



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Estudos Prévios para Locação de Poços Tubulares em Terrenos Cristalinos no município de Viçosa-MG

Lucas Santana Lopes¹, José Augusto Costa Gonçalves², Eliane Maria Vieira³

¹Mestrando do Programa de Pós-graduação em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, Itabira, MG. ²Professor Associado do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itabira, MG. ³Professora Adjunta do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itabira, MG, E-mail: jaucoستا@unifei.edu.br (Autor Correspondente)

Artigo recebido em 19/01/2023 e aceito em 24/07/2023

RESUMO

A segurança hídrica é um dos temas centrais quando globalmente o assunto é Recursos Hídricos. A busca por novas fontes de captação de água bruta é uma realidade em muitos municípios do Brasil e em Viçosa, Minas Gerais não é diferente. Visando dispor de uma fonte alternativa para abastecimento público, que não seja um manancial superficial distante do centro urbano, este estudo tem por objetivo a pesquisa da água subterrânea como fonte de abastecimento urbano no município de Viçosa, para expansão do sistema existente a partir da análise integrada das características do relevo, da hidrografia, da geologia e dos lineamentos estruturais (fraturas/falhas) e comparar com vazões dos poços existentes na área de estudo. Para tal, foram realizados estudos e coleta de dados in loco, elaboração de planilha e mapas com informações dos poços tubulares existentes e análises da viabilidade executiva do sistema proposto. O estudo revelou tendências de locais e regiões propícias para a perfuração de poços, indicando um potencial para aproveitamento da água subterrânea. A pesquisa mostrou que os controles geológicos favoráveis a poços de boa vazão seriam restritos e específicos ao local estudado sendo uma característica intrínseca do sistema; que podem existir controles geológicos idênticos em diversos locais, ou seja, o sistema é aleatório, entretanto, nos mostraria a possibilidade de melhorar as locações de poços. Foram identificados na área estudada os aquíferos porosos, representados pelos aluviões e coberturas detríticas e manto de alteração e os aquíferos do meio fissural, representados pelas rochas da associação xistos-gnaisses-migmatitos.

Palavras-chave: água subterrânea, gestão de recursos hídricos, locação de poços, lineamentos estruturais.

Preliminary Studies for the Location of Tubular Wells in Crystalline Terrain in Viçosa-MG

ABSTRACT

Water security is one of the central themes when the subject is globally related to water resources. The search for new sources of raw water is a reality in many municipalities in Brazil and Viçosa, Minas Gerais is no different. Aiming to have an alternative source for public supply, that is not a superficial spring distant from the urban center, this study has for objective the research of the underground water as source of urban supply in the city of Viçosa, for expansion of the existing system from the integrated analysis of the characteristics of the relief, the hydrography, the geology and the structural lineaments (fractures/faults) and to compare with flows of the existing wells in the area of study. To this end, studies and data collection were carried out in loco, a spreadsheet and maps were prepared with information about the existing tubular wells, and the executive feasibility of the proposed system was analyzed. The study revealed trends in locations and regions suitable for well drilling, indicating a potential for groundwater use. The research showed that the geological controls favorable to wells of good flow would be restricted and specific to the studied location being an intrinsic characteristic of the system; that identical geological controls can exist in several locations, that is, the system is random, however, it would show us the possibility of improving the well locations. Porous aquifers, represented by alluvium and detrital coverings and alteration mantle, and fissure aquifers, represented by the rocks of the schist-gnaisses-migmatite association, were identified in the studied area.

Keywords: groundwater, water resources management, well locations, structural lineaments.

Introdução

Nacionalmente, dados importantes sobre os recursos hídricos no Brasil são obtidos dos Relatórios de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, elaborado anualmente pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). No trabalho da Conjuntura de 2017, é apresentado que o Brasil é um dos países que possuem a maior disponibilidade de água doce do mundo. Isso traz um aparente conforto, porém os recursos hídricos estão distribuídos de forma desigual no território, espacial e temporalmente. Esses fatores, somados aos usos da água pelas diferentes atividades econômicas nas bacias hidrográficas brasileiras e os problemas de qualidade de água, geram áreas de conflito (IBGE, 2016).

O uso da água para consumo humano é um uso prioritário segundo a Lei das águas, que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), (BRASIL, 1997). Muitos municípios em Minas Gerais convivem com a escassez hídrica nos últimos anos, declarando situações de racionamento nos períodos de seca. Grande parte desse problema se relaciona com a matriz da fonte adotada pelas companhias de saneamento, na qual a maioria se utiliza da captação superficial como fonte de água bruta (IGAM, 2020).

A disponibilidade de água superficial possui dependência intrínseca com as precipitações, e não diferente as chuvas também ocorrem de maneira desigual sobre nosso território, pois a precipitação média anual do Brasil é de 1.760 mm, mas por causa das suas dimensões continentais, o total anual de chuva varia de 500 mm na região semiárida do Nordeste, a mais de 3.000 mm na região Amazônica, (ANA, 2017).

A existência da intrínseca relação de continuidade entre os cursos de água e os aquíferos, dão importante entendimento, considerando que a área aflorante de um aquífero é a porção que intercepta a superfície terrestre e possui potencial para receber recarga direta de água por intermédio da infiltração proveniente das chuvas e de corpos d'água superficiais (Bonilla et al., 2018; Lasagna et al., 2020). Diversos aquíferos extrapolam os limites das regiões hidrográficas e do território nacional, (ANA, 2017; Bertolo et al., 2015). Portanto, mesmo que exista continuidade entre os sistemas imediatamente nos pontos de intersecção entre os cursos de água e os aquíferos, a área das bacias de contribuições dos mananciais, não obrigatoriamente, se igualam as áreas das reservas

subterrâneas formadas pelos aquíferos (Zhang et al., 2020; Petitta et al., 2023; ANA, 2020).

Estima-se que a disponibilidade de água subterrânea no Brasil seja em torno de 14.650 m³/s. Da mesma forma como ocorre com as águas superficiais, sua distribuição pelo território nacional não é uniforme, e a produtividade dos aquíferos é variável, ocorrendo regiões de escassez e outras com relativa abundância, (ANA, 2017). Entretanto a quantidade de água disponível não depende apenas do aquífero, mas também de outros fatores. Para se alcançar um mesmo aquífero é necessário perfurar diferentes profundidades, conforme a localização. Os sistemas aquíferos localizados nos terrenos sedimentares, que ocupam 48% da área do Brasil, têm grande potencial para armazenamento de água, pois ocorrem, em geral, em regiões com condições climáticas favoráveis. As regiões de baixa disponibilidade coincidem com as áreas de ocorrência dos aquíferos fraturados, (Bertolo et al., 2015; ANA, 2017). As dimensões e as características de fluxo de água do reservatório subterrâneo são definidas pelo tipo e continuidade das rochas em subsuperfície, assim como pelas suas propriedades de porosidade e permeabilidade (Tzoraki et al., 2018; Wu et al., 2021; Zheng et al., 2023).

Ocorre que a baixa disponibilidade em regiões com ocorrência de aquíferos fraturados não impõe necessariamente o não aproveitamento da água subterrânea, podendo nessas regiões utilizar-se de técnicas modernas para obter locais com vazão aproveitável (Dillon et al., 2019; Freeze e Cherry, 2017). A grande maioria dos poços certamente não foi locada no melhor lugar possível do ponto de vista hidrogeológico, que, em aquíferos cristalinos, corresponde às fraturas ou zonas de fratura de maior transmissividade, (Fathi et al., 2020; Bertolo et al., 2015). Embora as vazões médias individuais dos poços existentes sejam baixas, considera-se ser possível elevá-las por meio da locação de poços que utilizem critérios geológicos e hidrogeológicos, passíveis de serem identificados e analisados devido às técnicas atualmente disponíveis, (Bertolo et al., 2015).

Os aquíferos, assim como os cursos de água, são dependentes das precipitações para que recarreguem seus volumes úteis. Os aquíferos podem abastecer os mananciais superficiais e vice-versa (Gonçalves et al., 2020). A descarga de água dos aquíferos mantém o equilíbrio ecológico e pereniza a maior parte de rios, lagos e pântanos no Brasil, por meio de sua contribuição ao fluxo de

base dos cursos de água (Halder et al., 2020). Em cerca de 90% dos rios brasileiros o fluxo de base, proveniente dos aquíferos, alimenta os rios e os mantém perenes nos períodos secos. A exceção ocorre nos terrenos cristalinos do semiárido nordestino, os quais não têm capacidade de regularizar seus rios, tornando-os intermitentes, (ANA, 2017).

O desconhecimento de questões técnicas por parte do consumidor imediato, seja ele público ou privado, rotineiramente faz com que poços sejam locados em pontos inadequados, resultando em vazão abaixo do esperado bem como prejuízo financeiro. Entretanto, é possível melhorar significativamente a vazão média dos poços caso eles sejam locados com critérios geológicos e construídos de acordo com as normas técnicas (Pauloo et al., 2020; Pardo-Igúzquiza et al., 2023).

