



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Comportamento Hidráulico do Aquífero Cárstico Lagoa do Jacaré e sua Relação com o Rio Verde Grande, Norte de Minas Gerais

Mateus Alfenas De Filippo

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPMTC-IGC, Laboratório de Estudos Hidrogeológicos – LEHID, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Paulo Galvão

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPMTC-IGC, Laboratório de Estudos Hidrogeológicos – LEHID, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Marília Carvalho de Melo

Universidade Vale do Rio Verde – UNINCOR, Avenida Castelo Branco, 82, Chácara das Rosas, Três Corações – MG, 37410-000, Brasil.

Artigo recebido em 18/09/2024 e aceito em 16/02/2025

RESUMO

Os aquíferos cársticos apresentam grande potencial hídrico, com a água circulando majoritariamente em redes de condutos heterogêneos e anisotrópicos. A interação aquífero-rio pode ser complexa, variando de influente, efluente ou até independente, dependendo da conexão e da dissolução do aquífero. Portanto, compreender essa dinâmica é fundamental, especialmente em regiões cársticas com escassez hídrica superficial. A bacia do Rio Verde Grande, norte de Minas Gerais, enfrenta períodos de escassez, onde há um importante empreendimento agropecuário que depende da água subterrânea extraída do Aquífero Cárstico Lagoa do Jacaré, este localizado ao lado do rio Verde Grande, principal rio da região. O objetivo do estudo foi avaliar a sustentabilidade hídrica subterrânea no que se refere a potenciais impactos no rio Verde Grande com foco nas seguintes questões: qual o comportamento desse aquífero frente à exploração de água subterrânea? Há conexão hidráulica entre o aquífero e o rio? Para tal, entre outubro de 2017 e junho de 2019, foram monitorados os níveis d'água e vazões de poços de bombeamento e do rio e de um riacho próximo. Foi realizado o balanço hídrico, mapas de superfícies potenciométricas e estimados os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero. Os resultados indicaram um comportamento resiliente do aquífero em relação aos bombeamentos dos poços e que não haveria conexão hidráulica direta com o rio Verde Grande na área estudada, contrariando a hipótese de impacto na disponibilidade hídrica do rio.

Palavras-chave: Hidrogeologia, gestão de recursos hídricos, carste, hidrologia.

Hydraulic Behavior of The Lagoa do Jacaré Karst Aquifer and its Relationship with the Verde Grande River, North of Minas Gerais

ABSTRACT

Karst aquifers have great water potential, with water predominantly circulating in heterogeneous and anisotropic conduit networks. The aquifer-river interaction may be complex, varying from influent, effluent, or even independent, depending on the connection and dissolution of the aquifer. Therefore, understanding this dynamic is fundamental, especially in karst regions with superficial water scarcity. The Verde Grande River basin, in the north of Minas Gerais, faces periods of scarcity, where there is an important agricultural enterprise that depends on groundwater extracted from the Lagoa do Jacaré Karst Aquifer, which is located next to the Verde Grande River, the main river in the region. The aim of the study was to assess the sustainability of groundwater in relation to potential impacts on the Verde Grande River, focusing on the following questions: what is the behavior of this aquifer under groundwater exploitation? Is there hydraulic connection between the aquifer and the river? To address this, between October 2017 and June 2019, groundwater levels in wells and discharge from pumping wells, the river, and a nearby stream were monitored. Additionally, a water balance, potentiometric surface maps, and hydrodynamic parameters of the aquifer were estimated. The results indicated a resilient behavior of the aquifer in relation to well pumping, with no direct hydraulic connection to the Verde Grande River in the studied area, contradicting the hypothesis of an impact on the river's water availability.

Keywords: Hydrogeology, water resources management, karst, hydrology.

Introdução

Aquíferos cársticos são conhecidos pela anisotropia, heterogeneidade e grande potencial hídrico que estão associados às descontinuidades geradas pela dissolução de rochas carbonáticas em seus planos de falhas e fraturas (porosidade terciária). Por esse motivo, apresentam ampla variabilidade de parâmetros hidráulicos, com diferenças de muitas ordens de magnitude, a depender da característica da rocha, porosidade ou direção de fluxo (Ford & Williams, 2007, Galvão et al. 2015, Filpi et al, 2023).

Outra característica dos aquíferos cársticos é a complexidade da relação hidráulica com corpos hídricos superficiais, cujo fluxo subterrâneo pode ocorrer em diferentes condições de porosidade (granular, fraturas ou condutos), onde o aquífero pode se comportar de maneira influente, efluente ou mesmo independente, desconectado de corpos hídricos da área (Feitosa et al., 2008).

Geralmente, em regiões cársticas bem desenvolvidas, as redes de drenagens superficiais tendem a ser menos presentes, pois feições geomorfológicas cársticas (cavernas, sumidouros, dolinas) desviam o fluxo superficial para condutos subterrâneos (Ford & Williams, 2007; Marques et al. 2024). Portanto, o conhecimento dessa relação é importante, sobretudo, em situações em que há grande exploração de água associada à escassez hídrica superficial ou conflito pelo uso de água (Goldscheider & Drew, 2007; Gomes et al., 2021; Carvalho et al. 2024).

O comportamento hidráulico de um aquífero cárstico em relação a um rio está diretamente relacionado às características geomorfológicas, geológicas e hidrodinâmicas do sistema (Barrie et al. 2022; Assunção et al. 2023; Marques et al. 2024). Sendo assim, é importante entender os fatores que atuam diretamente na interação aquífero-rio. A geologia e geomorfologia, por meio de feições cársticas, que conectam as zonas freáticas a condutos, ajudam no controle da troca entre águas superficial e subterrânea (Kan et al. 2024). Consequentemente, a hidrodinâmica é influenciada em relação à diferença de gradientes hidráulicos e permeabilidades (condutos grandes, poros mais conectados e fissuras) que influenciam localmente na interação aquífero-rio (Koit et al. 2022; Fatoni et al. 2024).

Estudos recentes internacionais sobre esse tema foram realizados por Saeedpanah e Azar (2023), que desenvolveram um modelo exato baseado na transformação de Laplace para calcular o fluxo de águas subterrâneas em sistemas rio-aquíferos. Pérez-Sánchez, et al. (2023), que estudaram a interação entre aquíferos cársticos e rios alogênicos, enquanto Barry-Sosa et al. (2024) verificaram as interações das

águas superficiais com as águas subterrâneas cársticas na biomassa microbiana.

No Brasil, estudos sobre conexões hidráulicas de corpos hídricos superficiais com aquíferos cársticos, especialmente associados aos calcários do Grupo Bambuí em Minas Gerais, podem ser citados, como Alves et. al (2021), Pacheco Neto et al. (2024) e Pereira et al. (2024). Esses trabalhos estudaram a relação entre aquíferos e reduções de volume d'água, respectivamente, em lagoas, no Parque Estadual do Sumidouro, Sete Lagoas e na Área de Proteção Ambiental Lagoa Santa. Todos os estudos indicam que o aumento da demanda hídrica impacta diretamente na dinâmica hidráulica entre aquíferos e lagoas, reduzindo o volume d'água e do espelho das lagoas.

A bacia do rio Verde Grande, assim como outras na região norte de Minas Gerais, passam por episódios de racionamento e conflitos pelo uso da água. Há uma demanda de abastecimento hídrico que, predominantemente, supera a oferta de água superficial em grande parte da bacia, assim como uma demanda maior de abastecimento por água subterrânea. Há um empreendimento de grande porte do setor agropecuário, cujo suprimento de água para abastecimento e irrigação é garantido principalmente pela exploração de água subterrânea em uma bateria de poços tubulares. Ainda que o recurso hídrico superficial seja escasso, a bateria explora um aquífero cárstico bem desenvolvido nos calcários da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí), de grande potencial hídrico, atestada por altas vazões dos poços.

Dessa forma, o objetivo principal desse trabalho é avaliar a sustentabilidade hídrica subterrânea no que se refere a potenciais impactos no rio Verde Grande com foco em dois questionamentos: qual o comportamento do aquífero cárstico frente à exploração de água subterrânea via bateria de poços, e há conexão hidráulica local entre esse aquífero e o rio Verde Grande? Para isso, foram avaliados dados sobre produção da bateria de poços e monitoramento dos recursos hídricos, de ensaios de bombeamento para estimar parâmetros hidráulicos do aquífero, elaborados o balanço hídrico e superfícies potenciométricas, bem como o levantamento topográfico da calha do rio Verde Grande e a elaboração de perfis hidrogeológicos para melhor entender a conexão entre aquífero e o rio.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo localiza-se em região rural no município de São João da Ponte, norte de Minas Gerais, distante 120 km de Montes Claros, distante de ocupações urbanas. Nessa região, há um grande

empreendimento do setor agropecuário de grande porte (83 km²), denominado Fazenda Santa Mônica (Figura 1), cujo suprimento de água para abastecimento e irrigação é obtido principalmente

pela exploração de água subterrânea por meio de uma bateria de poços tubulares.

