

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

Matheus Alonso Castelo Pena

**ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUÍFERO
DA REGIÃO DO CARSTE DE LAGOA SANTA POR MÉTODOS DIRETOS E
INDIRETOS**

Belo Horizonte

2023

Matheus Alonso Castelo Pena

**ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUÍFERO
DA REGIÃO DO CARSTE DE LAGOA SANTA POR MÉTODOS DIRETOS E
INDIRETOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula

Coorientadora: Profa. Dra. Leila Nunes Menegasse Velásquez

Belo Horizonte

2023

P397e 2023	Pena, Matheus Alonso Castelo. Estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero da região do Carste de Lagoa Santa por métodos diretos e indiretos [manuscrito] / Matheus Alonso Castelo Pena. – 2023. 102 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. 98-102. 1. Hidrogeologia – Teses. 2. Aquíferos – Minas Gerais – Teses. 3. Carste – Lagoa Santa (MG) – 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)
---------------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUÍFERO DA
REGIÃO DO CARSTE DE LAGOA SANTA POR MÉTODOS DIRETOS E INDIRETOS

MATHEUS ALONSO CASTELO PENA

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. Rinaldo Afrânio Fernandes
Vale

Belo Horizonte, 17 de novembro de 2023.

Aos familiares que sempre me inspiraram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente a todas as pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste estudo.

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus por todas as capacidades e oportunidades que Ele me abençoou ao longo deste percurso.

Aos meus orientadores, Rodrigo e Leila, pelo tempo dedicado, pelos ensinamentos transmitidos nas esferas profissional, acadêmica e pessoal, bem como pelas discussões sempre esclarecedoras.

À minha família e amigos, que me apoiaram durante este período, compreenderam a distância e me incentivaram a manter o foco na concretização desta pesquisa. Em particular, quero agradecer aos meus pais, Hudson e Aglasina, à minha irmã Sarah e à minha companheira Marina, pelo apoio constante, acolhimento e incentivo ao longo dos últimos anos.

Ao Yan, Vinícius e à WALM, que possibilitaram a conciliação entre meus estudos e minhas responsabilidades profissionais quando foi necessário.

A todos que participaram deste projeto e com os quais tive o prazer de trabalhar desde os tempos de graduação, em especial a Gabriela, Pedro, Arthur, Gabriel, Caio, Ricardo, Débora e outros voluntários. Também aos que vieram antes, pavimentando o caminho do conhecimento na área, como Carol, Diógenes, Bel, Luísa e Thais.

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.

Por fim, estendo meu reconhecimento aos membros da banca examinadora, Professor Dr. Paulo Henrique Galvão e Dr. Rinaldo Fernandes, pela dedicação e pelas valiosas contribuições no processo de avaliação desta dissertação. Suas análises e *insights* enriqueceram significativamente este trabalho.

RESUMO

O sistema aquífero da Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa (APA), em Minas Gerais, exibe características típicas de um ambiente cárstico evoluído, incluindo cavernas extensas, sumidouros e nascentes volumosas, sobrepondo-se ao embasamento cristalino. O entendimento das características hidrogeológicas é crucial para a prevenção da contaminação, dada a alta vulnerabilidade dessa área. Neste contexto, a avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos que influenciam o escoamento subsuperficial torna-se fundamental, especialmente considerando o desenvolvimento econômico e populacional da região. Este estudo utiliza métodos diretos (tratamento de testes de vazão) e indiretos (zonas de captação e análise de hidrógrafas) para estimar os parâmetros hidrodinâmicos, com foco na transmissividade e no coeficiente de armazenamento do aquífero na região da APA e adjacências. Destaca-se o método de Recuperação de Agarwal entre os métodos diretos devido à sua independência em relação ao tempo de bombeamento, minimizando erros relacionados à variação de vazão. Os métodos de Theis e Dupla-Porosidade de Moench também mostram resultados satisfatórios, enquanto o método de Neuman revela-se inadequado para caracterizar o aquífero cárstico da região. Além disso, os métodos indiretos demonstram viabilidade, entretanto são propostas recomendações para a sua utilização. Deriva-se uma equação que relaciona a transmissividade com a capacidade específica do poço, o que permite acessar esse parâmetro de forma mais eficiente. Por meio dessa relação é gerada uma superfície interpolada de transmissividade e outra de porosidade que permitem a identificação de áreas mais carstificadas. Quatro zonas de maior carstificação são delimitadas, cujos parâmetros hidrodinâmicos são definidos, apresentando produtividade considerável e concentração de nascentes importantes. Adicionalmente, determina-se os valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento para o aquífero aluvionar e fissural com base em testes de vazão, destacando a importância do aquífero aluvionar em termos de produtividade. O aquífero fissural é subdividido em uma porção rasa com produtividade significativamente maior que a porção de base. Essas conclusões têm implicações importantes na gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos em um ambiente cárstico complexo, contribuindo para a compreensão do comportamento hidrogeológico na região.

Palavras-chave: Aquífero Sete Lagoas; transmissividade; armazenamento.

ABSTRACT

The aquifer system of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (APA), in Minas Gerais, Brazil, exhibits typical characteristics of an evolved karst environment, including extensive caves, sinkholes and voluminous springs, overlaying the crystalline basement. Understanding hydrogeological characteristics is crucial for the efficient management of water resources and the prevention of contamination, given the high vulnerability of this area. In this context, the evaluation of hydrodynamic parameters that influence subsurface flow becomes fundamental, especially considering the economic and population development of the region. This study uses direct (pumping test analysis) and indirect methods (capture zones and hydrograph analysis) to estimate hydrodynamic parameters, focusing on the transmissivity and storativity of the aquifer in the APA region and surroundings. The Agarwal Recovery method stands out among the direct methods due to its independence in relation to pumping time, minimizing errors related to flow variation. The Theis and Moench Double-Porosity methods also show satisfactory results, while the Neuman method proves to be inadequate for characterizing the region's karst aquifer. Furthermore, indirect methods demonstrate viability, however recommendations for their use are proposed. An equation is derived that relates transmissivity to the specific capacity of the well, which allows this parameter to be accessed more efficiently. Through this relationship, an interpolated surface of transmissivity and another of porosity are generated, allowing the identification of more karstified areas. Four zones of greater karstification are delimited, whose hydrodynamic parameters are defined, presenting considerable productivity and a concentration of important springs. Additionally, the transmissivity and storativity values for the alluvial and fissure aquifer are determined based on pumping tests, highlighting the importance of the alluvial aquifer in terms of productivity. The fissure aquifer is subdivided into a shallow portion with significantly higher productivity than the base portion. These conclusions have important implications for the sustainable management of groundwater resources in a complex karst environment, contributing to the understanding of hydrogeological behavior in the region.

Keywords: Sete Lagoas Aquifer; karst transmissivity; karst storativity.

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
2	ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE E ARMAZENAMENTO POR MÉTODOS DIRETOS E INDIRETOS NO AQUIFERO CÁRSTICO.....	10
3	ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE A PARTIR DA CAPACIDADE ESPECÍFICA EM POÇOS TUBULARES DO AQUIFERO CÁRSTICO NA REGIÃO DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA – MG	50
4	COMPARTIMENTAÇÃO E PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUIFERO DA REGIÃO DO CARSTE CENTRAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
	REFERÊNCIAS.....	98

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho é resultado de pesquisa nas áreas de hidrogeologia e hidrodinâmica cárstica na região da APA Carste de Lagoa Santa e arredores. A pesquisa está vinculada ao “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”, financiado pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) por meio do Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas (CECAV), coordenado e executado por docentes do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

A área de estudo está localizada na porção central do estado de Minas Gerais, cerca 35 km a norte de Belo Horizonte. Possui aproximadamente 505 km² e abrange integral ou parcialmente os municípios de Confins, Lagoa Santa, Vespasiano, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Prudente de Moraes, São José da Lapa e Funilândia.

Geologicamente composta por sucessões pelito-carbonáticas da base do Grupo Bambuí que sobrepõe o embasamento cristalino representado pelo Complexo Belo Horizonte, a área apresenta uma dinâmica hidrogeológica complexa devido à interação estrutural em um terreno cárstico maduro.

Alvo de expansão socioeconômico, a região conta com crescimento industrial, minerário, agrícola, turístico e populacional, o que fomenta a busca por soluções para a escassez hídrica em uma área de baixo índice de cursos d’água superficiais, onde a exploração aquífera se mostra intensificada.

Dada a intrínseca vulnerabilidade hidrogeológica desse ambiente cárstico, é prudente avaliar formas de quantificar o escoamento subsuperficial e sua disponibilidade no esforço de municiar a construção de modelos hidrogeológicos e favorecer o correto manejo dos recursos hídricos locais.

Nesse sentido, questionamentos que direcionam as pesquisas deste trabalho são: Quais métodos são adequados para estimar a transmissividade e o coeficiente de armazenamento no aquífero cárstico? Quais métodos indiretos podem ser vantajosos em termos de custo-benefício a esse fim? Quais os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos que fazem parte do sistema hidrogeológico da região?

Com essa intenção, a primeira etapa desta pesquisa buscou consolidar uma base ampla de dados em órgãos públicos, como o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), e a Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM) para coletar informações gerais dos poços tubulares na área, além de reunir testes de vazão para estimar os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos.

Em seguida, métodos diretos e indiretos para extração desses parâmetros foram avaliados e comparados, e culminaram com a elaboração de um primeiro artigo, nomeado “Estimativa da transmissividade e armazenamento por métodos diretos e indiretos no aquífero cárstico”, cuja versão em inglês foi submetida em revista internacional, enquanto a versão em português é apresentada no capítulo 2 deste documento.

Por fim, utilizou-se as informações angariadas para avaliar os parâmetros hidrodinâmicos de todos os aquíferos que compõe o sistema hidrogeológico local, baseado nos modelos hidrogeológicos conceituais existentes na área e recentemente atualizados. Essa análise está apresentada em forma de artigo no capítulo 4 deste documento sob o título “Compartimentação e parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero da região do carste central do estado de Minas Gerais, Brasil”, ainda não submetido.

Além disso, o capítulo 3 apresenta um trabalho completo submetido e aprovado no XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, que ocorre em novembro de 2023 em Aracaju – SE. Essa publicação traz o equacionamento que permite estimar a transmissividade em um ponto a partir da capacidade específica do poço, e essa abordagem é utilizada no desenvolvimento do método de compartimentação do aquífero cárstico-fissural apresentado no artigo do capítulo 4.

Com isso, objetiva-se subsidiar melhor entendimento acerca dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos da região e contribuir com ideias e métodos que podem ser utilizados para acessar esses parâmetros com melhor custo-benefício.

2. ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE E ARMAZENAMENTO POR MÉTODOS DIRETOS E INDIRETOS NO AQUÍFERO CÁRSTICO

RESUMO

O aquífero cárstico localizado na Área de Proteção Ambiental de Lagoa Santa, Minas Gerais, Brasil, apresenta características morfológicas típicas de um ambiente cárstico evoluído, incluindo grandes cavernas, sumidouros e nascentes volumosas. A compreensão hidrogeológica dos aquíferos cársticos é crucial para uma gestão eficaz dos recursos públicos e prevenção da contaminação, uma vez que estes aquíferos são altamente vulneráveis, o que torna essencial a identificação e mitigação de potenciais riscos. Dado o contínuo crescimento económico e populacional na região, a quantificação dos parâmetros hidrodinâmicos que controlam o escoamento subsuperficial torna-se relevante para a correta concepção dos modelos hidrogeológicos e para a gestão dos recursos hídricos. Quatro métodos clássicos de tratamento de teste de bombeamento foram comparados para quantificar o fluxo e a capacidade de armazenamento do aquífero: Theis (1935), Neuman (1972), Moench (1984) e Recuperação de Agarwal (1980). Além disso, foram empregados métodos de estimativa indireta baseados na identificação de zonas de captura e na análise de curvas de recessão de cursos d'água. A análise estatística dos resultados sugere que soluções clássicas podem ser aplicadas ao aquífero cárstico para estimar parâmetros hidrogeológicos, com exceção do coeficiente de armazenamento obtido pelo método de Neuman. Em geral, os métodos de estimativa indiretos tendem a produzir valores consistentes com os obtidos através de métodos diretos, embora algumas ressalvas sejam observadas. Os valores de transmissividade obtidos nos testes de bombeamento foram de aproximadamente $3,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, enquanto o coeficiente de armazenamento é estimado em torno de $3,7 \times 10^{-3}$. Os métodos de estimativa indireta produziram valores de transmissividade de cerca de $1,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ usando o método da zona de captura, e valores de coeficiente de armazenamento de $4,0 \times 10^{-3}$ e $3,9 \times 10^{-2}$ usando métodos de análise de curva de recessão.

Palavras-chave: parâmetros hidrogeológicos; caracterização de aquíferos; hidrogeologia cárstica; métodos de teste de bombeamento; métodos de caracterização de aquíferos regionais.

ABSTRACT

The karst aquifer located in the Environmental Protection Area of Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil, exhibits the characteristic morphological features of an evolved karstic environment, including large caves, sinkholes, and copious springs. Understanding the hydrogeological characteristics of karst aquifers is crucial for effective management of public resources and prevention of contamination, as these aquifers are highly vulnerable, making it essential to identify and mitigate potential risks. Given the ongoing economic and population growth in this region, the assessment of the hydrogeological parameters that control the dynamics of local flow becomes relevant for the proper evaluation of hydrogeological models and the management of water resources. Four classical pumping test treatment methods were compared to quantify the flow and storativity of the aquifer: Theis (1935), Neuman (1972), Moench (1984), and Agarwal's Recovery (1980). In addition, indirect estimation methods based on the identification of capture zones and the analysis of recession curves of water courses were employed. The statistical analysis of the results suggests that classical solutions can be applied to the karstic aquifer to estimate hydrogeological parameters, apart from the Storage Coefficient obtained using the Neuman method. In general, the indirect estimation methods tend to produce values that are consistent with those obtained through direct methods, albeit with some reservations. The transmissivity values obtained from the pumping tests were approximately $3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, while the storage coefficient is estimated to be around 3.7×10^{-3} . The indirect estimation methods yield transmissivity values of about $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ using the capture zone method, and storage coefficient values of 4.0×10^{-3} and 3.9×10^{-2} using recession curve analysis.

Keywords: hydrogeological parameters; aquifer characterization; karst hydrogeology; pumping test methods; regional aquifer characterization methods.

1. INTRODUÇÃO

A “Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa” está localizada a aproximadamente 35 km ao norte de Belo Horizonte, Brasil. Esta região é significativa pelo seu valor histórico, cultural, espeleológico e ambiental (Figura 1). A APA abriga diversas cavernas e já foi palco de importantes descobertas arqueológicas, como o fóssil conhecido como Luzia, na Lapa Vermelha. Também foi objeto de pesquisas de cientistas influentes, como o naturalista Peter Lund.

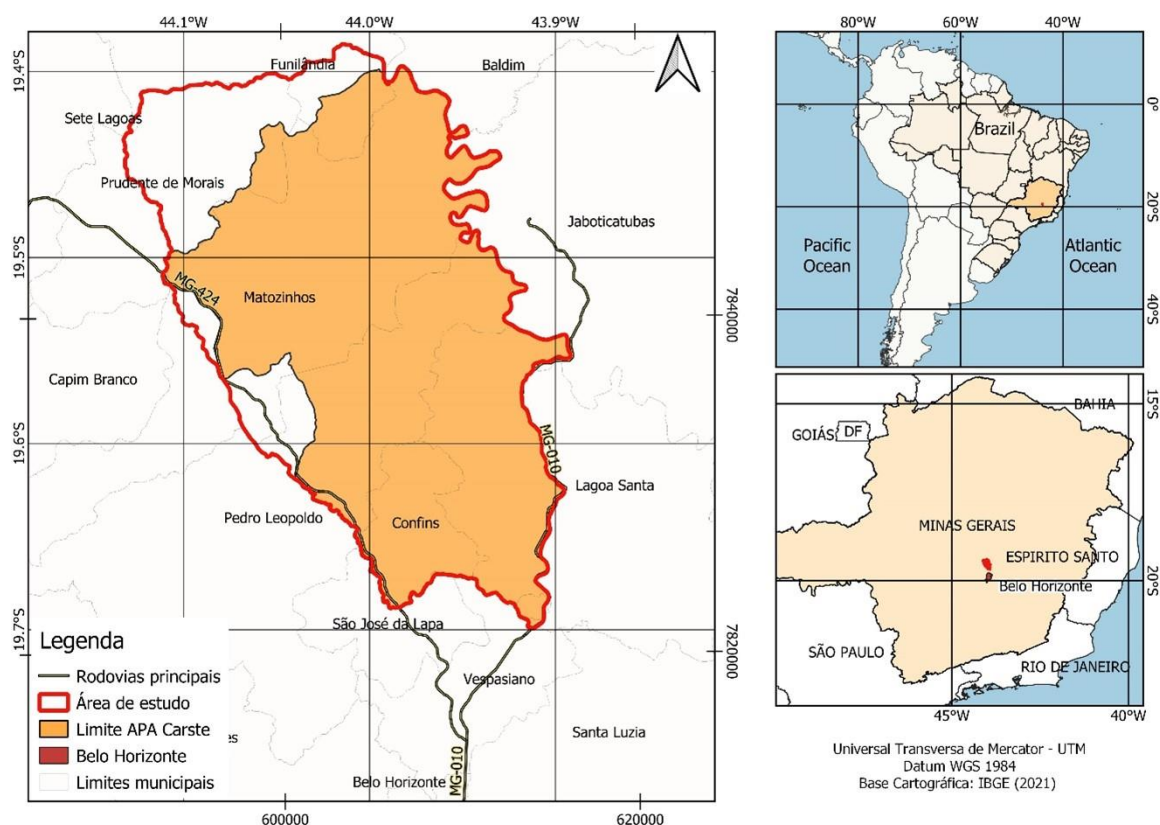


Figura 1 – Local da área de estudos no contexto nacional e sul-americano.

Além da sua importância cultural e ecológica, a APA enfrenta uma rápida expansão industrial e um crescimento econômico e populacional, o que aumenta a procura por recursos hídricos. Por se tratar de um ambiente cárstico evoluído e com poucos cursos de água superficiais, a exploração do aquífero carbonático é intensificada (De Paula, 2019; Ribeiro *et al.*, 2019, Teodoro *et al.*, 2019).

Morfologicamente, a região apresenta características típicas de um ambiente cárstico evoluído, com fraturas alargadas, dolinas, sumidouros e cavernas, com formação de canais subterrâneos interligados (Pessoa, 2005). A complexidade hidrogeológica e a vulnerabilidade do aquífero cárstico exigem uma compreensão do fluxo das águas

subterrâneas para uma gestão eficaz dos recursos hídricos. Este conhecimento é essencial para abordar a gestão dos recursos públicos, prevenir a contaminação e garantir a utilização sustentável deste aquífero.

O tratamento dos testes de bombeamento em poços tubulares é método amplamente utilizado para quantificar os parâmetros hidrodinâmicos que caracterizam os aquíferos. A solução de Theis (1935) é uma opção comumente usada para extrair esses parâmetros, mas assume que o aquífero é poroso, homogêneo e isotrópico. Ainda há debate sobre a utilização desta e de outras soluções clássicas em condições que diferem das suposições feitas na sua proposta original, particularmente no caso de aquíferos cársticos. É, portanto, importante considerar cuidadosamente as limitações e pressupostos destes métodos ao aplicá-los a situações reais (Muldoon & Bradbury, 2005).

Em meios fraturados, muitos estudos apontam para a validade de aproximar o meio como um aquífero poroso quando o número de fraturas é alto e elas estão interligadas (Bair & Roadcap, 1992; Podgorney & Ritzi, 1997; Muldoon & Bradbury, 2005). O meio poroso equivalente assume que a matriz rochosa, incluindo suas fraturas e rede de condutos, pode ser representada por uma condutividade hidráulica equivalente dentro de uma determinada área (Long *et al.*, 1982; Anderson & Woessner, 1992). Contudo, em aquíferos extremamente carstificados, o fluxo pode depender mais da rede de condutos do que da matriz, e como os modelos porosos equivalentes não distinguem o fluxo preferencial, podem não representar adequadamente este tipo de aquífero (Pankow, *et al.*, 1986; Scanlon *et al.*, 2003).

Para escalas intermediárias e regionais, embora pouco se saiba sobre as propriedades hidráulicas discretas dos condutos e da rede de fraturas, aproximar a natureza complexa do aquífero cárstico a um modelo poroso equivalente é suficiente para reproduzir o comportamento do fluxo (Ghasemizadeh *et al.*, 2015). As limitações do uso desta aproximação se devem à incapacidade de representar a escala local e a turbulência que ocorre na rede de condutos e sua interação com a matriz (Quinlan & Ewers, 1985; Thrailkill, 1986).

Feitosa *et al.* (2008) destacam os desafios de extrapolar valores obtidos através de métodos diretos em aquíferos cársticos devido à sua anisotropia e heterogeneidade inerentes. Esta observação está alinhada com os resultados de Galvão *et al.* (2015),

que em área adjacente e de contexto hidrogeológico similar, demonstraram a ocorrência do efeito escala, que pode restringir a confiabilidade desses resultados.

Este estudo tem como objetivo utilizar resultados de ensaios de vazão em poços tubulares já outorgados na área de estudo para obtenção de parâmetros hidrodinâmicos do aquífero cárstico, comparando a aplicabilidade de soluções clássicas (Theis, 1935; Neuman, 1972, Recuperação de Agarwal, 1980 e Moench, 1984). Os resultados também são comparados com os valores encontrados através dos métodos indiretos empregados, que são: zonas de captura identificadas com dados públicos; e análise das curvas de recessão dos córregos monitorados na área.

Esses resultados podem indicar qual método de interpretação dos testes de bombeamento é mais adequado para o aquífero cárstico local, bem como se há diferença significativa entre eles em termos estatísticos. Eles também podem revelar as limitações dos métodos indiretos em áreas com pouca informação hidrogeológica (poucos poços) e avaliar a precisão destes métodos na estimativa de parâmetros hidrodinâmicos para um aquífero cárstico.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

A área de estudo está localizada aproximadamente 35 km ao norte da cidade de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, Brasil. Abrange uma área de aproximadamente 505 km² e compreende total ou parcialmente 7 municípios da região central do estado, além de cobrir integralmente a APA Cársica de Lagoa Santa. A área é limitada a sudoeste pelo ribeirão da Mata e a leste pelo rio das Velhas, que é o nível de base local.

Geologicamente, a região está localizada na porção sudeste do Cráton São Francisco, que é composto principalmente por rochas sedimentares clásticas e carbonáticas Neoproterozoicas (Alkmim & Martins-Neto, 2001), com destaque para as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, que cobrem diretamente o embasamento granito-gnáissico arqueano (Ribeiro *et al.*, 2003).

O granito-gnaiss do Complexo de Belo Horizonte está na base da estratigrafia regional e frequentemente apresenta faixas composicionais e características de migmatização (Noce, Teixeira & Machado, 1997). Eles ocorrem na direção NNW na parte sudoeste da área de estudo. Diretamente sobrejacentes ao Complexo de Belo Horizonte estão depositadas rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas,

constituídas por metacalcários e metassiltitos (Ribeiro *et al.*, 2003). Os aquíferos em foco neste estudo estão relacionados a esse contexto carbonático, que representa mais de 60% da superfície na área de estudo. A Formação Sete Lagoas é dividida em dois membros: Membro Pedro Leopoldo, na base, e Membro Lagoa Santa, no topo. O primeiro consiste em uma intercalação pelito-carbonato, enquanto o segundo é predominantemente carbonato puro, com composição quase completamente calcítica (Ribeiro *et al.*, 2003). A Formação Serra de Santa Helena, unidade superior do Grupo Bambuí na área, é composta por siltitos intemperizados e lentes carbonáticas, que afloram principalmente nas partes leste e norte da área. Depósitos aluvionares e coberturas lateríticas cenozóicas ocorrem nas proximidades dos corpos d'água que cortam a região e nas porções de topografia relativamente mais elevada, respectivamente (Ribeiro *et al.*, 2003) (Figura 2).

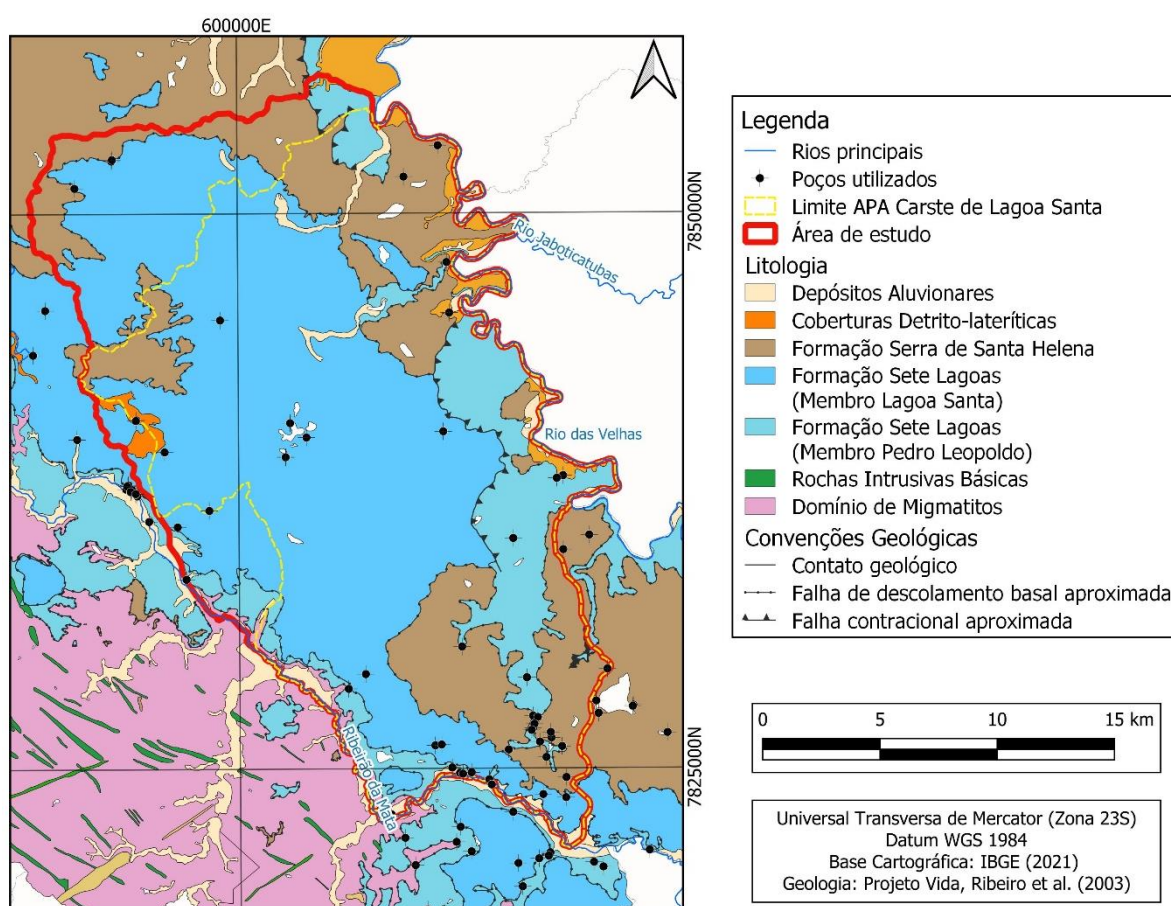


Figura 2 – Mapa geológico da região de estudo. Os poços utilizados na interpretação dos testes de bombeamento aparecem plotados em preto. Geologia modificada de Ribeiro *et al.* (2003).

As unidades do Grupo Bambuí, que compõe a maior parte da região, apresentam grau de deformação moderado a alto. Famílias de fraturas, falhas de empurrão,

acamamento sub-horizontal e zonas de cisalhamento (Ribeiro *et al.*, 2003) influenciam os processos erosivos responsáveis pela porosidade cárstica terciária do terreno carbonático (Teodoro *et al.*, 2019). Além disso, há maior dissolução ao longo dos planos de acamamento e fraturas verticais, o que influencia o alargamento dos condutos ao longo das principais direções de fluxo das águas subterrâneas (NW-SE, W-E e SW-NE) (Auler, 1994; Ribeiro *et al.*, 2019).

Na área de estudo são observadas feições cársticas típicas, associadas às rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas. A ocorrência de dolinas, depressões, condutos, cavernas, poljes e outras feições morfológicas refletem um ambiente cárstico evoluído (De Paula & Velásquez, 2019). Além disso, algumas dessas feições indicam a evolução temporal do relevo, com dissolução e subsidência significativas, sendo importantes controladores da hidrogeologia local, afetando a recarga e o fluxo subterrâneo (Pessoa, 2005).

Em termos hidrogeológicos, são descritos na área: um aquífero fissural representado pelo embasamento granito-gnaiss, sobreposto por um sistema aquífero carbonático, que apresenta características cárstico-fissurais na base e características cársticas nas porções mais rasas. A espessura deste aquífero é estimada em média de 200 m, mas pode variar localmente. Este sistema é por vezes coberto pelo aquífero metapelítico e pelas coberturas, de baixa espessura, não ultrapassando os 50 m na área de estudo, que funcionam principalmente como zonas de recarga do sistema aquífero carbonático principal (De Paula, 2019). É importante ressaltar que o manto de intemperismo pode atingir profundidades de até 60 m, com média de 30 m, enquanto as entradas de água normalmente localizam-se cerca de 30 m abaixo desse manto de alteração do intemperismo (Dantas *et al.*, 2023). A maior parte dos níveis d'água observados nos poços de monitoramento são encontrados muito acima da profundidade das entradas d'água. Isto sugere que pelo menos uma parte do aquífero apresenta comportamento confinado, o que pode ser atribuído tanto à pressurização dos condutos cheios de água como à presença do manto de alteração, que pode favorecer condições locais de confinamento.

3. MÉTODOS

Serão descritos métodos diretos utilizados para avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade e armazenamento), baseados em dados de testes

de bombeamento em poços tubulares, bem como métodos indiretos baseados na identificação de zonas de captura e análise de curvas de recessão de córregos na área de estudo.

