



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Avaliação do potencial hídrico de uma bacia hidrográfica considerando as interações entre águas superficiais e subterrâneas

José Augusto Costa Gonçalves¹, Milena Stefany Lage Almeida²

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

Artigo recebido em 06/10/2023 e aceito em 26/05/2024

RESUMO

A água que integra a paisagem e garante a perenidade de diferentes sistemas ambientais é um dos recursos primordiais para o pleno desenvolvimento das atividades humanas. Ainda que em diferentes matrizes, superficial e subterrânea, a água deve ser avaliada e gerenciada de forma integrada. A sub-bacia do rio do Peixe-MG está em sua maior parte assentada sob terrenos cristalinos, um ambiente composto por falhas, fraturas e rocha alterada nas quais permite a percolação e armazenamento das águas. Para entender o potencial das águas subterrâneas na região e sua contribuição nas águas superficiais, faz-se necessário, investigar as trocas quantitativas entre esses dois escoamentos. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo identificar as interconexões hidráulicas entre o fluxo superficial e subterrâneo, por meio do estudo dos parâmetros hidrodinâmicos, caracterização geológica-estrutural. Por meio da análise dos parâmetros hidrodinâmicos foi verificada uma grande amplitude de variação dos níveis estáticos dos poços para os dois domínios hidrogeológicos principais, Cristalino e Metassedimentos-Metavulcânicos. Os diferentes valores de vazão e capacidade específica revelam a heterogeneidade das propriedades hidrodinâmicas características desses domínios. Especificamente para a capacidade específica, notou-se, em geral, aumento de sua grandeza, quanto mais próximo o poço estivesse de um lineamento mapeado. Por meio da análise geológica-estrutural, observou-se sentido preferencial dos lineamentos NW-SE, sendo estes coincidentes com os trechos retilíneos da malha de drenagem. As microbacias com uma maior trama estrutural, do ribeirão São José e do córrego Santa Cruz, apresentam também a maior contribuição de fluxo de base. Palavras-chave: interconexões hidráulicas; água subterrânea; lineamentos.

Assessment of the water potential of a watershed considering the interactions between surface and groundwater

ABSTRACT

The water that integrates the landscape and guarantees the perpetuity of different environmental systems is one of the primary resources for the full development of human activities. Although in different matrices, surface and groundwater, water should be evaluated and managed in an integrated way. The sub-basin of the Peixe River - MG is mostly located on crystalline rocks, an environment composed of faults, fractures and altered rock in which allows the percolation and storage of water. To understand the potential of groundwater in the region and its contribution to surface water, it is necessary to investigate the quantitative exchanges between these two flows. Thus, this work aims to identify the hydraulic interconnections between surface and groundwater flow through the study of hydrodynamic parameters, geological-structural characterization. Through the hydrodynamic parameters analysis it was verified a large amplitude of variation of the static levels of the wells for the two main hydrogeological domains, Crystalline and Metasediments-Metavolcanics. The different values of flow rate and specific capacity reveal the heterogeneity of the hydrodynamic properties characteristic of these domains. Specifically for the specific capacity, it was noted, in general, an increase in its magnitude, the closer the well was to a mapped lineament. Through the geological-structural analysis, it was observed a preferential direction of the NW-SE lineaments, which coincided with the rectilinear stretches of the drainage network. The micro-basins with a bigger structural plot, the São José stream and the Santa Cruz stream, also present the greatest base flow contribution.

Keywords: hydraulic interconnect; groundwater; lineament.

Introdução

A água, participa e dinamiza todos os ciclos ecológicos (ANA, 2013), como também assegura o desenvolvimento social e econômico (ANA, 2016), e estes são motivos pelos quais, há uma preocupação constante com a sua disponibilidade e qualidade. Devido ao fato de que muitas vezes inexistem medidas preditivas e abordagens sistêmicas diante dos problemas relacionados ao recurso natural, torna-se urgente identificar, hierarquizar e acelerar soluções globais (Poeter et al., 2020).

Por causa das diferentes funcionalidades da água, as avaliações das matrizes hídricas devem ser realizadas de forma equitativa, sustentável e integrada. Neste sentido, considerar as águas superficiais e subterrâneas como um tema único é um grande desafio por parte dos órgãos gestores responsáveis (ANA, 2013), devido a complexidade da interação-resposta entre estes compartimentos. Por outro lado, é um mecanismo estratégico, por assegurar o uso múltiplo e consequentemente, os anseios da sociedade (IGAM, 2021).

Nesta equação hídrica, o conhecimento sobre a variável subterrânea é consideravelmente menor que aquele já adquirido para as águas superficiais. Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (Abdalla et al., 2020; Khoi et al., 2022), a água subterrânea já fornece metade do volume da água captada para uso doméstico pela população mundial e cerca de 25% de toda a água captada para irrigação, abastecendo 38% das terras irrigadas do mundo. Para garantirmos a manutenção e a perenidade dos rios é preciso que as águas infiltras, que os reservatórios subterrâneos continuem sendo abastecidos, ou seja, em outras palavras, a matriz subterrânea é, muitas vezes, a principal fonte de água para os cursos de água superficiais, (Sunkari et al., 2021; Kumar et al., 2018; Tolche, 2020).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, criada em 1997, fundamenta o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídrico (SINGREH) no qual tem dentre seus objetivos, coordenar a gestão integrada das águas. Para que isto ocorra de forma eficiente, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabelece, a partir da Resolução nº 202/2018 (BRASIL, 2022), Art. 3º, que sejam contemplados nos estudos de gestão integrada, as seguintes avaliações: I - delimitação das áreas de recarga e de contribuição dos aquíferos para os rios diretamente conectados; II - estimativa da contribuição dos aquíferos para a vazão de base dos rios; III - estimativa da recarga e as reservas exploráveis e renováveis; IV - estimativa da

disponibilidade hídrica integrada subterrânea e superficial para os diversos usos, considerando os incisos anteriores; e V - as redes de monitoramento hidrometeorológica e hidrogeológica necessárias.

Os resultados dos estudos realizados garantem aos órgãos gestores a previsibilidade quanto a alteração da qualidade ecológica da bacia hidrográfica, e reforça que, apesar das técnicas necessitarem de dados consistidos e suficientes para a caracterização dos sistemas de águas subterrâneas, tal investimento não é tão alto quanto ao de remediar esse sistema (Rosenberry e Labaugh, 2008).

A bacia do Rio do Peixe, é palco de importantes indústrias do segmento de mineração e siderurgia, com atividades iniciadas na década de 1942. Tal bacia está assentada, em sua grande parte, sobre o aquífero fissural, que detém uma rede de fraturas que transportam e armazenam a água infiltrada, possuindo assim, uma arquitetura que oferece um maior grau de complexidade e dinamismo. Além disso, o padrão das fraturas indica as regiões mais favoráveis para percolação e armazenamento de água. Ciente do valor desta abordagem para contextos geológicos como este, torna-se essencial o aprofundamento nessa temática, (Gonçalves et al., 2023).

Este estudo tem como principal objetivo investigar as interconexões hidráulicas existentes na bacia hidrográfica do Rio do Peixe, a fim de compreender melhor sobre os fatores que podem influenciar na interação das águas superficiais e subterrâneas, e, portanto, contribuir para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos disponíveis.

A matriz de água superficial e subterrânea diferem entre si no que diz respeito as suas características espaciais e temporais, entretanto, ambas devem ser consideradas nas avaliações ambientais como um recurso natural coexistente. Tal definição é possível pois essas águas fazem parte de um mesmo ciclo hidrológico, relacionando-se de forma quantitativa e qualitativa, visto que a água superficial infiltra no solo e recarrega o aquífero, e a água subterrânea aflora nas áreas de descarga, compondo assim uma parcela do volume superficial, (Elvis et al., 2022; Adeyeye et al., 2019; Cheng et al., 2019; Doke et al., 2021).

De forma a complementar a avaliação dos recursos hídricos, o conceito de bacia hidrogeológica deve ser considerado, ou seja, a extensão limitada pelas zonas de recarga e descarga do aquífero (SNIRH, 2015). Conceitua-se zona de recarga, a região onde as águas ou plumas de umidade descendentes alcançam o topo da zona

saturada dos aquíferos, e as zonas de descarga, os pontos ou áreas onde as águas retornam à superfície (BRASIL, 2022; Beato e Bertachinni, 2005). Os autores complementam que “A definição precisa dos limites entre bacias hidrogeológicas deve transcender os limites físicos entre tipos de rochas, fácies hidrogeológicas e estruturas, mas deve também considerar os aspectos do tipo de fluxo hidrogeológico e regime hídrico da rede de drenagem superficial (rios efluentes ou influentes)”.

As interconexões entre as duas bacias permitem a transferência de água podendo ocorrer por meio da infiltração de água da superfície via zona de aeração (zona insaturada) ou por meio da infiltração de água superficial ou subterrânea por meio da zona saturada (Sapkota et al., 2021; Ifediegwu, 2022).

Em um ambiente hidraulicamente conectado, a gestão integrada deve ser priorizada para os seguintes casos: áreas com elevada demanda hídrica, especialmente quando relacionada aos usos consultivos; áreas com estresse hídrico; regiões fronteiriças (países, estados e bacias); locais com risco de intrusão salina e rebaixamento (Gonçalves et al., 2023; Rosenberry e Labaugh, 2008).

Entende-se que a aplicação do balanço hídrico pode ocorrer em escala local, em uma planta de operações ou um trecho de um curso d'água por exemplo, como também pode ser calculado para uma escala regional, sendo capaz de definir o comportamento hídrico em toda uma bacia hidrográfica. Logo, têm-se a principal variável de entrada que corresponde ao volume concentrado no tempo (precipitação) e a saída de água ocorrendo de maneira distribuída no tempo (escoamento). Neste processo, há o escoamento superficial e subterrâneo, designados, respectivamente, como escoamento rápido e lento (Almeida e Gonçalves, 2021).

Na matriz de água superficial, essa velocidade é diretamente proporcional a inclinação da superfície. Dessa forma, quanto maior a diferença de potencial, dada uma distância lateral constante, maior será a velocidade do fluxo. No fluxo da água subterrânea, necessita-se considerar, além da inclinação do nível d'água, a permeabilidade do subsolo e a viscosidade da água (Muldoon e Bradbury, 2005; Andualet e Demeke, 2019).

Nas rochas cristalinas, basicamente, a qualidade da água subterrânea está associada a três processos: tempo de residência, condições de fluxo e qualidade da água de recarga. O tempo de residência e as condições de fluxo, que controlam

as condições de dissolução, estão associados diretamente com a geologia (litologia, estrutura e tectônica), enquanto existe uma grande quantidade de variáveis que influenciam na qualidade da água de recarga (Feitosa et al., 2008; Lopes et al., 2023; Fossen, 2017).

As características climáticas, morfológicas e geológicas, influenciam diretamente nos aspectos quantitativos, qualitativos e de transporte da água no sistema superficial e subterrâneo. As modificações inerentes às atividades antrópicas, também devem ser contabilizadas, como por exemplo, o bombeamento das águas subterrâneas que pode alterar o comportamento da descarga, induzir o fluxo do curso d'água e reduzir a água superficial disponível e a contaminação direta ou indireta, (Lee et al., 2020; Rane e Jayaraj, 2022).

De acordo com a Estratégia Nacional para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos 2022-2040, as análises para concessão das outorgas consideram apenas a disponibilidade hídrica superficial e, no caso de poços tubulares, a vazão de teste ou a reserva do aquífero. Esta análise dissociada pode gerar uma disponibilidade superestimada, uma vez que as vazões mínimas de referência para a concessão da outorga de águas superficiais são em sua maior parte provenientes do escoamento de base provido pelo aquífero (Neto et al., 2001).

Conforme define o IGAM (2021), a outorga é o instrumento legal que assegura ao usuário o direito de utilizar os recursos hídricos, e vista pela ótica da matriz subterrânea, um mecanismo capaz de garantir a sustentabilidade e proteção dos aquíferos e a qualidade da captação dessas águas, de modo que os critérios para a sua emissão deverão ser baseados em estudos sobre a disponibilidade hídrica subterrânea e a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, (Guimarães et al., 2010). Dessa forma, antes da liberação de uso, estudos sistemáticos no âmbito das duas matrizes deverão ser realizados.

Material e métodos

Os materiais/ferramentas utilizados foram: recursos computacionais, sendo eles, programas para análises estatísticas (Excel versão 16), geração de conteúdo gráfico (Excel versão 16 e Power Bi versão 2.10) e produção de mapas e diagramas (QGIS versão 3.0.4, ArcGis 10.8 e Stereonet). A utilização dos dois programas GIS, derivou-se da necessidade de utilizar um para tratamento da imagem Alos (QGIS).

As informações técnicas e os dados consistidos para caracterizar a área de estudo foram

coletadas através dos meios eletrônicos. Foram selecionados trabalhos anteriormente realizados para a bacia hidrográfica do Rio do Peixe e região, no intuito de compilar informações que subsidiarão as análises necessárias para a avaliação da interconectividade hídrica. Informações sobre a geologia e hidrogeologia também foram incorporadas a fim de obter uma melhor compreensão do comportamento da matriz de água subterrânea.