Geologicamente, a região está na porção centro sul do Cráton do São Francisco (

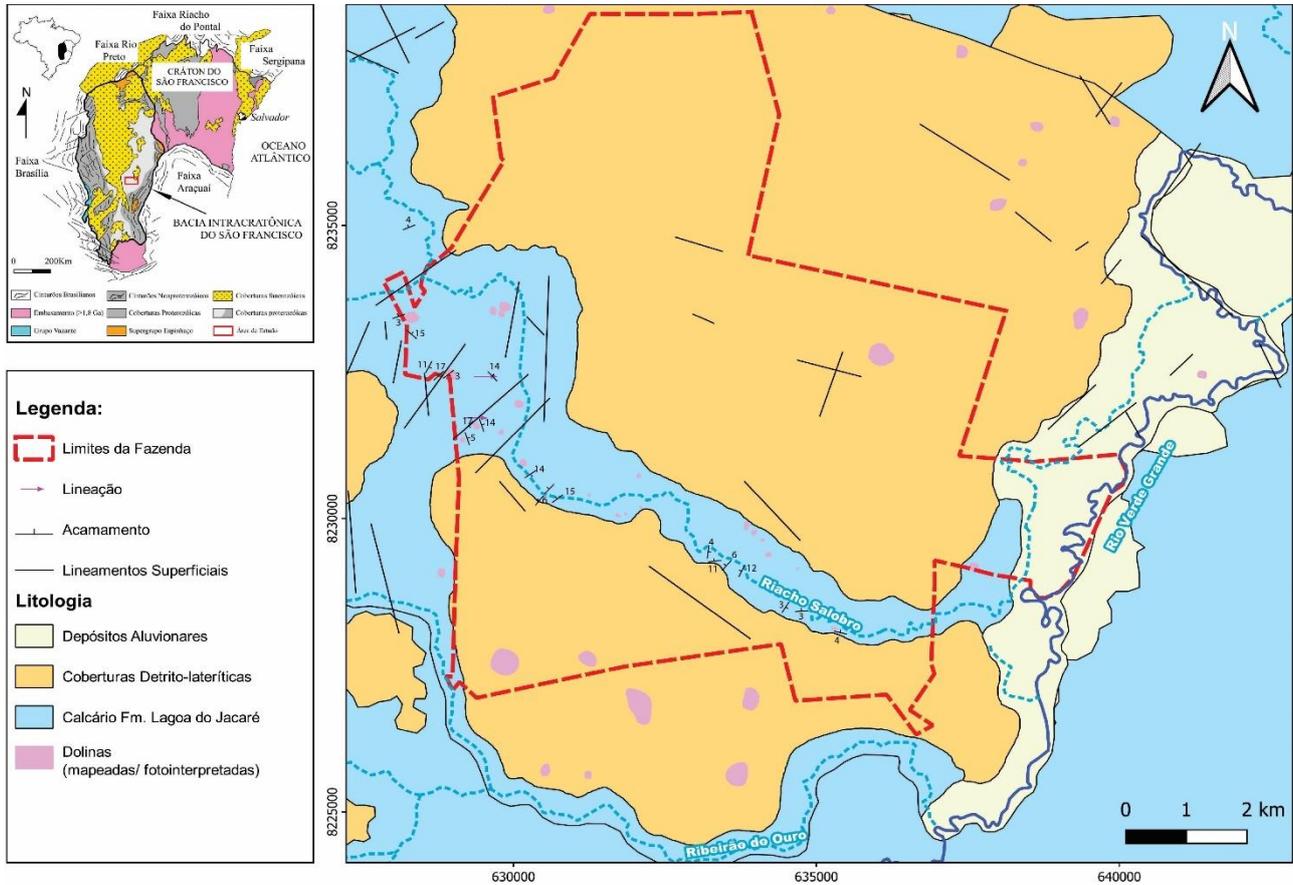


Figura 2), composta por rochas pré-cambrianas, sobrepostas por coberturas fanerozoicas. O Grupo Bambuí, que recobre a região, é constituído por rochas sedimentares siliciclásticas e carbonáticas, depositadas em ambiente de plataforma marinha

epicontinental, sendo, regionalmente, dividido em cinco formações, da base para o topo (Iglesias & Uhlein, 2009): 1) Sete Lagoas, 2) Serra de Santa Helena, 3) Lagoa do Jacaré, 4) Serra da Saudade e 5) Três Marias.

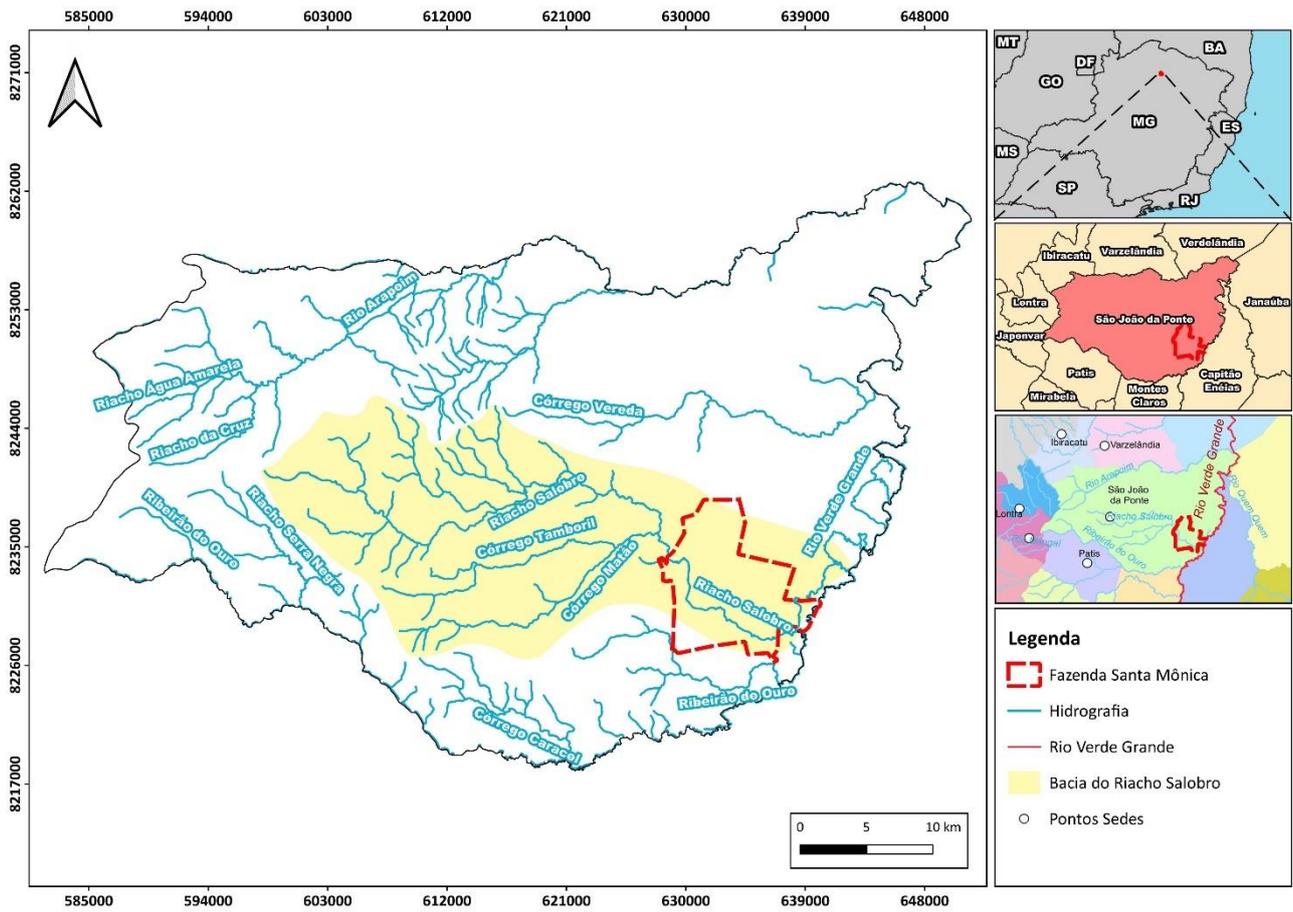


Figura 1: limites da Fazenda Santa Mônica (em vermelho) e do município de São João da Ponte (em preto). Localização hidrográfica em relação à da sub-bacia do Riacho Salobro (sombreada em amarelo) e à Bacia do Rio Verde Grande (detalhe).

Com base em mapas geológicos regional (CODEMIG & UFMG, 2017a), são individualizadas três unidades geológicas (MDGEO, 2015) e local (MDGEO, 2017b).

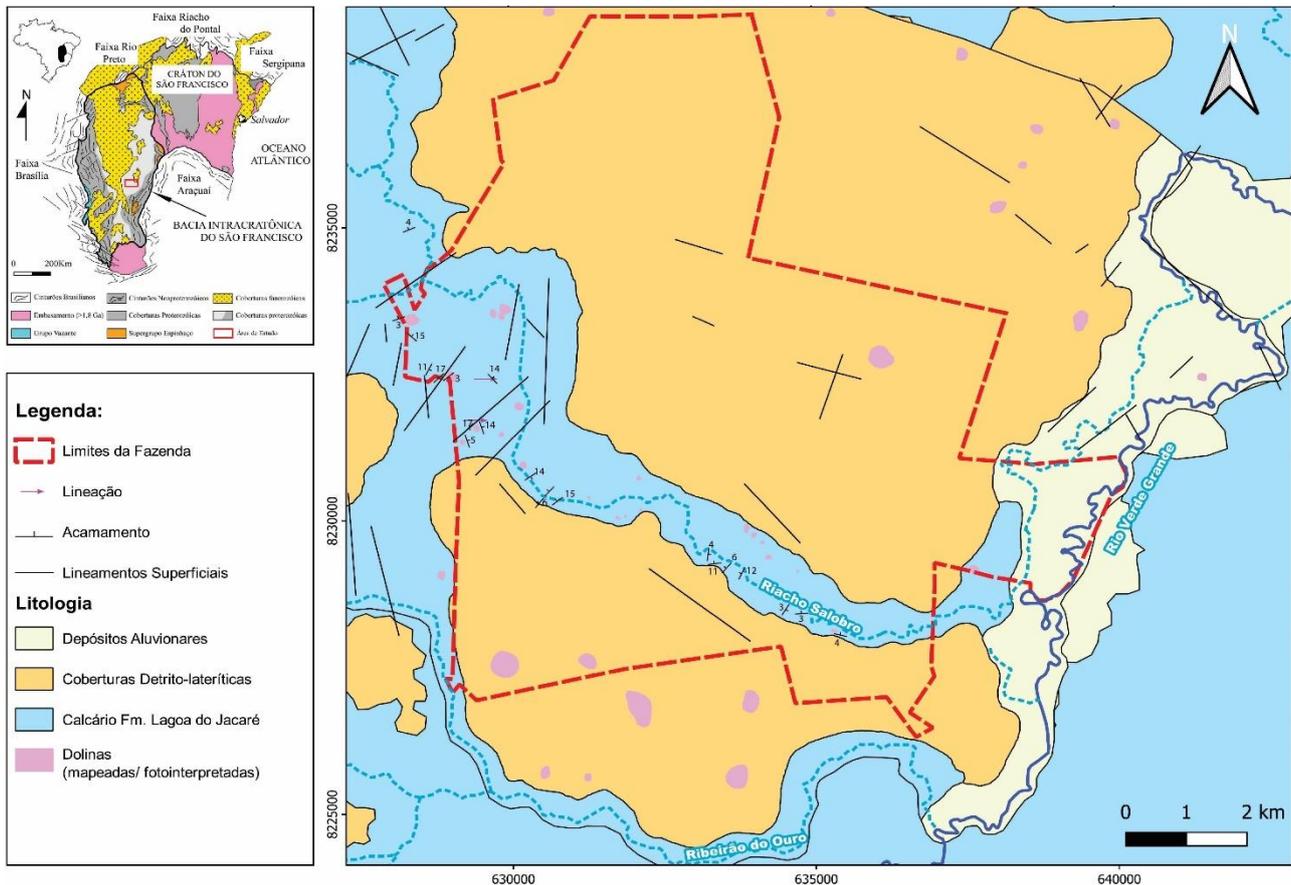


Figura 2):

1) Calcários, calcarenitos e pelitos da Formação Lagoa do Jacaré: coloração cinza a preto, aflorando ao longo da calha e da planície de inundação do riacho Salobro como blocos ou lajes e em maciços rochosos na região oeste da fazenda, onde se explorava uma pedra de calcário no passado.

2) Coberturas detríticas-lateríticas: constituídos por material argilo-arenoso de coloração avermelhada, decorrentes da decomposição de calcários. Com base em perfis litológicos de poços, as espessuras variam entre 5 e 30 m (MDGEO, 2017b).