3.1. MÉTODOS DIRETOS

Para caracterizar as propriedades hidrodinâmicas do aquífero cárstico-fissural da Formação Sete Lagoas na área, são utilizados dados de testes de vazão de poços realizados em 99 poços tubulares que penetram, total ou parcialmente, exclusivamente o aquífero carbonático (ou seja, não são poços mistos), localizados dentro e no entorno imediato da área de estudo, e disponibilizados pelos órgãos governamentais competentes, como o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (igam) e a Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM) (Figura 2).

Estes testes foram realizados para dimensionar o regime de exploração dos poços, com a medida de rebaixamento e recuperação sendo realizada no mesmo poço bombeado, sem poço de observação. Conforme proposto por Kruseman & Ridder (1979), estes dados podem ser utilizados para uma avaliação geral das características hidráulicas do aquífero. Mesquita *et al.* (2018) e De Paula *et al.* (2020) também empregaram esta metodologia para estimar o armazenamento adotando a distância do centro do poço bombeado para o ponto de observação igual ao raio do poço. É possível obter com precisão os valores de transmissividade local com esse método, porém, o coeficiente de armazenamento pode apenas ser estimado (Diniz & Michaluate, 2002; Mawlood & Ismail, 2019).

Os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos utilizando o software *AquiferTest* (versão 11.0) – Waterloo Hydrogeologic Inc. Com os dados de taxa de bombeamento, rebaixamento e recuperação fornecidos, quatro métodos de análise distintos foram empregados: Theis (1935), Neuman (1972), Dupla Porosidade (Moench, 1984) e Recuperação de Agarwal (1980). Esses métodos foram escolhidos por serem soluções clássicas que, conforme discutido anteriormente, podem ser utilizadas em aquíferos cársticos, desde que consideradas suas respectivas limitações e singularidades, sendo também amplamente utilizados para esse fim. Ver APÊNDICE A. NOTAÇÕES para notações usadas nas equações a seguir.

3.1.1. THEIS (1935)

O método Theis (1935), desenvolvido para aquíferos isotrópicos homogêneos e confinados, é uma solução que assume que o aquífero tem extensão horizontal infinita, é isotrópico, homogêneo e tem espessura constante. A relação entre rebaixamento (s), vazão (Q), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) é dada pelas equações (1) e (2).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1)$$

Quando:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2)$$

Como existe conhecimento limitado sobre as propriedades hidráulicas discretas de condutos e redes de fraturas, é suficiente aproximar a arquitetura cárstica usando um modelo poroso equivalente para simular o comportamento do fluxo em escalas intermediárias e regionais (Ghasemizadeh *et al.*, 2015). Neste cenário, a suposição de que o aquífero cárstico pode ser representado por um meio poroso equivalente permite a aplicação da solução de Theis (1935). Esta solução considera o fluxo médio dentro do meio calculando um tensor de permeabilidade equivalente, que aproxima os valores de permeabilidade do meio predominantemente discreto a um valor médio generalista.

Além disso, o uso de métodos designados para aquíferos confinados decorre do entendimento de que certos pontos dentro do aquífero apresentam pressurização em condutos, e há um manto de intemperismo espesso cobrindo as rochas carbonáticas na área.

3.1.2. NEUMAN (1972)

O método de Neuman (1972) apresenta uma solução genérica para aquíferos livres anisotrópicos. O modelo hidrogeológico da área sugere que em menores profundidades o aquífero apresente características mais cársticas, enquanto se comporta como um sistema cárstico-fissural em maiores profundidades (De Paula, 2019, Dantas *et al.*, 2023), onde a maior parte do fluxo é limitada à porosidade secundária, ou seja, a estruturas pouco alargadas por dissolução química da água,

caracterizando o aquífero como anisotrópico. A maioria dos poços também atinge essa porção mais profunda.

A solução proposta por Neuman (1972) apresenta um modelo analítico para caracterização do escoamento em um aquífero não confinado, homogêneo, anisotrópico, com extensão lateral infinita e rebaixamento medido em poço de observação totalmente penetrante. Neuman (1975) também apresenta a solução para poços parcialmente penetrantes.

A solução está dividida em três etapas: a primeira considera um período logo após o início do bombeamento, durante o qual a água provém da compactação do aquífero e expansão da água; a segunda etapa, intermediária, considera o fluxo vertical descendente da porção superior do aquífero, o que destoa do método de Theis (1935); e a terceira etapa, ao final do bombeamento, quando a água começa a ser liberada pela drenança dos poros e o armazenamento se torna igual ao armazenamento específico (S_y) do aquífero. A solução é dada pela equação (3):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u^A, u^B, \beta) \quad (3)$$

O termo $W(u^A, u^B, \beta)$ representa a função específica para aquíferos não confinados, onde:

u^A refere-se ao rebaixamento durante a fase inicial do teste (equação 4),

$$u^A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (4)$$

u^B está relacionado ao rebaixamento em estágio final (5):

$$u^B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (5)$$

e β relaciona a anisotropia com o raio de observação e espessura do aquífero (6):

$$\beta = \frac{r^2 K v}{D^2 K h} \quad (6)$$

3.1.3. DUPLA-POROSIDADE DE MOENCH (1984)

O modelo de Dupla Porosidade desenvolvido por Moench (1984) considera um sistema confinado composto por blocos de matriz rochosa separados por fraturas onde a maior parte da água é conduzida através das fraturas, que são caracterizadas por altas vazões e baixa capacidade de armazenamento, enquanto a matriz libera água para as fraturas sob perturbação do equilíbrio. Sua utilização no sistema cárstico justifica-se pelo seu modelo conceitual, que se assemelha a um aquífero cárstico onde as fraturas são representadas por condutos.

Moench (1984) apresenta uma abordagem para interpretação de dados de bombeamento, inicialmente aplicada a aquíferos fraturados de baixa porosidade primária, que possuem maior influência da porosidade secundária. Neste modelo, a maior parte do fluxo para o poço ocorre através das fraturas, enquanto a matriz atua como bloco de armazenamento, fornecendo água para as fraturas (Bäumle, 2003). A definição dos parâmetros hidrodinâmicos para aquíferos com comportamento de dupla porosidade segue as equações (7) e (8):

$$td = \frac{K t}{S_s r^2} \quad (7)$$

$$hd = \frac{4\pi K D}{Q} (h_0 - h_f) \quad (8)$$

3.1.4. RECUPERAÇÃO DE AGARWAL (1980)

Ao contrário das outras soluções apresentadas, a solução de Agarwal (1980) concentra-se no período de recuperação do aquífero, após a perturbação causada pelo bombeamento, e considera o período de recuperação como análogo a um bombeamento de taxa constante. O período de recuperação ocorre quando o bombeamento cessa e o nível da água começa a subir.

Portanto este método ignora os problemas decorrentes do bombeamento, como a dificuldade em manter uma vazão constante e a falta de confiabilidade nos dados apresentados, baseando sua confiança apenas no período de recuperação, que é medido em um intervalo de tempo menor que o bombeamento e sem perturbação no meio.

Agarwal (1980) desenvolveu seu método para aquíferos de grande extensão lateral, homogêneos e confinados, sob regime de bombeamento suficientemente longo, em que o fluxo radial se desenvolve nas regiões intermediárias do poço. Desta forma, as equações que regem o fluxo das águas subterrâneas são dadas pela equação (9):

$$sA(t) = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln\left(\frac{4Tt_p}{r^2 S}\right) - \ln\left(\frac{4T(t_r + t_p)}{r^2 S}\right) + \ln\left(\frac{4T(t_r)}{r^2 S}\right) \right] \quad (9)$$

É necessário observar as oscilações naturais da carga hidráulica do aquífero durante o período de recuperação, para que apenas o rebaixamento residual causado exclusivamente pelo bombeamento possa ser medido. Além disso, o período de bombeamento deve ser prolongado para que a curva de rebaixamento se desenvolva (Trabucchi *et al.*, 2018).

3.2. COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA

Uma comparação entre esses métodos é realizada utilizando dados de todos os poços para estabelecer uma relação estatística confiável que valide ou rejeite o uso de cada método para o aquífero cárstico. Para avaliar a normalidade dos dados foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk (1965). Os resultados da seção 4 mostram a não normalidade dos dados (Figura 6A), que, portanto, precisam ser validados estatisticamente por um teste não paramétrico.

O teste não paramétrico para amostras independentes é o teste de Kruskal-Wallis (1952). Este teste busca ordenar os valores individuais das amostras e observar se há tendência de um grupo se desviar dos demais, ou se as divergências são aleatórias, e então, sugere que as amostras são iguais dentro de um determinado intervalo de confiança (95% é o valor adotado nesta pesquisa).

O teste foi desenhado para avaliar se as posições dos valores, depois de ordenados nas amostras, são equivalentes. Portanto, a equação que fornece o valor do fator de teste (H) é dada por:

$$H = \left(\frac{12}{N(N+1)} \right) \sum_{i=1}^m \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (10)$$

3.3. MÉTODOS INDIRETOS

Além dos métodos diretos discutidos anteriormente, este estudo também utilizou métodos indiretos para obtenção de parâmetros hidrogeológicos. O primeiro a ser apresentado é o método da Zona de Captura, que é um método gráfico utilizado para determinar a área que está sob influência de bombeamento, e permite estimar a transmissividade a partir das relações da taxa de bombeamento e essa área. Os outros dois métodos envolvem a análise de hidrogramas, que são representações gráficas da vazão de um córrego ao longo do tempo, e são utilizados para estimar a capacidade de armazenamento do aquífero comparando a quantidade de água liberada durante um período de recessão. Estes métodos indiretos podem fornecer estimativas úteis dos parâmetros hidrodinâmicos quando os métodos diretos não são viáveis.

3.3.1. ZONAS DE CAPTURA

Para obter o valor de transmissividade na área de forma indireta, foi utilizado o método da Zona de Captura (Todd, 1980). As informações necessárias para a análise são: a superfície potenciométrica local e a taxa de bombeamento dos poços. Em resumo, o método propõe a delimitação de áreas onde há reversão de fluxo regional causada pelo bombeamento de um ou mais poços, que são chamadas de “Zonas de Captura”. O tamanho destas zonas é medido na superfície, partindo do centro de bombeamento até o ponto de estagnação, que é o ponto mais distante onde o fluxo regional segue o caminho natural ou é capturado para dentro da zona. A Figura 3 ilustra a ocorrência desta zona e os aspectos geométricos relevantes para esta análise.

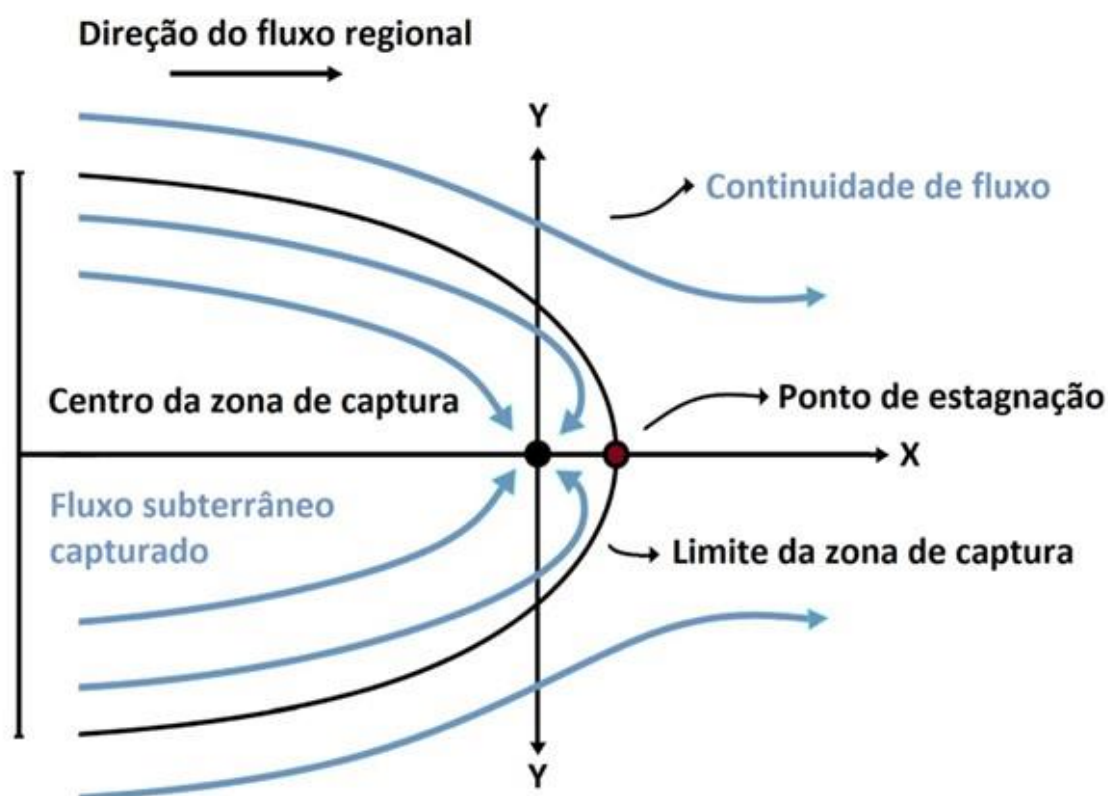


Figura 3 – Ilustração da característica de uma zona de captura, segundo Todd (1980). O fluxo regional mostra uma inversão dentro da zona, que pode ser delimitada por uma parábola.

As equações para cálculo da transmissividade com base no método da zona de captura são apresentadas nas equações (11) e (12), de Todd (1980).

$$-(Tx * 2\pi * i) = \frac{Q}{X} \quad (11)$$

$$\pm(Ty * 2 * i) = \frac{Q}{Y} \quad (12)$$

O tempo de bombeamento de cada poço foi determinado com base no regime de vazão estabelecido pelo órgão regulador. Se esta informação não estivesse disponível, um tempo de bombeamento de 18 horas por dia foi utilizado como padrão.

As superfícies potenciométricas foram plotadas para três períodos diferentes com 15 anos de intervalo, a fim de minimizar a sazonalidade e as variações na superfície potenciométrica da região ao longo do tempo. Os valores dos níveis de água utilizados para construção das superfícies potenciométricas são derivados de bancos de dados disponíveis em órgãos governamentais (igam e SUPRAM). Os valores das taxas de bombeamento dos poços também estão presentes nessa base de dados. As

seguintes considerações são feitas para aplicação do método: fluxo uniforme sob regime estacionário e aquífero confinado.

3.3.2. ANÁLISE TÉCNICA DE HIDRÓGRAFA

A curva de recessão pode ser representada como a soma de duas ou mais funções exponenciais (equação 13) para a descarga do fluxo subterrâneo no meio poroso ou fraturado (Maillet, 1905; Mangin, 1975).

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N Q_i e^{-\alpha_i t} \quad (13)$$

É mostrado na Figura 4 como a análise da curva de recessão em um gráfico semi-logarítmico retorna uma linha reta, onde a inclinação, em vermelho, é o valor de α , a constante da equação 13.

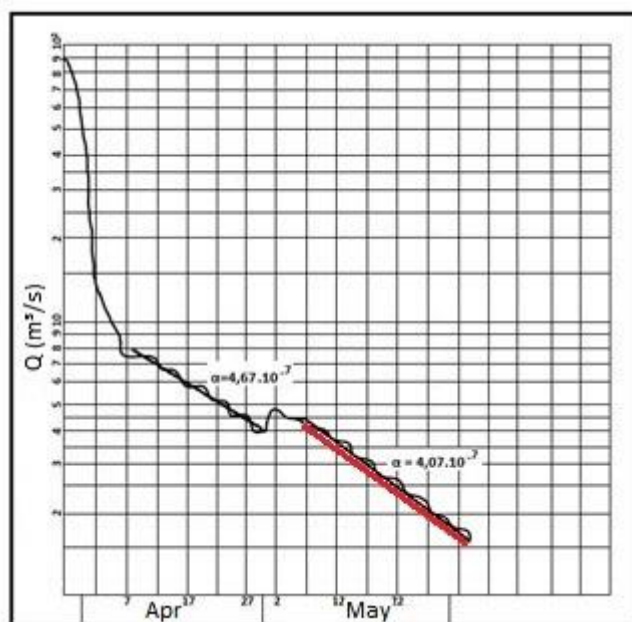


Figura 4 – Ilustração do modelo de análise da curva de recessão em gráfico semi-logarítmico, onde a inclinação vermelha é o valor de α . Curva de recessão do Rio Tordera. Adaptado de Custódio & Llamas (1983).

Com base nesse entendimento, Rorabaugh (1964) desenvolveu um método para relacionar os parâmetros hidrodinâmicos de uma bacia hidrográfica com base na curva de recessão, que se caracteriza pelo gráfico semi-logarítmico linearizado da vazão do curso d'água ao longo do tempo. Este período de recessão representa o momento em que todo o fluxo do curso de água é devido ao fluxo subterrâneo (Custodio & Llamas, 1983).

Dada a natureza complexa dos sistemas cársticos bem desenvolvidos, que compreendem uma combinação de matriz, fraturas e condutos, uma única linha reta no gráfico semi-logarítmico de vazão ao longo do tempo não representa todo o sistema. Em vez disso, são observados três segmentos distintos. O primeiro e mais íngreme segmento corresponde aos efeitos dominantes das maiores feições cársticas, enquanto o segundo segmento representa feições de armazenamento secundário, como fraturas. O terceiro e menos inclinado segmento representa a drenagem das porções de matriz do aquífero (Chen *et al.*, 2012).

Neste modelo idealiza-se um sistema de fluxo onde o aquífero possui espessura uniforme e condutividade hidráulica e armazenamento constantes. Além disso, o córrego concentra toda a vazão do aquífero. Para esta condição, Rorabaugh (1964) desenvolveu a igualdade representada pela equação (14):

$$\alpha 4SL^2/\pi^2 = T \quad (14)$$

Nessa abordagem, foram analisados os registros de vazões nos principais córregos da área de estudo entre 2017 e 2020, e os períodos de recessão foram obtidos por meio do programa *Recess*, disponibilizado pelo *USGS*. O mapa das sub-bacias da área, bem como os córregos e seus respectivos pontos de medição de vazão estão ilustrados no mapa da Figura 5, totalizando 6 pontos. O mapa também apresenta poços de monitoramento dentro de cada bacia.

Os poços de monitoramento são equipados com transdutores para medir variações de pressão causadas pela flutuação da água subterrânea. Os transdutores são instalados em profundidades específicas dentro do poço para capturar essas mudanças. De maneira semelhante, transdutores são empregados para monitorar vazões em córregos e estabelecer uma correlação com a vazão real a partir do cálculo da curva chave.

Para facilitar a coleta de dados, um coletor de dados automatizado (*data logger*) é utilizado nesses sistemas de monitoramento. O *data logger* é programado para registrar automaticamente medições dos transdutores em intervalos regulares. No caso deste sistema, os dados são registados de hora em hora, garantindo uma captura consistente e frequente da informação fornecida pelos transdutores.

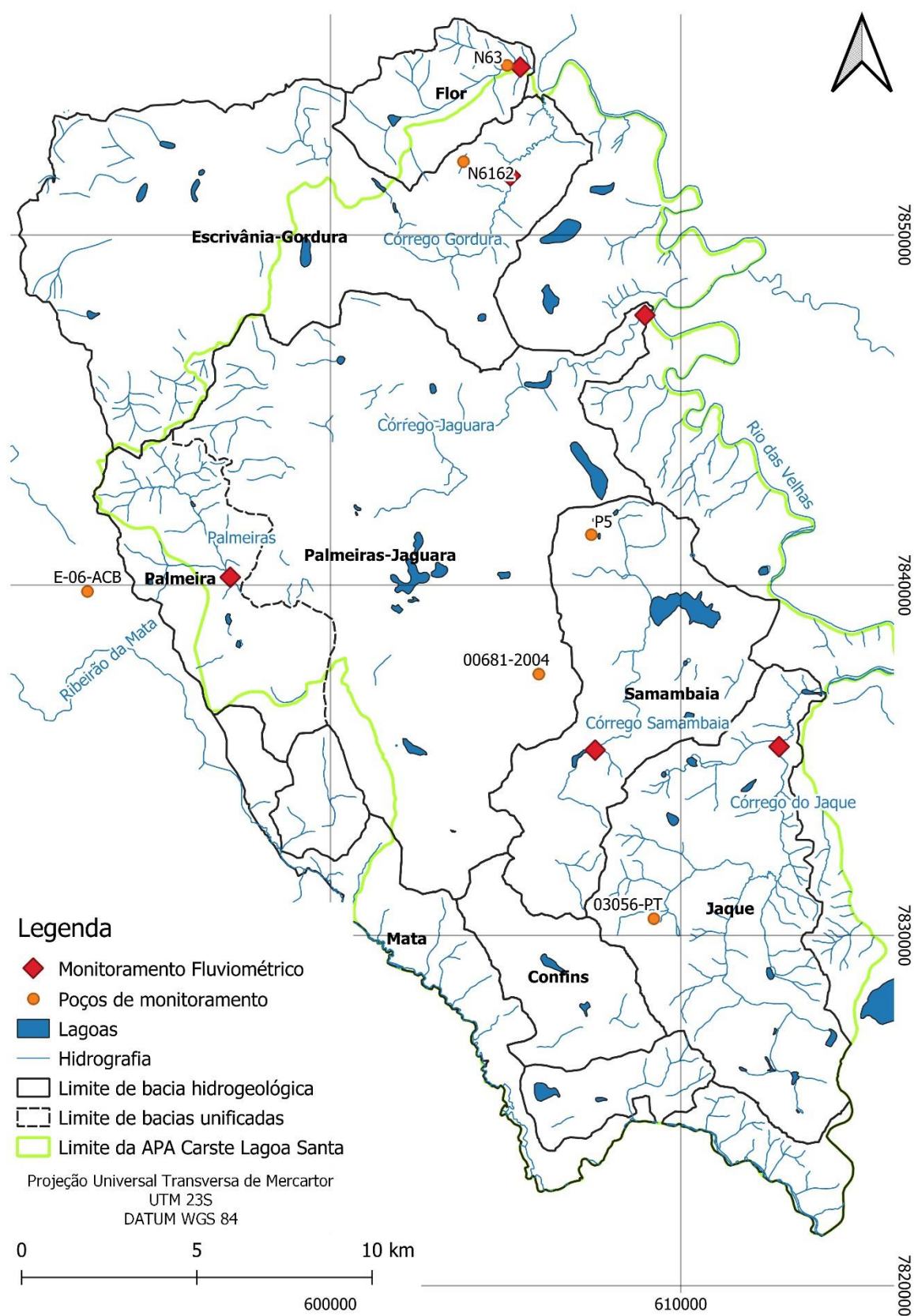


Figura 5 – Mapa da bacia e seus pontos de monitoramento fluviométrico e poços de observação.

Os valores de α utilizados nos cálculos foram obtidos através da conversão dos valores de k (coeficiente de recessão) obtidos pelo programa *Recess* utilizando a relação:

$$\alpha = -1/(k \log e) \quad (15)$$

3.3.3. COMPARAÇÃO DE DESCARGA NA BACIA

Milanovic (1981) apresenta um método para estimar a armazenamento regional, também baseado na curva de recessão, obtendo a drenagem da bacia no hidrograma e comparando esse volume com a queda média do nível da água da bacia, medida em um poço de observação representativo.

Dessa forma, aplica-se o conceito clássico de armazenamento (volume de água liberado por metro quadrado de área por metro linear de queda de carga hidráulica). A queda média no nível da água durante o período de recessão do aquífero pode ser expressa como:

$$H_0 = \frac{V_0}{(A)} = \frac{Q_0 t}{(\alpha A)} \quad (16)$$

$$H_t = \frac{V_t}{(A)} = \frac{(Q_t)t}{(\alpha A)} \quad (17)$$

A variação do volume de água no aquífero é obtida pela diferença entre as equações (16) e (17). Desta forma, o valor da armazenamento é calculado pela razão entre esta diferença e a diferença do nível da água da bacia medida no poço de observação durante os períodos em análise, conforme equação (18). A abordagem utilizada envolveu uma comparação entre cada período de recessão identificado nos hidrogramas e o seu correspondente período de monitoramento do poço de observação. Ao calcular os valores médios resultantes desta comparação, foi obtida uma estimativa do valor de armazenamento para a bacia.

$$S = \frac{(H_0 - H_t)}{(h_0 - h_t)} \quad (18)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo apresenta os resultados de métodos diretos e indiretos para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos no aquífero cárstico da área de estudo com base em poços que bombeiam exclusivamente esse aquífero. Os métodos diretos incluem a análise de testes de bombeamento, a partir dos quais são derivados os parâmetros de transmissividade (T) e armazenamento (S) e fornecem informações sobre o aquífero nas proximidades dos poços. Métodos indiretos incluem a análise de Zona de Captura e a análise de curva de recessão de sub-bacias na área.

4.1. MÉTODOS DIRETOS

A Tabela 1 apresenta os resultados de T obtidos a partir da interpretação dos testes de bombeamento para cada método proposto.

Tabela 1 – Valores de transmissividade (m^2/s) obtidos para os 4 métodos propostos. N = 99 poços.

Estatística	THEIS (1935)	NEUMAN (1972)	MOENCH (1984)	AGARWAL (1980)
Média	5.58×10^{-03}	6.71×10^{-03}	4.50×10^{-03}	5.79×10^{-03}
Mediana	3.70×10^{-04}	4.05×10^{-04}	2.40×10^{-04}	1.92×10^{-04}
Média Geométrica	4.31×10^{-04}	4.95×10^{-04}	2.39×10^{-04}	3.31×10^{-04}
Máximo	6.40×10^{-02}	8.21×10^{-02}	4.96×10^{-02}	6.59×10^{-02}
Mínimo	1.16×10^{-06}	1.67×10^{-06}	2.89×10^{-07}	9.62×10^{-07}

Os resultados revelam pouco desvio entre os métodos empregados e, dentro de cada método, pouca diferença entre os valores da mediana e da média geométrica. Este último é frequentemente utilizado quando se trata de dados cuja amostragem pode variar em várias ordens de grandeza.

A Figura 6A apresenta os resultados dos valores de transmissividade para cada poço na forma de um gráfico de probabilidade normal. Este gráfico é usado para determinar se os dados seguem uma distribuição normal, que é indicada por uma dispersão linear dos pontos ao longo da curva. Porém, mesmo quando plotados em gráfico semi-logarítmico, os resultados apresentam certa assimetria, sugerindo que os valores de transmissividade do aquífero não obedecem a uma distribuição normal ou log-normal. Isto é ainda apoiado pelo teste Shapiro-Wilk, que resultou em um “p-valor” inferior a 10^{-15} para um intervalo de confiança de 95%.

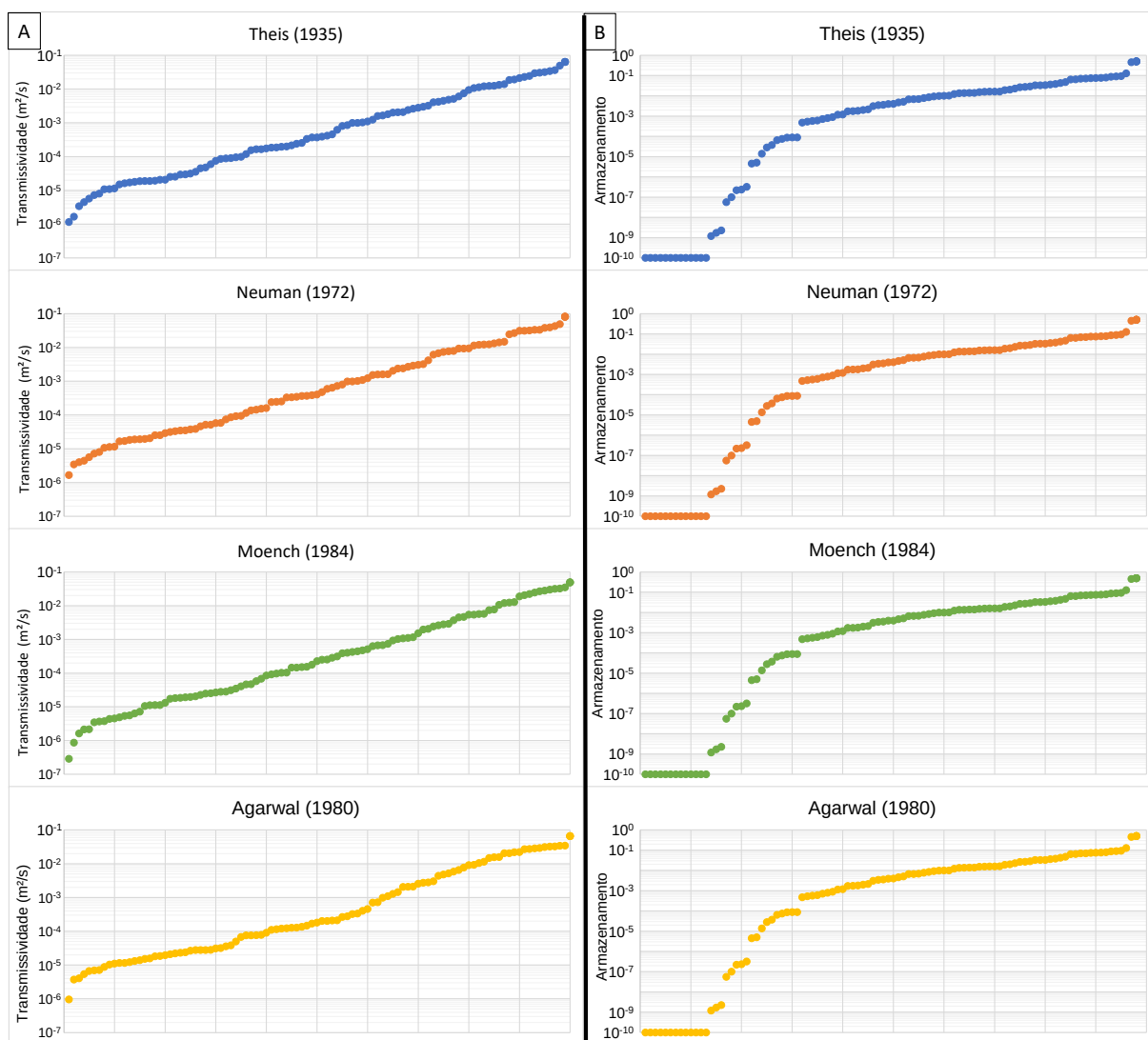


Figura 6 – Gráfico de probabilidade normal para A: valores de transmissividade; B: valores de armazenamento; obtidos através dos 4 métodos de tratamento propostos apresentando não normalidade. N = 99 poços tubulares.