Para maiores vazões, um conjunto de poços pode ser a solução encontrada para atendimento da demanda. Dessa forma, os poços são locados em posições estratégicas em uma determinada área – geralmente fora da zona urbana –, visando a otimizar ao máximo as vazões extraídas do aquífero. Entre as vantagens da instalação de campo de poços, estão às possibilidades de (1) conhecer mais profundamente as características de reservação, recarga e fluxo de água dos reservatórios aquíferos explorados, permitindo que sua exploração seja mais eficiente; (2) otimizar os custos de adução e automação do conjunto de poços, uma vez que estes se encontram mais próximos entre si; e (3) estabelecer ferramentas de governança da água mais eficazes, visando à proteção do aquífero contra atividades poluidoras em superfície, por meio de uma política de uso e ocupação do solo no local, (Bertolo et al., 2015; Zhao e Illman, 2018; Tong et al., 2021).

A escolha pela fonte de água bruta advinda das águas subterrâneas pode também ser justificada pelo fator econômico. As companhias de saneamento, ao produzirem a água com um menor custo, deve repassar esta economia aos usuários, que por sua vez obtém o benefício de forma direta (Rebouças, 2002). Este fator é ainda mais importante em períodos de crise econômica, onde grande parte da população carente possui dificuldade em pagar suas contas. Extraindo a mão de obra, a operação dos poços apresenta grande parte dos seus custos associados à energia elétrica, pois, em geral, as águas subterrâneas apresentam boa qualidade química natural e dispensam a adição de produtos químicos para o seu tratamento convencional (Rebouças, 2006).

A exploração de água subterrânea tampouco gera resíduos sólidos, como os lodos de tratamento de água, que representam um oneroso passivo ambiental para a companhia distribuidora de água, os custos de um sistema de abastecimento por água subterrânea, extraindo a mão de obra, praticamente se resumem à manutenção de bombas elétricas submersíveis e limpeza periódica dos poços. Além disso, os mananciais subterrâneos não sofrem perdas de água por processos de evaporação ou assoreamento, tal como ocorre nos reservatórios superficiais (Rebouças, 2002).

Os custos relacionados com a exploração de água subterrânea por poços se tornam proibitivos em situações em que os custos de energia elétrica são mais elevados que os do tratamento químico da água superficial. Entretanto, gastos elevados com energia elétrica ocorrem notadamente nos casos em que a água subterrânea se situa em grandes profundidades no poço, circunstância que normalmente está associada com quedas de vazões e, consequentemente, com sintomas de superexploração do aquífero. Nesse caso, a exploração do aquífero deve ser de fato evitada, (Bertolo et al., 2015).

Normalmente ocorre a superexploração do aquífero devido ao grande número de poços irregulares em uma determinada região (Maier et al., 2022; Stigter et al., 2023; Naves et al., 2021). Os usuários irregulares nestes casos não possuem segurança hídrica assegurada e o findar da reserva subterrânea ocasiona consideráveis prejuízos ao conjunto de usuários da região. A grande maioria dos poços profundos em funcionamento é clandestina, provavelmente porque a outorga é considerada pelo usuário de água subterrânea uma exigência cartorial, cara e desnecessária. O usuário não vê, portanto, quais seriam as vantagens na realização da outorga de uso ao gestor.

Outro assunto essencial a se abordar dentro do tema é a crescente utilização da água subterrânea no mundo e em nosso território para diversos fins, pois a captação de água subterrânea em todo o mundo vem aumentando fortemente desde o século passado (Ajjur e Mogheir, 2020; Anand et al., 2019). O crescimento populacional, o consumo de água para a produção de alimentos e, também, o progresso tecnológico e científico são fatores que influenciam esse aumento” (Emmanouil et al., 2022; Van der Gun, 2012).

Em especial no Brasil, os dados são marcantes, pois em janeiro de 2008, haviam sido cadastradas aproximadamente 145 mil fontes de abastecimento de água subterrânea, sendo quase a

totalidade representada por poços tubulares. Em outubro de 2016, os poços cadastrados totalizavam mais de 278 mil. Uma nova projeção da quantidade de poços tubulares existentes no país indica a ordem de 1,2 milhão, o que representa um aumento anual de mais de 22% em relação à estimativa de 2008, (ANA, 2017). Com relação ao cenário nacional, as crises de abastecimento causado pelas recentes secas são provavelmente o principal fator que contribui para índices elevados, por esta perspectiva. Cumpre ressaltar que poços tubulares construídos não significam, necessariamente, que estejam em exploração, os mananciais subterrâneos podem ser considerados reservas estratégicas e representam, muitas vezes, alternativas importantes em situações críticas. O uso desses mananciais vem crescendo ao longo dos últimos anos no país devido, dentre outros fatores, às recentes crises hídricas, as quais afetam mais intensamente os mananciais superficiais, (ANA, 2017).

Para a demanda do abastecimento urbano, sendo a segunda finalidade que mais demandou captação de água no ano de 2019. Existe uma grande discrepância no panorama de demanda entre o abastecimento urbano e rural, pois, em 2016, 16% da população do Brasil vivia em áreas rurais (IBGE, 2010). A população rural demanda 33,8m³/s para seu abastecimento, que se dá, geralmente, por meio do uso de poços, captações isoladas ou cisternas. Já para o abastecimento urbano são necessários 488,3m³/s, cerca de 15 vezes a demanda para o abastecimento rural. O serviço de abastecimento urbano de água, incluindo produção e distribuição, é prestado predominantemente por companhias estaduais de saneamento (em 69% dos municípios brasileiros), além de entidades municipais e empresas do setor privado, (ANA, 2017). Portanto a disparidade observada entre a demanda urbana e rural é devido à distribuição populacional, que neste momento é predominante nos centros urbanos.

Para amenizar a problemática, em um panorama de aumento de consumo, necessidade de expansão dos sistemas de abastecimento e eventos recorrentes de seca, o Diagnóstico Global da Governança das Águas Subterrâneas 2016, elaborada pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) mostra que a água subterrânea permanece em aquíferos por períodos muito longos (900 anos em média), portanto, representa um precioso capital hídrico, sendo uma reserva estratégica contra crises, (FAO, 2016). Considerando sempre que os poços tubulares

profundos podem ser construídos de forma ágil e rápida para ajudar no aumento da oferta de água na situação de contingenciamento quanto porque eles podem ser utilizados em longo prazo para complementar o abastecimento público mesmo em situações de normalidade de chuvas, (Bertolo et al., 2015).

Com relação à prestação de serviços em meio urbano o relatório mostra que a cobertura do serviço de abastecimento urbano tem se estabilizado no Brasil ao longo dos últimos 5 anos em torno de 93%. O elevado índice de cobertura indica acesso à rede de um sistema de abastecimento de água, mas não significa, necessariamente, garantia da oferta de água, isto é, disponibilidade hídrica do manancial, (ANA, 2017). Esta última afirmação corrobora essencialmente com este trabalho, pois tal realidade é perfeitamente associável ao município de Viçosa. Já com relação à fonte preferencial de captação, os municípios em sua maioria adotam o manancial superficial como matriz de abastecimento, talvez até mesmo pela falsa impressão de maior facilidade e disponibilidade hídrica. Dentre os municípios brasileiros, 58% utilizam mananciais de águas superficiais de forma preponderante para o seu abastecimento, enquanto 42% têm, nos mananciais subterrâneos, suas principais fontes. Considerando os grandes centros urbanos do país, a representatividade dos mananciais superficiais é ainda maior, com 69% dos mananciais utilizados correspondendo a corpos d'água superficiais e, apenas 31% a aproveitamentos subterrâneos, (ANA, 2017).

O município de Viçosa, localizado na Zona da Mata Mineira, está inserido neste contexto, pois atualmente possui duas Estações de Tratamento de Água (ETA). A primeira é denominada ETA I Sede Administrativa do SAAE Viçosa, situada no Bairro Bela Vista, com captação de água bruta no Ribeirão São Bartolomeu. Esta estação tem outorga de 100 l/s de acordo com Portaria IGAM no 157/2002, válida até 21/02/2022. A segunda estação é denominada ETA II Violeira, situada a Estrada da Violeira, com captação no Rio Turvo Sujo. Esta estação tem outorga de 250 l/s, de acordo com Portaria IGAM no 00156/2002, válida até 21/02/2022. Entretanto, a atual estrutura da estação não suporta tal vazão para produção de água, com capacidade atual para tratamento de 180 l/s, (SAAE VIÇOSA, 2015).

De acordo com PMS Viçosa, a capacidade máxima de produção de água dos poços tubulares espalhados pelo município é de 32 l/s,

considerando ainda que a soma das capacidades de tratamento de água das ETA's no período seco (240 l/s) (SAAE VIÇOSA, 2015). O objetivo da pesquisa é avaliar o potencial das águas subterrâneas como fonte de abastecimento para o município de Viçosa, avaliando os melhores locais para perfuração de poços tubulares, gerando alternativas aos mananciais superficiais.