Para a caracterização física e climatológica foram utilizados os dados da estação Nova Era Telemétrica, código 1943100 ANA/CPRM (Agência Nacional de Águas/ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), visto que a mesma possuía a série histórica mais completa, com dados de 2003 a 2021. As demais estações inseridas dentro da bacia hidrográfica em estudo, apresenta inconsistência em alguns dos dados obtidos e uma curta série histórica.

A seleção de dados secundários da bacia hidrográfica, à saber: malha hidrográfica IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas), outorgas (IGAM), pedologia FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente), geologia (CPRM), hidrogeologia (CPRM), modelo digital de elevação *Alos Palsar* (ASF DAAC) e imagem do satélite Sentinel. Os arquivos em *shapefile* e a imagem do satélite passaram por recorte no programa QGIS versão 3.0.4 a fim de representar apenas a área de interesse.

O acervo de dados dos poços alocados na sub-bacia do Rio do Peixe foi obtido por meio do IGAM. A integração das diferentes bases de dados permitiu a complementação dos dados dos poços tubulares.

Foram inventariados e cadastrados os poços tubulares profundos com as seguintes informações disponíveis: referência geográfica, vazão outorgada, nível estático, nível dinâmico e profundidade do poço. Para as análises estatísticas foram considerados todos os poços e para a

avaliação hidrodinâmica foram excluídos aqueles que não apresentaram pelo menos um dos parâmetros supracitados. Em sequência, foram realizadas análises estatísticas por meio dos gráficos de frequência acumulada e correlação.

Os lineamentos foram feitos a partir da imagem do modelo digital de elevação do *Alos Palsar*, com resolução espacial de 12,5 metros. Foram aplicados os sombreamentos nos azimutes de insolação de 0°, 45°, 90° e 135° a fim de destacar as feições das estruturas nos pontos cardeais e colaterais, N-S, NE-SW, E-W e SE-NW.

A vetorização dos lineamentos por meio da fotointerpretação ocorreu no software ArcGis 10.8, na escala de 1:100.000, e de forma complementar, foi utilizada a imagem do *software* Google Earth, a fim de validar os resultados com o ajuste da topografia, utilizando a função de exagero vertical disponibilizada no software, permitindo dessa forma, a visualização dos lineamentos de forma mais realista.

Utilizando a extensão AzimuthFinder 1.1 foram extraídos os azimutes por meio do método de frequência dos comprimentos dos lineamentos. Tais informações foram exportadas em formato txt e importadas no programa online Stereonet para geração do diagrama de roseta da sub-bacia do Rio do Peixe.

Em termos locais, a bacia hidrográfica do Rio do Peixe representa a maior área no município de Itabira, e uma pequena parcela à sudeste, em Nova Era. Pertencente a Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Rio Piracicaba (UPGRH-DO2), a bacia que fica localizada no médio Piracicaba, entre as coordenadas UTM, 672 e 714 km, direção Oeste-Leste, 7812 e 7840 km, direção Sul-Norte, possui uma área de drenagem de 410 km² e todos seus afluentes (Conceição, Candidópolis, Água Santa, Cachoeira, Santa Cruz, Goiabeira, São José e Cabral) convergem para o denominado Rio do Peixe, Figura 1, (CBH DOCE, 2010).

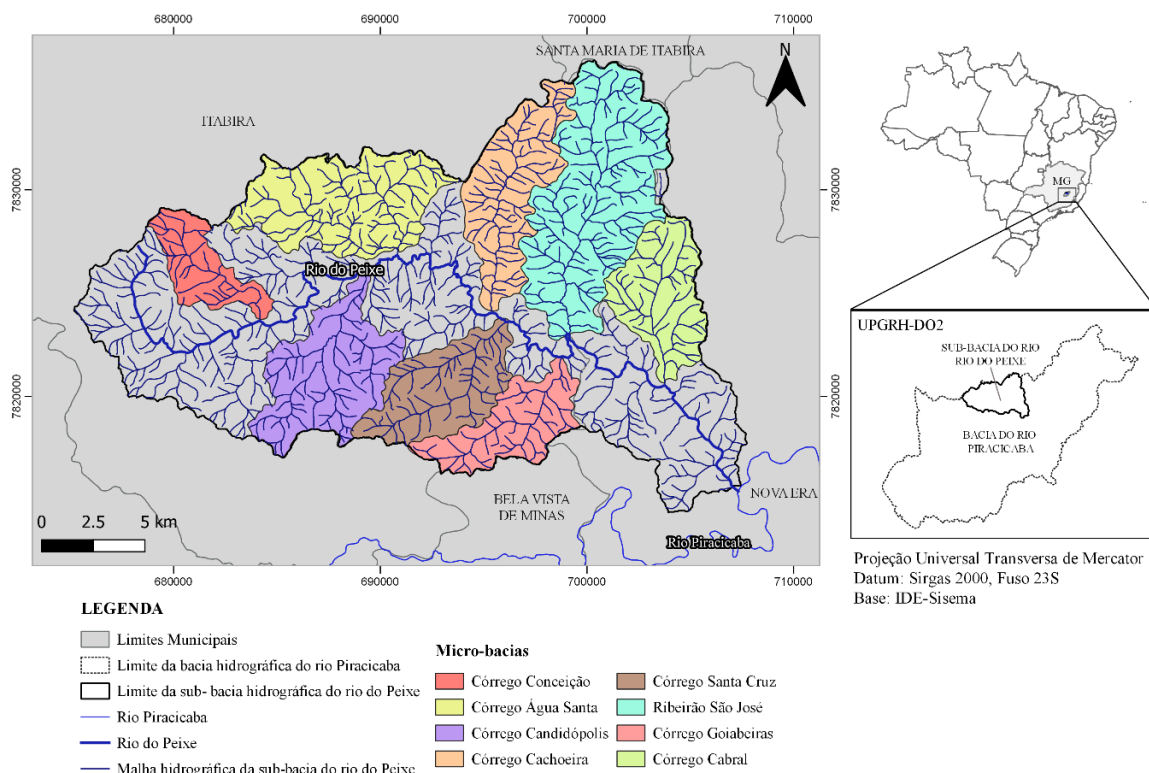


Figura 1. Delimitação da bacia hidrográfica do Rio do Peixe

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe, localizada majoritariamente em Itabira-MG e com pequena parcela à sudeste em Nova Era-MG, possui, segundo Koppen, classificação climática Cwa. O clima subtropical úmido é dividido em dois períodos sazonais marcantes, afetados pelas monções, configurando nesta região um verão com alto acumulado de chuva e secas rigorosas. Os

dados da estação 1943100 mostram que os valores de precipitação média mensal variam nos meses mais chuvosos entre 80 e 300 mm, enquanto no período de estiagem, o quantitativo pluviométrico fica constantemente abaixo de 100 mm. Com base nos valores históricos, de out/2003 a set/2021, tem-se uma média plurianual de 1279,09 mm, Figura 2, (CBH DOCE 2010).

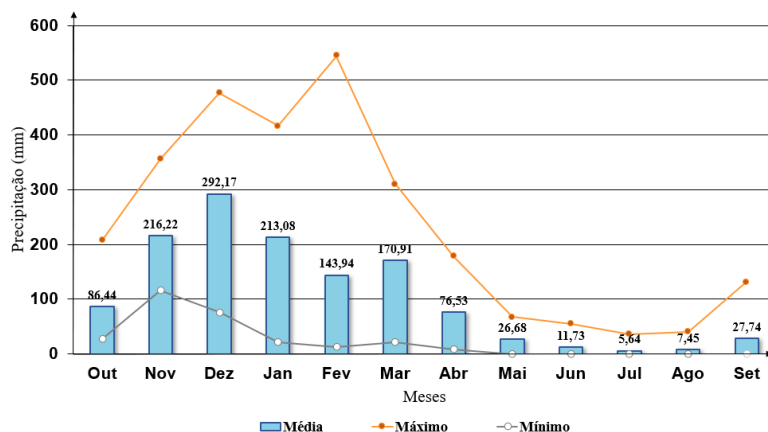


Figura 2. Pluviometria histórica média, máxima e mínima da sub-bacia do Rio do Peixe

As feições morfoestruturais são definidas com base nas curvas de nível. Para conhecer o desenho do relevo local, foi utilizada imagem do radar Palsar, produto da missão ALOS, com

resolução espacial de 12,5 m. O relevo sombreado foi aplicado para um melhor conhecimento espacial da escala hipsométrica, Figura 3.

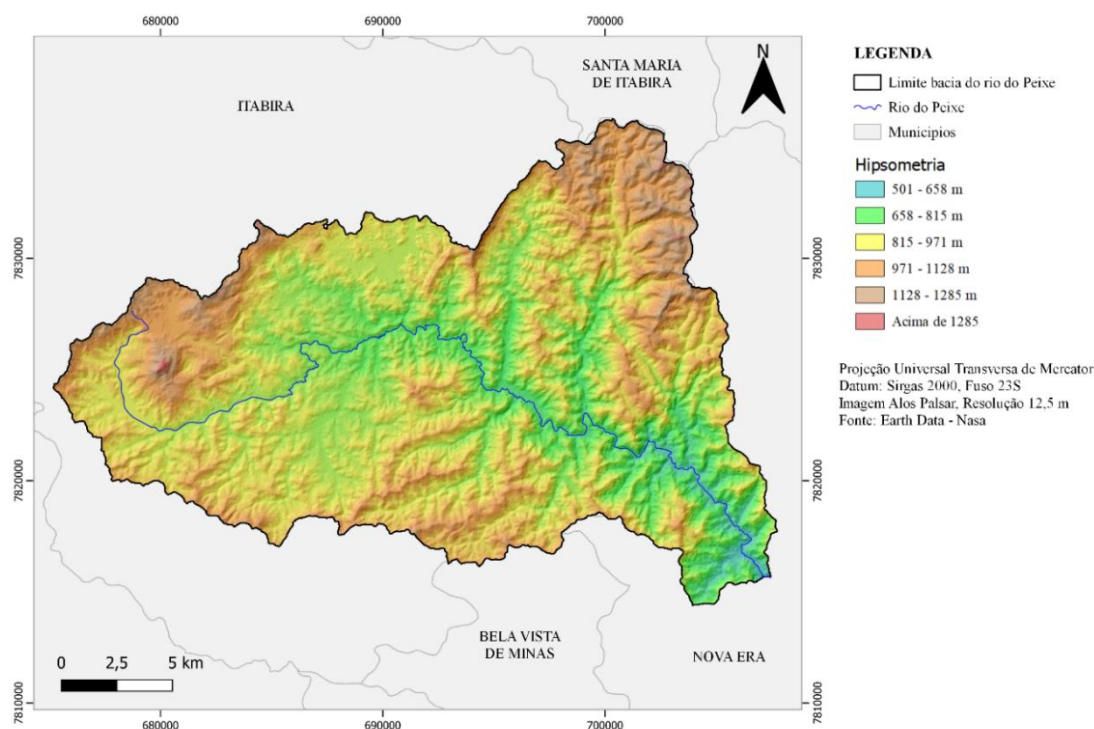


Figura 3. Mapa hipsométrico da sub-bacia do Rio do Peixe

O relevo regional é estruturado, com divisores de águas definidos nas microbacias, principalmente a partir da porção média da bacia. A altitude mínima e máxima da bacia é de 501 e 1285 m, respectivamente, sendo que as mais elevadas estão situadas à noroeste da área de estudo e os menores valores, nos vales dos rios, (Andrade, 2012). Na geologia local, destaca-se o sinclinal Itabira, na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, sendo

representada por onze unidades litoestratigráficas que podem ser discretizadas em: 1) a Suíte Borrachudos; 2) Suíte Catas Altas da Noruega; 3) Suíte Santa Rita; 4) Grupo Itacolomi; 5) Grupo Sabará; 6) Grupo Piracicaba; 7) Grupo Itabira; 8) Grupo Caraça; 9) Grupo Nova Lima; 10) Complexo Guanhanês; e 11) Complexo Santa Bárbara, (Jordt-Evangelista et al., 2016), Figura 4. A extensão dos litotipos pode ser consultada na Tabela 1.