Embora os resultados de transmissividade tenham um comportamento não normal, uma similaridade pode ser observada entre todos os métodos utilizados: uma dispersão quase uniforme dentro das faixas de valores entre 10^{-5} e 10^{-2} m²/s. Portanto, é possível atestar que os métodos apresentam pouca divergência em termos estatísticos, e que a média geométrica está muito próxima da mediana. Isso sugere que todos os métodos empregados são capazes de interpretar a anisotropia e heterogeneidade do aquífero cárstico de maneira similar. É importante ressaltar que o parâmetro T está intimamente ligado à capacidade de exploração do poço e geralmente é mais fácil de estimar em comparação à S.

Além disso, o teste de Kruskal-Wallis apresenta um valor p de 0,3238 para um nível de confiança de 95%, o que comprova que não há diferença estatística significativa entre os métodos utilizados em termos de obtenção de transmissividade no aquífero cárstico dentre os quatro métodos aplicados.

De uma forma geral, os resultados apontam para um aquífero muito heterogêneo e anisotrópico, o que pode ser comprovado pelo amplo espectro de valores de transmissividade, mas também pela diferença de valores obtidos entre a média e a mediana (Tabela 1).

O histograma da Figura 7A e B mostra a distribuição dos valores de transmissividade encontrados para cada ordem de grandeza. Pode-se observar não só como todos os métodos empregados tendem a avaliar a transmissividade no aquífero de forma semelhante, mas também a constância dos resultados obtidos. Embora haja uma variação superior a quatro ordens de grandeza, percebe-se uniformidade de distribuição dentro dessas faixas.

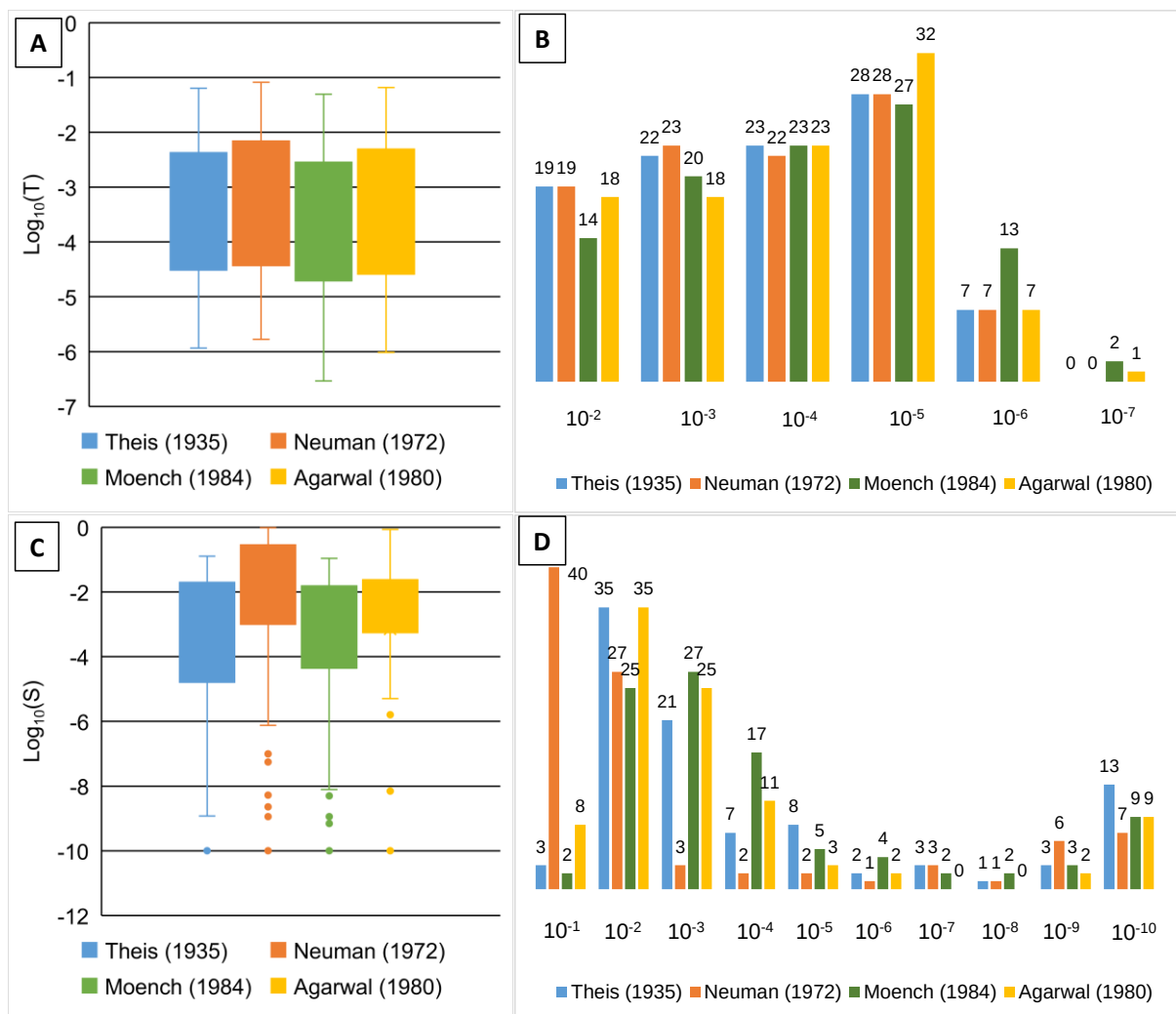


Figura 7 – A: *Boxplot* mostrando resultados estatísticos de T para cada teste; B: Histograma de frequência de cada ordem de grandeza de T obtida para cada método empregado; C: *Boxplot* mostrando resultados estatísticos de S para cada teste; D: Histograma de frequência de ordem de grandeza de S obtida para cada método empregado.

Os valores de transmissividade encontrados por De Paula *et al.* (2020) também variam bastante, com valor mediano de aproximadamente 10^{-4} m²/s. Em contrapartida, Teodoro *et al.* (2019) encontraram valores superiores a 6,0 m/s para condutividade hidráulica em condutos, que, se convertida em transmissividade, exibe valores em torno de 500 m²/s. É importante notar que estas velocidades foram medidas através de observações diretas em rotas conhecidas usando traçadores corante e podem ser representativas de grandes condutos que funcionam como rios subterrâneos no aquífero cárstico maduro da região. Galvão *et al.* (2015) encontraram valores regionais para este parâmetro da ordem de 10^{-2} m²/s em área adjacente com características geológicas semelhantes empregando testes de bombeamento e método de zona de captura.

Em relação a S, os resultados para o aquífero cárstico indicam significativa heterogeneidade e anisotropia, conforme demonstrado pela ampla faixa de valores obtidos (10^{-10} a 10^{-1}) e pela diferença entre os valores médios e medianos. A razão entre os valores medianos e médios geométricos também pode sugerir que certos métodos são mais eficazes na caracterização do aquífero do que outros. Os resultados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de S obtidos a partir dos quatro métodos utilizados. N = 99 poços.

Estatística	THEIS (1935)	NEUMAN (1972)	MOENCH (1984)	AGARWAL (1980)
Média	1.72×10^{-02}	1.78×10^{-01}	1.38×10^{-02}	3.02×10^{-02}
Mediana	3.76×10^{-03}	6.85×10^{-02}	3.51×10^{-03}	6.64×10^{-03}
Média Geométrica	1.06×10^{-04}	1.72×10^{-03}	1.62×10^{-04}	7.21×10^{-04}
Máximo	1.28×10^{-01}	9.60×10^{-01}	1.10×10^{-01}	8.54×10^{-01}
Mínimo	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}

Os valores encontrados para S no aquífero cárstico não apresentam distribuição normal, como mostra a assimetria nos valores do gráfico de probabilidade normal (Figura 6B) e o teste de Shapiro-Wilk (p-valor $< 10^{-13}$).

O teste de Kruskal-Wallis retornou valor inferior a 10^{-9} , indicando que há diferença estatisticamente significativa no método escolhido. Com base no que pode ser observado na Tabela 2, Figura 6B e no histograma da Figura 7C e D, nota-se que o método que mais desvia é o método de Neuman (1972), geralmente apresentando valores uma ordem de grandeza superiores aos demais. Quando realizado o teste de Kruskal-Wallis sobre os resultados excluindo o método de Neuman (1972), o valor encontrado é de 0,2375, o que significa que não há diferença estatisticamente significativa entre esses outros métodos para um nível de confiança de 95%.

Embora os valores de T para o aquífero estejam distribuídos uniformemente na faixa de 10^{-2} a 10^{-5} , os valores de S variam entre 10^{-1} e 10^{-10} , com uma concentração de valores entre 10^{-2} e 10^{-4} . Isso indica que embora existam porções confinadas do aquífero, a estatística aponta uma tendência ao semiconfinamento, e representa a heterogeneidade e anisotropia deste aquífero.

De Paula *et al.* (2020), estudando a mesma área, também encontra considerável heterogeneidade, com valores variando de 10^{-11} a 10^{-1} , e valores modais da ordem de 10^{-4} , com 33% de ocorrências superiores a este valor.

Os valores de S obtidos usando o método de Neuman (1972) são aproximadamente uma ordem de grandeza maiores do que aqueles obtidos pelos outros métodos, conforme mostrado tanto pelos dados de poços individuais quanto pela estatística na Tabela 2. Essa discrepância pode ser atribuída ao fato de que o Neuman (1972) assume que o aquífero livre drena por gravidade durante o estágio intermediário do bombeamento, mas não leva em conta o confinamento que pode existir em um aquífero cárstico devido a condutos pressurizados. Também, essa drenança por gravidade implica em fluxos descendentes a partir das porções mais rasas do aquífero, o que pode ser incompatível com o modelo de alimentação por condutos sub-horizontais do aquífero cárstico da área. Como resultado, o método tende a superestimar o valor de S e pode não ser adequado para uso em um aquífero cárstico, mesmo sob condições de não confinamento.

Destaca-se também a diferença entre os valores medianos e médios geométricos de S obtidos por cada método. Espera-se que a média geométrica leve em conta as assimetrias do aquífero, resultando em um valor próximo da mediana da amostra. O fato de todos os métodos apresentarem valores medianos superiores às médias geométricas sugere que há uma concentração de valores altos de S e que a distribuição é assimétrica. Isso fornece informações sobre a heterogeneidade e anisotropia do aquífero, mas também sobre o melhor método a ser utilizado neste tipo de aquífero.

De fato, quanto mais próximos esses valores estiverem entre si, maior é a probabilidade de que o método represente com precisão as características do aquífero. Dentre os métodos testados, o método de Neuman (1972) apresentou o maior desvio, com valor mediano aproximadamente 40 vezes maior que a média geométrica. O método de Theis (1935) teve um desvio de 36 vezes, enquanto o método de dupla porosidade teve um desvio de 22 vezes. O método de recuperação de Agarwal (1980) apresentou o menor desvio, de 9 vezes, indicando que pode ser o mais eficaz na captura da anisotropia e heterogeneidade do aquífero e na produção de resultados consistentes e representativos.

Isso possivelmente ocorre porque o método de Agarwal (1980) ignora as perturbações do aquífero durante o período de bombeamento, o que favorece a correta interpretação das características hidrodinâmicas naquele ponto, principalmente quando o poço bombeado é utilizado como fonte de medição do nível de água do aquífero.

Além disso, o método Moench de Dupla Porosidade parece ser adequado para avaliar o aquífero cárstico, potencialmente devido à sua proximidade de um modelo cárstico.

4.2. ZONAS DE CAPTURA

Foram construídas três superfícies potenciométricas utilizando os níveis estáticos dos mesmos poços utilizados para os métodos diretos mencionados acima, com intervalo de tempo de quinze anos entre cada superfície. Isto permitiu a observação de seis zonas de captura na área.

As seis zonas de captura estão representadas na Figura 8, numeradas sequencialmente. É evidente que as zonas aparecem perto dos cursos de água na área de estudo, onde a superfície potenciométrica é mais baixa e a concentração de poços é mais alta. Ainda que o método preveja o cálculo da transmissividade em duas direções (paralelo ao fluxo regional – T_x ; e perpendicular ao fluxo regional – T_y), neste estudo pôde-se apenas calcular a transmissividade em direção à x . Isso ocorre porque o ponto onde as zonas de reversão de fluxo encontrado estão localizadas é o ponto de descarga do aquífero, então as linhas de fluxo convergem a esse trecho. Dessa forma, não é viável a delimitação dos limites laterais teóricos das zonas observadas.

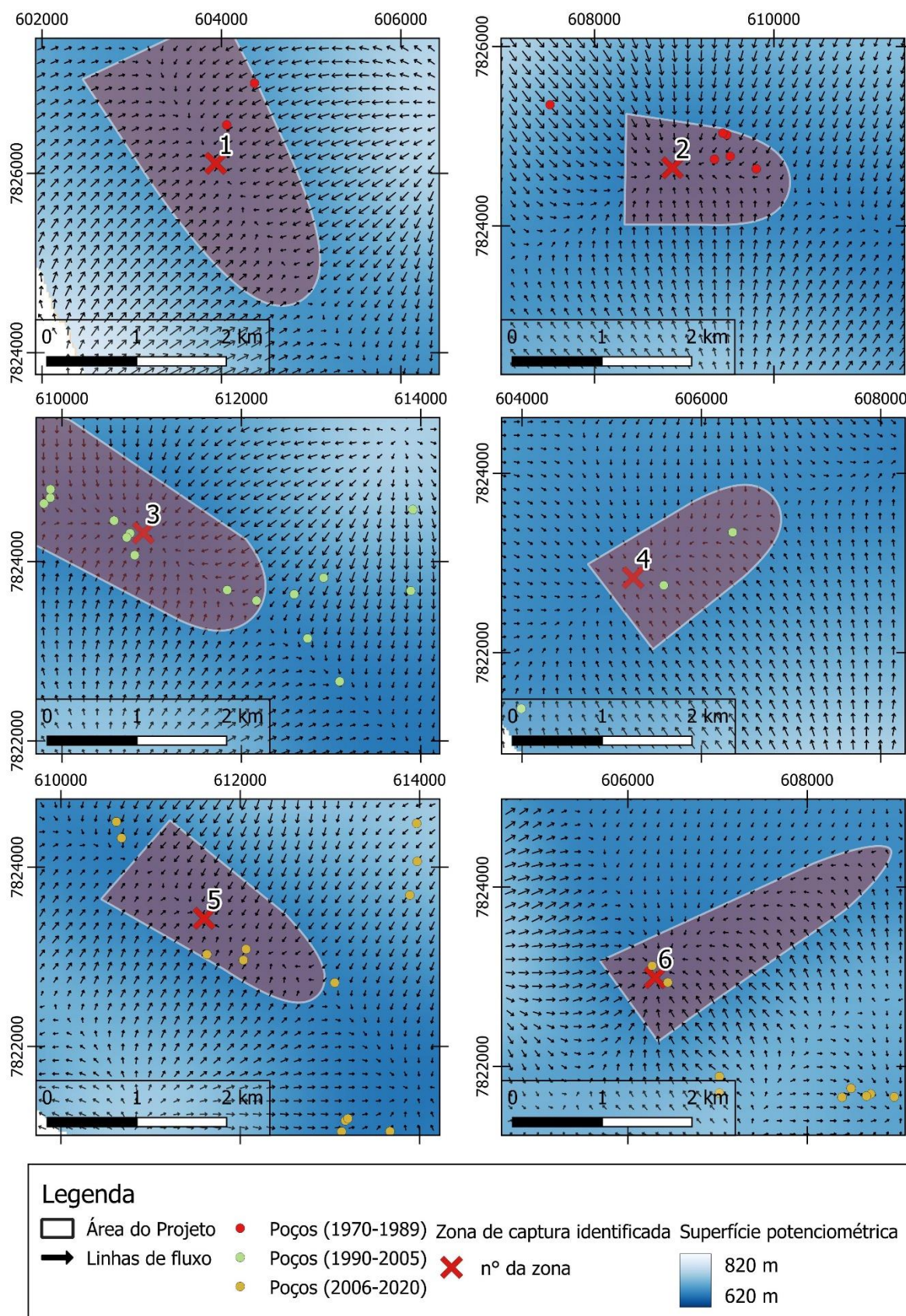


Figura 8 – Zonas de captura observadas para superfícies potenciométricas elaboradas.

Os valores de T (Tabela 3) foram calculados com base nas equações (11) e (12), utilizando o valor de 0,86% para o gradiente hidráulico regional, que foi o valor médio obtido na área.

Tabela 3 – Valores de transmissividade nas Zonas de Captura identificadas na área de estudo.

Zona	Descarga (t) (m ³ /h)	X (m)	T (m ² /s)
1	77,5	1956	$2,04 \times 10^{-04}$
2	673,0	1491	$2,32 \times 10^{-03}$
3	1544,0	1510	$5,26 \times 10^{-03}$
4	56,0	1813	$1,59 \times 10^{-04}$
5	31,0	1500	$1,06 \times 10^{-04}$
6	19,4	2964	$3,37 \times 10^{-05}$
Média	400,2	1872,3	$1,53 \times 10^{-03}$
Mediana	66,8	1661,5	$1,81 \times 10^{-04}$
Média Geométrica	118,1	1812,9	$3,35 \times 10^{-04}$
Máximo	1544,0	2964,0	$5,26 \times 10^{-03}$
Mínimo	19,4	1491,0	$3,37 \times 10^{-05}$

Os valores de transmissividade nas zonas de captura variam em até duas ordens de grandeza, indicando a heterogeneidade e anisotropia do aquífero, semelhante ao observado pelos métodos diretos. Quando são calculados os valores médios e medianos das zonas, obtém-se uma média de $1,53 \times 10^{-3}$ m²/s e uma mediana de $1,81 \times 10^{-4}$ m²/s, que são comparáveis aos valores encontrados nos testes de bombeamento. Esta ampla variação de valores é provavelmente resultado da heterogeneidade inerente do aquífero. Vale ressaltar que o método conseguiu capturar essa característica.

No entanto, este método apresenta alguma incerteza, ainda que os valores obtidos convirjam estatisticamente com os obtidos através de métodos diretos. Apesar dos esforços dos órgãos governamentais para regular a exploração da água por meio do cadastro de poços tubulares, estima-se que para cada poço outorgado no país existam nove poços irregulares (Hirata *et al.*, 2019). Também não é possível confirmar se poços perfurados há mais de 30 anos ainda estão em operação, o que adiciona um elemento de especulação aos cálculos por este método.

Foram avaliadas adaptações para reduzir as incertezas do método. Procurou-se comparar a evolução das zonas ao longo do tempo e ajustar os valores de exploração

para um valor esperado superior, considerando o sub-registo de poços tubulares. No entanto, esta abordagem resultou em incertezas adicionais e em mais divergências em relação aos resultados obtidos utilizando métodos diretos. Portanto, recomenda-se avaliar múltiplas zonas ao utilizar este método para estimar a transmissividade em uma área, conforme mostrado neste estudo (Tabela 3), a fim de melhorar a precisão dos resultados e refletir melhor a realidade do aquífero.

Este método provou ser eficaz na previsão dos valores de transmissividade quando as variáveis necessárias são conhecidas, conforme demonstrado em contexto hidrogeológico semelhante por Galvão *et al.* (2015). Isto mostra que o método pode ser aplicado de forma confiável ao ambiente cárstico. Contudo, devido à heterogeneidade inerente ao aquífero, pode ser necessário avaliar múltiplas zonas de captura para obter resultados com maior confiança para uma grande área.

4.3. ANÁLISE TÉCNICA DE HIDRÓGRAFA

A Figura 9 ilustra as vazões nos cursos principais da bacia analisada (Figura 5), cujo monitoramento permitiu a construção dos hidrogramas que foram utilizados nestas análises. Para cada bacia, o valor médio de S dos 4 anos hidrológicos foi obtido a partir das equações (13) e (14), utilizando o valor mediano de T obtido pelo Método Agarwal (Tabela 1) de $1,92 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (aproximadamente $16 \text{ m}^2/\text{d}$).

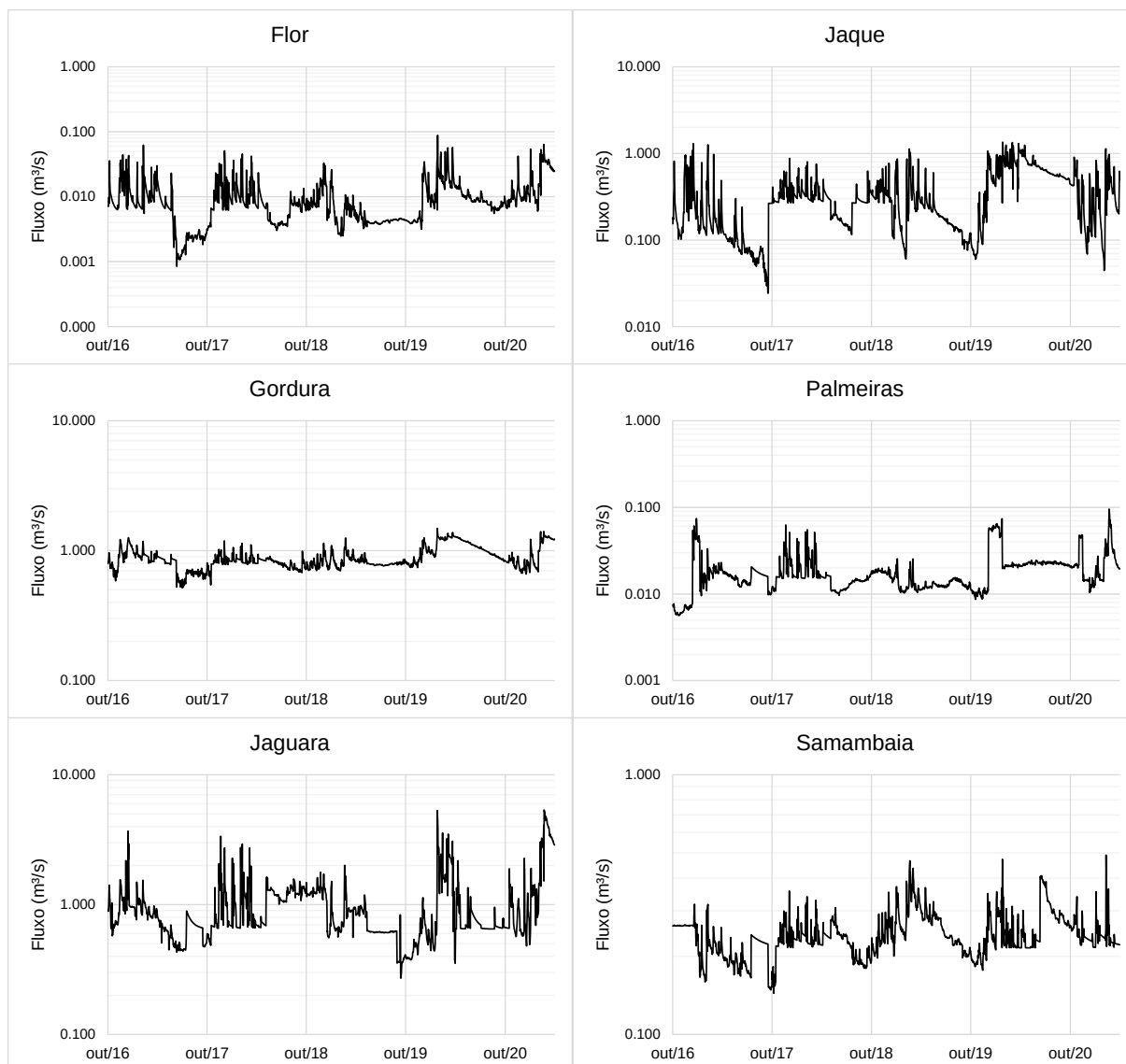


Figura 9 – Hidrograma dos córregos de cada sub-bacia.

Cada série de monitoramento gerou valores de coeficiente de recessão (k) para cada bacia por meio do software *Recess*, cujos valores são comparados aos encontrados por De Paula & Velásquez (2019) na mesma área. Os resultados para S são apresentados na Tabela 4. É importante ressaltar que os valores obtidos pelos referidos autores se baseiam em um único ano hidrológico.

Tabela 4 – Valores do Coeficiente de Armazenamento pelo método Rorabaugh (1964) com base no valor do coeficiente de recessão obtido por De Paula & Velásquez (2019) e neste estudo.

Bacia	k (De Paula & Velasquez, 2019)	S (com K de De Paula & Velásquez, 2019)	k calculado	S obtido
Flor	19	1.27×10^{-02}	42	2.81×10^{-02}
Escrivânia-Gordura	68	1.03×10^{-04}	800	1.21×10^{-03}
Palmeiras-Jaguara	178	4.77×10^{-03}	185	4.96×10^{-03}
Jaque	20	5.36×10^{-04}	111	2.97×10^{-03}
Palmeiras	178	1.12×10^{-03}	60	7.14×10^{-04}
Samambaia	240	4.46×10^{-03}	323	6.01×10^{-03}
Media	117	4.12×10^{-03}	253	7.33×10^{-03}
Mediana	123	3.29×10^{-03}	148	3.96×10^{-03}
Média Geom	76	1.78×10^{-03}	154	3.60×10^{-03}

Os resultados obtidos variam entre $1,03 \times 10^{-04}$ e $2,81 \times 10^{-02}$. Observa-se que, em geral, os dados estão de acordo com o encontrado através dos testes de bombeamento e possuem valor mediano de $3,29 \times 10^{-3}$ utilizando valores de k de De Paula & Velásquez (2019), e $3,96 \times 10^{-03}$ utilizando 4 anos hidrológicos, para todas as bacias.

Ressalta-se que algumas bacias, devido à presença de pontos de regulação de vazão, apresentam valores de k muito elevados, o que pode fornecer valores incorretos para cálculo. É o caso da bacia de Samambaia, conforme discutido por De Paula & Velásquez (2019).

De modo geral, é possível concluir que este método resulta em uma boa aproximação para o valor do valor de S de uma bacia quando há conhecimento sobre o seu valor de T. É importante considerar que certos fatores que podem influenciar os resultados, tais como pontos de estagnação antrópicos no fluxo e a heterogeneidade inerente do aquífero cárstico. Essas características podem interferir no fluxo natural do córrego e devem ser consideradas na avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero.

4.4. COMPARAÇÃO DE DESCARGA NA BACIA

O Coeficiente de Armazenamento também foi estimado em cada bacia pelo método Milanovic (1981), onde o volume de água no córrego da bacia é comparado com a

queda do nível d'água medido em um poço de observação. Para cada bacia foi avaliado um poço de observação entre 2018 e 2020 (Figura 10) concomitante ao monitoramento da vazão.

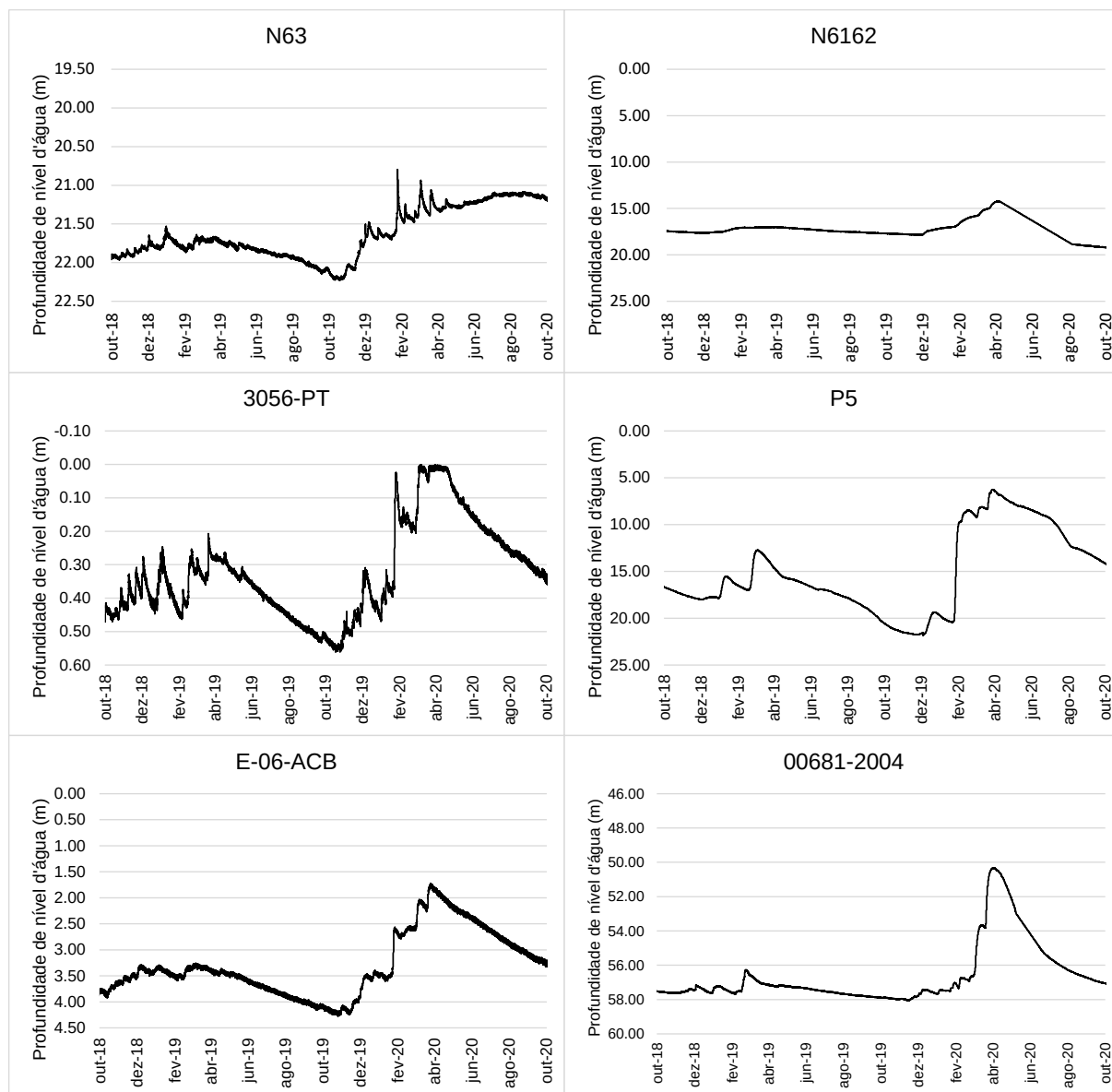


Figura 10 – Histórico de monitoramento dos poços de observação de cada bacia monitorada durante o período de monitoramento de vazões. A localização dos poços é mostrada na Figura 5.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos por esta comparação para cada bacia. Os valores de α utilizados são os mesmos utilizados para cada bacia apresentada na Tabela 4.