Material e métodos

O município de Viçosa está localizado na porção norte da Zona da Mata de Minas Gerais e totalmente inserido na sub bacia hidrográfica do Rio Turvo, que está inserida na bacia do rio Doce,

na região Atlântico Sudeste, região reconhecida pelo adensamento populacional e importância econômica no cenário nacional (ANA, 2012). A nascente do Rio Turvo fica localizada nas coordenadas de latitude sul 7682922,278 e longitude oeste 715287,986, no município de Paula Candido, Minas Gerais. A bacia hidrográfica possui uma área drenada de 847,72 km² e o curso de água principal possui extensão aproximada de 94,96 km. O deságue ocorre no Rio Piranga, próximo ao município de Guaraciaba, Figura 1. Na Figura 2, um infográfico com as etapas do estudo e em seguida as etapas são descritas individualmente.

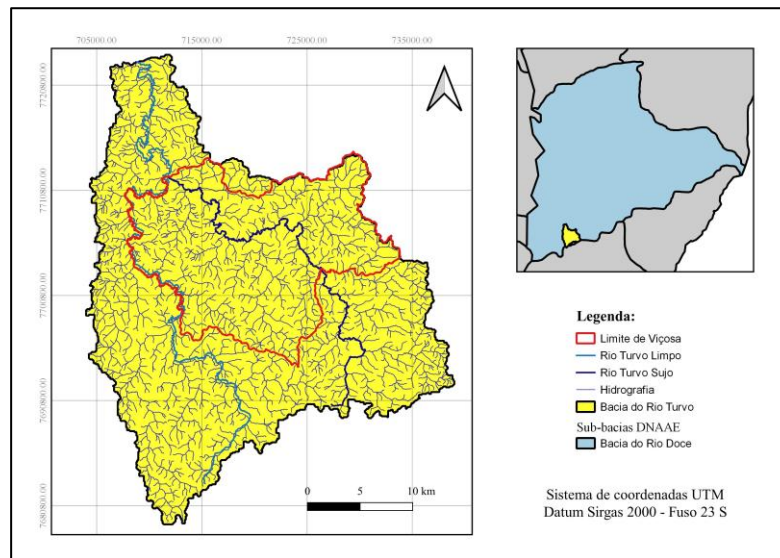


Figura 1 - Localização da Bacia do Rio Turvo. Fonte: Autores, 2020.



Figura 2 - Etapas de execução dos estudos. Fonte: Autores, 2021.

As coletas de dados e trabalhos de campo, foram através da companhia de saneamento local,

nos sítios eletrônicos dos órgãos estaduais e federais de gerenciamento dos recursos hídricos,

todos os dados disponíveis acerca dos poços utilizados para abastecimento de água no município, seja em área urbana ou rural. Foram também realizadas visitas aos poços levantados, para uma avaliação de locação deles, a fim de identificar seu correto posicionamento sobre a perspectiva hidrogeológica. Das informações obtidas, foi produzida planilha única, englobando todos os poços catalogados e todas as informações necessárias à análise do estudo das vazões dos poços locais, de modo a subsidiar os estudos. A partir da visita de campo, foi produzido mapa georreferenciado com a localização dos poços catalogados. Todo o trabalho envolvendo mapas e demais processos de geoprocessamento foi feito no software livre QGIS versão 3.4.13. Foi produzido também um mapa georreferenciado com a drenagem da bacia com a indicação dos principais cursos d'água. A base de dados foi obtida junto a ANA, ao IGAM e a prefeitura local. Um mapa geológico contemplou as litologias regionais, com a finalidade é subsidiar a análise do estudo das vazões dos poços e suas relações com o substrato rochoso. A produção do mapa de lineamentos, destacou todas as feições estruturais isoladas ou em conjunto da região. Por fim, o mapa de temas integrados delimitou possibilitou uma análise mais completa de toda a bacia, incluindo a localização dos poços, a drenagem dos cursos d'água, a litologia local e os lineamentos.

Resultados

A Tabela 1 mostra as informações obtidas da coleta de dados e visita de campo. As informações foram adquiridas através de pesquisa na companhia de saneamento e em sítios eletrônicos de órgãos estaduais e federais relacionados aos recursos hídricos.

Os estudos hidrogeológicos desenvolvidos basearam-se inicialmente nos levantamentos de campo e pesquisa junto a órgãos públicos e privados, destinados ao inventário de poços tubulares existentes nos domínios da área. Os dados relativos aos poços tubulares inventariados foram submetidos a uma revisão para eliminação de possíveis erros grosseiros e posteriormente agrupados em um cadastro totalizando 21 poços.

✓ O equipamento mais utilizado na perfuração dos poços cadastrados são as sondas

roto-pneumáticas, de maior eficiência e rapidez na perfuração de rochas duras em meios fraturados, seguido, em menor proporção, por sondas a percussão.

✓ A maioria dos poços construídos, geralmente, são iniciados com diâmetros de 10 ou 12", em coberturas indiferenciadas e rochas inconsolidadas. Na rocha sã, o diâmetro do furo é de 6".

✓ Os poços, na sua grande maioria, são revestidos apenas, na seção superior do furo, pela presença de material inconsistente, permanecendo abertos nas rochas sãs. Os materiais de revestimento mais usados são tubos de aço carbono ou galvanizado e de PVC rígido, próprios para poços tubulares. A utilização de filtros se restringe a poços onde ocorre a disponibilidade de águas nas coberturas e rochas alteradas, sendo os filtros de aço e PVC, os mais usados.

✓ As informações sobre as entradas de água e as profundidades das fraturas atravessadas foram registradas em apenas 7 poços. As profundidades das entradas de água, situam-se, na maioria dos casos, 80%, entre 20 a 60 metros, nenhuma entrada acima de 60 metros e 20% das entradas de água ocorrem em profundidades de até 20 metros.

✓ As profundidades dos níveis estáticos para os poços cadastrados, cuja distribuição de frequência, indicam um valor máximo de 10 metros, com mínimo de 0,4 metros e média de 5,33 metros. Verificam-se ainda que 75% dos poços se situam no intervalo entre 2,00 e 8,45 metros de profundidade para o nível estático.

✓ O cômputo das vazões específicas para um número de amostras dos 12 poços, indica que 75% dos poços têm produção até 0,33 L/s/m, com um valor médio de 0,22 L/s/m, um valor máximo de 0,85 L/s/m e um mínimo de 0,038 L/s/m.

✓ A distribuição das profundidades dos poços tubulares tratados regionalmente para o número total de amostras mostra que 33%, dos poços se inserem entre o intervalo de 60 a 90 metros e que 67 % dos poços foram perfurados acima de 100 metros. Verificam-se ainda um valor máximo de 130 metros e um valor mínimo de 60 metros, tendo como valor médio 99 metros.

✓ Também na Tabela 1, após os devidos estudos a partir de critérios hidrogeológicos, foram sugeridos pontos para futuras perfurações de poços,

Tabela 1- Planilha de Informações dos Poços. Fonte: Autores, 2022.

Código (poço)	Coord. Poços Perfurados UTM 23S		Profundidade (m)	Vazão (m³/h)	Nível Dinâmico (m)	Nível Estático (m)	Rebaixamento (m)	Vazão Específica (m³/h/m)	Filtros (m)	Coord. Pontos Sugeridos por Critérios Hidrogeológicos	
	W	S								W	S
P-01	718976,88	7700905,25	100,00	4,00	60,80	7,34	53,46	0,0748	Sem informação	719300,15	7700823,30
P-02	721720,34	7697427,46	120,00	6,00	52,00	6,80	45,20	0,1327	2,00 a 19,96	721589,82	7697543,69
P-03	722274,82	7709233,02	120,00	6,50	72,15	5,66	66,49	0,0977	Sem informação	722210,10	7709031,80
P-04	722060,28	7709478,52	100,00	4,60	59,00	8,13	50,87	0,0904	Sem informação	722210,10	7709031,80
P-05	720338,30	7700642,03	80,00	5,50	71,45	7,12	64,33	0,0854	Sem informação	720358,05	7700764,39
P-06	720678,18	7701042,62	100,00	3,27	55,50	8,00	47,50	0,0688	40,00 a 42,00	720912,52	7701200,13
P-07	720650,05	7700881,71	120,00	3,30	88,55	1,40	87,15	0,0379	Sem informação	720912,52	7701200,13
P-08	719080,01	7704050,14	102,00	4,63	56,40	8,00	48,40	0,0957	Sem informação	719080,00	7704050,14
P-09	719060,02	7703455,10	130,00	6,49	77,39	8,45	68,94	0,0941	30,50 a 33,00	719060,017	7703455,10
P-10	720873,37	7701048,70	100,00	4,50	49,90	6,76	43,14	0,1043	Sem informação	720912,52	7701200,13
P-11	725479,15	7708364,13	80,00	6,00	27,70	10,00	17,70	0,3390	Sem informação	725479,14	7708364,13
P-12	717867,99	7708646,50	80,00	5,20	43,76	5,12	38,64	0,1345	Sem informação	717999,29	7708391,34
P-13	715956,68	7712894,12	60,00	8,56	18,90	2,00	16,90	0,5070	Sem informação	715956,68	7712894,12
P-14	724618,58	7700794,12	100,00	6,00	55,00	4,80	50,20	0,1195	Sem informação	724608,98	7700619,47
P-15	720856,31	7701082,13	120,00	4,20	62,30	3,72	58,58	0,0717	23,00 a 25,50	720912,52	7701200,13
P-16	721140,63	7700688,67	120,00	5,00	64,92	6,80	58,12	0,0860	Sem informação	721140,63	7700688,67
P-17	731075,72	7703926,66	120,00	5,60	68,45	3,92	64,53	0,0867	Sem informação	730016,86	7700688,70
P-18	730754,65	7704043,05	80,00	2,80	54,50	0,40	54,10	0,0518	24,40 a 29,12	730016,86	7703698,34
P-19	726494,23	7703832,64	80,00	10,90	36,76	3,69	33,07	0,3296	17,00 a 19,40 / 25,20 a 27,60 / 33,60 a 36,00	725630,80	7703760,25
P-20	726422,56	7703976,99	80,00	15,00	22,25	4,64	17,61	0,8518	47,60 a 49,94 / 53,60 a 58,28	725630,80	7703760,25
P-21	726244,22	7703606,90	100,00	5,60	51,80	4,10	47,70	0,1174	Sem informação	725630,80	7703760,25

