável que tem influência tanto nos valores de amplitude entre o nível máximo e mínimo observado nos poços, assim como no somatório das variações positivas calculados para os pontos monitorados. Todavia, é importante salientar que as características hidrodinâmicas e a morfologia dos condutos, cavidades, fissuras e descontinuidades podem influenciar na velocidade com que essas variações ocorrem, conforme descrito por Schevenell (1996);
- Há, sim, uma correlação entre os compartimentos aquíferos e as cotas das entradas de água observadas nos poços instalados nessas unidades hidrogeológicas, existe, também, uma correlação entre as cotas do nível freático, sejam elas máximas ou mínimas e o aquífero monitorado. Conforme apresentado nos diagramas *boxplot* ilustrados na Figura 29, as cotas das principais entradas de água do compartimento aquífero cárstico, assim como os níveis freáticos medidos nesse sistema estão, de forma geral, situadas em uma faixa específica, entre 650 e 700 m de altitude, enquanto no compartimento aquífero cárstico-fissural as entradas de águas e os níveis de água verificados em cada uma das estruturas monitoradas variam de 600 até 750 m de altitude. Os modelos estatísticos realizados condizem com as informações aprestandas no modelo hidrogeológico composto por De Paula (2019), e as cotas das entradas de água identificadas nesses compartimentos hidrogeológicos, ao serem associadas às profundidades dos compartimentos hidrogeológicos, são aderentes às profundidades informadas por Dantas, *et al.* (2023).

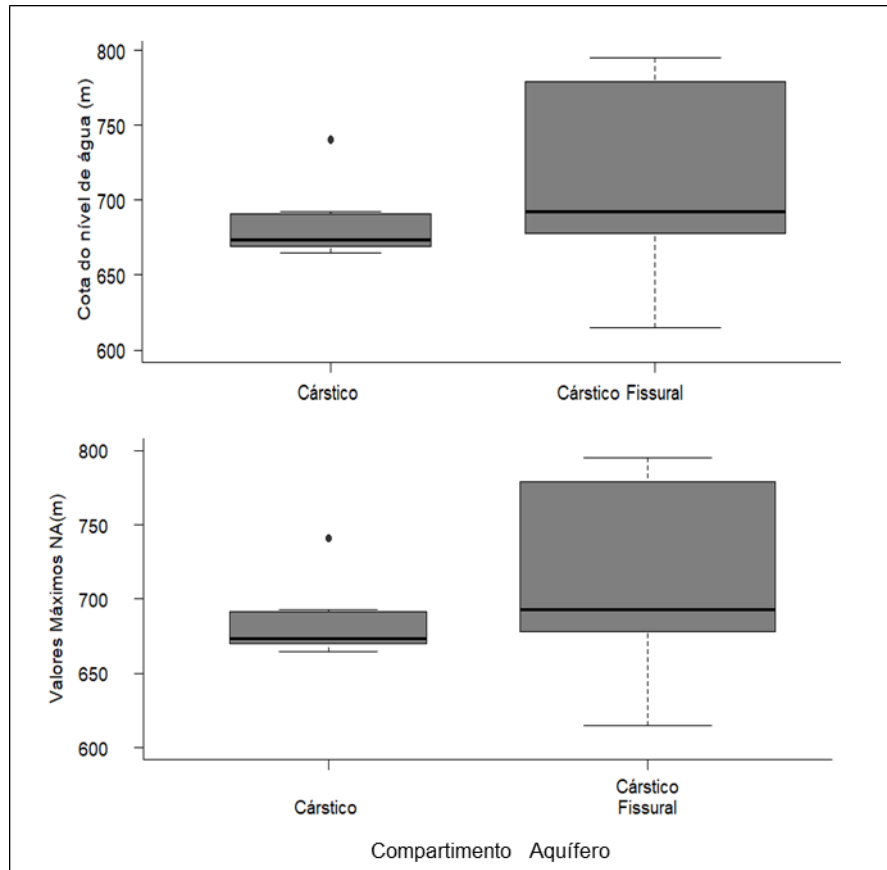


Figura 29: Gráfico *boxplot* com destaque a distribuição das cotas de entrada de água variações do nível de água nos sistemas aquíferos monitorados.

Ao se compreender que a pluviometria é a principal variável, dentre as que puderam ser mensuradas durante o período de monitoramento, que influencia nas variações de nível na área de interesse, se faz necessário compreender quais são as condições de recarga no entorno dos poços monitorados, visto que essa configuração irá influenciar diretamente no aporte de água pluvial para os aquíferos. As avaliações da recarga na área de estudo estão apresentadas no item 5.3 deste trabalho.

5.2.1.2 Correlação Cruzada e Avaliação do Tempo de Reação dos Compartimentos Aquíferos à Pluviometria

Sabendo-se da forte relação apresentada pelos modelos estatísticas entre a precipitação e as variações do nível de água subterrânea, foi realizada uma correlação cruzada dessas variáveis. Os dados obtidos a partir do uso do método empregado por Ferrari & Karmann (2008) para verificação do tempo de trânsito de carga hidráulica em um ambiente cárstico, foram comparados ao tempo necessário para se observar uma variação positiva no nível de

água dos poços monitorados, ou seja, o tempo necessário para que a cota do nível freático do poço se elevasse. Nos gráficos apresentados na Figura 30, Figura 31 e Figura 32 são exibidos os quantitativos de dias que se passaram até que uma variação no nível de água do poço fosse observada, após uma recarga, bem como a contagem de dias para que se pudesse observar uma correlação entre um evento pluviométrico e a variação do NA de um poço. .

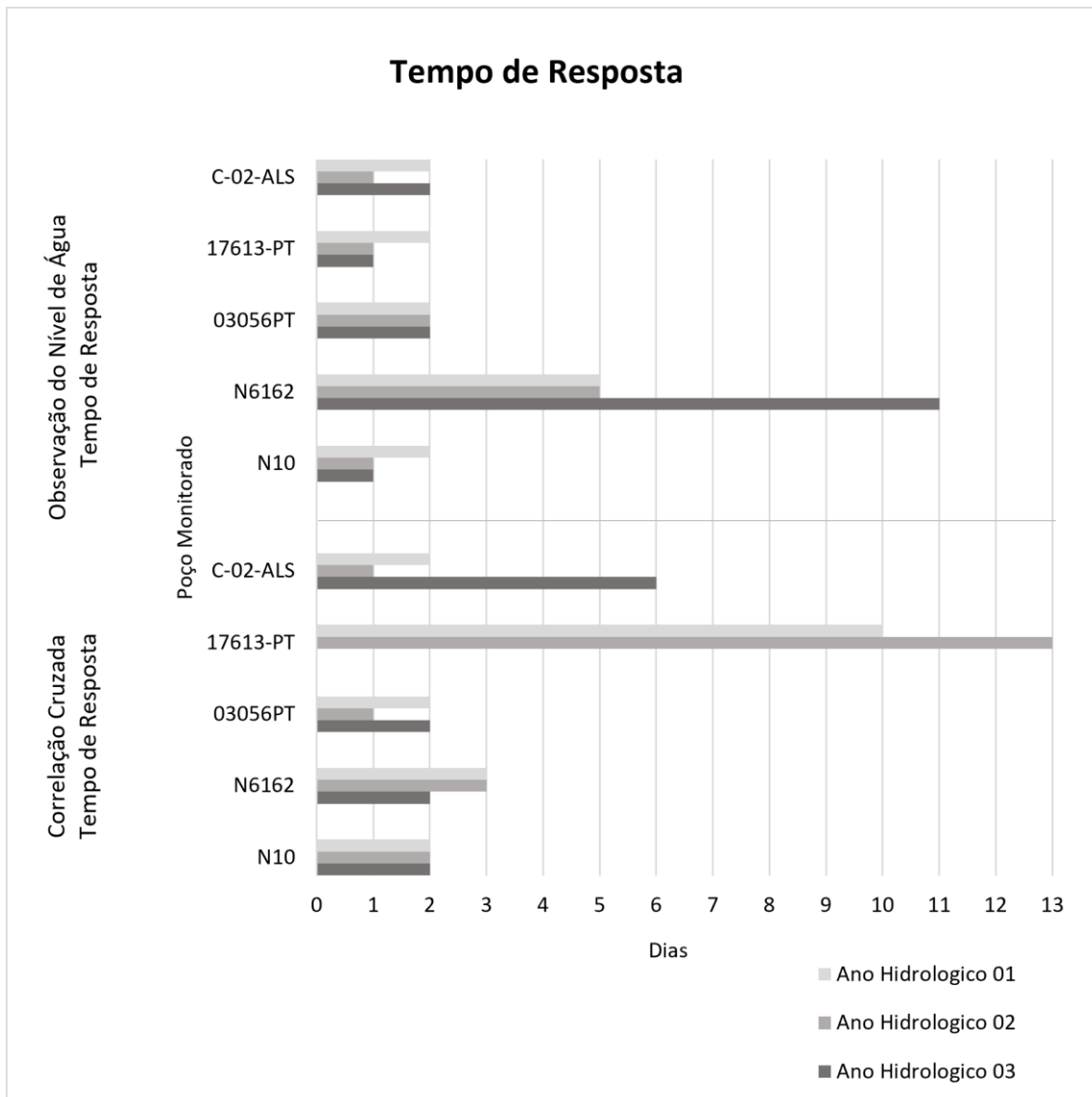


Figura 30: Resumo do tempo de necessário para se observar uma oscilação do nível de água em poços localizados no aquífero cárstico. (Fonte: Autor)

Nota-se que, durante os três anos hidrológicos, para os poços localizados no aquífero cárstico, os resultados da correlação cruzada e o observado de forma direta, foram similares, com diferenças, quando existentes de poucos dias. Com exceção do poço 17613-PT, onde se observaram maiores contrastes entre esses resultados. Pode-se concluir, de forma geral, que

para os poços onde a carstificação é mais bem desenvolvida o tempo de resposta a uma recarga é de 1 a 2 dias, como observado nos poços N10, 03056-PT, C-02-ALS e N6162.