Tabela 5 – Valores do Coeficiente de Armazenamento obtidos pelo método Milanovic (1981). Os valores de α utilizados derivam dos valores de k são apresentados na Tabela 4.

Bacia	S anual médio
Flor	2.59×10^{-02}
Escrivânia-Gordura	7.21×10^{-02}
Palmeiras-Jaguara	2.74×10^{-02}
Jaque	3.18×10^{-01}
Palmeiras	9.70×10^{-03}
Samambaia	5.10×10^{-02}
Média	8.40×10^{-02}
Mediana	3.92×10^{-02}
Média Geométrica	4.48×10^{-02}

Os valores encontrados para S por este método são maiores do que aqueles encontrados pelo método desenvolvido por Rorabaugh (1964) (Tabela 4), variando em mais de uma ordem de grandeza entre as diferentes bacias, e apresentando um valor mediano para a área maior que o valor encontrado pelo método Rorabaugh e pelos métodos diretos.

Embora este método exija um refinamento adicional, que pode ser alcançado através do uso de poços de observação mais confiáveis, ainda é uma estimativa razoável quando comparada com os outros resultados apresentados.

Idealmente, poços de observação com condição de confinamento, como o poço 3056-PT, devem ser evitados no cálculo de S , pois a baixa variação do nível da água pode levar a uma superestimativa do valor na bacia. O cálculo do parâmetro utiliza a relação entre o volume de água liberado pelo aquífero pela diferença de nível de água medida no poço. Se a faixa de variação do nível no poço for estreita, o valor de S obtido será mais variável.

Além disso, é importante considerar que devido à complexidade do aquífero cárstico, um poço de observação pode não estar diretamente conectado à bacia e, portanto, pode não representar com precisão as flutuações do nível da água. Isto pode contribuir ainda mais para a incerteza no cálculo do coeficiente e pode levar a conclusões incorretas sobre as características do aquífero.

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos métodos diretos demonstram que os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero cárstico podem ser determinados através de testes de bombeamento utilizando métodos propostos, mesmo quando se mede o rebaixamento dentro do próprio poço de teste, exceto para o método de Neuman (1972). A análise estatística pelo teste de Kruskal-Wallis não revelou diferença significativa entre os métodos na determinação da transmissividade e da armazenagem, exceto para os valores de S pelo método de Neuman (1972).

A ampla gama de valores obtidos indica a presença de um alto grau de anisotropia e heterogeneidade no aquífero. Dentre os métodos diretos, o método de Agarwal (1980) foi identificado como a opção mais confiável, principalmente porque a perturbação do período de bombeamento não envolve o processo de cálculo. Em contraste, o método de Neuman (1972) produziu consistentemente valores mais altos em comparação com os outros métodos. Essa discrepância pode ser atribuída ao fato de o método de Neuman ter sido originalmente projetado para aquíferos livres, considerando um estágio onde o fluxo vertical das porções superiores do aquífero tem influência significativa. No entanto, a formulação matemática do método não leva em conta a pressurização nos condutos, levando a uma superestimativa do valor de S no aquífero cárstico com alimentação principal advinda de condutos sub-horizontais.

A utilização de métodos indiretos para estimar os parâmetros hidrodinâmicos da região produziu resultados alinhados com a situação hidrogeológica local. Os resultados são consistentes com os encontrados por outros pesquisadores da mesma área e foram validados por métodos diretos.

No entanto, é importante reconhecer que tanto os métodos diretos como os indiretos têm limitações. Os métodos diretos baseiam-se em pressupostos que podem não ser inteiramente adequados para aquíferos cársticos, enquanto os métodos indiretos dependem da disponibilidade de pontos de monitoramento, de dados de séries temporais e da representatividade da dinâmica hidrológica da bacia.

Trabalhar com métodos diretos pode fornecer informações mais confiáveis, embora seja limitado pelo efeito de escala e deva ser usado com cautela ao extrapolar devido à anisotropia e heterogeneidade do aquífero cárstico. Por outro lado, os métodos

indiretos podem oferecer uma solução econômica, mas a sua utilização é limitada pela disponibilidade das informações.

Recomenda-se então a utilização de mais poços de observação para garantir que estão devidamente ligados à bacia e que as suas flutuações a representem efetivamente. Também é aconselhável evitar a utilização de poços de observação em condições confinantes, pois podem levar a superestimativas do valor de S. Além disso, é importante evitar pontos de retenção de água, como pequenas barragens, pois interferem no fluxo natural do córrego.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, R. G. (1980). **A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition (20 pp.). <https://doi.org/10.2118/9289-MS>.

ALKMIM, F. F., MARTINS-NETO, M. A. (2001). **A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos.** A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais. SBG, Belo Horizonte, 9-30.

ANDERSON M. P., WOESSNER W. W. (1992) **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport.** Academic Press, New York, 381p.

AULER, A. (1994). **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil.** Western Kentucky University. Dissertação de Mestrado, 110 p.

BAIR, S., G.S. ROADCAP. (1992). **Comparison of flow models used to delineate capture zones of wells: Leaky-confined fractured-carbonate aquifer.** Ground Water 30, no. 2: 199–211.

BÄUMLE, R. (2003). **Geohydraulic Characterisation of Fractured Rock Flow Regimes: Regional Studies in Granite and Dolomite.** 149 p. Tese (Doutorado em Ciencias Naturais) - Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, 2003.

CHEN, X., ZHANG Y., XUE, X., ZHANG, Z., WEI, L. (2012). **Estimation of baseflow recession constants and effective hydraulic parameters in the karst basins of**

southwest China. *Hydrology Research* 1. 43 (1-2): 102–112. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2011.136>.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (1983). **Hidrologia Subterrânea.** second ed. Omega, Barcelona.

DANTAS, J. C. M., VELASQUEZ, L. N. M., DE PAULA, R. S. (2023). **Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area and surroundings, Minas Gerais, Brazil.** *Journal of South American Earth Sciences* 123 104219, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>.

DE PAULA, R. S. (2019). **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG.** PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 272 p.

DE PAULA, R. S., VELÁSQUEZ, L. N. M. (2019). **Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** *Águas Subterrâneas*, 33(2), 119–133. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i2.29252>

DE PAULA, R. S., TEIXEIRA, G. M., RIBEIRO, C. G., SILVA, P. H. P., SILVA, T. G. A., VIEIRA, L. C. M., & VELÁSQUEZ, L. N. M. (2020). **Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** *Águas Subterrâneas*, 34(2), 221–235. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29812>.

DINIZ, H. N & MICHALUATE, W. J. (2002). **Interpretação de testes de produção em poços tubulares profundos – dimensionamento e especificações de bombas submersas.** Instituto Geológico. São Paulo. Bol. Inst. Geol n° 16. ISSN 0100-431X.

FEITOSA, F. A. C., MANUEL FILHO, J., FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A. (2008). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. rev e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID.

GALVÃO, P., HALIHAN, T., HIRATA, R. (2015). **The Karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil.** *Journal of hydrology*, v. 532, p 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.026>.

GHASEMIZADEH, R., YU, X., BUTSCHER C, HELLWEGER F, PADILLA I, *ET AL.* (2015). **Equivalent Porous Media (EPM) Simulation of Groundwater Hydraulics**

and Contaminant Transport in Karst Aquifers. PLOS ONE 10(9): e0138954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138954>.

HIRATA, R., UHOGUSOFF, A., MARCELLINI, S. S., VILLAR, P. C., MARCELLINI, L. (2019). **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.** São Paulo: Universidade de São Paulo / Instituto de Geociências.

KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. (1979). **Analysis and evaluation of pumping test data.** International Institute for Land Reclamation and Improvement, Holanda. Bulletin 11, 200p.

KRUSKAL, W H.; WALLIS, W. A. (1952). **Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis.** Journal of the American Statistical Association. 47 (260): 583–621. ISSN 0162-1459. doi:10.1080/01621459.1952.10483441.

LONG, J.C.S., REMER, J.S., WILSON C.R., WITHERSPOON P.A. (1982). **Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures.** Water Resources Research 18(3):645–658.

MAILLET, E. (1905). **Essais d'hydraulique souterraine et fluviale.** Hermann.

MANGIN, A. (1975). **Contribution à L'étude hydrodynamique des aquiferes karstiques.** Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Dijon.

MAWLOOD, D. K., ISMAIL S. O. (2019). **Comparison between Neuman and Dupuits for pumping test in water Tabel aquifer.** ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences 31(3), 385–391.

MESQUITA, D. C., DANTAS, J. C. M., DE PAULA, R. S., GUERRA, K. J. (2017). **Estudo Dos Parâmetros Hidrodinâmicos Obtidos Em Ensaio De Campo Em Itabirito Brandos Da Porção Sudoeste Do Quadrilátero Ferrífero, MG.** Geonomos - v.25, n.2 (2017)

MILANOVIC, P. T. (1981). **Karst hydrogeology.** Water Resources. Publ., Littleton, Colorado, U.S.A.

MOENCH, A. F. (1984). **Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin.** Water Resour. Res., v. 20, n. 7, p. 831-846.

- MULDOON, M., BRADBURY, K.R. (2005). **Site characterization in densely fractured dolomite: comparison of methods.** *Ground Water*. Nov-Dec;43(6):863-76. doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00091.x. PMID: 16324008.
- NEUMAN, S.P. (1972). **Theory of Flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of the Water Tabel.** *Water Resources Research*, 8, 1031-1045. <http://dx.doi.org/10.1029/WR008i004p01031>.
- NEUMAN, S. P. (1975). **Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response.** *Water Resour. Res.*, 11(2), 329 – 342.
- NOCE, C. M.; TEIXEIRA, W.; MACHADO, N. **Geoquímica dos gnaisses TTG e granitoides neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 27, n. 01, p 25-32, 1997. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.19972532>.
- PANKOW, J. F., JOHNSON R. L., HEWETSON J. P., CHERRY J. A. (1986). **An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the equivalent porous medium (EPM) model.** *J. Contaminant Hydrology* 1(1):65–76.
- PESSOA, P. F. P. (2005). **Hidrogeologia do aquífero cárstico coberto de Lagoa Santa, MG.** Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- PODGORNEY, R.K., R.W. RITZI JR. (1997). **Capture zone geometry in a fractured carbonate aquifer.** *Ground Water* 35,no. 6: 1040–1049.
- QUINLAN, J. F., EWERS, R. O. (1985). **Ground water flow in limestone terranes: Strategy rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas,** in *Proceedings of the National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring* (5th, Columbus, Ohio), pp. 197–234, National Water Well Association, Worthington, Ohio.
- RIBEIRO, J. H.; TULLER, M. P.; FILHO, A. D.; PADILHA, A. V.; CÓRDOBA, C.V. Projeto VIDA. (2003). **Mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de**

Morais, Confins e Funilândia, Minas Gerais – relatório final, escala 1:50.000. 2. ed. Belo Horizonte: CPRM. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29148>.

RIBEIRO, C. G., VELÁSQUEZ, L. N. M., 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.** Revista Águas Subterrâneas, v. 33, n. 1, p. 12-21.

RORABAUGH, M. I. (1964). **Estimating changes in bank storage and groundwater contribution to streamflow.** Int Assoc Sci Hydrol Publ 63:432–441.

SCANLON, B.R., MACE, R.E., BARRETT M.E., SMITH B. (2003). **Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA.** Journal of Hydrology 276:137–158.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. (1965). **An analysis of variance test for normality (complete samples).** Biometrika. 52 (3–4): 591–611. JSTOR 2333709. MR 205384. [doi:10.1093/biomet/52.3-4.591](https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591) p. 593.

TEODORO, M. I. P., VELÁSQUEZ, L. N.M, FLEMING, P. M., PAULA, R. S., SOUZA, R. T., DOI, B. M. (2019). **Hidrodinâmica Do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Revista Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, v. 33, n. 4, p. 392-406. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>.

THEIS, C. V. (1935). **The Relation between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage.** Transactions on American Geophysical Union, Washington DC, 518-524.

THRAILKILL, J. (1986). **Models and methods for shallow conduit-flow carbonate aquifers,** in Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions Conference, pp. 17-31, Water Well Journal Publishers, Dublin, Ohio.

TODD, D.K., 1980. **Groundwater Hydrology.** John Wiley & Sons, NY, p. 535.

TRABUCCHI, M., RAMÍREZ, J., FERNÁNDEZ-GARCIA, D. (2018). **Generalizing Agarwal's Method for the Interpretation of Recovery Tests Under Non-Ideal Conditions.** Water Resources Research. 10.1029/2018WR022684.

WORTHINGTON S. R. H., FORD D. C., BEDDOWS P. A. (2000). **Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution.** In: Klimchouk A., Ford. D.C. and Palmer A.N. and Dreybrodt (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*, Huntsville, Natl. Speleol. Soc., 463-472.

7. APÊNDICE A. NOTAÇÕES

Aqui é apresentada uma lista de todas as notações usadas neste artigo para as equações e fórmulas acima mencionadas.

Notação	Equação	Significado
s	(1)	Rebaixamento
Q	(1)	Descarga
T	(1)	Transmissividade
W(u)	(1)	Função do poço
r	(2)	Distância radial de observação do poço
S	(2)	Coeficiente de armazenamento
t	(2)	Tempo a partir do começo do bombeamento
Sy	(3)	Armazenamento livre
K _v	(6)	Velocidade de fluxo vertical
K _h	(6)	Velocidade de fluxo horizontal
D	(6)	Espessura do aquífero
td	(7)	Tempo adimensional
K	(7)	Condutividade hidráulica
hd	(7)	Carga hidráulica adimensional
Ss	(7)	Armazenamento específico
h	(8)	Altura do nível d'água
h ₀	(8)	Carga hidráulica inicial
h _f	(8)	Carga hidráulica final
s _A	(9)	Rebaixamento de Agarwal
t _p	(9)	Tempo do bombeamento
t _r	(9)	Tempo desde o início da recuperação
N	(10)	Tamanho da amostra
m	(10)	Número de grupos sob comparação
R _i	(10)	Soma das posições no grupo i
n _i	(10)	Número de amostras no grupo i

T_x	(11)	Transmissividade na direção X
X	(11)	Distância do centro da zona de captura à borda
i	(11)	Gradiente hidráulico regional
T_y	(12)	Transmissividade na direção Y
Y	(12)	Metade da distância do centro da zona à borda lateral
α	(13)	Constante de recessão
L	(14)	Distância do ponto de descarga ao eixo de simetria
k	(15)	Coeficiente de recessão
V_0	(16)	Volume inicial de água
A	(16)	Área do aquífero
V_t	(17)	Volume de água no aquífero no tempo t

3. ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE A PARTIR DA CAPACIDADE ESPECÍFICA EM POÇOS TUBULARES DO AQUIFERO CÁRSTICO NA REGIÃO DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA – MG

Resumo: A área de proteção ambiental (APA) do Carste de Lagoa Santa é localizada a aproximadamente 40 km a norte de Belo Horizonte - MG, e é geologicamente composta por rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, principal unidade Neoproterozoica do Cráton do São Francisco. Estas sequências carbonáticas formam um arcabouço para aquíferos cárstico-fissurados de grande importância para o abastecimento de água na região. Atualmente, estudos hidrogeológicos regionais ainda enfrentam a escassez de dados, ocasionada principalmente pelas limitações na execução de testes de aquífero e de produção. Nesse sentido, este estudo apresenta uma abordagem alternativa para a estimativa da transmissividade na APA. O método estabelece correção empírica entre a capacidade específica (Q_s) dos poços e a transmissividade (T) do aquífero no gráfico bi logarítmico. Por meio da regressão, é obtida uma equação que permite estimar T de forma menos custosa. Essa abordagem oferece uma alternativa viável para a obtenção de dados hidrogeológicos em áreas cársticas onde a disponibilidade de recursos para a execução de testes é limitada. Ao aplicar o método proposto na APA, obteve-se resultados aderentes, conforme esperado para esse tipo de aquífero.

Palavras-Chave: transmissividade; capacidade específica; cárste de Lagoa Santa.

Abstract: The Environmental Protection Area (EPA) of Lagoa Santa Karst is located approximately 40 km north of Belo Horizonte (Minas Gerais state) and is geologically composed of carbonate rocks from the Bambuí Group, the main Neoproterozoic unit of the São Francisco Craton. These carbonate sequences serve as a framework for highly significant karst-fissured aquifers that play a crucial role in water supply in the region. Currently, regional hydrogeological studies still face data scarcity, primarily due to limitations in conducting aquifer tests. In this context, this study presents an alternative approach for estimating transmissivity in the EPA. The method establishes an empirical relationship between the specific capacity (Q_s) of wells and the transmissivity (T) of the aquifer on a bi-logarithmic graph. Through regression analysis,

an equation is derived to estimate T in a more cost-effective manner. This approach offers a viable alternative for obtaining hydrogeological data in karst areas where resources for conducting such tests are limited. Applying the proposed method in the EPA area yielded results consistent with expectations for karst aquifers.

INTRODUÇÃO

A área de proteção ambiental (APA) do Carste de Lagoa Santa é uma região cárstica a norte da capital do estado de Minas Gerais, que guarda grande importância histórica, cultural, ambiental e geomorfológica. É marcada pela ocorrência de cavernas, dolinas, sumidouros, bem como paredões calcários ornamentados com pinturas rupestres.

Essa região contém uma população aproximada de 300.00 habitantes, e apresenta rápido crescimento industrial, que pressiona a demanda por recursos hídricos. A pluviosidade média anual é cerca de 1380mm e sua vegetação predominante varia entre cerrado e floresta estacional decidual.

Frente à necessidade do manejo dos recursos hídricos na região, estudos diversos que buscam compreender a dinâmica hidrológica da região se intensificaram. Pesquisas recentes culminaram no desenvolvimento do modelo hidrogeológico conceitual da região (De Paula, 2019), conhecimento das rotas de fluxo (Teodoro *et al.*, 2019), constatações hidroquímicas sobre proveniência das águas (Vieira, 2018), observações acerca das direções de fluxo (Ribeiro *et al.*, 2019), entre outros. Entretanto, a falta de dados robustos e confiáveis ainda impedem a consolidação de um conhecimento total acerca da dinâmica hidrogeológica dessa região, principalmente ao que tange à determinação de parâmetros hidrodinâmicos que auxiliem na quantificação do fluxo subterrâneo.

Nesse sentido, Razack & Huntley (1991) apresentam uma alternativa, demonstrando de forma empírica a correlação direta entre a capacidade específica (Q_s), parâmetro facilmente obtido durante a operação do poço, e a transmissividade (T) do aquífero (em aquíferos porosos). Essa solução contorna também a subestimativa ou superestimativa dos parâmetros para aquíferos heterogêneos ou anisotrópicos, como é o caso na APA, e comprova que a correção dos dados considerando as perdas específicas nos poços é um fator que adiciona incertezas ao resultado, em detrimento da correlação empírica direta.

Mace (1997) ainda comprova que essa relação pode ser obtida também para aquíferos cársticos, e sugere que o valor encontrado pela equação de regressão no aquífero “Edwards”, do estado do Texas, Estados Unidos é utilizável em outros aquíferos similares.

Motivação e objetivos

Frente ao rápido desenvolvimento urbano e industrial da região, a necessidade por recursos hídricos é crescente, e incentiva o acréscimo da exploração das águas subterrâneas. Entretanto, a complexidade de um sistema cárstico maduro e evoluído dificulta a compreensão do comportamento do fluxo subsuperficial na região. Nesse contexto, o conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos e características do aquífero é essencial para melhor controle e gerenciamento de seus recursos hídricos. Objetiva-se apresentar uma equação que relacione T e Q_s a partir da regressão linear do gráfico bi logarítmico que seja capaz de aproximar satisfatoriamente T a partir de dados de vazão, nível estático e nível dinâmico de um poço.

Localização

A área de proteção ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, localizada a norte de Belo Horizonte – MG, compreende integral ou parcialmente os municípios de Lagoa Santa, Matozinhos, Pedro Leopoldo, Funilândia, Confins, Prudente de Moraes e São José da Lapa. É limitada a leste e nordeste pelo rio das Velhas e a sudoeste pelo ribeirão da Mata, e totaliza aproximadamente 505 km² (Figura 1).

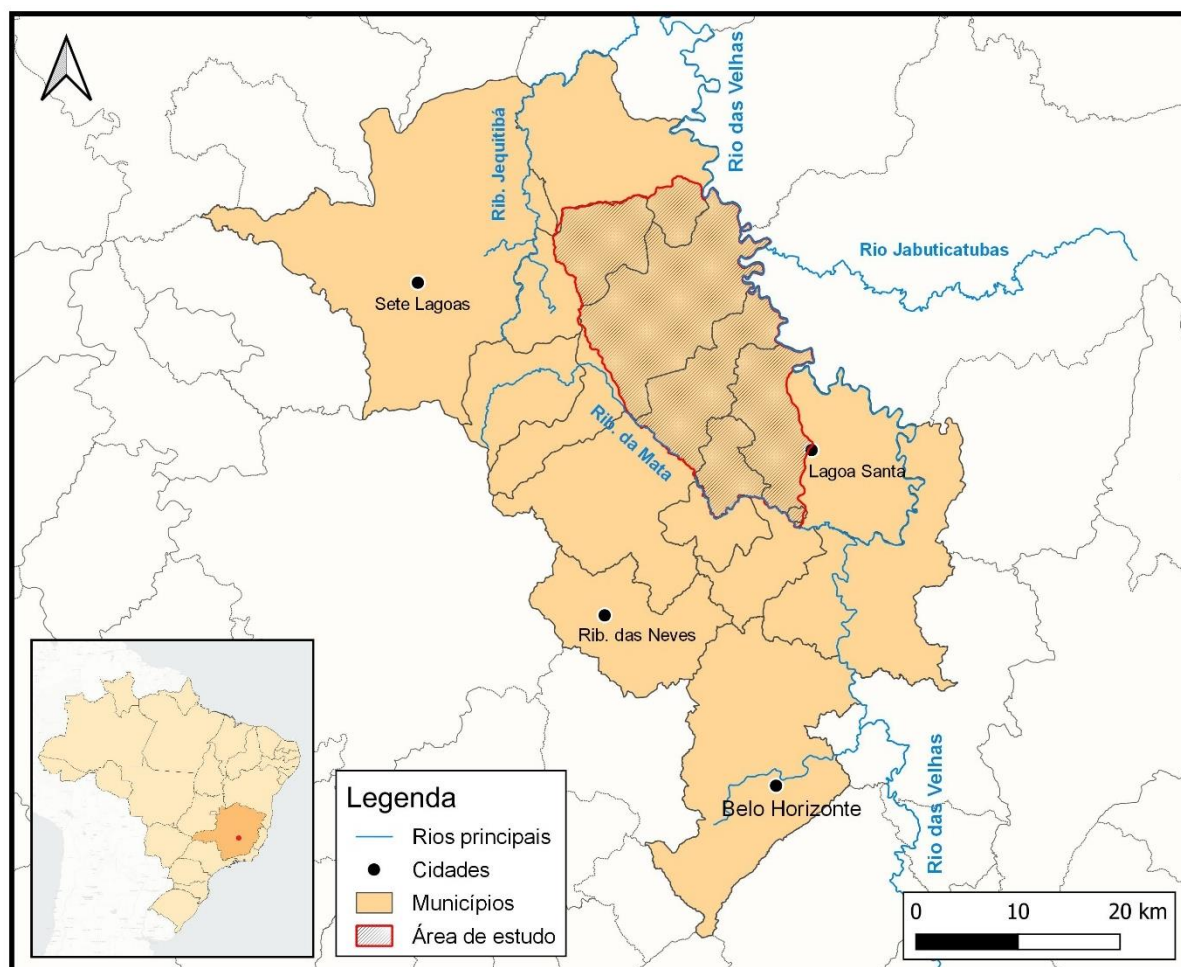


Figura 1 - Localização da área de estudo e principais redes hidrográficas no contexto local.

CONTEXTO LOCAL

Inserida na porção sudeste do Cráton do São Francisco, com predomínio de rochas clásticas e carbonáticas (Alkmim & Martins-Neto, 2001), a APA tem como unidade litoestratigráfica dominante o Grupo Bambuí, espesso pacote pelito-carbonático Neoproterozóico que sobrepõe diretamente o embasamento gnáissico (Ribeiro, *et al.*, 2003). O grupo é dividido em cinco formações, sendo que as duas mais basais ocorrem na área.

Contexto Geológico

A estratigrafia regional tem como base os gnaisses do complexo Belo Horizonte, aflorantes apenas no extremo Sudoeste da área de estudo, que recorrentemente apresentam bandamento composicional e feições de migmatização (Ribeiro, *et al.*, 2003). Sobrepõe-se, em contato brusco, as rochas carbonáticas da Formação (Fm.) Sete Lagoas, compostas majoritariamente por metacalcários e metapelitos (Viana,

Kohler, Tavares, 1998; Ribeiro *et al.*, 2003). O mais relevante aquífero na região está associado à essa Formação, que representa aproximadamente 60% da área de estudo. A Formação é dividida em dois membros, Pedro Leopoldo, na base, e Lagoa Santa no topo. O membro basal consiste em uma intercalação de metapelitos e metacalcários enquanto o superior é de composição predominantemente carbonática calcítica. A Fm. Serra de Santa Helena, unidade superior do Grupo Bambuí na área, é composta por folhelhos, siltitos e lentes carbonáticas intermitentes (Ribeiro *et al.*, 2003).

As unidades do grupo Bambuí aflorantes na região apresentam moderado a alto grau de deformação, com famílias de fraturas, falhas, zonas de cisalhamento e foliação sub-horizontal que controlam os processos erosivos responsáveis pela intensa porosidade cárstica terciária (Ribeiro *et al.*, 2003; Teodoro *et al.*, 2019). Além disso, existe uma dissolução preferencial tanto ao longo dos planos de acamamento quanto das famílias de fraturas verticais, o que influencia a maior abertura e formação de condutos cársticos alargados segundo as principais direções do fluxo subterrâneo regional, cujos *trends* principais são NW-SE, NE-SW e W-E (Auler, 1994; Ribeiro *et al.*, 2019). Regionalmente, as feições cársticas são observadas nas rochas da Formação Sete Lagoas, entre elas dolinas, depressões, poljes e cavernas, que refletem um sistema cárstico maduro (De Paula, 2019).

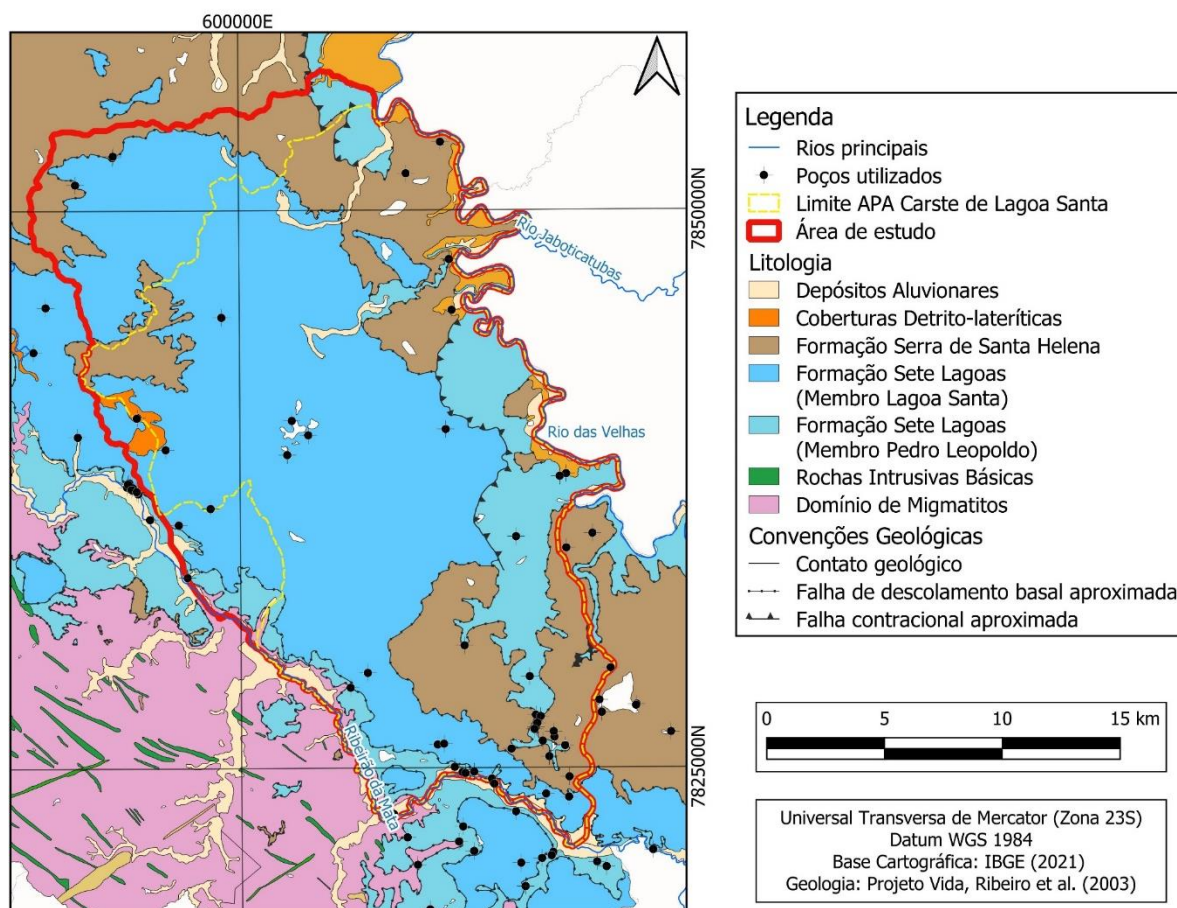


Figura 2 - Geologia da área de estudo e poços utilizados neste estudo.