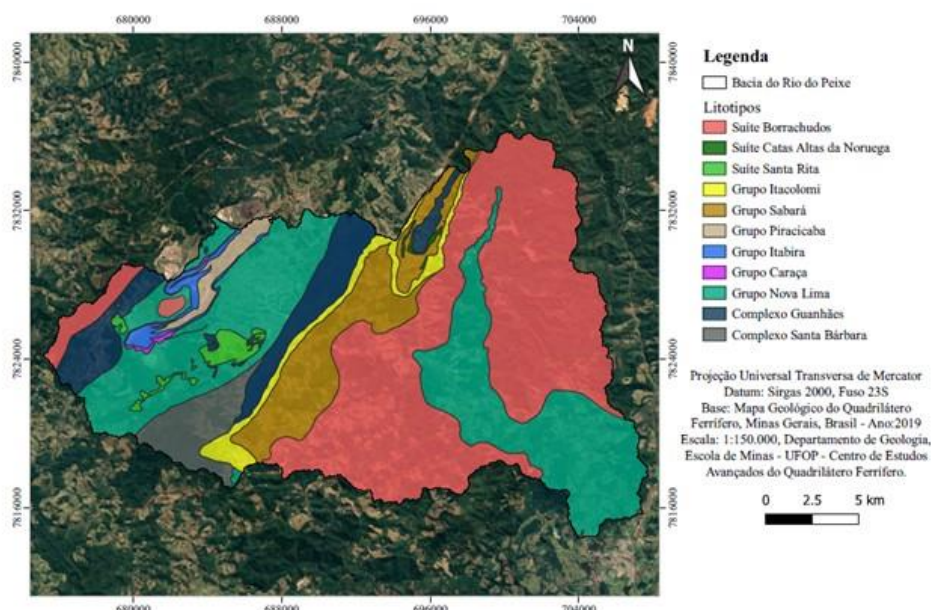


Figura 4. Geologia da sub-bacia do Rio do Peixe – MG, Fonte: Adaptado Endo et al., 2019.

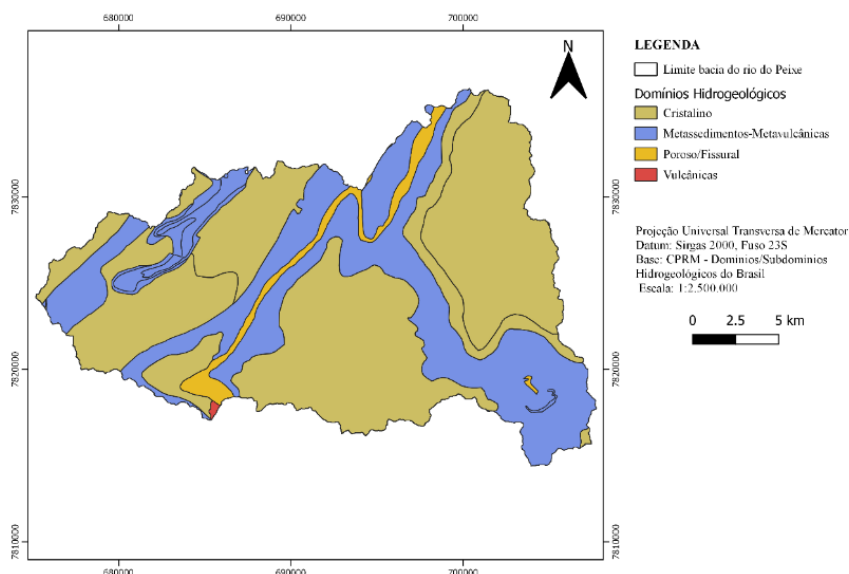
Tabela 1. Área por litotipo da sub-bacia do Rio do Peixe

Litotipo	Área	
	Km ²	%
Suíte Catas Altas da Noruega	0,91	0,22
Suíte Santa Rita	5,61	1,37
Suíte Borrachudos	164,9	40,21
Grupo Itacolomi	12,78	3,12
Grupo Sabará	38,65	9,42
Grupo Piracicaba	6,44	1,57
Grupo Itabira	5,1	1,24
Grupo Caraça	1,38	0,34
Grupo Nova Lima	125,47	30,60
Complexo Guanhães	32,23	7,86
Complexo Santa Barbará	16,62	4,05

Distingue-se quatro domínios hidrogeológicos na bacia, Figura 5. O domínio Cristalino cobre 62% da bacia, sendo o domínio hidrogeológico predominante na bacia. Tem como característica zonas aquíferas descontínuas, localizadas, heterogêneas e anisotrópicas. Quando há existência de lineamentos, fraturas, rocha são fraturada e manto de intemperismo, o processo de recarga natural ocorre por toda extensão exposta da rocha, enquanto o processo de descarga natural é evidenciado em pequenas nascentes nos fundos dos vales. Por ser espesso, propicia a recarga das fraturas subjacentes e funciona como uma fonte de armazenamento para alimentação dos rios, tornando o embasamento cristalino um importante reservatório em períodos de estiagem, (Gonçalves et al, 2019; Gonçalves et al., 2020). O domínio dos Metassedimentos/Metavulcânicas corresponde a

35% da bacia, e formam aquíferos livres aleatórios, descontínuos e pouco extenso.

O domínio das rochas Vulcânicas, representando 3,38% da área, na porção sul, apresenta porosidade secundária, e de forma menos dominante, porosidade primária, sendo ela intrínseca as estruturas vesiculares. O domínio Poroso/Fissural, possui uma área de 0,09%, e ocorre predominantemente em uma faixa sentido nordeste na região central da bacia, bem como em uma pequena porção a sudeste. Com largura variável, ela divide o domínio dos Metassedimentos-metavulcânicas. Considerando a sua propriedade de aquífero misto, mostra zonas aquíferas granulares, apresentando porosidade primária baixa à média e zonas aquíferas fissurais, com porosidade secundária. Tal domínio possui médio potencial hidrogeológico.

**Figura 5.** Domínios Hidrogeológicos da sub-bacia do rio do Peixe, Adaptado Endo et al., 2019

Resultados

De acordo com informações obtidas por meio do IGAM, em Itabira, 59 outorgas são destinadas para o uso de água subterrânea e 68 para o uso de água superficial, e isto, até o início do ano de 2022. Para as águas subterrâneas, foram

verificadas três modalidades de exploração: por meio de um poço tubular (92%); rebaixamento do nível d'água (5%); e nascente (3%). Dos processos avaliados, apenas 26 deles apresentaram a qual finalidade seu uso se destinava, Figura 6.

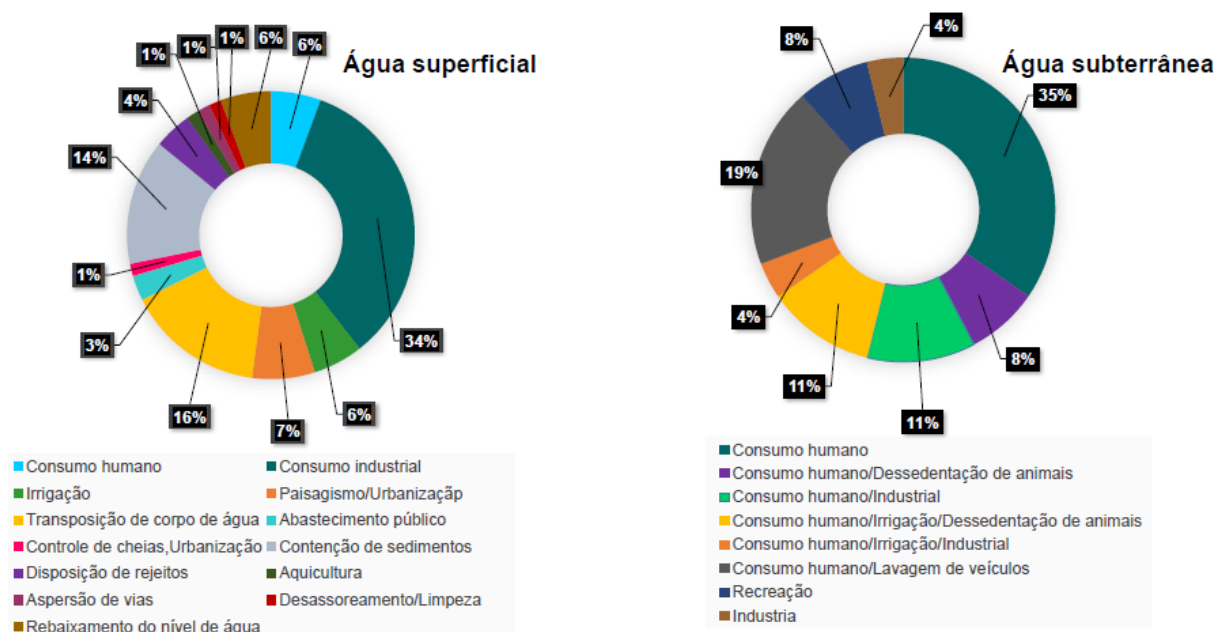


Figura 6. Finalidades de uso das outorgas deferidas

Observa-se ainda que para a matriz de água subterrânea, os pedidos de outorga cresceram nos últimos anos (2019, 24 solicitações; 2020, 10

solicitações), sendo possível verificar na Figura 7 o comportamento temporal entre 2009 a 2020 das outorgas deferidas para a bacia hidrográfica.

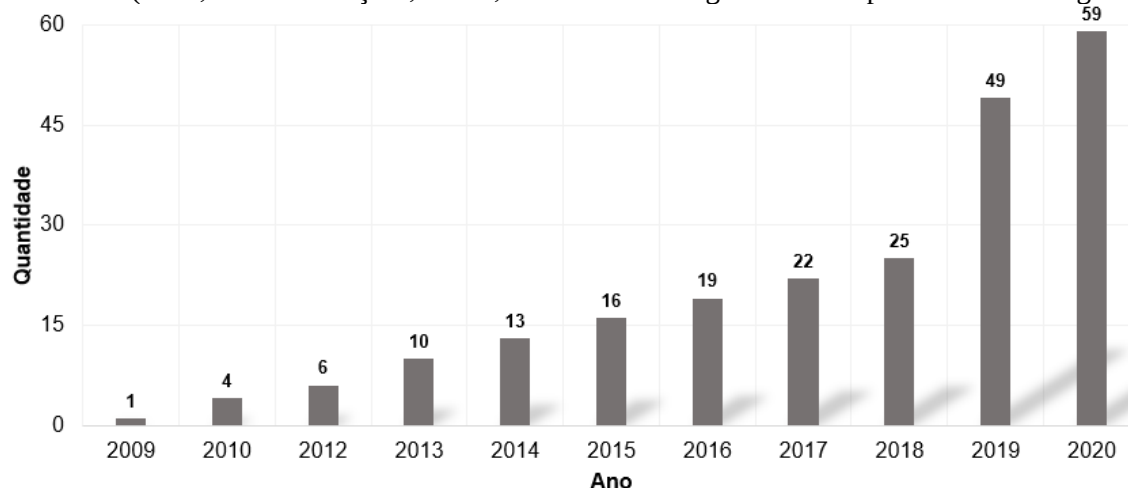


Figura 7. Acumulado de outorgas de água subterrânea, Fonte: IGAM, 2022.

Foram analisados os seguintes parâmetros dos poços tubulares outorgados: vazão, nível estático, nível dinâmico e capacidade específica. A profundidade do poço é uma variável construtiva que auxilia na interpretação dos resultados, e por isso, está também foi considerada nas análises Das

outorgas de água subterrânea compiladas, três estão localizadas fora do limite da sub-bacia do Rio do Peixe. Dessa forma, verifica-se na Figura 8, os seguintes quantitativos por domínio hidrogeológico: Cristalino (25), Metassedimentos-Metavulcânicas (28), Poroso fissural (2) e Vulcânicas (1).

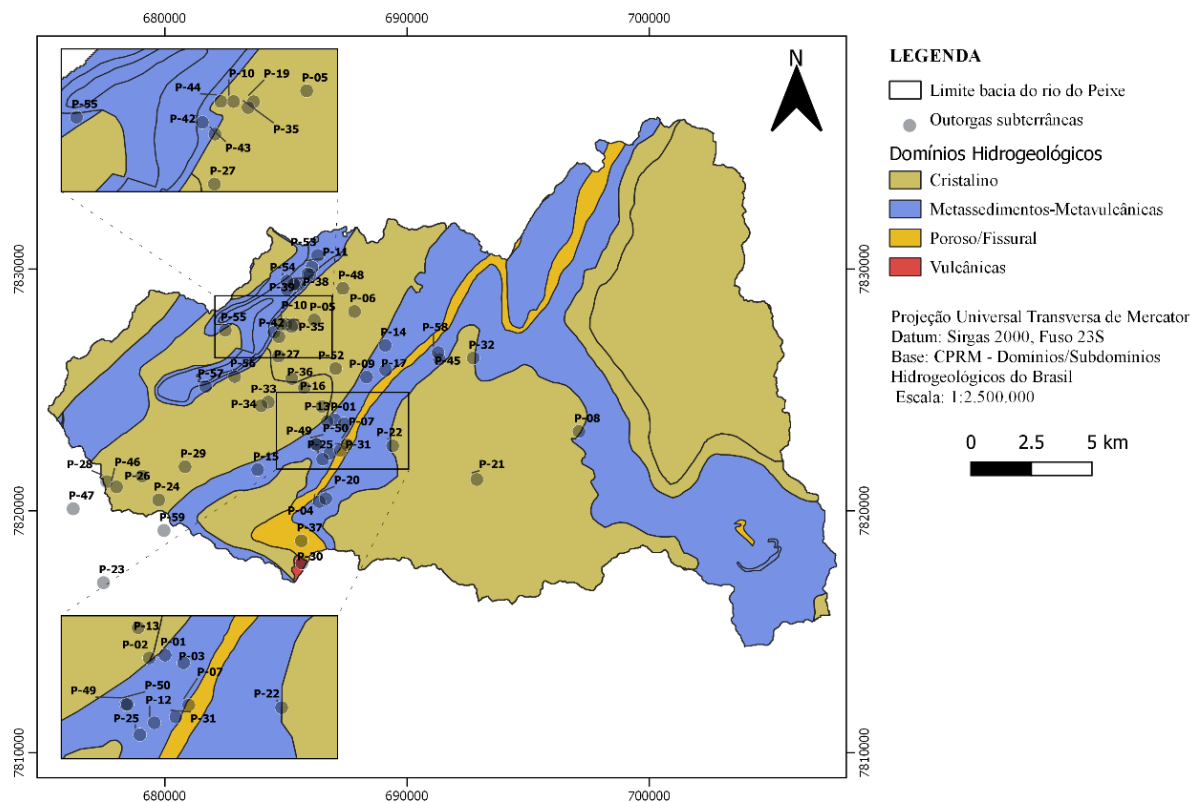


Figura 8. Outorgas subterrâneas distribuídas na sub-bacia do Rio do Peixe, Adaptado Endo et al., 2019.

