



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS PURAS E APLICADAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DOS RECURSOS  
HÍDRICOS - PROFÁGUA

Milena Stefany Lage Almeida

**ESTUDO DAS INTERCONEXÕES HIDRÁULICAS ENTRE ÁGUAS  
SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO DO PEIXE (MG) UTILIZANDO ANÁLISE DE LINEAMENTOS  
ESTRUTURAIS E GEOPROCESSAMENTO**

Itabira - Minas Gerais

2023

Milena Stefany Lage Almeida

**ESTUDO DAS INTERCONEXÕES HIDRÁULICAS ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS  
E SUBTERRÂNEAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO PEIXE (MG)  
UTILIZANDO ANÁLISE DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS E  
GEOPROCESSAMENTO**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves (Orientador)

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

---

Prof. Dr. Roberto César de Almeida Monte-Mor

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

---

Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Faculdade de Ciências Tecnologia e Educação (Câmpus de Ourinhos)

Itabira – Minas Gerais

2023

Dedico à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me conceder, mais uma vez, a sabedoria e capacidade para concluir mais esse projeto na minha vida.

A minha família, por compreenderem a minha ausência e por tanto apoiarem os meus estudos. Em especial, aos meus pais e irmão, pelo exemplo diário no qual muito valorizo.

Ao Marcelo, meu companheiro, por toda compreensão e incentivo.

Ao meu orientador Prof. José Augusto pelo direcionamento, paciência e motivação.

A Prof<sup>ª</sup>. Eliane Vieira, pela disponibilidade em ajudar e por compartilhar seu conhecimento.

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

“... Infalível Criador... concedei-me a agudeza de entender, a capacidade de reter, a sutileza de relevar, a facilidade de aprender, a graça abundante de falar e escrever. Ensinai-me a começar, regei-me no continuar e no perseverar até o término...”

São Tomás de Aquino

## RESUMO

ALMEIDA, Milena Stefany Lage. **Estudo das interconexões hidráulicas entre águas superficiais e subterrâneas da bacia hidrográfica do rio do Peixe (MG) utilizando análise de lineamentos estruturais e geoprocessamento.** 2023. 94 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2023.

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 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 e análise multicritério. 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-Metavulcânicas. 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. Adicionalmente, e por meio da análise multicritério verificou-se influência principalmente das camadas de solo e geologia na definição das áreas de maior potencialidade hídrica subterrânea da bacia. Especialmente, a porção noroeste da área de estudo possui, em geral, potencialidade hídrica alta e muito alta. A análise integrada mostrou que diferentes fatores influenciam na comunicabilidade hídrica entre água subterrânea e superficial, e que os parâmetros quantitativos podem ser utilizados para corroborar essa relação.

Palavras-chave: Interconexões Hidráulicas. Água subterrânea. Lineamentos.

## ABSTRACT

ALMEIDA, Milena Stefany Lage. *Study of the hydraulic interconnections between surface water and groundwater in the watershed of the Peixe River (MG) using structural lineament analysis and geoprocessing*. 2023. 94 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Itabira, Minas Gerais, 2023.

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 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 and multicriteria analysis. 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. Additionally, and through the multicriteria analysis it was verified the influence mainly of the soil layers and geology in the definition of the areas of greater groundwater hydric potentiality of the basin. Spatially, the northwestern portion of the study area has, in general, high and very high hydric potentiality. The integrated analysis showed that different factors influence the hydric communicability between groundwater and surface water, and that quantitative parameters can be used to corroborate this relationship.

Keywords: Hydraulic interconnect. Groundwater. Lineament.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquematisação de bacias hidrográficas sobrepostas as bacias hidrogeológicas ...	17
Figura 2 – Fluxo de Gestão dos recursos hídricos.....	18
Figura 3 – Esquematisação básica do Ciclo Hidrológico.....	19
Figura 4 – Fluxo influente (1) e efluente (2) das águas subterrâneas.....	21
Figura 5 – Bloco esquemático de uma zona de fratura/falha em terreno cristalino, projetada em superfície por meio de um rio.....	26
Figura 6 – Conceito de riacho-fenda ilustrado na visão de mapa ou fotografia aérea (a) e em afloramentos (b, c).....	28
Figura 7 – Fraturas evidenciadas nas drenagens .....	29
Figura 8 – Relevo sombreado em uma imagem de satélite com 30 metros de resolução espacial, obtidos por azimutes solares de 0°, 45°, 180° e 225°, contendo lineamentos morfoestruturais (em amarelo e vermelho) .....	30
Figura 9 – Delimitação da bacia hidrográfica do Rio do Peixe.....	33
Figura 10 – Pluviometria histórica média, máxima e mínima da bacia do Rio do Peixe.....	34
Figura 11 – Mapa hipsométrico da bacia do Rio do Peixe.....	35
Figura 12 – Classes de solo da bacia do Rio do Peixe .....	36
Figura 13 – Geologia da bacia do Rio do Peixe – MG.....	38
Figura 14 – Domínios Hidrogeológicos da bacia do rio do Peixe.....	42
Figura 15 – Uso e cobertura da terra da bacia do Rio do Peixe .....	43
Figura 16 – Fluxograma metodológico para o desenvolvimento da pesquisa.....	44
Figura 17 – Superposição dos critérios para geração do mapa de potencialidade hídrica subterrânea segundo análise AHP .....	46
Figura 18 – Finalidades de uso das outorgas deferidas .....	47
Figura 19 – Acumulado de outorgas de água subterrânea.....	48
Figura 20 – Outorgas subterrâneas distribuídas na bacia do Rio do Peixe.....	50
Figura 21 – Nível estático dos poços alocados no domínio hidrogeológico Cristalino .....	51
Figura 22 - Nível estático dos poços alocados no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas .....	57
Figura 23 – 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). .....	63
Figura 24 – Lineamentos estruturais fotointerpretados da bacia do Rio do Peixe .....	64
Figura 25 - Mapa de densidade de drenagem da bacia do Rio do Peixe .....	73
Figura 26 - Mapa de densidade de lineamentos estruturais da bacia do Rio do Peixe.....	74
Figura 27 - Potencialidade hídrica subterrânea .....	76
Figura 28 – Classificação dos poços em relação a potencialidade hídrica vs capacidade específica .....	77
Figura 29 – Disposição da capacidade específica dos poços .....	78
Figura 30 – Relatório interativo da bacia do rio do Peixe – Página inicial .....	83
Figura 31 – Página das Outorgas dos recursos hídricos .....	84
Figura 32 – Página dos domínios hidrodinâmicos dos sistemas aquíferos .....	84
Figura 33 – Página dos Lineamentos estruturais .....	85
Figura 34 – Página dos Hidrogramas .....	85
Figura 35 – Página da Análise Multicritério .....	86
Figura 36 – Página das considerações sobre a pesquisa.....	86

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição de frequências das profundidades no domínio hidrogeológico cristalino .....	52
Gráfico 2 – Distribuição de frequências de vazão no domínio hidrogeológico Cristalino.....	53
Gráfico 3 – Distribuição de frequências da capacidade específica no domínio hidrogeológico cristalino .....	54
Gráfico 4 – Distribuição de frequências do nível estático e nível dinâmico no domínio hidrogeológico cristalino .....	55
Gráfico 5 – Capacidade específica em função da profundidade do poço no domínio hidrogeológico cristalino .....	55
Gráfico 6 – Capacidade específica em função do nível dinâmico do poço no domínio hidrogeológico cristalino .....	56
Gráfico 7 – Distribuição de frequências das profundidades no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas .....	58
Gráfico 8 – Distribuição de frequências de vazão no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas .....	58
Gráfico 9 – Distribuição de frequências da capacidade específica no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas .....	59
Gráfico 10 – Distribuição de frequências do nível estático e nível dinâmico no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas .....	60
Gráfico 11 - Capacidade específica em função da profundidade do poço no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas.....	60
Gráfico 12 – Capacidade específica em função da profundidade do poço no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas.....	61
Gráfico 13 – <i>Box plot</i> dos dados de vazão dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio do Peixe – Candidópolis, Cachoeira, Santa Cruz e São José .....	68
Gráfico 14 – Hidrogramas dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio do Peixe – Candidópolis, Cachoeira, Santa Cruz e São José .....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice Randômico em função do número de critérios .....	32
Tabela 2 – Área por classe de solo da bacia do Rio do Peixe .....	37
Tabela 3 – Área por litotipo da bacia do Rio do Peixe.....	38
Tabela 4 - Análise pareada para o critério Solo.....	70
Tabela 5- Análise pareada para o critério Geologia .....	71
Tabela 6 - Análise pareada para o critério Uso e cobertura da terra .....	71
Tabela 7 - Análise pareada para o critério Declividade.....	72
Tabela 8 - Análise pareada para o critério Densidade de drenagem .....	73
Tabela 9 - Análise pareada para o critério Densidade de lineamentos .....	74
Tabela 10 - Pesos discretizados por subcritérios .....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
<i>Cwa</i>	Clima subtropical de inverno seco
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
IDE-SISEMA	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 Geral .....	15
2.2 Específicos .....	15
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
3.1 Águas superficiais e subterrâneas – Um único recurso .....	15
3.2 Balanço hídrico .....	18
3.3 Dinâmica de fluxo entre o sistema superficial e subterrâneo .....	20
3.4 Aspectos qualitativos da integração.....	21
3.5 Gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas .....	22
3.6 Metodologias para definição da conectividade hídrica.....	25
3.7 Método Analítico Hierárquico .....	25
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
4.1 Caracterização da área de estudo .....	44
4.2 Aquisição, tratamento e integração dos dados .....	45
4.2.1 Levantamento e tratamento dos parâmetros dos poços tubulares .....	45
4.2.2 Geração dos mapas de lineamentos.....	45
4.2.3 Geração do mapa de potencialidade hídrica.....	46
4.3 Criação do produto final – Página Interativa .....	47
<b>5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>33</b>
5.1 Hidrografia.....	33
5.2 Clima.....	34
5.3 Hipsometria e Declividade.....	35
5.4 Solo .....	36
5.5 Geologia.....	37
5.5.1 Litoestratigrafia.....	37
5.6 Domínios Hidrogeológicos .....	40
5.7 Uso e cobertura da terra .....	42
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
6.1 Avaliação das outorgas de uso do recurso hídrico .....	47
6.2 Avaliação Hidrodinâmica dos Sistemas Aquíferos .....	48
6.3 Análise dos lineamentos estruturais .....	62
6.4 Análise das vazões do rio do Peixe .....	66
6.5 Potencialidade Hídrica Subterrânea .....	70

6.5.1 Análise de relevância dos critérios e subcritérios.....	70
6.5.2 Potencialidade hídrica subterrânea .....	76
6.5.3 Considerações geral sobre os resultados obtidos.....	78
<b>7. PRODUTO FINAL.....</b>	<b>83</b>
<b>8. CONCLUSÕES E PROPOSIÇÕES FINAIS.....</b>	<b>87</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A água, participa e dinamiza todos os ciclos ecológicos (TUNDISI, 2003), como também assegura o desenvolvimento social e econômico (UN-WATER, 2008), 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 (TUNDISI, 2008), 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 (OLIVEIRA et al., 2007; MORAES, 2018) é um grande desafio por parte dos órgãos gestores responsáveis (ANA, 2013; IGAM, 2018), devido a complexidade da interação-resposta entre estes compartimentos. Por outro lado, é um mecanismo estratégico, por assegurar o uso múltiplo e conseqüentemente, os anseios da sociedade (IGAM, 2018).

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 (UNESCO, 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. OLIVEIRA (2018) explica: “Para garantirmos a manutenção e a perenidade de rios é preciso que a água infiltre, que a caixa d’água continue permanentemente enchendo”. Em outras palavras, a matriz subterrânea é, muitas vezes, a principal fonte de água para os cursos de água superficiais. Dessa forma, para que haja segurança hídrica por meio da gestão integrada, o conhecimento deste recurso deve ser ampliado (BRASIL, 2022; OLIVEIRA et al., 2007).

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, 2018), 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.

No Brasil, a abordagem de análise integrada para os recursos hídricos está em desenvolvimento para algumas bacias hidrográficas. De acordo com o Plano de Ação: Estratégia Nacional para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos 2022-2040 (BRASIL, 2022), até 2014, os Planos de Bacia Hidrográfica também apresentavam o cálculo da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea de forma separada, entretanto, a partir do Plano Integrado de Recursos Hídricos do Rio Paranapanema (ANA, 2016) começaram a ser desenvolvidos diagnósticos integrados de recursos hídricos, considerando-as de forma conjunta. O que se tem notado é que o conceito de gestão integrada e os resultados dos diagnósticos realizados não têm sido considerados ao longo de todo ciclo de elaboração e implementação do plano.

Em um estudo aplicado na área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte – APA Sul, BEATO e BERTACHINNI (2005) analisou a hidroquímica associada a técnicas isotópicas para investigar a interação das águas entre bacias, o que propiciou em uma compartimentação mais consistente das bacias hidrogeológicas. As principais rotas de conexão hídrica e o aporte de água proveniente do fluxo de base dos rios, levantados por HIDROVIA (2014), confirmam a importância deste tipo de estudo.

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 consistentes e suficientes para a caracterização dos sistemas de águas subterrâneas, tal investimento não é tão alto quanto ao de remediar esse sistema (JAKEMAN et al., 2016).

A bacia do Rio do Peixe, é palco de importantes indústrias do segmento de mineração e siderurgia, com atividades iniciadas na década de 1942 (VALE, 2014). 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.

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.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

O objetivo geral deste estudo é investigar as interconexões hidráulicas entre o escoamento superficial e subterrâneo da bacia do Rio do Peixe (MG), por meio da ótica geológica-estrutural e geoprocessamento.

### **2.2 Específicos**

Os objetivos específicos são discriminados em:

- a) Caracterização hidrogeológica da bacia por meio dos dados de poços tubulares;
- b) Caracterização geológica-estrutural da bacia hidrográfica;
- c) Determinação dos critérios que interferem na interconexão da água superficial e subterrânea;
- d) Análise das condições e interações hidrodinâmicas entre as águas subterrâneas e as águas superficiais.

## **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **3.1 Águas superficiais e subterrâneas – Um único recurso**

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

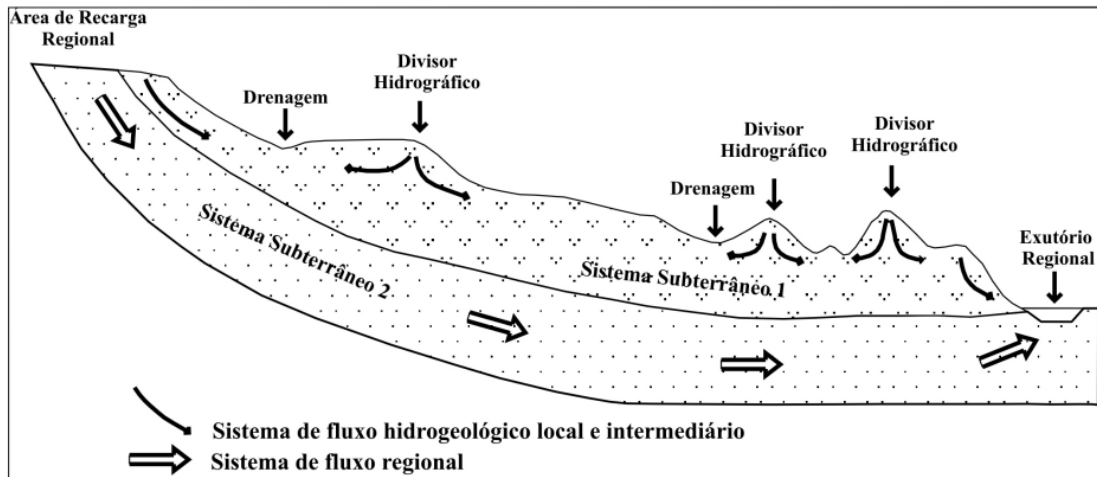
subterrânea aflora nas áreas de descarga, compondo assim uma parcela do volume superficial (vazão de base).

Na atualidade, as discussões sobre aos recursos hídricos, em geral, são realizadas no âmbito de bacia hidrográfica. Tal unidade espacial de planejamento e desenvolvimento limita-se as águas superficiais transportadas por meio dos rios, lagos, represas e mares (WINTER et al., 1998; FEITOSA et al., 2008).

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 (ARRAES e CAMPOS, 2007). 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)”.

Dessa forma, a bacia hidrográfica pode contemplar mais de uma bacia hidrogeológica (**Figura 1**), bem como uma bacia hidrogeológica pode possuir limites coincidentes com aqueles delimitados para as bacias hidrográficas (SNIRH, 2015). Conhecer a assimetria entre essas bacias é essencial para a gestão integrada de recursos hídricos, uma vez que o objeto de gestão é o mesmo, o que difere é a localização dos ambientes físicos (CHEREPANSKY et al., 2005).

**Figura 1 – Esquematisação de bacias hidrográficas sobrepostas as bacias hidrogeológicas**

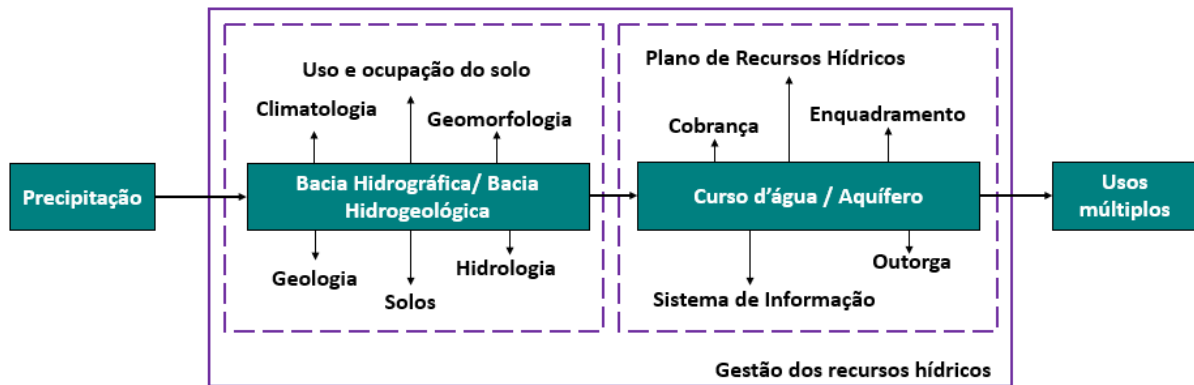


Fonte: ARRAES e CAMPOS, 2007.

As interconexões entre as duas bacias permitem a transferência de água, e segundo CHEREPANSKY et al. (2005), elas podem 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.

Para uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos, é necessário minimizar os conflitos dos usos concorrentes para a água, regulando e cedendo a água disponível nas matrizes, via análise conjunta das mesmas. Segundo SOPHOCLEOUS (2002), as interações que ocorrem entre as duas matrizes são complexas e por isso, para compreendê-las deve ser utilizada uma análise em perspectiva hidrogeológica, sendo as interações, de acordo com DINGMAN (2002) dependentes das características de clima, solo, geologia e fatores bióticos presentes na bacia hidrográfica. É importante compreender que a gestão dos recursos hídricos transcende a compreensão das características físicas da bacia hidrográfica e hidrogeológica, nela também deve ser considerada os meios nos quais a água será regulada em função dos instrumentos de gestão existentes, a fim de que todos os usos múltiplos visados para aquela determinada região sejam atendidos (**Figura 2**).

**Figura 2 – Fluxo de Gestão dos recursos hídricos**



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

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 (OLIVEIRA et al., 2007).

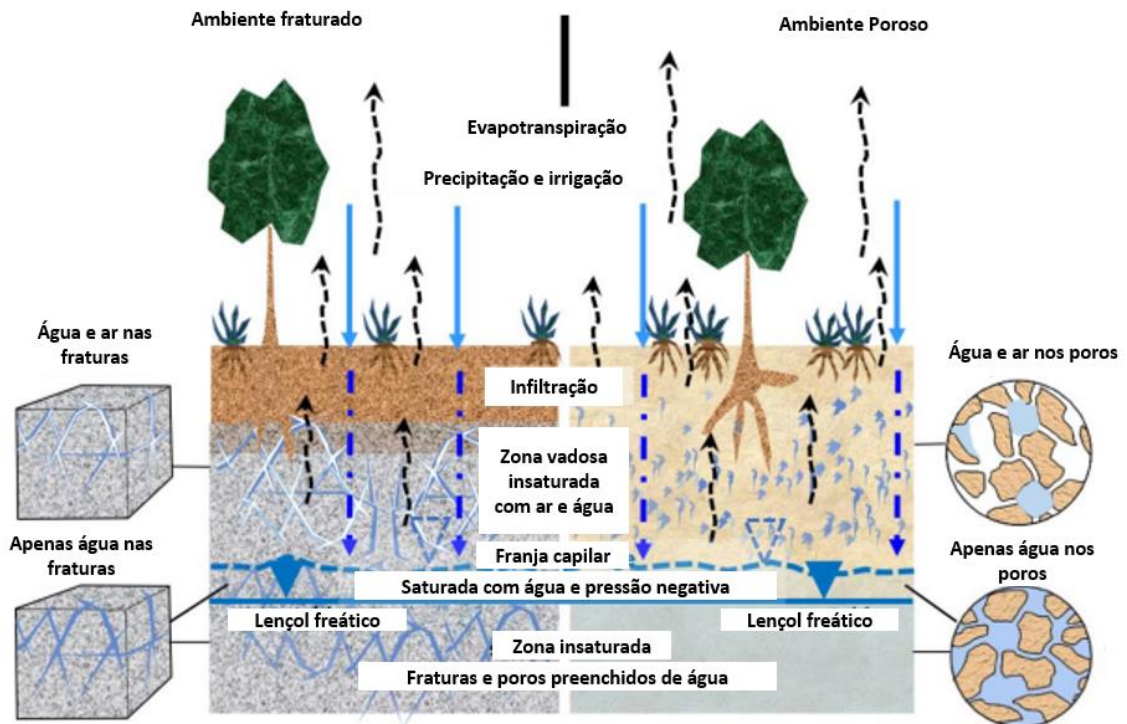
### 3.2 Balanço hídrico

WINTER et al. (1998) diz que o ciclo hidrológico descreve o contínuo movimento da água acima, sobre e abaixo da superfície da Terra. Em outras palavras, pode ser considerado um sistema global onde a água migra entre os compartimentos, oceano, atmosfera, continentes e solo, por meio dos processos governantes de evaporação (E), evapotranspiração (ET), infiltração (I) e escoamento superficial/deflúvio (R). FEITOSA et al. (2008) detalha:

“Esse ciclo é governado, no solo e subsolo, pela ação da gravidade, bem como pelo tipo e densidade de cobertura vegetal; e a atmosfera e superfícies líquidas (rios, lagos, mares e oceanos), pelos elementos e fatores climáticos, como por exemplo, temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar e insolação, que são os responsáveis pelos processos de circulação da água dos oceanos para a atmosfera em uma dada latitude terrestre.”

A **Figura 3** apresenta de forma esquemática, o comportamento que a água pode realizar com ênfase para o tipo de meio geológico fraturado e poroso.

Figura 3 – Esquemática básica do Ciclo Hidrológico



Fonte: Adaptado POETER et al., 2020.

Dos componentes do ciclo hidrológico, a precipitação corresponde a fonte de praticamente toda a água doce do ciclo hidrológico, apresentando ocorrência em toda extensão global, diferenciando em termos de distribuição quantitativa e qualitativa (WINTER et al., 1998), e especificamente no Brasil, a chuva, é o precipitado mais comum (TUCCI, 1995). De modo similar, a evaporação devolve a água à atmosfera em quase todo o território, mas as suas taxas variam consideravelmente de acordo com o clima condições (TUCCI, 1995).

Nos estudos hidrogeológicos, a variável do ciclo hidrológico de maior importância é a infiltração, sendo a variação de armazenamento do aquífero, uma resposta a sua taxa. Este processo ocorre, enquanto a superfície do solo não se satura, e é controlado pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade. Sua saída desse sistema pode ser feita por meio da transpiração das plantas ou percolação para camadas mais profundas do solo, alcançando os aquíferos e, dessa forma, contribuindo para o escoamento de base dos rios (WINTER, 1998).

O suprimento de água terrestre obedece ao fenômeno físico da conservação de massa, segundo o qual, em um determinado sistema, a diferença entre as entradas e saídas (precipitação (P); evapotranspiração (ETR); escoamento superficial (R); e infiltração (I) é igual a variação do armazenamento ( $\Delta S$ ). A equação básica do balanço hídrico, definida por THORNTHWAITE e MATHER (1955), pode ser descrita por:

$$P - ETR - R - I = \Delta S \quad \text{Equação 1}$$

### 3.3 Dinâmica de fluxo entre o sistema superficial e subterrâneo

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 (TUCCI, 1995; TEIXEIRA et al., 2009).