Contexto Hidrogeológico

A hidrogeologia local pode ser dividida em dois sistemas, um fissural, associado às rochas do embasamento cristalino, e um carbonático, que apresenta características cárstico-fissurais na base e cársticas no topo. Localmente, a espessura do aquífero é irregular, mas regionalmente possui espessura média de 200 m, com porções semiconfinadas pelas camadas pelíticas da Formação Santa Helena (De Paula, 2019). Ressalta-se ainda elevada heterogeneidade e anisotropia do aquífero cárstico em questão, com valores para os parâmetros hidrodinâmicos encontrados em estudos diversos indicando variação por mais de 4 ordens de grandeza (Teodoro *et al.*, 2019; De Paula, *et al.*, 2020).

MÉTODO

Os dados utilizados nesse estudo foram obtidos nas plataformas dos órgãos governamentais, notadamente o SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e o SIAM-MG (Sistema Integrado de Informação Ambiental). Os dados

coletados apresentam informações construtiva dos poços, bem como a geologia percorrida, localização, profundidade, diâmetro, e resultados obtidos por meio dos testes de produção executados no ato do requerimento de outorga, como a vazão de estabilização, o nível estático (NE) e o nível dinâmico (ND). Adicionalmente, apresentam também testes de aquífero ou produção, que contam com valores de vazão, tempo e o rebaixamento provocado, bem como contemplam também uma planilha de recuperação com os tempos decorridos.

Nesse sentido foram separados poços que interceptam o aquífero cárstico da Fm. Sete Lagoas exclusivamente (ou seja, não são poços mistos) que tinham testes de aquífero ou produção, e com isso pôde-se obter os valores de transmissividade para cada poço por meio do método de recuperação de Agarwal (1980). Os cálculos foram realizados com auxílio do programa *Aquifertest* versão 11.0, do fabricante *Waterloo Hydrogeologic*, e o número de testes analisados totalizou 99 poços.

A escolha da utilização do método de recuperação para a determinação do parâmetro tem por objetivo reduzir influências externas e turbulências geradas pelo bombeamento nos poços, conferindo maior verossimilhança nos resultados obtidos.

Os valores de Capacidade Específica (Q_s) dos poços tubulares são obtidos por meio da relação expressa pela Equação (1). O valor de Q_s geralmente é expresso em $m^3/h/m$, sendo uma grandeza relativa à capacidade de exploração de um poço, ou sua produtividade.

$$Q_s = Q / (ND - NE) \quad (1)$$

Onde: Q é a vazão de estabilização do poço;

ND é o nível dinâmico do poço sob a vazão de estabilização;

NE é o nível estático do poço.

Os valores de transmissividade obtidos por meio dos tempos de recuperação para os poços foram plotados contra seus respectivos valores de Q_s num gráfico bi logarítmico, expressando uma função afim. O valor que retorna dessa regressão empírica é uma aproximação satisfatória do valor de T esperado para as intermediações do poço tubular para qualquer valor de Q_s . Um exemplo dessa regressão está apresentado pela Figura 3, em outros aquíferos cársticos.

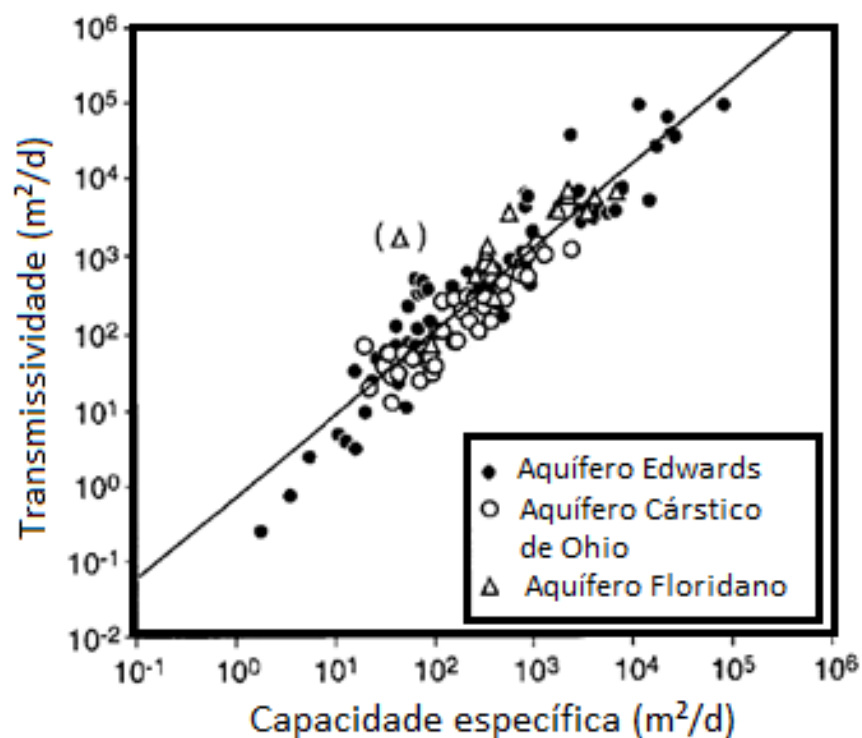


Figura 3 - Comparação dos valores de transmissividade e capacidade específica para os aquíferos "Edwards", "Ohio Karst Aquifer" e "Floridan". A linha contínua apresenta a melhor aproximação para os dados de 3 aquíferos cársticos distintos. Gráfico adaptado de Mace, 1997.

RESULTADOS

Os valores de transmissividade por capacidade específica de cada poço plotados sobre o gráfico bi logarítmico exibem característica linear conforme a Figura 4, e a equação da regressão linear encontrada é dada pela Equação (2).

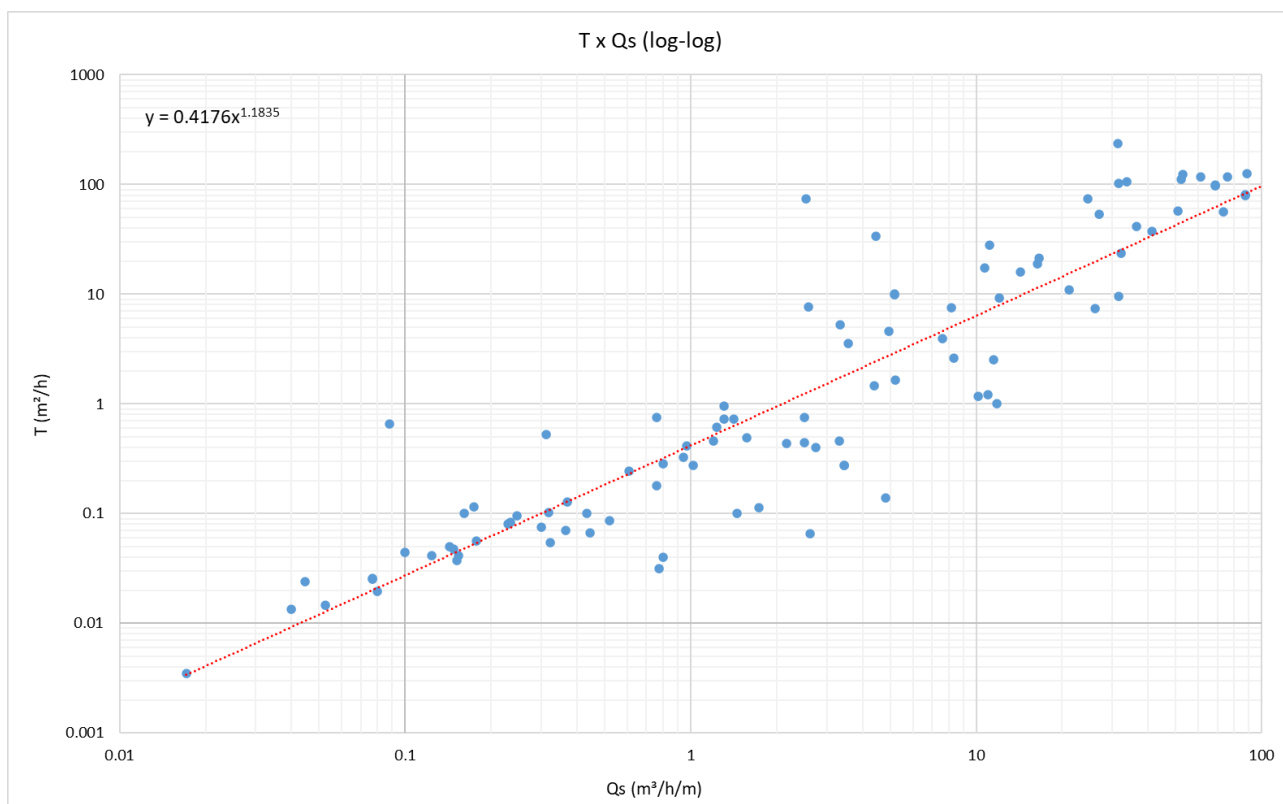


Figura 4 – Resultado dos valores de T contra Q_s para cada poço deste estudo. A linha em vermelho expressa a regressão linear. Gráfico bi logarítmico.

$$T = 0,4176(Q_s)^{1,1835} \quad (2)$$

Onde: Q_s é a vazão de estabilização do poço;

T é a transmissividade.

Observa-se que alguns pontos são *outliers*, e desviam mais de uma ordem de grandeza da regressão traçada. Entende-se que esses pontos podem ocorrer devido à má condução do teste ou perdas devido a questões construtivas dos poços tubulares, que supervaloriza os efeitos de perda específica de alguns pontos.

Além disso, o amplo espectro de abrangência dos valores de Q_s e T são indicativos de alta heterogeneidade e anisotropia do aquífero cárstico em questão, com valores variando de 1×10^{-2} a 1×10^2 .

CONCLUSÃO

De fato, os valores de transmissividade podem ser aproximados pela capacidade específica de cada poço. Para isso é preciso que exista um teste de estabilização que retorne os valores de vazão de estabilização e nível dinâmico do poço, que é uma

informação mais fácil de se obter do que o valor de T, que depende de um teste de aquífero.

Nesse sentido está apresentado um método acessível para estimativa de T para os poços tubulares da região cárstica de Lagoa Santa. Entretanto, de acordo com Mace (1997), essa aproximação é válida para qualquer aquífero com características hidrogeológicas similares, como é o caso do próprio aquífero estudado por ele. Esse autor encontra a relação $T = 0,76(Qs)^{1,08}$ como melhor regressão, resultado que é bem próximo ao observado neste estudo.

Entretanto não é recomendado extrapolar esses valores para muito além das intermediações do poço, uma vez que o aquífero em questão apresenta elevada heterogeneidade e anisotropia, e os valores obtidos para a capacidade específica são função direta das características hidrodinâmicas daquele poço, e podem apresentar muita divergência para outro ponto.

Os resultados desse estudo podem ser utilizados para facilitar o acesso à parametrização de aquíferos com baixo número de testes, abreviando a necessidade de testes de aquífero ou produção em áreas remotas ou de dados escassos. Recomenda-se, todavia o balizamento dos resultados por valores de referência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, R.G., (1980). ***A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data.*** Proceedings of the 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. Paper SPE 9289.

ALKMIM, F. F., & MARTINS-NETO, M. A. (2001). **A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos.** A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais. SBG, Belo Horizonte, 9-30.

AULER, A. (1994). ***Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil.*** Western Kentucky University. Dissertação de Mestrado, 110 p.

DE PAULA, R. S. (2019). **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Doutorado em

Hidrogeologia – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 272p.

DE PAULA, R. S., TEIXEIRA, G. M., RIBEIRO, C. G., SILVA, P. H. P. DA, SILVA, T. G. A., VIEIRA, L. C. M., & VELÁSQUEZ, L. N. M. (2020). **Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** *Águas Subterrâneas*, 34(2), 221–235. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29812>.

MACE, R. E. (1997). *Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer.* *Ground Water*, v. 35, p. 738–742.

RAZACK, M., HUNTLEY, D. (1991). *Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer.* *Ground Water* 24, 519–524.

RIBEIRO, J. H.; TULLER, M. P.; FILHO, A. D.; PADILHA, A. V.; CÓRDOBA, C.V. PROJETO VIDA. (2003). **Mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – relatório final, escala 1:50.000.** 2. ed. Belo Horizonte: CPRM. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29148>.

RIBEIRO, C. G., VELÁSQUEZ, L. N. M., 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.** *Revista Águas Subterrâneas*, v. 33, n. 1, p. 12-21.

TEODORO, M. I. P., VELÁSQUEZ, L. N.M, FLEMING, P. M., PAULA, R. S., SOUZA, R. T., DOI, B. M. (2019). **Hidrodinâmica Do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** *Revista Águas Subterrâneas*, Belo Horizonte, v. 33, n. 4, p. 392-406. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i4.29532>.

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. 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.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV/ICMBio) pelo financiamento, Proc. FUNDEP/GER-DAU/UFMG Nº 22.317, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG). Ao PPGEOL (Programa de Pós-graduação em Geologia) e LEHID (Laboratório de Estudos Hidrogeológicos).

4. COMPARTIMENTAÇÃO E PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUIFERO DA REGIÃO DO CARSTE CENTRAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL

RESUMO

A Área De Proteção Ambiental Do Carste De Lagoa Santa (APA) é uma exuberante região cárstica, conhecida por sua variedade faunística, botânica, arqueológica, e espeleológica, com relevantes achados de influentes pesquisadores naturalistas, como Peter W. Lund, além de ser lar do esqueleto humano mais antigo das américas: Luzia. Ainda assim, esses valores estão em conflito com o acelerado crescimento socioeconômico e industrial da região. Em meio a essa dualidade, a sensibilidade da região é ressaltada ainda mais pela vulnerabilidade aquífera, visto que em um contexto de carste maduro, as opções de exploração de água são voltadas para as fontes subterrâneas. Nesse sentido é fundamental que sejam conhecidas as questões que regem o escoamento subsuperficial para correto manejo das reservas aquíferas e mitigação de conflitos hídricos. Para isso, este estudo apresenta os parâmetros hidrodinâmicos obtidos por meio do tratamento de testes de vazão em vários poços da área utilizando o método de recuperação de Agarwal (1980) nas diversas unidades aquíferas delimitadas por De Paula (2019) e Dantas *et al.* (2023), cujos limites foram reavaliados neste trabalho. A compartimentação horizontal das áreas mais carstificadas no aquífero cárstico-fissural foi realizada por meio de álgebra de mapas pela multiplicação da superfície interpolada de transmissividade pela porosidade, enquanto a separação vertical foi definida por densidade de entradas de água e produtividade, permitindo a determinação de quatro zonas de maior carstificação. No aquífero fissural, os limites verticais avaliados são concordantes com aqueles estabelecidos por Dantas *et al.* (2023) com base na densidade de entradas d'água e produtividade dessas entradas por profundidade. O trabalho estabelece uma estimativa para os valores dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos da região da APA, ressaltando a heterogeneidade e anisotropia dos aquíferos cárstico-fissurais e fissurais, enquanto comprova a isotropia e alta relevância produtiva dos aquíferos aluvionares.

Palavras-chave: transmissividade; armazenamento; compartimentação cárstica; carste de Lagoa Santa.

ABSTRACT

The Environmental Protection Area of Lagoa Santa Karst (APA) is a lush karst region, known for its diverse fauna, flora, archaeological, and speleological importance, with significant discoveries by influential naturalist researchers like Peter W. Lund. It is also home to the oldest human skeleton in the Americas: Luzia. Nevertheless, these values are in conflict with the rapid socio-economic and industrial growth of the region. Amidst this duality, the region's aquifer vulnerability is further emphasized, given that in a mature karst context, water supply options are focused on underground sources. Therefore, it is essential to understand the factors governing subsurface flow for proper aquifer management and mitigation of water conflicts. To this end, this study presents the hydrodynamic parameters obtained through the analysis of pumping tests in various wells within the area using the Agarwal Recovery (1980) method in the different aquifer units defined by De Paula (2019) and Dantas *et al.* (2023), whose boundaries were re-evaluated in this work. Horizontal compartmentalization of the most karstified areas in the karst-fissured aquifer was performed using map algebra by multiplying the interpolated transmissivity surface by porosity, while vertical separation was defined by water inlet density and well productivity, allowing the delimitation of four zones of greater karstification. In the fissured aquifer, the evaluated vertical boundaries are consistent with those established by Dantas *et al.* (2023) based on water inlet density and the productivity of these inlets by depth. This study provides estimates for the hydrodynamic parameters of the aquifers in the APA region, highlighting the heterogeneity and anisotropy of the karst-fissured and fissured aquifers, while confirming the isotropy and high productive relevance of the alluvial aquifers.

Keywords: transmissivity; storativity; karst compartmentalization; Lagoa Santa karst.

1. INTRODUÇÃO

Pouco mais de 35 km a norte da capital do estado de Minas Gerais se localiza a Área De Proteção Ambiental Do Carste De Lagoa Santa (APA), que está posicionada em meio a um rápido crescimento urbano e econômico. Região conhecida nacionalmente pelas exuberantes cavernas, fonte de estudo de renomados e históricos pesquisadores, como o naturalista Peter Lund, e valiosos achados arqueológicos e faunísticos (Da-Gloria *et al.*, 2017), a APA está em meio a um complexo e frágil ecossistema, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica superficial, escassa na região dada a maturidade do sistema cárstico, que impulsiona a exploração das reservas aquíferas locais.

Nesse sentido o conhecimento das questões relacionadas à quantificação das reservas se torna importante para o correto manejo do recurso e a resolução de conflitos hídricos, além da possibilidade remediação de áreas contaminadas, visto que o sistema cárstico da região apresenta elevada vulnerabilidade aquífera (Silva, 2022).

Todavia, a correta avaliação das condições de circulação subterrânea da água depende de fatores geológico-estruturais, e considerando a dissolução das rochas carbonáticas (principal ocorrência geológica da região), a geometria resultante é função também do tempo, com a evolução de um complexo sistema aquífero. Por isso é comum classificar esse tipo de sistema como altamente heterogêneo e anisotrópico (Ford e Williams, 1991), e essa característica é constatada por variados autores que estudaram a área, e com foco nos parâmetros hidrodinâmicos, cita-se principalmente De Paula *et al.* (2020).

Fica claro, portanto, que as condições que regem a percolação da água pelo aquífero cárstico são majoritariamente definidas pela porosidade terciária, o que torna a avaliação desse sistema ainda mais complexo, porque ela está sujeita também a interferências do efeito de escala (Goldscheider e Drew, 2007; Galvão, *et al.*, 2015). Feitosa *et al.* (2008) ressaltam que, embora os sistemas cársticos não satisfaçam as condições para a aplicação de métodos para interpretação de testes de bombeamento, é possível aplicar alguns métodos para obtenção da transmissividade e do coeficiente de armazenamento, ainda que a extrapolação dos resultados seja desaconselhada, visto que são representativos apenas das imediações do poço testado.

Portanto, este estudo visa avaliar o comportamento desse sistema aquífero, com base no modelo hidrogeológico conceitual elaborado por De Paula (2019) e refinado por Dantas *et al.* (2023). Considera-se parte do sistema: as coberturas, em especial a cobertura aluvionar, e o aquífero fissural, base do sistema regional. Para mitigar as complicações decorrentes do efeito de escala, o aquífero cárstico-fissural é compartimentado em zonas mais carstificadas e menos carstificadas, o que favorece a compreensão e o entendimento da hidrodinâmica regional.

2. DESCRIÇÃO DA ÁREA

A área de estudo tem aproximadamente 505 km² e está localizada ao norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG). Essa área está delimitada a oeste e sul pelo ribeirão da Mata e a leste pelo rio das Velhas, e abrange total ou parcialmente os municípios de Funilândia, Prudente de Moraes, Matozinhos, Pedro Leopoldo, Confins e Lagoa Santa (Figura 1). Além disso, a região de estudo engloba toda a “Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa” (APA), constituída por um frágil sistema cárstico que exhibe diversas feições de relevo decorrentes da ação hidrológica no local.

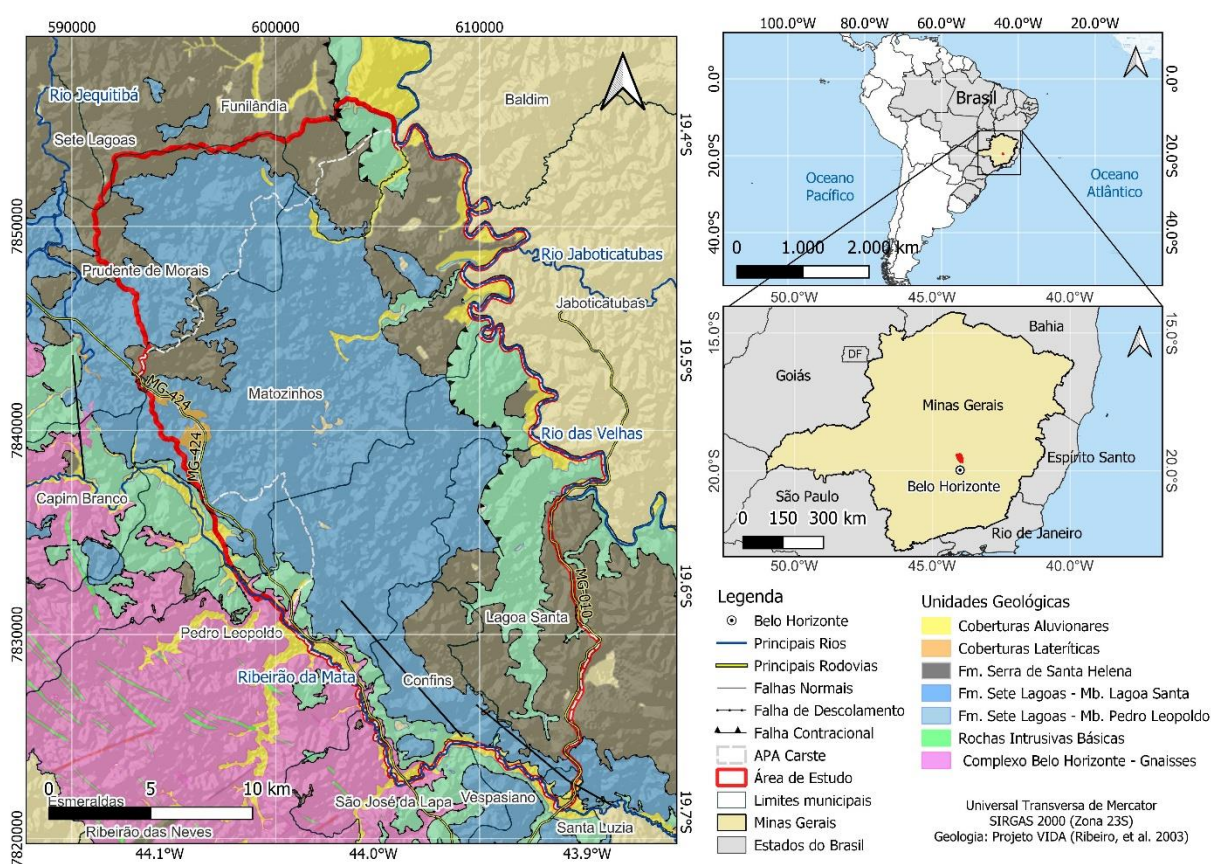


Figura 1 – Localização da área de estudos no contexto sul-americano, estadual e municipal, com representação da geologia local.

2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

Em um contexto geológico regional, a área de estudo está localizada na porção centro-sudeste do Cráton São Francisco. Estratigraficamente, a área é constituída, da base para o topo, pelo embasamento cristalino do Complexo Belo Horizonte, sobreposto por rochas sedimentares Neoproterozóicas pertencentes ao Grupo Bambuí, mais especificamente pelas formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, localmente sobrepostas por coberturas sedimentares Cenozóicas (Alkmim & Martins-Neto, 2001).

O Complexo Belo Horizonte (CHB) é composto por rochas gnáissico-granítico-migmatíticas do Arqueano e Paleoproterozóico. Os gnaisses dessa unidade exibem bandamentos leucocráticos e melanocráticos, podendo apresentar até mesmo feições de migmatização (Ribeiro *et al.*, 2003; Ribeiro *et al.*, 2016).

Acima do CBH, tem-se as sucessões pelito-carbonáticas da Formação Sete Lagoas, que é subdividida em dois membros: na base, Membro Pedro Leopoldo e, no topo, Membro Lagoa Santa. O Membro Pedro Leopoldo é constituído por calcissiltitos e calcilutitos impuros e silicosos, finamente laminados, com granulometria fina e coloração clara. Já o Membro Lagoa Santa, por outro lado, é composto por calcários puros, como calcarenitos associados a calcissiltitos e calcirruditos (Ribeiro *et al.*, 2003; Ribeiro *et al.*, 2016; Teixeira, Pena e Silva, 2020).

Sobre a Formação Sete Lagoas, são identificadas rochas metapelíticas, compostas por metassiltitos e metargilitos da Formação Serra de Santa Helena. Por fim, em sequência, observam-se coberturas cenozóicas constituídas por sedimentos do tipo detrito-lateríticas e aluvionares (Ribeiro *et al.*, 2003).

O Membro Lagoa Santa cobre a maioria da superfície da área, enquanto o Complexo Belo Horizonte aflora sutilmente na porção sul e oeste da área, imediatamente sotoposto pelo Membro Pedro Leopoldo. As coberturas são encontradas próximo das margens dos córregos ou em platôs como depósitos localizados (Figura 1).

2.2. EVOLUÇÃO GEOLÓGICA E ESTRUTURAL

Situada no contexto da Bacia de São Francisco, que recobre o embasamento do Cráton do São Francisco, a área é entendida como uma bacia intracratônica que foi preenchida predominantemente por rochas sedimentares proterozóicas em ciclos tecto-sedimentares distintos (Fragoso *et al.*, 2011).

A evolução geológica da Bacia de São Francisco se deu a partir do soerguimento da Faixa Brasília, a oeste do Cráton e da Faixa Araçuaí, a leste. Em um contexto de ambiente marinho plataformar, foram depositadas sequências sedimentares detríticas e químicas que deram origem ao Grupo Bambuí (Chang *et al.* 1988; Alkmim & Martins-Neto, 2001; Baptista, 2004).

Em termos estruturais, com a evolução da edificação das faixas orogênicas, processos de deformação de caráter rúptil-dúctil afetaram toda a Bacia. Nesse sentido é constatada maior intensidade de deformação a partir das faixas móveis em direção às porções centrais do Cráton (Ribeiro *et al.*, 2003).

Ribeiro *et al.* (2003) dividiram a região sul do Cráton em três domínios tectono-estruturais: o compartimento leste, o compartimento central e o compartimento oeste. O compartimento leste (que contém a área de estudo) exhibe elementos estruturais com vergência para oeste, apresentando falhas de empurrão, cavalgamento e cisalhamento. A Formação Sete Lagoas e Formação Serra de Santa Helena exibem pares conjugados de fraturas nas direções NE e NW, similares as direções de fraturas observadas e caracterizadas no embasamento cristalino.

Os aspectos do controle estrutural da área refletem diretamente nos padrões de drenagens locais, haja visto que o rio das Velhas e o ribeirão da Mata estão direcionados para NNW (Pessoa, 2005).

Além disso, devido a uma maior dissolução das rochas ao longo de planos de estratificação e fraturas verticais, é possível identificar um alargamento nos condutos dada a percolação preferencial da água subterrânea por essas estruturas (Auler, 1994; Ribeiro *et al.*, 2019). Teodoro (2020) calculou o provável diâmetro de alguns condutos por meio de técnicas de traçadores corantes, obtendo resultados de variam de fraturas milimétricas a aberturas de 1,50 m ou mais, como por exemplo o caso da conexão Goiabeiras-Gordura, cujo diâmetro calculado é de 2,40 m. Inclusive, poços de monitoramento da área de estudos foram filmados com equipamento de perfilagem ótica (Figura 2) e demonstraram, em alguns casos, aberturas cavernosas com mais de um metro de altura, comprovando os cálculos da supracitada autora.

2.3. GEOMORFOLOGIA

O contexto geomorfológico da região cárstica de Lagoa Santa é marcado por um relevo ondulado e montanhoso, exibindo afloramentos de rochas calcárias (Viana, Kohler e Tavares, 1998).

Herrmann *et al.* (1998) dividiram os relevos mais proeminentes em dois tipos: Compartimentos não Cársticos e Compartimentos Cársticos. Em Compartimentos não Cársticos, o relevo é esculpido por um padrão de drenagem dendrítica, exibindo colinas com topos alongados e convexos em metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Por outro lado, os Compartimentos Cársticos são marcados por abismos e desfiladeiros, com grandes paredões e maciços rochosos, além de cavernas, vales fechados, vales cegos, torres, arcos e pontes ruiniformes. Os maciços que ocorrem em dolinas geralmente estão associados a sumidouros (Ribeiro *et al.*, 2017).

A presença de dolinas, depressões, condutos, cavernas, poljés, dentre outras feições morfológicas são indicativos de um ambiente cárstico evoluído (De Paula & Velásquez, 2019). Amaral (2018) delimita 393 depressões cársticas na área de estudo, exibidas em sua maioria na Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa. Além disso, segundo esse mesmo autor, cerca de 164 depressões são delimitadas por maciços calcários.

A diferenciação erosiva foi, em geral, fundamental na elaboração das formas de relevo desnudados, aos quais os calcários mostram-se expostos, em detrimento de locais em que estão encobertos (De Paula, 2019). A erosão diferencial é fruto de mudanças paleoclimáticas, bem como de distintos tipos de rocha.

Os maciços calcários rochosos possuem diversas fraturas, condutos e descontinuidades que favorecem a percolação de água e, consequentemente, contribuem para o abastecimento de aquíferos locais (recarga direta). O abastecimento dos aquíferos também pode ser realizado de forma lenta e difusa por meio de lagoas que acumulam e reservam água nas depressões durante os períodos chuvosos (Amaral, 2018).