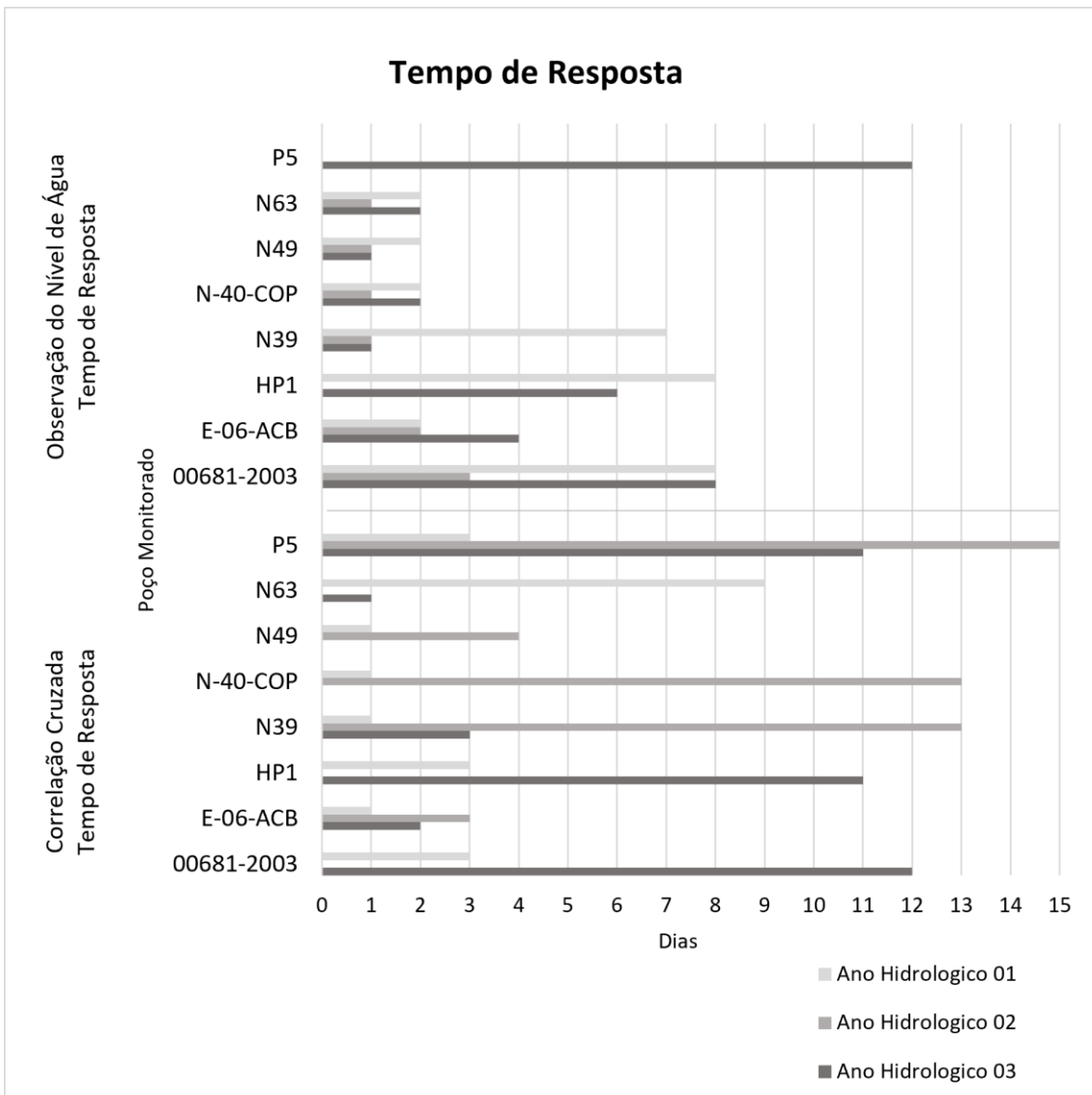


Figura 31: Resumo do tempo de necessário para se observar uma oscilação do nível de água em poços localizados no aquífero cárstico fissural. (Fonte: Autor)

Observa-se que, durante os três anos hidrológicos, para os poços localizados no aquífero cárstico fissural, os resultados da correlação cruzada e o observado de forma direta, foram divergentes para a maioria dos poços. Em diversos poços onde não foi observada, com o uso desta metodologia, uma boa correlação entre os *inputs* (aportes pluviais) e a variação no nível de água no poço. Tal condição pode estar associada a uma maior heterogeneidade do compartimento como um todo, de forma que as configurações, o grau de fraturamento e, também, o nível de saturação e pressurização das fraturas alteram as velocidades de fluxo de água subterrânea nesse sistema, no qual já é esperada uma velocidade de fluxo menor do que

no compartimento aquífero cárstico. Esse contexto é corroborado pelas definições de fluxo descritas por Dantas *et al* (2023), bem como pelo sistema de fluxo apresentado por Ribeiro (2019), no qual há uma circulação mais lenta em profundidades maiores, ou seja, principalmente, nas unidades onde a circulação de água ocorre em fraturas e descontinuidades. Por outro lado, pode se notar que um evento pluviométrico, fator predominante na recarga de um sistema aquífero, terá maior impacto e influência nas variações de nível de água no compartimento aquífero cárstico, fato esperado devido sua localização mais próxima ao exocarste e, conseqüentemente, às zonas de recarga autóctones.

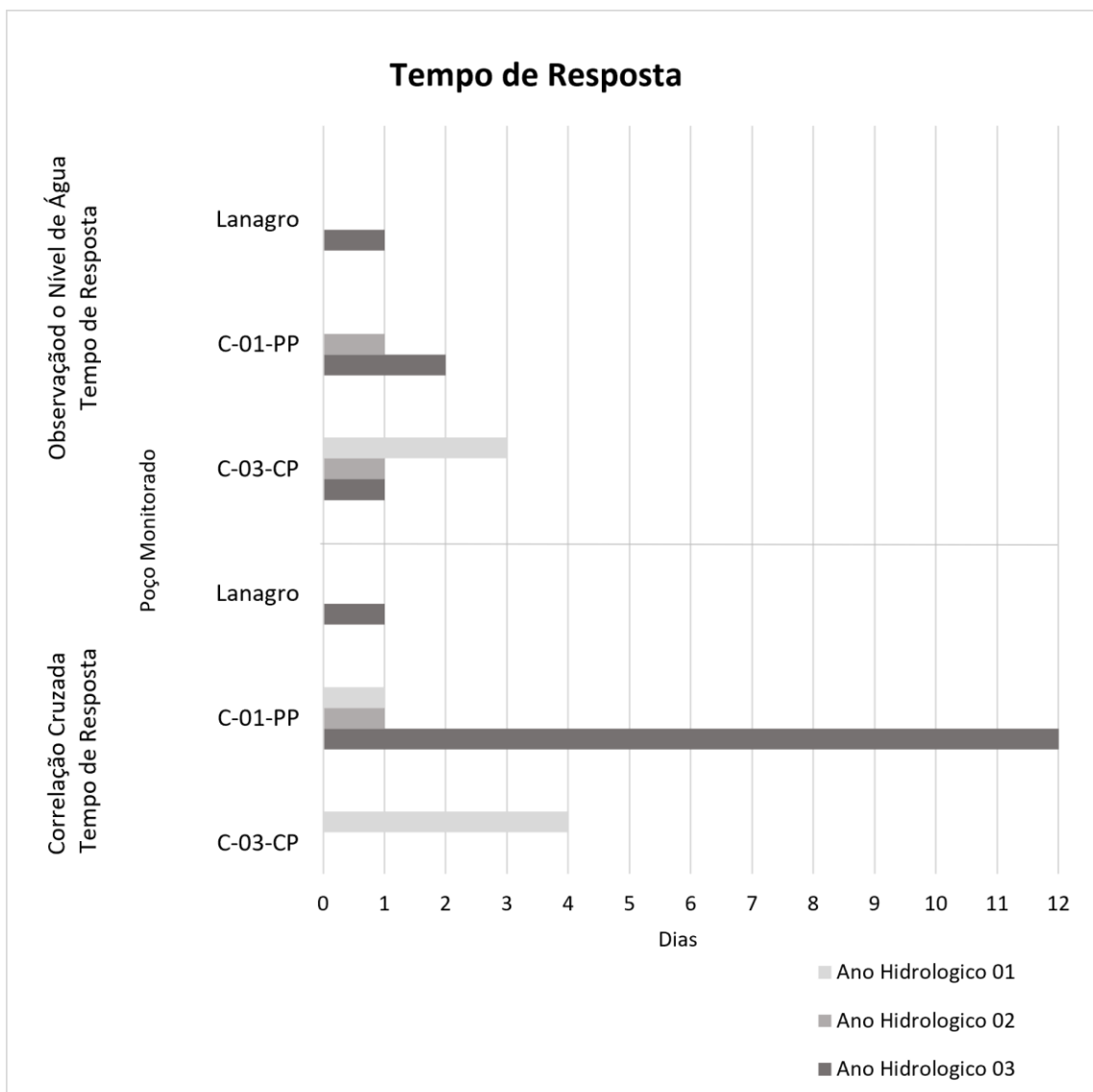


Figura 32: Resumo do tempo de necessário para se observar uma oscilação do nível de água em poços localizados no compartimento aquífero fissural. (Fonte: Autor)

Nota-se que, durante os três anos hidrológicos, para os poços localizados no aquífero fissural em rochas do embasamento, os resultados da correlação cruzada e o observado de forma direta, foram divergentes para a maioria dos poços, com diversos poços onde não foi observada, com o uso desta metodologia, boa correlação entre os *inputs* (aportes pluviais) e a variação no nível de água no poço. Essa condição se dá pela complexa forma de circulação de água nesse compartimento aquífero, complexidade que é acentuada pela decrescente condutividade hidráulica, que é reduzida à medida que a circulação de água se torna mais profunda, ocasionando diferentes velocidades para distintas direções de fluxo, conforme descrito por Dantas *et al.* (2023).