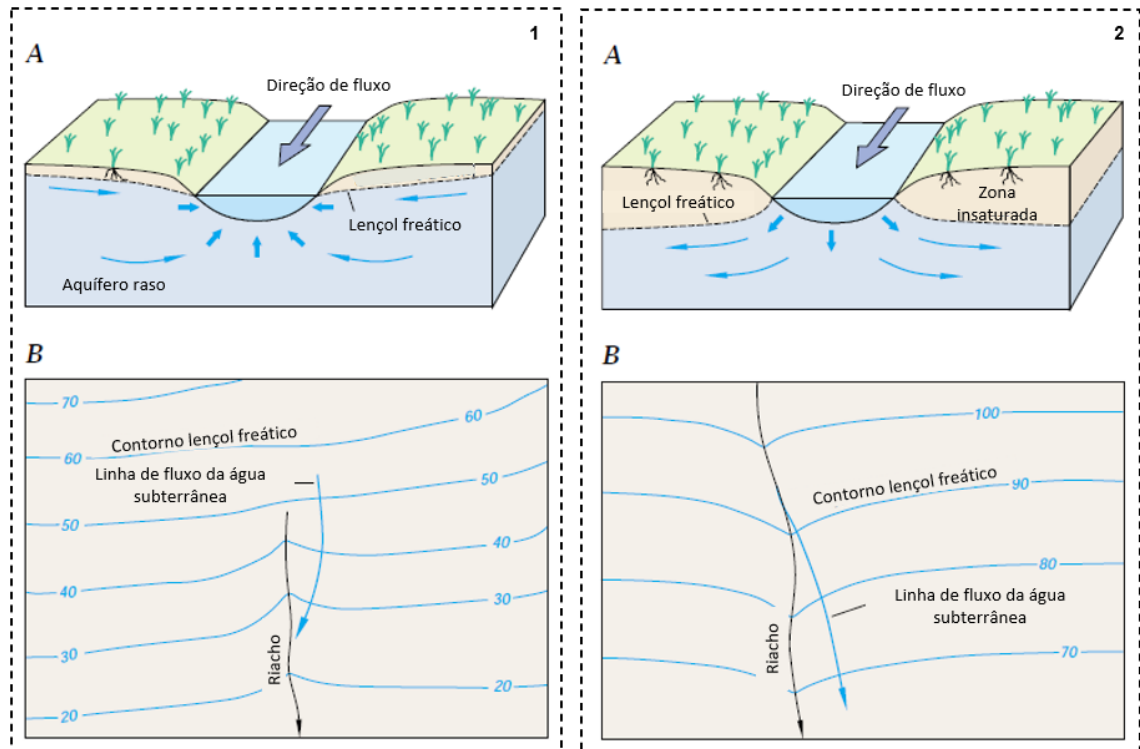
Na matriz de água superficial, essa velocidade é diretamente proporcional a inclinação da superfície. Dessa forma, quanto maior a diferença de potencial, dada uma distância lateral constante, maior será a velocidade do fluxo. No fluxo da água subterrânea, necessita-se considerar, além da inclinação do nível d'água, a permeabilidade do subsolo e a viscosidade da água (TEIXEIRA et al., 2009).

De acordo com WINTER et al. (1998), após infiltrar no solo ou compartimentos geológicos, as águas subterrâneas podem apresentar dois comportamentos distintos: permanecer na zona insaturada/vadosa, ou atingir o aquífero, que compõe a zona saturada, onde os espaços vazios entre os poros são totalmente preenchidos.

A interação possui três formas básicas: ganho de água subterrânea por meio do fluxo direcional aquífero-rio (Esquema 1A), perda de água superficial por meio do fluxo direcional rio-aquífero (Esquema 2A), e/ou ganhos e perdas ao longo do curso d'água (**Figura 4**). Para que as águas subterrâneas sejam descarregadas para um canal do rio, a altitude do lençol freático próximo a ele deve ser mais elevada do que a altitude do próprio rio. Inversamente, para que a água de superfície infiltre na matriz subterrânea, a altitude do lençol freático nas proximidades do rio

deve ser inferior à altitude da água do próprio rio. Os contornos indicam as equipotenciais quando há ganho, apontando na direção de montante (Esquema 1B) e perda apontando na direção de jusante (Esquema 2B) (WINTER et al., 1998).

**Figura 4 – Fluxo influente (1) e efluente (2) das águas subterrâneas**



Fonte: Adaptado WINTER et al., 1998.

### 3.4 Aspectos qualitativos da integração

As águas subterrâneas encontram-se em quantidade na maior parte do mundo, entretanto, sua qualidade é um fator limitante para utilização. As necessidades percebidas para este recurso pode ocorrer a nível de indivíduo, grupo ou ecossistema.

De acordo com FEITOSA et al. (2008), 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 que existe uma grande quantidade de variáveis que influenciam na qualidade da água de recarga.

As reações biogeoquímicas que ocorrem comumente entre essas águas são: reação ácido-base, precipitação e dissolução de minerais, sorção e troca de íons, reações de oxidação-redução, biodegradação, dissolução e exsolução de gases (WINTER et al., 1998).

### **3.5 Gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas**

No Brasil, o processo de gestão integrada do recurso natural primordial, a água, ainda está em fase de consolidação (BRASIL, 2022), em face das dificuldades naturais inerentes a complexidade e dimensão dos sistemas ambientais e pelos desafios imputados pela ação antrópica sobre esses diferentes sistemas (TUNDISI, 2008).

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 as 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.

Ainda que o processo de gestão ocorra na maior parte do território nacional de forma separada, a gestão integrada faz-se necessária pelos seguintes motivos: o ciclo hidrológico é naturalmente integrado; a valoração hídrica aplicada atualmente não é a mais realista; necessidade de agir proativamente para evitar futuros conflitos de disponibilidade; uso sustentável dos recursos hídricos para evitar a possibilidade de danos ambientais importantes; e cumprimento do aparato legal.

Neste sentido, a gestão integrada deve ser aplicada em compatibilidade com as leis, decretos e regulamentos existentes, não apresentando ideias controversas ou dualidade na interpretação. De forma objetiva, a Lei N° 9.433/1997 (BRASIL, 2018), que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, define como um de seus objetivos a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, entretanto, não detalha tais conceitos no que diz respeito a sua aplicabilidade. Logo, entende-se que os seus instrumentos desta política devem servir de amparo para este tipo de análise (**Quadro 1**).

**Quadro 1 - Gestão integrada previstos nos instrumentos da política nacional de recursos hídricos**

<b>Resolução CNRH</b>	<b>Instrumento da PNRH</b>	<b>Conteúdo relacionado</b>
Nº 145/2012	Plano de Recursos Hídricos	“[...] Art. 13º O Plano de Ações visa a mitigar, minimizar e se antecipar aos problemas relacionados aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, de forma a <b>promover os usos múltiplos e a gestão integrada</b> [...]”
Nº 91/2008	Enquadramento	“[...]Art. 3º § 1º A elaboração da proposta de enquadramento deve considerar, <b>de forma integrada e associada, as águas superficiais e subterrâneas</b> , com vistas a alcançar a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade compatíveis com os usos preponderantes identificados [...]”
Nº 16/2001	Outorga	“[...] Art. 1º § 4º A análise dos pleitos de outorga deverá <b>considerar a interdependência das águas superficiais e subterrâneas</b> e as interações observadas no ciclo hidrológico visando a gestão integrada dos recursos hídricos. [...]”
-	Cobrança	-
Nº 13/2000	Sistema de Informação	“[...]Art. 1º A Agência Nacional de Águas - ANA coordenará os órgãos e entidades federais, cujas atribuições ou competências estejam relacionadas com a gestão de recursos hídricos, mediante acordos e convênios, <b>visando promover a gestão integrada das águas</b> e em especial a produção, consolidação, organização e disponibilização à sociedade das informações e ações [...]”

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Vale ressaltar que, apesar do Brasil já ter iniciado estudos sobre a cobrança pelo uso da água em algumas das suas bacias, mesmo antes da aprovação da Lei 9.433/1997, estes estudos estão concentrados na cobrança da água superficial.

De acordo com o Plano de Ação – Estratégia Nacional para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos 2022-2040 (BRASIL, 2022), as análises realizadas 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.

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, detalha GUIMARÃES et al. (2010). Dessa forma, antes da liberação de uso, estudos sistemáticos no âmbito das duas matrizes deverão ser realizados.

Efetivamente para este propósito, têm-se a Resolução N° 202/2018 (BRASIL, 2018), que estabelece diretrizes para a gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Art. 3° A gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos contemplará avaliações hidrológicas integradas e deverá observar, no mínimo, as seguintes diretrizes:

- 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.

Em Minas Gerais, a Lei N° 13.199/1999 (BRASIL, 1999), assinala pontos a serem executados quanto aos recursos hídricos, em seu Art. 3:

“II - o gerenciamento integrado dos recursos hídricos com vistas ao uso múltiplo; IV - a adoção da bacia hidrográfica, vista como sistema integrado que engloba os meios físico, biótico e antrópico, como unidade físico-territorial de planejamento e gerenciamento; X - o reconhecimento da unidade do ciclo hidrológico em suas três fases: superficial, subterrânea e meteórica; XI - a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade.”

GUIMARÃES et al. (2008) explana que, neste contexto, a aplicação das tecnologias para Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) vem possibilitar a garantia para o atendimento de metas de desenvolvimento sustentável e implica em subsidiar políticas públicas eficientes

para a proteção do meio ambiente, especialmente em função de a bacia hidrográfica representar a unidade de gestão ambiental por excelência.

### **3.6 Metodologias para definição da conectividade hídrica**

No Brasil, alguns estudos foram conduzidos com a finalidade de melhor gerenciar o uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Neste sentido, o estudo de Lima et al. (2003) aplicado a uma área piloto da sub-bacia do rio Fêmeas, localizada no Oeste da Bahia, pautou-se nos seguintes objetivos específicos:

- Identificar as características hidrogeológicas dos aquíferos da sub-bacia;
- Identificar as características hidrológicas dos principais corpos d'água;
- Determinar os parâmetros hidrodinâmicos para a utilização de modelos de simulação;
- Estudar a relação existente entre as águas superficiais e subterrâneas;
- Definir critérios para outorga e gerenciamento de águas subterrâneas.

O intercâmbio entre as matrizes pode ser conhecido por meio de diferentes técnicas: 1) aérea, por meio de sensoriamento remoto; 2) caracterização da temperatura por perfil térmico; 3) traçadores; 4) estudo geoquímico; 5) e instrumentos de monitoramento, como piezômetros, medidores de infiltração, medidores de fluxo de água e rede de poços (ROSENBERRY e LABAUGH, 2008).

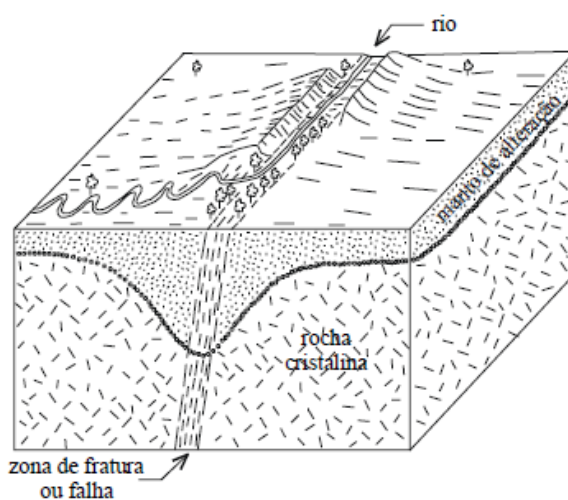
SEGUNDO NEVES (2005), atualmente, existem muitas linhas de pesquisa que utilizam métodos de sensoriamento remoto e SIG para estudar a variação da produtividade dos poços em ambientes fraturados, e por consequência, entender a relação da geologia estrutural com o fluxo e armazenamento de água. A principal limitação destes métodos está no desconhecimento de qual ou quais fatores efetivamente interferem na produtividade desses aquíferos, e consequentemente, qual peso deve ser atribuído a cada um deles.

### **3.7 Método Analítico Hierárquico**

A ausência de subsídios financeiros para o desenvolvimento de pesquisas sobre a conectividade das águas superficiais e subterrâneas implica na utilização de métodos alternativos para estabelecimento desta integração.

A maior complexidade dos ambientes fraturados sugere metodologias mais robustas para estabelecer o comportamento das águas. Em se tratando deste contexto geológico, segundo SILVA (2015), o fluxo das águas subterrâneas ocorre por meio de descontinuidades do maciço rochoso, e devido à intersecção entre elas, existe a comunicabilidade do aquífero (**Figura 5**).

**Figura 5 – Bloco esquemático de uma zona de fratura/falha em terreno cristalino, projetada em superfície por meio de um rio**



Fonte: SINGHAL e GUPTA, 1999.

Do ponto de vista hidrogeológico, a condutividade hidráulica em uma rocha cristalina/aquífero fissural pode apresentar ordem de grandeza bastante variável em uma curta distância, visto que este parâmetro depende da presença e características das estruturas geológicas (NEVES, 2005). Logo, a compreensão da geologia estrutural torna-se uma importante ferramenta para compreender as descontinuidades mais favoráveis para a percolação das águas, armazenamento (BERTACHINI, 1987; NEVES, 2005), ou atuar como barreira de fluxo (SINGHAL e GUPTA, 2010). Com base nisso, o potencial hidrogeológico pode ser investigado por meio da caracterização dessas estruturas.

CARVALHO et al. (2015) explicam que para avaliar espacialmente as estruturas contidas do substrato rochoso é necessário entender as características do terreno em superfície que representariam estruturas geológicas. As descontinuidades, também tratadas aqui como lineamentos na paisagem, correspondem a feições únicas ou um conjunto delas, que refletem elementos estruturais do arcabouço geológico como direção de camadas, xistosidade, falhas e fraturas (WINGE et al, 2001).

Segundo Fetter (2001), as fraturas estão relacionadas a juntas (descontinuidades ao longo das quais o movimento relativo entre os blocos é muito pequeno) e as falhas (ou zonas de falhas), cujas dimensões (comprimento) de interesse variam de metros a dezenas de quilômetros.

AMARO e STRIEDER (1994) denominaram lineamentos, como estruturas regionalmente penetrativas (Tipo 1) e estruturas rúpteis (Tipo 2). Aos lineamentos do Tipo 1 associou-se feições geomorfológicas positivas (quebras positivas), que correspondem a feições bastante salientes no relevo, arranjada de forma linear ou levemente curva, apresentando-se de forma paralela constituindo cristas simétricas ou levemente assimétricas (SOARES e FIORI, 1976), que permitem caracterizar as foliações ou lineações. Ao tipo 2 associaram predominantemente às feições geomorfológicas negativas, que constituem trechos retilíneos de canais de drenagem (O'LEARY et al., 1976), e que representam falhas ou fraturas. Neste último agrupamento, pode-se considerar também as redes de drenagem (LIMA, 1997). A **Quadro 2** apresenta alguns dos lineamentos existentes.

**Quadro 2 - Síntese de alguns lineamentos estruturais**

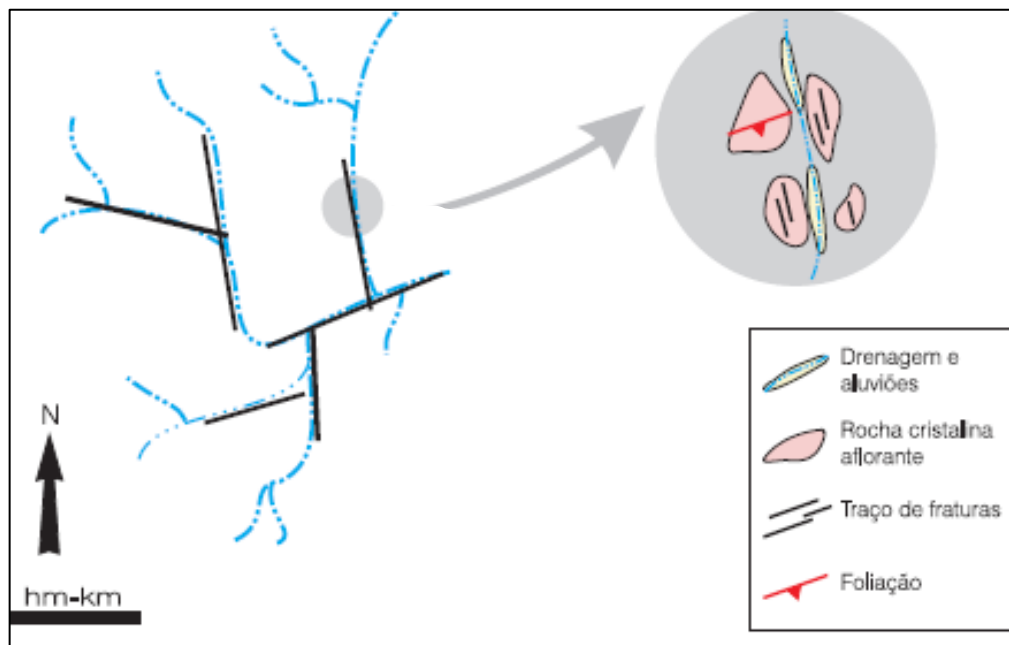
<b>Tipo de lineamento</b>	<b>Descrição</b>
Plano de acamamento	Camadas paralelas de diferentes tamanhos de grão ou composição indicam sucessivas superfícies deposicionais. O acamamento pode ser delgado, com espessura da ordem de milímetros, centímetros ou mesmo metros.
Foliação (Clivagem)	Do latim <i>folium</i> (folha), qualquer estrutura plana ou curvo plana que defina uma trama em uma rocha metamórfica, mas pode também incluir estruturas primárias, como acamamento sedimentar ou magmático. Já a clivagem refere-se a propriedade da rocha em romper-se ou clivar em superfícies aproximadamente paralelas.
Fraturas	Zonas bastante delgadas, em geral consideradas como superfícies, e estão relacionadas a descontinuidades nas propriedades mecânicas (resistência ou rigidez) e deslocamentos.
Falhas	Um volume de rocha com uma superfície central ou núcleo de cisalhamento, onde o cisalhamento é mais intenso, envolto por um volume afetado em menor grau por uma deformação rúptil, que tem relação espacial e genética com a falha.

Fonte: FOSSEN, 2017; SANTOS, 2018.

O estudo dos elementos fisiográficos da paisagem é uma importante ferramenta para a identificação de falhas transcorrentes e seus movimentos relacionados (ALLEN, 1965), representados por longos traços lineares no relevo e que podem ser mapeados por meio da fotointerpretação (MOODY e HILL, 1956). As fraturas também podem ser identificadas dessa forma, e segundo SINGHAL e GUPTA (2010), quando paralelas, conferem uma forte anisotropia ao maciço rochoso e quanto maior o número de fraturas, mais interconectadas e menor a anisotropia.

Quando considerada a rede de drenagem para compreensão da geologia estrutural, o modelo riacho-fenda proposto por SIQUEIRA (1967) é aplicável. Ele se refere a uma drenagem que teria seu curso controlado por uma fratura/zona de fratura, assegurando periodicamente, condições de recarga (**Figura 6**).

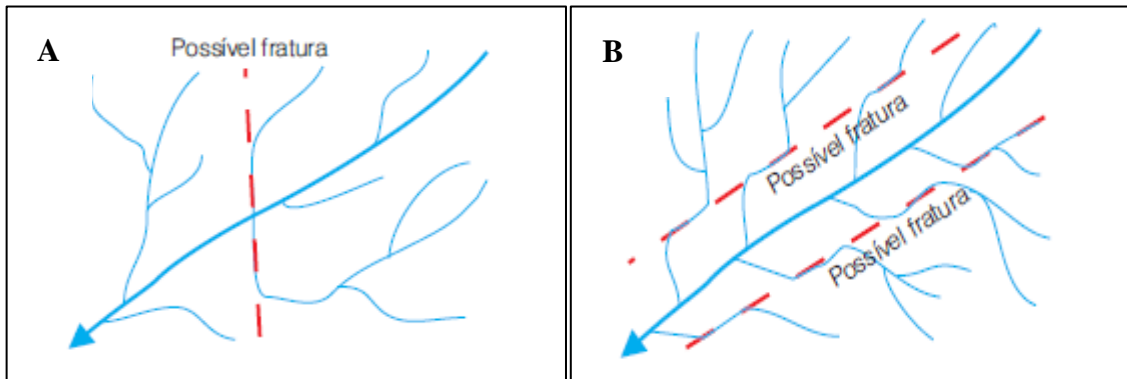
**Figura 6 – Conceito de riacho-fenda ilustrado na visão de mapa ou fotografia aérea (a) e em afloramentos (b, c).**



Fonte: Adaptado: FEITOSA et al., 2008.

No embasamento cristalino, pode-se obter indícios de fraturas a partir da rede de drenagens, como dois tributários opostos que encontram o rio principal com alinhamentos diferenciados dos demais (**Figura 7, A**), e trechos de tributários distintos encontram-se alinhados sobre uma mesma reta (**Figura 7, B**).

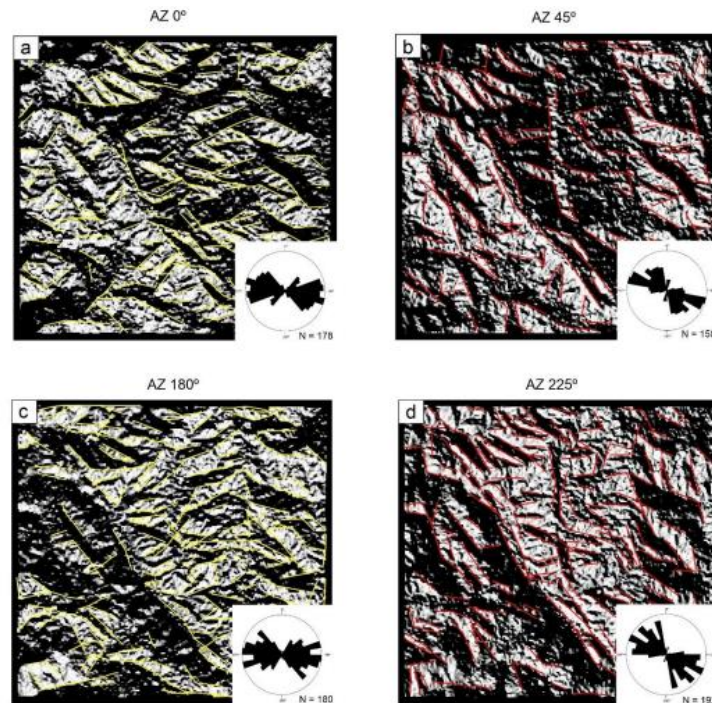
**Figura 7 – Fraturas evidenciadas nas drenagens**



Fonte: Adaptado FEITOSA et al., 2008.

As imagens de satélite para a coleta de informações morfoestruturais leva em consideração que a quantidade de sombreamento de uma feição topográfica está relacionada principalmente a elevação solar. Esta quando de baixo ângulo produz um maior sombreamento, destacando possíveis lineamentos. Linhas de diferentes tonalidades no solo, alinhamento da vegetação, vales retilíneos encaixados e cumes alinhados também são características que orientam na demarcação dos lineamentos (MULDOON e BRADBURY, 2005). A **Figura 8** mostra o sombreamento aplicado a uma imagem de satélite para realce dos lineamentos existentes em uma determinada área na região sudoeste do escudo Sul-Riograndense.

**Figura 8 – Relevo sombreado em uma imagem de satélite com 30 metros de resolução espacial, obtidos por azimutes solares de 0°, 45°, 180° e 225°, contendo lineamentos morfoestruturais (em amarelo e vermelho)**



Fonte: GOULART, 2021.

Após análise da geologia estrutural é possível mensurar a relação entre estruturas e a produção do aquífero (BERTACHINI, 1987; MIRNA, 2005; DAEE, 2005). Para isso, é feita a análise da produtividade do poço por meio da variável capacidade específica que, por sua vez, corresponde à vazão retirada por metro rebaixado do nível d'água do poço ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ ). Logo, antes de compreender a dinâmica do recurso hídrico, é necessário compreender o padrão e a natureza dos lineamentos (SINGHAL e GUPTA, 2010).

Em seguida, aplica-se o método do Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process - AHP*), proposto por Saaty, que consiste no estabelecimento de critérios e seus respectivos pesos, que tenham influência direto no mapa de interesse (objetivo pretendido), que neste caso é o mapa de potencialidade hídrica subterrânea. O método é aplicado seguindo as seguintes tarefas:

1. Definir a problemática;
2. Seleção dos critérios;

3. Hierarquização dos critérios na matriz de julgamento;
4. Análise paritária da matriz  $n \times n$ , onde  $n$  é o quantitativo de critérios. Neste momento, é atribuído a cada célula da matriz um valor que condiz com a intensidade de importância do parâmetro da linha (i) em relação a coluna (j), conforme **Quadro 3**. Ressalta-se que cada elemento de nível inferior afeta todos os elementos do nível superior;
5. Calcular o índice de consistência (IC), que define a coerência dos julgamentos realizados conforme fórmula abaixo. Quanto mais próximo de zero, maior a consistência global da matriz.

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad \text{Equação 2}$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{Aw}{w} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$\lambda_{m\acute{a}x}$ : autovalor máximo

$n$ : quantidade de critérios

$Aw$ : novo vetor

$w$ : vetor coluna de prioridades

6. Calcular razão de consistência (RC), que indica a confiabilidade do julgamento realizado, conforme fórmula abaixo. Esta deve ser  $< 0,10$ .

$$RC = \frac{IC}{n - IR} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$Ir$ : Índice Randômico

Para o Índice Randômico, considerar a quantidade de critérios, seguindo tabela definida por Saaty (**Tabela 1**).

**Quadro 3 - Escala fundamental de Saaty (1991)**

<b>Intensidade de importância</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade <i>i</i> recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade <i>j</i> , então <i>j</i> , tem o valor recíproco quando comparado a <i>i</i> .	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos <i>n</i> , somente para completar a matriz.