No domínio hidrogeológico Cristalino, apenas 15 poços tubulares apresentaram os parâmetros necessários para avaliação hidrodinâmica, sendo eles, P-01, P-05, P-06, P-09,

P-10, P-13, P-19, P-21, P-24, P-26, P-27, P-28, P-32, P-33 e P-34. Na Figura 9, pode ser observado o nível estático dos poços.

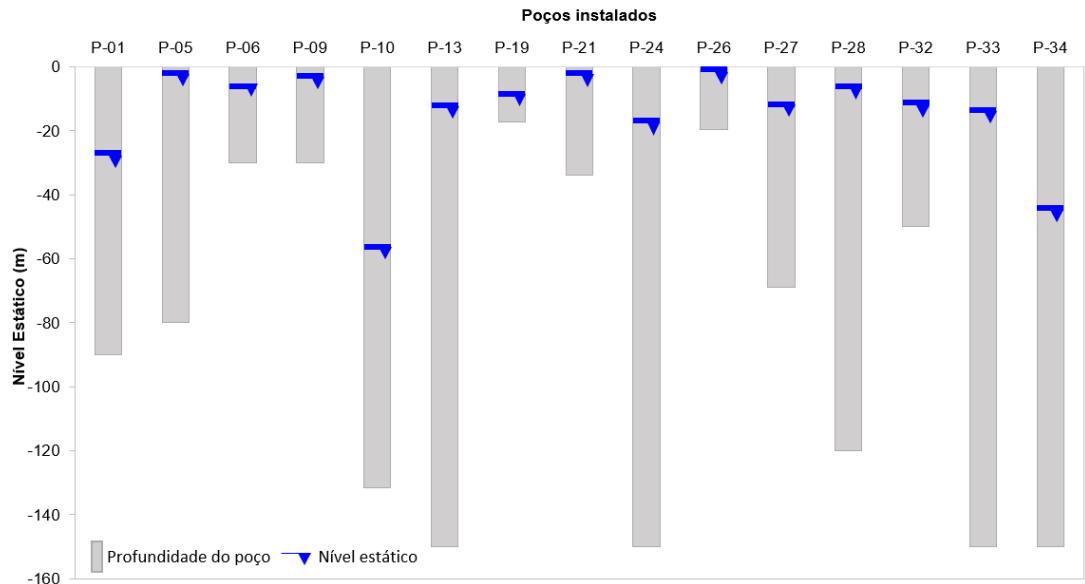


Figura 9. Nível estático dos poços alocados no domínio hidrogeológico Cristalino

Dentre os poços, os que possuem nível estático mais próximos a superfície são, P-5 (2 metros), P-6 (6 metros), P-9 (3 metros), P-21 (1,9 metros), P-26 (0,9 metros) e P-28 (6,2 metros). Os

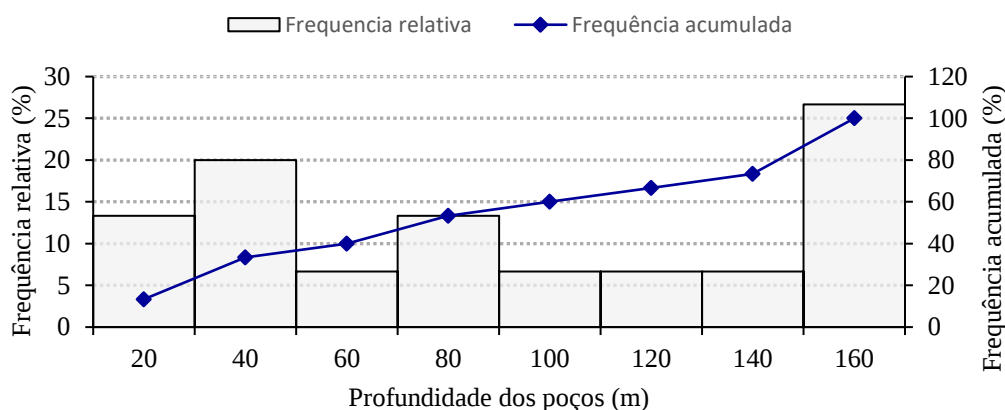
demais apresentam nível estático mais profundo, à saber, P-01 (27 metros), P-10 (56,18 metros), P-13 (12 metros), P-19 (8,6 metros), P-24 (16,8 metros),

P-27 (11,7 metros), P-32 (11,2 metros), P-33 (13,6 metros) e P-34 (44 metros).

Dentre os poços que possuem informação litológica, apenas o P-5 possui na composição do saprólito areia argilosa, enquanto nos demais poços, argila. No manto de alteração/regolito, têm-

se a atuação do intemperismo modificando as propriedades da rocha, que em geral, é o Gnaisse. Observa-se para o P-5 e P-10, que o material da parte inferior (rocha sã) dá origem ao material alterado indicado na camada superior, Gráfico 1.

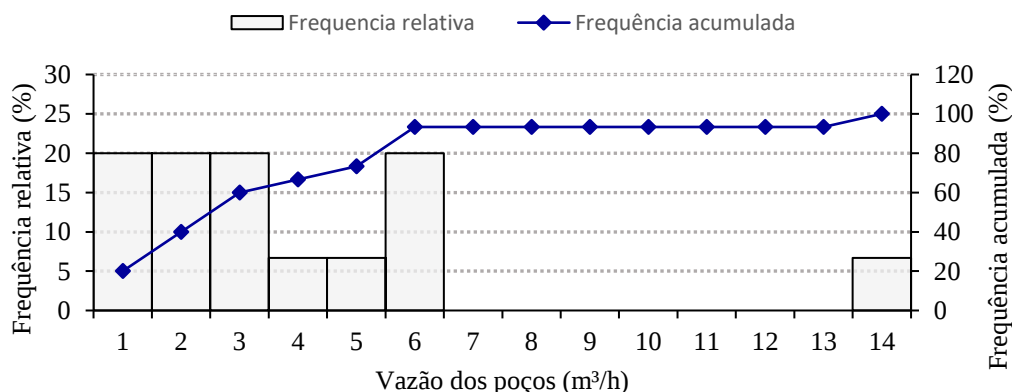
Gráfico 1. Distribuição de frequências das profundidades no domínio hidrogeológico cristalino



A quantidade de perfurações foi realizada nos limites entre 20 e 40 metros e 140 e 160 metros, e isto, considerando a malha amostral de dados secundários. Para as demais profundidades, foi registrado um total de dois poços tubulares, no máximo, por intervalo. Nota-se uma distribuição

normal da frequência acumulada, sendo que aproximadamente 50% dos poços apresentam profundidade de até 80 metros. Depois dessa profundidade, incremento considerável é visualizado a partir de 140 metros, Gráfico 2.

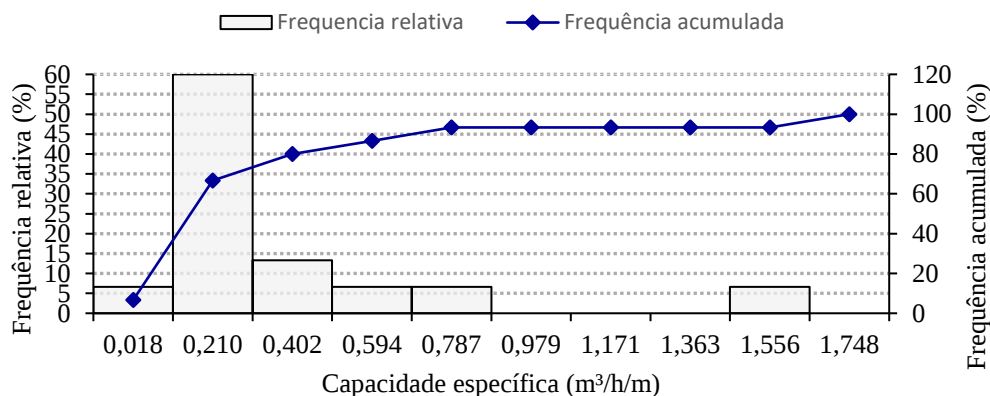
Gráfico 2. Distribuição de frequências de vazão no domínio hidrogeológico Cristalino



O domínio hidrogeológico Cristalino possui zonas com maior quantidade de fraturas, maior quantidade de outorgas com vazões mais baixas. Dos poços considerados, a vazão mínima foi de 0,7 m³/h, máxima de 14 m³/h e mediana de 3 m³/h, respectivamente. A linha de frequência acumulada mostra que cerca de 90% dos poços apresentam

vazões de até 6 m³/h. A capacidade específica dos poços, mostram um comportamento similar ao da vazão, onde são verificados uma maior densidade de valores mais reduzidos, Gráfico 3. Essa variável apresenta intervalo de 0,018 a 1,556 m³/h/m e valor mediano de 0,114 m³/h/m, com resultados mais frequentes abaixo de 0,21 m³/h/m.

Gráfico 3. Distribuição de frequências da capacidade específica no domínio hidrogeológico cristalino



Os níveis estático e dinâmico foram avaliados, sendo a curva do comportamento do nível estático exponencial, na qual podemos extrair o valor mínimo e máximo de 0,9 e 56,18 m, respectivamente, ao passo que a curva do nível dinâmico é logarítmica normal, variando de 2,45 a 88,00 m. Já a mediana para estes parâmetros é de 11,20 e 37,00 metros,

respectivamente, para o nível estático e dinâmico, Gráfico 4. A variação da capacidade específica em relação a profundidade pode ser verificada no Gráfico 5, e em relação ao Nível Dinâmico no Gráfico 6

Gráfico 4. Distribuição das frequências do NE e ND no domínio hidrogeológico cristalino

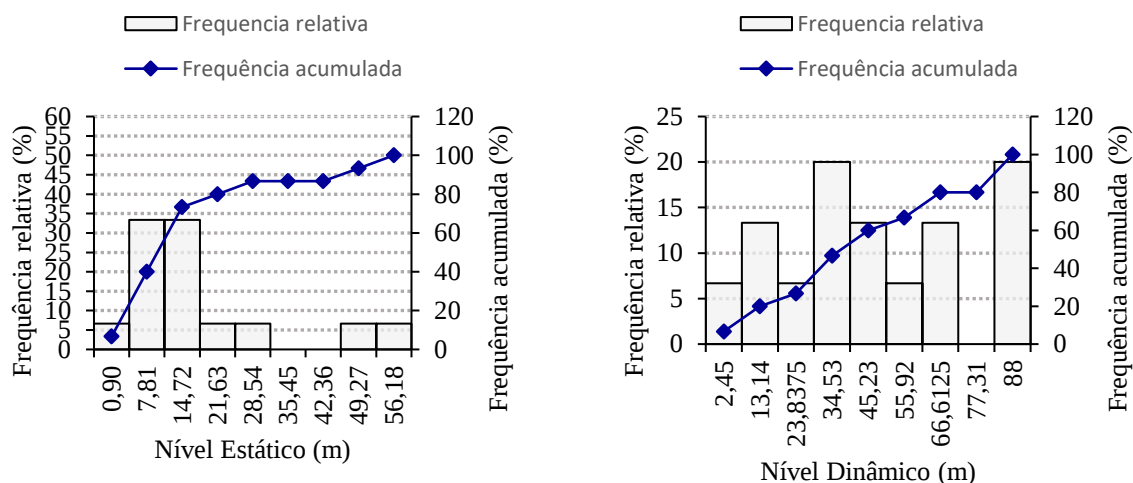


Gráfico 5. Capacidade específica em função da profundidade no domínio hidrogeológico cristalino

