

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

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

*Thomaz Augusto de Vasconcellos Vidal¹; Gabriel Piassi Tosi²; Matheus Alonso Castelo Pena³;
Rodrigo Sérgio de Paula⁴; Leila Nunes Menegasse Velásquez⁵*

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 (Qs) 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.

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 Neoproterozóica 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 sofrem com 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 (Qs) dos poços e a transmissividade (T) do aquífero no gráfico bi-logaritmico. 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.

1) Mestrando em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG). Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.627. Belo Horizonte, MG, +55 31 991912008, thomazavv@gmail.com;

2) Discente de graduação do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG): Avenida Antonio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte – Minas Gerais. gptosi@gmail.com;

3) Discente de pós-graduação do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG): Avenida Antonio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte – Minas Gerais. matheuspena8@gmail.com;

4) Docente do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG): Avenida Antonio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte – Minas Gerais. rodrigo.spdm@yahoo.com.br;

5) Docente do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG): Avenida Antonio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte – Minas Gerais. menegase@yahoo.com.br;

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 paredes calcárias ornamentadas 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 sobrestimativa 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.

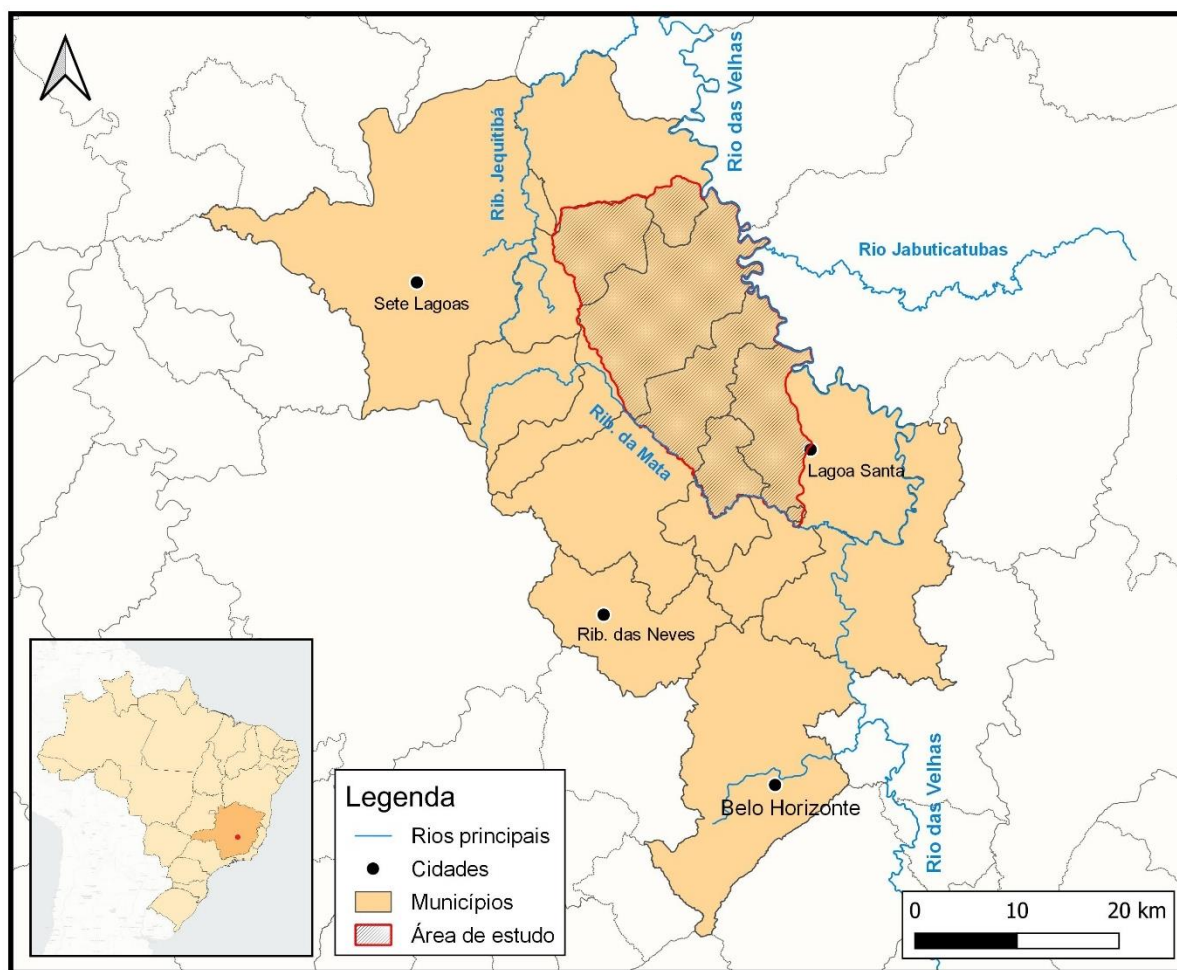
Motivação e objetivos

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-logaritmico 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 seis formações, sendo que as duas mais basais ocorrem na área.