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

**Tabela 1 – Índice Randômico em função do número de critérios**

<b>Número de critérios (<i>n</i>)</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Índice Randômico (IR)</b>	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

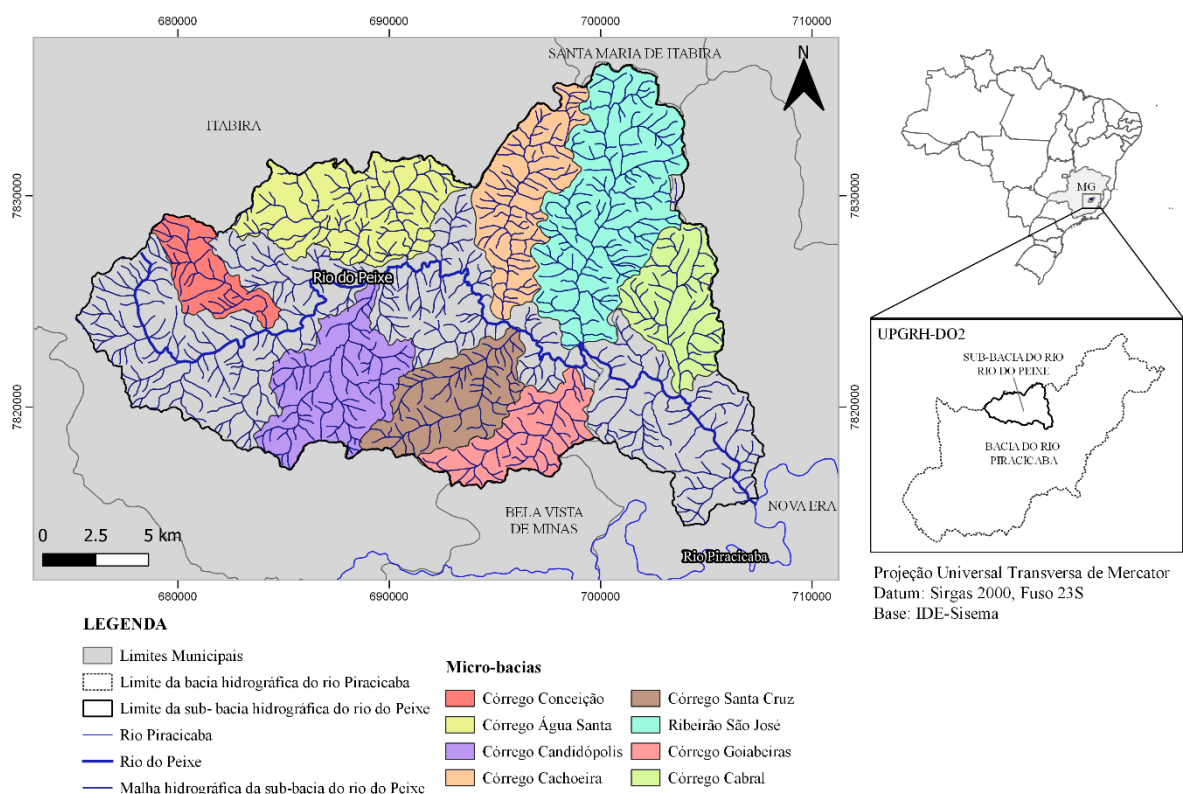
Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

## 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 Hidrografia

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 km<sup>2</sup> e todos seus afluentes (Conceição, Candidópolis, Água Santa, Cachoeira, Santa Cruz, Goiabeira, São José e Cabral) convergem para o denominado Rio do Peixe, conforme apresentado na **Figura 9**.

**Figura 9 – Delimitação da bacia hidrográfica do Rio do Peixe**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A extensão do curso d'água principal é de 53 km, da sua nascente até a confluência com o rio Piracicaba, sendo 38 km dentro da área do município de Itabira. No seu trajeto desenvolve uma direção predominante oeste-leste possuindo uma declividade equivalente da ordem de 0,35 %. Os principais afluentes do Rio do Peixe apresentam um padrão dentrítico e são o Ribeirão

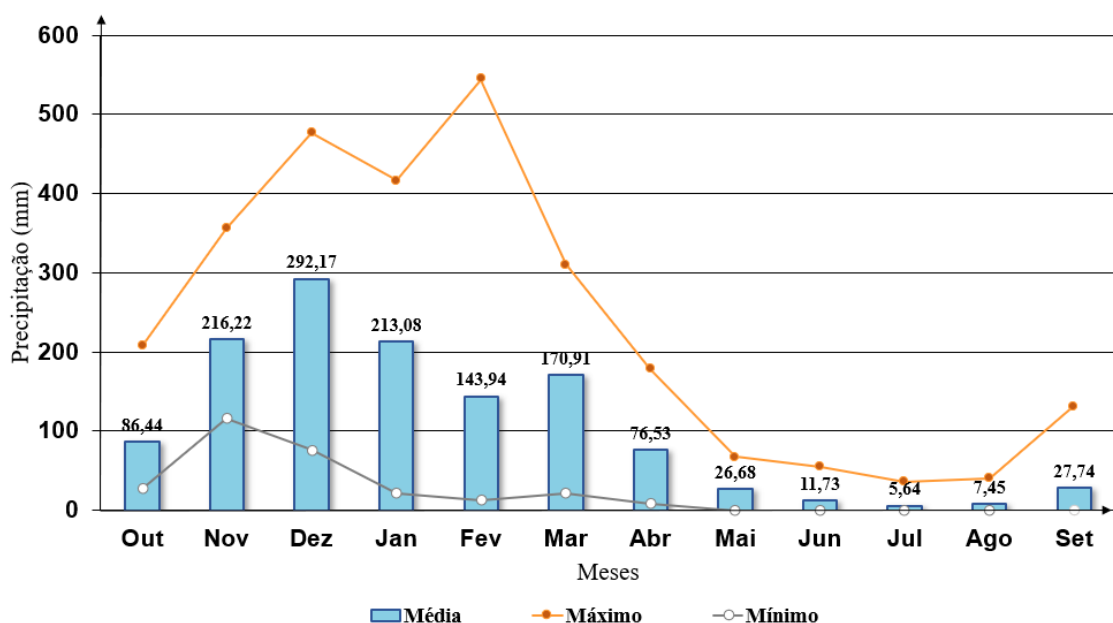
Candidópolis (área de 33,86 km<sup>2</sup> e comprimento de 11,17 km), Córrego Cachoeira (área de 30,16 km<sup>2</sup> e comprimento de 11,58 km), Ribeirão São José (área de 57,99 km<sup>2</sup> e comprimento de 15,34 km) e o Córrego Santa Cruz (área de 26,7 km<sup>2</sup> e comprimento de 12,65 km).

## 4.2 Clima

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe, localizada majoritariamente em Itabira-MG e com pequena parcela à sudeste em Nova Era- MG, possui classificação climática Cwa (KÖPPEN e GEIGER, 1928). 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, para a área de estudo, 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, apresentando os meses de julho e agosto os menores valores. Ainda assim, considerando os anos hidrológicos completos, o acumulado de precipitação máximo ocorreu em fevereiro, 544,2 mm, e a precipitação mínima na maioria dos meses do período de estiagem. Com base nos valores históricos, de out/2003 a set/2021, obtem-se para a área estudada uma média plurianual de 1279,09 mm. (**Figura 10**).

**Figura 10 – Pluviometria histórica média, máxima e mínima da bacia do Rio do Peixe**

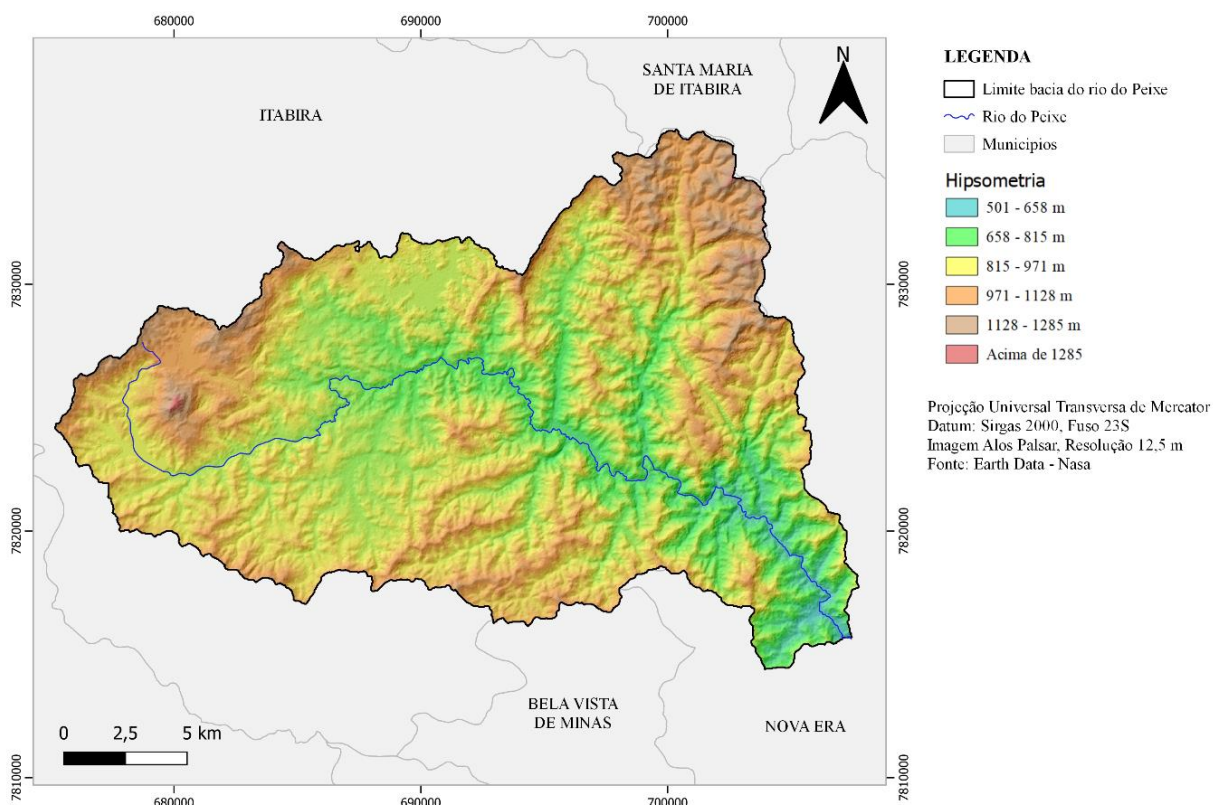


Fonte: Adaptado da ANA, 2023.

### 4.3 Hipsometria e Declividade

As feições morfoestruturais podem ser 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 a fim de obter um melhor conhecimento visual e espacial da escala hipsométrica (**Figura 11**).

**Figura 11 – Mapa hipsométrico da bacia do Rio do Peixe**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na área de estudo, nota-se um relevo bem estruturado, com divisores de águas bem definidos nas bacias, principalmente a partir da porção média da bacia do Rio do Peixe. 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, próximo a Usina Conceição – Vale, e os menores valores, nos vales dos rios, principalmente mais próximos a confluência com o rio Piracicaba.

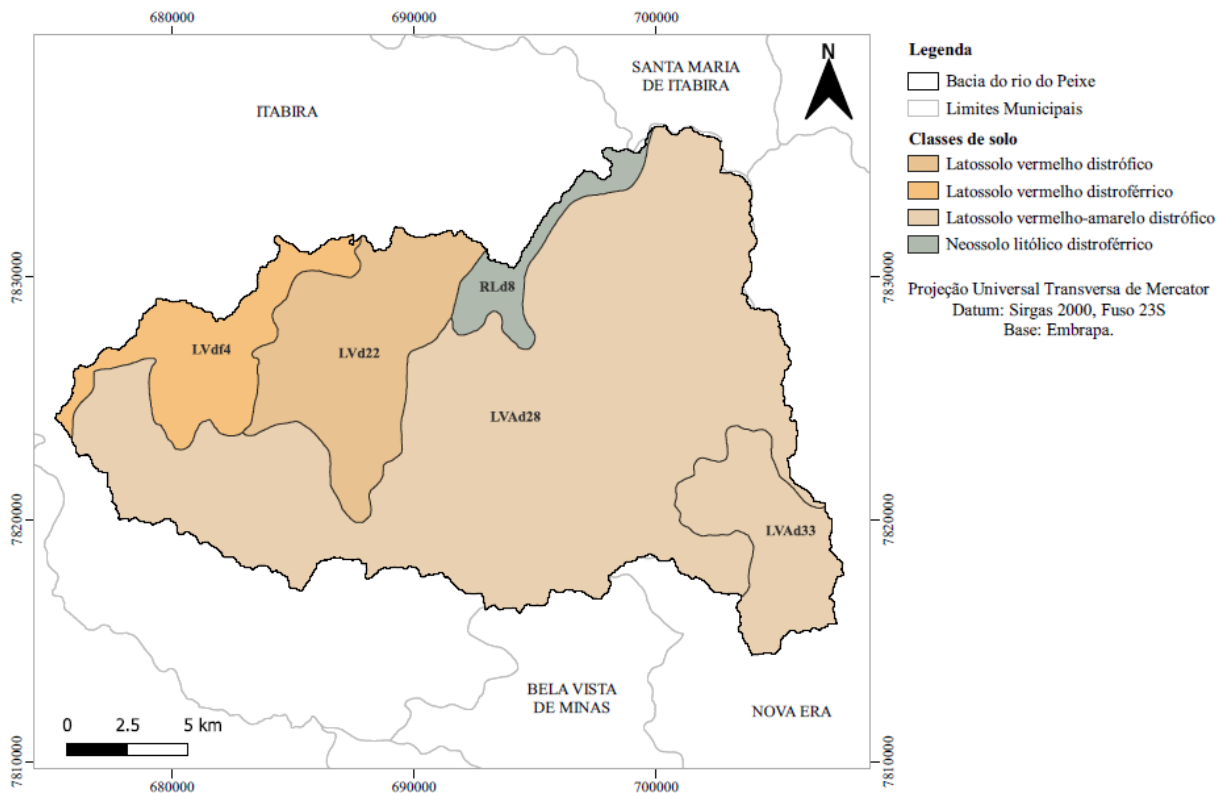
De acordo com a classificação da Embrapa, a área de estudo possui um relevo predominantemente ondulado (8 a 20%) até a porção média da bacia e, a partir daí, categorizado

como forte-ondulado (20 a 45%). O relevo plano pode ser visualizado nas regiões dos rios, lagoas e represas.

#### 4.4 Solo

A área em estudo apresenta duas classes de solo, latossolo e neossolo, sendo essa primeira a predominante (**Figura 12**).

**Figura 12 – Classes de solo da bacia do Rio do Peixe**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O Latossolo vermelho-amarelo distrófico está localizado principalmente na parte média a baixa da bacia do Rio do Peixe e corresponde a 74,10% do território estudado. Caracterizado pelo predomínio de areia em suas amostras, especialmente as frações mais finas, o que o torna susceptível à erosão mesmo em relevo plano e suave ondulado. São acentuadamente drenados.

Em segundo lugar, o latossolo vermelho distrófico que se estende em 14,11% da área estudada, é caracterizado por ser um solo muito intemperizado quimicamente, o que leva-o a decomposição de componentes minerais, principalmente de origem caulínica (MACHADO

SÁ, 2014). Possui saturação por base inferior a 50%. São profundos e apresenta resistência à erosão. Apresentam alta permeabilidade.

O latossolo vermelho distroférico, que compreende 8,48% da bacia, possui teores de  $Fe_2O_3$  de  $180\text{ g Kg}^{-1}$  a  $< 360\text{ g Kg}^{-1}$  de solo, ambos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B.

Já o neossolo litólico distroférico são comumente encontrados em afloramentos rochosos e por isso possui limitações como pedregosidade e o relevo movimentado. São pouco desenvolvidos, rasos e moderadamente a excessivamente drenados. É devido a essas características, considerados susceptíveis a erosão laminar. Na bacia hidrográfica do Rio do Peixe, ele está presente em 3,30% de sua extensão (**Tabela 2**).

**Tabela 2 – Área por classe de solo da bacia do Rio do Peixe**

Classe	Descrição do solo	Área	
		Km <sup>2</sup>	(%)
LVAd28	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	269	65,92
LVd22	Latossolo vermelho distrófico	57,6	14,11
LVdf4	Latossolo vermelho distroférico	34,6	8,48
LVAd33	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	33,5	8,21
RLd8	Neossolo litólico distrófico	13,4	3,28

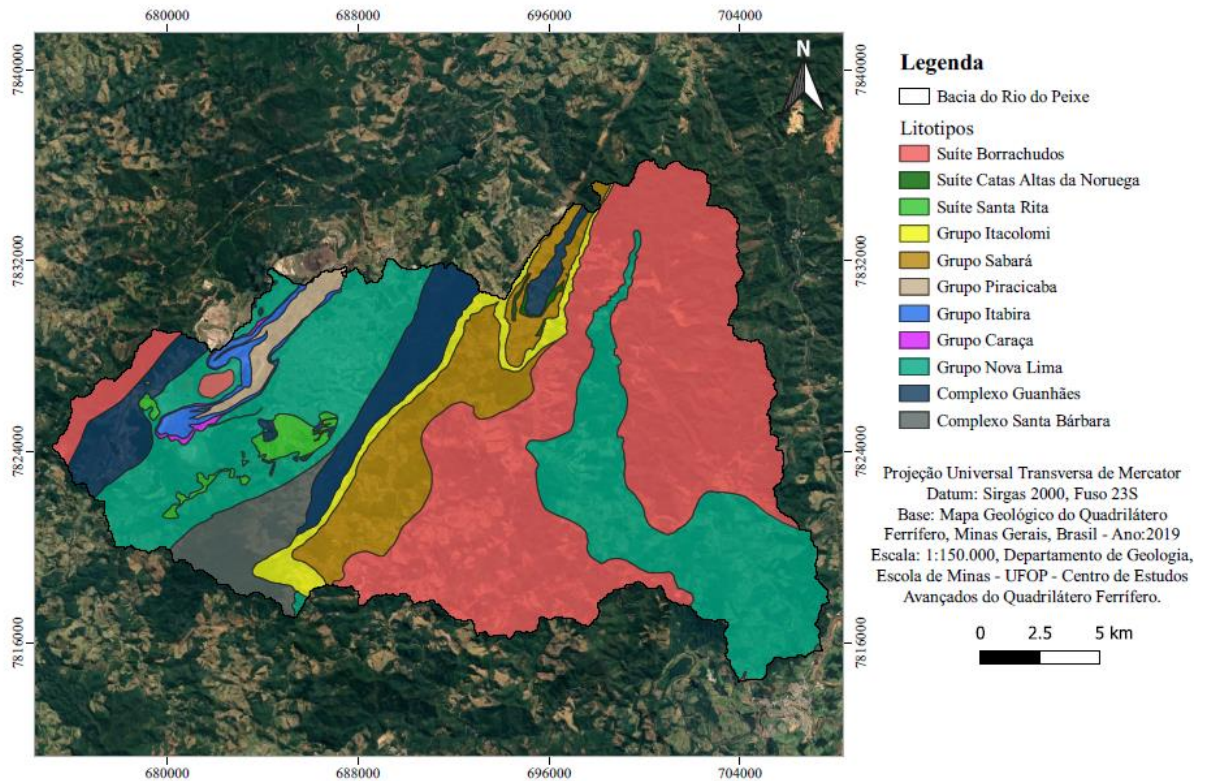
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

## 4.5 Geologia

### 4.5.1 Litoestratigrafia

A área de estudo pertence, pertence ao sinclinal Itabira, localizado na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, sendo ela 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 Guanhães; e 11) Complexo Santa Barbará (**Figura 13**). A quantificação de cada litotipo dentro da bacia do Rio do Peixe pode ser consultada na **Tabela 3**.

**Figura 13 – Geologia da bacia do Rio do Peixe – MG**



Fonte: Adaptado Endo et al., 2019.

**Tabela 3 – Área por litotipo da bacia do Rio do Peixe**

Litotipo	Área	
	Km <sup>2</sup>	%
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

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A Suíte Borrachudos é constituída por metagranitos, metasienito-granitos intrusivos e augen gnaiesses (JORDT-EVANGELISTA et al., 2016), da era Paleoproterozoica, encontrando-se distribuída em uma grande faixa direcional SW-NE e em menor extensão, à noroeste da área de estudo. Os mais bem preservados tipos de granitos, dessa suíte alcalina são foliados, com grau de faturamento bastante variável. Apesar da natureza tectônica, são comuns corpos pegmatíticos no interior dos corpos e nas encaixantes, além de expostos naturalmente na forma de pães de açúcar ou no leito dos rios (FERNANDES et al., 1994). Caracteriza-se por um relevo em meia laranja, com poucos afloramentos, (ANDRADE, 2012) e de granulometria intercalando entre média e grossa (FERNANDES et al., 1994).

O Supergrupo Minas de era Paleoproterozóica, compreende os seguintes grupos em ordem geocronológica: Caraça, Itabira e Piracicaba. Distribuído espacialmente no intermédio nor-noroeste da área estudada, no núcleo deste supergrupo prenomina-se o Grupo Piracicaba, constituído principalmente por quartzitos ferruginosos, quartzo-sericita xistos, mica xistos, xistos grafitosos e, esporadicamente, xistos carbonáticos, dolomitos manganésíferos e itabiritos (FERNANDES et al., 1994). As rochas do Grupo Piracicaba são foliadas, geralmente dobradas e com estruturação subvertical devido a ação de zonas transcorrentes que cortam e limitam o Supergrupo Minas (GONÇALVES et al., 2019).

No entorno do grupo Piracicaba, o Grupo Itabira é traçado. Representado pela Formação Cauê, segundo Endo et al. (2019), consiste em itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos e, subordinadamente, de filitos, quartzitos e mármore. Em grandes profundidades tal formação apresenta-se alterada em produtos friáveis, possuindo imensa propriedade armazenadora de água devido a sua natureza porosa ou fraturada (NETO et al., 2001; MOURÃO, 2007). O Grupo Caraça é a unidade basal do Supergrupo Minas sendo constituído pelas Formações Moeda e Batatal, RENGGER et al. (1994). As rochas deste grupo apresentadas em estreita faixa na área de estudo, contornando em partes, as minas de Periquito e Conceição, e sendo representado por quartzitos, metaconglomerados, filitos sericíticos e mármore dolomíticos no topo.

Sotoposto ao Grupo Caraça, o Grupo Nova Lima, de idade arqueana, apresenta intercalação de rochas de origem sedimentar e vulcânica que, conforme FERNANDES et al., (1994), devido a imposição de uma forte deformação cisalhante e ação de processos hidrotermais, foram transformadas em xistos, xistos cloríticos e filitos. Três corpos distintos do Supergrupo Rio das Velhas estão especializados na área de estudo. O primeiro, localizado na porção mais alta da bacia, constitui a unidade vulcanoclástica, na qual são encontrados metabasaltos intercalados

com BIFs, metacherts, filitoscarbonosos, metapelito e metagrauvacas. O segundo, a Unidade sedimentar química, comportas por metamargas, formações ferríferas da fácies carbonato e xistos carbonosos intercalados a metapelito, metagrauvacas e metarenitos impuros, com turmalinitos e lentes de metaconglomerados (Endo et al., 2019). O terceiro, característico da Formação Indiviso, localiza-se majoritariamente na porção baixa da área estudada, e têm-se em sua constituição filitos terrígenos, quartzo-clorita-xistos, carbonato-quartzo-clorita-xisto, quartzitos, metagrauvacas, metaconglomerados, metavulcânicas félsicas, metaultramáficas, metamáficas tholeiíticas, metabasaltos komatiíticos e formações ferríferas bandadas.

As rochas do Complexo Guanhães, projetam-se na direção preferencial NNE-SSW, estão sotopostas às rochas do Grupo Nova Lima, e são representadas na área por uma diversidade de litotipos como ortognaisses tonalíticos-trondhjemíticos-granodioríticos e megraníticos, gnaisses com intercalações ou anfibolitos acamadados (Endo et al., 2019).

Pertencente ao Grupo Itacolomi, a Formação Florália apresenta-se em uma faixa que corta a região média da bacia do Rio do Peixe. Apresentando variações em sua espessura, é composta por ortoquartzitos e seixos de formação ferrífera. Tal formação contorna o limite leste da Formação Samarenha do Grupo Sabará, sendo ela definida pela presença de biotita-clorita-granada xistos, quartzitos, metapelitos, filitos carbonosos, mármore dolomíticos, BIF, metadiamicititos, metagrauvacas e paragnaisses. Em forma de pequenos corpos inclui-se nas adjacências a Suíte Catas Altas da Noruega, diques máficos intrusivos nos xistos cloríticos do Grupo Sabará (RAPOSO, 1991).

O Complexo Santa Bárbara, está inserido na região su-sudoeste e contitui-se de ortognaissestonalíticos-trondhjemíticos-granodioríticos, metagranitos e migmátitos. Compartimentado na porção alta da bacia, têm-se se ainda a Suíte Santa Rita, integrando ao contexto geológico as metaultramáficas.

#### **4.6 Domínios Hidrogeológicos**

A área de estudo dispõe de quatro domínios hidrogeológicos (**Figura 14**). Os domínios Cristalino, Metassedimentos/Metavulcânicas e Vulcânicas são designados como aquíferos fissurais. Já o domínio Poroso/Fissural é categorizado como um aquífero misto.