5.2.2 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO

Os mapas de isolinhas elaborados para espacializar os dados referentes às variações do nível de água ao longo do tempo de monitoramento são apresentados nas Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36. Os dados apresentados neste item serão avaliados no item 5.3 em conjunto com as informações de recarga, condutividade hidráulica e o modelo hidrogeológico proposto por De Paula (2019), considerando também as atualizações na compartimentação propostas Dantas *et al.* (2023).

A Figura 33 indica que os acréscimos positivos de nível de água medidos nos poços monitorados são uma resposta aos eventos pluviométricos que ocorrem na área de estudo, de forma que as variações do nível de água observadas são condicionadas, então, pela recarga dos compartimentos aquíferos a partir do aporte de água pluvial. Nota-se que os maiores valores acréscimo no nível de água ocorrem na porção noroeste, central e sul/sudeste da área de estudo. É importante evidenciar que esses acréscimos independem do compartimento hidrogeológico monitorada. Assim, observam-se acreções significativas tanto em pontos de monitoramento situados no compartimento aquífero cárstico, quanto no cárstico fissural e fissural.

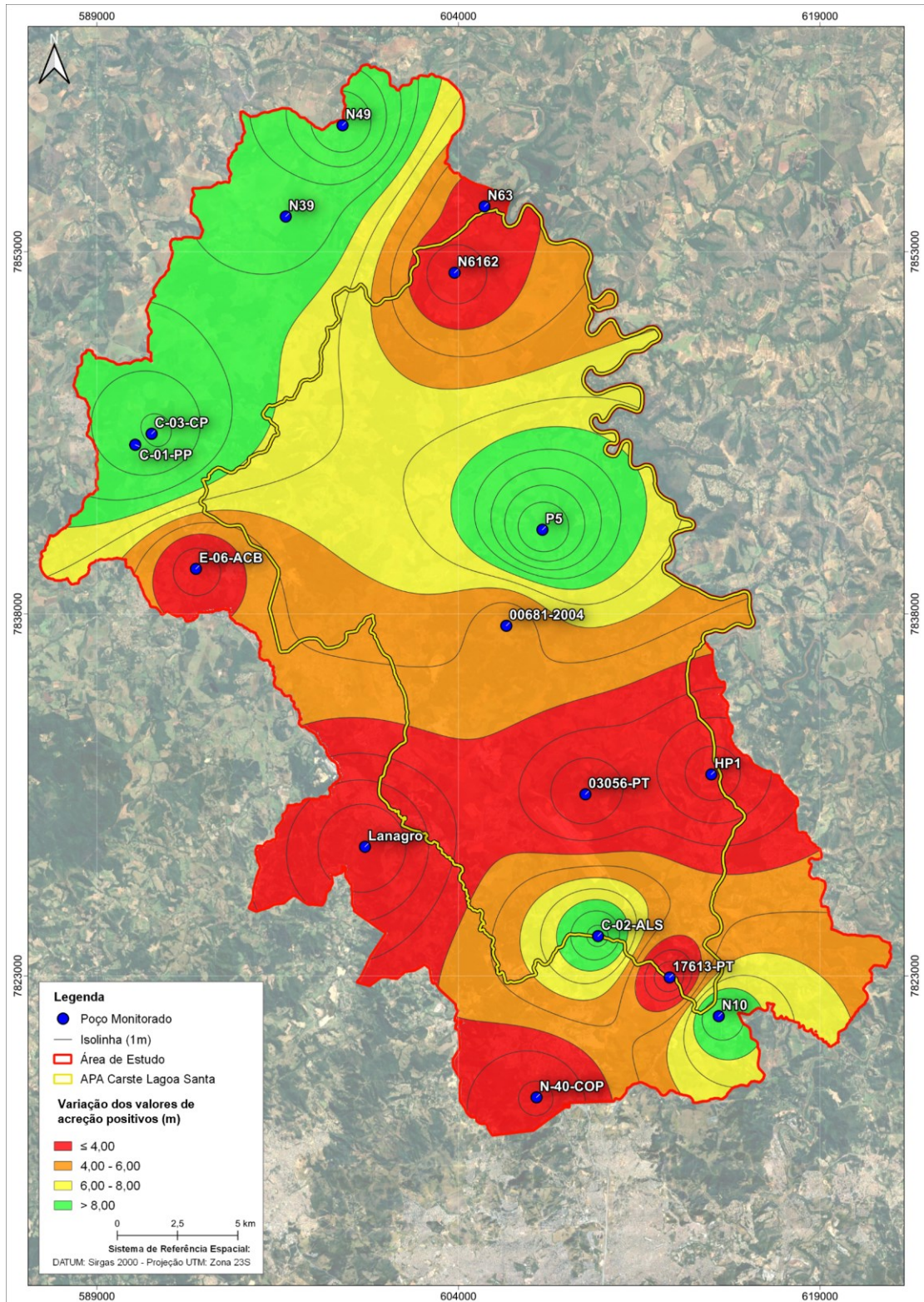


Figura 33: Mapa de isolinhas com destaque para a distribuição espacial dos valores de acreção positivos medidos durante o período de monitoramento hidrogeológico.

A partir da avaliação da amplitude entre os valores máximos e mínimos de nível d'água nos poços monitorados é possível se identificar, na área de estudo, quais são as regiões

onde os acréscimos positivos podem ser associados a uma recarga efetiva do aquífero, ou seja, qual a capacidade da unidade hidrogeológica avaliada de reter e armazenar os aportes de água recebidos. Neste contexto, nota-se que há uma maior amplitude entre os valores de nível de água máximos e mínimos na região onde estão instalados o poço P5 e os poços C-01-PP e C-03-CP, na porção norte da área encontram-se valores intermediários para a variável observada enquanto na porção sul da área de interesse foram medidas as menores diferenças entre os NA's mais profundos e mais rasos. Assim, entende-se que nas porções onde a amplitude é menor, os aportes de água pluvial para o aquífero não são rapidamente descarregados, de forma que o tempo de armazenamento dos volumes de água que chegaram ao compartimento aquífero monitorado é maior. É importante salientar que essa diferença entre o nível de água mais raso e mais profundo não está relacionada com a velocidade de trânsito da água no sistema aquífero, mas sim com os volumes de água que ficam retidos nesse sistema.

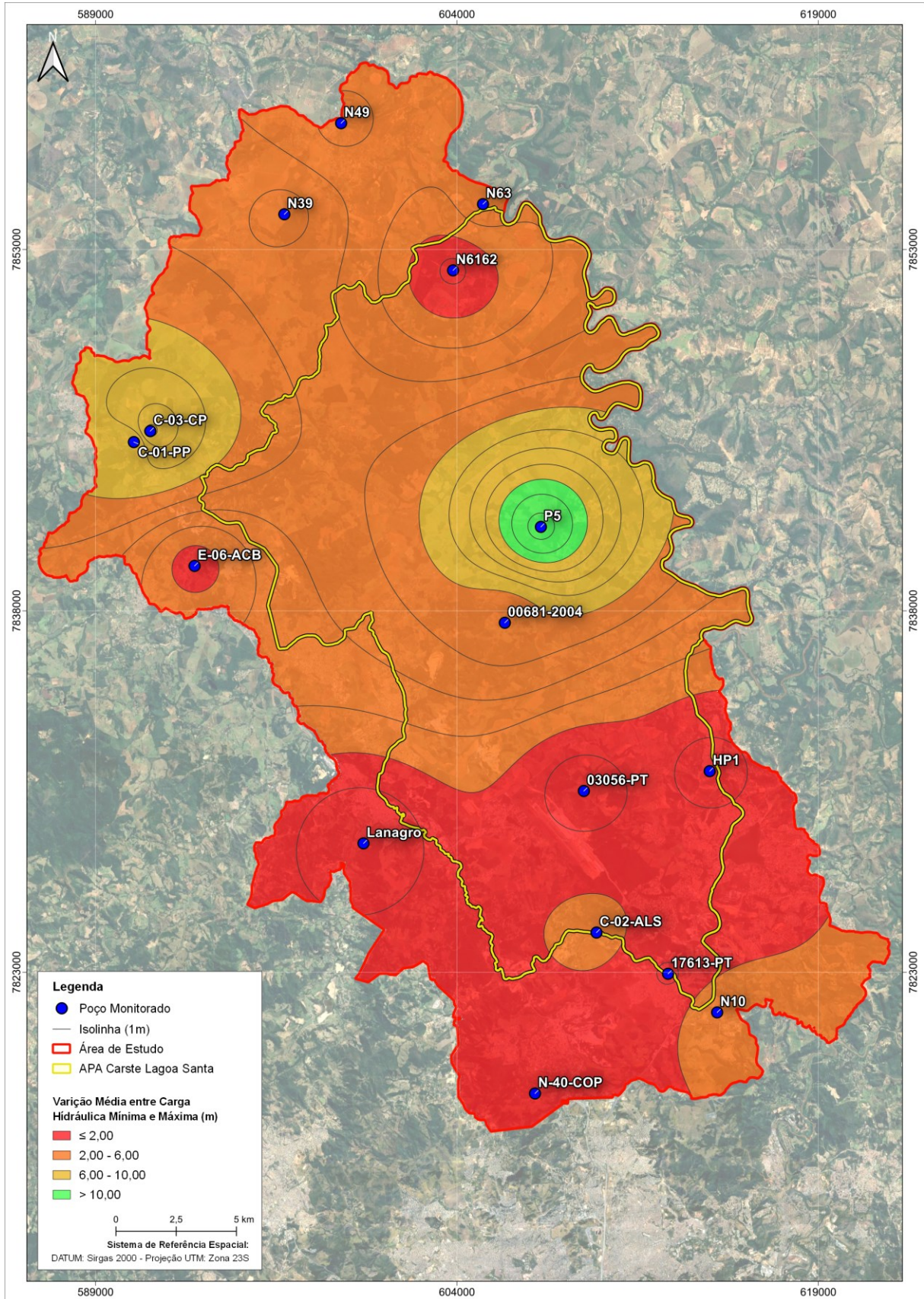


Figura 34: Mapa de isolinhas com destaque para a distribuição espacial dos valores da amplitude entre os níveis de água máximos e mínimos medidos durante o período de monitoramento hidrogeológico.