3) Sedimentos aluvionares: material mal selecionado composto por bancos métricos de areia branca e/ou amarelada, intercalados por estratos argilo-arenosos, cascalho e seixos de quartzo arredondados. A espessura foi estimada em, no mínimo, 8 m, ao longo da planície de inundação do rio Verde Grande (MDGEO, 2017a).

Climatologicamente, a região está na Zona Tropical Brasil Central, de umidade do tipo semiárido e temperatura média superior a 18°C (IBGE, 2019). Conforme classificação de Köppen (INMET, 2018) o clima é do tipo tropical, com estação seca de inverno, sendo que dentre os subtipos dessa categoria climática, destaca-se na área o clima semiárido com baixa precipitação de chuvas, podendo haver períodos de estiagem que se prolongam por muitos meses, não sendo suficientes para recarga completa

dos aquíferos (CODEMIG & UFMG, 2015). A média pluviométrica plurianual é de 1012 mm, sendo 93% (941 mm), concentrado no período chuvoso, o que evidencia os períodos secos de pouquíssimas chuvas na região.

Hidrologicamente, área está na sub-bacia do riacho Salobro (525 km²), no baixo curso, próximo à foz com o rio Verde Grande, principal corpo hídrico da região (Figura 1) e afluente da margem direita do rio São Francisco. O riacho Salobro é um curso d'água intermitente, ficando localmente seco em grande parte do ano, influenciado principalmente por questões climáticas (clima semiárido e distribuição de chuvas), geológicas (região cárstica com presença de sumidouros) e antrópicas (barragem para captação de água no distrito de Tamboril, a montante da área), assim como potencial influência de captações por poços ao longo do seu leito, inclusive na própria fazenda. O rio Verde Grande é um dos principais rios da região, percorrendo uma área de aproximadamente 200 km, desde o entorno de Montes Claros, até a confluência com o rio Verde Pequeno, fronteira com a Bahia e desaguando na margem direita do rio São Francisco, em Matias Cardoso.

Do ponto de vista geomorfológico, a região é tipicamente cárstica, com estruturas de dissolução, como dolinas, sumidouros e lapíás, que configuram a porção externa do relevo cárstico (exocarste), assim como condutos, cavernas e estruturas de dissolução causadas pela circulação de água subterrânea

(endocarste). O solo da região, classificado como latossolo vermelho ou amarelo (IBGE & EMBRAPA, 2001), está associado à alteração intempérica dos calcários ou das coberturas detrito-lateríticas.

Com relação à hidrogeologia, há dois aquíferos principais: 1) cárstico (porosidade terciária), predominante na região, com circulação de água subterrânea em estruturas de dissolução dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré (condutos cársticos), assim como em fraturas. Trata-se de um aquífero predominantemente livre, com alta permeabilidade e potencialidade hídrica, resultando em elevadas vazões de poços, alcançando centenas de m³/h. As estruturas portadoras de água subterrânea são comuns até 80 m de profundidade (MDGEO, 2017a); e 2) granulares (porosidade primária), sendo aquíferos livres superficiais com espessuras inferiores a 30 m, representados por coberturas

detrito-lateríticas distribuídas em grande parte da área, além de coberturas aluvionares nas margens do rio Verde Grande. Embora não sejam grandes produtores de água, os aquíferos granulares exercem importante função na recarga allogênica do aquífero cárstico sotoposto.

Referente aos parâmetros hidráulicos do aquífero cárstico, segundo Filpi et al, (2023), em área correlata, indicam valores de condutividade hidráulica (K) entre 0,01 e 1 m/d. Silva (1984) interpretou ensaios de bombeamento de 60 poços existentes no aquífero cárstico Jaíba, a norte de São João da Ponte, obtendo transmissividades (T) entre 0,8 e 694 m²/d, e armazenamento (S) entre 10⁻² e 10⁻⁵, refletindo a heterogeneidade característica de aquíferos cársticos na região.

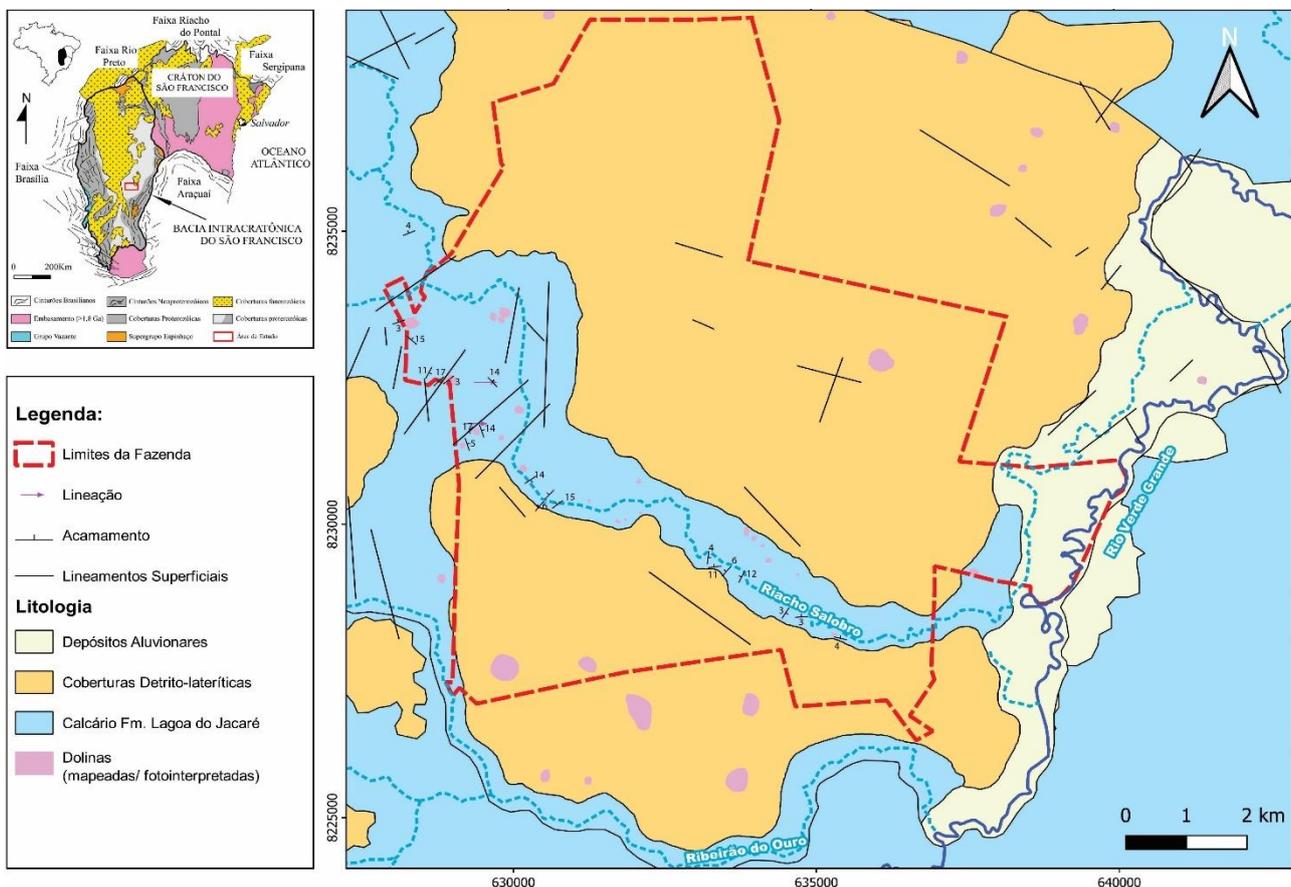


Figura 2: Geologia da área, com destaque para os calcários da Formação Lagoa do Jacaré aflorantes na calha do Riacho Salobro e sobrepostos pelas coberturas detrito-lateríticas (adaptado de CODEMIG & UFMG, 2015 e MDGEO, 2017b).

A recarga do aquífero é, predominantemente pluvial, ao longo de toda superfície do terreno, seja por infiltração direta em calcários aflorantes (recarga autogênica), sobretudo, na calha do riacho Salobro, ou indiretamente, pelo acúmulo e infiltração de água dos aquíferos granulares (recarga allogênica) (MDGEO, 2018). Concentra-se no período chuvoso

(novembro a março), pois, na estiagem, praticamente não chove na região. O riacho Salobro é um curso d'água intermitente que, durante a estação chuvosa, comporta-se como “rio influente”, cedendo água ao aquífero. Na estiagem (abril a outubro), o rio é seco e, portanto, não recarrega o aquífero.

Na fazenda, há cinco barragens de acumulação de água fluvial e pluvial na calha do Salobro que, quando saturadas, favorecem a infiltração, potencializando a recarga localmente. Com base em dados climáticos e balanço hídrico, foi estimada uma taxa de infiltração na bacia do Salobro de 15,4% da precipitação (MDGEO, 2018). O riacho Salobro fica seco na maior parte do ano e de comportamento influente durante os meses mais chuvosos, não se configurando como uma estrutura de descarga do aquífero na área. A conexão hidráulica e a possibilidade de descarga desse aquífero no rio Verde Grande serão discutidas adiante. Bateria de poços tubulares e redes de monitoramento

A bateria de poços tubulares (PT) da fazenda contempla 65 poços, dos quais 55 são ativos e com instrumentos de monitoramento de níveis d'água (NA) e vazões. Até setembro de 2017, o monitoramento de NA foi realizado nos próprios poços de bombeamento. A partir de outubro de 2017, esse monitoramento foi realizado em poços de monitoramento (PM) exclusivos, sendo 19 instalados na fazenda (14 novos e cinco antigos poços de bombeamento desativados) além de outros seis poços, em propriedade de vizinhos a norte e oeste da

fazenda (Figura 3). Todos os poços captam águas predominantemente do Aquífero Cárstico Lagoa do Jacaré e, em alguns casos, também na porção saturada da cobertura detrito-laterítica.

Referente ao monitoramento de vazões do rio Verde Grande e do riacho Salobro, foram instaladas sete estações fluviométricas (VZ 01 a 07) compostas por réguas instaladas em posições estratégicas, a montante e a jusante da fazenda (Figura 3). No entanto, as estações VZ-01 e VZ-04, no riacho Salobro, foram descartadas, devido à forte influência antrópica no riacho ao longo de todo seu curso (tanto dentro da fazenda quanto a montante e a jusante). O monitoramento nessas duas estações deixou de ser relevante, por não se tratar de vazões naturais do riacho. A estação VZ-06 não foi considerada devido à sua localização. Portanto, nesse estudo, serão utilizados os dados de quatro estações fluviométricas (VZ-02, VZ-03, VZ-05 e VZ-07), situadas no rio Verde Grande. O monitoramento das precipitações pluviométricas é realizado na fazenda em pluviômetro particular, localizado próximo à sede (onde estão os poços de bombeamento STM-04 e STM-07 - Figura 3).