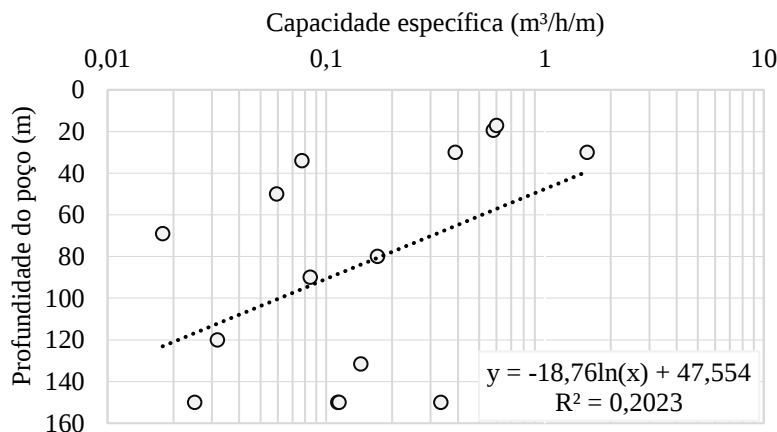
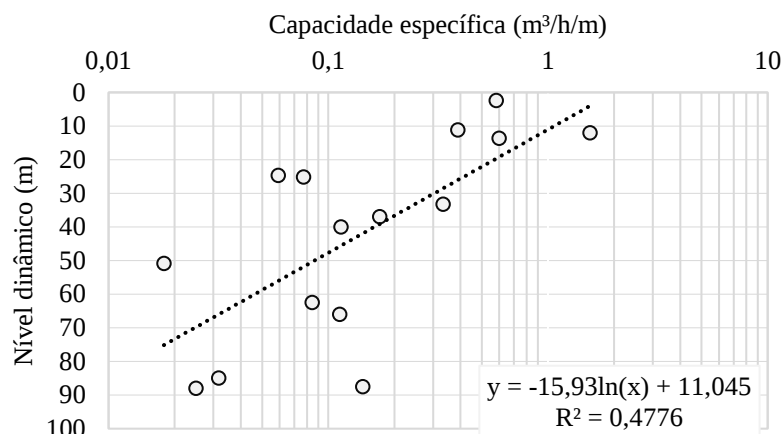


Gráfico 6. Capacidade específica em função do ND do poço no domínio hidrogeológico cristalino



Nos aquíferos fissurais, as descontinuidades e anisotropia, condicionam uma maior variabilidade dos parâmetros hidrodinâmicos justificando a baixa correlação na análise profundidade *versus* capacidade específica, porém, entre o nível dinâmico *versus* capacidade específica, o coeficiente de correlação aumenta.

No domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas, apenas 10 poços tubulares apresentaram os parâmetros necessários para avaliação hidrodinâmica,

Figura 10.

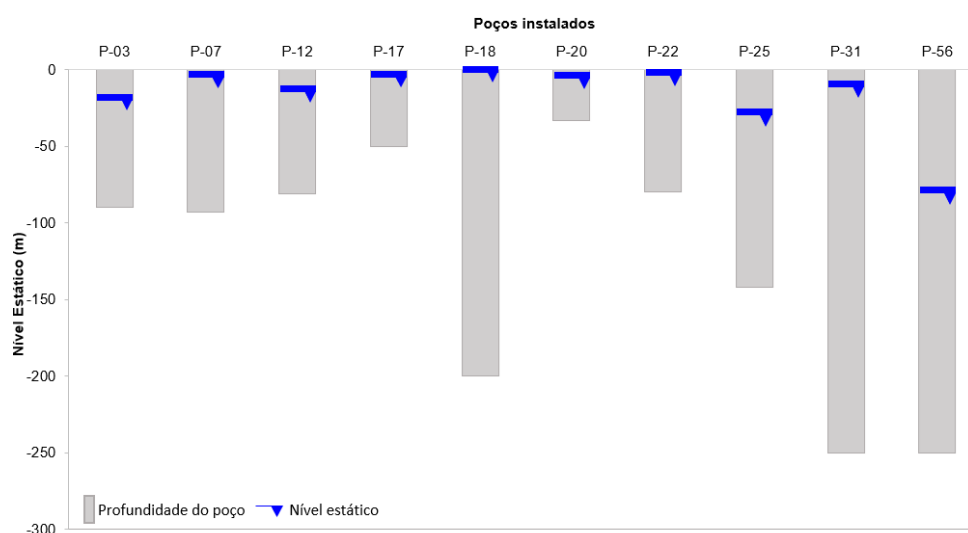


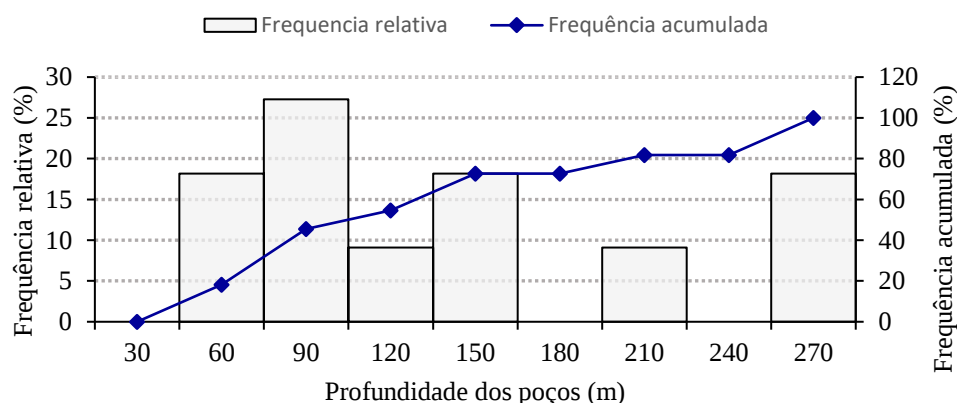
Figura 10. NE dos poços alocados no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas

Verifica-se na Figura 10 que, os poços com nível estático mais próximos a superfície para os poços P-07 (3 metros), P-17 (3 metros), P-20 (4,2 metros) e P-22 (1,79 metros). Já os níveis mais profundos foram constatados no P-03 (18,4 metros), P-12 (12,42 metros), P-25 (28 metros), P-31 (9,5 metros) e P-56 (78,73 metros). Especificamente para o P-18, o nível estático foi cadastrado como 0 metros.

Para o domínio dos Metassedimentos-Metavulcânicas, apenas o P-12 apresentou informação para o litotipo, sendo ele situado em

um ambiente mais argiloso em sua camada de solo mais superficial. Neste domínio há uma distribuição irregular do número de perfurações, sendo verificados o mesmo percentual de frequências para poços perfurados entre 30 e 60 metros, 120 e 150 metros e entre 240 e 270 metros. Tal comportamento sugere que existe uma maior possibilidade de encontrar zonas com maior potencial hidrogeológico, ou seja, fraturas com características de comprimento e espessura mais favoráveis que aquelas encontradas no embasamento cristalino, Gráfico 7.

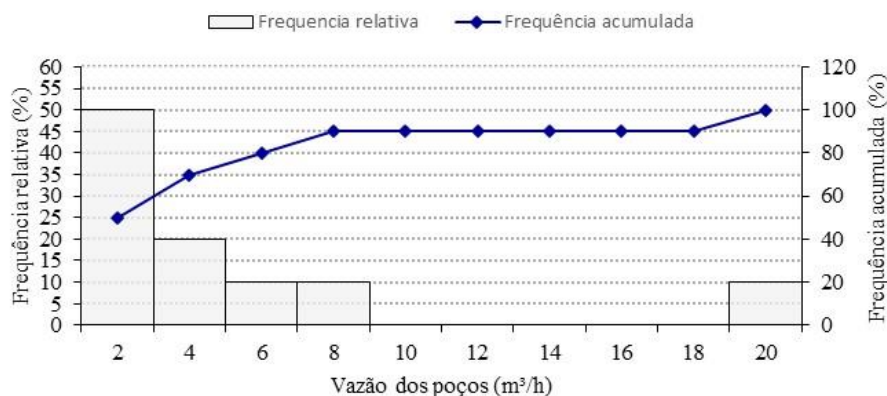
Gráfico 7. Distribuição das frequências das profundidades no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas



Quanto as vazões, valores mais representativos são verificados em menor quantidade na área de estudo, sendo que apenas

10% do conjunto amostral apresenta vazões acima de 20 m³/h. Os demais 90% correspondem às vazões de até 8 m³/h, Gráfico 8.

Gráfico 8. Distribuição das frequências de vazão no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas



No Gráfico 9, verifica-se que a capacidade específica apresenta um comportamento similar aos da vazão em termos de proporções. Os valores entre 0,520 e 0,594 m³/h/m, representam cerca de 10% do total, e os demais representam 90% do conjunto de outorgas analisadas. Para o NE foi verificado valor mínimo e máximo de 1,79 e 78,73

m, respectivamente, ao passo que para o ND, esta variação ficou entre 17,10 e 118,86 m, Gráfico 10. O Gráfico 11, mostra a relação entre profundidade e produtividade e o Gráfico 12, entre profundidade e ND.

Gráfico 9. Distribuição das frequências da capacidade específica no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas

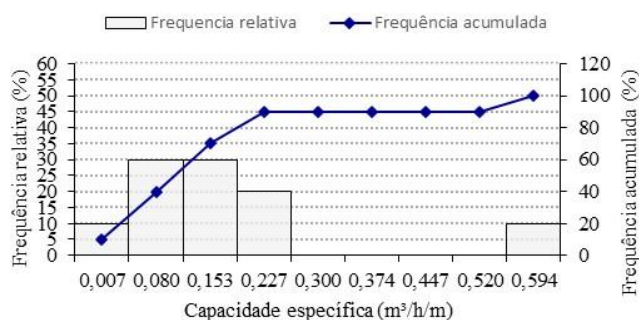


Gráfico 10. Distribuição das frequências do NE e ND no domínio Metassedimentos-Metavulcânicas

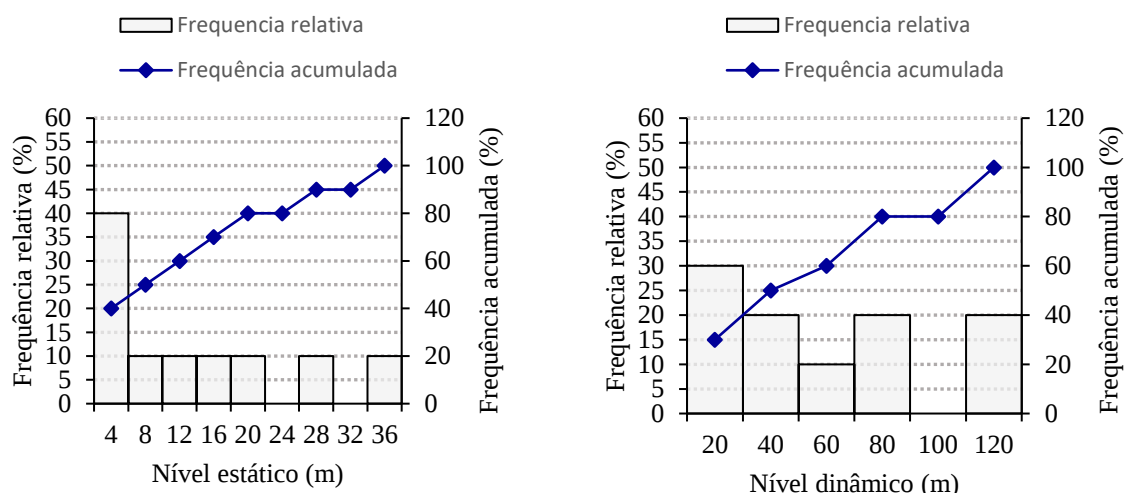


Gráfico 11. Capacidade específica em função da profundidade no domínio Metassedimentos-Metavulcânicas

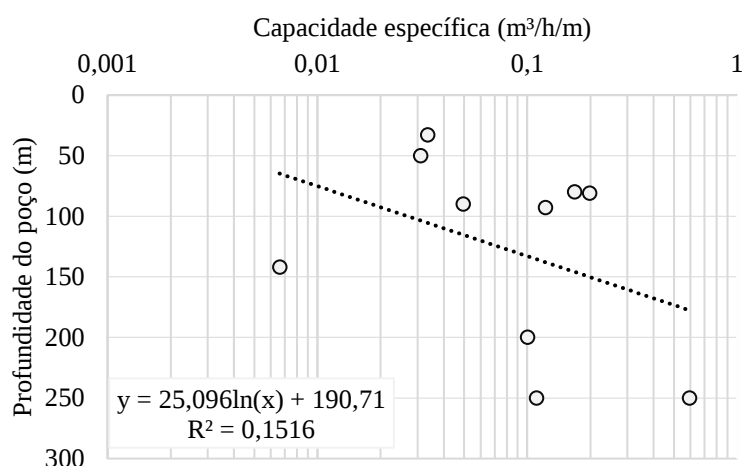
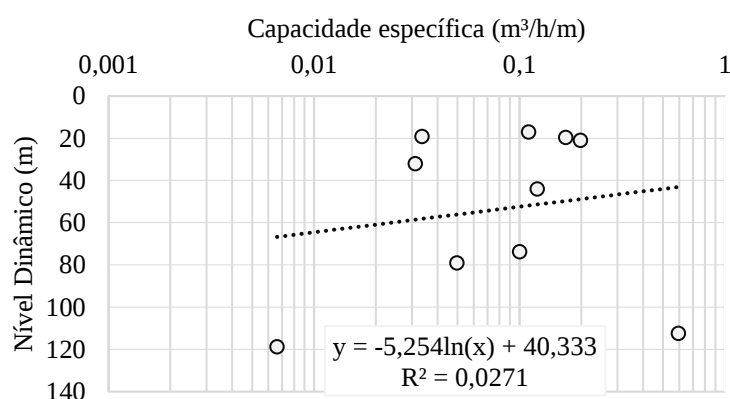


Gráfico 12. Capacidade específica em função da profundidade no domínio Metassedimentos-Metavulcânicas



Verifica-se uma baixa correlação entre as variáveis consideradas, visto que as zonas potencialmente aquíferas podem ser encontradas em qualquer região do arcabouço geológico que tenha alta porosidade secundária.