Para entender quais são as influências de fatores externos na dinâmica hídrica subterrânea da área de estudo, é necessário avaliar quais são as zonas dentro da região de interesse onde ocorrem as maiores interferências no recurso hídrico subterrâneo. Dessa forma, a espacialização das vazões que podem ser captadas por poços tubulares. A capacidade de captação observada nesses poços utilizados para abastecimento e atendimento das demandas urbanas e rurais, auxilia na compreensão de quais são os locais onde se pode ter um maior estresse hídrico. Isto posto, no mapa ilustrado na Figura 35 são apresentados os poços tubulares e as vazões passíveis de serem bombeadas nessas estruturas de captação. Tais poços encontram-se majoritariamente instalados na porção sul da área do projeto, região, também, onde se identificam os maiores valores passíveis exploração.

São apresentados, ainda, os valores referentes aos somatórios de todas as variações dos níveis de água medidos nos poços monitorados, o que possibilitou especializar as regiões com balanços positivos e negativos ao final do período de coleta de dados. Conforme identificado na Figura 36, na região sul da área do projeto, área onde há o maior contingente de poços tubulares com capacidades para exploração de volumes maiores de água subterrânea, existe também um déficit no balanço hídrico, com diversas áreas com redução da profundidade da superfície potenciométrica ao final do período de monitoramento.

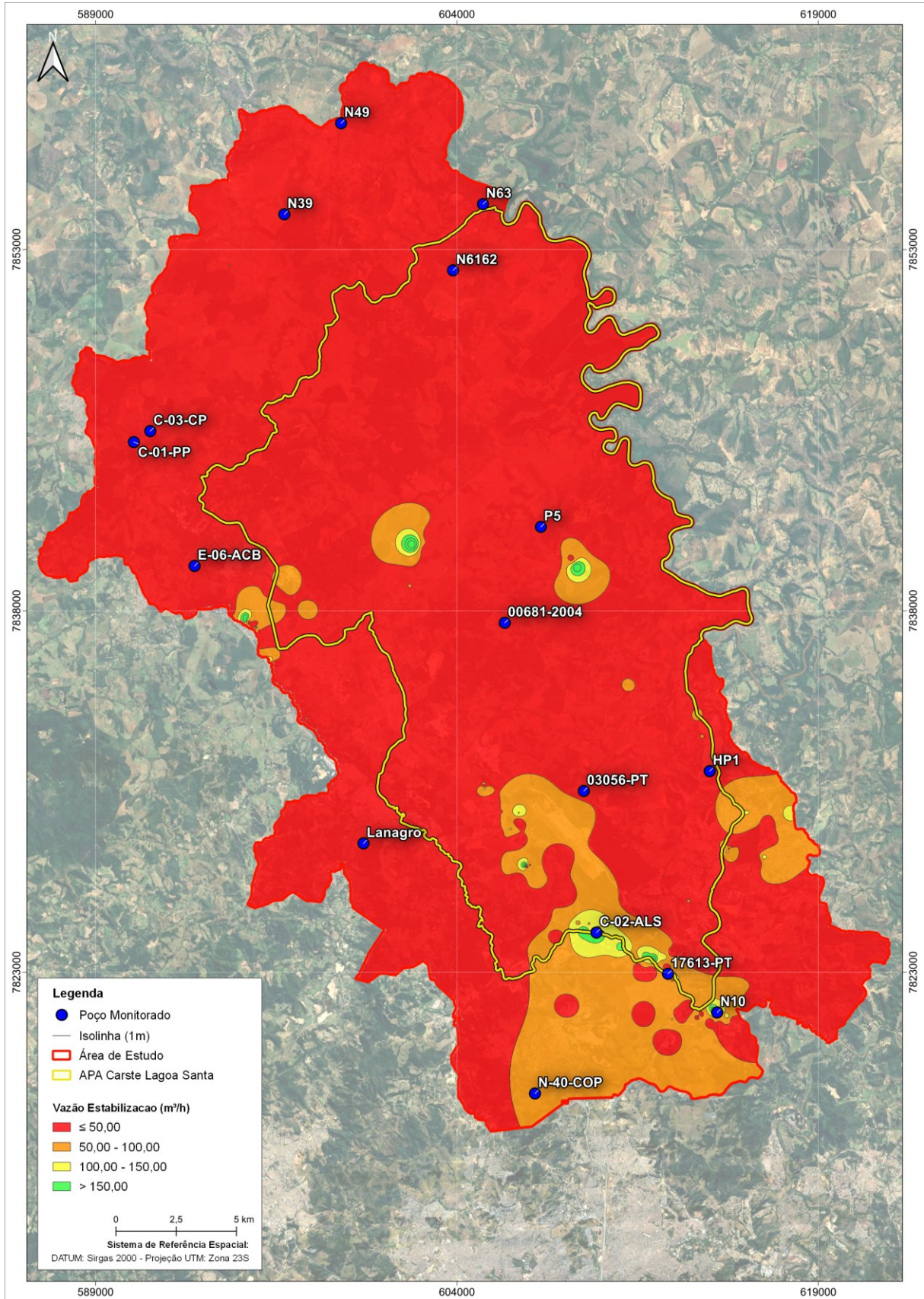


Figura 35: Mapa de isolinhas com destaque para a distribuição espacial dos poços tubulares e vazões captadas na área do projeto.

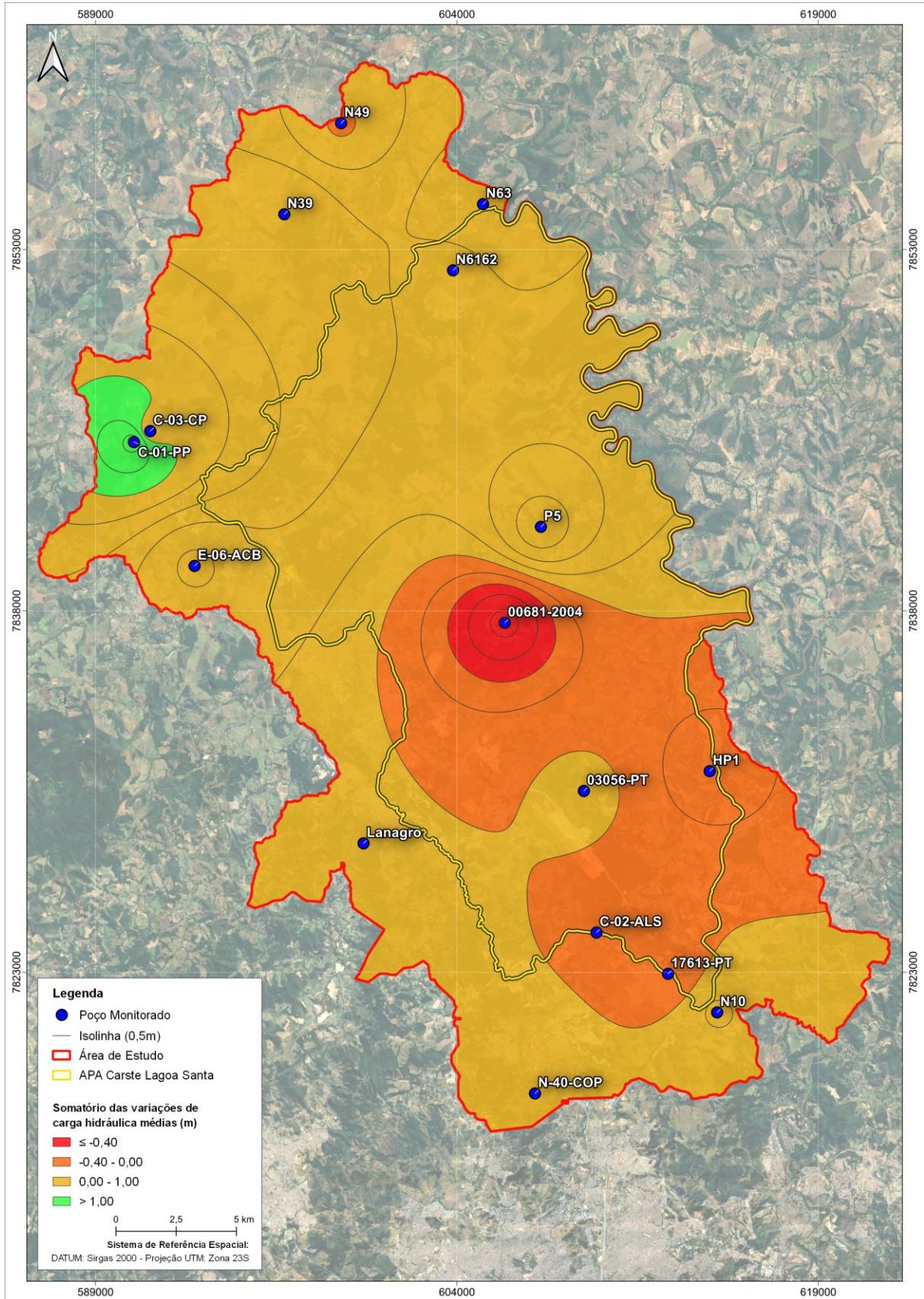


Figura 36: Mapa de isolinhas com destaque para a distribuição espacial dos somatórios de todas as variações de nível de água observadas durante o monitoramento hidrogeológico.