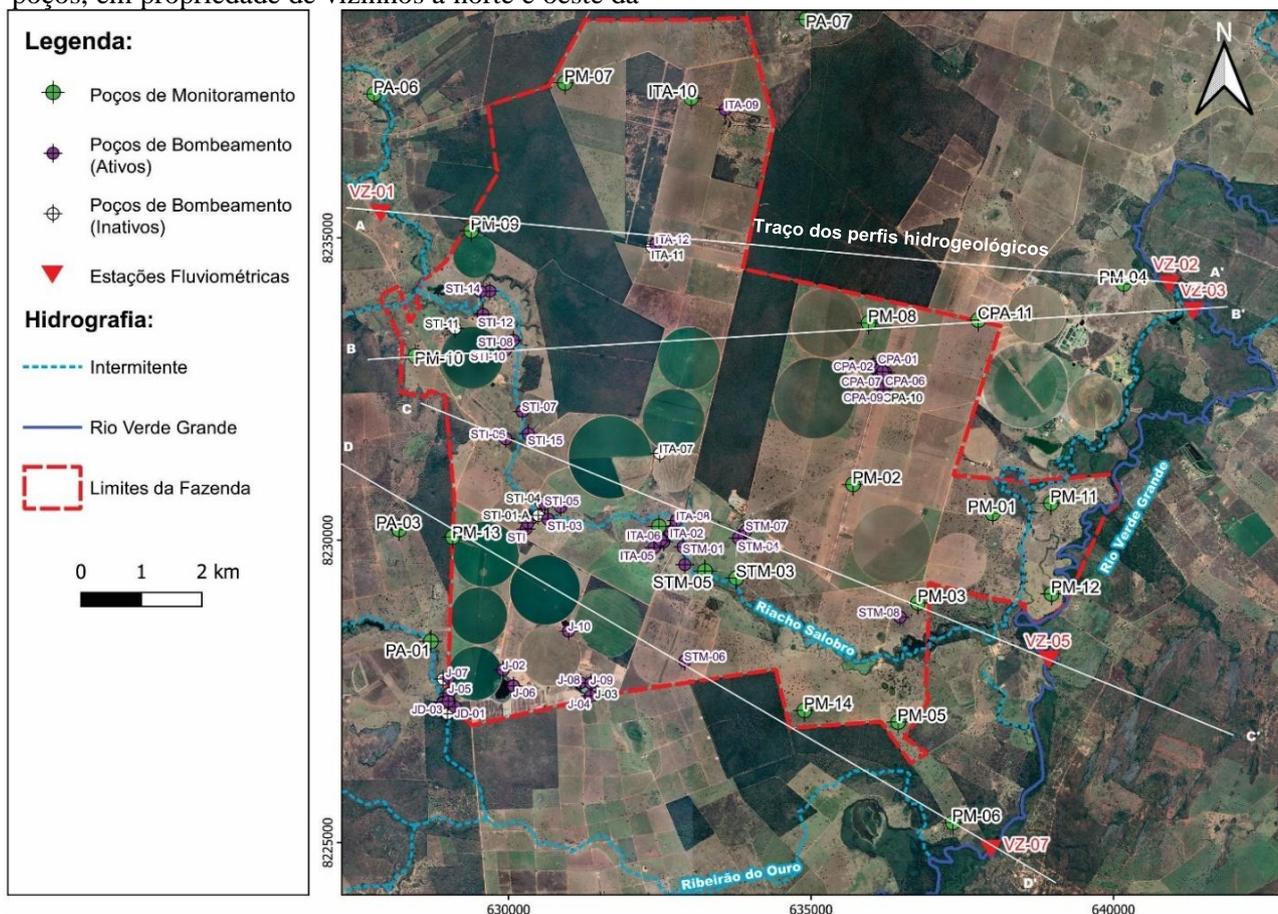


Figura 3: Localização dos poços de bombeamento, de monitoramento do nível d'água, estações fluviométricas e indicação das seções hidrogeológicas.

Avaliações da exploração dos poços e do monitoramento hidrogeológico

Foram avaliados dados mensais de vazão de exploração dos PTs, os NAs dos PMs e vazões do rio Verde Grande, entre outubro/2017 e junho/2019. A vazão de produção dos PTs foi obtida pela razão dos volumes bombeados, medidos nos hidrômetros, pelo tempo de operação de cada poço, via horímetros das bombas submersas.

Os níveis estático e dinâmico foram monitorados, inicialmente, nos próprios poços tubulares de bombeamento e, posteriormente (outubro/2017), nos poços exclusivos para o monitoramento do NA. As profundidades de NA foram obtidas com medidor elétrico, posteriormente, convertidas em cota altimétrica do NA, mediante subtração pela cota de boca do poço.

A vazão do rio Verde Grande foi monitorada mensalmente em estações fluviométricas instaladas em pontos estratégicos ao longo do seu leito. As medições foram realizadas com micromolinetes fluviométrico USGS Pygmy Current Meter, modelo Current Meter Digitizer. Nas estações, também foram medidas diariamente as alturas da lâmina d'água do rio, em réguas fluviométricas nas margens.

Balanço hídrico

O balanço hídrico (BH) foi realizado com base no método clássico e amplamente usado de Thornthwaite e Mather (1955), que considera o movimento vertical natural da água, sem interferência antrópica, representando a entrada de água proveniente exclusivamente da precipitação e a saída, pela evapotranspiração real e pelo excedente hídrico, expresso pela equação $P - (ETR + EXC) = \pm \Delta ARM$, onde: P = precipitação média mensal (mm); ETR = evapotranspiração real média mensal (mm); EXC = excedente hídrico; ΔARM = variação do armazenamento de água do solo (umidade).

O cálculo do BH foi precedido pela determinação da evapotranspiração potencial (ETP) pelo método de Penman-Monteith (Monteith, 1973), com base nos dados de temperatura, umidade, velocidade do vento e insolação, monitorados na estação meteorológica de Montes Claros (código 83437), operada pelo INMET (2018), a 70 km da área (em linha reta), de características climáticas similares.

Devido à relevância local e maior período de amostragem, os dados de precipitação foram provenientes do monitoramento local no pluviômetro da fazenda, com registros de chuva desde julho de 1981, dados que também foram utilizados nas avaliações comparativas da exploração dos poços e variações de NA e vazões.

Para o cálculo do BH e da ETP foram utilizadas as planilhas eletrônicas Excel "BHseqV6.3.2002" e "BHnormV4.0.1998", desenvolvidas por Rolim e Sentelhas (1998, 2002), disponíveis em: <https://pt.scribd.com/document/282161512/BHseq63> e <https://pt.scribd.com/document/373135767/BHnorm>. Foram inseridos os dados de temperatura e precipitação mensais entre outubro/2017 e junho/2019.

Para a variável capacidade de água disponível no solo (CAD), que, segundo Rolim e Sentelhas (1998), é função das características físicas do solo e da profundidade de exploração efetiva das raízes, foi utilizado 150 mm, baseado no valor utilizado por Galvão et al. (2018) e Alves et. al (2021), em estudos hidrogeológicos correlatos desenvolvido também em calcários do Grupo Bambuí, em Sete Lagoas (MG).

Levantamento topográfico

O levantamento topográfico foi realizado utilizando o equipamento modelo V90, referenciado ao datum SIRGAS 2000 e ao datum vertical (altimétrico) Mareógrafo de Imbituba, mesma referência utilizada pelo IBGE em suas bases topográficas (NEDRO, 2020). Foram levantadas as cotas de fundo das calhas do Rio Verde Grande em todas as estações fluviométricas, e de todos os poços.

Superfícies potenciométricas

As superfícies potenciométricas foram determinadas a partir de dados de NA em poços de monitoramento, em regime estático, com a bateria de poços desligada a, pelo menos, 12 horas. Essa condição permitiu representar o NA em situação natural do aquífero, sem (ou com mínima) influência do bombeamento. Foram confeccionados dois mapas de superfície potenciométrica, referentes aos períodos chuvoso (fevereiro/2018) e seco (setembro/2018).

Cargas hidráulicas (h) foram determinadas a partir da diferença entre os dados de elevação do terreno do poço, obtidos a partir de levantamentos topográficos no local, e a profundidade estática do NA. Em seguida, os valores de h foram interpolados usando o método de krigagem (kriging), utilizando o software Surfer 13, gerando isolinhas das superfícies potenciométricas que, depois, ajustadas manualmente e finalizadas usando o software Corel Draw 2020.

Ensaio de bombeamento e parâmetros hidráulicos do aquífero

Os parâmetros hidráulicos transmissividade (T) e condutividade hidráulica (K) foram estimados

via ensaios de bombeamento (rebaixamento e recuperação do NA) em 51 poços tubulares, em 2016. Durante os ensaios foram medidos os níveis estáticos, dinâmicos e vazão dos poços.

Por se tratar de ensaios com leituras no próprio poço bombeado, foi utilizado o método clássico e amplamente usado de Cooper e Jacob (1946) na interpretação. Por ser um aquífero cárstico, foram realizadas adequações práticas ao método (Galvão et al., 2015), conceitualmente desenvolvido para meio poroso homogêneo isotrópico e contínuo, para um meio heterogêneo, anisotrópico e descontínuo. Os valores de K foram calculados pela equação $K=T/b$, onde b é a espessura saturada do aquífero, considerada 80 m, com base em dados de perfis litológicos (MDGEO, 2017a).

Por se tratar de rebaixamento no próprio poço bombeado, é inviável o cálculo do coeficiente de armazenamento (S), sendo calculado apenas valores de T e K. Com base na razão entre vazão e rebaixamento do NA, também foram calculadas as vazões específicas (ou capacidade específica) dos poços que, embora não seja um parâmetro hidráulico do aquífero, reflete a capacidade dos poços produzirem água subterrânea. Em alguns poços, não foi possível calcular os parâmetros hidráulicos, por consequência de problemas no bombeamento, nas leituras ou ausência de rebaixamento.

Perfis hidrogeológicos

Para a avaliação da conexão hidráulica do aquífero com o rio Verde Grande (RVG) foram definidas quatro seções verticais cortando toda área da fazenda em direção às estações fluviométricas, atravessando também os PM próximos ao rio e outros PM e PT existentes na fazenda.

Nos perfis hidrogeológicos foram representados os aquíferos cárstico e superficiais sobrepostos, a calha do riacho Salobro e do RVG, e o NA dos meses fevereiro e outubro de 2018, que corresponderam, respectivamente, aos picos dos períodos chuvoso e seco, representando a variação sazonal do nível d'água.

Resultados e discussão

Exploração da bateria e monitoramento dos poços

Há uma grande variabilidade nas vazões individuais dos poços, com predominância de valores inferiores a 50 m³/h (42%), sendo boa parte entre 50 e 150 m³/h (33%) e, em menor proporção, poços com vazões superiores a 150 m³/h (25%), como mostra o histograma de vazões de bombeamento.