No domínio poroso-fissural estão inseridos dois poços, P-04 e P-37, sendo designado apenas o litotipo deste primeiro, argila na primeira camada e em sequência, gnaiss alterado. Tal composição pode condicionar em menor percolação da água neste aquífero. Quanto a vazão, essa variou de 0,84

a 2 m³/h. Para o PT-04 o nível estático e dinâmico foram de, respectivamente, 9,8 e 58,05 m, demonstrando que o poço possui um alto rebaixamento e isto pode relacionar-se a baixa capacidade neste local.

Nas rochas de carácter vulcânico, apenas um poço com a informação e única vazão outorgada, 1,96 m³/h. Vale ressaltar que, os dois últimos domínios, poroso/fissural e vulcânico, apresentam as menores parcelas de área dentro da bacia hidrográfica bem como menor quantidade de poços instalados com informação disponível. Com o objetivo de interpretar os foto lineamentos das formações geológicas existentes na sub-bacia

do Rio do Peixe, foram aplicados diferentes realces na imagem de satélite, Figura 11. Observa-se que, as estruturas N-S realçadas no azimuth de 0°, NE-SW em 45°, E-W em 90° e SE-NW em 135°. Os lineamentos foto interpretados, em escala local, e os lineamentos estruturais em escala regional, derivados do mapeamento geológico realizado para o Quadrilátero Ferrífero em escala 1:100.000, Figura 12.

Na Figura 12, é possível visualizar que a direção majoritária dos lineamentos na bacia estudada é NW-SE,

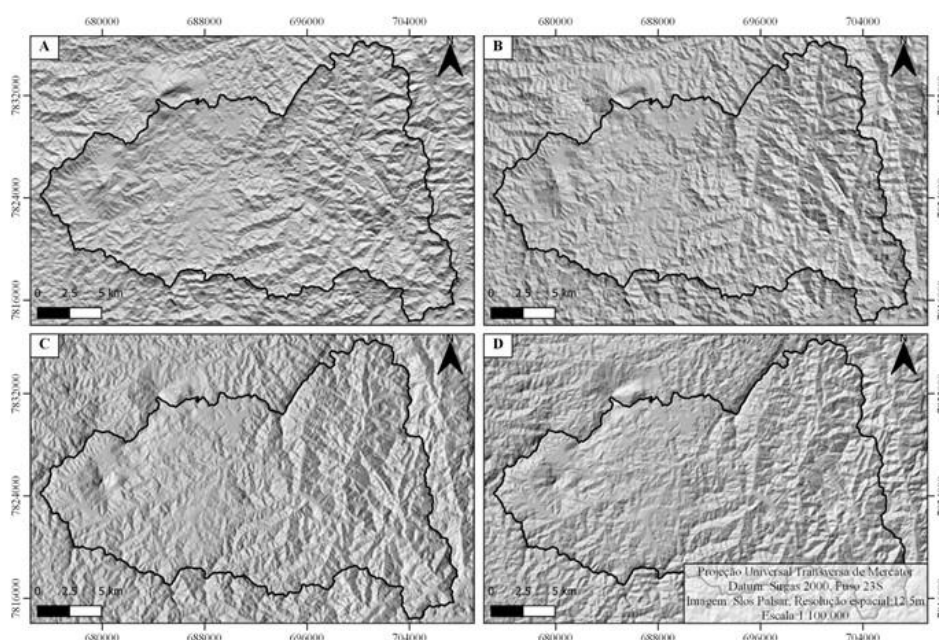


Figura 11. Imagens de relevo sombreado derivadas do modelo digital de elevação Alos Palsar, com iluminação artificial realçando os azimutes de 0° (A), 45° (B), 90° (C) e 135° (D).

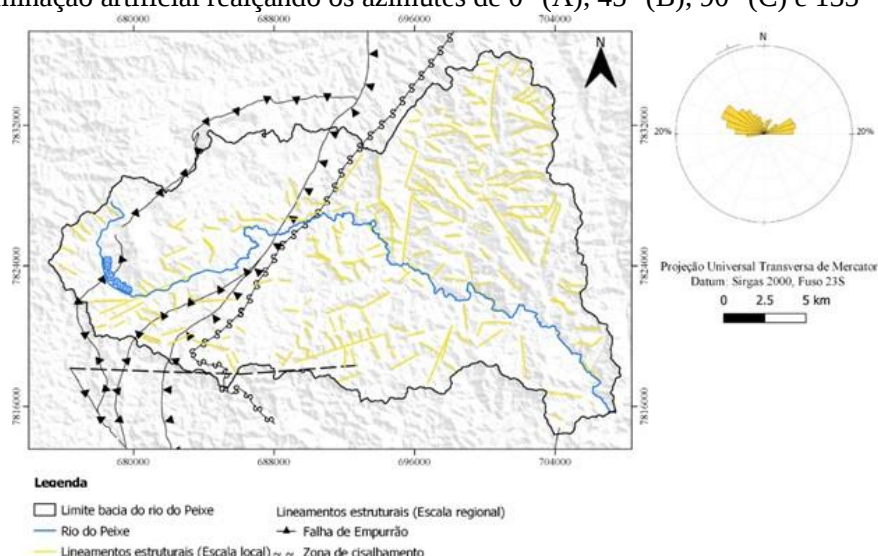


Figura 12. Lineamentos estruturais fotointerpretados na bacia do Rio do Peixe

Na Figura 12, constata-se que a direção majoritária dos lineamentos na bacia é NW-SE, ocorrendo em maior densidade na região da Suíte Borrachudos e Grupo Nova Lima, pertencentes ao embasamento cristalino. Na suíte supracitada, os mais bem preservados tipos de granitos são foliados com grau de faturamento muito variável. Nesta região é possível ver a interseção de alguns lineamentos bem como a grande proximidade entre eles. Essas características podem indicar a capacidade de conexão hidráulica do aquífero local por meio da rede de fraturas e consequentemente, áreas com potencial de águas subterrâneas. Visto que o comportamento dos lineamentos pode variar com a escala, faz-se necessário trabalhos de campo para entender em maior detalhe o grau de conectividade entre tais lineamentos. Para isso, as drenagens retilíneas podem nortear tal mapeamento (Bayewu et al., 2018; Fadhilah et al., 2021; Liaqat et al., 2021).

Visualiza-se em menor quantidade lineamentos na bacia do córrego Água Santa e Conceição, localizados na região mais alta da bacia, e que tem por uso e cobertura da terra a mineração e área urbana. Para essas classes de uso, as alterações na paisagem são mais significativas do que em outros. A rede de drenagem modificada pelas atividades minerárias assim como no

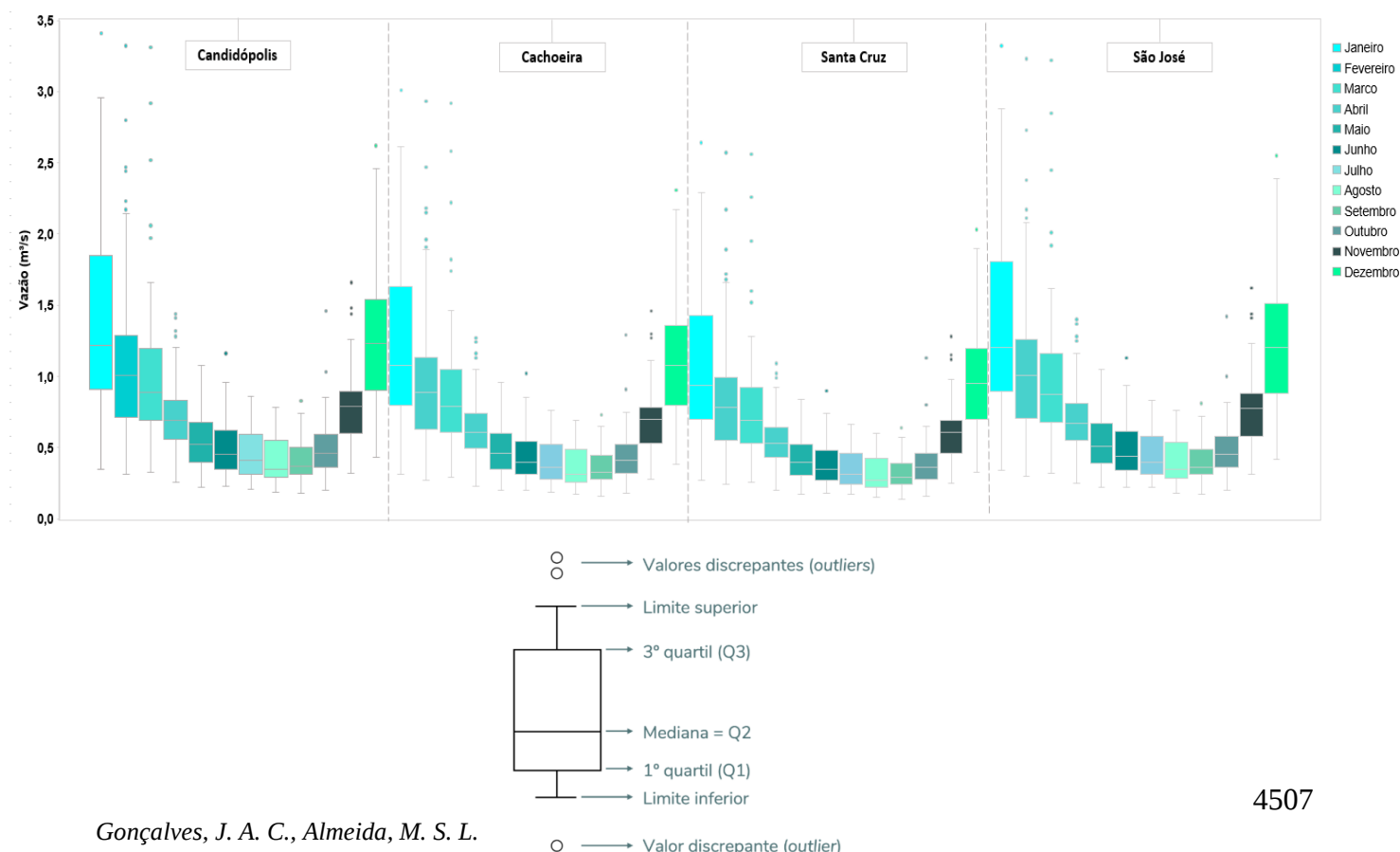
contexto urbano, condiciona em menores quantidades de lineamentos que podem ser mapeados.

As bacias que possuem mais lineamentos são a ribeirão São José e córrego Santa Cruz. Em geral, observa-se variabilidade do comprimento dos lineamentos estruturais locais em toda a extensão da bacia. Ao todo, foram traçados em escala local, aproximadamente 220 lineamentos, sendo o lineamento máximo a 359 metros e o mínimo de 8 metros de comprimento.

No que se refere aos lineamentos regionais, têm-se falhas cortando a bacia no sentido SW-SE, envolvendo o Grupo Nova Lima, pertencente ao contexto hidrogeológico cristalino. A zona de cisalhamento também gera, portanto, condições para a existência de um sistema de fraturas localizado.

A série histórica de vazões para os cursos d'água da sub-bacia do Rio do Peixe denominados ribeirão Candidópolis, Córrego Cachoeira, Córrego Santa Cruz e ribeirão São José, contempla o período de 1935 a 2001. Ao longo dos cursos d'água monitorados, observa-se forte influência da sazonalidade no comportamento das vazões, representados pela ordem de valor mais reduzidas das medianas, bem como do terceiro quartil e resultados máximos, Gráfico 13.