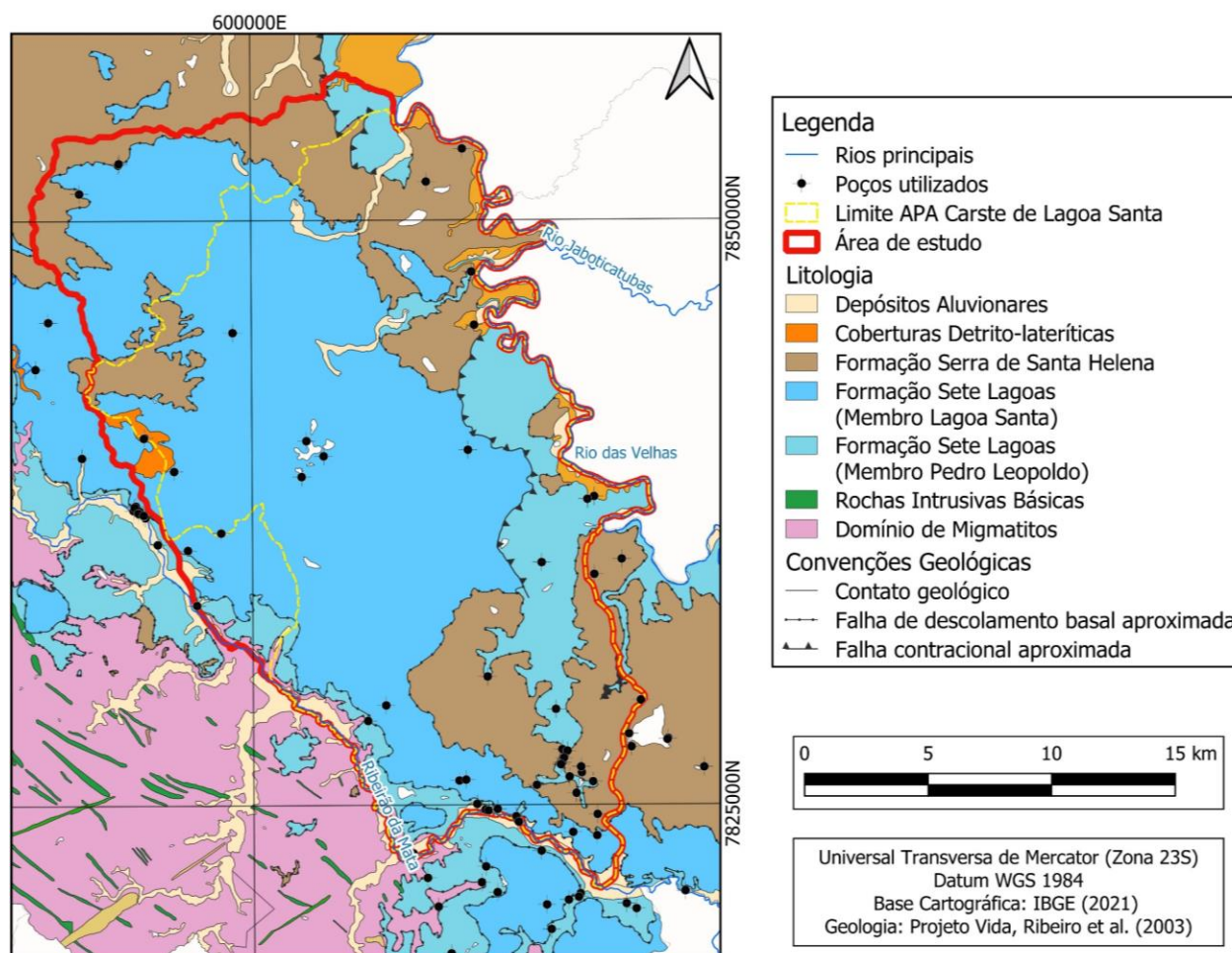
Contexto Geológico

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 de famílias de fraturas verticais, o que influencia a maior abertura e formação de condutos cársticos 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).

METODOLOGIA

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 101 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.