A distribuição dos poços mostra heterogeneidade espacial, não por mera casualidade, já que é influenciada por quatro fatores: em primeiro lugar, é natural a existência de um maior número de poços em áreas de maior disponibilidade hídrica subterrânea. Em segundo lugar a existência da demanda já instalada para as águas subterrâneas em decorrência das características das atividades econômicas predominantes em cada região. Em

terceiro lugar, a perfuração de poços seria uma alternativa para locais onde as águas superficiais são mais escassas ou de maior custo. Por último, uma maior dificuldade na obtenção de informações em decorrência do grau de organização e arquivamento dos registros das entidades públicas ou privadas. A densidade de poços foi considerada satisfatória, com a média de 7 poços por cem quilômetros quadrados, Figuras 3 e 4.

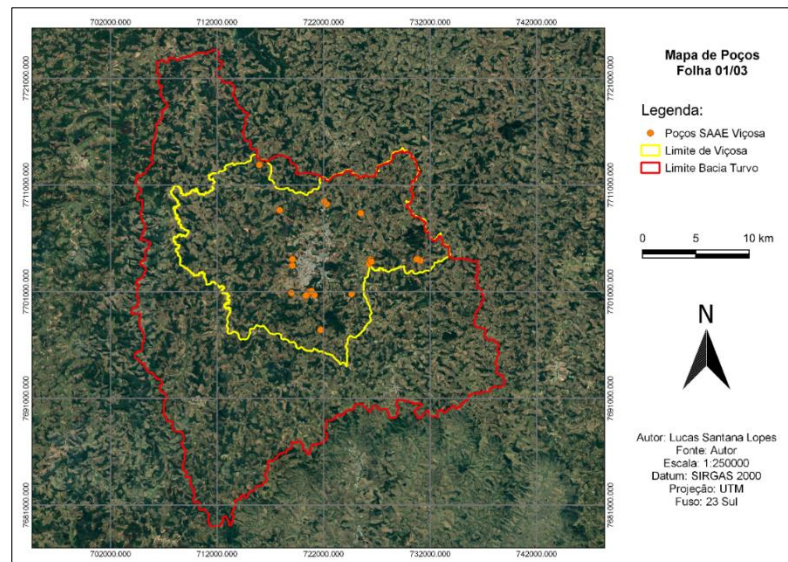


Figura 3 - Mapa de Localização dos Poços. Fonte: Autores, 2021.

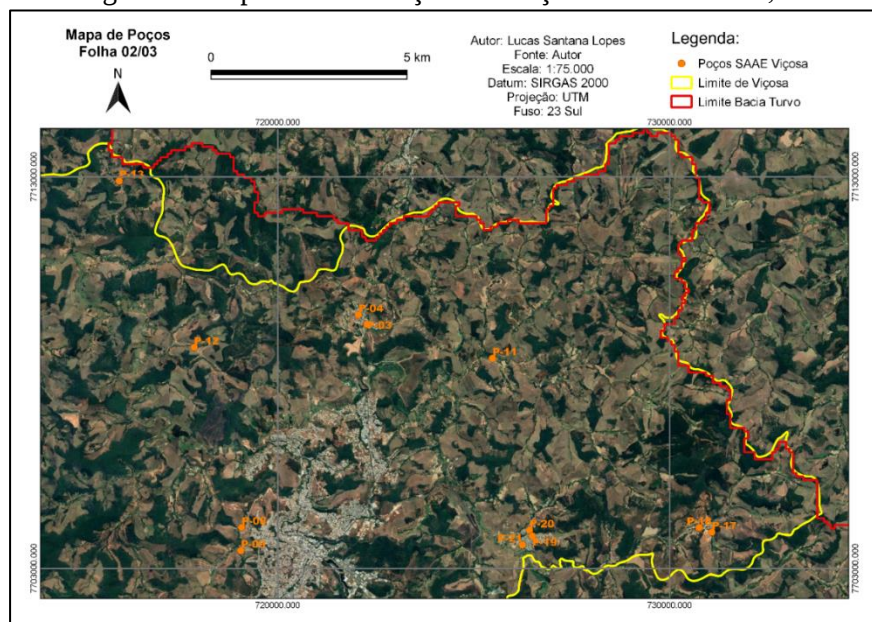


Figura 4 - Mapa de Localização dos Poços. Fonte: Autores, 2021.

O Mapa de Drenagem para a bacia do Rio Turvo como um todo. Para este estudo o propósito também é auxiliar na identificação e visualização do território, mas com foco nos recursos hídricos

superficiais. Interessante comentar que a Oeste, em uma grande extensão territorial, o Rio Turvo Limpo coincide com o limite do município de Viçosa ao norte e leste, em determinado trecho, o

limite da Bacia (divisor de água) também coincide com o limite do município de Viçosa. O Ribeirão São Bartolomeu, Rio Turvo Sujo e Rio Turvo Limpo foram destacados na hidrografia do mapa elaborado. Estes são importantes recursos da área de estudo. A ETA I do SAAE Viçosa utiliza o

Ribeirão São Bartolomeu para captação de água superficial. A ETA II do SAAE Viçosa utiliza o Rio Turvo Sujo para captação de água superficial. Já o Rio Turvo Limpo é o manancial escolhido para possível implantação da ETA III, conforme explanado anteriormente (SAAE VIÇOSA, 2015).

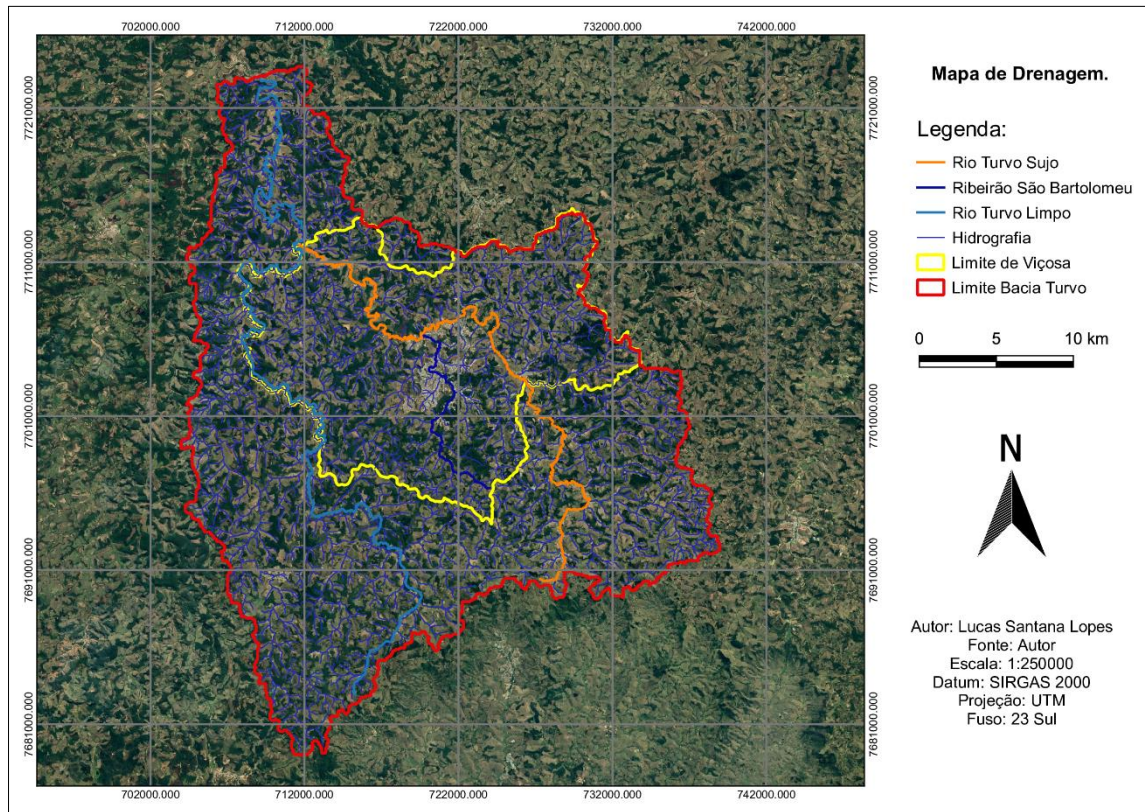


Figura 5 - Mapa de Drenagem. Fonte: Autores, 2021.