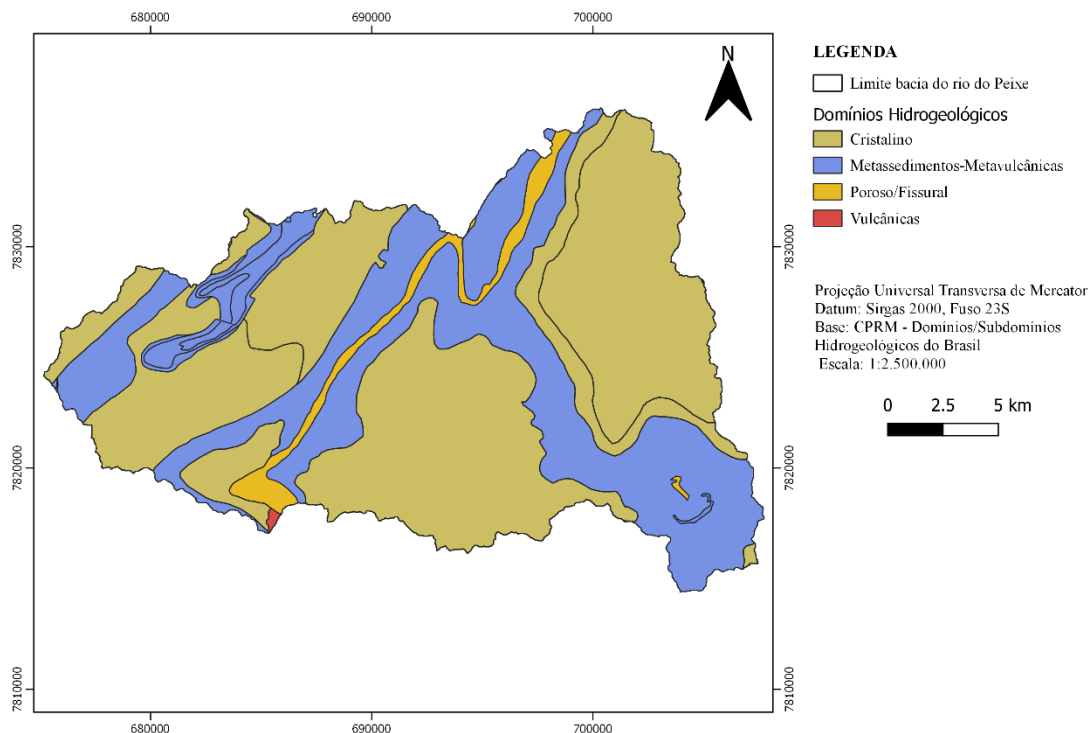
O domínio Cristalino cobre 62% da bacia do Rio do Peixe é o domínio hidrogeológico predominante na área de estudo. Tem como característica zonas aquíferas descontínuas, localizadas, heterogêneas e anisotrópicas. Quando há existência de lineamentos, fraturas, rocha são fraturada e manto de intemperismo, 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, ocorrendo também em fundo de voçorocas. Quando esses elementos da porosidade secundária não são evidenciados, a permeabilidade da água no meio torna-se nula. 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.

O domínio dos Metassedimentos/Metavulcânicas corresponde a 35% da bacia do Rio do Peixe e formam aquíferos livres aleatórios, descontínuos e pouco extenso. Sua favorabilidade hídrica é baixa e suas águas um pouco menos salinizadas que aquela verificada no embasamento Cristalino.

Quanto ao domínio das rochas Vulcânicas, representando 3,38% da área total estudada, na porção sul, pode ser classificado com porosidade secundária, e de forma menos dominante, porosidade primária, sendo ela intrínseca as estruturas vesiculares. Por este motivo, sua potencialidade hidrológica pode vir a ser superior do que aquela verificada no Metassedimentos/Metavulcânicas.

O domínio Poroso/Fissural, possui uma área de 0,09%, e ocorre predominantemente em uma faixa sentido nor-nordeste (NNE) na região central da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, 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, têm-se em sua arquitetura, zonas aquíferas granulares, apresentando porosidade primária baixa à média e zonas aquíferas fissurais, com porosidade secundária. Tal domínio possui médio potencial hidrogeológico.

**Figura 14 – Domínios Hidrogeológicos da bacia do rio do Peixe**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

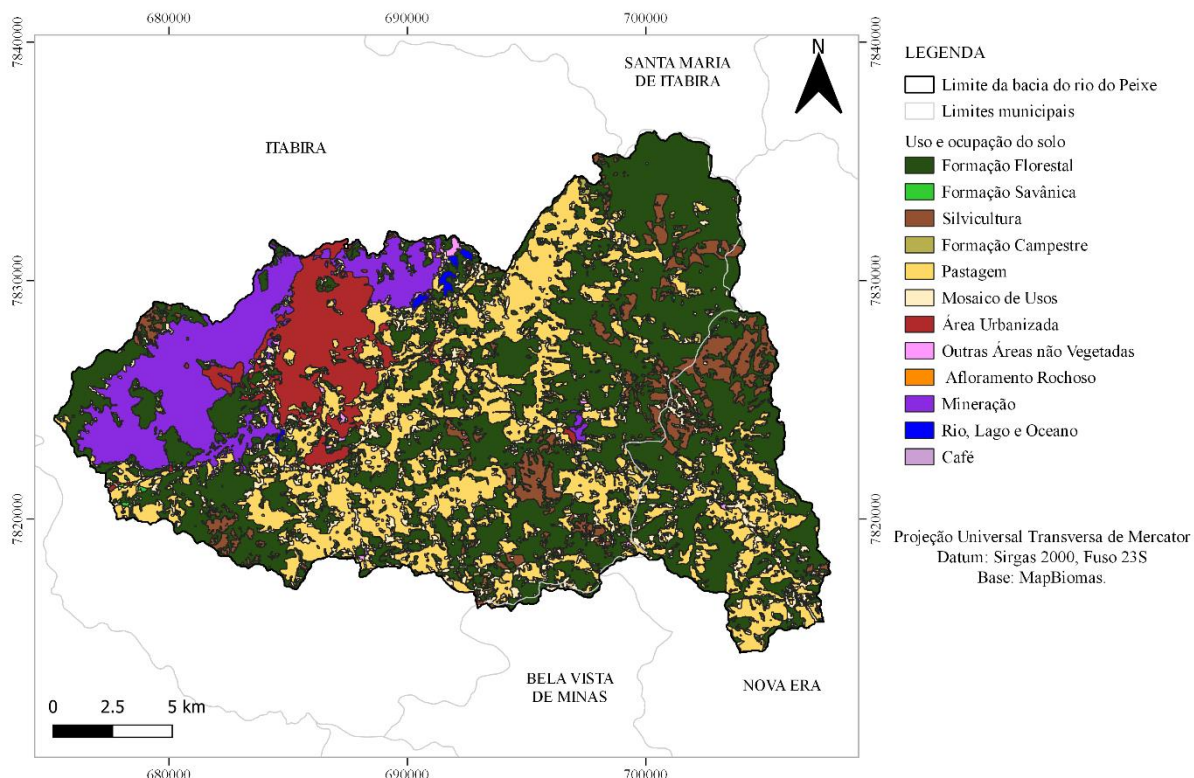
#### 4.7 Uso e cobertura da terra

O uso e cobertura da terra é representado por: Formação Florestal (172,39 km<sup>2</sup>), Pastagem (94,10 km<sup>2</sup>), Mosaico de Usos (43,11 km<sup>2</sup>), Mineração (40,59 km<sup>2</sup>), Área urbanizada (25,36 km<sup>2</sup>), Sivicultura (23,67 km<sup>2</sup>), Formação Campestre (6,28 km<sup>2</sup>), Outras áreas não vegetadas (2,05 km<sup>2</sup>), Rios, lagos e oceanos (1,12 km<sup>2</sup>), Formação Savânica (0,54 km<sup>2</sup>) e Afloramento Rochoso (0,18 km<sup>2</sup>).

Ressalta-se que, somou-se ao uso Formação Florestal as plantações de café também encontradas na região. Este processamento foi feito visto que a parcela dessa camada foi bem pequena e nas adjacências encontram-se fragmentos de floresta.

A discretização do uso e cobertura da terra pode ser visualizado na **Figura 15**.

**Figura 15 – Uso e cobertura da terra da bacia do Rio do Peixe**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

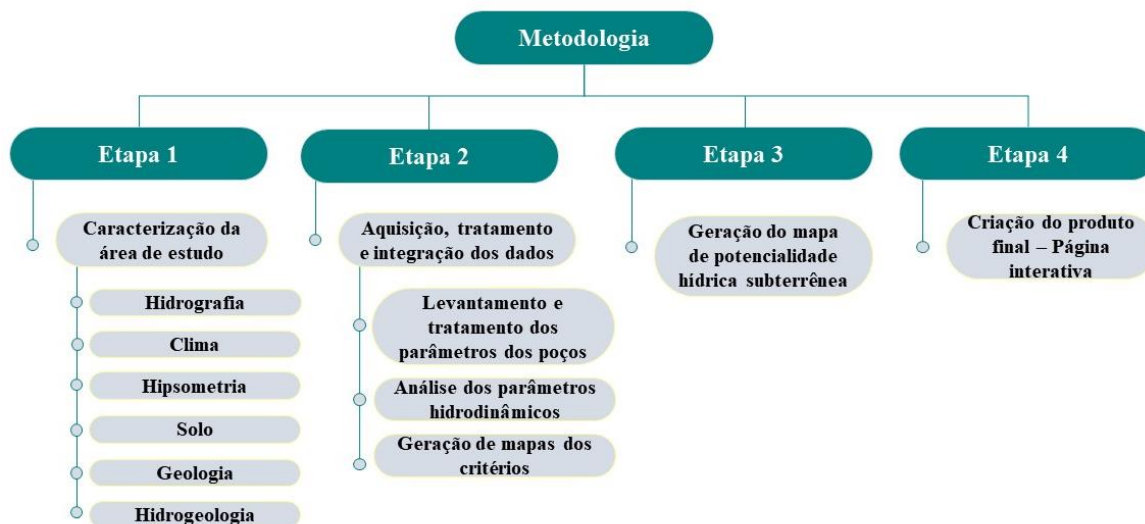
## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão apresentados neste item, os materiais/ferramentas utilizadas no desenvolvimento da pesquisa e os métodos adotados.

Os materiais/ferramentas utilizadas podem ser sintetizados em 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) e o outro, para o processamento das demais etapas do trabalho, como extração dos lineamentos de análise hierárquica multicritério.

O método aplicado baseou-se em quatro etapas: (1) caracterização da área de estudo; (2) aquisição, tratamento e integração dos dados; e (3) geração do mapa de potencialidade hídrica; e (4) criação do produto final – Página Interativa. A esquematização detalhada dessas etapas pode ser visualizada na **Figura 16**.

Figura 16 – Fluxograma metodológico para o desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

### 5.1 Caracterização da área de estudo

Para caracterizar a área de estudo foi feita uma busca em meio eletrônico de suas características físicas e climatológicas. Neste sentido, 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 pluviométrica foram utilizados os dados da estação Nova Era Telemétrica, código 1943100 (ANA/CPRM), 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.

Além disso, realizou-se a seleção de dados secundários da bacia hidrográfica, à saber: malha hidrográfica (ANA/IGAM), outorgas (IGAM), pedologia (FEAM/UFV), geologia (UFV/CPRM + colaboradores), 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.

A discriminação dessas informações em mapas temáticos foi importante para conhecer as características da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, assim como o cenário atual de demanda hídrica.

## **5.2 Aquisição, tratamento e integração dos dados**

Essa etapa foi dividida em duas, a primeira, referente as atividades de gabinete e a segunda, relativa as atividades de campo.

### **5.2.1 Levantamento e tratamento dos parâmetros dos poços tubulares**

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

Para a metodologia a ser empregada, foram selecionados apenas os poços 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 (**Capítulo 6.1**) e para a avaliação hidrodinâmica foram excluídos aqueles que não apresentaram pelo menos um dos parâmetros supracitados (**Capítulo 6.2**). Em sequência, foram realizadas análises estatísticas por meio dos gráficos de frequência acumulada e correlação.

### **5.2.2 Geração dos mapas de lineamentos**

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 a 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.

Em seguida, utilizando a extensão AzimuthFinder 1.1 foram extraídos os azimutes por meio do método de frequência dos comprimentos dos lineamentos. Tais informações foram exportadas

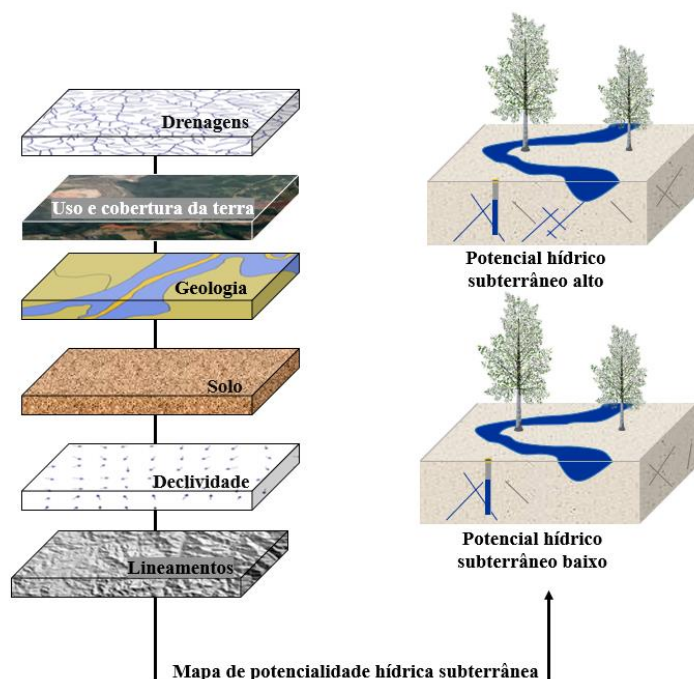
em formato txt e importadas no programa online Stereonet para geração do diagrama de roseta da bacia do Rio do Peixe.

### 5.2.3 Geração do mapa de potencialidade hídrica

O mapa de potencialidade hídrica indicará locais onde há interação da água superficial e subterrânea. Para isto, deverá ser aplicada uma rotina de mapeamento para classificar a rede de fluxo superficial em função de características que influenciam o comportamento do fluxo subterrâneo.

Com base nos resultados dessas interações, será feito um mapa de potencial hídrico subterrâneo utilizando a ferramenta *Álgebra de mapas* do ArcGis. A cada camada considerada, deve-se atribuir uma significância para cada um de seus critérios. A **Figura 17** apresenta a álgebra de mapas que deverá ser realizada inicialmente.

**Figura 17 – Superposição dos critérios para geração do mapa de potencialidade hídrica subterrânea segundo análise AHP**



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A potencialidade hídrica subterrânea dependerá da resposta dos critérios selecionados para essa análise.

### 5.3 Criação do produto final – Página Interativa

Nesta etapa, será confeccionada um relatório online do Power Bi para acesso ao público em geral, que irá conter diferentes visuais gráficos que respondem de forma interativa aos comandos do usuário. A página será nomeada como “Gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos da bacia hidrográfica do rio do Peixe- MG”.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

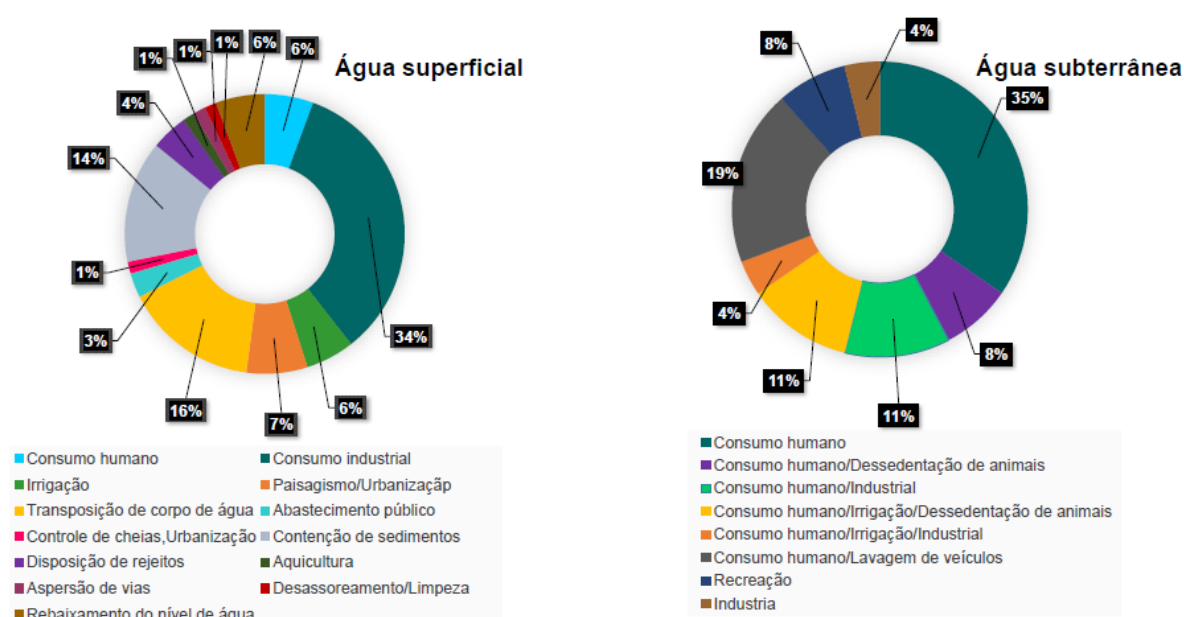
### 6.1 Avaliação das outorgas de uso do recurso hídrico

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.

As finalidades de uso para cada uma das matrizes podem ser visualizadas na **Figura 18**.

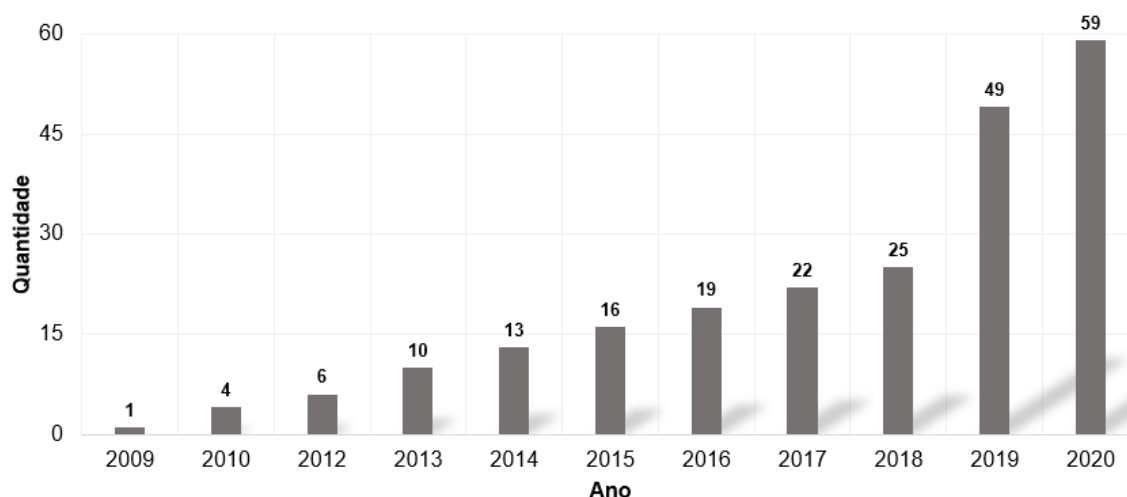
**Figura 18 – Finalidades de uso das outorgas deferidas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

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 19** o comportamento temporal entre 2009 a 2020 das outorgas deferidas para a bacia hidrográfica.

**Figura 19 – Acumulado de outorgas de água subterrânea**



Fonte: IGAM, 2022.

Vale considerar que alguns desses poços podem ter sido desativados, por motivos como, vida útil, problemas de operação, rebaixamento significativo do nível d'água e conflito entre demandas de uso de água na bacia. Todavia, para as discussões acerca das outorgas de água subterrânea, o *status* desativado do poço, não compromete as análises que serão realizadas.

## 6.2 Avaliação Hidrodinâmica dos Sistemas Aquíferos

A disponibilidade de dados confiáveis para análise da matriz subterrânea é um fator limitante para as pesquisas dentro dessa temática, e por consequência, para a efetiva gestão dos órgãos regulamentadores de recursos hídricos. Na existência de dados secundários, a validação deles deve ser realizada, a fim de definir se as informações coletadas possuem coerência, consistência e representatividade.

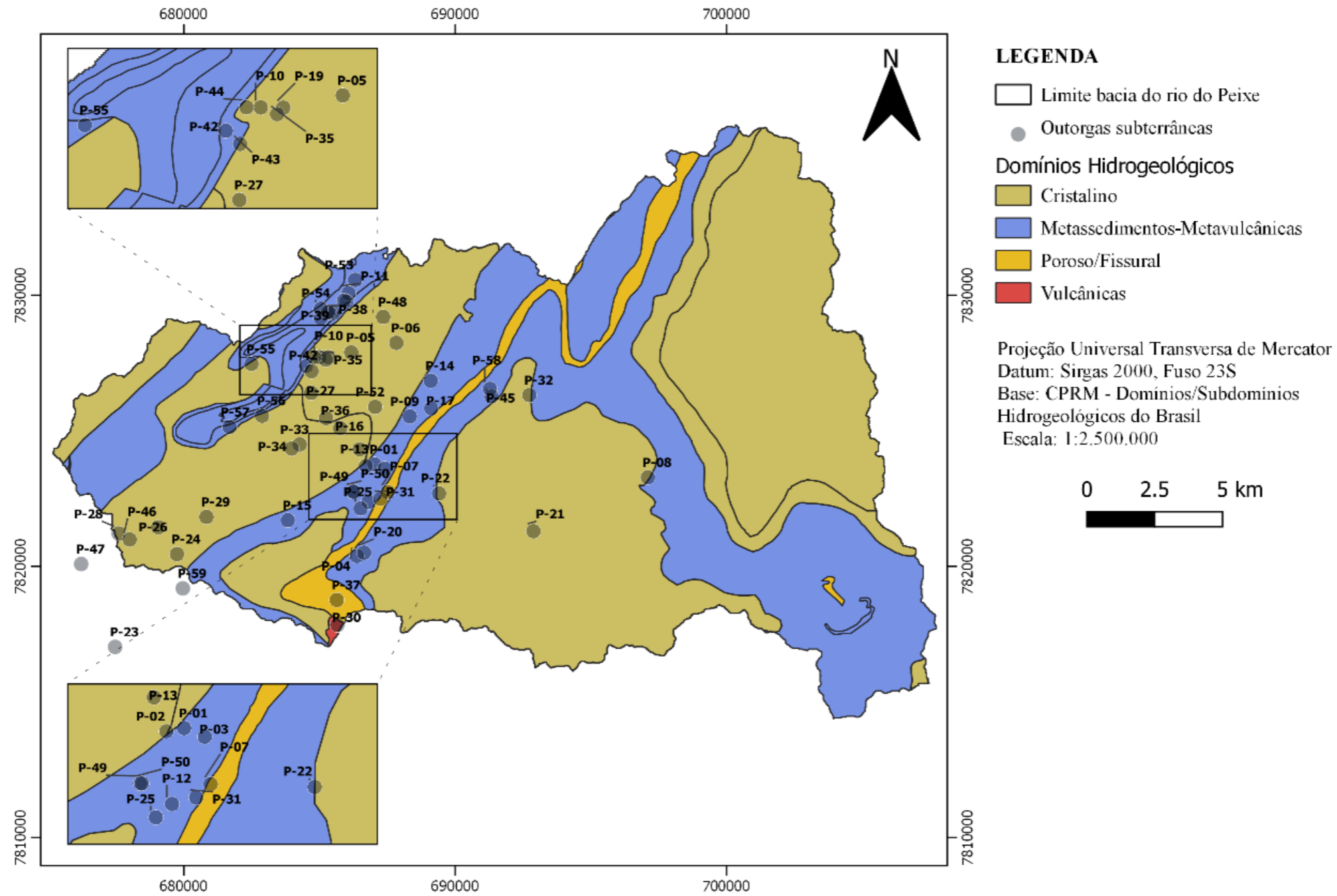
Atualmente, o Sistema de Informações de Águas Subterrânea (SIAGAS), é a principal fonte de informação hidrogeológica do país, tal qual dispõe de poucos poços para avaliação dentro da bacia do Rio do Peixe, sendo que a maioria não apresenta o perfil litológico, série histórica de monitoramento e parâmetros hidrodinâmicos medidos ou calculados. Para os poços outorgados

e que estão inclusos na plataforma, foi feita a compilação dos dados. De forma complementar, foi utilizada a base da SUPRAM-MG, para obter mais informações sobre poços outorgados na região.

Para a compreensão do comportamento hidrodinâmico dos poços tubulares outorgados na bacia do Rio do Peixe, foram analisados os seguintes parâmetros: 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 bacia do Rio do Peixe. Dessa forma, visualiza-se na **Figura 20**, os seguintes quantitativos por domínio hidrogeológico: Cristalino (25), Metassedimentos-Metavulcânicas (28), Poroso fissural (2) e Vulcânicas (1).