Ao se realizar a avaliação conjunta dos mapas de isolinhas compostos para os acréscimos positivos; da variação entre os valores máximos e mínimos do nível de água subterrânea e do somatório de todas as variações piezométricas aferidas, observa-se um maior aporte de água subterrânea para as áreas situadas na região noroeste, centro-leste e sudoeste da área de estudo; entretanto, esses acréscimos não resultam em uma maior variação entre os níveis de água máximos e mínimo observados nos mapas, como pode ser visto na porção sudoeste e sul da área, zona onde também se notaram maiores valores de saída de água subterrânea do que o aporte para os compartimentos aquíferos locais. Tal condição indica uma maior retirada de água do aquífero em relação aos volumes aportados para o sistema, nesse caso, referente ao somatório dos acréscimos positivo medidos durante o monitoramento. Ademais, essas retiradas são corroboradas pelo alto volume de poços, dos quais muitos têm boa capacidade de exploração, principalmente, na região sul da área de interesse. Nessa porção encontram-se os maiores municípios e as maiores densidades populacionais localizadas na área de estudo, o que também é corroborado pelo balanço hídrico apresentado por De Paula (2019) para a área da APACLS, no qual o autor comprova o déficit na reserva de água subterrânea na região.

5.3 Validação da Rede Monitoramento

De maneira geral, a distribuição espacial dos pontos de monitoramento de água subterrânea, para os quais foi possível estabelecer uma série histórica satisfatória, constitui uma rede heterogênea de monitoramento que ainda precisa ser complementada, visto a falta de instrumentos de monitoramento na porção centro-norte da área de interesse. No entanto, essa rede de monitoramento possibilitou a obtenção de uma série de informações, além de ser possível utilizar as estruturas já existentes para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos em zonas da área de estudo.

Assim, para se obter uma linha de raciocínio sobre as informações atualmente disponíveis devido às atividades de monitoramento, os dados de variação de nível de água subterrânea medidos nos poços foram avaliados considerando-se a recarga anual na área do projeto, obtidas por Teixeira *et al* (2023), bem como a condutividade hidráulica apresentada por De Paula (2019), parâmetro que foi calculado para a região de entorno da APACLS. Neste sentido, de acordo com De Paula (2019), as entradas de água para os compartimentos aquíferos ocorrem por recarga, a partir de águas pluviais.

De Paula (2019) afirma que as recargas na região ocorrem de quatro formas:

- i) Infiltração direta em maciços calcários fraturados sem vegetação nos quais a infiltração é máxima;
- ii) Infiltração direta nos maciços calcários cobertos com vegetação, em que parte da água pluviométrica é retida pela vegetação antes de constituir a recarga aquífera;
- iii) Difusa através dos solos, coberturas e/ou metapelitos, condição mais comum na área de estudo;
- iv) Escoamento interno, através de dolinas com ou sem sumidouros.

Ribeiro (2019) utilizou análises isotópicas para entender o modo como os aportes pluviais se deslocam nos compartimentos aquíferos, que são unidades fortemente anisotrópicas e heterogêneas. A autora observou, nesta avaliação, que desde sua entrada no sistema até sua descarga, não há evolução isotópica e hidrogeoquímica natural dessas águas. Em contrapartida, as variações isotópicas e hidroquímicas ocorrem em consonância com a estratigrafia, as características hidrodinâmicas, a forte anisotropia das rochas locais, assim como com a configuração estrutural da região e as variadas formas de recarga (direta e indireta, por fraturas em maciços, sumidouros, dolinas e solo).

Dessa forma, Ribeiro (2019), sugere que a recarga de água que chega aos compartimentos aquíferos monitorados nos poços seja, predominantemente, originária da recarga nos maciços e afloramentos calcários, percolando através de fraturas verticais abertas e de *shafts*, estruturas essas que promovem um escoamento direto e rápido. Motivo pelo qual a percolação até esses compartimentos é curta e sua circulação mais rápida, condicionada pelo fluxo vertical direto e ao gradiente hidráulico. Ribeiro (2019) correlacionou os fluxos de água subterrânea mais rápidos e com menor tempo de renovação às porções mais superficiais e carstificadas na área de estudo, sendo esses fluxos, assim, atribuídos ao compartimento aquífero cárstico, os quais são, então, alimentados, principalmente, pela recarga direta.

Contrariamente, um fluxo de água mais profundo e mais lento é atribuído à unidade aquífera cárstica-fissural, condicionado, em suma, por recargas difusas através da cobertura pedológica em dolinas ou mesmo fora delas, embora também direta por sumidouros. Outro ponto destacado por Ribeiro (2019) é que, por muitas vezes, essa circulação mais lenta e profunda é que alimenta as nascentes, surgências para as quais é atribuída uma recarga difusa, com aportes de águas para esses corpos d'água também de contribuições superficiais e subsuperficiais. No ambiente cárstico as surgências podem ser pontos de alívio de pressão de

águas confinadas um pouco mais profundas, que ascendem por fraturas alargadas e *shafts*. Isto posto, de modo contrário do que se esperava, Ribeiro (2019) demonstra que na maior parte dos casos, as nascentes estão com concentrações menores de trítio, ou seja, com tempos de renovação maiores.

É interessante destacar que, o modelo de recarga descrito por Ribeiro (2019), auxiliou a compreender os questionamentos de De Paula (2019), no qual o autor destaca que não houve significativa variação entre as vazões de nascentes medidas por Auler (1994) e as avaliadas por Paula & Velásquez (2019), durante a elaboração de um balanço hídrico para a região da APACLS. Nesse estudo, Paula & Velásquez (2019) demonstram que a retirada antrópica de 121 mm por meio de poços tubulares e captações a fio d'água representa um montante maior do que a própria recarga aquífera, calculada em 119 mm. Como informado, devido às origens de recarga diversas das nascentes, bem como pela contribuição de fluxo mais profundos, lentos e antigos, pôde-se explicar o porquê de as vazões de muitas delas terem sido mantidas, mesmo com períodos de estresse hídrico e recarga menor do que a exploração.

Um parâmetro válido para da velocidade de fluxo de água em um compartimento aquífero é a condutividade hidráulica, a qual é alusiva a facilidade que a água tem de percolar através de uma unidade hidrogeológica. Na Figura 37 é mostrado o mapa de condutividade hidráulica dos poços da área estudada, sem distinção de compartimentos aquíferos, modificado de De Paula (2019). Os poços de monitoramento do nível d'água foram plotados sobre esses mapas para serem relacionados com a velocidade de fluxo de água subterrânea, de modo a embasar a avaliação do comportamento sazonal desses poços com as características hidráulicas locais dos aquíferos onde eles estão construídos.

Os poços do compartimento cárstica concentram-se em duas regiões, uma na porção sul (4 poços) e outra na porção norte (1 poço). É notório que os poços da porção sul se encontram em uma zona de elevada condutividade hidráulica, condição que corrobora o fluxo mais rápido nas porções mais rasas e mais carstificada, identificado por Ribeiro (2019), descrito também no modelo de De Paula (2019) e nas atualizações de Dantas *et al* (2023), e corroborado pelas avaliações estatísticas e de verificação direta de tempo de resposta aporte pluviais elucidadas neste estudo.