Gráfico 13. Box plot dos dados de vazão dos principais tributários do Rio do Peixe (Candidópolis, Cachoeira, Santa Cruz e São José)



Para o ribeirão Candidópolis, a mediana apresentou-se mais elevada nos meses de dezembro ($1,22 \text{ m}^3/\text{s}$) e janeiro ($1,23 \text{ m}^3/\text{s}$) em relação aos demais meses do ano. Este mesmo comportamento foi verificado nos demais cursos d'água, entretanto, em menor quantitativo. Para o córrego Cachoeira, a mediana de dezembro coincidiu com a de janeiro ($1,08 \text{ m}^3/\text{s}$), e tal padrão também foi visualizado no ribeirão São José, $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ em ambos os meses. Quanto ao córrego Santa Cruz, em dezembro e janeiro os resultados medianos foram de $0,95$ e $0,94 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Espacialmente, os resultados máximos apresentaram redução na seguinte sequência: Candidópolis, São José, Cachoeira e Santa Cruz. Ao avaliar o período sazonal de estiagem, têm-se as menores vazões ocorrendo nos últimos meses deste ciclo, agosto e setembro, sendo mais menores no córrego Santa Cruz do que nos demais cursos d'água avaliados, variando de $0,14$ a $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Os demais apresentam valores de $0,16$ a $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$.

Em geral, são verificados *outliers* ao longo dos meses, sendo os picos de vazão registrados principalmente nos meses mais chuvosos.

Por meio dos hidrogramas, Gráfico 14, é possível compreender a relação entre o quantitativo de água superficial e subterrânea para uma dada localidade. Na existência de conectividade hidráulica, a relação chuva x vazão é refletida no sistema hídrico, tanto na parcela superficial, quanto

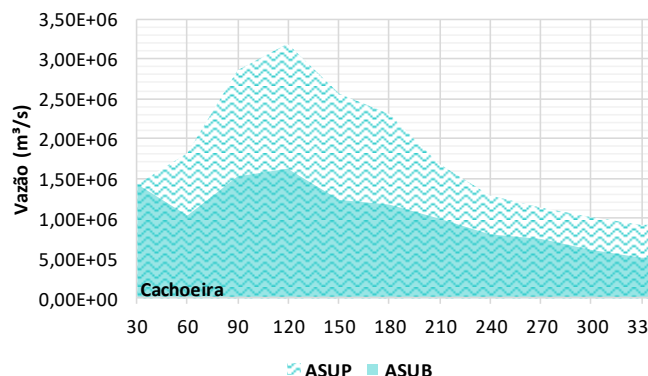
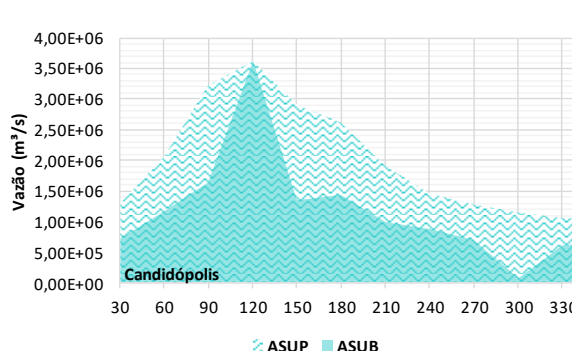
subterrânea. Isto é possível visto que as chuvas que alimentam os cursos d'água superficiais, ocorrem principalmente no período de outubro a março. Já no período de estiagem, de abril a setembro, há uma redução do deflúvio superficial, sendo ele, mantido por uma parcela da água subterrânea armazenada no subsolo.

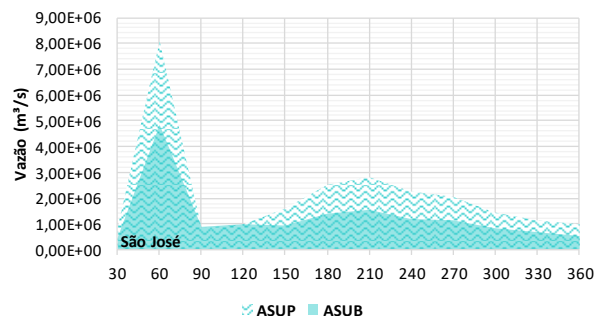
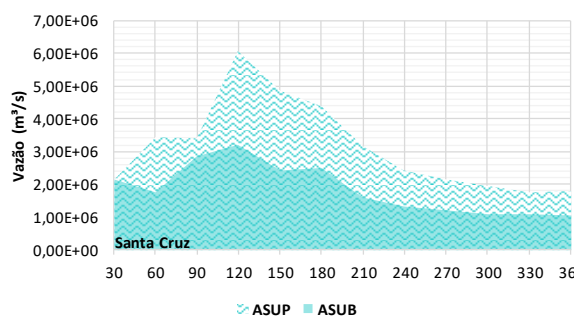
As vazões mais elevadas condizem com o período sazonal de chuva, que inicia no mês de outubro e se estende em 210 dias, aproximadamente. Ao final deste período, têm-se a estiagem, com vazões menos pronunciadas, entretanto suficientes para manter o fluxo de base dos cursos d'água superficiais.

Percebe-se que a área do deflúvio subterrâneo é maior do que a área de deflúvio superficial, o que indica a marcante influência das águas subterrâneas no sistema hídrico. O percentual de deflúvio subterrâneo para as bacias são: Candidópolis (58,79%), Cachoeira (57,56%), Santa Cruz (59,47%) e São José (60,65%).

Pelos hidrogramas do Gráfico 14, verifica-se que as microbacias do ribeirão São José e do córrego Santa Cruz apresentam maiores deflúvios, superficiais e subterrâneo. No período de estiagem, o fluxo de base das microbacias dos córregos Candidópolis e Cachoeirinha são mantidos por menores vazões.

Gráfico 14 – Hidrogramas dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio do Peixe- Candidópolis, Cachoeira, Santa Cruz e São José. Nota: ASUP – Água superficial, ASUB – Água subterrânea





Conclusões

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe é palco de importantes atividades de mineração, especialmente em sua porção noroeste. O beneficiamento do minério consome muita água, tornando-se mais importante a compreensão da oferta para suprir a demanda da região. Contatou-se por meio dos dados disponíveis que aproximadamente 46% das outorgas são referentes a água subterrânea, sendo a modalidade de exploração por meio de poços instalados em regiões com disponibilidade hídrica. Para a água superficial e subterrânea, têm-se como finalidade de uso preponderante o consumo industrial, e especificamente, em segundo lugar para água subterrânea, o consumo humano e lavagem de veículos. O crescimento contínuo da demanda no decorrer dos anos, justifica o maior número de solicitações de outorga, o que pode ser visualizado nos anos de 2019 e 2020.

Para entender o ambiente hidrogeológico é necessário realizar a avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos, sendo alvo dessa pesquisa os seguintes: vazão, nível estático, nível dinâmico e capacidade específica. Essas informações são fundamentais para expandir o conhecimento sobre os aquíferos fissurais presentes na região bem como entender sua potencialidade, (Nguyen et al., 2020). Sabe-se que existem quatro domínios hidrogeológicos na área de estudo, Cristalino e Metassedimentos-Metavulcânicas, com maior representatividade, e o Poroso/fissural e Vulcânicas, em menor parcela dentro da bacia hidrográfica. Para a análise, foram considerados apenas os poços que possuíam os parâmetros hidrodinâmicos supramencionados. Dessa forma, foram considerados 15 poços do aquífero Cristalino, 10 poços do aquífero dos Metassedimentos-Metavulcânicas, 2 poços no aquífero Poroso/Fissural e 1 poço no aquífero Vulcânico. Ao retirar o filtro utilizado para selecionar apenas os poços que detém informação hidrodinâmica completa, percebe-se que existem

mais poços alocados em ambiente dos Metassedimentos -Metavulcânicas, e posteriormente, no maciço Cristalino.

Para os diferentes domínios hidrogeológicos, os parâmetros hidrodinâmicos apresentam variações. A maior parte da sub-bacia do Rio do Peixe está assentada sobre o domínio hidrogeológico Cristalino. Neste tipo de terreno, a água percola e é armazenada em fraturas e descontinuidades do maciço rochoso. Logo, caminhos preferenciais para a água estão ligados a zonas com fraturas mais concentradas, a seu tamanho, abertura e conectividade com outras fraturas. No que se refere aos parâmetros hidrodinâmicos compilados, o entendimento prévio dos mesmos pode direcionar a conclusões sobre o cenário hídrico subterrânea, e, por conseguinte, como essa matriz pode ser influenciada por fatores externos (precipitação, recarga, infiltração) bem como o transporte de água no meio. O contexto geológico desse aquífero é predominantemente relacionado a Suíte Borrachudos e Grupo Nova Lima. Os níveis estáticos verificados para este contexto, variam espacialmente, de 0,9 metros a 56,18 metros. Para os poços com níveis estáticos mais rasos, a uma maior chance de comunicabilidade com a matriz superficial. Especificamente para a parcela do Cristalino localizada entre as falhas de empurrão delineadas a leste da área de estudo e com direção SO-NE, têm-se uma maior quantidade de poços instalados, corroborando com o mapeamento que indica que nessa área é possível se ter um maior potencial de água subterrânea, (Castro e Gonçalves, 2022; Tadese et al., 2020; Taha et al., 2021).

No ambiente Cristalino, os poços mais profundos são predominantes. As vazões mais recorrentes ocorrem em uma faixa até 6 m³/h, e a capacidade específica até 0,21 m³/h/m. Quanto ao nível estático, o mesmo apresenta um crescimento acentuado em profundidades mais rasas, ou seja, próxima a superfície, e posteriormente, apresenta uma certa estabilização indicada por meio da baixa

variabilidade de poços com nível estático mais elevado. Ao realizar o bombeamento nos poços, o nível dinâmico varia indefinidamente.

Quanto ao domínio hidrogeológico dos Metassedimentos-Metavulcânicas, a água também é direcionada e armazenada por meio de fraturas e falhas, além de possuir baixa porosidade primária. Em maior escala, este domínio hidrogeológico associa-se ao Grupo Nova Lima, Grupo Sabará e Complexo Guanhães. Os níveis estáticos verificados para este contexto, variam espacialmente, de 1,79 metros a 78,73 metros. Neste domínio, os poços mais profundos são predominantes. As vazões mais recorrentes ocorrem em uma faixa até 8 m³/h, e a capacidade específica até 0,23 m³/h/m. Quanto ao nível estático, o mesmo apresenta maior representatividade em profundidades mais rasas.

Ao relacionar os dois domínios hidrogeológicos supramencionados, têm-se para o nível estático, uma maior proximidade com a superfície do terreno no Cristalino, e a possibilidade de encontrar água em camadas mais profundas no Metassedimentos-Metavulcânicas. Outra leitura passível de ser relacionada, referente a capacidade específica é que, para os poços analisados, a capacidade específica tende a aumentar, quanto mais próximo os lineamentos estiverem dos poços. Contudo, para áreas onde a poucos poços instalados, tal premissa deve ser analisada para somente depois, ser confirmada. Conclusões mais assertivas sobre isto exige um maior nível de detalhamento das fraturas e falhas existentes.

O aquífero Poroso/Fissural e Vulcânico possui menor representatividade espacial na bacia bem como uma quantidade de poços inferior quando comparado aos dois outros domínios. Para o Poroso/Fissural, notou-se uma ampla variabilidade do nível estático, em ordem de grandeza também verificada para o terreno Cristalino e Metassedimentos-Metavulcânicas. Tal análise não foi possível de ser realizada para o domínio hidrogeológico Vulcânico devido a ausência dessa informação. Os poços, em geral, têm distribuição mais concentrada na parte alta e média da sub-bacia do Rio do Peixe.

Na prospecção hidrogeológica para instalação de poços, é necessário conhecer os lineamentos estruturais, que se resumem as fraturas e descontinuidades do meio. Com isso, faz-se uso de imagens de satélites, em escala regional e/ou local, para mapeá-los e caracterizá-los. Tratando-se interconexões hidráulicas entre a componente subterrânea e superficial, nota-se que as zonas de fraturas ou falhas existentes nas rochas cristalinas,

são projetadas em superfície, por meio dos lineamentos retilíneos da paisagem, traduzidos pelas drenagens. Na bacia hidrográfica do Rio do Peixe, há uma ampla malha dendrítica, e nela, trechos retilíneos que variam em seus comprimentos, mas que indicam zonas de falha e descontinuidades.

Ao comparar a rede de drenagem com a trama estrutural da sub-bacia do Rio do Peixe, observa-se que o sistema de drenagem é controlado estruturalmente, coincidindo com as direções dos lineamentos. Logo, a água subterrânea possui sentido preferencial NW-SE. Em geral, há uma baixa interseção entre os lineamentos, restringindo o fluxo do aquífero cristalino, entretanto, onde elas existem é possível prever que a água seja transmitida das estruturas que o representa no subsolo.