Em termos de produção global da bateria, foram monitorados volumes mensais entre 300 mil m³

e 1,3 milhões de m³ de água subterrânea, em média 700 mil m³ (Figura 4). Esses volumes equivalem a vazões médias mensais entre 420 e 1.925 m³/h (média global próximo a 1000 m³/h) de exploração de água subterrânea pela bateria. Vale ressaltar que essa produção está dentro do volume anual outorgado para o empreendimento para a pesquisa hidrogeológica (18 milhões de m³).

Dos 25 PMs (Figuras 3 e 6), 11 estão nos setores central e leste da fazenda, entre a região com a maior concentração de PT e o RVG. Considerando que os demais PM dos setores norte e oeste são irrelevantes para a avaliação da conexão hidráulica da bateria com o rio, foram analisados apenas os níveis desses 11 PM: PM-01, PM-03, PM-04, PM-05, PM-06, PM-11, PM-12A, PM-02, PM-08, PM-14 e CPA-11 (Figura 4 e Tabela 1).

Os NAs monitorados e apresentados na Figura 4 e Tabela 1 são leituras mensais do nível estático nesses poços entre outubro de 2017 e junho de 2019, com a bateria de poços de bombeamento desligada. De maneira geral, os poços exibem um comportamento do NA semelhante, com oscilações temporais mensais acompanhando o regime sazonal de chuvas e tendência a um rebaixamento do NA, a depender do período de comparação. A exceção são os PM-06 e PM-04, situados nas extremidades sudeste e nordeste da área, próximo às estações fluviométricas VZ-07 e VZ-02 (Figura 3), que resalta um rebaixamento mais acentuado do NA. Esses poços foram instalados apenas em fevereiro de 2018 (por questões de permissão de superficiários), portanto, sem dados desde outubro de 2017. Entende-se que, possivelmente, os níveis nesses dois PMs também estariam abaixo nos meses iniciais com ausência de dados (outubro/17 a janeiro/18), o que deixaria de ressaltar o suposto rebaixamento contínuo e mais acentuado, observado no gráfico (Figura 4).

Destaca-se que, no período, nota-se, pelo histograma de precipitações (Figura 4), um grande volume de chuvas concentrado no período chuvoso 2017-2018, em níveis históricos para região. Esse acúmulo de chuvas foi responsável por uma elevação do NA geral em todos os PM (assim como nas vazões do rio), nitidamente destacada em uma avaliação individual de cada instrumento da rede de monitoramento.

Considerando a diferença entre os valores monitorados em todo o período (out/17 e jun/19 – 1ª linha), em uma análise global simplificada, percebe-se que predomina uma ligeira elevação do NA, o que pode estar relacionado a leituras em meses hidrológicos distintos (junho e outubro). Contudo, esse comportamento contrapõe a existência de um rebaixamento do NA global associado ao período total avaliado.

Em uma comparação realizada entre os meses de máxima estiagem possíveis de serem avaliados (out/18-out/17 – 2ª linha), há uma elevação geral do NA em todos os instrumentos (entre 0,62 e 2,54 m), associado ao grande volume de precipitações registrado no período chuvoso 2017-2018 (Figura 4).

Tabela 1: Variação do nível d'água nos PM (m) em períodos comparativos distintos (sinal positivo: elevação do NA no período avaliado; sinal negativo: diminuição do NA no período avaliado).

Período	PM-01	PM-03	PM-04	PM-05	PM-06	PM-11	PM-12A	PM-02	PM-08	CPA-11	PM-14
Out/17-Jun/19	-1,0	-0,62	-	+0,21	-	+0,58	+2,95	+0,67	+1,88	+0,04	+0,28
Out/17-Out/18	+0,85	+0,87	-	+0,62	-	+1,01	+1,71	+1,32	+2,54	+0,64	+1,11
Jun/18-Jun/19	-3,49	-3,12	-1,03	-0,50	-1,72	-1,50	-0,10	-1,35	-1,47	-1,68	-1,59
Fev/18-Fev/19	-0,55	-0,84	-1,20	+0,10	-1,82	-	-1,94	-0,23	-0,71	-1,09	-0,57

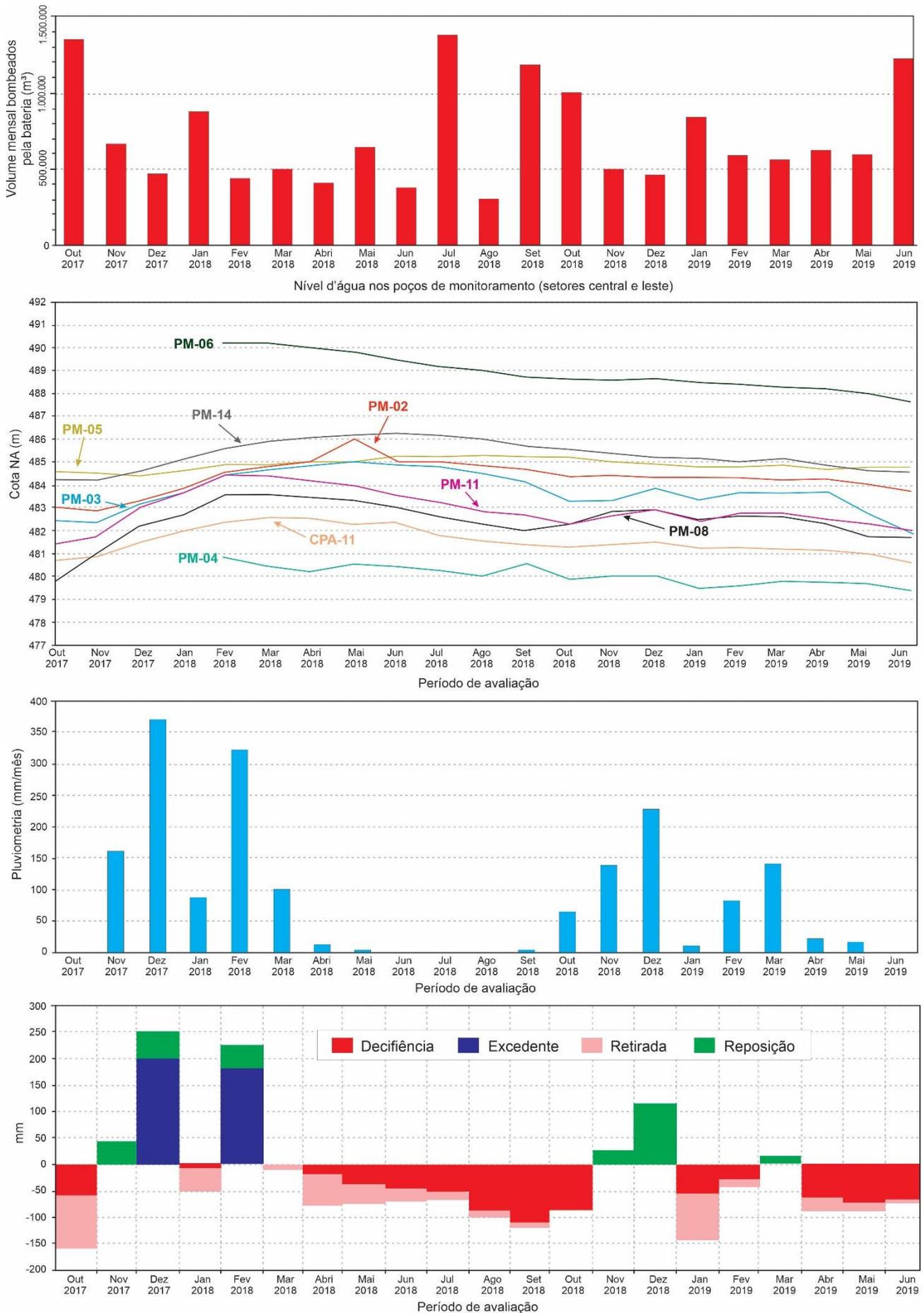


Figura 4: Variação de vazões de exploração da bateria, do NA nos PM situados entre a bateria e o RVG e extrato do balanço hídrico no período de out/7 a jun/19.

Por outro lado, em uma comparação realizada na metade final do período, entre 2018 e 2019 (contando agora com os dados dos PM 06 e 04), percebe-se que, independentemente se a avaliação é feita em meses de estiagem (jun/19-jun/18 – 3ª linha) ou de chuva (fev/19-fev/18 – 4ª linha), há uma tendência de rebaixamento global do NA, respectivamente entre 0,10 e 3,49 m (jun/19-jun/18) e entre 0,33 e 1,94 m (fev/19-fev/18). Da mesma forma, entende-se que essa diminuição também esteja associada ao grande volume de precipitações do período chuvoso 2017-2018, o que não se repetiu na mesma intensidade (volumes), no período chuvoso 2018-2019.

Balanço hídrico

Sobre o balanço hídrico (Figura 4), há a predominância de períodos de deficiência hídrica, típico da região semiárida do norte de Minas Gerais, com tendências de reposição com o avanço do período chuvoso e excedente restrito no auge do período chuvoso (dezembro a fevereiro). No período, há um grande excedente nos meses de dezembro e fevereiro de 2018 (acima de 150 mm/mês), coerente com o grande volume de precipitações que se concentrou na área nesse período, com totais mensais superiores a 300 mm, valores atípicos se comparado a média histórica desses meses, desde 1981, ano em que se iniciou o monitoramento no pluviômetro local.

Bombeamento e parâmetros hidráulicos

Na análise gráfica dos ensaios de bombeamento foi comum o aparecimento de mais de uma reta de rebaixamento, situação comum na interpretação de ensaios em meios descontínuos, sobretudo, em carste, em que a água bombeada muitas vezes está associada a mais de uma estrutura (e.g., fraturas e condutos), podendo inclusive apresentar propriedades hidráulicas direcionais (K e T) distintas (Figura 5) (Galvão, et al., 2018).

Predominam poços com vazões abaixo de 50 m³/h, mas em número considerável entre 50 e 100 m³/h. O rebaixamento do NA revela o predomínio de valores menores que 30 m, sendo, a grande maioria, inferiores a 15 m. Estes números indicam dois aspectos principais: 1) o aquífero tem elevado potencial de produção de água; e 2) essa produção não reflete em um rebaixamento no NA em grande magnitude (resiliência do aquífero). Essa relação é notada pela vazão específica dos poços.

Entende-se que o bombeamento não esteja provocando superexploração, conforme conceituado por Schuch et al. (2023), que desenvolveu pesquisa em área correlata em Sete Lagoas (MG), captando água subterrânea majoritariamente da reserva renovável do aquífero. Ou seja, as vazões exploradas não estão superiores à capacidade de recarga/disponibilidade hídrica local do aquífero cárstico (Feitosa et al. 2008). Essa avaliação é corroborada pela relativa rápida recuperação do NA aos patamares iniciais (nível estático), geralmente inferior a 12 horas após paralisação do bombeamento (ensaio de bateria). Se o aquífero estivesse sendo superexplorado, o rebaixamento seria de maior magnitude, com redução de vazão nos poços e contínuo aprofundamento das bombas submersas, o que não ocorre. Analisando os dados de nível estático, verifica-se que 80% dos poços têm nível estático com profundidade inferior a 30 m.