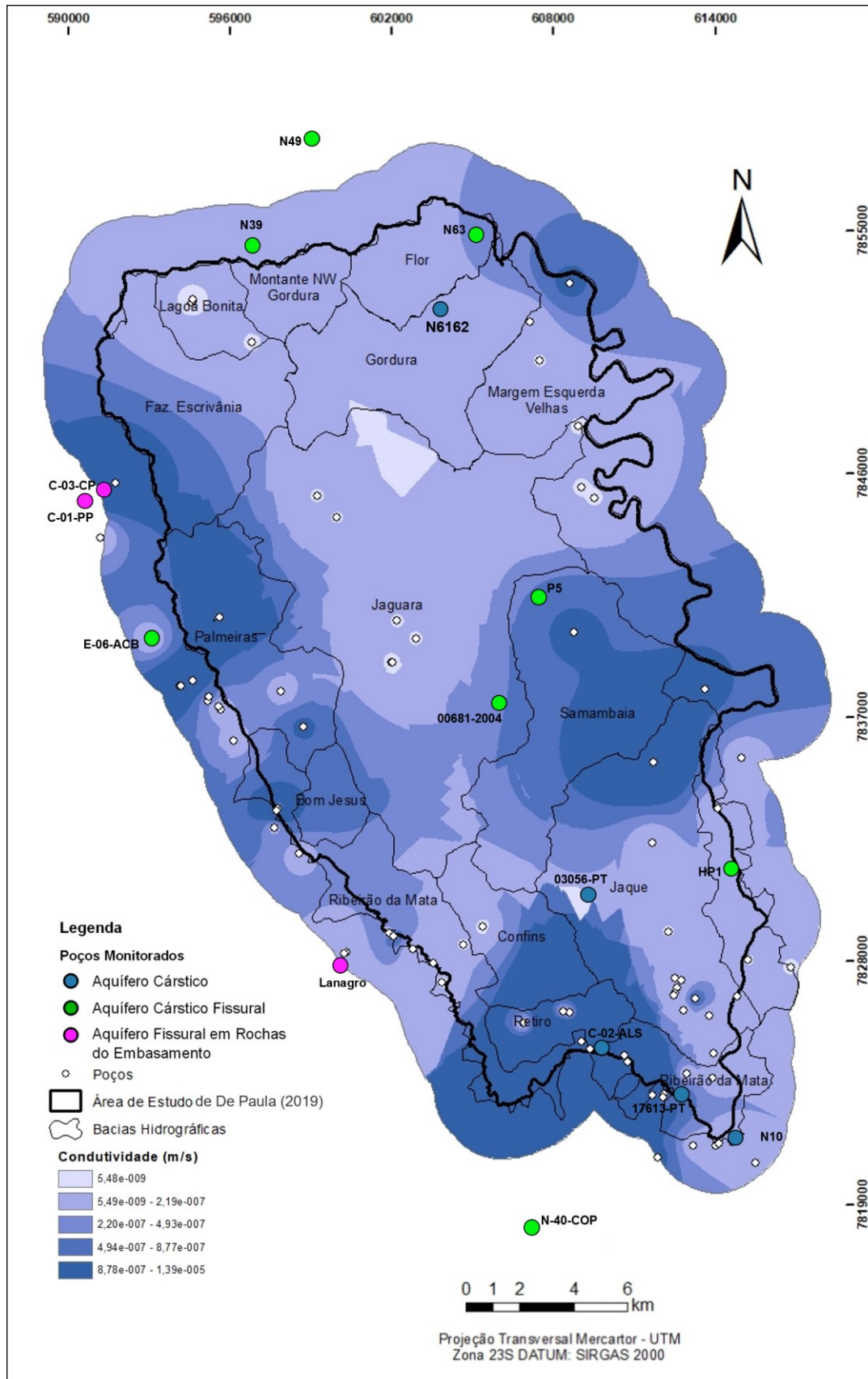


Figura 37: Mapa de distribuição da condutividade hidráulica com destaque para a espacialização dos poços monitorados (Adaptado de De Paula, 2019).

De modo complementar, nota-se na Figura 37 que os poços instalados nos compartimentos aquíferos cárstico-fissural e fissural, estão em zonas onde a condutividade hidráulica calculada por De Paula (2019) são menores do que no compartimento aquífero cárstico, valores esses que também podem ser associados a um modelo de circulação mais lento e profundo, em conformidade com De Paula (2019) e Ribeiro (2019), assim como com os resultados de correlação cruzada obtidos para alguns poços do compartimento aquífero cárstico-fissural.

Na Figura 38 é possível se observar um modelo esquemático do processo de recarga e circulação de água subterrânea na área de estudo. Salienta-se que, conforme observado nas perfilagens óticas executadas nos poços monitorados, mediu-se o nível de água comumente acima das entradas de água principais dos compartimentos aquíferos e, por muitas vezes, acima do que seria o topo do compartimento. Tal condição é associada a uma pressurização local que, por sua vez, é ocasionado por uma pressão associada a uma zona de recarga com carga hidráulica maior do que a medida em condutos e fraturas. A representação dessa pressurização é apresentada, também, na Figura 38.

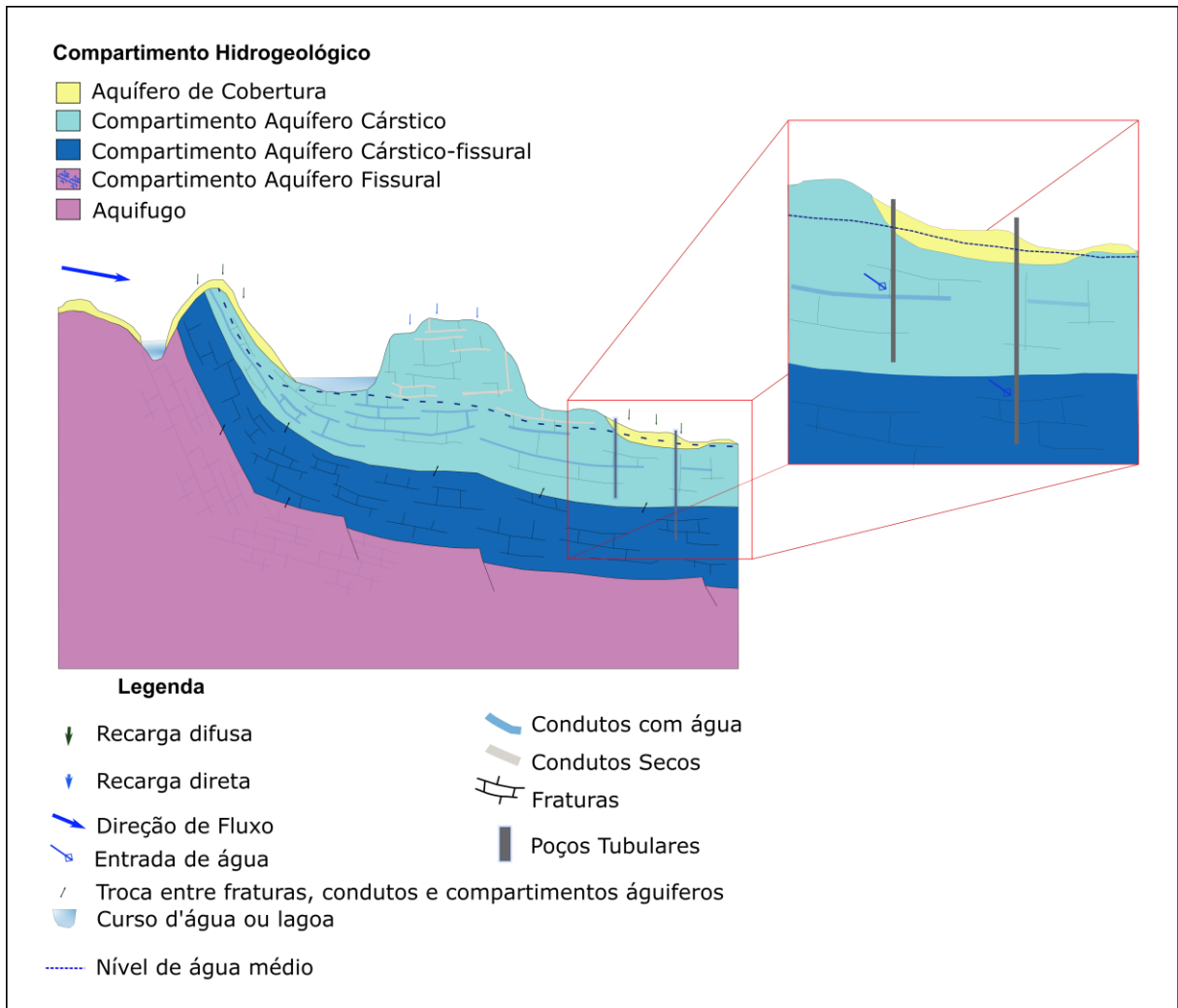


Figura 38: Modelo esquemático do sistema de recarga e circulação de água subterrânea nos compartimentos aquífero da área de estudo, com destaque para o processo de pressurização nesses compartimentos. Adaptado de Ribeiro (2019).

No ano de 2023 os dados de variação do nível de água nos poços monitorados na área de estudo foram utilizados por Teixeira *et al* para calcular a porcentagem da precipitação anual que efetivamente recarrega os compartimentos aquíferos locais. Teixeira *et al* (2023) utilizou o coeficiente de armazenamento calculado por De Paula (2019) para diversos poços da área de interesse, para calcular a recarga a partir das séries históricas dos poços monitorados. Posteriormente essas informações foram interpoladas em um mapa de isolinhas. Na Figura 39 é apresentado o mapa composto por Teixeira *et al* (2023) (Figura 39 A), o mapa de condutividade hidráulica de De Paula (2019) (Figura 39 B) e os mapas com as diferenças entre os níveis água mínimos e máximos (Figura 39 C) e do somatório da variações de nível de água nos poços monitorados (Figura 39 D) para uma avaliação conjunta dessas informações.