Os planos de falha, foliação e zonas de cisalhamento contribuem significativamente para o processo de erosão e percolação da água subterrânea, e favorecem a evolução da porosidade terciária do terreno cárstico (Teodoro *et al.*, 2019). Nesse contexto entende-se o porquê de não serem identificados muitos cursos d'água superficiais,

mas são observados sumidouros ou pontos de surgências e ressurgência (Viana, Kohler e Tavares, 1998). Portanto, a exploração de água ocorre principalmente nos aquíferos cársticos (Paula & Velásquez, 2019; Ribeiro *et al.*, 2019, Teodoro *et al.*, 2019).

2.4. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

No contexto local da Bacia do Rio das Velhas, 10 sub-bacias podem ser delimitadas, sendo elas: Jaque, Samambaia, Palmeiras, Jaguará, Escrivânia-Gordura, Flor, Confins, Retiro, Mata margem esquerda e rio das Velhas margem esquerda. Elas formam uma rede de drenagens subterrâneas favorecidas pelo sistema cárstico para o desenvolvimento de aquíferos em subsuperfície (Viana, Kohler e Tavares, 1998).

A presença de fraturas sub-horizontais ao longo dos planos de acamamento dos calcários (Figura 2 – A-D) e verticais no embasamento cristalino (Figura 2 – E e F) contribuem também para o desenvolvimento e aumento da produtividade dos aquíferos na região. A interseção dos planos de acamamento e de fraturas verticais fornece as linhas de fraqueza principais onde se estabelecem condutos de dissolução nas rochas carbonáticas, com direção preferencialmente para E-NE, seguindo o suave mergulho das camadas (Ribeiro *et al.*, 2019; Pena *et al.*, 2021).

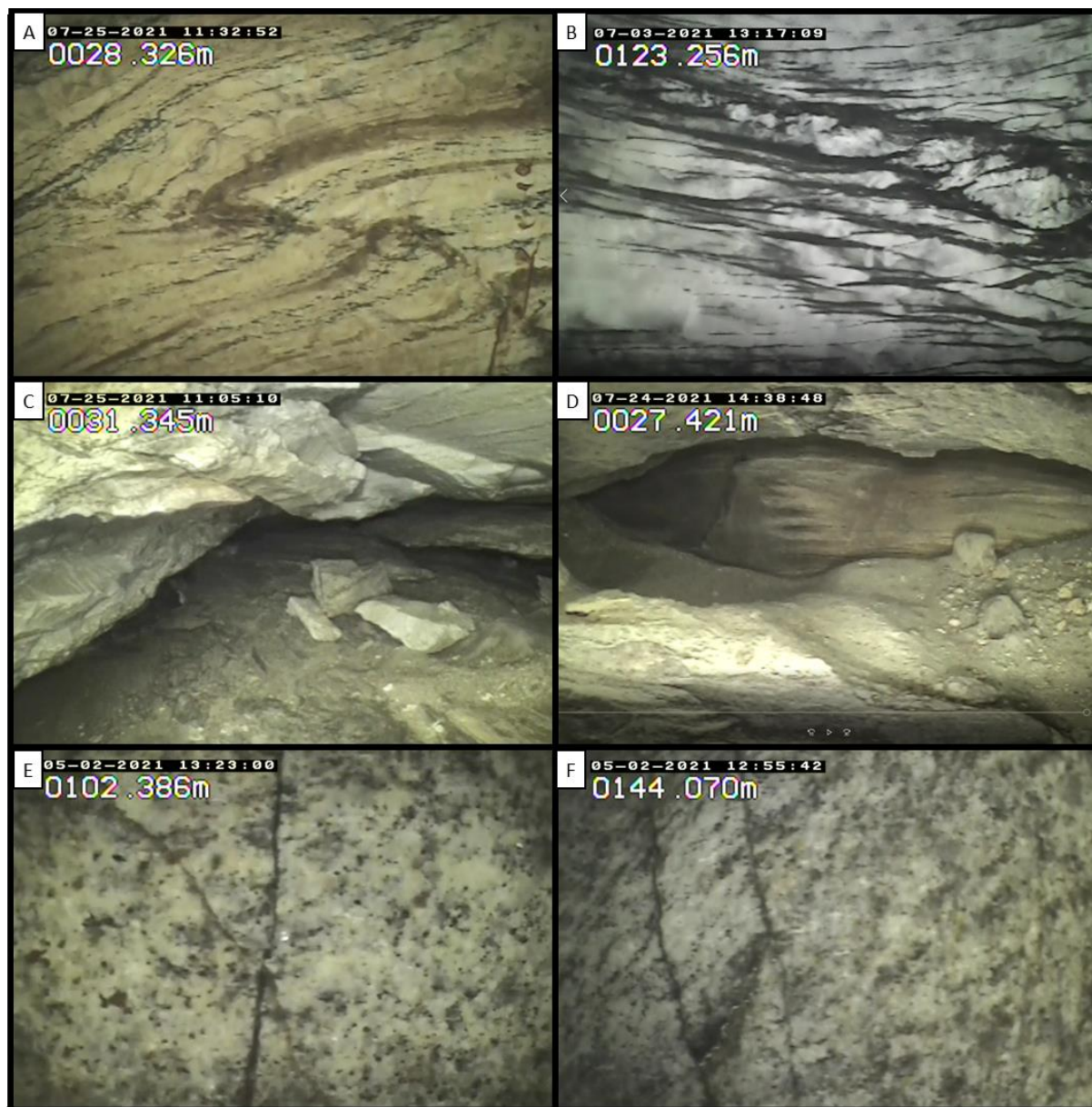


Figura 2 – Imagens capturadas por perfilagem ótica em poços da região, com informação de data, hora e profundidade na figura. a) Calcário exibindo feições de deformação com falha e pequena dobra, com planos de foliação evidentes. b) Calcário com estruturas de cisalhamento. c) Conduto cavernoso métrico formado com desprendimento de blocos. d) Entrada d'água em forma de conduto oblato. e) Granito fraturado no embasamento (Aquífero Fissural). f) Gnaiss do embasamento exibindo fraturas subverticais paralelas.

De Paula (2019) apresenta uma compartimentação vertical e horizontal do sistema aquífero cárstico-fissural para a Formação Sete Lagoas fundamentada principalmente nas cotas de entradas d'água, das nascentes e poços tubulares, bem como em características geológico-estruturais da região.

Com isso, o autor determina a subdivisão da área em quatro unidades aquíferas constituídas, da base para o topo, por: um aquífero fissural (constituído pelas rochas granito-gnaiss-migmatíticas do CBH); aquífero cárstico-fissural (calcários da Formação Sete Lagoas) sotoposto, em cota, pelo aquífero cárstico; aquífero aquífero (rochas metapelíticas da Formação Serra de Santa Helena) e, cobrindo localmente a estratigrafia da área, os aquíferos rasos (coberturas formadas por coberturas detrítico-lateríticas e sedimentos aluvionares).

Dantas, *et al.* (2023), adotaram novos aspectos acerca do comportamento hidrogeológico a partir da reorganização de dados coletados anteriormente na região de estudo. Dessa forma, atualizaram a compartimentalização horizontal no aquífero cárstico e modificaram a compartimentalização vertical para os aquíferos cárstico-fissural e fissural, por meio das profundidades das entradas d'água em relação ao topo das rochas calcárias e do embasamento, respectivamente, com o objetivo de entender melhor como as sequências estratigráficas afetam as condições de fluxo de água subterrânea a despeito da espessura do manto de alteração.

A compartimentalização horizontal elaborada pelos últimos autores decorre de características fisiográficas, como a presença de cavernas e maciços carbonáticos, associados a outros fatores, tais como nascentes de alto fluxo e altas concentrações de Ca^{2+} . Com isso, delimitaram as áreas com carstificação mais intensa em 3 compartimentos, sendo eles: Escrivânia-Gordura, Palmeiras-Jaguara e Palmeiras-Jaguara-Samambaia.

Para delimitar as unidades aquíferas verticalmente, Dantas, *et al.* (2023) utilizaram dados de poços para considerar o topo do calcário, diferentemente de De Paula (2019), que fez uma divisão vertical baseada em elevações. Sendo assim, nos primeiros 30 metros de profundidade da Formação Sete Lagoas encontra-se o aquífero cárstico, com cavidades, e condutos mais produtivos, e em seguida, tem-se o aquífero cárstico-fissural, com menor fluxo e descontinuidades menos produtivas (fraturas menos alargadas). Na área de contato profundo dos carbonatos com o embasamento granito-gnaiss é descrita uma zona de transição devido à diferença de percolação nesses dois meios. Por fim, no CBH, é definido um aquífero fissural nos primeiros 60 metros de profundidade, seguido por uma superfície impermeável que se comporta como aquífugo, sendo considerada a base impermeável do sistema (Dantas, *et al.*, 2023).

3. MÉTODOS

Este estudo utilizou os modelos hidrogeológicos conceituais descritos para estimar os parâmetros hidrodinâmicos de cada unidade aquífera delimitada. Nesse sentido, uma abordagem qualitativa e quantitativa foi empregada para confirmação dos limites estabelecidos nos modelos supracitados e definição dos valores de transmissividade e armazenamento para cada uma dessas unidades.

As informações utilizadas nessas análises foram obtidas em bases públicas, como do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), e da Superintendência Regional de Meio Ambiente (SUPRAM), e contam com dados de localização, profundidade de entrada de água, regime de bombeamento, vazão dos poços, nível estático, nível dinâmico, geologia perfurada, aspectos construtivos etc. Os dados de transmissividade e armazenamento utilizados para a caracterização hidrodinâmica dos aquíferos advêm do tratamento de testes de vazão dos poços utilizando o método de recuperação de Agarwal (1980). Essa escolha se baseia na constatação descrita no capítulo 2, onde quatro métodos clássicos de tratamento de testes de bombeamento são avaliados e discute-se a maior confiabilidade dos resultados obtidos pelo método supracitado, cuja análise se baseia no período de recuperação, evitando as incertezas e a perturbação do meio causadas pelo bombeamento. 99 poços continham informações de testes de vazão no aquífero cárstico-fissural, 20 no embasamento cristalino e 36 poços eram mistos. A distribuição espacial desses poços é ilustrada pelo mapa da Figura 3.

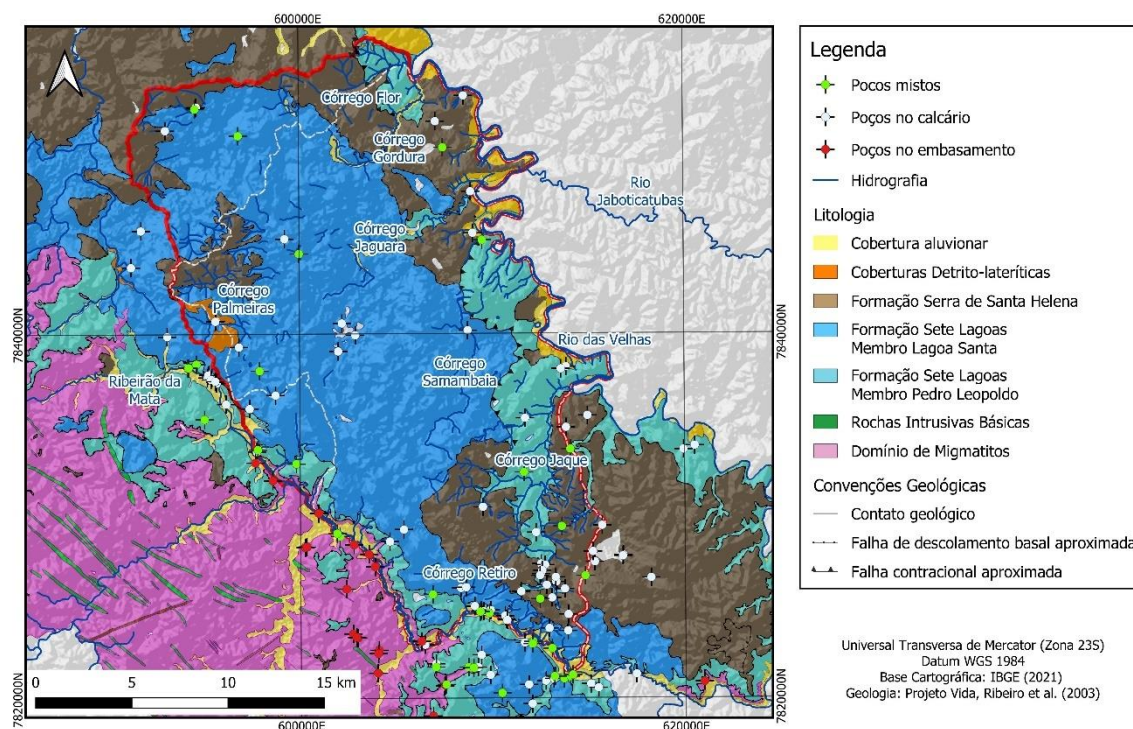


Figura 3 – Localização dos poços utilizados para obtenção de T e S a partir do tratamento dos testes de vazão pelo método de Agarwal (1980): poços perfurados exclusivamente na F. Sete Lagoas, poços exclusivamente no CBH e poços mistos.

Além desses testes de vazão, foram consolidados dados gerais dos poços, que contemplam mais 213 informações de capacidade específica, e 272 informações de profundidade de entrada d'água, sendo 130 no aquífero cárstico-fissural, 75 no aquífero fissural e 67 em poços mistos.

Para segmentação horizontal e vertical dos compartimentos delimitados, métodos distintos foram empregados. Em concordância com o que apresenta Dantas *et al.* (2023), questões litoestratigráficas não foram estritamente seguidas (ex. separação entre os membros da Formação Sete Lagoas), uma vez que estruturas condutoras de água no aquífero cárstico podem estar presentes em ambas as unidades (Galvão *et al.*, 2015; De Paula *et al.*, 2020).

Para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos de cada unidade aquífera foram utilizados valores da média geométrica (média dos logaritmos) de T e S dos poços que atravessam exclusivamente uma litologia (não são poços mistos). Os poços mistos foram utilizados para avaliação da zona de transição profunda do aquífero cárstico-fissural (imediatamente acima do aquífero fissural) e determinação dos

parâmetros do aquífero aluvionar, por meio da retirada da influência dos aquíferos sobrepostos.

3.1. COMPARTIMENTAÇÃO HORIZONTAL NO AQUIFERO CÁRSTICO

Conforme discutido por Dantas *et al.* (2023), variados autores apresentaram modelos de compartimentação horizontal para o aquífero carbonático da área baseados em critérios hidrogeológicos, hidrodinâmicos e hidroquímicos, que visam segmentar porções de maior carstificação em meio ao aquífero cárstico-fissural, dentre os quais são citados: Pessoa (2005), De Paula (2019) e Ribeiro (2020).

Dantas *et al.* (2023) lançam mão de dez características físicas e resultados de outros autores para delimitar as regiões de maior carstificação, sendo eles: aspectos litológicos, geomorfológicos, hidrográficos, traçadores, geoquímica e datação. Dessa forma foram definidos 3 compartimentos.

Este estudo, entretanto, baseia-se apenas em características físicas e hidrodinâmicas para estimar os contornos dessas zonas. Conforme apontado no capítulo anterior, foi possível obter uma equação que relaciona a capacidade específica (Q_s), em $m^3/h/m$, dos poços com a transmissividade, em m^2/h , para o aquífero cárstico da área de estudo, e com isso a densidade de poços que estão localizados no aquífero cárstico é aumentada para realização de uma superfície de transmissividade interpolada. Essa superfície, antes de ser interpolada, teve os valores de transmissividade linearizados pelo seu valor logarítmico, criando um *raster* de variação linear.

De forma similar, este estudo observou a mesma relação direta entre a transmissividade e a porosidade, que é relacionada com o armazenamento conforme (Equação 1). Essa relação também foi utilizada para aumentar a densidade de valores de porosidade antes de realizar a interpolação para gerar uma superfície de áreas com maior e menor porosidade (Figura 6).

$$m = \frac{4 H_0 S}{2,25 b} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde m é a porosidade, H_0 é a espessura saturada inicial, S é o armazenamento e b é a espessura do aquífero (Custodio & Llamas, 1983). Os valores de S também foram obtidos, para cada poço, pelo tratamento do teste de vazão pelo método de Agarwal.

As duas superfícies geradas têm resolução de pixel de 100 m, e foram multiplicadas num processo de álgebra de rasters, que resultou em contornos nítidos de zonas de mais alta transmissividade e porosidade, que são entendidos como os limites horizontais dos compartimentos mais carstificados.

3.2. COMPARTIMENTAÇÃO VERTICAL NOS AQUÍFEROS

Para realizar a compartimentação vertical no aquífero fissural, avaliou-se a densidade de entradas d'água a cada 10 m e o valor de capacidade específica dos poços com entradas d'água nesses intervalos. Para o aquífero cárstico-fissural, os limites foram determinados por densidade de entradas d'água e produtividade.

Após definidos os limites verticais dos compartimentos mais carstificados e do aquífero fissural, os parâmetros hidrodinâmicos foram associados a cada unidade aquífera por poços que as atravessam exclusivamente. Em poços mistos (poços que bombeiam água de mais de uma unidade aquífera), os valores de transmissividade e armazenamento foram regredidos por meio da retirada da influência da porção conhecida, considerando o valor dos parâmetros do poço como a média geométrica da influência das unidades aquíferas. Esse método foi utilizado principalmente para a determinação dos valores de T e S no aquífero aluvionar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros hidrodinâmicos de cada unidade aquífera definida são apresentados, considerando também as zonas carstificadas delimitadas, conforme apresentado nos itens 3.1 e 3.2. Os limites das zonas mais carstificadas foram reavaliados e ajustados. São apresentados primeiro os resultados obtidos para o aquífero cárstico-fissural e fissural, que permitem, posteriormente, a obtenção dos parâmetros do aquífero aluvionar por meio de poços mistos que interceptam esses aquíferos.

4.1. Aquífero Cárstico-Fissural

Nesta seção, são expostos os resultados provenientes exclusivamente de poços localizados no aquífero cárstico-fissural, excluindo-se poços mistos. Dessa forma, tais resultados não são afetados por influências dos aquíferos de cobertura ou do aquífero fissural.

Ao avaliar as entradas d'água a partir do topo da unidade (ou seja, a espessura do manto de alteração acima topo rochoso é dada como valor negativo), observou-se que

aquelas mais produtivas estão acima de 60 m de profundidade. Além disso, em termos de densidade, há concentração de 61% das entradas acima dos 30 m em relação ao topo da camada, e menos de 10% das entradas d'água ocorrem abaixo dos 100 m de profundidade (Figura 4).

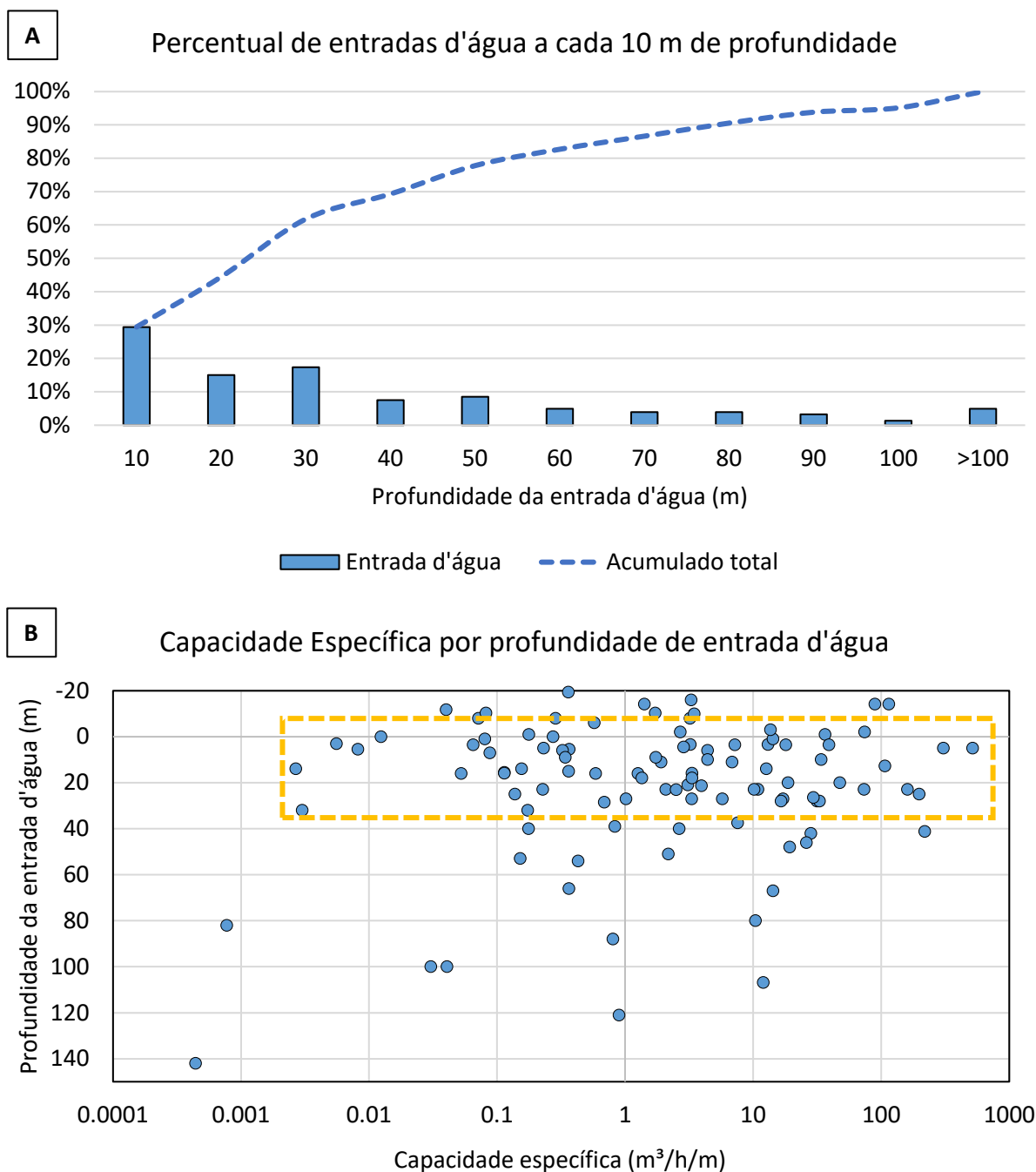


Figura 4 – A: porcentagem de entradas d'água em relação ao topo da camada. Predominância superior a 61% até os 30 m, e maior de 82% até os 60, sugerindo que essa é a profundidade mais carstificada do aquífero cárstico-fissural. B: capacidade específica dos poços em relação à profundidade de sua entrada d'água, indicativo de que os poços mais produtivos interceptam entradas d'água da porção mais rasa do aquífero.

Tendo em vista um limite inferior para a maior produtividade do aquífero, e considerando que o manto de alteração tem em média 30 m de espessura, podendo chegar até a 60 m (De Paula, 2019), foi realizada uma avaliação em termos de parâmetros dos poços que têm até 80 m de profundidade e poços mais profundos que 80 m, e os resultados são expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – T e S para o aquífero cárstico-fissural dividido em poços com profundidades de até 80 m e poços mais profundos do que 80 m.

Estatística	Até 80 metros		Além de 80 metros	
	T (m ² /s)	S	T (m ² /s)	S
Média	$9,35 \times 10^{-3}$	$6,10 \times 10^{-2}$	$3,60 \times 10^{-3}$	$3,29 \times 10^{-2}$
Mediana	$2,08 \times 10^{-3}$	$9,38 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-4}$	$6,00 \times 10^{-3}$
Média geométrica	$9,00 \times 10^{-4}$	$4,17 \times 10^{-4}$	$1,87 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-3}$

Com essa simples separação é nítido que poços de até 80 m de profundidade apresentam valores de transmissividade medianamente uma ordem de grandeza superiores àquelas dos poços mais profundos. Essa diferença é também ressaltada pela média e pela média geométrica. Ressalva-se que o valor médio geométrico do armazenamento é maior em poços além dos 80 m, mas isso é explicado por 6 poços em condição de confinamento, cujo valor de armazenamento retornado pelo software é de 10^{-10} nos poços até 80 m. Se esses *outliers* forem excluídos, o valor passa a ser de $7,27 \times 10^{-3}$. Com isso constata-se que a camada mais rasa do aquífero cárstico-fissural é significativamente mais produtiva do que a camada mais profunda desse sistema aquífero.

Em relação à cota de ocorrência das entradas d'água, percebe-se abrupta queda a leste, próximo ao rio das Velhas, e na porção norte da área (Figura 5), o que confirma a ideia de aprofundamento da bacia para leste e para norte apresentada por Teixeira, Pena e Silva (2020), sendo a região SW da área de estudo, borda de bacia.

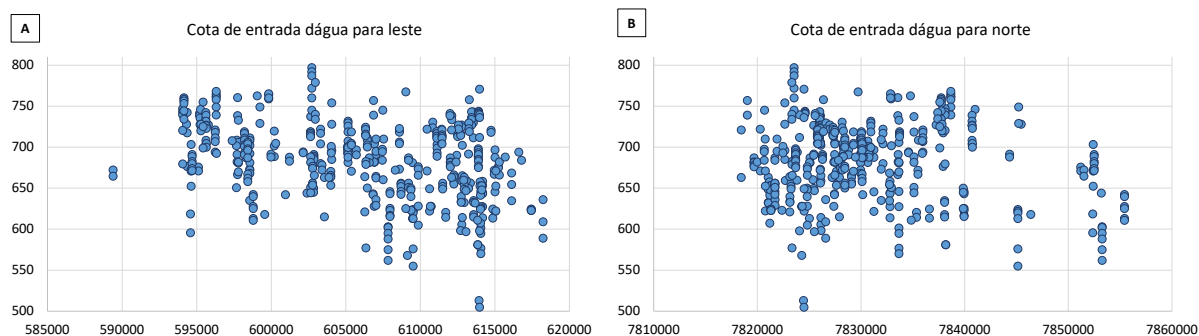


Figura 5 – Aprofundamento das entradas d’água: A, para leste e B, para norte confirmando maior espessura da bacia nesses sentidos.

Quanto à porosidade, os resultados obtidos pela (Equação 1) mostram que o Aquífero Sete Lagoas em questão apresenta porosidade geralmente inferior a 10%, com 56% dos valores abaixo de 1%. O máximo estatístico observado é de 21%, que é nitidamente um valor fora da curva (*outlier*). Dessa forma, fica comprovado que a matriz deste aquífero é pouco relevante para o armazenamento, e que a porosidade é quase toda secundária ou terciária, sendo o próprio conduto, responsável pelo armazenamento e transmissividade. Vieira (2015) observa em lâminas petrográficas deformação estrutural que é responsável pela recristalização de cristais de calcita nas rochas do Membro Lagoa Santa de forma quase completa, o que condiz com a baixa porosidade da matriz.

Uma relação direta de T para porosidade (P) pode ser observada quando comparadas essas grandezas em um gráfico de dispersão. Observa-se na Figura 6 um acréscimo de porosidade com incremento da transmissividade, o que é fruto da maior condição de percolação de água por meio de estruturas alargadas de condução. Nesse sentido, pode-se estabelecer uma regressão que permite estimar a porosidade a partir de dados de transmissividade.

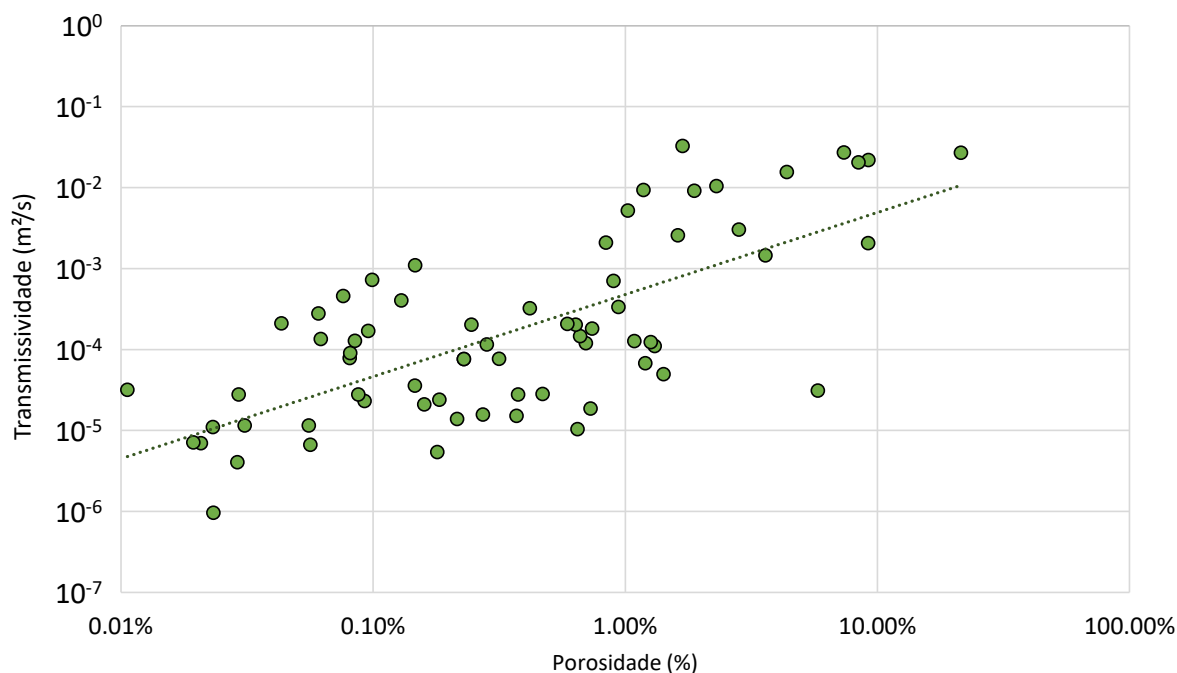


Figura 6 – Regressão traçada que expressa a relação de transmissividade e porosidade para o aquífero cárstico.