O histograma da transmissividade (T) apresenta a distribuição de probabilidade log-normal, típico de aquíferos cársticos e fraturados. O histograma de condutividade hidráulica (K) indica valores concentrados entre 0,1 e 10 m/dia, evidenciando bombeamento tanto do sistema cárstico como um todo, como de estruturas cársticas excepcionais, como condutos principais. Entretanto, predominam valores inferiores a 0,5 m/dia, que refletem uma excelente condição geral de permeabilidade do aquífero (Figura 5).

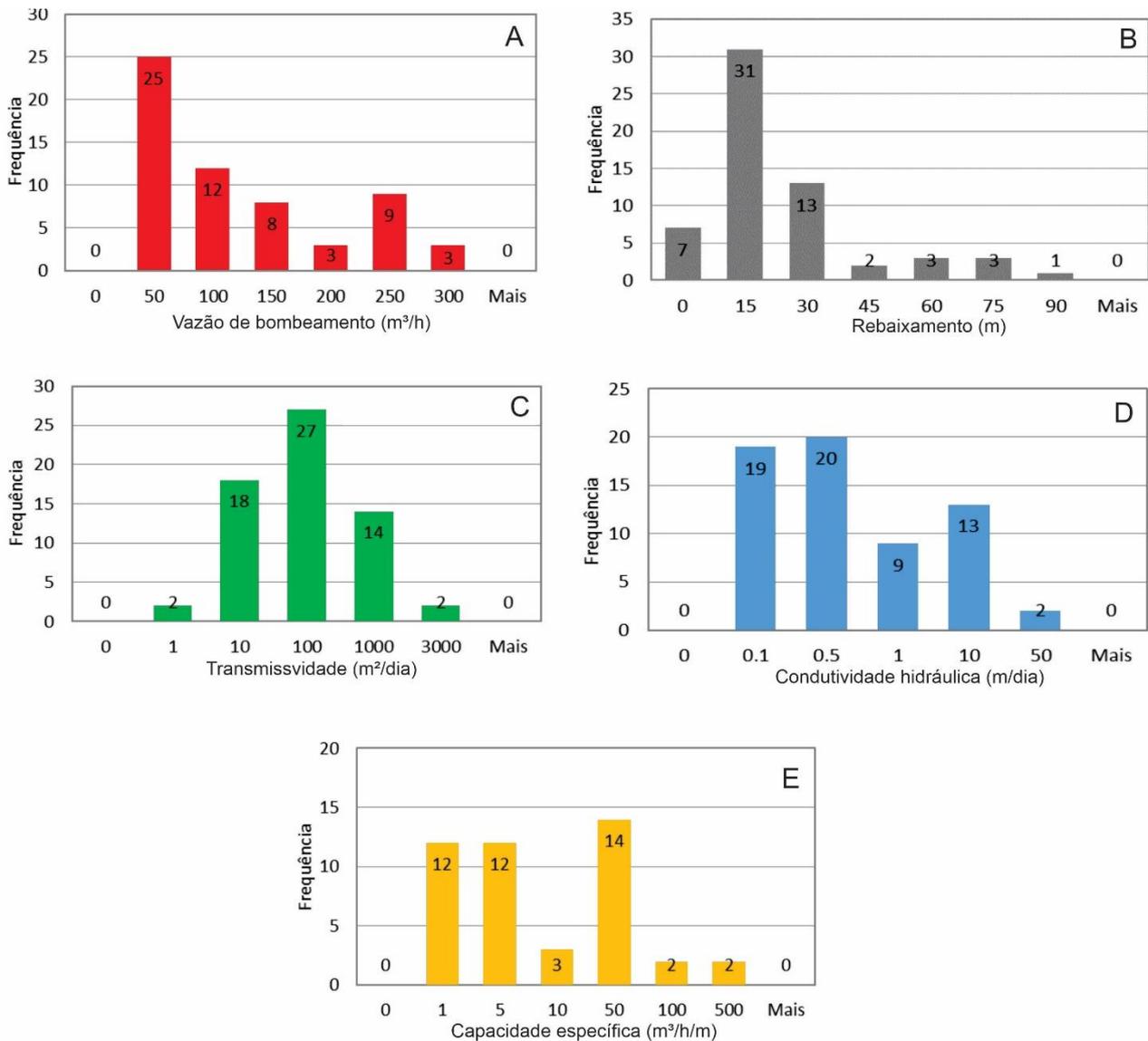


Figura 5 - Gráficos de frequência versus (A) vazão de bombeamento (m³/h), (B) rebaixamento (m); (C) Transmissividade (m²/dia); (D) condutividade hidráulica (m/dia); e (E) capacidade específica (m³/h/m) via ensaios de bombeamento.

Como as leituras das evoluções dos rebaixamentos foram realizados no próprio poço bombeado não foi possível calcular o coeficiente de armazenamento (S), sendo adotado como referência os valores 0,01 e 0,02 (parâmetro adimensional), obtidos em testes de interferência realizados em 2016 nos poços do setor Capão das Abelhas – CPA (MDGEO, 2016), valores esses, associados à aquíferos livres.

Referente à vazão específica (Q/s) dos poços, os valores estão entre 1 e 5 m³/h/m, seguido pelo intervalo entre 10 e 50 m³/h/m, evidenciando a presença de estruturas cárstico-fraturadas, e, no caso dos valores mais elevados, de um carste mais desenvolvido (condutos principais), com grande potencial de produção de água subterrânea. As duas tendências vistas em Q/s se repetem na vazão e K, reforçando a existência de dois principais sistemas/estruturas portadoras de água subterrânea no

aquífero, um sistema cárstico-fissural secundário e um sistema cárstico principal bem desenvolvido, formado por possíveis grandes condutos, conforme visto por Galvão et al. (2015) e Filpi et al. (2023). Evidentemente que há também valores de parâmetros hidráulicos coerentes com a percolação de água em fraturas (porosidade secundária) mas, de menor potencial, bem como de porosidade primária, associado ao aquífero poroso superficial (cobertura detrito-laterítica).

Superfícies potenciométricas

Foram confeccionados dois mapas de superfície potenciométrica, referentes aos NAs monitorados nos 25 PMs, no auge dos períodos chuvoso (fevereiro/2018) e seco (setembro/2018), para representar espacialmente a variação sazonal do nível d'água subterrâneo (Figura 6). Foram definidas

isolinhas de carga hidráulica de 2 m, entendidas como intervalo mínimo adequado para a avaliação espacial nesta escala de trabalho.

Observa-se um padrão de distribuição das equipotenciais e do fluxo subterrâneo na área muito semelhante em ambos os períodos avaliados. O fluxo natural predominante tem sentido leste, em direção ao rio Verde Grande, com uma inflexão para nordeste próximo à sua calha, acompanhando a direção preferencial de fluxo superficial.

Localmente, na porção central da fazenda, próximo à calha do riacho Salobro, onde se concentra o maior número de poços de bombeamento (e com consideráveis vazões), observa-se a formação de um cone de rebaixamento, com um fluxo em direção aos poços produtores. Esse efeito é observado também devido à proximidade dos poços de monitoramento ITA-04 e STM-05 dos poços produtores (Figura 6).

Altimetria da calha do RVG, seções hidrogeológicas e conexão hidráulica

Foram avaliadas as cotas de fundo da calha e da lâmina d'água nas 4 estações fluviométricas do RVG: VZ-02 (492,8 m) VZ-03 (492,8 m), VZ-05 (496,5 m) e VZ-07 (497,0 m) (Figura 7). A avaliação da conexão hidráulica do aquífero com o RVG foi realizada nas seções verticais A, B, C e D, cortando toda área da fazenda em direção às estações fluviométricas, considerando também poços de monitoramento e de bombeamento (Figura 7).

Analisando quatro seções hidrogeológicas verticais (Figura 8), percebe-se que, na maioria dos locais, não há diferenças significativas entre os níveis estáticos nos PM (e PT) no período seco (set/18) e chuvoso (fev/18) do ano de 2018, em que se tem o registro completo de leituras. A exceção se dá nas imediações das barragens de acumulação de água no leito do RS, nos poços próximos às barragens B1 e B2 (região oeste - seções B e C), onde, em virtude do

acúmulo de chuva em fevereiro de 2018 (Figura 4), houve consideráveis elevações no NA. Na região centro-leste, de interesse para a avaliação da conexão hidráulica, essa diferença entre os níveis desses meses é ainda menor, predominantemente inferior a 1 m.

Comparando as cotas de fundo da calha do RVG (e de lâmina d'água) nas 4 estações, com os níveis estáticos dos PM mais próximos ao RVG, observa-se que níveis dos PM mais próximos à cada estação fluviométrica estão sempre abaixo das cotas de fundo da calha do RVG, independente dos períodos seco ou chuvoso.

A diferença média entre as cotas do NA do aquífero, obtida em poços de monitoramento proximais, e a do ponto mais fundo da calha em cada estação é de 12 m, com exceção do VZ-07, em que a diferença é de 7 m. Portanto, nas 4 seções, a calha e a lâmina d'água do rio estão bem acima da cota do nível estático do aquífero cárstico, indicando a inexistência de uma conexão hidráulica direta entre aquífero e rio e, conseqüentemente, descaracterizando o rio Verde Grande como estrutura de descarga do aquífero cárstico nessa área.

Contudo, ainda que os dados indiquem que o RVG está desconectado do aquífero (sem relação direta de efluência-influência), é sugerido que ele possa exercer alguma recarga no aquífero em períodos de cheia, onde seu volume e extensão lateral aumentaria, atingindo uma planície de inundação de dezenas de metros de largura, gerando uma recarga pelas aluviões, predominantemente mais permeáveis que o leito. No entanto, além do aumento da carga hidráulica do rio, extensão lateral e maior permeabilidade das aluviões, provavelmente essa relação de recarga não seja uniforme, sendo restrita também a regiões mais fraturadas e/ou carstificadas do seu leito.