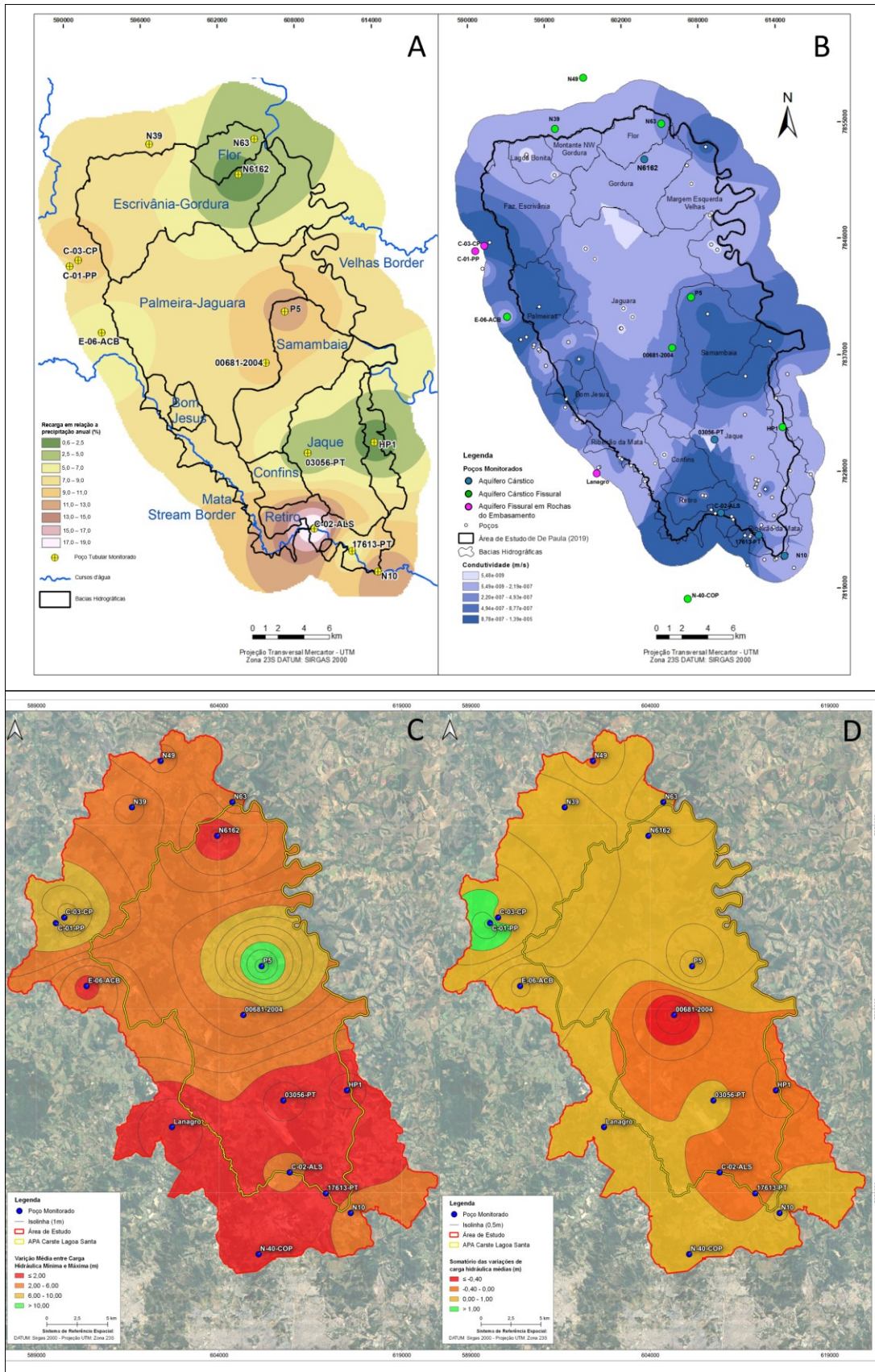


Figura 39: Mapa de potencialidade hídrica do compartimento cárstico-fissural inferior (Fonte: De Paula, 2019).

Observa-se que as zonas onde foram identificados os maiores valores de recarga, estão associadas às porções com maiores valores de condutividade hidráulica, a poços situados no compartimento aquífero cárstico, às zonas com diferenças mais acentuadas entre os valores de nível mais profundos e mais rasos. Os menores valores de recarga, em contrapartida, estão correlacionados a poços localizados no compartimento aquífero cárstico-fissural, enquanto para os poços localizados no compartimento aquífero fissural esses valores são intermediários.

Após a avaliação das zonas de maior potencial hídrico, as quais são exibidas na (Figura 39 B) em consonância com os valores de recarga e o somatório de todas as variações de nível ao longo dos anos de monitoramento, três afirmações são passíveis de serem realizadas:

- i) De forma geral, as recargas nas áreas de estudo são uniformes, porém maiores valores de recarga são observados na porção onde estão localizados os poços C-02-ALS, N10 e 17613-PT, enquanto valores mais baixos são observados nas proximidades dos poços HP1, N6163 (esse localizado no compartimento cárstico, mas com provável influência de operações de exploração em seu entorno) e N63.
- ii) Ao longo dos três anos de monitoramento, com exceção dos poços localizados na porção centro-sul da área de interesse, houve uma acreção no nível de água da reserva renovável dos compartimentos aquíferos; e
- iii) Na porção centro-sul da área de estudo, mesmo com a determinação de um maior valor de recarga, obtidos por Teixeira *et al* (2023), o valor calculado para a soma de todas as variações de nível de água ocorridas foi menor do que zero, o que reflete em uma depleção da reserva renovável local.

A afirmação iii) é um dos resultados mais significativos deste estudo, pois é nítido que a grande dependência do recurso hídrico subterrâneo na região impacta os volumes de água disponíveis nos compartimentos aquíferos locais. Destaca-se ainda, que nessa porção foi identificada a maior eficiência do uso dos poços de monitoramento para um entendimento específico da área de estudo. O que torna esse conjunto de poços em uma ferramenta interessante para a gestão de água subterrânea nessa região.

6 CONCLUSÕES

O trabalho realizado nesta dissertação teve como objetivo observar e analisar as variações nos níveis de água subterrânea nas compartimentações hidrogeológicas de uma área de estudo que abrange territórios de diversos municípios na região metropolitana de Belo Horizonte-MG. A área de interesse está situada na região de grande importância ambiental, na qual está inserida a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, situada 30 km a norte da capital Mineira.

Os níveis de água subterrânea na área de estudo são influenciados por diversos fatores, de forma que a precipitação é a principal variável que interfere nesse parâmetro. Ainda, as explorações de água subterrânea por poços tubulares também foram consideradas como condicionadores das alterações nos níveis freáticos locais.

Nesse sentido, pôde-se observar que nos quatro poços instalados no compartimento aquífero cárstico, situados na porção sudoeste da área de interesse e localizados no município de Vespasiano (C-02-ALS, 03056-PT, 17613-PT e N10), observaram-se comportamentos similares para aportes pluviais, os quais ocorrem com tempos de resposta de poucos dias.

Além disso, as profundidades das principais entradas de água desses poços também são encontradas em cotas similares, o que foi comprovado por meio de modelagem estatística e da perfilagem ótica.

As avaliações das oscilações dos níveis de água nesses poços, assim como os outros atributos discutidos acima, mostraram que o somatório das variações positiva de nível de água e o somatório final de todas as variações medidas nesses poços têm valores próximos, o que permite utilizá-los como ferramentas para auxiliar na gestão dos recursos hídricos na porção sul da área de estudo. Essa possibilidade se dá porque, ao se identificar um comportamento uniforme na variação da potenciometria desses poços, é possível verificar se está ocorrendo algum tipo de superexploração dos recursos hídricos subterrâneos nessa porção, visto que esse recurso é fonte de abastecimento para diversos usos nessa área. É importante salientar que como foram mapeados diversos condutos e cavidades nesses poços, caso seja implementado um monitoramento qualitativo, será possível avaliar as características físico-químicas das águas subterrâneas nessa porção da área de estudo e, assim, se tomar medidas mitigadoras caso, em algum momento, sejam identificadas substâncias químicas nocivas para o meio ambiente em concentrações superiores aos limites normativos descritos na legislação.

Com relação aos poços instalados no compartimento aquífero cárstico fissural e fissural, identificou-se a necessidade de ampliar a rede de monitoramento e complementar a malha de pontos de monitoramento, visto que a heterogeneidade desse sistema aquífero e a configuração espacial da rede podem não ser suficientes para o efetivo monitoramento da área de estudo. Isso se deve principalmente à falta de pontos na região central da área de estudo e à irregularidade da distribuição dos poços, sendo que, em algumas porções da área de interesse, existem dois ou três poços instalados a uma distância relativamente pequena, enquanto em outros locais não existem instrumentos de monitoramento

As conclusões do estudo destacam a importância do monitoramento contínuo de níveis de água subterrânea na área de estudo. Os resultados deste trabalho têm implicações práticas para apoiar a gestão de recursos hídricos regionais e para desenvolver estratégias para combater os efeitos adversos das atividades humanas nos recursos hídricos subterrâneos. No entanto, é essencial realizar pesquisas adicionais para aprofundar nossa compreensão dos fatores que influenciam os níveis de água subterrânea na área de estudo e para elaborar estratégias mais eficientes para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Por fim, recomenda-se que sejam realizadas ações para instalar novos poços de monitoramento nas porções da área de estudo com menos abrangência de instrumentos de monitoramento. Tal ação deve ser balizada por um plano de monitoramento que abranja não só as, mas, também, as águas superficiais. Outro ponto que desse ser considerado é o uso de metodologias como traçadores corantes e geofísicas para se verificar a conectividade dos poços monitorados e, desta forma, evidenciar qual a abrangência espacial da rede de monitoramento instalada na área de estudo.

7 REFERÊNCIAS

- Alkmim F.F. & Martins-Neto M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.). A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais. SBG: Belo Horizonte, p. 9-30
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, 349-364.
- Amaral, D. G. P. 2018. Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG). 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Anderson, M. A., & Woessner, W. W. (1992). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport* (p. 381p). Academic Press.
- Andrade, I. B., & Amorim, J. B. (2018). Mapeamento geológico com ênfase na relação hidráulica entre o complexo granítico-gnáissico com o Grupo Bambuí (p. 105). Trabalho de Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Aragão, F. 2019. Natural background levels of inorganic elements in the groundwaters of the Lagoa Santa karst region, Minas Gerais, Brazil (p. 89). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Auler, A. 1994. Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of The Matozinhos - Pedro Leopoldo Karst, Brazil. Bowling Green: Faculty of the Department of Geography and Geology / Western Kentucky. 110p. (Thesis, Master of Science)
- Berbert, C.A. 1980. Complexo basal goiano. In: CONG. BRAS. DE GEOL., 31, Camburiú., Anais... Camburiú, SBG. p. 2837 - 2849, v.5.
- Berbert-Born M. 1998. Carste de Lagoa Santa, MG – Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira *in* Síntese da geologia, recursos minerais e geomorfologia; organizado por Haroldo S. Viana, Volmir P. Tavares, Prof. Heinz Charles Kohler. – Belo Horizonte: IBAMA/CPRM. 301p.
- Berbert-Born, M.L.C. 2002. Carste de Lagoa Santa, MG: Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil, vol. 1, Brasília
- Cabral, J. A. L. 1994. Projeto VIDA – Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental. Região de Sete Lagoas – Lagoa Santa: Informações Básicas para a Gestão Territorial. (Série Ordenamento territorial v.3). Cartografia geotécnica de planejamento. Belo Horizonte: CPRM/CETEC
- Campos, A.B. 1994. Relações entre as características faciológicas e estruturais das unidades do Grupo Bambuí e a morfologia cárstica na região de Lagoa Santa-Pedro Leopoldo (Minas Gerais). Belo Horizonte, UFMG/FAPEMIG, 21p. (Relatório final de pesquisa - aperfeiçoamento. Programa de Pesquisa “Estudos ambientais e proposta de manejo na região do carste no Planalto de Lagoa Santa, M.G.”).