Figura 20 – Outorgas subterrâneas distribuídas na bacia do Rio do Peixe

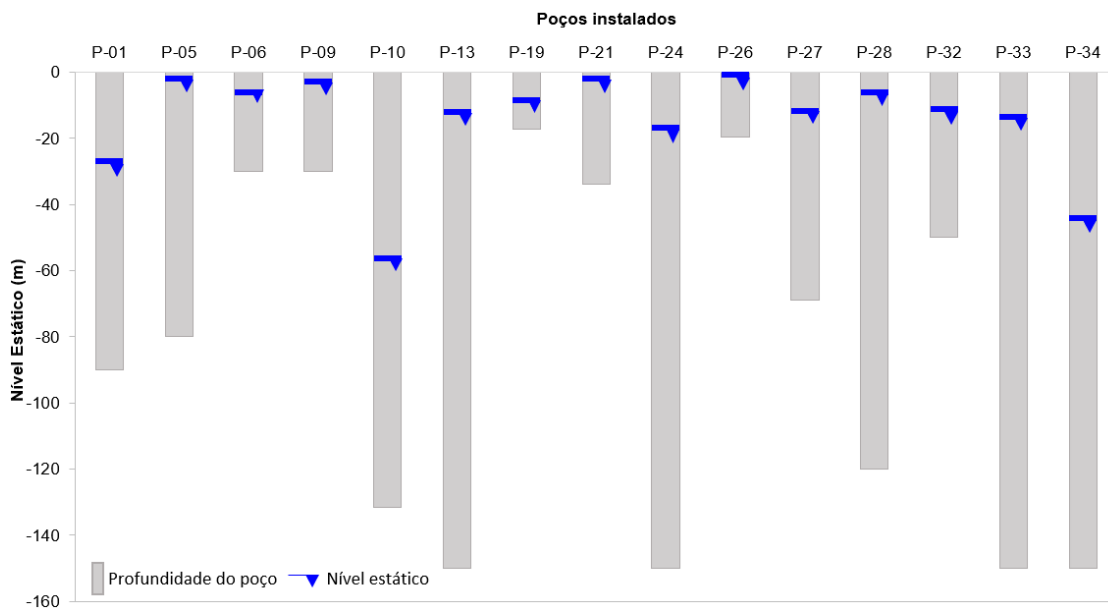


Fonte: CPRM, 2007.

- **Cristalino**

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 21** pode ser observado o nível estático dos poços.

**Figura 21 – Nível estático dos poços alocados no domínio hidrogeológico Cristalino**



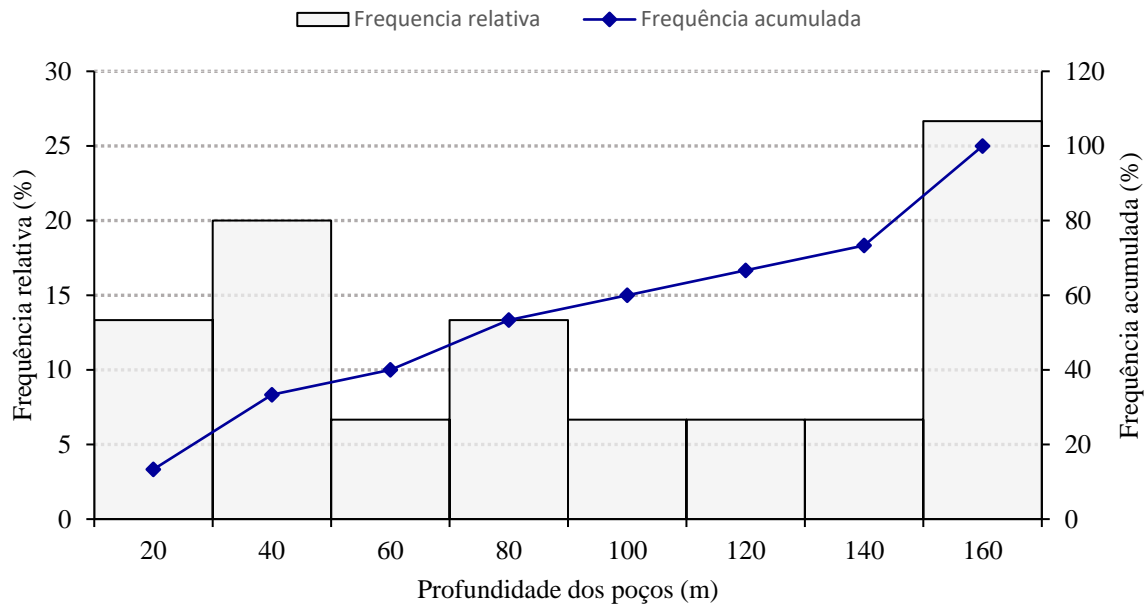
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

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.

O **Gráfico 1** mostra a frequência relativa e acumulada em relação a profundidade dos poços em análise.

**Gráfico 1 – Distribuição de frequências das profundidades no domínio hidrogeológico cristalino**

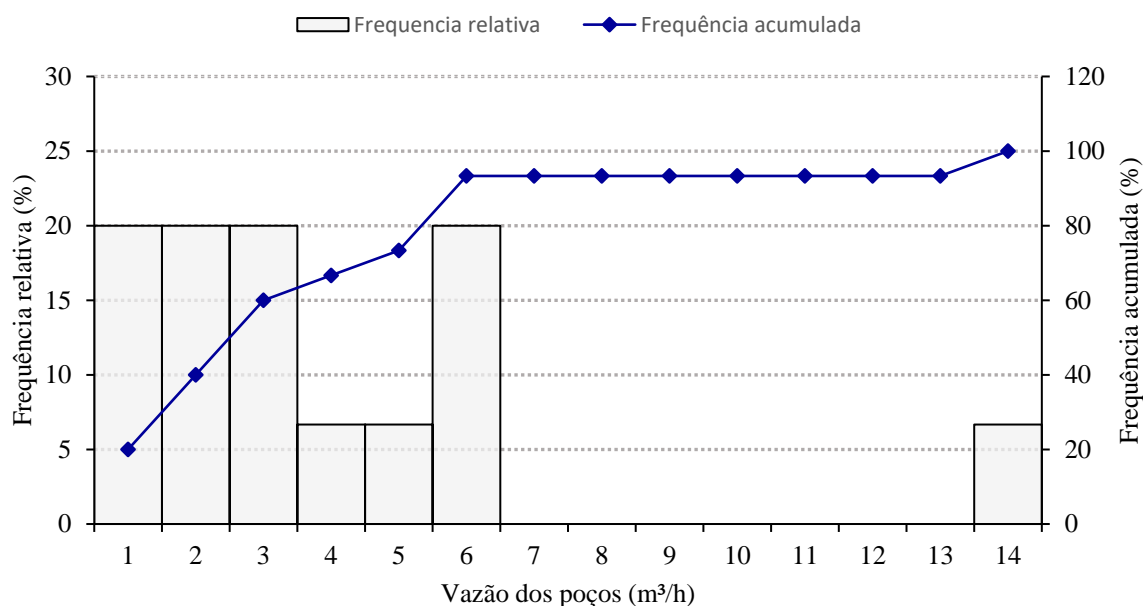


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Com base na análise de frequência relativa das profundidades dos poços localizados na área de estudo, observa-se que, uma maior 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 obtida para este estudo. 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.

O comportamento da vazão também foi estudado para compreender a dinâmica de exploração dos poços neste domínio hidrogeológico, conforme apresentado no **Gráfico 2**.

**Gráfico 2 – Distribuição de frequências de vazão no domínio hidrogeológico Cristalino**

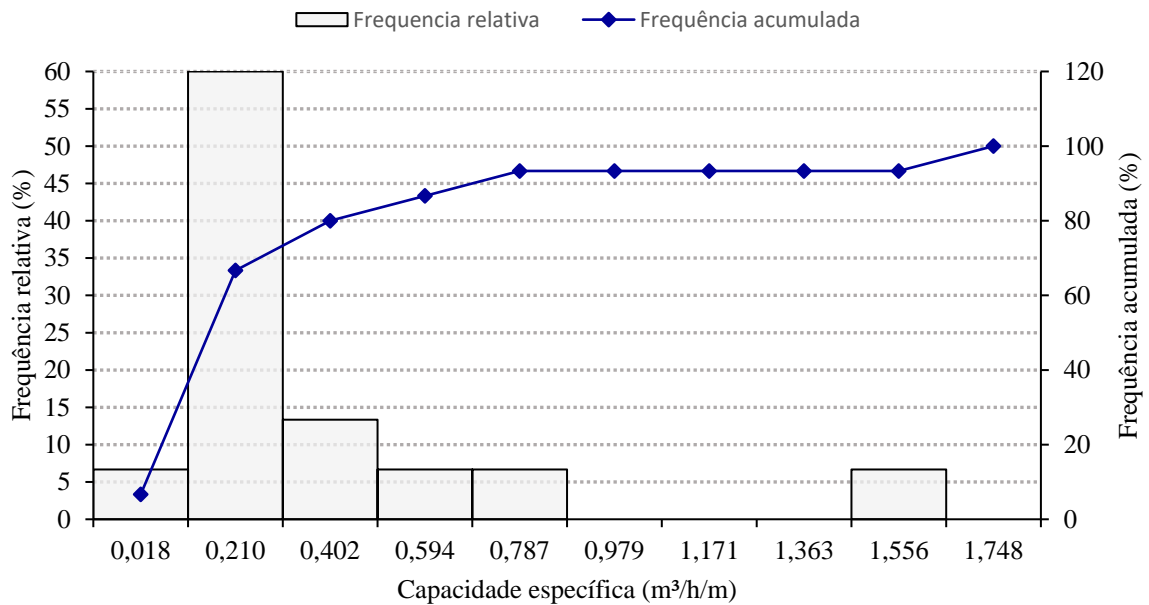


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O domínio hidrogeológico Cristalino possui zonas com maior quantidade de fraturas e que apresentam uma grande variabilidade em suas dimensões. Evidencia-se nele, uma maior quantidade de outorgas com vazões mais baixas e menores quantidades de outorgas com altas vazões. 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 aproximadamente 90% dos poços tem vazão até 6 m³/h.

A produtividade do poço, representado pela capacidade específica, mostra um comportamento similar ao da vazão, onde são verificados uma maior densidade de valores mais reduzidos (**Gráfico 3**). Essa variável apresenta uma variação de 0,018 a 1,556 m³/h/m e valor mediano de 0,114 m³/h/m. Evidencia-se resultados mais frequentes abaixo de 0,21 m³/h/m. Vale reforçar que a variável estatística média não foi calculada, visto que a distribuição de frequência para o parâmetro apresenta uma assimetria na distribuição dos resultados, ou seja, mais valores baixos e poucos valores altos, e dessa forma, essa variável estatística não poderia refletir este comportamento.

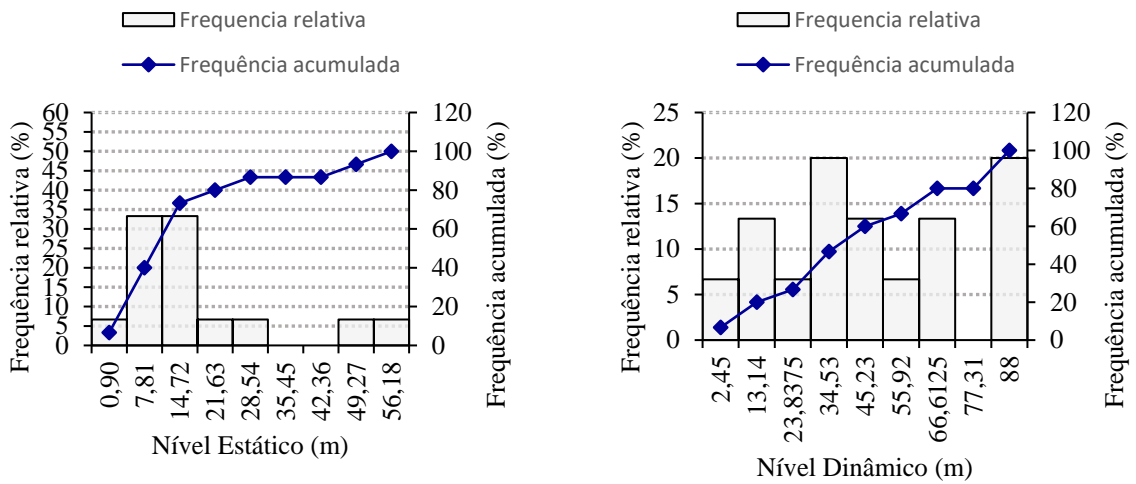
**Gráfico 3 – Distribuição de frequências da capacidade específica no domínio hidrogeológico cristalino**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Os níveis estático e dinâmico também 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.

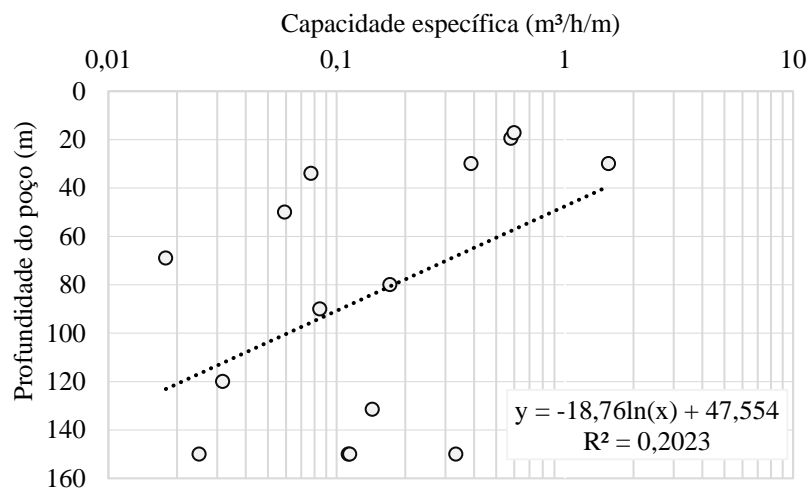
**Gráfico 4 – Distribuição de frequências do nível estático e nível dinâmico no domínio hidrogeológico cristalino**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

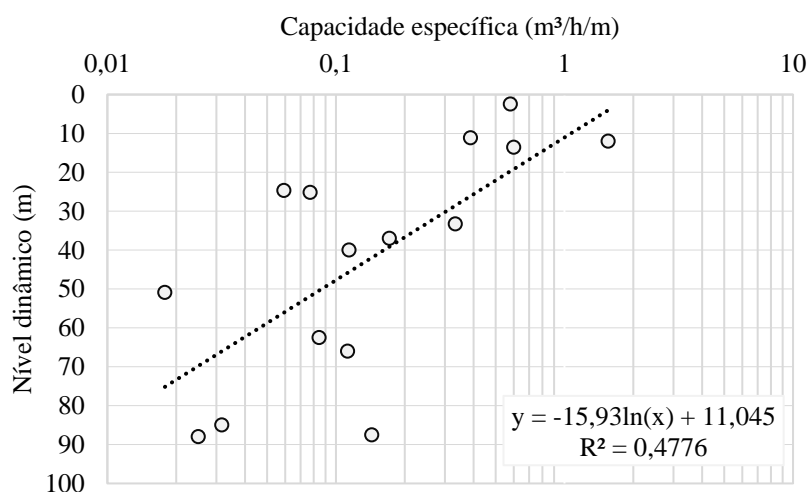
A variação da capacidade específica em relação a profundidade pode ser verificada no **Gráfico 5**, e em relação ao Nível Dinâmico no **Gráfico 6**.

**Gráfico 5 – Capacidade específica em função da profundidade do poço no domínio hidrogeológico cristalino**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

**Gráfico 6 – Capacidade específica em função do nível dinâmico do poço no domínio hidrogeológico cristalino**



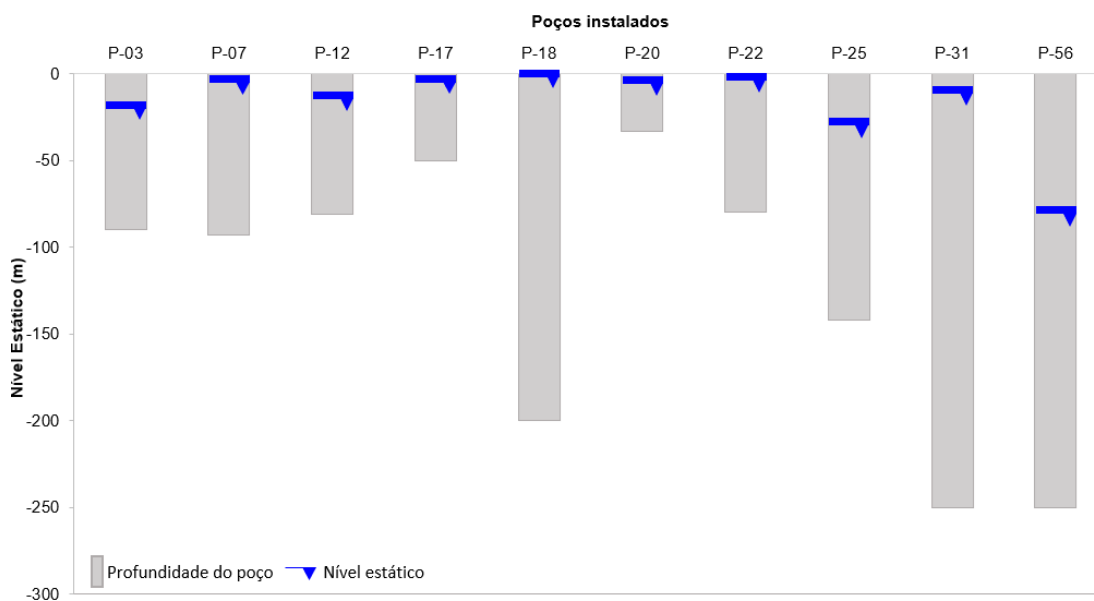
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Nota-se que, as características do aquífero fissural cristalino, como a descontinuidade, heterogeneidade e anisotropia, condicionam uma maior variabilidade dos parâmetros hidrodinâmicos, e tais fatores, justificam a baixa correlação verificada, principalmente na análise profundidade *versus* capacidade específica. Porém, na comparação de nível dinâmico *versus* capacidade específica, o coeficiente de correlação aumenta. Tal comportamento pode estar relacionado a dependência dessas variáveis, visto que para bombear água o nível dinâmico deve ser considerado.

- **Metassedimentos-Metavulcânicas**

No domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas, apenas 10 poços tubulares apresentaram os parâmetros necessários para avaliação hidrodinâmica, sendo eles, P-03, P-07, P-12, P-17, P-18, P20, P-22, P-25, P-31 e P-56. Na **Figura 22** Figura 21 pode ser observado o nível estático dos poços.

**Figura 22 - Nível estático dos poços alocados no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas**



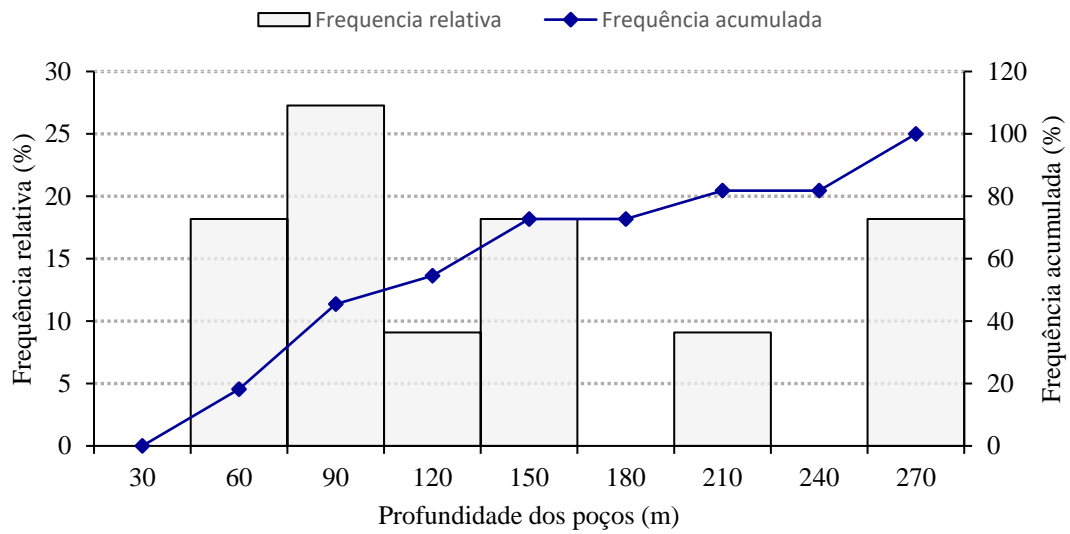
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Observa-se na **Figura 22**, 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.

Nota-se neste domínio 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. Nota-se ainda que 50% dos poços estão instalados em profundidades inferiores ou igual a 120 metros (**Gráfico 7**).

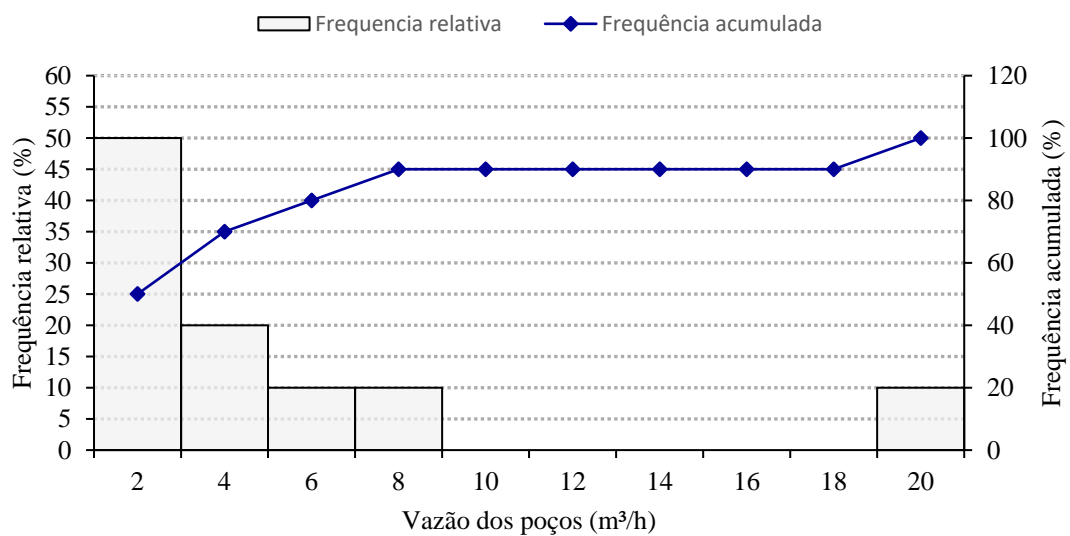
**Gráfico 7 – Distribuição de frequências das profundidades no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

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 m<sup>3</sup>/h. Os demais 90% correspondem às vazões de até 8 m<sup>3</sup>/h (**Gráfico 8**).

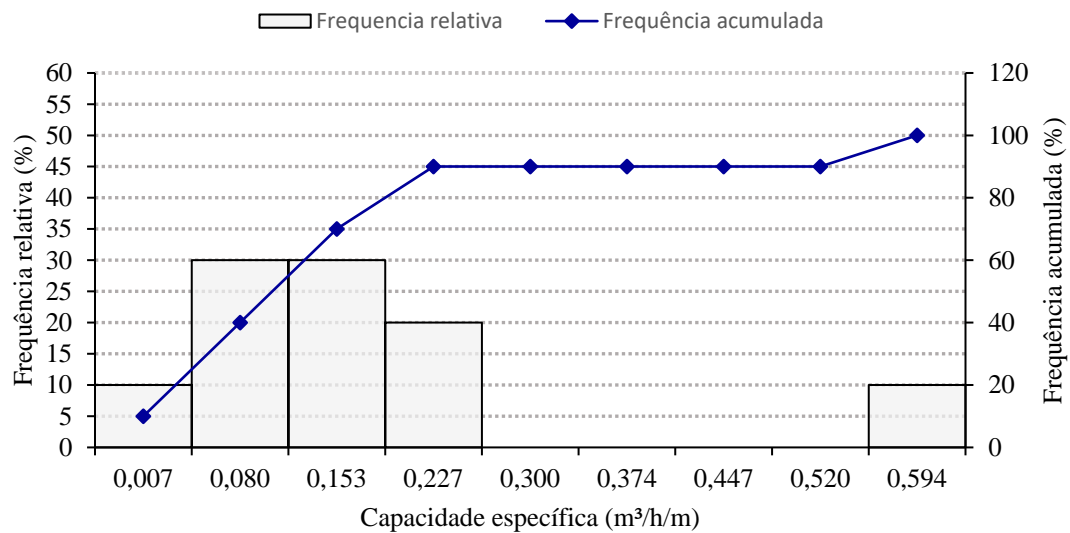
**Gráfico 8 – Distribuição de frequências de vazão no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A capacidade específica, representada no **Gráfico 9**, apresenta um comportamento similar a vazão em termos de proporções. Os valores mais representativos são verificados em menor quantidade, 10% entre 0,520 e 0,594 m<sup>3</sup>/h/m, e os demais que representam 90% do conjunto de outorgas analisadas, detém capacidade específica de até 0,227 m<sup>3</sup>/h/m.