A maior densidade de lineamentos é verificada na bacia do ribeirão São José e córrego Santa Cruz. Tais bacias possuem a maior contribuição do fluxo de base proveniente dos aquíferos se comparada com a bacia do ribeirão Candidópolis e córrego Cachoeira. Essa relação permite inferir que maior quantidade de fraturas pode condicionar em maiores deflúvios subterrâneos, e consequentemente, maiores deflúvios superficiais.

Em geral, há variação no comprimento dos lineamentos em toda a extensão, corroborando com a característica conhecida de heterogeneidade dos aquíferos cristalinos e metassedimentos-metavulcânicos. Ao selecionar um conjunto qualquer de poços alocados próximos, e comparar os lineamentos existentes com a produtividade (capacidade específica), é possível observar uma variabilidade nos valores deste último. Isto ocorre devido a diversidade das características de uma fratura, como tamanho da abertura e comprimento.

Os poços mais profundos da sub-bacia do Rio do Peixe são P-10, P-13, P-24, P-27, P-28, P-33, P-34, P-18, P-25, P31 e P-56, e em sobreposição aos lineamentos traçados, não foi possível visualizar ligação direta (poços mais profundos = dificuldade de encontrar água = maior distância dos lineamentos). Essa falta de correlação permite entender que não precisa haver um lineamento próximo ao poço para encontrarmos água, visto que camadas mais profundas do aquífero podem ser acessadas e as ligações das fraturas internas no maciço rochoso, pode permitir a presença e exploração de água em áreas mais distais dos lineamentos.

Especificamente no contexto geológico, é correspondente que a potencialidade hídrica subterrânea mais alta refira-se aos litotipos com

maior capacidade de infiltração e permeabilidade. Já para o contexto geológico majoritário da Suíte Borrachudos, têm-se uma maior resistência para a passagem de água.

A capacidade específica dos poços, corroboram com o potencial hídrico subterrâneo, uma vez que os poços, em geral, estão localizados nas zonas de potencialidade moderada a muito alta. O fato de não existir uma malha amostral representativa na porção leste da bacia, onde há uma maior quantidade de lineamentos, não extingue a chance de encontrar altas vazões nessa região.

Um importante parâmetro para associação da interconectividade hídrica é a vazão. As microbacias analisadas que possuem maior quantidade de lineamentos, também possuem o maior fluxo de base, relacionando-se dessa forma diretamente, a quantidade de fraturas mapeadas em superfície com os deflúvios subterrâneos indicando maiores deflúvios superficiais. Além deste, é possível inferir sobre o potencial hídrico subterrâneo por meio da capacidade específica dos poços, uma vez que haja poços suficientes dentro da área estudada.

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 Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Referências

Abdalla, F., Moubark, K., Abdelkareem, M. 2020. Groundwater potential mapping using GIS, linear weighted combination techniques and geochemical processes identification, west of the Qena area, Upper Egypt. *Journal of Taibah University for Science* 14, 1350-1362. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1822646>.

Adeyeye, O. A., Ikpokonte, E. A., Arabi, S. A. 2019. GIS-based groundwater potential mapping within Dengi area, North Central Nigeria. *Egypt. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 22, 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.003>.

Almeida, M. S. L., Gonçalves, J. A. C. 2021. Application of Visual MODFLOW to the Analysis of Boundary Conditions for a Phreatic

Porous Aquifer Using Limited Available Information: A Case Study. *Anuário do Instituto de Geociências* 44: 39646. https://doi.org/10.11137/1982-3908_20214439646

ANA (Agência Nacional de Águas). 2013. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce: Relatório executivo. Brasília. 129 p. ISBN: 978-85-8210-022-6.

ANA (Agência Nacional de Águas). 2016. Relatório Final do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema. 335 p.

Andrade, C. F. 2012. Relevô antropogênico associado à mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero: uma análise espaço-temporal do complexo Itabira (Itabira - MG). Tese de Doutorado - Departamento de Geografia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Andualem, T. G., Demeke, G. G. 2019. Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: a case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin. *Ethiop. Journal of Hydrology: Regional Studies* 24, 100610. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100610>.

Bayewu, O. O., Oloruntola, M. O., Mosuro, G. O., Laniyan, T. A., Ariyo, S. O., Fatoba, J. O. 2018. Assessment of groundwater prospect and aquifer protective capacity using resistivity method in Olabisi Onabanjo University campus, Ago-Iwoye, Southwestern Nigeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* 7, 347-360. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.05.002>.

Beato, D. A. C., Bertachinni, A. C. 2005. Projeto APA Sul RMBH: Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte. 8, 67 p.

BRASIL. 2022. Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (SNSH)/Agência Nacional de Águas (ANA)/ Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Plano Nacional de Recursos Hídricos: Plano de Ação: Estratégia Nacional Para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos 2022-2040. Volume II, março/2022.

Castro, K. Q., Gonçalves, J. A. C. 2022. Quantificação do Potencial Hídrico Subterrâneo do Baixo Curso do Rio Piracicaba (MG): Interação das Águas Subterrâneas e Superficiais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(4), 1881-1901. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.4.p1881-1901>

CBH-DOCE - Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Plano de Ação de Recursos Hídricos

- da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Piracicaba – PARH Piracicaba. Belo Horizonte: Consórcio Ecoplan - Lume, 2010. 100 p. Disponível em: http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/PARH_Piracicaba.pdf Acesso em: 20 de Outubro de 2023.
- Cheng, Q., Tao, M., Chen, X., Binley, A. 2019. Evaluation of electrical resistivity tomography (ERT) for mapping the soil–rock interface in karstic environments. *Environmental Earth Sciences* 78, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8440-8>.
- Doke, A. B., Zolekar, R. B., Patel, H., Das, S. 2021. Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach in a hardrock basaltic terrain in India. *Ecological Indicators* 127 (March), 107685. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107685>.
- Elvis, B. W. W., Arsène, M., Théophile, N.M., Bruno, K. M. E., Olivier, O. A. 2022. Integration of shannon entropy (SE), frequency ratio (FR) and analytical hierarchy process (AHP) in GIS for suitable groundwater potential zones targeting in the Yoyo river basin, Méiganga area, Adamawa Cameroon. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 39, 100997. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100997>.
- Endo, I.; Galbiatti, H. F.; Delgado, C. E. R.; Oliveira, M. M. F.; Zapparoli, A. C.; Moura, L. G. B.; Peres, G. G.; Oliveira, A. H.; Zavaglia, G.; Danderfer, F. A.; Gomes, C. J. S.; Carneiro, M. A.; Nalini Jr., H. A.; Castro, P. T. A.; Suita, M. T. F.; Seixas, L. A. R.; Tazava, E.; Lana, C. C.; Martins-Neto, M. A.; Martins, M. S.; Ferreira, F. F. A.; Franco, A. P.; Almeida, L. G.; Rossi, D. Q.; Angeli, G.; Madeira, T. J. A.; Piassa, L. R. A.; Mariano, D. F.; Carlos, D. U. 2019. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero. Disponível em: <www.qfe2050.ufop.br>; Acesso em 01/11/2021.
- Fadhillah, M. F., Lee, S., Lee, C. W., Park, Y. C. 2021. Application of support vector regression and metaheuristic optimization algorithms for groundwater potential mapping in gangneung-si, South Korea. *Remote Sensing* 13, (6). <https://doi.org/10.3390/rs13061196>.
- Feitosa, Fernando A. C. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. Ed. - Rio de Janeiro: CPRM: LABHID. 812 p.
- Fossen, H. 2017. Geologia Estrutural. São Paulo: Oficina de Textos. Acesso em: 01 set. 2022.
- Gonçalves, J. A. C., Almeida, M. S. L., Vieira, E. M., Paiva, B. L. F., Ferreira, M. A. M. Marcellino, L. C. 2023. Interaction Between Surface and Underground Waters of the Itapemirim and Itabapoana River Basins in the Southern part of the State of Espírito Santo, Southeastern Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 46:49992. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_49992
- Gonçalves, J. A. C., Almeida, M. S. L., Ferreira, M., Paiva, B. 2019. Potencial e disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas na bacia do Rio do peixe – Itabira - MG. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 23., 2019, Foz do Iguaçu, Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: jan. 2023.
- 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, e84. <https://doi.org/10.5902/2179460X40433>
- Guimarães, Borba Vilar, P; Rios Ribeiro, M. M. 2008. Águas Subterrâneas: Aspectos Compartilhados da Gestão de Recursos Hídricos na Legislação Brasileira. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.
- Ifediegwu, S. I. 2022. Assessment of groundwater potential zones using GIS and AHP techniques: a case study of the Lafia district, Nasarawa State, Nigeria. *Applied Water Science* 12 (1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01556-5>.
- IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas). Outorga. 2021, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/outorga#:~:text=A%20Outorga%20%C3%A9%20o%20instrumento,o%20direito%20de%20seu%20uso.>>>. Acesso em: abr. 2022.
- Jordt-Evangelista, H., Lana, C.; Delgado, C. E. R. Viana, D. J. 2016. Age of the emerald mineralization from the Itabira-Nova Era District, Minas Gerais, Brazil, based on LA-ICP-MS geochronology of cogenetic titanite. *Brazilian Journal of Geology*, 3, 427-437. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150074>
- Khoi, D. N., Sam, T. T., Chi, N. T. T., Linh, D. Q., Nhi, P. T. T. 2022. Impact of future climate change on river discharge and groundwater

- recharge: a case study of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change* 13, 1313-1325. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.379>.
- Kumar, P., Thakur, P. K., Bansod, B. K. S., Debnath, S. K. 2018. Groundwater: a regional resource and a regional governance. *Environment, Development and Sustainability* 20, 1133-1151. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-9931-y>.
- Lee, S., Hyun, Y., Lee, S., Lee, M. J. 2020. Groundwater potential mapping using remote sensing and GIS-based machine learning techniques. *Remote Sensing*. 12 (7) <https://doi.org/10.3390/rs12071200>.
- Liaqat, M. U., Mohamed, M. M., Chowdhury, R., Elmahdy, S. I., Khan, Q., Ansari, R. 2021. Impact of land use/land cover changes on groundwater resources in Al Ain region of the United Arab Emirates using remote sensing and GIS techniques. *Groundwater for Sustainable Development* 14, 100587. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2021.100587>.
- Lopes, L. S., Gonçalves, J. A. C., Vieira, E. M. 2023. Estudos Prévios para Locação de Poços Tubulares em Terrenos Cristalinos no município de Viçosa-MG. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 16(5), 2704-2720. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2704-2720>
- Muldoon, M.; Bradbury, K. 2005. Site Characterization in Densely Fractured Dolomite: Comparison of Methods. *Groundwater*. 43. 863-76. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00091>.
- Neto, A. F. S., Bertachini, A. C., Girodo, A. C., Almeida, D. C. 2001. Hidrogeological Model of the Itabira iron ore district. IMWA - International Mine Water Association Symposium, Belo Horizonte, Brazil.
- Nguyen, P. T., Ha, D. H., Avand, M., Jaafari, A., Nguyen, H. D., Al-Ansari, N., Phong, T. Van, Sharma, Kumar, R., Le, R., Van, H., Ho, L. S., Prakash, I., Pham, B. T. 2020. Soft computing ensemble models based on logistic regression for groundwater potential mapping. *Applied Sciences* 10, (7). <https://doi.org/10.3390/app10072469>.
- Poeter, E., Fan, Y., Cherry, J., Wood, W., Mackay, D. 2020. Groundwater in our water cycle: getting to know Earth's most important fresh water source. Ontario: The Groundwater Project. 136 p. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-1-3>.
- Rane, N. L., Jayaraj, G. K. 2022. Comparison of multi-influence factor, weight of evidence and frequency ratio techniques to evaluate groundwater potential zones of basaltic aquifer systems. *Environment, Development and Sustainability* 24. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01535-5>.
- Rosenberry, D. O., Labaugh, J. W., 2008, Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4–D2, 128 p.
- Sapkota, S., Pandey, V. P., Bhattarai, U., Panday, S., Shrestha, S. R., Maharjan, S. B. 2021. Groundwater potential assessment using an integrated AHP-driven geospatial and field exploration approach applied to a hard-rock aquifer Himalayan watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 37, (September), 100914. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100914>.
- Sunkari, E. D., Kore, B. M., Abioui, M. 2021. Hydrogeophysical appraisal of groundwater potential in the fractured basement aquifer of the federal capital territory, Abuja, Nigeria. *Results in Geophysical Sciences* 5, (February), 100012. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2021.100012>.
- Tadese, M., Kumar, L., Koech, R., Kogo, B. K. 2020. Mapping of land-use/land-cover changes and its dynamics in Awash River Basin using remote sensing and GIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 19, 100352. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2020.100352>.
- Taha, A. I., Al Deep, M., Mohamed, A. 2021. Investigation of groundwater occurrence using gravity and electrical resistivity methods: a case study from Wadi Sar, Hijaz Mountains, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences* 14, 5. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06628-z>.
- Tolche, A. D. 2020. Groundwater potential mapping using geospatial techniques: a case study of Dhungeta-Ramis sub-basin, Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes* 00, 1-16. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1728882>.