4.2. Compartimentação do Aquífero Cárstico-Fissural

Com base em resultados obtidos de transmissividade nos poços ensaiados, foram elaborados *rasters* interpolados de zonas de mais alta e mais baixa T, bem como de maior P e menor P. A multiplicação dessas duas superfícies fornece um contorno nítido de separação de zonas mais carstificadas e zonas menos carstificadas, conforme expresso pela Figura 7. Ainda é possível refinar essas zonas com base em feições observadas em campo que refletem maior carstificação, como a presença de cavernas, dolinas, maciços fraturados e nascentes. Esse refinamento, chamado na figura como “tratamento”, é a junção das considerações hidrodinâmicas subsuperficiais com as feições fisiográficas superficiais.

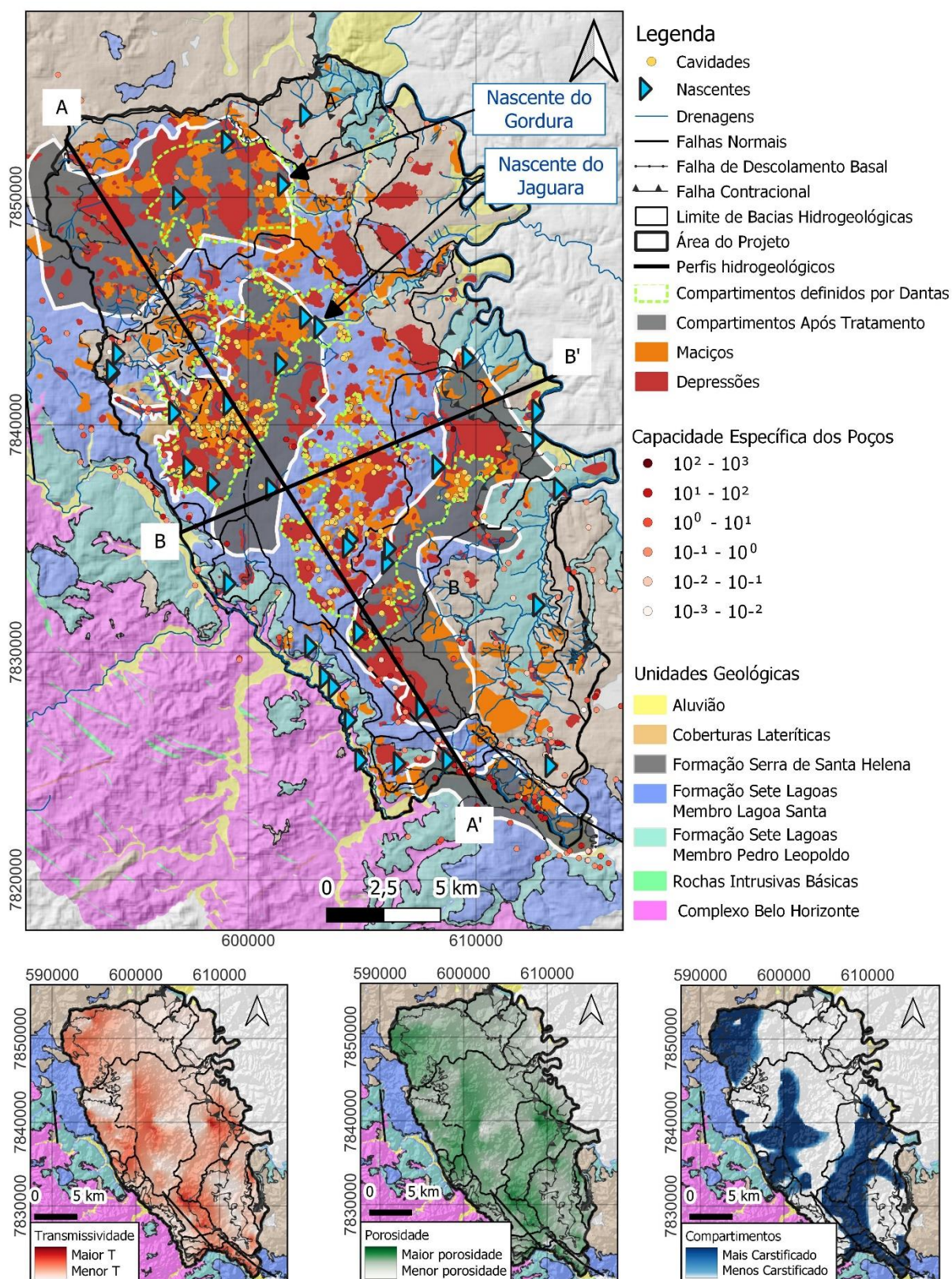


Figura 7 – Na parte inferior apresenta-se as superfícies de transmissividade interpolada, porosidade e os compartimentos como produto dos *rasters*. No mapa principal estão retratadas as feições físicas que foram utilizadas para ajuste dos limites das zonas mais carstificadas e os limites dos compartimentos definidos por Dantas *et al.* (2023). Os perfis dos traços apresentados no mapa são ilustrados pela Figura 13.

Foram, portanto, delimitadas quatro zonas de maior carstificação. As zonas carstificadas definidas são nomeadas com base nas bacias hidrogeológicas nas quais estão inseridas: Compartimento Escrivânia-Gordura, Compartimento Palmeiras-Jaguara, Compartimento Confins-Samambaia, Compartimento Ribeirão do Mata. As divergências observadas para as zonas mais carstificadas delimitadas por Dantas *et al.* (2023) são atribuídas a um modelo que considera também quesitos hidrodinâmicos, uma vez que feições geomorfológicas também são adotadas. Neste sentido, observa-se que as zonas apresentam um considerável aumento de tamanho, o que demonstra a carstificação no carste encoberto.

Chama atenção a predominância de nascentes dentro ou nos limites das zonas mais carstificadas, o que indica uma região de contato de uma área mais transmissiva com uma zona menos transmissiva. De fato, 18 das 37 nascentes cadastradas na área estão dentro das zonas carstificadas delimitadas.

Esse valor é inferior a 50% das nascentes, contudo essas nascentes representam a maior parte da vazão da área, correspondendo a 92% do volume total, com média de 457 m³/h e mediana de 130 m³/h, enquanto as nascentes fora desses compartimentos têm 32,5 m³/h de vazão média e 1,2 m³/h mediana. As 7 (sete) nascentes de maior vazão estão todas dentro dos limites dos compartimentos, incluindo as nascentes do Gordura e do Jaguara, com vazões próximas a 2000 m³/h, que estão posicionadas exatamente na borda leste dos compartimentos Escrivânia-Gordura e Palmeiras-Jaguara, respectivamente, sugerindo que são os pontos de descarga dessas zonas carstificadas.

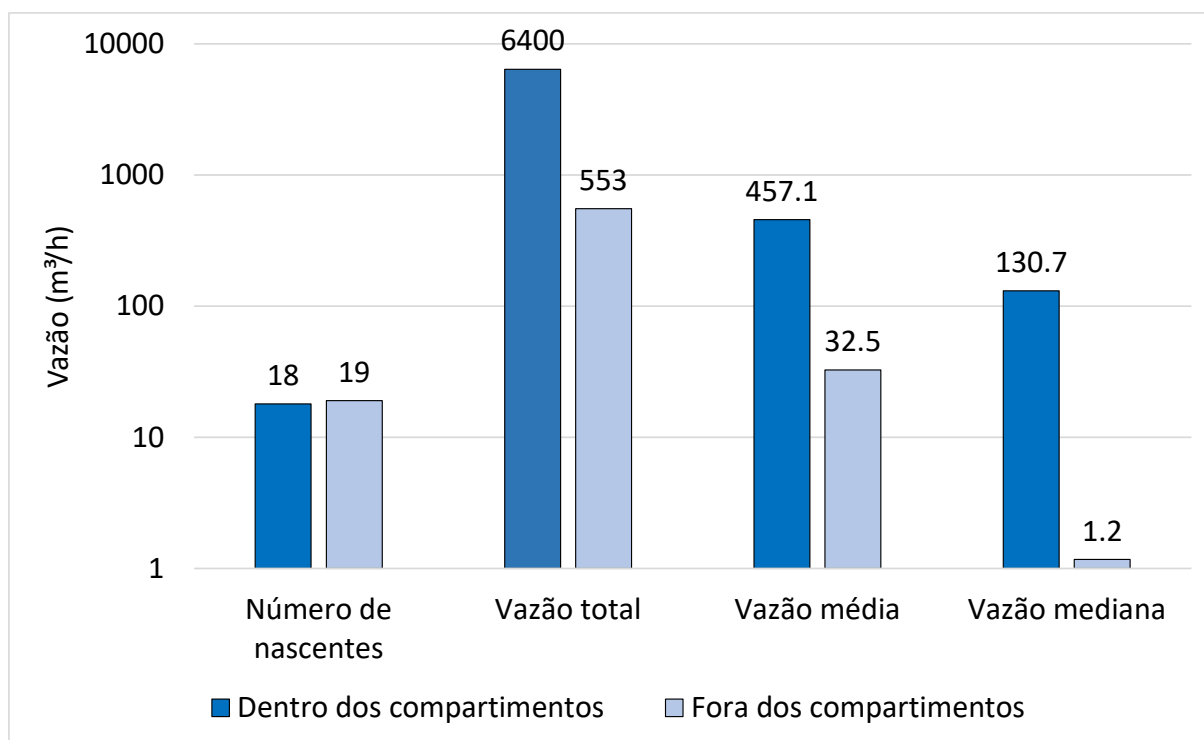


Figura 8 – Estatística das nascentes dentro e fora dos compartimentos. Atenção ao eixo das ordenadas em escala logarítmica.

Os parâmetros hidrodinâmicos médios geométricos para cada compartimento, bem como para as regiões fora dos compartimentos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores geométricos de T e S para cada compartimento delimitado.

Compartimento	Número de poços	T (m²/s)	S
Escrivânia-Gordura	1	3.36×10^{-04}	7.43×10^{-02}
Palmeiras-Jaguara	10	1.11×10^{-03}	5.97×10^{-05}
Confins-Samambaia	4	6.38×10^{-04}	3.71×10^{-03}
Ribeirão do Mata	12	2.59×10^{-03}	9.02×10^{-03}
Fora dos Compartimentos	32	5.55×10^{-5}	4.89×10^{-03}

Por esses resultados fica claro que os compartimentos definidos são mais carstificados, uma vez que a transmissividade e o armazenamento são consistentemente maiores do que os valores encontrados fora dessas zonas. À exceção do armazenamento no Compartimento Palmeiras-Jaguara (que aparenta estar numa condição de confinamento), todos os outros são superiores ou aproximadamente iguais ao valor de armazenamento observado fora dos compartimentos. Além disso, ressalta-se que o Compartimento Escrivânia-Gordura compreende apenas um poço, e, portanto, os valores obtidos podem estar enviesados por esse dado singular.

Entretanto, é possível confirmar maior capacidade de escoamento de fluxo nessas porções, principalmente porque todos os compartimentos apresentam T pelo menos 6 vezes maior que os valores para fora dos compartimentos, com o Compartimento Ribeirão do Mata apresentando valor de T 45 vezes superior ao valor fora dos compartimentos.

Pode-se também discorrer acerca da profundidade das zonas mais carstificadas nessa delimitação horizontal estabelecida. Para esse fim, foram plotados os valores de profundidade de entrada d'água e nível dinâmico dos poços dentro e fora das zonas carstificadas, ilustrados pelo *boxplot* da Figura 9. Percebe-se que além de as entradas d'água serem mais rasas nas regiões mais carstificadas, essas zonas ainda apresentam um rebaixamento em decorrência do bombeamento que é significativamente menor, próximo de 30 m, enquanto fora dessas zonas, o nível dinâmico geralmente atinge profundidades superiores aos mesmos 30 m.

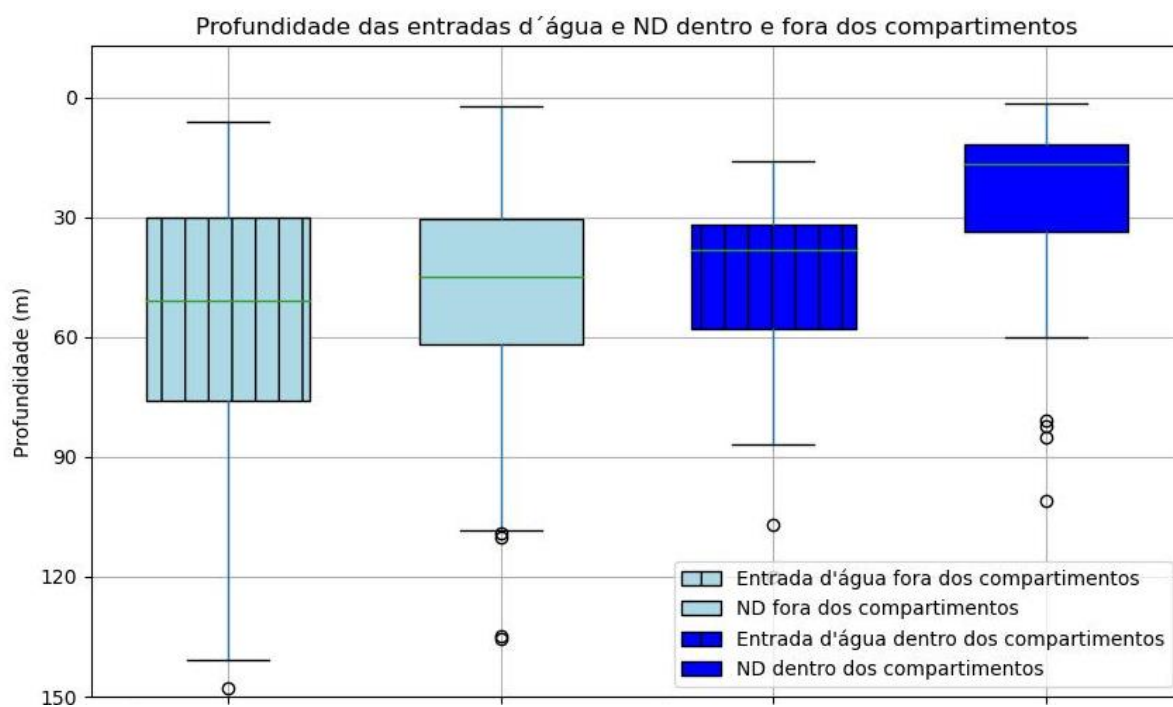


Figura 9 – Gráfico do tipo *boxplot* mostrando os intervalos de entrada d'água e nível dinâmico dos poços dentro das zonas mais carstificadas e fora.

Constata-se que as entradas d'água dentro dos compartimentos são consistentemente mais rasas do que as entradas d'água fora dos compartimentos, e que os valores de nível dinâmico, que expressam a magnitude do rebaixamento frente à exploração, se mostram muito menores dentro dos compartimentos do que fora deles, o que confirma o caráter mais carstificados e produtivo dessas zonas. De fato,

em termos de produtividade, os poços dentro dos compartimentos tendem a apresentar capacidades específicas 25 vezes maiores que poços fora dos compartimentos, com um valor mediano de 7,62 m³/h/m contra 0,30 m³/h/m.

Adicionalmente, a densidade de entradas d'água a cada dez metros confirma o caráter mais carstificados dessas zonas até os 50 m de profundidade em relação ao topo do calcário, uma vez que mais de 90% das entradas d'água ocorrem acima dessa profundidade dentro dos compartimentos, enquanto fora deles, apenas 70% (Figura 10). Também fica evidenciado que existe uma zona mais carstificada até os 30 m fora dos compartimentos, o que corrobora ao resultado expresso pela Figura 4 e com o modelo de compartimentação vertical do aquífero cárstico-fissural elaborado por Dantas *et al.* (2023). Observa-se um processo mais acelerado de carstificação dentro das zonas delimitadas, já que a maior parte das entradas d'água ocorrem até os 50 m, enquanto existe uma distribuição mais ampla de zonas de percolação além dos limites compartimentados.

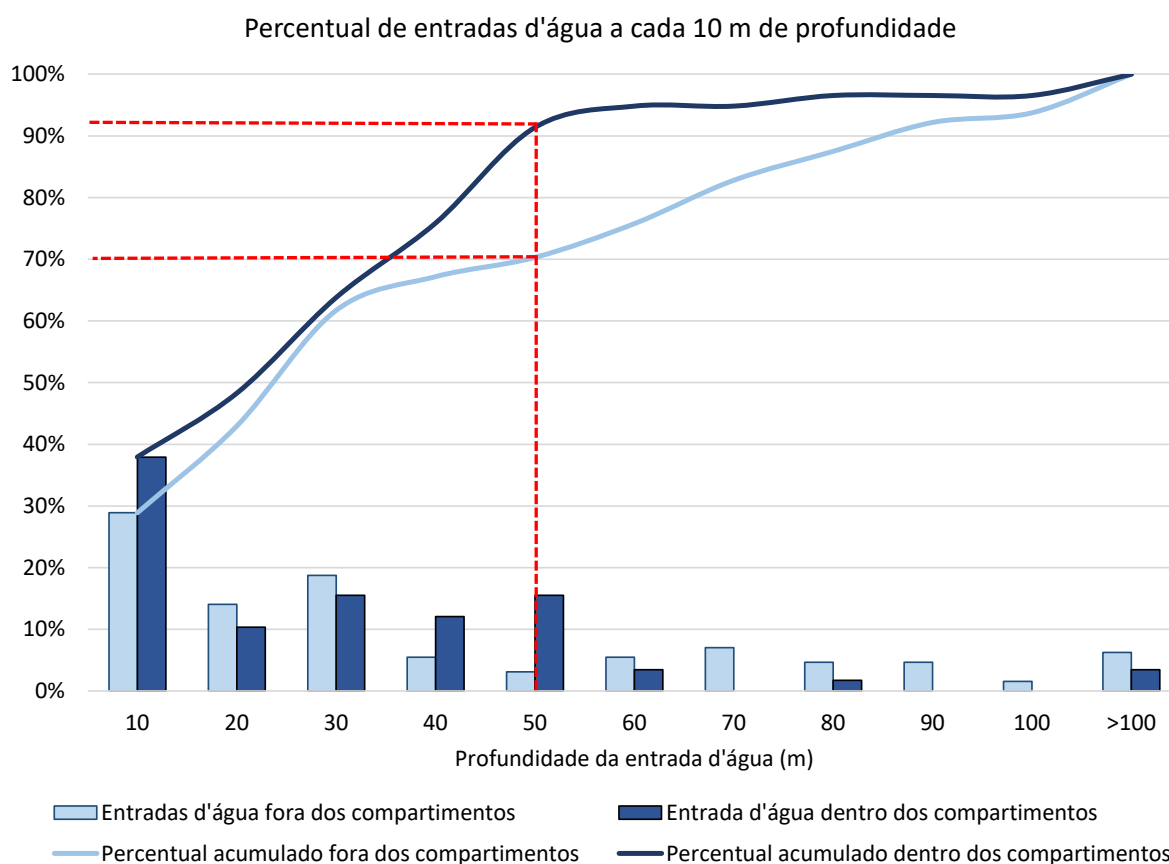


Figura 10 – Gráfico de densidade de entradas d'água a cada 10 m para poços perfurados dentro dos limites de maior carstificação delimitados e fora desses limites.

4.3. Aquífero Fissural e Aquífero Aluvionar

Nesta seção são discutidos os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero aluvionar, que tem abrangência localizada, porém é bastante produtivo, e do aquífero fissural, que é subdividido em uma porção mais produtiva no topo e menos produtiva na base.

4.3.1. Aquífero Fissural

Um total de 20 poços intercepta o aquífero fissural e apresenta informações construtivas e ensaios de bombeamento e recuperação que permitem a extração dos parâmetros hidrodinâmicos nessa unidade de forma direta. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 3, onde se observa que a porção mais rasa do aquífero fissural tem transmissividade 3 vezes maior e o dobro de armazenamento da porção mais profunda, além dos 60 m.

Tabela 3 – T e S para o aquífero fissural.

Estatística	Total		Até 60 metros		Além de 60 metros	
	T (m ² /s)	S	T (m ² /s)	S	T (m ² /s)	S
Média	$1,30 \times 10^{-4}$	$6,60 \times 10^{-3}$	$9,23 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-2}$	$1,43 \times 10^{-4}$	$5,33 \times 10^{-3}$
Mediana	$3,99 \times 10^{-5}$	$2,88 \times 10^{-3}$	$6,84 \times 10^{-5}$	$4,61 \times 10^{-3}$	$2,13 \times 10^{-5}$	$2,36 \times 10^{-3}$
Média geométrica	$3,21 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-3}$	$7,88 \times 10^{-5}$	$2,53 \times 10^{-3}$	$2,38 \times 10^{-5}$	$2,32 \times 10^{-3}$

Essa divisão nos 60 m de profundidade está embasada pelas conclusões advindas da análise das informações de profundidade das entradas d'água, que são cada vez menos comuns a partir dos 60 m, e está em acordo com o modelo conceitual apresentado por Dantas *et al.* (2023). Inclusive, a produtividade é menor quanto mais profundas são as entradas d'água, como ilustram os gráficos da Figura 11, o que demonstra o fechamento das fraturas em profundidade. O gráfico A da Figura 11 mostra que as entradas d'água mais produtivas (valores maiores que 1 m³/h/m) se concentram invariavelmente acima dos 60 m, enquanto o gráfico B mostra o decréscimo de produtividade com a interceptação de entradas d'água mais profundas.

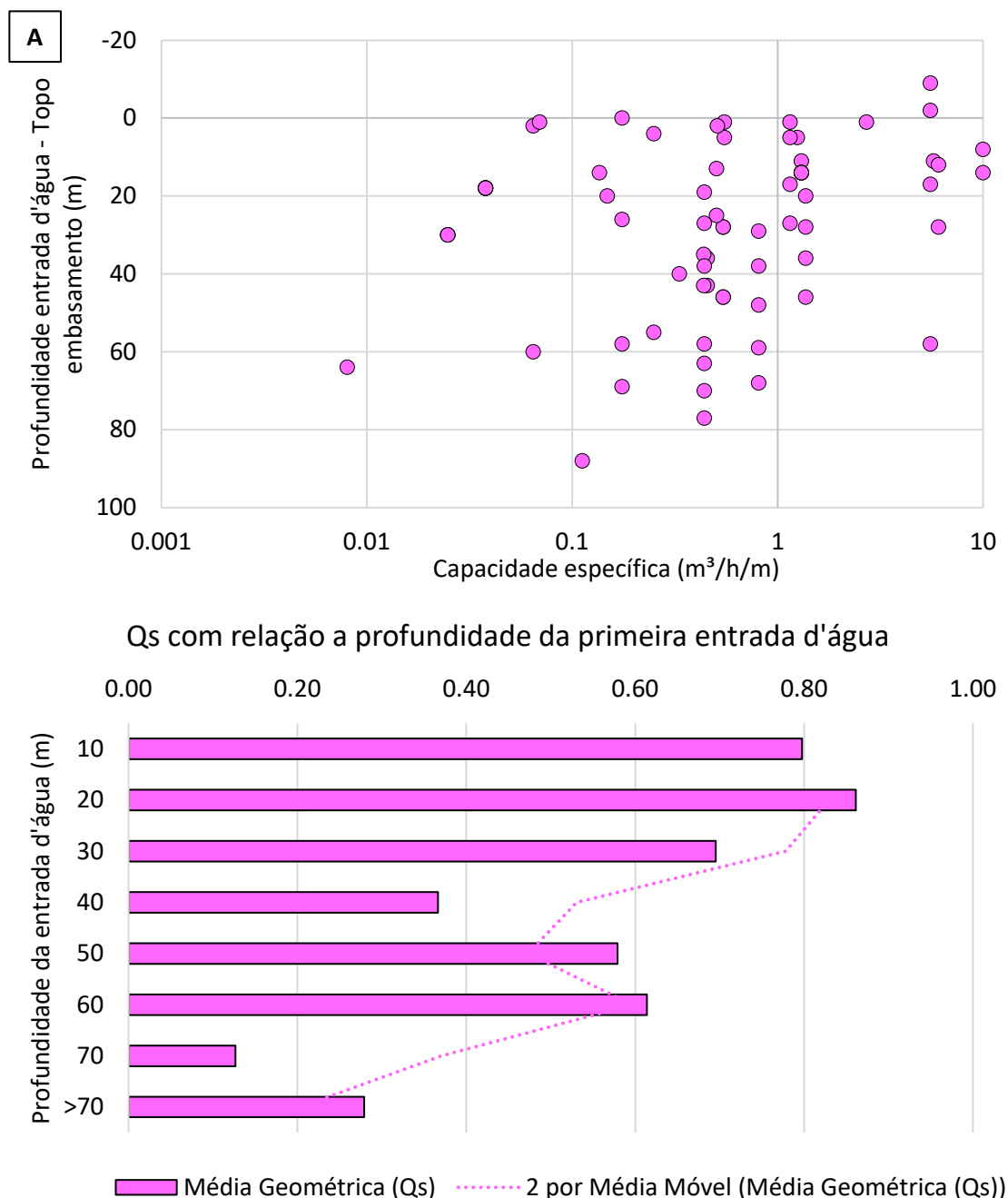


Figura 11 – Avaliação da capacidade específica dos poços por profundidade de entrada d'água. A: demonstração de que os 60 m do aquífero fissural é mais produtivo que a porção profunda. B: Qs a cada 10 m de profundidade ressaltando diminuição da produtividade.

Um aspecto que carece menção é a não confirmação, neste estudo, da zona de transição determinada por Dantas *et al.* (2023) na base do aquífero cárstico-fissural, em contato com o aquífero fissural. Ainda que os autores apresentem a ocorrência de entradas d'água próximas a essa interface, não foi possível constatar uma maior densidade de entradas d'água no contato dessas duas unidades aquíferas. Além disso, os valores encontrados para os parâmetros hidrodinâmicos nos poços mistos

que atravessam o aquífero cárstico-fissural e o fissural ($4,32 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para T e $2,33 \times 10^{-3}$ para S) são bastante similares aos valores de T e S encontrados apenas para o aquífero cárstico-fissural fora das zonas mais carstificadas (Tabela 2), e também bastante próximos dos valores encontrados para o aquífero fissural (Tabela 3). Tendo em vista esses resultados, não fica ressaltada nenhuma evidência da existência dessa zona de transição, nem que ela seja mais produtiva do que a unidade cárstico-fissural em si.

4.3.2. Aquífero Aluvionar

Para quantificar os parâmetros para o aquífero aluvionar foi necessário estabelecer sua relação por meio de poços mistos e regredir para os seus parâmetros por meio de um cálculo ponderado que elimine a contribuição do aquífero cárstico ou aquífero fissural dos poços mistos em questão. A Figura 12 ilustra T e S para os 36 poços mistos, separados por litologias atravessadas por poço: calcário-granito, calcário-aluvião e granito-aluvião. A localização destes poços é apresentada em verde no mapa da Figura 3.

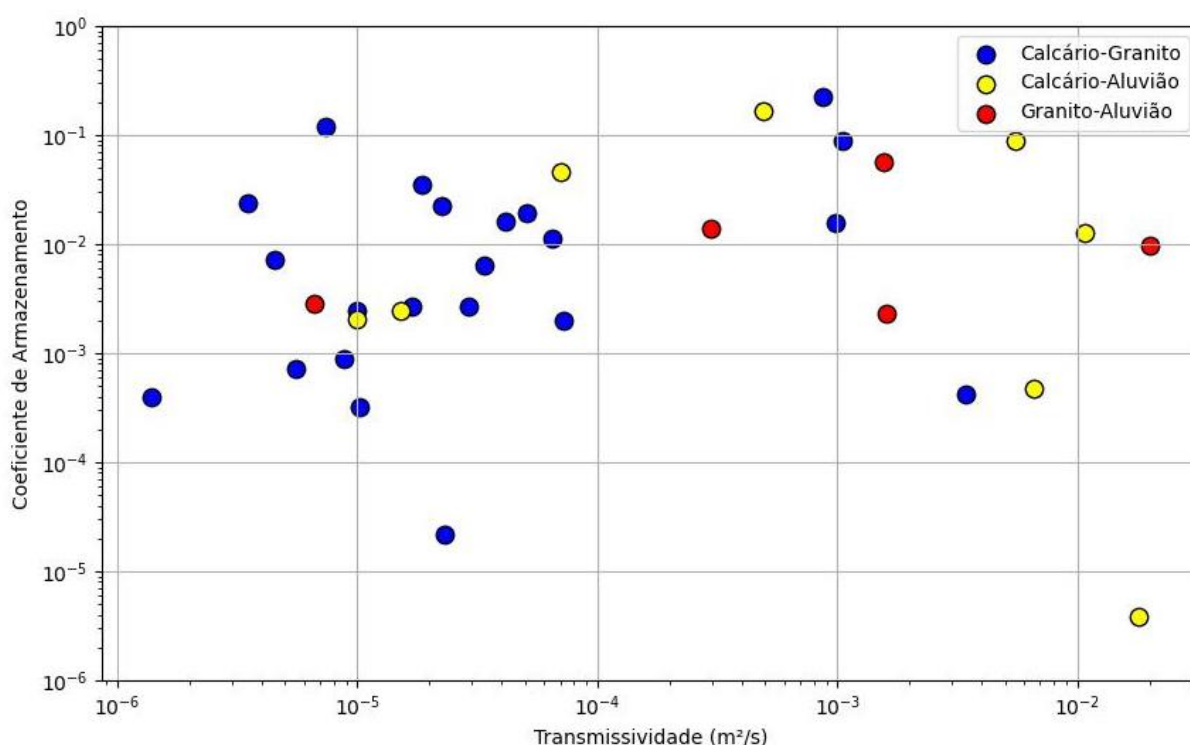


Figura 12 – Valores de T e S para poços mistos que interceptam calcário-granito, calcário-aluvião e granito-aluvião.

Dessa figura percebe-se que o aluvião contribui consistentemente para a elevação do valor de T nos poços mistos em detrimento dos poços que interceptam granito e calcário, exclusivamente. Isso comprova que o aluvião é um aquífero produtivo e relevante para a área de estudo, ainda que seja localizado.