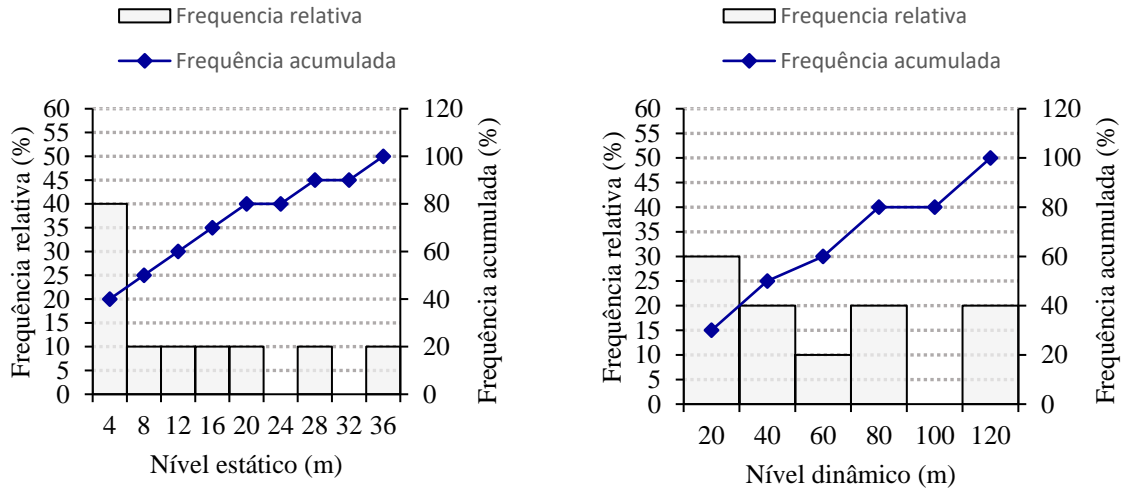
**Gráfico 9 – Distribuição de frequências da capacidade específica no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Para o nível estático foi verificado valor mínimo e máximo de 1,79 e 78,73 m, respectivamente, ao passo que para o nível dinâmico, esta variação ficou entre 17,10 e 118,86 m (**Gráfico 10**).

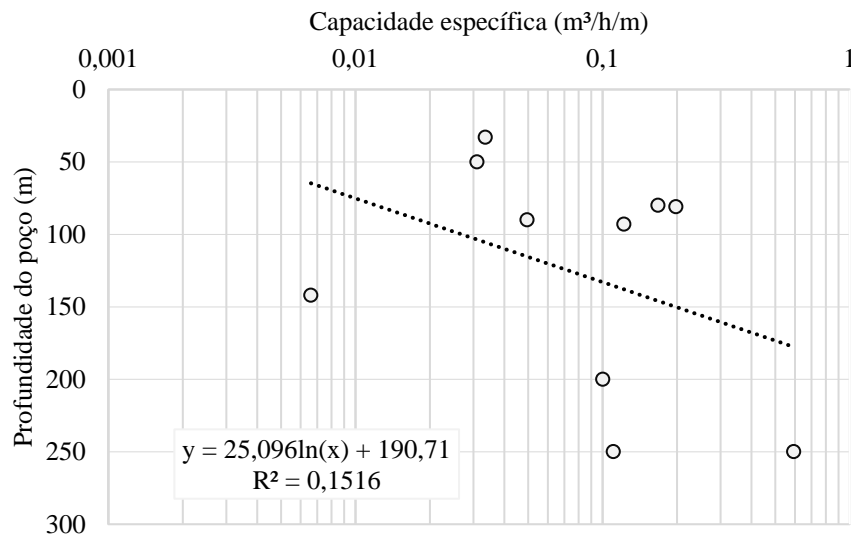
**Gráfico 10 – Distribuição de frequências do nível estático e nível dinâmico no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

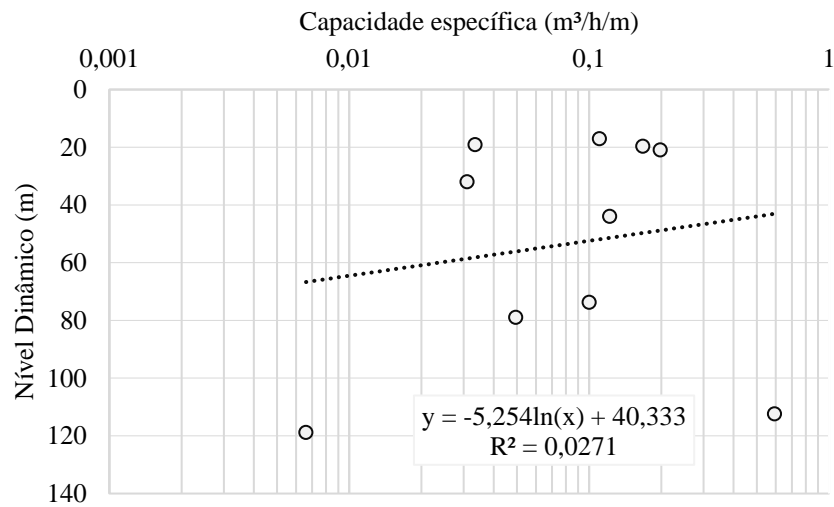
O **Gráfico 11**, apresenta a relação entre profundidade e produtividade e o **Gráfico 12**, relação entre profundidade e nível dinâmico.

**Gráfico 11 - Capacidade específica em função da profundidade do poço no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

**Gráfico 12 – Capacidade específica em função da profundidade do poço no domínio hidrogeológico Metassedimentos-Metavulcânicas**



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

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

- **Poroso/Fissural**

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 ponto.

- **Vulcânico**

Situado sob as rochas de carácter vulcânico, têm-se apenas um poço com a informação única de vazão outorgada, 1,96 m³/h. Por causa da ausência dos parâmetros hidrodinâmicos necessários para a análise, não foi possível realizá-la. 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.

### 6.3 Análise dos lineamentos estruturais

Com o objetivo de interpretar os fotolineamentos das formações geológicas existentes na bacia do Rio do Peixe, foram aplicados diferentes realces na imagem de satélite (**Figura 23**). Observa-se que, as estruturas N-S realçadas no azimute de  $0^\circ$ , NE-SW em  $45^\circ$ , E-W em  $90^\circ$  e SE-NW em  $135^\circ$ . A **Figura 24** apresenta os lineamentos fotointerpretados, 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 23 – 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).

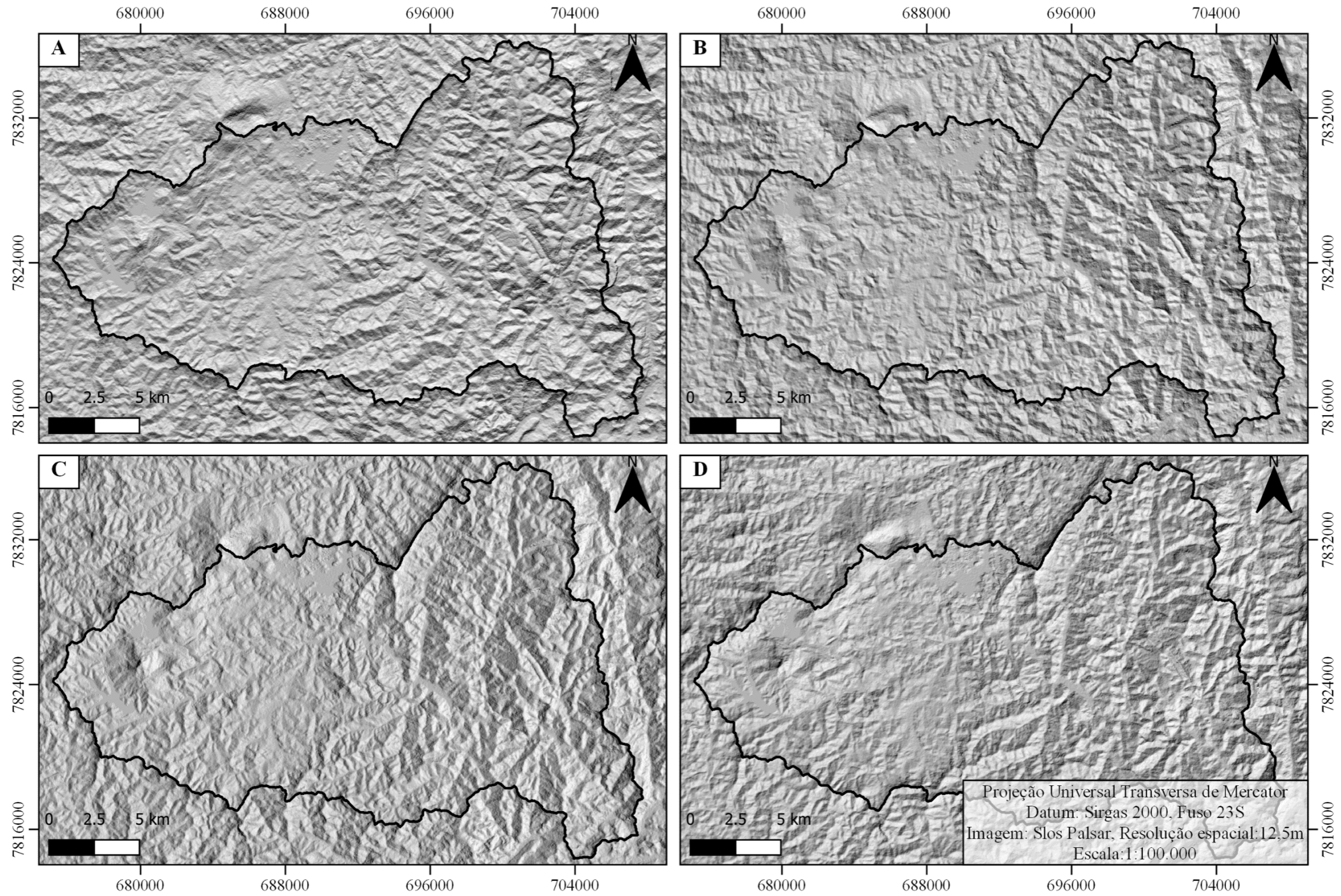
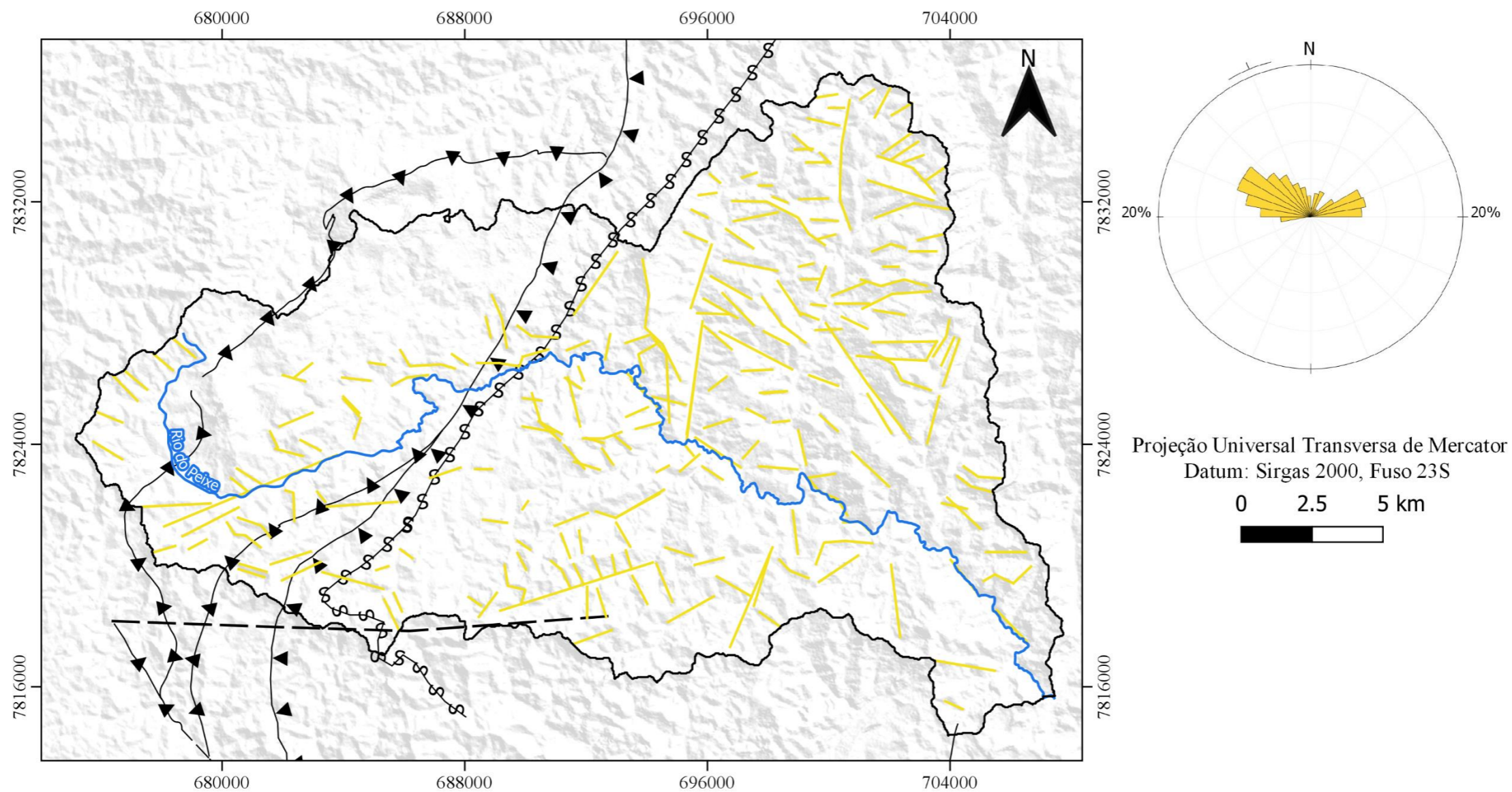








Figura 24 – Lineamentos estruturais fotointerpretados da bacia do Rio do Peixe



**Legenda**

- |  |   |
|--|---|
|  Limite bacia do rio do Peixe           |  Lineamentos estruturais (Escala regional) |
|  Rio do Peixe                           |  Falha de Empurrão                         |
|  Lineamentos estruturais (Escala local) |  Zona de cisalhamento                      |

Na **Figura 24**, é possível visualizar que a direção majoritária dos lineamentos na bacia estudada 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 conseqüentemente, 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.

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 (ver **item 4.7**). 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.

#### 6.4 Análise das vazões do Rio do Peixe

A série histórica de vazões para os cursos d'água da 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**).

Para o ribeirão Candidópolis, a mediana apresentou-se mais elevada nos meses de dezembro (1,22 m<sup>3</sup>/s) e janeiro (1,23 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s), e tal padrão também foi visualizado no ribeirão São José, 1,2 m<sup>3</sup>/s em ambos os meses. Quanto ao córrego Santa Cruz, em dezembro e janeiro os resultados medianos foram de 0,95 e 0,94 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Especialmente, 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 m<sup>3</sup>/s. Os demais apresentam valores de 0,16 a 0,19 m<sup>3</sup>/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, é possível compreender a relação entre o quantitativo de água superficial e subterrâneo para uma dada localidade (**Gráfico 14**). 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. Com isso, a ordem de grandeza do

deflúvio subterrâneo pode ser obtida por meio da aplicação de fórmulas sobre o resultado de vazão monitorado nos vertedouros.

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%).

Ao comparar as bacias, observa-se que a sub-bacia do ribeirão São José, seguida da sub-bacia do córrego Santa Cruz apresentam os maiores deflúvios, superficiais e subterrâneo. No período de estiagem, o fluxo de base dos rios é mantido por vazões de menor magnitude na sub-bacia do ribeirão Candidópolis e do córrego Cachoeirinha.

No **Anexo I** é possível observar os hidrogramas junto ao mapa de suas respectivas micro-bacias.

Gráfico 13 – Box plot dos dados de vazão dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio do Peixe – Candidópolis, Cachoeira, Santa Cruz e São José

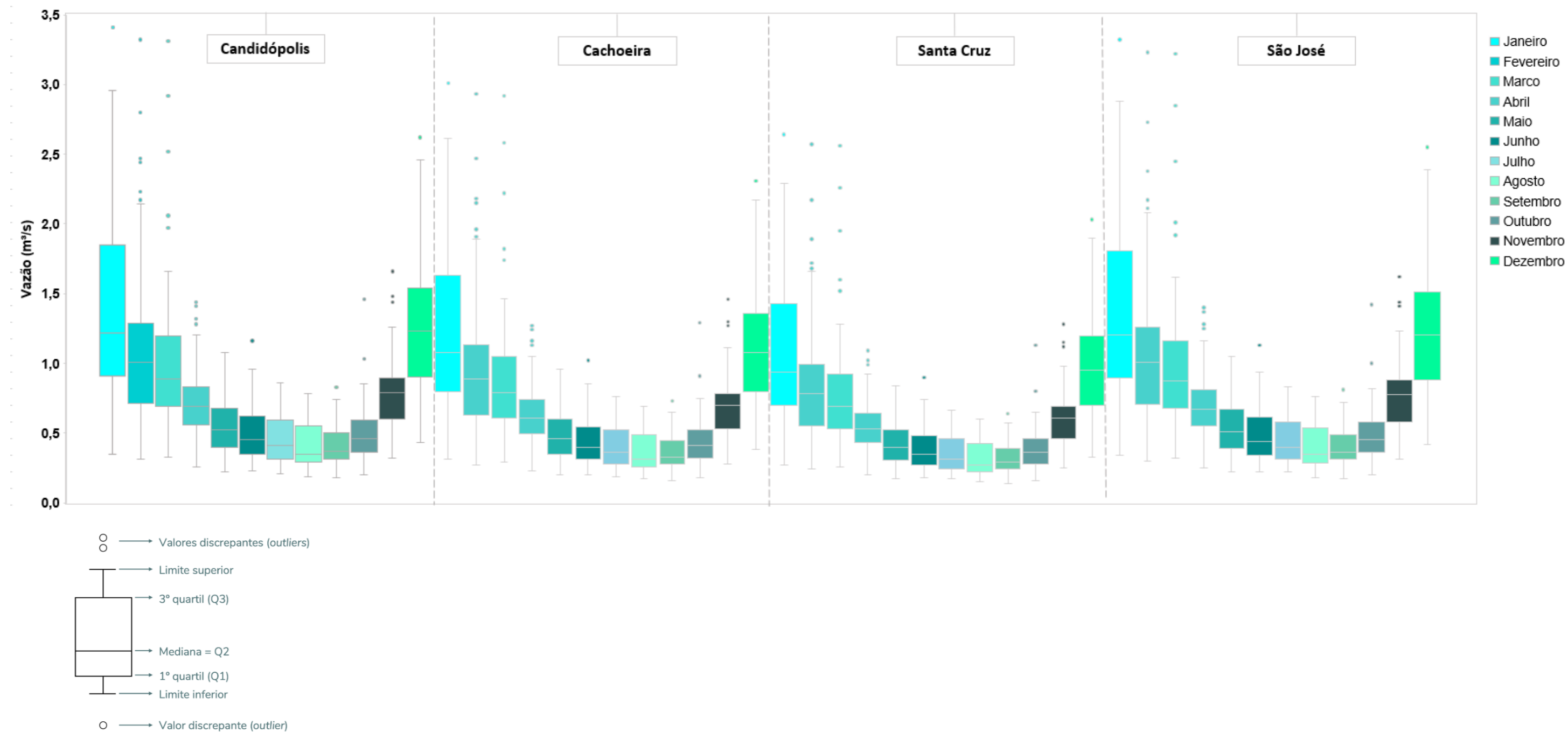
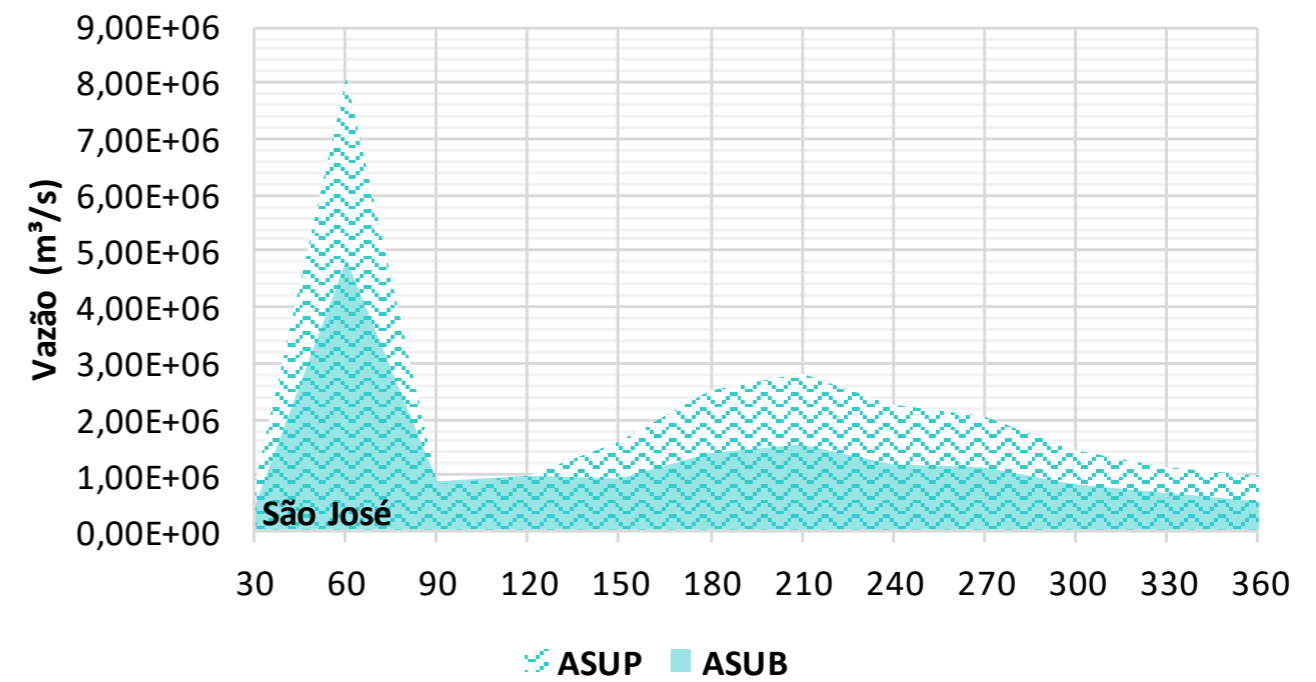
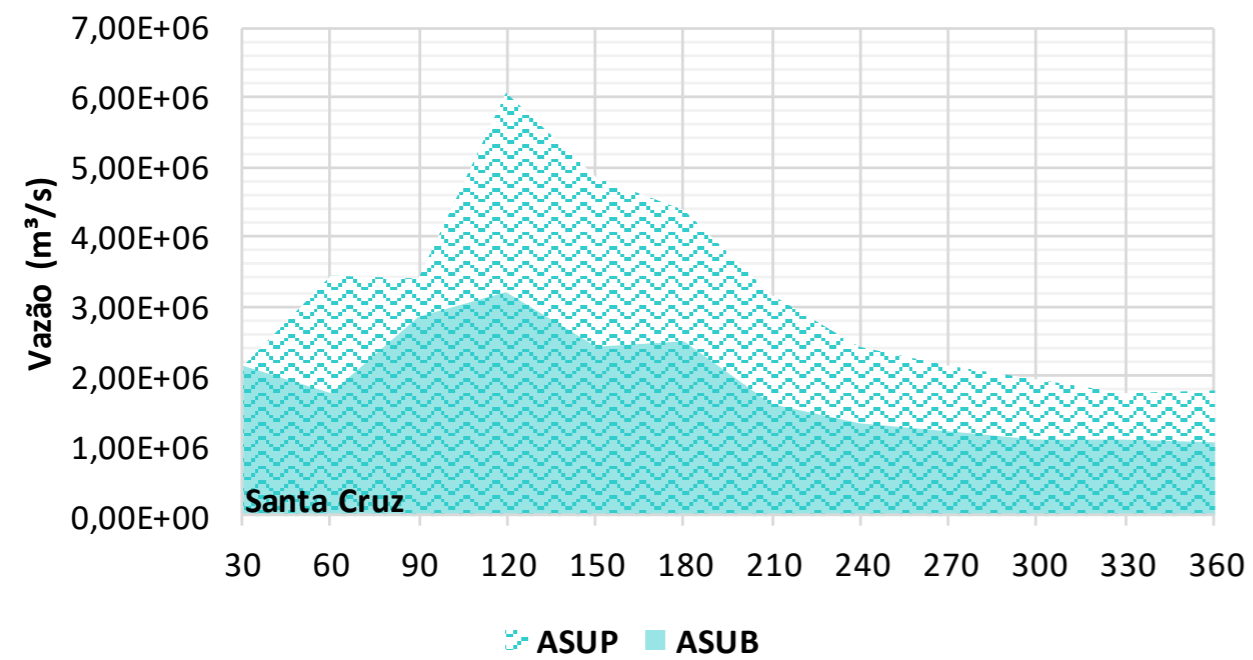
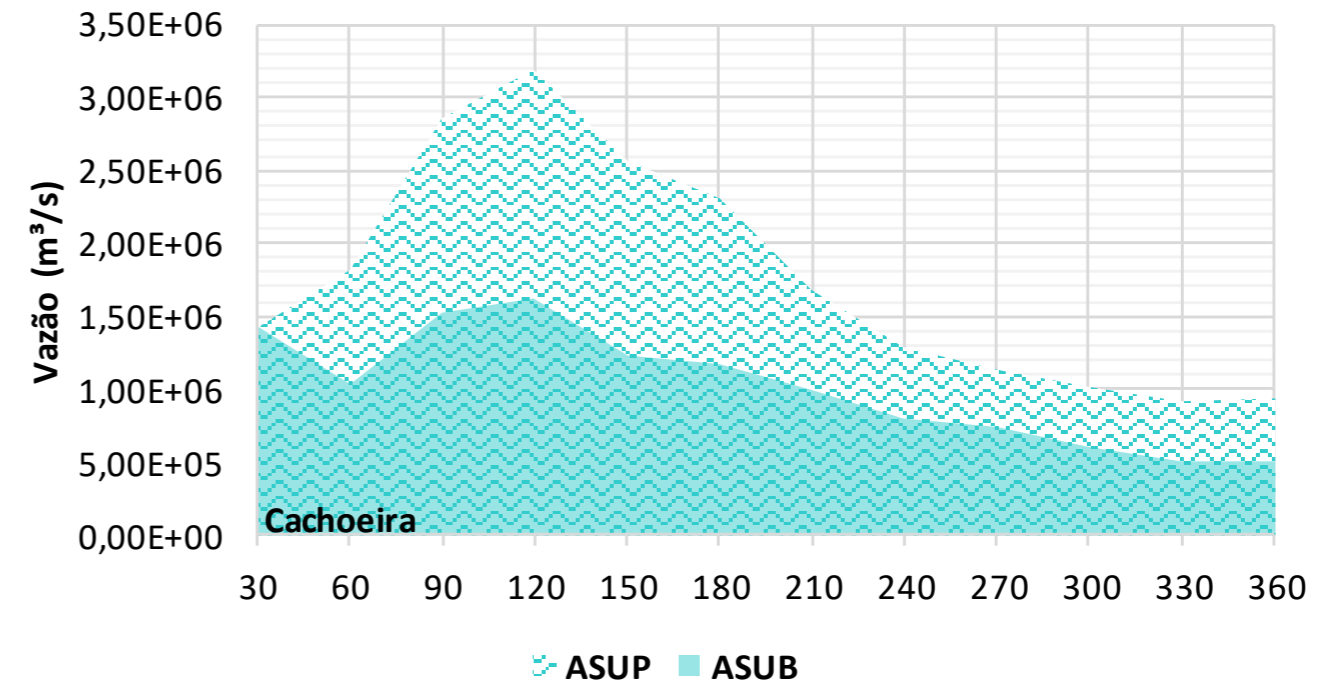
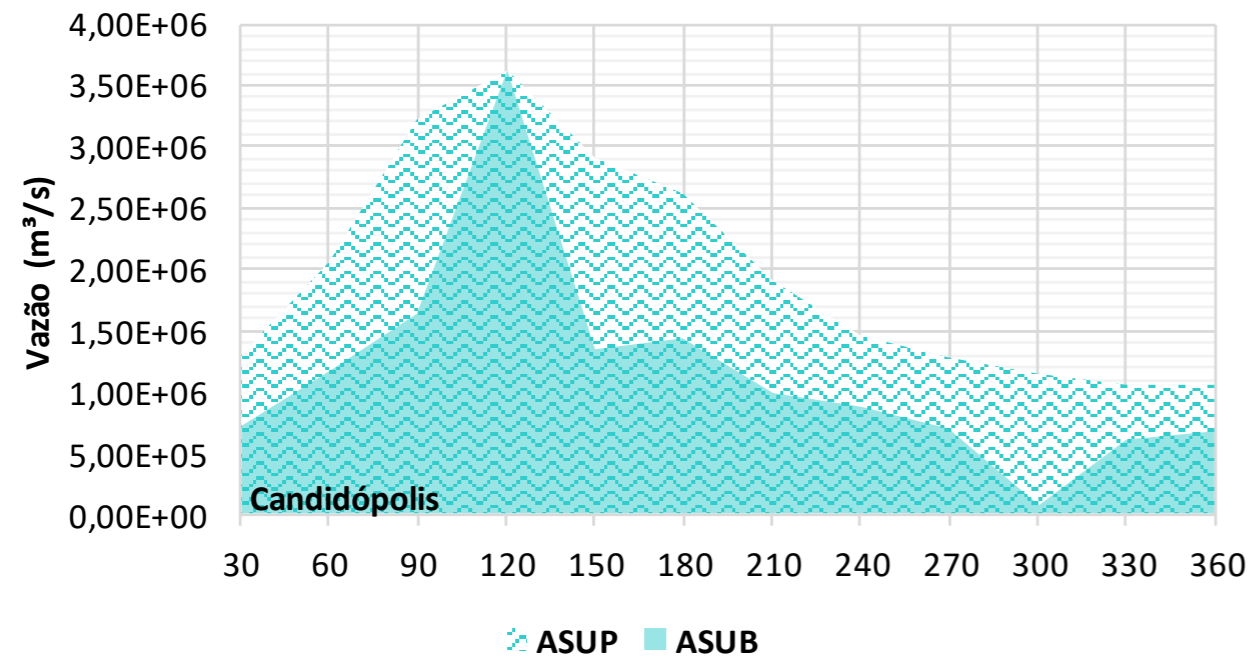