A área de estudo apresenta rochas referentes ao período Pré-Cambriano inferior ou Indiviso, compreendendo gnaisses e migmatitos diversos. Sedimentos quaternários ocorrem ao longo dos vales, constituindo depósitos aluvionares de caráter argiloso, argilo-arenoso, representados por terraços e leitos maiores de deposição mais recente (RADAMBRASIL, 1983). A geologia da microrregião de Viçosa situa-se no Complexo Mantiqueira, composta por rochas do Embasamento Granito-Gnáissico indiviso, referentes ao período Pré-Cambriano. São constituídas de gnaisses moderadamente indiferenciados e bastantes alterados, apresentam níveis quartzosos intercalados a níveis micáceos e a presença de intrusões de rocha metabásica às

vezes concordantes ou discordantes com a foliação da rocha local (Vieira, 2000).

A maior parte da bacia está inserida no Complexo Mantiqueira, com uma pequena porção ao norte inserida no Grupo Dom Silvério e áreas menores espalhadas pelo terreno inseridas nas outras camadas. O município de Viçosa está totalmente inserido no complexo Mantiqueira e sua subdivisão Unidade Mantiqueira, ortoanfibolito e ortognaisse. Esta segunda ocupa pequenas áreas ao leste e nordeste do município, sendo quase a totalidade do município ocupada pela primeira. Todos os poços estão localados na área da camada do Complexo Mantiqueira, motivo pelo qual não há dados sobre como se comportam as vazões em relação à litologia, Figura 6 (CPRM, 2011).

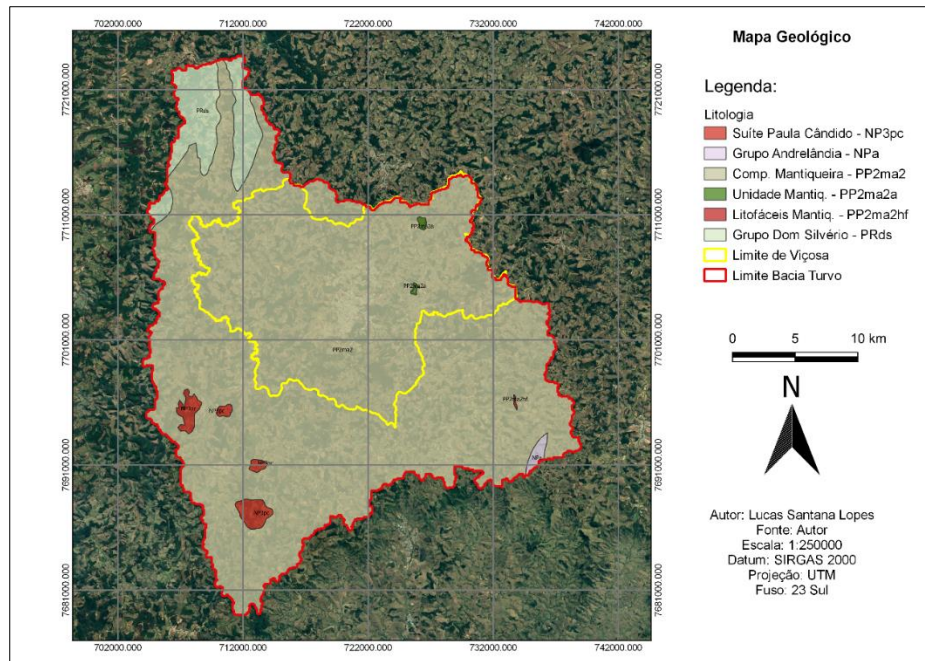


Figura 6 - Mapa Geológico. Fonte: Autores, 2021.

Ao se considerar o ambiente hidrogeológico da área de estudo, identificam-se duas categorias de sistemas aquíferos: um meio granular, caracterizado por depósitos aluvionares, e um meio fissural, representado por rochas cristalinas de diversas unidades litológicas. Em relação ao aquífero fissural adotou-se uma entidade espacial,

caracterizada por um tipo predominante e bem definido de rocha reservatório, associada a uma unidade geológica regional específica. As relações entre os sistemas aquíferos e as unidades geológicas associadas, como os tipos de rochas dominantes, constam na Tabela 2.

Tabela 2: Sistemas Aquíferos da área de estudo.

Sistemas Aquíferos	Litologia Predominante e Unidades Geológicas
Meio Granular	
Aluvial	Areias de depósitos aluviais – Quaternário
Coberturas Detríticas e Manto de Alteração	Areias, Siltes e Argilas – Terciário-Quaternário
Meio Fissural	
Rochas da Associação Xistos-Gnaisses-Migmatitos (Rochas metamórficas não orientadas)	Diques, Veios Pegmatíticos (Suíte Paula Cândido); Paragneisses, migmatitos (Grupo Andrelândia); Anfibólio-biotita ortogneisses (Complexo Mantiqueira); Biotita xisto, mica xisto, granada-biotita xisto, cianita-grafita-mica-quartzo xisto, grafita-mica xisto (Grupo Dom Silvério)

Meio Granular:

Aquíferos em Sedimentos Aluviais - que podem atingir até 15 metros de espessura, encontrados ao longo da rede de drenagem, nos canais fluviais, nas planícies de inundação e nos terraços aluviais.

Aquíferos em Coberturas Detríticas e Mantos de Alteração - esse sistema constitui os aquíferos superficiais associados ao manto de alteração das rochas (saprólitos, elúvios e colúvios) e aos depósitos detríticos de cobertura do Terciário-

Quaternário. Os mantos de alteração das rochas não estão representados no mapa geológico ou de sistemas aquíferos por limitação de escala do mapeamento, entretanto, ocorrem de modo generalizado se constituindo numa importante fonte de recarga das rochas fraturadas subjacentes, pois atua como um meio de captação da água precipitada em toda a superfície permeável (ou semi-permeável), diminuindo a perda por escoamento e minimizando o processo de evaporação. Sua mineralogia e espessura são muito

variáveis e guardam íntima relação com a litologia de origem e as condições climáticas atuantes.

Meio Fissural:

Para o meio fissural, as informações reunidas e tratadas regionalmente vieram indicar que os fatores mais determinantes e que influenciam quantitativa e qualitativamente nas águas subterrâneas dos domínios hidrogeológicos são o condicionamento estrutural e litológicos derivados.

O meio aquífero fissural é caracterizado pela ausência ou presença muito reduzida de espaços vazios na rocha. Nesse aquífero, a água se encontra em espaços representados por fissuras ou fraturas, juntas ou ainda em falhas, ocorrendo ainda em situações esporádicas, em vesículas.

Os principais fatores atuantes considerados no estudo de caracterização do meio fissural e que controlam os mecanismos de infiltração, percolação, armazenamento d'água e qualidade são: clima, relevo, hidrografia, coberturas (sedimentares, detríticas, manto de alteração), constituição litológica e estruturas (Fernandes et al., 2005; Gonçalves et al., 2005). Sendo assim, para toda a área estudada, entende-se que, através de uma ótica regionalizada, com exceção dos condicionantes estruturais associados às litologias, todos os outros fatores atuaram de forma geralmente constante, influenciando de maneira homogênea o meio aquífero fissural (Ameli e Craig, 2018).

Na área estudada, predominantemente constituída de rochas cristalinas de baixa permeabilidade primária, existem dois aquíferos de comportamentos bastante distintos: um mais superficial, formado na maioria das vezes pelo regolito intemperizado e/ou depósitos quaternários de comportamento de meio granular e um mais profundo, formado por fraturas de rocha sã. O primeiro é regional e extenso, dando contornos à superfície do relevo. O segundo, subjacente, em geral, apresenta maior condutividade hidráulica e pode atingir profundidades grandes. Nesse domínio, os aquíferos são fraturados, locais, descontínuos, livres e semiconfinados, restritos a juntas e fraturas, sendo recobertos pela ocorrência de aluviões e coberturas indiferenciadas, os quais não foram representados na Figura 6, por limitações de escala.