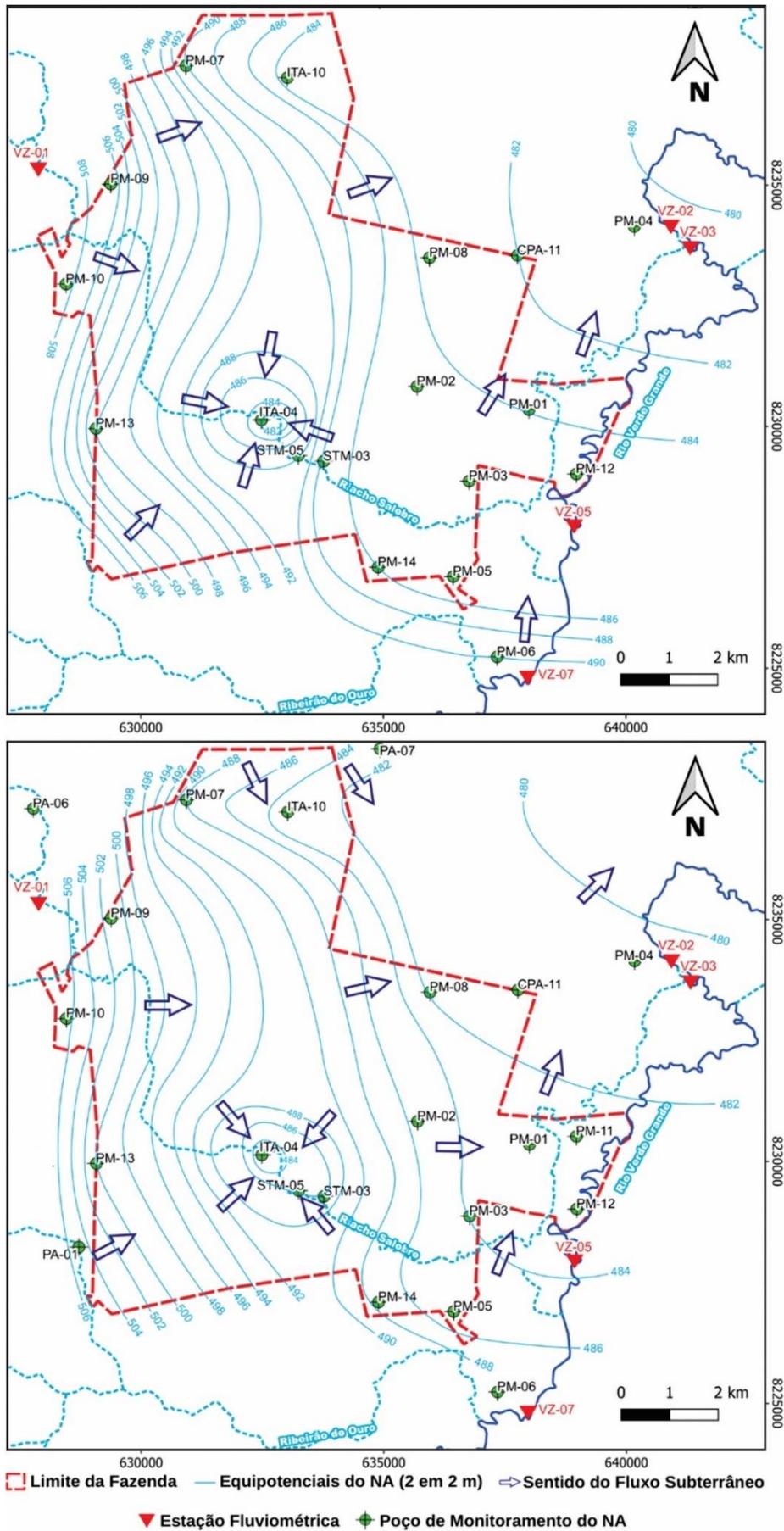


Figura 6: Superfícies potenciométricas e fluxos subterrâneos representativos do auge dos períodos chuvoso (fev/18, acima) e seco (set/18, abaixo) do mesmo ano.

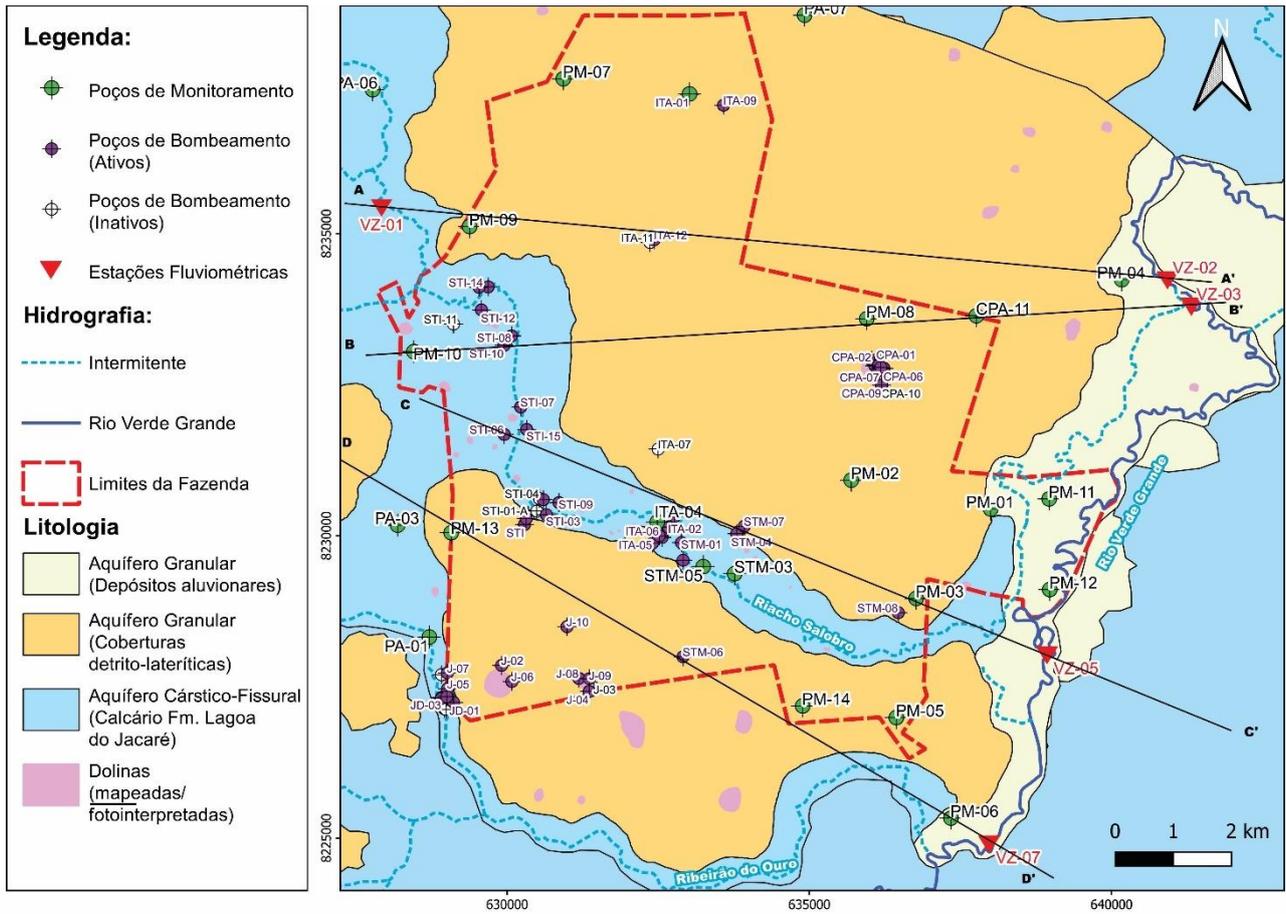


Figura 7: Domínios hidrogeológicos e de seções hidrogeológicas e demais elementos relevantes para a compreensão da conexão hidráulica, ilustrada nas seções verticais adiante (Figura 8).

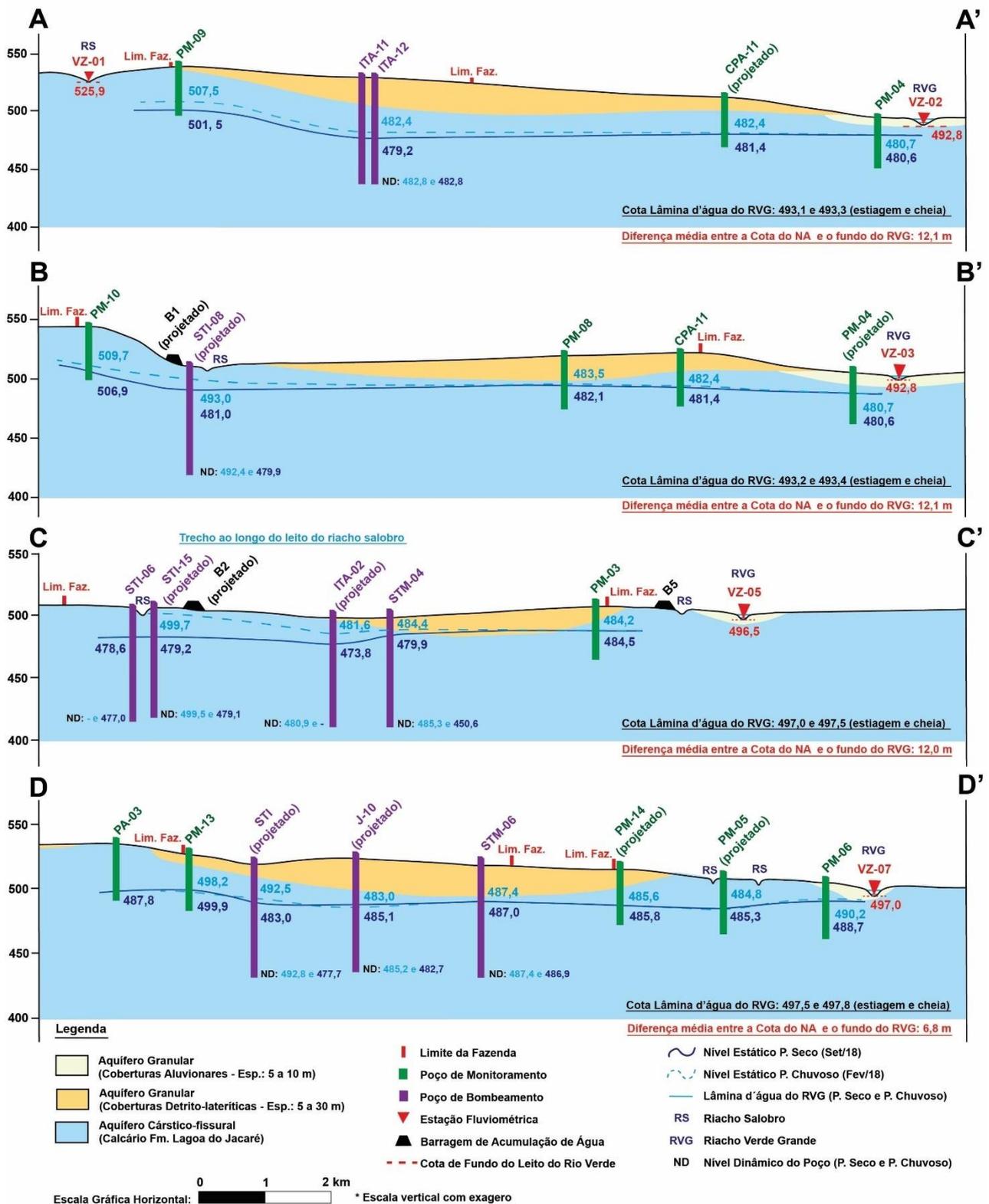


Figura 8: Relação hidráulica entre o aquífero cárstico e rio Verde Grande. Os níveis estáticos dos períodos seco e chuvoso são semelhantes e a diferença entre as cotas de fundo do RVG e do NA do aquífero nos PM mais próximos é da ordem de 12 m.