Gráfico 14 – Hidrogramas dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio do Peixe – Candidópolis, Cachoeira, Santa Cruz e São José



Nota: ASUP – Água superficial, ASUB – Água subterrânea.  
 Fonte: Adaptado Gonçalves et. al, 2019.

## 6.5 Potencialidade Hídrica Subterrânea

O mapa de potencialidade hídrica subterrânea define, em escala variável, a capacidade potencial de haver água subterrânea em determinado local. Este, somado a outras camadas de informações, subsidiará questionamentos acerca da interconectividade hídrica entre as diferentes matrizes, superficial e subterrânea, na bacia hidrográfica do Rio do Peixe.

### 6.5.1 Análise de relevância dos critérios e subcritérios

Para a confecção do mapa de potencialidade hídrica, foram selecionados como critério a camada de Solo, Geologia, Uso e cobertura da terra, Declividade, Densidade de drenagem e Densidade de Lineamentos, e estes, por sua vez, foram divididos em subcritérios.

Na definição dos critérios não foi considerado como parâmetro de entrada precipitação, visto que, dentro da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, existem poucas estações de monitoramento com dados consistentes, definindo de forma limitada o comportamento da chuva. Dessa forma, considerou-se um mesmo volume de chuva em toda a extensão da bacia.

Para a definição de cada peso, foram avaliadas as condições favoráveis ou não para a infiltração da água na matriz subterrânea. Vale ressaltar que especificidades inerentes a cada subcritério não são objeto de discussão dessa pesquisa.

- Solo

A infiltração da água no solo, pode ser definida por meio de sua granulometria (argila, silte e areia). Quanto maior o volume de espaços vazios entre os grânulos, maior a percolação e quanto menor o volume de espaços vazios entre os grânulos, menor a percolação. A **Tabela 4** mostra a ponderação realizada para tal subcritério.

**Tabela 4 - Análise pareada para o critério Solo**

<i>Critérios</i>	<b>NLD</b>	<b>LV-AD</b>	<b>LVD</b>	<b>LVDF</b>
<b>Neossolo litólico distrófico</b>	<b>1,00</b>	5,00	6,00	6,00
<b>Latossolo vermelho-amarelo distrófico</b>	1/5	<b>1,00</b>	2,00	2,00
<b>Latossolo vermelho distrófico</b>	1/6	1/2	<b>1,00</b>	2,00
<b>Latossolo vermelho distroférico</b>	1/6	1/2	1/2	<b>1,00</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O RC para este critério foi de 0,03. O mapa de solo pode ser visualizado no **item 4.4**.

- Geologia

As conformações geológicas influenciam no armazenamento, porosidade e permeabilidade da água subterrânea. Uma vez que exista a recarga direta/difusa, sendo essa, proveniente exclusivamente da infiltração da água meteórica na zona não saturada do solo, e indireta, derivada dos canais de água superficial, lagos e similares, a geologia irá contribuir para a potencialidade hídrica subterrânea. A análise por litotipo pode ser vista na **Tabela 5**.

**Tabela 5- Análise pareada para o critério Geologia**

<i>Critérios</i>	<b>GP</b>	<b>GI</b>	<b>GIT</b>	<b>GS</b>	<b>GC</b>	<b>CNL</b>	<b>CG</b>	<b>CSB</b>	<b>SCA</b>	<b>SSR</b>	<b>SB</b>
<b>Grupo Piracicaba (GP)</b>	<b>1,00</b>	2,00	5,00	5,00	7,00	7,00	8,00	8,00	8,00	8,00	9,00
<b>Grupo Itabira (GI)</b>	1/2	<b>1,00</b>	5,00	5,00	7,00	7,00	8,00	8,00	8,00	8,00	9,00
<b>Grupo Itacolomi (GIT)</b>	1/5	1/5	<b>1,00</b>	2,00	5,00	5,00	7,00	7,00	7,00	7,00	8,00
<b>Grupo Sabará (GS)</b>	1/5	1/5	1/2	<b>1,00</b>	3,00	3,00	5,00	5,00	5,00	5,00	7,00
<b>Grupo Caraça (GC)</b>	1/7	1/7	1/5	1/3	<b>1,00</b>	2,00	5,00	5,00	5,00	5,00	7,00
<b>Grupo Nova Lima (GNL)</b>	1/7	1/7	1/5	1/3	1/2	<b>1,00</b>	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00
<b>Complexo Guanhães (CG)</b>	1/8	1/8	1/7	1/5	1/5	1/2	<b>1,00</b>	2,00	2,00	2,00	5,00
<b>Complexo Santa Barbará (CSB)</b>	1/8	1/8	1/7	1/5	0,2	1/2	1/2	<b>1,00</b>	2,00	2,00	5,00
<b>Suíte Catas Altas da Noruega (SCA)</b>	1/8	1/8	1/7	1/5	1/5	1/2	1/2	1/2	<b>1,00</b>	2,00	5,00
<b>Suíte Santa Rita (SSR)</b>	1/8	1/8	1/7	1/5	1/5	1/2	1/2	1/2	1/2	<b>1,00</b>	2,00
<b>Suíte Borrachudos (SB)</b>	1/9	1/9	1/8	1/8	1/7	1/5	1/5	1/5	1/5	1/2	<b>1,00</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O RC para este critério foi de 0,09. O mapa de geologia pode ser visualizado no **item 4.5**.

- Uso e cobertura da terra

O uso e cobertura da terra estão relacionados diretamente a recarga, sendo que as áreas vegetadas permitem uma maior taxa de infiltração da água, e aquelas mais antropizadas, seja pela urbanização, atividades minerárias, ou mesmo naturais como os afloramentos rochosos e fluxos de água superficiais, permite um maior escoamento em superfície da água, e consequentemente, menor infiltração. A análise do uso e cobertura da terra pode ser vista na **Tabela 6**.

**Tabela 6 - Análise pareada para o critério Uso e cobertura da terra**

<i>Critérios</i>	<b>FF</b>	<b>FS</b>	<b>S</b>	<b>FC</b>	<b>P</b>	<b>UM</b>	<b>AU</b>	<b>OANV</b>	<b>AR</b>	<b>M</b>	<b>RLO</b>
<b>Formação Florestal</b>	<b>1,00</b>	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
<b>Formação Savânica</b>	1/3	<b>1,00</b>	3,00	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00

<b>Silvicultura</b>	1/3	1/3	<b>1,00</b>	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
<b>Formação Campestre</b>	1/3	1/3	1/3	<b>1,00</b>	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
<b>Pastagem</b>	1/2	1/2	1/2	1/2	<b>1,00</b>	2,00	5,00	4,00	6,00	7,00	5,00
<b>Mosaico de usos</b>	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	<b>1,00</b>	5,00	4,00	6,00	7,00	5,00
<b>Área Urbanizada</b>	1/8	1/8	1/8	1/8	1/5	1/5	<b>1,00</b>	2,00	3,00	3,00	3,00
<b>Outras áreas não vegetadas</b>	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/2	<b>1,00</b>	3,00	3,00	3,00
<b>Afloramento rochoso</b>	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/3	1/3	<b>1,00</b>	3,00	2,00
<b>Mineração</b>	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/3	1/3	1/3	<b>1,00</b>	2,00
<b>Rio, Lago, Oceano</b>	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/2	1/2	<b>1,00</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O RC para este critério foi de 0,09. O mapa de uso e cobertura da terra pode ser visualizado no **item 4.7**.

- Declividade

A inclinação da topografia influencia diretamente na taxa de infiltração da água da chuva no solo. Logo, quanto maior a inclinação do terreno, menor é infiltração, sendo o contrário, também verdadeiro. A análise da declividade pode ser vista na **Tabela 7**.

**Tabela 7 - Análise pareada para o critério Declividade**

<i>Critérios</i>	<b>Plano</b>	<b>Suave ondulado</b>	<b>Ondulado</b>	<b>Forte ondulado</b>	<b>Montanhoso</b>	<b>Escarpado</b>
<b>Plano</b>	<b>1,00</b>	3,00	4,00	5,00	7,00	9,00
<b>Suave ondulado</b>	1/3	<b>1,00</b>	3,00	4,00	5,00	9,00
<b>Ondulado</b>	1/4	1/3	<b>1,00</b>	3,00	5,00	7,00
<b>Forte ondulado</b>	1/5	1/4	1/3	<b>1,00</b>	3,00	5,00
<b>Montanhoso</b>	1/7	1/5	1/5	1/3	<b>1,00</b>	3,00
<b>Escarpado</b>	1/9	1/9	1/7	1/5	1/3	<b>1,00</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O RC para este critério foi de 0,06. O mapa de declividade pode ser visualizado no **item 4.3**.

- Densidade de drenagem

A densidade de drenagem vai influenciar diretamente na quantidade de água a ser infiltrada. Quanto maior a densidade, maior o escoamento superficial e menor a infiltração. Neste sentido, a densidade de drenagem muito baixa corresponde ao cenário ideal para tal critério **Tabela 8**.

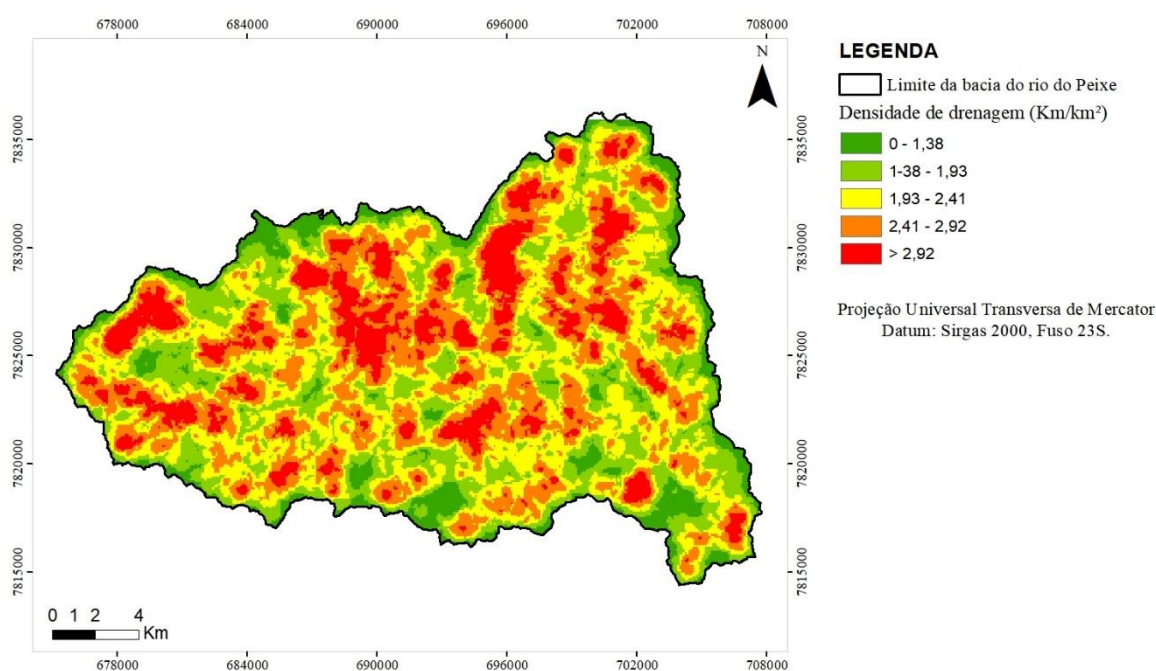
Tabela 8 - Análise pareada para o critério Densidade de drenagem

<i>Critérios</i>	<b>Muito baixa</b>	<b>Baixa</b>	<b>Moderada</b>	<b>Alta</b>	<b>Muito Alta</b>
<b>Muito baixa</b>	<b>1,00</b>	3,00	4,00	5,00	7,00
<b>Baixa</b>	1/3	<b>1,00</b>	3,00	4,00	5,00
<b>Moderada</b>	1/4	1/3	<b>1,00</b>	3,00	5,00
<b>Alta</b>	1/5	1/4	1/3	<b>1,00</b>	3,00
<b>Muito Alta</b>	1/7	1/5	1/5	1/3	<b>1,00</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O RC para este critério foi de 0,06. O mapa da **Figura 25** apresenta a densidade de drenagem da bacia do Rio do Peixe.

Figura 25 - Mapa de densidade de drenagem da bacia do Rio do Peixe



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

- Densidade de lineamentos

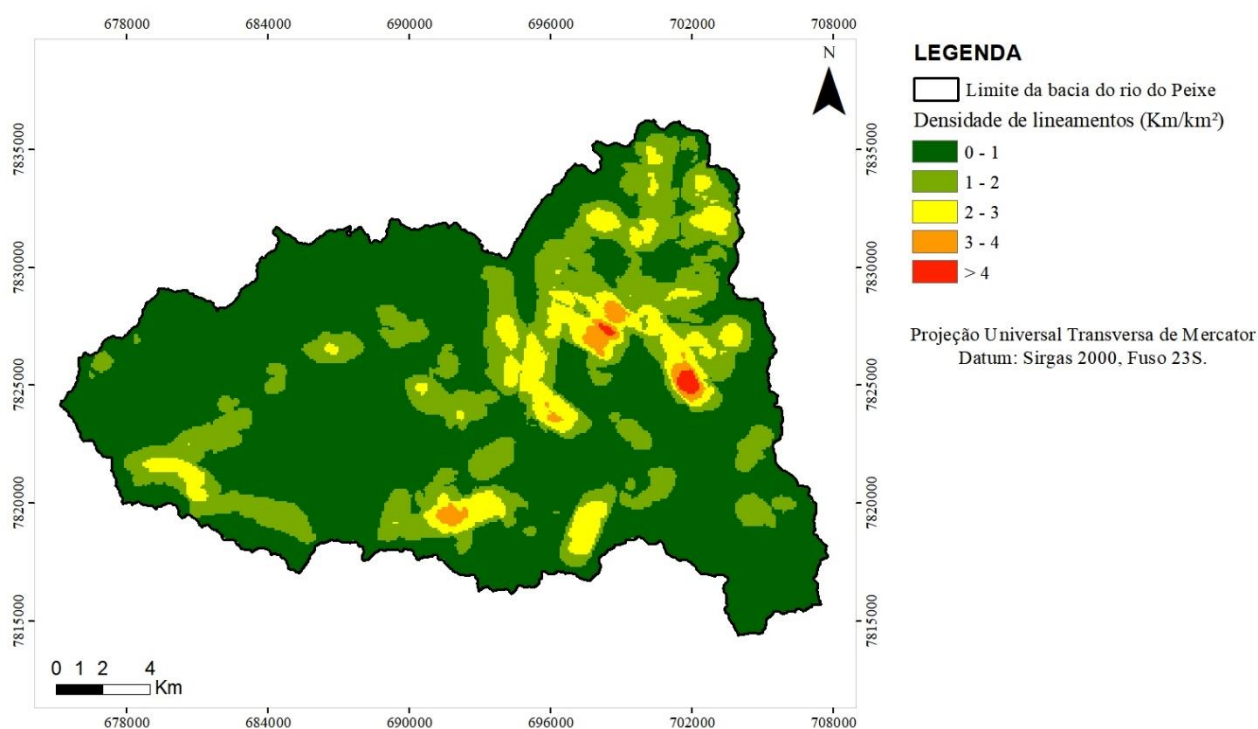
A ponderação dos lineamentos foi feita em termos de densidade. A maior quantidade de lineamentos indica que, na localidade onde ele está especializado, há uma zona de fraqueza. Isto implica em um aumento da porosidade e permeabilidade secundária. Logo, fluxos preferenciais podem ocorrer nessas áreas, promovendo um maior trânsito de águas superficiais e que podem infiltrar no subsolo. Neste mesmo sentido, o armazenamento de água também pode aumentar, a depender do comprimento e profundidade da fratura (**Tabela 9**).

**Tabela 9 - Análise pareada para o critério Densidade de lineamentos**

<i>Critérios</i>	<b>Muito Alta</b>	<b>Alta</b>	<b>Moderada</b>	<b>Baixa</b>	<b>Muito Baixa</b>
<b>Muito Alta</b>	<b>1,00</b>	3,00	4,00	7,00	9,00
<b>Alta</b>	1/3	<b>1,00</b>	3,00	7,00	9,00
<b>Moderada</b>	1/4	1/3	<b>1,00</b>	5,00	7,00
<b>Baixa</b>	1/7	1/7	1/5	<b>1,00</b>	3,00
<b>Muito Baixa</b>	1/9	1/9	1/7	1/3	<b>1,00</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O RC para este critério foi de 0,06. A **Figura 26** apresenta o mapa de densidade de drenagens para a bacia estudada.

**Figura 26 - Mapa de densidade de lineamentos estruturais da bacia do Rio do Peixe**

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O mapa da densidade de lineamentos mostra que na bacia do ribeirão São José, estão as regiões com as maiores densidades de lineamentos, assim como pode ser visualizado, ainda que em menor escala de intensidade, na região da bacia do córrego Santa Cruz. Os pesos para cada critério e subcritério são apresentados na **Tabela 10**.

Tabela 10 - Pesos discretizados por subcritérios

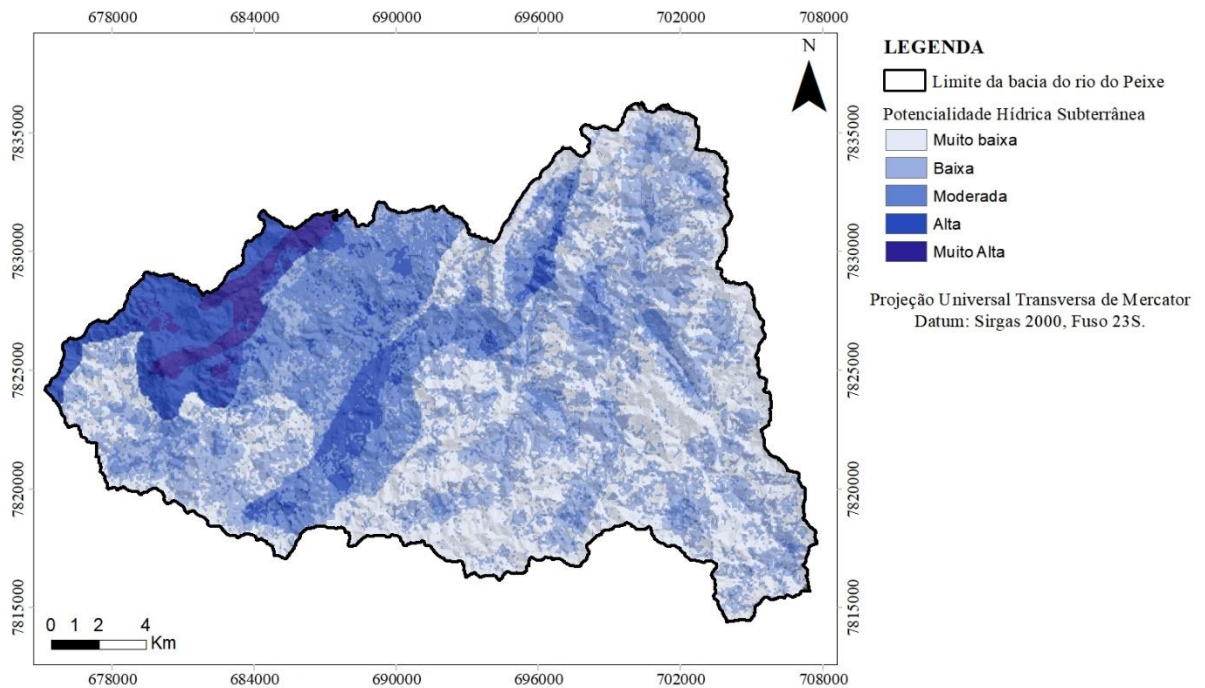
<b>Critério/Peso</b>	<b>Subcritério/Peso</b>	
Solo	Neossolo lítico distrófico	0,64
	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	0,17
0,39	Latossolo vermelho distrófico	0,12
	Latossolo vermelho distroférico	0,08
Geologia	Grupo Piracicaba	0,28
	Grupo Itabira	0,24
	Grupo Itacolomi	0,14
	Grupo Sabará	0,10
	Grupo Caraça	0,08
	Grupo Nova Lima	0,04
0,31	Complexo Guanhões	0,03
	Complexo Santa Barbará	0,03
	Suíte Catas Altas da Noruega	0,03
	Suíte Santa Rita	0,02
	Suíte Borrachudos	0,01
Uso e cobertura da terra	Formação Florestal	0,22
	Formação Savânica	0,18
	Silvicultura	0,15
	Formação Campestre	0,12
	Pastagem	0,11
	Mosaico de usos	0,09
0,11	Área Urbanizada	0,04
	Outras áreas não vegetadas	0,04
	Afloramento rochoso	0,03
	Mineração	0,02
	Rio, Lago, Oceano	0,02
Declividade	Plano	0,42
	Suave ondulado	0,25
	Ondulado	0,16
0,09	Forte ondulado	0,09
	Montanhoso	0,05
	Escarpado	0,03
Densidade de drenagem	Muito baixa	0,46
	Baixa	0,25
0,06	Moderada	0,16
	Alta	0,08
	Muito Alta	0,04
Densidade de lineamentos	Muito Alta	0,47
	Alta	0,28
0,04	Moderada	0,16
	Baixa	0,06
	Muito baixa	0,03

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

### 6.5.2 Potencialidade hídrica subterrânea

Com os pesos definidos, foi obtido o mapa de potencialidade hídrica subterrânea da bacia do Rio do Peixe (**Figura 27**).