A Figura 7, mostra o Mapa de Lineamento para a bacia do Rio Turvo. Alguns poços, tais quais os de código final 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 14, 15, 16, 17 e 18 estão próximos às feições de lineamento,

entretanto em nenhum caso há coincidência exata com a coordenada da locação com a feição de lineamento adquirida da base de dados do CPRM. O poço mais próximo é o de código final 15, que possui vazão baixa se comparando com outros estudados.

Os lineamentos estruturais da área de estudo foram abordados a partir da análise de estruturas em escala macroscópica num contexto regional e através de trabalhos de detalhe. Para que essas considerações tivessem consistência, certificou-se em campo de que todos os poços cadastrados se encontram locados em condições similares para fins de uma análise detalhada, ou seja, independentemente do tipo de rocha, na melhor situação morfológica, ou seja, em depressões geralmente de bacias hidrográficas, os poços localizados em topos de elevações, divisores hidrográficos, flancos de colinas ou vertentes dos vales (Costa, 1998).

Uma densa malha de fraturas, associada às coberturas de alteração e aluviais, constitui um sistema aquífero livre onde a topografia passa a ser o principal fator responsável pela circulação das águas (Devlin, 2020; Fahrmeier et al., 2021). A recarga da unidade aquífera tem na rede de drenagem superficial e nas chuvas, os maiores contribuintes, sendo mais eficiente nas áreas onde o controle estrutural da drenagem se dá através das fraturas, que permitem uma contínua realimentação por meio das aluviões, principalmente durante o período das chuvas. Em escala regional, a Folha Viçosa exibe três domínios estruturais: i) domínio de colinas policonvexas; ii) depressão de Ubá; iii) e o feixe de lineamentos de Abre Campo. Nos dois primeiros domínios predominam estruturas horizontalizadas ou com baixo ângulo de mergulho. Rumo a oeste entra-se no domínio da Zona de Cisalhamento de Abre Campo, uma complexa faixa de cisalhamento que ocupa grande parte da Folha Viçosa, apresentando continuidade nas articulações vizinhas norte, sul e oeste. Este domínio é marcado por forte cisalhamento transpressivo e verticalização das estruturas dúcteis, (Noce et al., 2003; Alkmim et al., 2007)

De acordo com Noce et al. (2003), na porção oeste da Folha Viçosa, ocorre uma feição da tectônica distensiva denominada com direção NE-SW. As fraturas possuem direções dispersas, usualmente com mergulhos altos e não raramente verticais, com espaçamentos milimétricos a dessimétricos. A despeito desta dispersão, direções preferenciais foram identificadas segundo NE, NW

e WNW. O processo de fraturamento na região se comportou de maneira homogênea. Entretanto as fraturas são mais frequentes em porções de granulação mais fina, melanocráticas e/ou máficas. Durante o Mesozóico-Cenozóico, ocorreu uma tectônica distensiva gerando estruturas rúpteis (fraturas) visíveis, tendo uma direção preferencial NE-SW, com uma família secundária de direção NWSE, (Noce et al., (2003).

Segundo o mapa de lineamento e estudos preliminares de campo, chegou-se à conclusão de que os sistemas de fraturas fazem parte de um sistema de cisalhamento de distensão, possivelmente relacionadas a eventos do Mesozóico-Cenozóico. As fraturas de direção NE-SW foram consideradas as fraturas com maior

potencial hidrogeológico já que elas são abertas em decorrência a um esforço tectônico distensivo.

As estruturas neotectônicas e as feições morfotectônicas locais identificadas concordam com o campo das feições regionais, influenciando bastante no potencial da vazão dos aquíferos fissurais, principalmente quando as fraturas são abertas como reflexo de reativações extensionais.

As correlações concordantes entre as feições morfológicas e as zonas de fraturas já existentes não necessariamente produzirão poços com altas vazões, são ótimos indicativos e importantes critérios para locações de poços, principalmente se a eles forem acrescentados outros critérios (Gonçalves et al., 2005; Pires et al, 2021; Previati e Crosta, 2021).

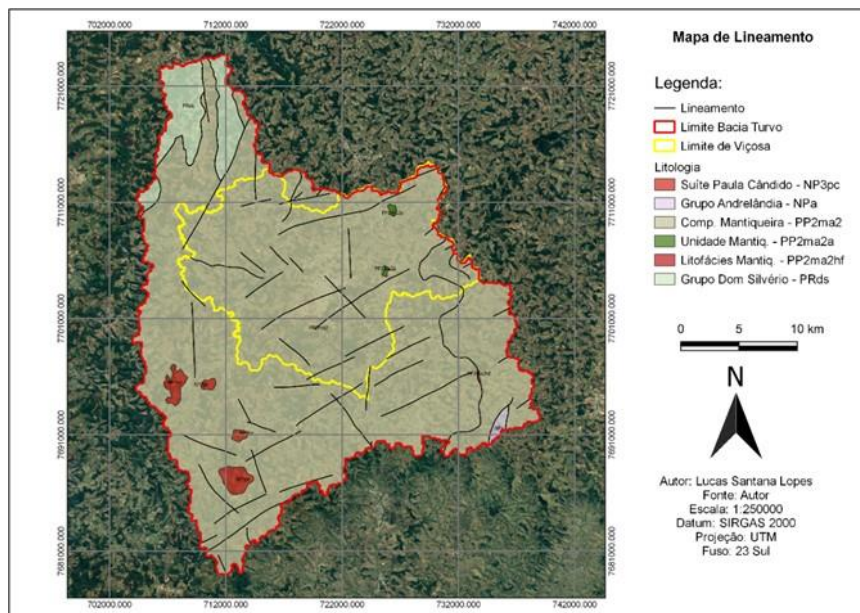


Figura 7 - Mapa de Lineamentos. Fonte: Autores, 2021.

A Figura 8, apresenta o resultado elaborado a partir da integração das áreas temáticas desenvolvidas para toda a área de estudo e os atributos mais relevantes para o trabalho proposto. O mapa mostra os limites da Bacia do Rio Turvo, os limites do município de Viçosa, a localização dos poços, o Ribeirão São Bartolomeu, o Rio Turvo Sujo e Rio Turvo Limpo, o contexto geológico e os lineamentos estruturais identificados. A menor vazão registrada pelos poços foi de 2,8 m³/h, a maior vazão é de 15 m³/h e a média foi de

5,89 m³/h. A partir da integração das informações, foi observado que as vazões dos poços não possuem uma correlação com as litologias e com os lineamentos existentes na área de estudo.

A menor vazão registrada pelos poços foi de 2,8 m³/h, a maior vazão é de 15 m³/h e a média foi de 5,89 m³/h. A partir da integração das informações, foi observado que as vazões dos poços não possuem uma correlação com as litologias e com os lineamentos existentes na área de estudo.

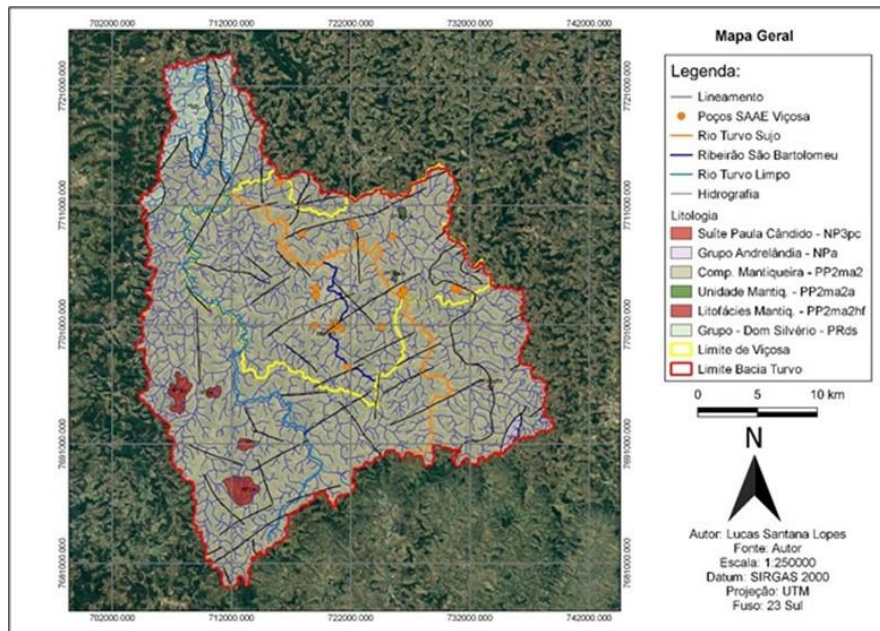


Figura 8 - Mapa de Temas Integrados. Fonte: Autores, 2021

As melhores vazões foram identificadas nos poços que estão locados em áreas mais favoráveis do ponto vista geológico local, bem como a existência de filtros na coluna de revestimentos na estrutura do poço para captação de águas subsuperficiais (Fernandes, 2008; Fahrmeier et al., 2022). Daí é importante citar que a utilização de filtros deve ser utilizada com critério, já que nesse caso há o risco de contaminação. O ideal é utilizar os filtros em regiões que permitam uma estrutura de preservação ao entorno do poço, minimizando os riscos de contaminação. Neste caso, políticas de uso e ocupação do solo são essenciais para a segurança hídrica (Witt et al., 2021).