Conclusões

Os parâmetros hidráulicos e vazões específicas indicam a existência de dois principais sistemas aquíferos: cárstico-fissural secundário e cárstico principal bem desenvolvido, provavelmente formado por grandes condutos.

O aquífero cárstico tem elevado potencial hídrico, mas que não se reflete em rebaixamento no nível d'água global em grande magnitude, indicando comportamento hidráulico resiliente frente à exploração da bateria, explicado pela retirada de água subterrânea majoritariamente da reserva renovável, não extrapolando à capacidade local de recarga/disponibilidade hídrica cárstica.

Há uma relação direta entre variações de níveis estáticos do aquífero e volumes bombeados pela bateria de poços, com um rebaixamento crescente do nível d'água ao longo da estiagem em virtude do aumento da demanda de água subterrânea e, conseqüentemente, a recuperação dos níveis nos meses de chuva, dada a menor demanda de água subterrânea para irrigação e dessedentação, em virtude do aumento da disponibilidade de água superficial, caracterizando uma maior exploração de água subterrânea no período de estiagem.

O fluxo subterrâneo natural é para leste, em direção ao rio Verde Grande, com inflexão para nordeste próximo a calha do rio, acompanhando a direção de fluxo superficial. Localmente, no setor central da área, próximo à calha do riacho Salobro, onde há o maior número de poços de bombeamento de altas vazões, há um cone de rebaixamento. Em outros locais, ainda que se tenham poços bombeando, não se tem poços de monitoramento tão próximos a uma bateria de produção concentrada, que possa também evidenciar outro cone de rebaixamento pontual.

Não há diferenças relevantes entre níveis estáticos entre períodos seco e chuvoso, sobretudo, na região centro-leste da área. No período/condições avaliadas, a calha e lâmina d'água do rio Verde Grande está, em média, 12 m acima da cota do nível d'água estático do aquífero cárstico, indicando ausência de conexão hidráulica direta entre eles, descaracterizando o rio como estrutura de descarga do aquífero na área.

Mesmo assim, sugere-se que o rio Verde Grande possa exercer alguma recarga no aquífero (influência) em períodos de cheia, favorecida por um elevado aumento do volume e de carga hidráulica do rio e pela presença de aluviões permeáveis no entorno da calha, e em locais mais fraturados e/ou carstificados ao longo do leito do rio. Para confirmar essa relação influência-efluência entre aquífero e rio, uma investigação qualitativa complementar é sugerida, com análises hidroquímicas e isotópicas, e

uso de traçadores fluorescentes nas águas subterrâneas e superficiais (poços de bombeamento, de monitoramento e rio Verde Grande).

Agradecimentos

Às empresas do Grupo A.R.G: Fortaleza de Santa Terezinha Agricultura e Pecuária e Carapreta Carnes Nobres, à MDGEO Hidrogeologia e Meio Ambiente e ao Programa de Pós-graduação de Geologia do Instituto de Geociências, UFMG.

Referências

- Alves, M., Galvão, P., & Aranha, P. 2020. Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake. *Journal of Hydrology*, 593, 125830. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125830>
- Assunção, P., Galvão, P., Lucon, T., Doi, B., Fleming, P. M., Marques, T., & Costa, F. 2023. Hydrodynamic and hydrodispersive behavior of a highly karstified neoproterozoic hydrosystem indicated by tracer tests and modeling approach. *Journal of Hydrology*, 619, 129300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129300>
- Barrie, C. J.; Rasmussen, T. C.; Tollner, E. W. ; Golladay, S. W. ; Brantley, S .T. 2022. Steady vs dynamic stream-aquifer interactions: Lower Flint River Basin, Southwest Georgia, USA, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, V40: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101046>
- Barry-Sosa, A., Flint, M. K., Ellena, J. C., Martin, J. B., and Christner, B. C. 2024. Effects of surface water interactions with karst groundwater on microbial biomass, metabolism, and production, *Biogeosciences*, 21, 3965–3984, <https://doi.org/10.5194/bg-21-3965-2024>.
- Carvalho, J. D. de., Melo, M. C. de., Galvão, P., Miranda, W. L., & Lasmar, B. E. 2024. Groundwater in water scarcity context in the São Francisco River Basin (MG). *Ambiente & Sociedade*, 27, e00177. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0177r5vu27L2OA>
- CODEMIG & UFMG, 2015. Projeto Fronteira de Minas Gerais. Folha São João da Ponte-Sd.23-Z-C-V. Escala 1:100.000. Romano, W.A.
- Cooper Jr., H.H., Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Trans.Am. Geophys. Union*.27, 526–534.
- Fatoni, H., Kholis, A.N., Kurniawan, I.A. et al. 2024. Use of discharge variability, aquifer memory effect, and recession curve analysis in several

- springs to characterize karst aquifers in the tropical area. *Geosci J* 28, 925–939. <https://doi.org/10.1007/s12303-024-0034-0>
- Feitosa, F.A.C., Manoel Filho, J.R., Feitosa, E.C., Demetrio, J.G.A. 2008. *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. 3ªed. CPRM/LABHid, 812p.
- Filipi, F. C. M. T., Galvão, P., Da Rocha Santos, L. et al. 2023. Permeability scale effect analyzed in high resolution in Brazilian Neoproterozoic karst aquifer. *Environ Earth Sci* 82, 57. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10743-9>
- Ford, D, Williams, P. 2007. *Karst hydrogeology and Geomorphology*. Ed. John Wiley Sons. 562p.
- Galvão P., Halihan, T., Hirata, R. 2015. The Karst Permeability Scale Effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. *J Hydrol.* 531:85/15–105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.026>
- Galvão, P., Hirata, R. & Conicelli, B. 2018. Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environ Earth Sci* 77, 398. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7579-z>
- Goldscheider, N. Drew, D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. International Contributions to Hydrogeology.
- Gomes L. C. D., Salvador N. N. B., Lorenzo H. C. de. 2021. Conflicts By Water Resource Use And The Case Of Araraquara-Sp. *Ambient soc [Internet].*:24:e01003. Available from: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20190100r3vu2021L3AO>
- IBGE. 2019. Mapa de Climas do Brasil. Disponível em ftp://geofpt.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/clima.pdf
- IBGE & EMBRAPA, 2001. Solos do Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15829-solos.downloads>.
- Iglesias M., Uhlein A., 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco. *Revista Brasileira Geociências*, 39(2): 256-267. [10.25249/0375-7536.2009392256266](https://doi.org/10.25249/0375-7536.2009392256266)
- INMET, 2018. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>
- Kan, X.; Cheng, J.; Zheng, W.; Zhangzhong, L.; Li, J.; Liu, C.; Zhang, X. 2024. Interpretation of Soil Characteristics and Preferential Water Flow in Different Forest Covers of Karst Areas of China. *Water*, 16, 2319. <https://doi.org/10.3390/w16162319>
- Koiti, O.; Mayaud, C.; B. Kogovšek; M., Vainu; J. Terasmaa; A. Marandi. 2022. Surface water and groundwater hydraulics of lowland karst aquifers of Estonia, *Journal of Hydrology*, V610. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127908>
- Marques, T., Galvão, P., Assunção, P., Pandolf, B., Marshall, P., And Paiva, I. 2024. Natural responses of Neoproterozoic dynamic karst springs to rainfall events, São Miguel Watershed, Minas Gerais, Brazil, *Hydrol. Processes*, vol. 38, iss. 3, E15107. <https://doi.org/10.1002/hyp.15107>
- MDGEO, 2016. Ensaio individuais de bombeamento e recuperação e interferência nos poços e avaliação inicial da vulnerabilidade à contaminação. F.S.T.A.P. Disponível na base de dados de outorga do IGAM.
- MDGEO, 2017a. Informações sobre os perfis litológicos - construtivos dos poços tubulares da Fazenda Santa Mônica. Disponível na base de dados de outorga do IGAM.
- MDGEO, 2017b. Mapeamento geológico na região da Fazenda Santa Mônica. Disponível na base de dados de outorga do IGAM
- MDGEO, 2018. Monitoramento de hidrômetros e horímetros dos poços de bombeamento da Fazenda Santa Mônica. Consolidação dados até dezembro 2018. Disponível na base de dados de outorga do IGAM.
- Monteith, J. L., 1973. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London, 241p.
- NEDRO, 2020. Levantamento topográfico planialtimétrico – Estações fluviométricas. Fazenda Santa Mônica. Documento privado A.R.G.
- Pacheco Neto, W.; de Paula, R.; Galvão, P. 2024. Karst Hydrological Connections of Lakes and Neoproterozoic Hydrogeological System between the Years 1985–2020, Lagoa Santa—Minas Gerais, Brazil. *Water*, 16, 2591. <https://doi.org/10.3390/w16182591>
- Pereira, S.; Galvão, P.; Miotlinski, K.; Schuch, C. 2024. Numerical modeling applications for the evaluation of the past and future scenarios of groundwater use in an urbanized complex karst aquifer in the city of Sete Lagoas, State of Minas Gerais, Brazil. *Groundw. Sustain. Dev.*, 25, 101089. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101089>
- Pérez, E., Pidal, I. and Rosales, R. 2013. Interaction between karstic aquifers and allogenic rivers: The aquifer of the national park of the ephemeral river Lobos Canyon (Spain). *Natural Science*, 5, 296-312. [10.4236/ns.2013.52A042](https://doi.org/10.4236/ns.2013.52A042).

- Rolim, G.S & Sentelhas, P.C. 1998. Balanço Hídrico Normal Thornthwaite & Mather. Planilha Excel BHnorm V4.0.1998. ESALQ/USP. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/373135767/BHnorm>.
- Rolim, G.S & Sentelhas, P.C. 2002. Balanço Hídrico Sequencial Thornthwaite & Mather. Planilha Excel. BHseq V6.3. ESALQ/USP. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/282161512/>.
- Schuch, C.S., Galvão, P., De Melo, M.C., Pereira, S., 2023. Overexploitation assessment in an urban karst aquifer: the case of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environ. Res.* 236, 116820 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116820>.
- Saeedpanah, I., Golmohamadi Azar, R. 2023. Modeling the river-aquifer via a new exact model under a more general function of river water level variation. *Appl Water Sci* 13, 95. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01892-8>
- Silva, A. B. da. 1984. Análise morfoestrutural e sua aplicação no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/view/24231>
- Thornthwaite, C.W., Mather, Jr., 1955 *The Water Balance*. Laboratory of Climatology, USA.