- Cardoso M. R. D., Marcuzzo F. F. N., Barros J. R. 2014. Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. *ACTA Geográfica*, Boa Vista, v.8, n.16, pp.40-55.
- Carpenedo C. B. & Ambrizzi T. 2020. Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul Associado ao Modo Anular Sul e Impactos Climáticos no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 4, 605-613, 2020. [rbmet.org.br DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786354006](http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786354006)
- Cordani, V.G., Hasui, Y. 1975. Comentários sobre dados geocronológicos disponíveis para a folha Goiás. In: *Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha Goiás - SD-22*, p.85-94,
- Costa A. C., Silva T. P., Prado L. F., Rogrigues R. A., 2016. Atuação dos sistemas atmosféricos no espaço urbano de Catalão (Go) em dezembro de 2015. *XII SBCG, Variabilidade E Susceptibilidade Climática: Implicações Ecosistêmicas e Sociais*, outubro de 2016, Goiânia (GO)/UFG, p. 1175-1184.
- Danni, J.C.M., Fuck, R.A. 1979. A compartimentação tectono-estratigráfica do embasamento das faixas dobradas da margem do Cráton São Francisco e suas Faixas Marginais. Salvador: SBG.
- Danni, J.C.M., Fuck, R.A. A., Leonardos, O.H. 1982 Archean and lower proterozoic in Central Brazil. *Geologische Rundschau*, v.71, n.1, p.291-317.
- Dantas J. C. M., Velásquez L. N. M., Paula R. S. 2023, Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, Minas Gerais, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>
- Darnault, C. (2008). *Overexploitation and contamination of shared groundwater resources*. B.V.: Springer Science+business media.
- De Paula R. S. 2019. Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG [manuscrito]. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. 278 p.
- De Souza, R. T. (2020). Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido (p. 223). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- EMBRAPA. 2018. *SIBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]*. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.
- Ferrari, J. A. & Karmann, I. 2008. Comportamento Hidrodinâmico de Sistemas Cáísticos na Bacia do Rio Betari, Município de Iporanga – SP. Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP. *Revista do Instituto de Geociências – USP*. V.8, n.1: 1-13,.

- Ford, D. C., & Williams, P. W. 1989. Karst geomorphology and hydrology (p. 601). Unwin Hyman.
- Galvão, P. H. 2015. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. São Paulo: Igc/ USP.
- Guerra, A. 1993. Dicionário geológico – geomorfológico (Vol. 8). Rio de Janeiro: IBGE
- Hasui, Y., Almeida, F.F.M. de. 1970. Geocronologia do Centro-oeste brasileiro. Boletim Sociedade Bras. Geol., São Paulo, v.19, n.1, p.5-26, set.
- Hasui, Y., Tassinari, C.C.A., Siga Júnior, O., *et al.* 1980. Datações Rb/Sr e K/A do Centro-norte do Brasil e seu significado geológico-tectônico. Op. cit. In: CONG. BRAS. DE GEOL., 31, Camburiú. Anais... Camburiú, SBG, 1980. p.2659-2678, v.5
- Healy, R. W., & Cook, P. G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- IBGE, I. B. 2006. Mapa de unidades de relevo do Brasil. Escala 1:5.000.000. Brasília: IBGE
- Kohler, H. 1989. Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa-MG. FFLCH/USP, São Paulo
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15, No. 3, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Magalhães, C. C. C., & Silva, T. G. A. 2018. Mapeamento hidroestratigráfico dos aquíferos cársticos nos municípios de Matozinhos e Pedro Leopoldo, MG (p. 96). Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Marini, O.J., Dardanne, M.A., Fuck, R.A., *et al.* 1979 Mapa geológico da Faixa Brasília - escala: 1:1.000.000. Brasília: Univ. de Brasília/IG. [Eliminadas as coberturas terciárias e quaternárias superficiais].
- Meneses, I. C. 2003. Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG. PUC - MG. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado - PUC-MG
- Nelder, J. A., & Wedderburn, R. W. M. 1972. Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 135(3), 370-384.
- Palmer, A. N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, Boulder, v. 103, n. 1, p. 1-21.
- Patrus, M. L. R. A. 1998 Estudos Hidrológicos e Qualidade das Águas de Superfície. In: VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. (Org.) Série APA Carste de Lagoa Santa, v. 1. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM.
- Paula, R.S. de, Velásquez, L.N.M. 2019. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Rev. Águas Subterrâneas*, 33, 2, 119-133.

- Peñaranda-Salgado, J.R. 2016. Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da Formação Sete Lagoas, Município de Sete Lagoas (MG). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente).
- Pessoa, P. F. P.; Mourão, M. A. A. 1998. Levantamento Hidrogeológico. In: VIANA, H. S.; Kohler, H. C.; Tavares, V. P. (Org.) Série APA Carste de Lagoa Santa, v. 1. Belo Horizonte: IBAMA/CPRM.
- Pessoa, P.F.P. 2005. Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p.
- Piló, L.B. 1998. Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú, carste de Lagoa Santa, MG. Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo. Tese de Doutorado, 269 p
- Piló, Luís B. 2000. Geomorfologia cárstica. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 1, n. 1, p. 88-102
- Ribeiro, C. G.; Meireles, C. G.; Lopes, N. H. B.; Arcos, R. E. C. 2016. Levantamento geológico estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cársticos-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. 2016. 157 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Ribeiro, C.G., Velásquez, L.N.M., de Paula, R.S., Meireles, C.G., Lopes, N.H.B, Arcos, R.E.C., Amaral, D.G.P. 2019. Análise de fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Rev. Águas Subterrâneas, 33, 1, 12-21
- Ribeiro, J.H.; Tuller, M.P.; Filho, A.D.; Padilha, A.V.; Córdoba, C.V. 2003. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais - Relatório final, escala 1:50.000. 2ª ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p., Mapas e anexos (Série Programa Informações Básicas para Gestão Territorial - GATE, versão digital).
- Rodrigues A. P (coord.). 2005. Caracterização do Meio Físico, dos Recursos Minerais e Hídricos do Município de Aparecida de Goiânia. Goiânia: Superintendência de Geologia e Mineração, 106 p. il.
- Rodrigues, R.A., Castro, S.S. 2008. A Estrutura Espacial das Chuvas na Cidade de Araguari (MG) Durante a Estação Chuvosa 2001-2005. Revista Geográfica Acadêmica, v.2, n.1, p. 43-55, 2008.
- Rolim, G.S.; Sentelhas, P.C.; Barbieri, V. 1998. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.6, p.133-137.
- Scholl W.U. 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: SBG: Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Anais, 207 – 231

- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. 1965. An Analysis of Variance Test for Normality. *Biometrika*, 52(3-4), 591-611.
- Shevenell, L. 1996. Analysis of well hydrographs in a karst aquifer: estimates of specific yields and continuum transmissivities. *Journal of Hydrology* 174 (1996) 331-355, 1995
- Shinzato, E. 1998. O carste da área de proteção ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos. 35 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes.
- Silva, A. B.; Moreira, C. V. R.; Cesar, F. M.; Auler, 1987. A. Estudo da Dinâmica dos Recursos Hídricos da Região Cárstica dos Municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos. Unpublished technical report, CETEC, p.32.
- Silva, T. G. A. 2022. Análise da aplicação de métodos europeus de vulnerabilidade intrínseca ao carste tropical da região da APA Carste de Lagoa Santa (p. 84). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Souza R. T. & Sampaio J. L. D. 2021. Características do solo na APA Carste de Lagoa Santa (MG) e seu papel na infiltração de potenciais contaminantes. *Caderno de Geografia*, v.31, n.64, 2021.
- Souza R. T. 2020. Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos com Cobertura Espessa de Solo: Metodologia COP-Solo em Ambiente Tropical Úmido. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. 231p.
- Teixeira, G. M., de Paula, R. S., Velasquez, L. N. M., Andrade, I. B., & Neto, W. M. P. 2023. Evaluation of recharge estimation methods applied to fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. *Hydrological Processes*, 37(8), e14971.
- Teixeira, G. M., Pena, M. A. C., & Silva, P. H. P. 2020. Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG. Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Teixeira, N.A., Danni, J.C.M. 1979. Geologia da raiz de um greenstone belt na região de Fortaleza de Minas, Minas Gerais. *Rev. Bras. de Geociências*, São Paulo, n. 9/1, p.17-26
- Teodoro, M. I.; Velásquez, L. N. M.; Fleming, P. M.; Paula, R. S.; Tadeu, R.; Doi, B. 2019. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 392-406.
- Teodoro, M.I.P. 2020 Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema de aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das

estruturas rúpteis na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais [manuscrito] / Maria Isabel Pereira Teodoro.

- Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. 1955. The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p.
- Tuller M.P., Ribeiro J.H., Signorelli N., Féboli W.L., Pinho J.M.M. 2010. Projeto Sete Lagoas - Abaeté. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, 160 p.
- Tuller, M., Ribeiro, J., & Danderfer Filho, A. 1991. Geologia da região cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG). Belo Horizonte: CPRM.
- Velásquez, L.N.M.; Andrade, I.B.; Ribeiro, C.G.; Amaral, D.G.P.; Vieira, L.C.M.; Cardoso, F.A.; Paula, R.S.; Silva, P.H.P.; Souza, R.T.; Almeida, S.B.S. 2018. Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco
- Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P. (Org.). 1998. APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 301p.
- Viana, H.S., Kohler, H.C., Tavares, V.P. (Org.). 1998. APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 301p.
- Vieira, L. C. M. 2015. Características da Geologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG (p. 99). Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Vieira, L.C.M. 2018. Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 111 p.
- Vieira, L.C.M.; Dussin, T.M.; Velásquez, L.N.M. 2018. Geoquímica e condições paleoambientais de deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa, MG. Geochimica Brasiliensis, 32, 1, 1-19.