A grande maioria dos poços não foi locada em campo com critérios geológicos e sim com critérios de proximidade da via de acesso, proximidade da energia elétrica ou em local disponível/doado para tal. Durante as visitas de campo, foi possível observar que há regiões específicas onde não há nenhum poço e que do ponto de vista geológico são áreas com grande potencial para se obter poços com boas vazões. Este ponto é a jusante do encontro do Rio Turvo Sujo e o Ribeirão São Bartolomeu, onde há o encontro de grandes vales e acúmulo significativo de vazões dos recursos hídricos. Tal área fica situada já na saída da sede urbana, em direção à cidade de Porto Firme. Inclusive por estar dentro da área urbana, tem uma localização privilegiada, próximo as mais importantes estruturas de distribuição de água da

companhia local. Ademais, nessa região há locais ainda preservados ao longo das margens dos recursos hídricos superficiais, viabilizando uma possível seleção de área que alinhe critérios geológicos, de proximidade, inseridos a estrutura urbana e com possibilidade de preservação do ambiente, permitindo a segurança hídrica.

Locando poços seguindo critérios geológicos, variando a profundidade e utilizando filtros, é muito provável que se consiga vazões acima de 10 m³/h, sendo este valor conservador. Atualmente já existem poços com vazões próximas e superiores e que foram locados sem seguir tais critérios. A companhia local de saneamento trabalha com o valor de 100 l/s (ou 360 m³/h) para a fonte de abastecimento necessária a equalização do sistema de abastecimento no curto e médio prazo. Com poços de vazão 10 m³/h, seriam precisos a quantidade de 36 poços para o atendimento. Do ponto de vista econômico, para uma profundidade de 150 metros, com um valor médio de R\$ 750,00/m para a execução completa, cada poço custa em média R\$ 112.500,00. Daí 36 poços somariam um montante de R\$ 4.050.000,00. Esses valores são muito conservadores e retratam o cenário com enorme folga, já que um quantitativo maior de serviço oferece maior rendimento e aproveitamento de recursos, com consequente redução de custos. Ademais, em caso de melhores vazões a quantidade e profundidade dos poços também seriam reduzidas, o que impactaria na redução do custo.

Conclusão

O município de Viçosa não possui em sua área urbana ou rural um manancial superficial com vazões que possibilitem a expansão da captação a fim de atender às projeções de consumo e a segurança hídrica. Por isso as águas subterrâneas são uma alternativa real e exequível, principalmente devido às vantagens econômicas.

As águas subterrâneas captadas de poços profundos geralmente dispensam o uso de tratamentos complexos, de forma que os custos nestes sistemas se resumem aos custos de consumo de energia. Ademais, esta fonte pode se encontrar em áreas mais próximas ao local que se pretende abastecer, pois em quase todo território há existência de água subterrânea, variando sua disponibilidade com a profundidade.

Os resultados desta pesquisa apontam a existência de área onde o abastecimento por bateria de poços pode ser amplamente vantajoso do ponto de vista financeiro, o que resulta em melhores condições para o usuário final.

Portanto, que este estudo sirva de ponto de partida para outras pesquisas de detalhe, indicando regiões alvos de maior favorabilidade para a captação de água subterrânea como alternativa viável de utilização para o abastecimento urbano, em localidade próxima ao centro urbano e mais próximo que o atual manancial superficial pretendido para captação de água bruta.

Os aquíferos fissurais representam uma das mais difíceis questões da hidrogeologia, por se tratar de aquíferos anisotrópicos e heterogêneos, configurados através de tramas de fratura (Fang et al., 2019; Lachassagne et al., 2021). Diante disso, a locação de um poço constitui uma tarefa complexa, devido aos vários fatores que influenciam na potencialidade hídrica das rochas cristalinas fraturadas. Ou seja, por melhores que sejam as evidências superficiais, não se pode garantir que uma locação implicará em um poço de boa vazão.

Diante disso, a locação de um poço constitui uma tarefa complexa, devido aos vários fatores que influenciam na potencialidade hídrica

das rochas cristalinas fraturadas. Ou seja, por melhores que sejam as evidências superficiais, não se pode garantir que um poço obterá uma boa vazão. Sendo assim, um dos desafios da hidrogeologia, em regiões assentadas em terrenos de rochas cristalinas, é melhorar os índices de sucessos das locações dos poços, identificando previamente zonas fraturadas potencialmente produtoras de água (Misstear et al., 2023; Maier et al., 2022).

As rochas cristalinas são caracterizadas pela reduzida ou inexistência de porosidade intergranular (porosidade primária) e o único meio de infiltração, percolação e acúmulo de água é através das zonas de falhas e/ou fraturas (Fahrmeier et al., 2022; Houben et al., 2022). O município de Viçosa é composto predominantemente por rochas cristalinas e sobre esse substrato ocorrem as coberturas detríticas indiferenciadas e aluvionares. A locação de poços nesse ambiente requer uma análise integrada de vários critérios: formas de relevo, manto de alteração, vegetação, hidrografia e, principalmente, a análise das descontinuidades (fraturas/falhas), (Adamson et al., 2021; Barthel et al., 2021).

Com a crescente importância da água subterrânea como reserva estratégica, muitos poços estão sendo construídos visando à captação de água nesse município. O grande problema é a falta de critérios técnicos durante a locação do poço, levando muitas vezes a construção de poços com baixa vazão ou, até mesmo, poços secos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradecemos também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Agência Nacional de Águas (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2017.

Agência Nacional de Águas (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2020.

Referências

Adamson, J.K., LaVanchy, G.T., Stone, B., 2021. Geological and hydrogeological assessment of the Brito Formation: Município de Tola, Nicaragua. *Hydrogeology Journal* 29, 2285-2304. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02360-w>

- Agência Nacional de Águas (ANA). Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil: 2012/Agência Nacional de Águas - Brasília: ANA, 2012.
- Águas doces no Brasil. Escrituras Editora, São Paulo, 3ª edição, p. 111-114.
- Ajjur, S. B., Mogheir, Y. K., 2020. Identification of intrinsic suitable sites in Gaza Strip for the application of artificial groundwater recharge using a geographic information system multicriteria decision analysis. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 27, 255-265. <https://doi.org/10.1002/mcda.1701>.
- Alkmim, F. F., Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Cruz, S. C. P., 2007. Sobre a evolução tectônica do Orógeno Araçuai-Congo Ocidental. *Geonomos* 15, 25-43. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v15i1.105>
- Ameli, A. A., Craig, J. R., 2018. Semi-analytical 3D solution for assessing radial collector well pumping impacts on groundwater-surface water interaction. *Hydrology Research* 49, 17-26.
- Anand, B., Karunanidhi, D., Subramani, T., Srinivasamoorthy, K., Suresh, M., 2019. Long-term trend detection and spatiotemporal analysis of groundwater levels using GIS techniques in lower Bhavani River basin, Tamil Nadu, India. *Environment, Development and Sustainability* 22, 2779-2800.
- Barthel, R., Haaf, E., Giese, M., 2021. Similarity-based approaches in hydrogeology: proposal of a new concept for data-scarce groundwater resource characterization and prediction. *Hydrogeology Journal* 29, 1693-1709. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02358-4>
- Bertolo, R., Hirata, R., Conicelli, B., Simonato, M., Pinhatti, A., Fernandes, A. 2015. Água subterrânea para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo: é possível utilizá-la em larga escala? *Revista DAE* 199, 06-17.
- Bonilla, V. J. P., Stefan, C., Palma Nava, A., Bernardo da Silva, E., Pivaral Vivar, H. L., 2018. Inventory of managed aquifer recharge schemes in Latin America and the Caribbean. *Sustainable Water Resources Management* 4, 163-178.
- BRASIL. 1997. Lei Federal nº 9.433/1997 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília, Distrito Federal: Diário Oficial da União.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Folha Viçosa, SE.23-X-B-V. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Brasília. 2011. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17798>
- Costa, W. D., 1998. Avaliação de reservas, potencialidade e disponibilidade de aquíferos. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (ANAIS), São Paulo.
- Devlin, J. F., 2020. Groundwater velocity. The Groundwater Project, Guelph, ON.
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., Van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., Shamrukh, M., Pavelic, P., Murray, E., Ross, A., Bonilla, V. J. P., Palma Nava, A., Ansems, N., Posavec, K., Há, K., Martin, R., Sapiano, M., 2019. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal* 27, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>
- Emmanouil, A., Varouchakis, E. K., Ioannis, T., Gerald, A., George, P. K., 2022. An integrated method to study and plan aquifer recharge. *Hydrology Research* 53, 1-20. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.054>
- Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N., 2022. A novel probe for point injections in groundwater monitoring wells. *Hydrogeology Journal* 30, 1021-1029. <http://doi.org/10.1007/s10040-022-02477-6>
- Fahrmeier, N., Goeppert, N., Goldscheider, N., 2021. Comparative application and optimization of different single-borehole dilution test techniques. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02271-2>
- Fang, C., Sun, S., Jia, S., Li, Y., 2019. Groundwater level analysis using Regional Kendall test for trend with spatial autocorrelation. *Groundwater* 57, 320-328. <https://doi.org/10.1111/gwat.12800>.
- Fathi, S., Hagen, J. S., Haidari, A. H., 2020. Synthesizing existing frameworks to identify the potential for Managed Aquifer Recharge in a karstic and semi-arid region using GIS Multi Criteria Decision Analysis. *Groundwater for Sustainable Development* 11, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100390>.
- Fernandes, A. J., 2008. Aquíferos Fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos