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

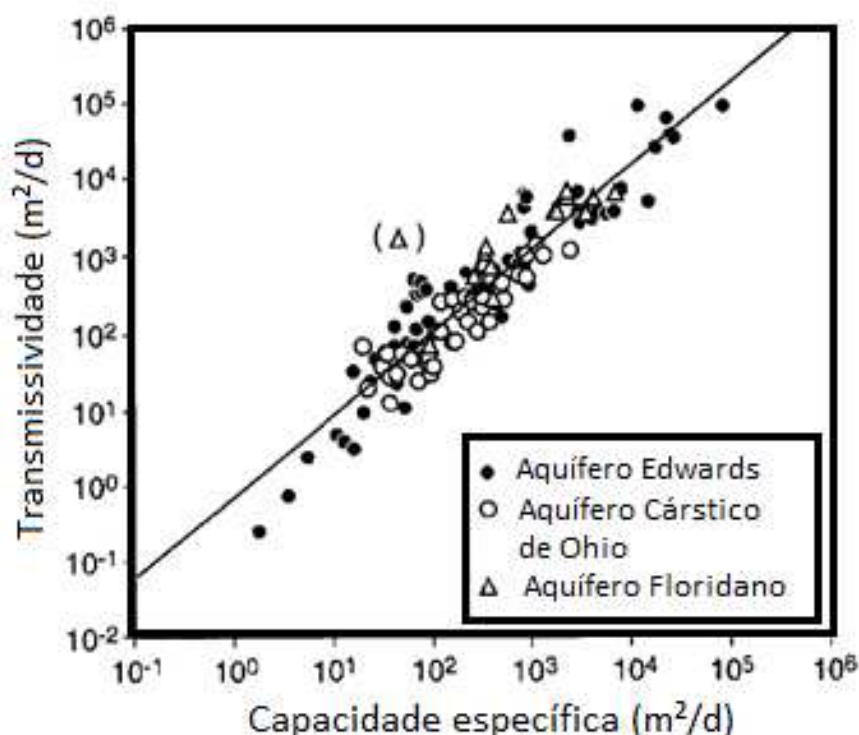
Onde: Q é a vazão de estabilização do poço;

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.

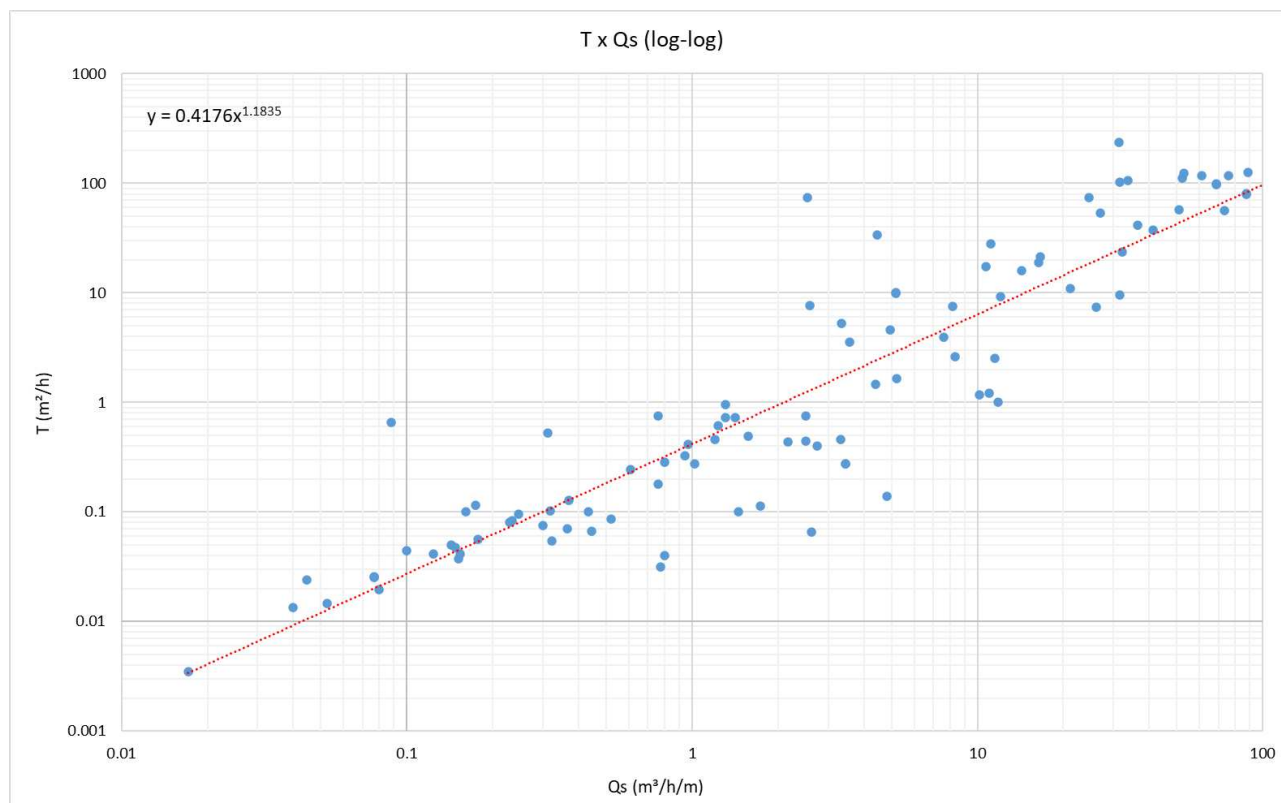
Figura 3 - Comparação dos valores de transmissividade e capacidade específica para os aquíferos "Edwards", "Ohio Karst Aquifer" e "Floridan". A linha contínua apresenta a melhor aproximação para os dados de 3 aquíferos cársticos distintos. Gráfico adaptado de Mace, 1997.



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 Qs para cada poço deste estudo. A linha em vermelho expressa a regressão linear. Gráfico bi-logarítmico.



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

Onde: Qs 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 Qs 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

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).