Os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero aluvionar são obtidos por meio da remoção dos valores de cada um dos aquíferos que influenciam os poços mistos de forma ponderada. Os valores de T e S nos poços mistos são considerados como média da influência dos dois aquíferos explotados. Como é sabido o valor dos parâmetros dos aquíferos fissural e cárstico-fissural, é possível estimar qual é o valor dos parâmetros no aquífero aluvionar isoladamente. Sendo assim, obtêm-se os valores expressos na Tabela 4.

Tabela 4 – T e S para os poços mistos e para o aquífero aluvionar.

Estatística	Aluvionar e Fissural		Aluvionar e carbonático		Apenas aluvionar	
	T (m ² /s)	S	T (m ² /s)	S	T (m ² /s)	S
Média	$4,70 \times 10^{-03}$	$1,17 \times 10^{-02}$	$2,12 \times 10^{-03}$	$5,13 \times 10^{-02}$	-	-
Mediana	$1,55 \times 10^{-03}$	$9,79 \times 10^{-03}$	$2,79 \times 10^{-04}$	$2,42 \times 10^{-02}$	-	-
Média Geométrica	$6,28 \times 10^{-04}$	$8,79 \times 10^{-03}$	$2,40 \times 10^{-04}$	$1,09 \times 10^{-02}$	$2,28 \times 10^{-03}$	$2,70 \times 10^{-02}$

Os dados mostram valores médios e medianos relativamente próximos, o que sugere isotropia e homogeneidade para esse aquífero. No caso dos aquíferos fissural e cárstico, a anisotropia indica que algumas direções de fraturas apresentam maiores produtividades que outras, e isso decorre, principalmente, de questões estruturais, como observado por Andrade *et al.* (2020) e Pena *et al.* (2021). Contudo, no caso do aquífero aluvionar, está provado seu caráter isotrópico, que demonstra uniformidade de fluxo dentro de seus limites.

4.4. Modelo de compartimentação

Por fim, foi possível elaborar dois perfis hidrogeológicos esquemáticos para sumarizar as propostas aqui descritas, com a delimitação das zonas mais carstificadas, suas profundidades e a direção principal de fluxo (Figura 13). Observa-se um fluxo preferencial para NE, com sentido local para sul nas imediações do córrego do retiro no perfil A-A', próximo ao limite sul da área de estudos, e fluxo local para oeste próximo ao ribeirão da Mata no extremo oeste da área no perfil B-B'. As zonas mais carstificadas hospedam a maioria das cavidades e nascentes, além de estarem,

muitas vezes, sobrepostas por espessos solos de alteração ou metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Nota-se também a ocorrência dos aquíferos de cobertura de forma bastante localizada, principalmente os aquíferos aluvionares, que são mais relevantes às margens dos grandes córregos e rios da área, como o ribeirão da Mata e o rio das Velhas.

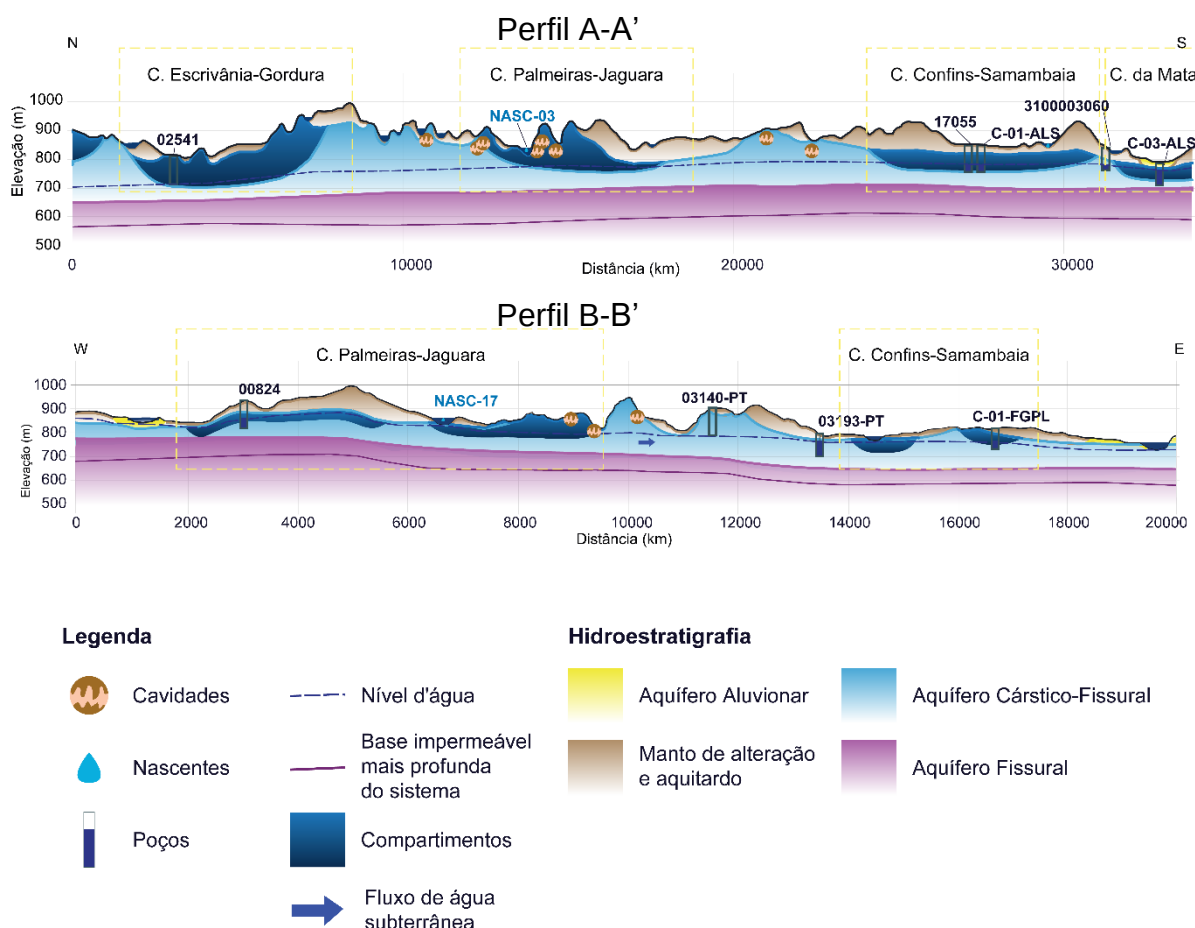


Figura 13 – A: perfil hidrogeológico esquemático A-A', com exagero vertical de 6 vezes; B: perfil hidrogeológico esquemático B-B' com exagero vertical de 4 vezes. Os traços estão apresentados no mapa principal da Figura 7.

Dessa forma, entende-se que o fluxo é majoritariamente controlado pelo aquífero cárstico-fissural, que pode ser dividido em regiões de diferentes graus de carstificação dentro dos limites de estudo. Está localmente sotoposto por um aquífero aluvionar de ocorrência muito restrita e pouco espesso, isotrópico e de alta produtividade, com elevados valores de transmissividade e armazenamento. O aquífero aluvionar pode alimentar a vazão de córregos e rios na região.

O aquífero carbonático é o principal do sistema, e é dividido em cárstico, cárstico-fissural e quatro compartimentos mais carstificados, que concentram a maioria das feições cársticas, nascentes de alta vazão e poços de maior produtividade. Esses compartimentos apresentam espessuras máximas de 50 m abaixo do topo rochoso, e transicionam bruscamente ao aquífero cárstico-fissural. Este é composto por zonas de percolação de água praticamente restritas à porosidade secundária, uma vez que apresentam valores de armazenamento, porosidade e transmissividade uma ordem de grandeza inferiores àqueles encontrados nas zonas carstificadas. Inclusive, o caráter fissural desse aquífero é novamente ressaltado pela similaridade dos parâmetros hidrodinâmicos encontrados com os parâmetros do aquífero fissural.

Em poços mistos, não se observa maior concentração de entradas d'água na zona de contato do aquífero cárstico-fissural com o aquífero fissural, tampouco maiores produtividades que justifiquem a existência de uma zona de transição que funcione como zona preferencial de percolação subsuperficial.

Por fim, o aquífero fissural, na base, apresenta também anisotropia, que é capturada pela diferença observada entre o valor médio e mediano de T e S, mas também pela separação nítida que é observada em termos de produtividade a partir dos 60 m, quando o número de entradas d'água é diminuto e provavelmente refletem o fechamento das fraturas em profundidade. Essa zona superior chega a ser até 3 vezes mais produtiva que a zona além dos 60 m, que é entendida como base impermeável do sistema aquífero descrito.

5. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados demonstram um sistema aquífero de elevada anisotropia e heterogeneidade, principalmente no que diz respeito ao principal aquífero da região. A partir das superfícies interpoladas de transmissividade e porosidade foi possível delimitar contatos entre zonas mais carstificadas e menos carstificadas no aquífero carbonático. Essas zonas expandem os limites previamente definidos pelos modelos hidrogeológicos, uma vez que consideram fatores hidrodinâmicos subsuperficiais e também fatores fisiográficos superficiais.

A separação dessas zonas permitiu a delimitação de quatro compartimentos, nomeados de Compartimento Escrivânia-Gordura, Compartimento Palmeiras-

Jaguara, Compartimento Confins-Samambaia e Compartimento da Mata no aquífero cárstico-fissural.

Verificou-se que além de apresentarem maior produtividade, esses compartimentos também englobam as maiores densidades de maciços e depressões, e as nascentes principais da área estão em seus contatos imediatos, o que denota um caráter diferenciado. A profundidade das entradas d'água dentro dessas zonas é geralmente inferior a 50 m (concentrando 90% das entradas d'água), enquanto cerca de 30% das entradas d'água ocorrem até os 100 m fora das zonas mais carstificadas.

Constatou-se também a relevância do aquífero aluvionar para a produtividade da região, ainda que seja uma unidade aquífera bastante localizada. É classificada como aquífero isotrópico e apresenta os maiores valores de transmissividade dentre as unidades aquíferas da área.

Em contraponto, o aquífero fissural apresenta valores de transmissividade e armazenamento compatíveis com sua natureza, mas é possível delimitar uma zona rasa mais produtiva e uma zona profunda menos produtiva, classificada como aquíclode (ou aquífugo), considerada como a base impermeável do sistema aquífero em questão.

Ao contrário do que consta no modelo hidrogeológico conceitual de De Paula (2019) refinado por Dantas *et al.* (2023), não se constata a presença de uma zona de transição na base do aquífero cárstico-fissural, porque não são observadas diferenças de T e S nos poços mistos para o aquífero cárstico-fissural ou fissural. Ademais, uma maior densidade de entradas d'água nesse contato também não foi confirmada.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, R. G. (1980). **A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition (20 pp.). <https://doi.org/10.2118/9289-MS>.

ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. (2001). **A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais.** SBG, Belo Horizonte. pp. 9-30.

- AMARAL, F. G.P. (2018). **Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa (MG)**. MS Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 156p.
- ANDRADE, I. B.; BARBOSA J. A.; RIBEIRO, C. G., DE PAULA, R. S.; VELASQUEZ, L. N. M. (2020). **Relação hidráulica entre o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Bambuí na porção sul da APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Geonomos v.27. Belo Horizonte. doi:10.18285/geonomos.v27i1.21852
- AULER, A. (1994). **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil**. Western Kentucky University. Dissertação de Mestrado, 110 p.
- BAPTISTA M. C. (2004). **Estratigrafia e evolução geológica da região de Lagoa Formosa (MG)**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 104 p.
- CHANG H. K.; MIRANDA F. P.; MAGALHÃES E.; ALKMIM F. F. (1988). **Considerações sobre a evolução tectônica da bacia do São Francisco**. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 35, Anais, 5: 2076-2090.
- DANTAS, J. C. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; DE 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. V. 123. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>.
- DE PAULA, R. S. (2019). **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 272 p.
- DE PAULA, R. S., VELÁSQUEZ, L. N. M. (2019) **Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Revista Águas Subterrâneas, v.33, n. 2, p. 119-133.
- DE PAULA, R. S., TEIXEIRA, G. M., RIBEIRO, C. G., SILVA, P. H. P. DA, SILVA, T. G. A., VIEIRA, L. C. M., & VELÁSQUEZ, L. N. M. (2020). **Parâmetros**

Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Águas Subterrâneas, 34(2), 221–235.
<https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29812>.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (1983). **Hidrologia Subterrânea**, second ed. Omega, Barcelona.

DA-GLORIA, PEDRO; NEVES, WALTER ALVES; HUBBE, MARK. **História das pesquisas bioarqueológicas em Lagoa Santa, Minas Gerais, Brasil.** Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, v. 12, n. 3, p. 919-936, set.-dez. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1981.81222017000300014>.

FEITOSA, F. A. C., MANUEL FILHO, J., FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A. (2008). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID.

FORD, D. C., WILLIAMS, P. W. (1991). **Karst geomorphology and hydrology**. London: Chapman-Hall.

FRAGOSO, D. G.C.; ULHEIN, A.; SANGLARD, J. C. D.; SUCKAU, L.; GUERZONI, H. T. G.; FARIA, P. H. (2011). **Geologia Dos Grupos Bambuí, Areado E Mata Da Corda Na Folha Presidente Olegário (1:100.000), MG: Registro Deposicional Do Neoproterozóico Ao Neocretáceo Da Bacia Do São Francisco.** Geonomos, 28-38p.

GALVÃO, P., HALIHAN, T., HIRATA, R. (2015). **The Karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil.** Journal of hydrology, v. 532, p 149-162.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.026>.

GOLDSCHIEDER N.; DREW, D. (2007). **Methods in Karst Hydrogeology.** International Contributions to Hydrogeology, 26, Londres: Tay-lor & Francis.

HERRMANN, G.; KOHLER, H. C.; DUARTE, J. C.; CARVALHO, P. G. S. (1998). **APA Carste de Lagoa Santa – Gestão Ambiental.** IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 57p.

PENA, M. A. C.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; TEIXEIRA, G. M.; DA SILVA, P. H. P.; AMARAL, D. G. P.; DE PAULA, R. S. (2021). **Análise de lineamentos e sua relação com a capacidade específica de poços na APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Águas Subterrâneas. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.29816>

PESSOA, P. F. P. **Hidrogeologia do aquífero cárstico coberto de Lagoa Santa, MG.** (2005). Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

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 e convenção).

RIBEIRO, C. G.; MEIRELES, C. G.; LOPES, N. H. B.; ARCOS, R. E. C. (2016). **Levantamento geológico estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Trabalho de Graduação (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 157p.

RIBEIRO, C. G.; VELASQUEZ, L. N. M., AMARAL, D. G. P., MURTA, M. C. P., SILVA, P. H. P., PAULA, R. S. (2017). **Utilização de Feições Exocársticas para Identificação de Áreas Favoráveis à Ocorrência de Cavidades e Sumidouros.** In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA EM DIAMANTINA. GEOSUDESTE, Diamantina. Anais. Diamantina: SBG 1p.

RIBEIRO, C. G., VELÁSQUEZ, L. N. M., 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.** Revista Águas Subterrâneas, v. 33, n. 1, p. 12-21.

RIBEIRO, C.G. (2020). **Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos 2H, 18O e 3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. 2020.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 234

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.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 78.

TEIXEIRA, G. M., PENA, M. A. C., SILVA, P. H. P. (2020). **Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região à sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Trabalho final de Graduação, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 282.

TEODORO, M. I. P., VELÁSQUEZ, L. N.M, FLEMING, P. M., PAULA, R. S., SOUZA, R. T., DOI, B. M. (2019). **Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Revista Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, v. 33, n. 4, p. 392-406.

TEODORO, M. I. P. (2020). **Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúpteis na região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 129.

VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. (1998). **APA Carste de Lagoa Santa: meio físico – Volume I.** Belo Horizonte: IBAMA/CPRM.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo realizou análises gerais acerca de métodos para obtenção de parâmetros hidrodinâmicos no sistema aquífero da área de estudos, que engloba a APA Carste de Lagoa Santa e arredores. Foram usados métodos diretos (métodos clássicos de tratamento de ensaios de bombeamento e de aquífero) e métodos indiretos (que incluíram zonas de captura e análises de hidrógrafas) para verificar sua aderência ao aquífero cárstico, bem como subsidiar soluções de bom custo-benefício para estimar a transmissividade (T) e o armazenamento (S). Além disso, pôde-se estimar os valores de T e S para cada unidade aquífera que compõe o sistema aquífero da região.

Validou-se a utilização de diversos métodos diretos e indiretos para a obtenção de parâmetros hidrodinâmicos no aquífero cárstico. Constatou-se que os métodos utilizados capturam satisfatoriamente bem a anisotropia do aquífero, além de tenderem a valores medianos apropriados para o aquífero cárstico. Dentre os métodos diretos, o método de tratamento da Recuperação de Agarwal demonstrou melhores resultados, o que é atribuído ao fato de que sua avaliação não considera o tempo de bombeamento, que é mais suscetível a erros, seja por conta da dificuldade de manutenção da vazão constante da bomba, seja por efeitos de perturbação gerados pelo bombeamento, uma vez que o poço bombeado é usado como poço de observação em testes de vazão. Observou-se que o método de Neuman não foi capaz de caracterizar adequadamente o aquífero cárstico da região, e atribui-se a isso o fato de que esse método foi concebido para aquíferos livres, quando um estágio secundário do bombeamento é alimentado por fluxo vertical descendente das porções superiores do aquífero, o que provavelmente não encontra ressonância com o aquíferos da região dada a alimentação preferencialmente por condutos sub-horizontais pressurizados, cuja dinâmica é mais bem capturada por métodos designados para aquíferos confinados. Os métodos indiretos também podem ser empregados no aquífero cárstico, respeitando-se as ressalvas de que o aquífero é muito heterogêneo e anisotrópico.

O primeiro artigo (ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE E ARMAZENAMENTO POR MÉTODOS DIRETOS E INDIRETOS NO AQUÍFERO CÁRSTICO) e o trabalho completo (ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE A PARTIR DA CAPACIDADE ESPECÍFICA EM POÇOS TUBULARES DO AQUÍFERO CÁRSTICO NA REGIÃO DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA – MG) foram importantes para subsidiar o segundo

artigo (COMPARTIMENTAÇÃO E PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO SISTEMA AQUÍFERO DA REGIÃO DO CARSTE CENTRAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL) na medida em que indicaram a necessidade de buscar uma segregação dentro do aquífero cárstico-fissural, dada sua anisotropia, e para municiar com informações consistentes de T, a construção da superfície interpolada, base para a separação horizontal dos compartimentos definidos.

Esse último artigo, por sua vez, permitiu a delimitação de quatro zonas mais carstificadas, e a definição de seus parâmetros hidrodinâmicos, bem como das demais unidades aquíferas do sistema. Essas zonas concentram as nascentes mais relevantes da área e grande número de feições cársticas, além de apresentarem nítida maior produtividade, o que favorece tanto a compreensão hidrodinâmica da área de estudos quanto subsidia modelos hidrogeológicos mais complexos.

Recomendações para trabalhos futuros dizem respeito a investigação e confirmação dos limites a montante de cada zona mais carstificada delimitada. Julga-se também relevante angariar informações de mais poços de monitoramento para compreensão das relações de variação dos níveis d'água na bacia com a recarga e a descarga na área.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, R. G. (1980). **A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition (20 pp.). <https://doi.org/10.2118/9289-MS>.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. (2001). **A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos.** Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. SBG, Belo Horizonte. pp. 9-30.
- AMARAL, F. G.P. (2018). **Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região de Lagoa Santa (MG).** MS Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 156p.
- ANDERSON M. P., WOESSNER W. W. (1992) **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport.** Academic Press, New York, 381p.
- ANDRADE, I. B.; BARBOSA J. A.; RIBEIRO, C. G., DE PAULA, R. S.; VELASQUEZ, L. N. M. (2020). **Relação hidráulica entre o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Bambuí na porção sul da APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Geonomos v.27. Belo Horizonte. doi:10.18285/geonomos.v27i1.21852
- AULER, A. (1994). **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos Pedro Leopoldo Karst, Brazil.** Western Kentucky University. Dissertação de Mestrado, 110 p.
- BAPTISTA M. C. (2004). **Estratigrafia e evolução geológica da região de Lagoa Formosa (MG).** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 104 p.
- BAIR, S., G.S. ROADCAP. (1992). **Comparison of flow models used to delineate capture zones of wells: Leaky-confined fractured-carbonate aquifer.** Ground Water 30, no. 2: 199–211.
- BÄUMLE, R. (2003). **Geohydraulic Characterisation of Fractured Rock Flow Regimes: Regional Studies in Granite and Dolomite.** 149 p. Tese (Doutorado em Ciencias Naturais) - Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, 2003.
- CHEN, X., ZHANG Y., XUE, X., ZHANG, Z., WEI, L. (2012). **Estimation of baseflow recession constants and effective hydraulic parameters in the karst basins of southwest China.** Hydrology Research 1. 43 (1-2): 102–112. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2011.136>.
- CHANG H. K.; MIRANDA F. P.; MAGALHÃES E.; ALKMIM F. F. (1988). **Considerações sobre a evolução tectônica da bacia do São Francisco.** In: SBG, Cong. Bras. Geol., 35, Anais, 5: 2076-2090.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (1983). **Hidrologia Subterrânea.** Second ed. Omega, Barcelona.
- DANTAS, J. C. M.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; DE 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. V. 123. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104219>.

DE PAULA, R. S. (2019). **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 272 p.

DE PAULA, R. S., VELÁSQUEZ, L. N. M. (2019) **Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Revista Águas Subterrâneas, v.33, n. 2, p. 119-133.

DE PAULA, R. S., TEIXEIRA, G. M., RIBEIRO, C. G., SILVA, P. H. P. DA, SILVA, T. G. A., VIEIRA, L. C. M., & VELÁSQUEZ, L. N. M. (2020). **Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero Cárstico-Fissural da Região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Águas Subterrâneas, 34(2), 221–235. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29812>.

DA-GLORIA, PEDRO; NEVES, WALTER ALVES; HUBBE, MARK. **História das pesquisas bioarqueológicas em Lagoa Santa, Minas Gerais, Brasil.** Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, v. 12, n. 3, p. 919-936, set.-dez. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1981.81222017000300014>.

DINIZ, H. N & MICHALUATE, W. J. (2002). **Interpretação de testes de produção em poços tubulares profundos – dimensionamento e especificações de bombas submersas.** Instituto Geológico. São Paulo. Bol. Inst. Geol nº 16. ISSN 0100-431X.

FEITOSA, F. A. C., MANUEL FILHO, J., FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A. (2008). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. rev e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID.

FORD, D. C., WILLIAMS, P. W. (1991). **Karst geomorphology and hydrology.** London: Chapman-Hall.

FRAGOSO, D. G.C.; ULHEIN, A.; SANGIARD, J. C. D.; SUCKAU, L.; GUERZONI, H. T. G.; FARIA, P. H. (2011). **Geologia dos Grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na Folha Presidente Olegário (1:100.000), MG: Registro Depositional do Neoproterozóico ao Neocretáceo da Bacia do São Francisco.** Geonomos, 28-38p.

GALVÃO, P., HALIHAN, T., HIRATA, R. (2015). **The Karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil.** Journal of hydrology, v. 532, p 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.026>.

GHASEMIZADEH, R., YU, X., BUTSCHER C, HELLWEGGER F, PADILLA I, ET AL. (2015). **Equivalent Porous Media (EPM) Simulation of Groundwater Hydraulics and Contaminant Transport in Karst Aquifers.** PLOS ONE 10(9): e0138954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138954>.

GOLDSCHIEDER N.; DREW, D. (2007). **Methods in Karst Hydrogeology.** International Contributions to Hydrogeology, 26, Londres: Tay-lor & Francis.

HERRMANN, G.; KOHLER, H. C.; DUARTE, J. C.; CARVALHO, P. G. S. (1998). **APA Carste de Lagoa Santa – Gestão Ambiental.** IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 57p.

- HIRATA, R., UHOGUSOFF, A., MARCELLINI, S. S., VILLAR, P. C., MARCELLINI, L. (2019). **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo / Instituto de Geociências.
- KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. (1979). **Analysis and evaluation of pumping test data**. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Holanda. Bulletin 11, 200p.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. (1952). **Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis**. Journal of the American Statistical Association. 47 (260): 583–621. ISSN 0162-1459. doi:10.1080/01621459.1952.10483441.
- LONG, J.C.S., REMER, J.S., WILSON C.R., WITHERSPOON P.A. (1982). **Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures**. Water Resources Research 18(3):645–658.
- MAILLET, E. (1905). **Essais d'hydraulique souterraine et fluviale**. Hermann.
- MANGIN, A. (1975). **Contribution à L'étude hydrodynamique des aquifères karstiques**. Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Dijon.
- MAWLOOD, D. K., ISMAIL S. O. (2019). **Comparison between Neuman and Dupuits for pumping test in water Tabel aquifer**. ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences 31(3), 385–391.
- MESQUITA, D. C., DANTAS, J. C. M., DE PAULA, R. S., GUERRA, K. J. (2017). **Estudo Dos Parâmetros Hidrodinâmicos Obtidos Em Ensaios De Campo Em Itabiritos Brandos Da Porção Sudoeste Do Quadrilátero Ferrífero, MG**. Geonomos - v.25, n.2 (2017)
- MILANOVIC, P. T. (1981). **Karst hydrogeology**. Water Resources. Publ., Littleton, Colorado, U.S.A.
- MOENCH, A. F. (1984). **Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin**. Water Resour. Res., v. 20, n. 7, p. 831-846.
- MULDOON, M., BRADBURY, K.R. (2005). **Site characterization in densely fractured dolomite: comparison of methods**. Ground Water. Nov-Dec;43(6):863-76. doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00091.x. PMID: 16324008.
- NEUMAN, S.P. (1972). **Theory of Flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of the Water Tabel**. Water Resources Research, 8, 1031-1045. <http://dx.doi.org/10.1029/WR008i004p01031>.
- NEUMAN, S. P. (1975). **Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response**. Water Resour. Res., 11(2), 329 – 342.
- NOCE, C. M.; TEIXEIRA, W.; MACHADO, N. **Geoquímica dos gnaisses TTG e granitoides neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Revista Brasileira de Geociências, v. 27, n. 01, p 25-32, 1997. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.19972532>.
- PANKOW, J. F., JOHNSON R. L., HEWETSON J. P., CHERRY J. A. (1986). **An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on**

fractured porous media in terms of the equivalent porous medium (EPM) model. J. Contaminant Hydrology 1(1):65–76.

PENA, M. A. C.; VELÁSQUEZ, L. N. M.; TEIXEIRA, G. M.; DA SILVA, P. H. P.; AMARAL, D. G. P.; DE PAULA, R. S. (2021). **Análise de lineamentos e sua relação com a capacidade específica de poços na APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Águas Subterrâneas. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.29816>

PESSOA, P. F. P. **Hidrogeologia do aquífero cárstico coberto de Lagoa Santa, MG.** (2005). Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PODGORNEY, R.K., R.W. RITZI JR. (1997). **Capture zone geometry in a fractured carbonate aquifer.** Ground Water 35,no. 6: 1040–1049.

QUINLAN, J. F., EWERS, R. O. (1985). **Ground water flow in limestone terranes: Strategy rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas.** Proceedings of the National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring (5th, Columbus, Ohio), pp. 197–234, National Water Well Association, Worthington, Ohio.

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 Morais, 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 e convenção).

RIBEIRO, C. G.; MEIRELES, C. G.; LOPES, N. H. B.; ARCOS, R. E. C. (2016). **Levantamento geológico estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Trabalho de Graduação (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 157p.

RIBEIRO, C. G.; VELASQUEZ, L. N. M., AMARAL, D. G. P., MURTA, M. C. P., SILVA, P. H. P., PAULA, R. S. (2017). **Utilização de Feições Exocársticas para Identificação de Áreas Favoráveis à Ocorrência de Cavidades e Sumidouros.** In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA EM DIAMANTINA. GEOSUDESTE, Diamantina. Anais. Diamantina: SBG 1p.

RIBEIRO, C. G., VELÁSQUEZ, L. N. M., 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.** Revista Águas Subterrâneas, v. 33, n. 1, p. 12-21.

RIBEIRO, C. G. (2020). **Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos 2H, 18O e 3H na região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 234.

RORABAUGH, M. I. (1964). **Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow.** Int Assoc Sci Hydrol Publ 63:432–441.

SCANLON, B.R., MACE, R.E., BARRETT M.E., SMITH B. (2003). **Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media**

models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. Journal of Hydrology 276:137–158.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. (1965). **An analysis of variance test for normality (complete samples).** Biometrika. 52 (3–4): 591–611. JSTOR 2333709. MR 205384. doi:10.1093/biomet/52.3-4.591 p. 593.

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.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 78.

TEIXEIRA, G. M., PENA, M. A. C., SILVA, P. H. P. (2020). **Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região à sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Trabalho final de Graduação, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 282.

TEODORO, M. I. P., VELÁSQUEZ, L. N.M, FLEMING, P. M., PAULA, R. S., SOUZA, R. T., DOI, B. M. (2019). **Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Revista Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, v. 33, n. 4, p. 392-406.

TEODORO, M. I. P. (2020). **Hidrodinâmica das zonas cárstica e cárstica-fissural do sistema aquífero da Formação Sete Lagoas por meio de traçadores corantes e da análise das estruturas rúpteis na região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 129.

THEIS, C. V. (1935). **The Relation between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage.** Transactions on American Geophysical Union, Washington DC, 518-524.

THRAILKILL, J. (1986). **Models and methods for shallow conduit-flow carbonate aquifers,** in Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions Conference, pp. 17-31, Water Well Journal Publishers, Dublin, Ohio.

TODD, D.K., 1980. Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons, NY, p. 535.

TRABUCCHI, M., RAMÍREZ, J., FERNÁNDEZ-GARCIA, D. (2018). **Generalizing Agarwal's Method for the Interpretation of Recovery Tests Under Non-Ideal Conditions.** Water Resources Research. 10.1029/2018WR022684.

VIANA, H. S.; KOHLER, H. C.; TAVARES, V. P. (1998). **APA Carste de Lagoa Santa: meio físico – Volume I.** Belo Horizonte: IBAMA/CPRM.

WORTHINGTON S. R. H., FORD D. C., BEDDOWS P. A. (2000). **Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution.** Speleogenesis: Evolution of karst aquifers, Huntsville, Natl. Speleol. Soc., 463-472.