- métodos de investigação. In: Revista do Instituto Geológico 29, 49-72.
- Fernandes, A. J., Perrota, M., Salvador, E., Azevedo, S., Gimenez Filho, A. Stefani, F., Paulon, N., 2005. Aquíferos Fraturados. In: G. Rocha, A.J. Fernandes, M. Mancuso (ed.) Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Nota explicativa. DAEE/IG/ CPRM/IPT, p. 66-84.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Final evaluation of the Groundwater Governance: a global framework for action. 2016. Roma.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 2017. Água Subterrânea. São Paulo: Instituto Água Sustentável, 2017. Traduzido de Groundwater.
- Gonçalves, J. A. C., Pereira, P. H. R., Vieira, E. M., 2020. Evaluation of the groundwater recharge potential using GIS multi-criteria data analysis: a case study from district of Itabira, Minas Gerais, southeastern Brazil. *Ciência e Natura* 42. <https://doi.org/10.5902/2179460X40433>.
- Gonçalves, J. A. C., Scudino, P. C. B., Sobreira, F. G. 2005. Reservas renováveis e caracterização dos aquíferos fissurais do Leste da Zona da Mata de Minas Gerais e adjacências. *Geologia USP Série Científica* 5, 19-27. <http://dx.doi.org/10.5327/S1519-874X2005000100002>
- Halder, S., Roy, M. B., Roy, P. K., 2020. Analysis of groundwater level trend and groundwater drought using Standard Groundwater Level Index: a case study of an eastern river basin of West Bengal, India. *SN Applied Sciences* 2, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2302-6>.
- Houben, G.J., Collins, S., Bakker, M., 2022. Review: Horizontal, directionally drilled and radial collector wells. *Hydrogeology Journal* 30, 329-357. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02425-w>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Base Hidrográfica, IBGE.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016. Base de dados, IBGE.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2020. Relatório técnico do período chuvoso 2019-2020 / Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2021. Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers-guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeology Journal* 29, 2561-2594. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02339-7>
- Lasagna, M., Mancini, S., De Luca, D. A., 2020. Groundwater hydrodynamic behaviours based on water table levels to identify natural and anthropic controlling factors in the Piedmont Plain (Italy). *Science of the Total Environment* 716, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137051>
- Maier, R., Leven, C., Sánchez-León, E. Strasser, D., Maximilian Stoll, M., Cirpka, O.A., 2022. Revealing vertical aquifer heterogeneity and hydraulic anisotropy by pumping partially penetrating wells. *Hydrogeology Journal* 30, 463-477. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02458-9>
- Maier, R., Leven, C., Sánchez-León, E., Strasser, D., Stoll, M., Cirpka, O. A., 2022. Revealing vertical aquifer heterogeneity and hydraulic anisotropy by pumping partially penetrating wells. *Hydrogeology Journal* 30, 463-477. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02458-9>
- Missteat, B., Vargas, C.R., Lapworth, D., 2023. A global perspective on assessing groundwater quality. *Hydrogeology Journal* 31, 11-14. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02461-0>
- Naves, A., Samper, J., Pisani, B., 2021. Hydrogeology and groundwater management in a coastal granitic area with steep slopes in Galicia (Spain). *Hydrogeology Journal* 29, 2655-2669. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02349-5>
- Noce, C. M., Romano, A. W., Pinheiro, C. M., Mol, V. S., Pedrosa-Soares, A. C., 2003. Geologia das Folhas Ubá e Muriaé. In: A.C. Pedrosa-Soares, C.M. Noce, R. Trouw, M. Heilbron. Projeto Sul de Minas – Etapa I: Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro. COMIG/UFMG/UFRJ/UERJ, Belo Horizonte, cap.12, p.623-659.
- Pardo-Igúzquiza, E., Dowd, P.A., Luque-Espinar, J.A., 2023. Increasing knowledge of the transmissivity field of a detrital aquifer by geostatistical merging of different sources of information. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02644-3>
- Pauloo, R. A., Escrivá-Bou, A., Dahlke, H., Fencel, A., Guillon, H., Fogg, G. E., 2020. Domestic well vulnerability to drought duration and unsustainable groundwater management in California's central Valley. *Environmental Research Letters* 15, 1-14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f10>.

- Petitta, M., Kreamer, D., Davey, I., 2023. Topical Collection: International Year of Groundwater-managing future societal and environmental challenges. *Hydrogeology Journal* 31, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02587-1>
- Pires, C.A., Athayde, G.B., de Souza Filho, O.A., 2021. Litho-structural conditioning in the exploration of fractured aquifers: a case study in the Crystalline Basement Aquifer System of Brazil. *Hydrogeology Journal* 29, 1657-1678. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02312-4>
- Previati, A., Crosta, G.B., 2021. Characterization of the subsurface urban heat island and its sources in the Milan city area, Italy. *Hydrogeology Journal* 29, 2487-2500. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02387-z>
- Radambrasil. 1983. Levantamento de recursos naturais. Rio de Janeiro: Projeto Radambrasil, v. 32, 767 p.
- Rebouças, A. C., 2002. A política nacional de recursos hídricos e as águas subterrâneas. *Revista Águas Subterrâneas* nº. 16.
- Rebouças, A. C., 2006. Águas Subterrâneas. In Rebouças, A.C.; Braga, B., Tundisi, J.G. (org.). SAAE VIÇOSA-MG. Serviço de águas e Esgoto de Viçosa, 2015. Plano Municipal de Saneamento Básico. Viçosa, Minas Gerais, 321 p. Disponível em: <http://www.saaevicosa.mg.gov.br/images/plano-municipal-de-saneamento-basico-2015.pdf>.
- Stigter, T.Y., Miller, J., Chen, J., 2023. Groundwater and climate change: threats and opportunities. *Hydrogeology Journal* 31, 7-10. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02554-w>
- Tong, X., Illman, W.A., Berg, S.J., 2021. Hydraulic tomography analysis of municipal-well operation data with geology-based groundwater models. *Hydrogeology Journal* 29, 1979-1997. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02320-4>
- Tzoraki, O., Dokou, Z., Christodoulou, G., Gaganis, P., Karatzas, G., 2018. Assessing the efficiency of a coastal managed aquifer recharge (MAR) system in Cyprus. *Science of the Total Environment* 626, 875-886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.160>
- Van Der Gun, J., 2012. Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. ISBN 978-92-3-001049-2 Paris: UNESCO.
- Vieira, V., 2000. Caracterização preliminar do risco geológico da área urbana de Viçosa - MG. Viçosa: UFV, 2000. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Viçosa.
- Witt, L., Müller, M.J., Gröschke, M., Vincent E. A., 2021. Experimental observations of aquifer storage and recovery in brackish aquifers using multiple partially penetrating wells. *Hydrogeology Journal* 29, 1733-1748. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02347-7>
- Wu, S., Fiaz, H., Yuan-Chien, Lin., Tzu-Yu, Y., Kai-Chun, Yu., 2021. Characterization of Regional Groundwater System Based on Aquifer Response to Recharge–Discharge Phenomenon and Hierarchical Clustering Analysis. *Water* 13, 15-21. <https://doi.org/10.3390/w13182535>
- Zhang, H., Xu, Y., Kanyerere, T., 2020. A review of the managed aquifer recharge: historical development, current situation and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 118-119. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102887>
- Zhao, Z., Illman, W. A., 2018. Three-dimensional imaging of aquifer and aquitard heterogeneity via transient hydraulic tomography at a highly heterogeneous field site. *Journal of Hydrology* 559, 392-410.
- Zheng, Y., Vanderzalm, J., Hartog, N., 2023. The 21st century water quality challenges for managed aquifer recharge: towards a risk-based regulatory approach. *Hydrogeology Journal* 31, 31-34. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02543-z>