**Figura 27 - Potencialidade hídrica subterrânea**



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

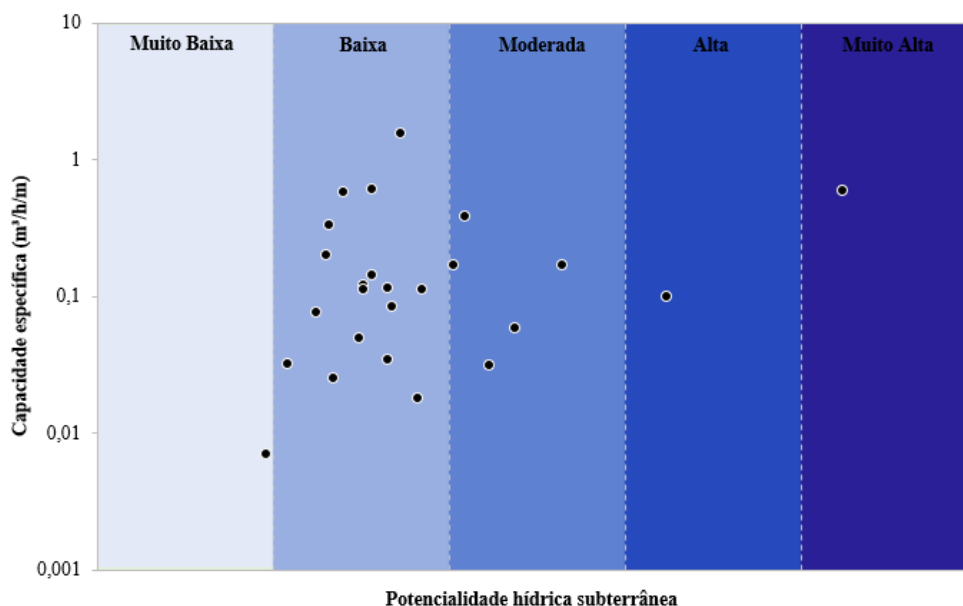
No mapa da **Figura 27**, observa-se uma proeminente influência da geologia no mapa final de potencialidade hídrica. A região marcada pela potencialidade hídrica muito alta está condicionada ao contexto geológico do Grupo Itabira e Grupo Piracicaba. Extrapolando a demarcação desses litotipos, têm-se áreas com potencialidade hídrica Alta. Intercalações entre produtividade Muito Alta a Moderada podem ser encontradas a leste dos grupos supramencionados.

Nas regiões onde existe uma maior quantidade de lineamentos, o azul apresenta nuances, indicando potencialidade hídrica moderada.

A análise conjunta dos critérios evidencia que as áreas com maior potencialidade hídrica são aquelas que contemplam solos e feições geológicas favoráveis a percolação de água e declividade menos acentuada. O gráfico de dispersão da **Figura 28**, mostra a distribuição da

capacidade específica por grau de potencialidade hídrica subterrânea. Tal informação foi extraída do mapa de potencialidade hídrica.

**Figura 28 – Classificação dos poços em relação a potencialidade hídrica vs capacidade específica**



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A maior parte dos poços analisados são classificados com potencialidade hídrica baixa, apresentando capacidade específica que varia de 0,01 a 1 m³/h/m, aproximadamente, e que é considerada como muito baixa e baixa segundo a classificação de Diniz et al. (2014). Um menor número de poços é observado na região de potencialidade hídrica subterrânea muito baixa, alta e muito alta.

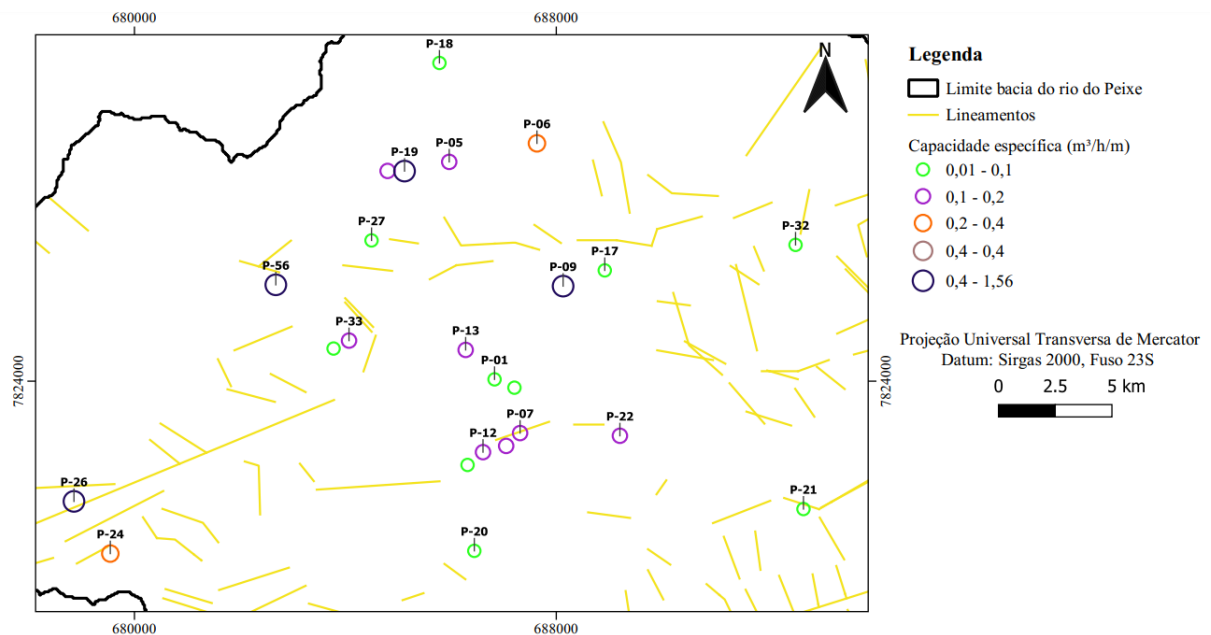
Em relação a área com potencialidade hídrica muito alta, é possível verificar que o poço por ela representado possui ordem de grandeza na mesma faixa de valores já indicados para a área de potencialidade hídrica baixa. Visto a diferença amostral dos poços entre essas duas classificações, não é possível inferir se a capacidade específica de zonas com maior potencial de água subterrânea, de fato, é mais elevada.

Vale ressaltar que, os poços considerados nesta análise foram aqueles com dados hidrodinâmicos disponíveis para o cálculo da capacidade específica. Dito isto, há uma limitação na análise realizada. Outro fator que contribui é que, existem poços que podem não estar

cadastrados no sistema, e que podem estar localizados nas sub-bacias com maior quantidade de lineamentos, por exemplo. Tais lineamentos podem ser fontes produtivas de água.

Na **Figura 29** é possível visualizar a disposição dos poços sob o mapa de potencialidade hídrica subterrânea. Com base neste mapa, é possível notar que, em geral, os poços com capacidade específica mais elevados estão nas zonas de potencialidade hídrica de Moderada a Muito alta.

**Figura 29 – Disposição da capacidade específica dos poços**



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

### 6.5.3 Considerações geral sobre os resultados obtidos

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe é palco de importantes atividades de mineração, especialmente em sua porção noroeste. O beneficiamento do minério exige alta demanda de água, tornando-se ainda mais importante a compreensão da oferta para suprir a demanda de água 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. 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 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 encontrar um maior potencial de água subterrânea.

No ambiente Cristalino, os poços mais profundos são predominantes. As vazões mais recorrentes ocorrem em uma faixa até 6 m<sup>3</sup>/h, e a capacidade específica até 0,21 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/h, e a capacidade específica até 0,23 m<sup>3</sup>/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 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 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 conseqüentemente, 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 bacia do Rio do Peixe são P-10, P-13, P-24, P-27, P-28, P-33, P-34, P-18, P-25, P-31 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.

É notório que um conjunto de fatores tem influência nas águas subterrâneas, à saber: solo, geologia, uso e cobertura da terra, declividade, densidade de drenagens e densidade de lineamentos. Os lineamentos é a forma direta de conexão, em aquíferos como estes verificados predominantemente na área estudada, entretanto, é necessário compreender as outras variáveis que influenciam no interconectividade da água superficial com a subterrânea.

Ao comparar o mapa de potencialidade hídrica subterrânea com o dos critérios que foram somatizados para gerá-lo, observa-se que a maior influência é do solo e da geologia, formando agrupamentos no mapa que remetem as feições das classes de solo e litotipos.

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 maior potencialidade hídrica está localizada em uma área onde a menos lineamentos estruturais. Entretanto, é possível visualizar que nas áreas onde há uma maior densidade de lineamentos, a potencialidade hídrica caria de alta a moderada. Vale dizer que este critério foi considerado como o de menor peso em relação aos demais, visto que de acordo com o método AHP, o critério posicionado na base, influencia em todos os outros que estão acima dele, e assim sucessivamente.

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.



Figura 31 – Página das Outorgas dos recursos hídricos

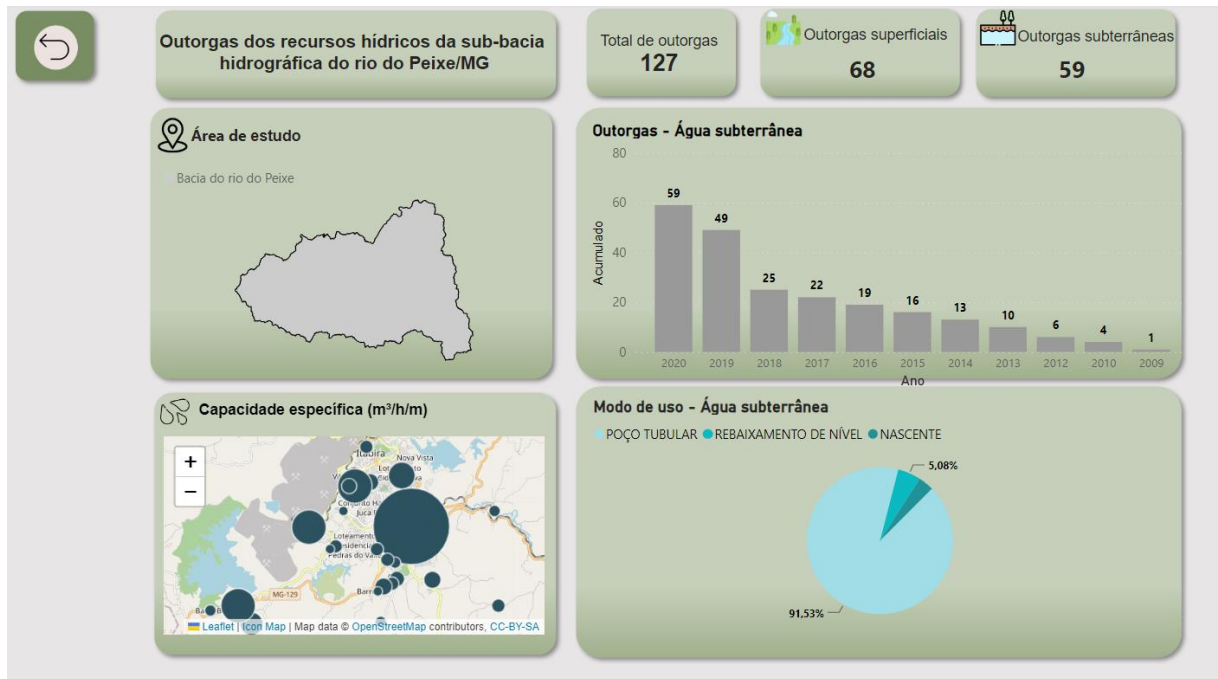


Figura 32 – Página dos domínios hidrodinâmicos dos sistemas aquíferos

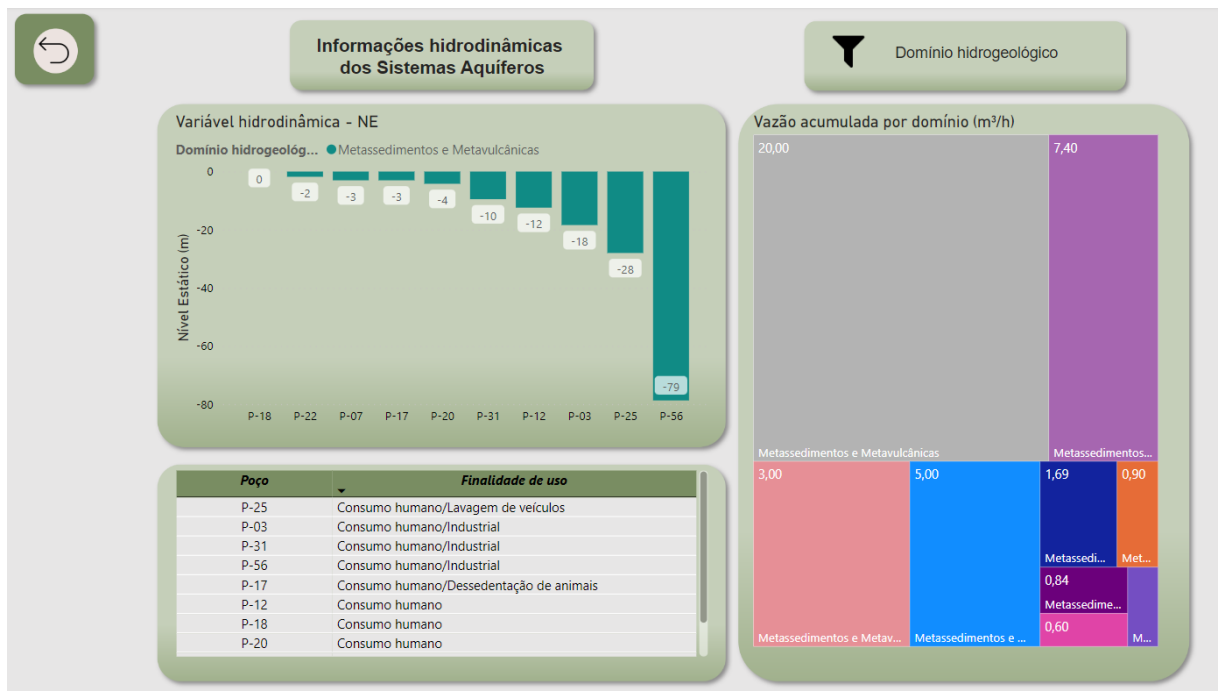


Figura 33 – Página dos Lineamentos estruturais

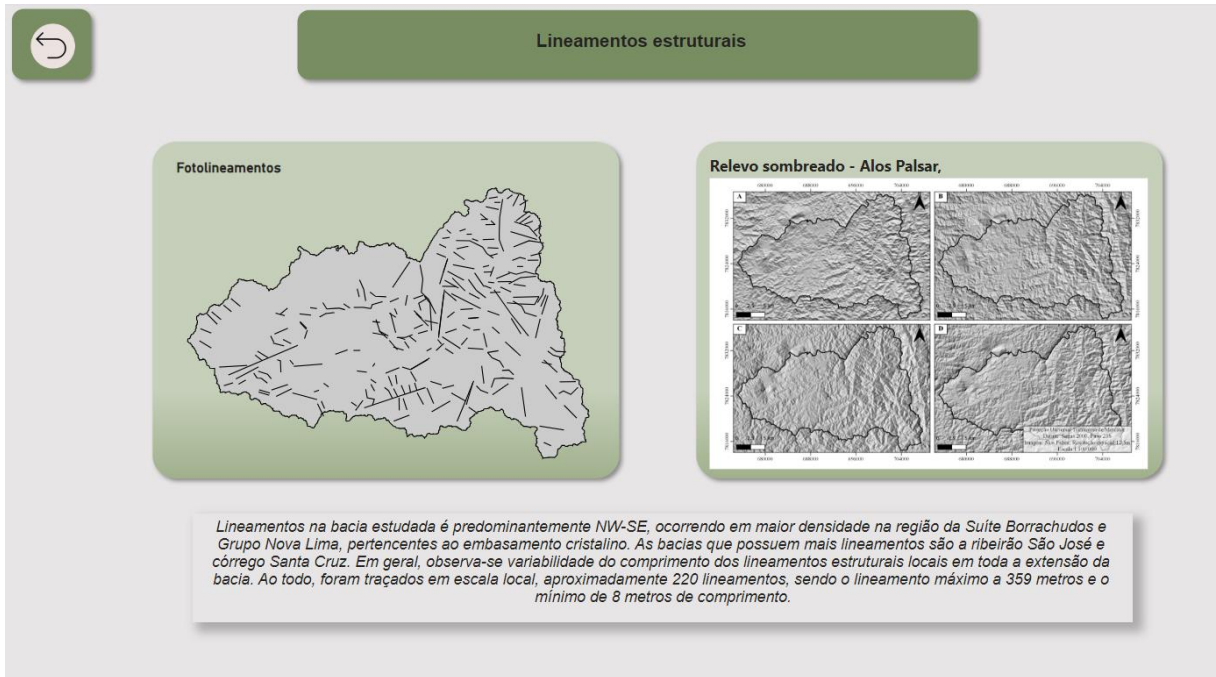


Figura 34 – Página dos Hidrogramas

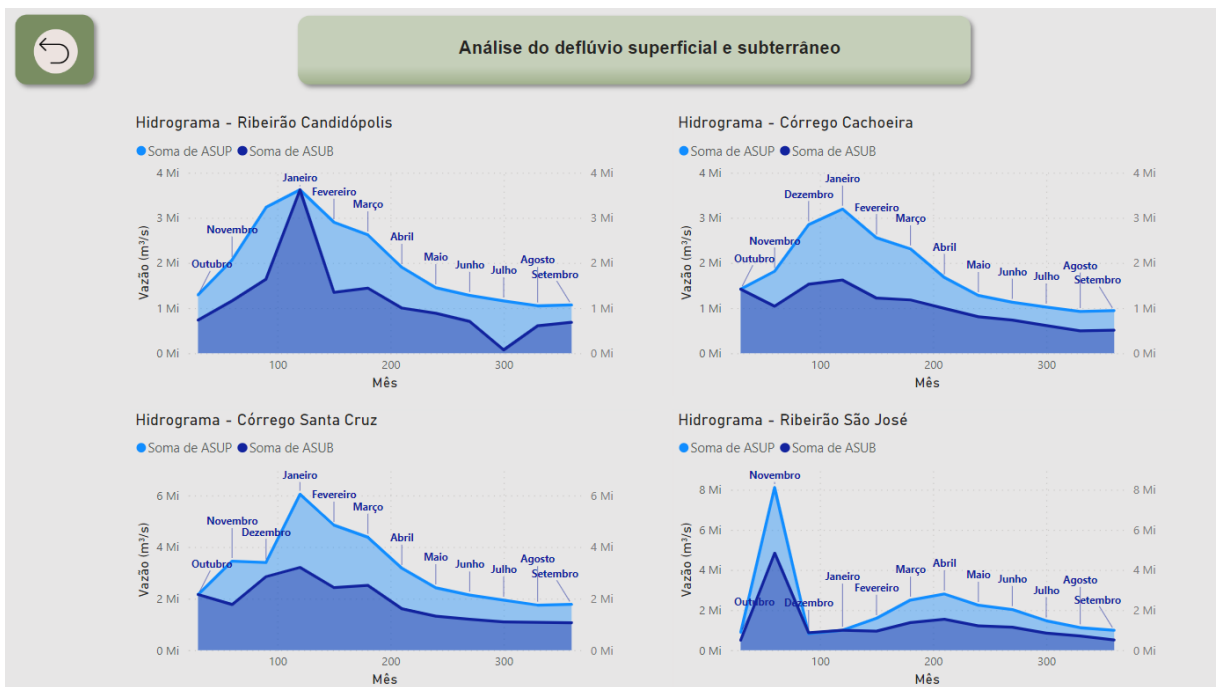


Figura 35 – Página da Análise Multicritério




### Análise hierárquica multicritério (AHP)

Sub-critério linha	FF	FS	S	FC	P	UM	AU	OANV	AR	M	RLO
Formação Florestal	1,00	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Formação Savânica	0,33	1,00	3,00	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Silvicultura	0,33	0,33	1,00	3,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Formação Campestre	0,33	0,33	0,33	1,00	2,00	3,00	8,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Pastagem	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	2,00	5,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Mosaico de usos	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	5,00	4,00	6,00	7,00	5,00
Área Urbanizada	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,00	2,00	3,00	3,00	3,00
Outras áreas não vegetadas	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	1,00	3,00	3,00	3,00
Afloramento rochoso	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,33	0,33	1,00	3,00	2,00
Mineração	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,33	0,33	0,33	1,00	2,00
Rio, Lago, Oceano	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,33	0,33	0,50	0,50	1,00

O método é aplicado seguindo as seguintes tarefas:

1. Definir a problemática;
2. Seleção dos critérios;
3. Hierarquização dos critérios na matriz de julgamento;
4. Análise paritária da matriz  $n \times n$ , onde  $n$  é o quantitativo de critérios. Neste momento, é atribuído a cada célula da matriz um valor que condiz com a intensidade de importância do parâmetro da linha (i) em relação a coluna (j);
5. Calcular o índice de consistência (IC), que define a coerência dos julgamentos realizados. Quanto mais próximo de zero, maior a consistência global da matriz;
6. Calcular razão de consistência (RC), que indica a confiabilidade do julgamento realizado. Esta deve ser  $< 0,10$ .

Figura 36 – Página das considerações sobre a pesquisa



### Considerações sobre a pesquisa

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe é palco de importantes atividades de mineração, especialmente em sua porção noroeste. O beneficiamento do minério exige alta demanda de água, tornando-se ainda mais importante a compreensão da oferta para suprir a demanda de água da região.

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.

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. 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 encontrar um maior potencial de água subterrânea.

Quanto ao **domínio hidrogeológico dos Metassedimentos** - **Matadães**, a água também é armazenada e transportada por meio de

Ao comparar o mapa de potencialidade hídrica subterrânea com o dos critérios que foram somatizados para gerá-lo, observa-se que a maior influência é do solo e da geologia, formando agrupamentos no mapa que remetem as feições das classes de **solo e litotipos**. 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.

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%**).

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.**

As fontes das informações inseridas nesse relatório foram disponibilizadas no documento da dissertação.

## 8 CONCLUSÕES E PROPOSIÇÕES FINAIS

A partir das informações obtidas nesta pesquisa, foi possível estabelecer uma análise das interações entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos da bacia do Rio do Peixe. A limitada base de informações hidrodinâmicas bem como o cadastro de poços incompleto, interferem no entendimento global da bacia, entretanto, o objetivo exploratório dessa pesquisa permite compreender premissas básicas sobre fatores controladores do potencial hídrico subterrâneo e a interação com a componente hídrica superficial.

São diversos os fatores que podem influenciar e contribuir para a potencialidade hídrica subterrânea da bacia. Foi constatado que a extração dos lineamentos estruturais a partir de imagens de satélite e a hierárquica multicritério utilizados como metodologia consagrada, se mostraram eficientes e eficazes na determinação da potencialidade hídrica subterrânea na bacia, demonstrando a elevada favorabilidade a percolação e infiltração das águas nas camadas de solo e no arcabouço geológico. Dentro desta linha temática, é possível julgar a geologia e o solo como as principais camadas delimitadoras da interconectividade hídrica. Especificamente com base na matriz geológica, é configurado o tipo de densidade de drenagem e de lineamentos, elementos da paisagem que conectam as matrizes de água superficial e subterrânea. A promoção de estudos que integrem essas duas matrizes por meio de variáveis físicas e parâmetros quantitativos, como é o caso deste estudo, é essencial para aprofundar em outros conceitos que envolvem principalmente a matriz de água subterrânea, que possui a particularidade de ser muito dinâmica dentro de uma pequena escala e ainda pouco explorada.

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.

Com base em todos os aspectos apresentados conclui-se que é possível compreender por meio do método exploratório o comportamento de variáveis que interferem na interconectividade hídrica e portanto, podem ser traçados linhas de gestão deste recurso com base em pesquisas como esta. É importante dizer que quanto maior o nível de detalhes em relação a todos os

parâmetros de entrada para a análise proposta nessa pesquisa, melhor serão os resultados obtidos e as interpretações que poderão ser geradas.

Como sugestão para complementações futuras para a pesquisa, pode ser utilizado dados aeromagnetométricos (campo da geofísica) para melhor compreender as estruturas em subsuperfície. Após identificar domínios geofísicos, tais informações podem ser relacionadas aos resultados de capacidade específica dos poços e, com isso, indicar o grau de correlação entre eles. Além disso, é possível estimar quantos poços estão sob os lineamentos de alta produtividade.

A seguir são apresentadas alguns parâmetros que podem auxiliar no entendimento da interconectividade hídrica subterrânea e com isso, no apoio a decisão e que especificamente estão associados aos parâmetros geométricos do condutor hidráulico fraturado: densidade de frequência das fraturas em escala detalhada (No cenário onde todas as fraturas estão abertas, sem preenchimento com material de bacia permeabilizada, a condutividade hidráulica deve ser proporcional a sua densidade, conforme explica Feitosa et. al (2008)); orientação (direção e mergulho); distância ortogonal entre as paredes da fratura; e rugosidade (irregularidades que podem criar caminhos preferenciais).

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, C.R. 1965. **Transcurrent faults in continental areas**. Div. of the Geol. Sciences. California Institute of Technology, Pasadena, California.
- AMARO, V.E & STRIEDER, A.J.1994. Análise de fotolineamentos e padrões estruturais em imagens de satélite. In: Congresso Brasileiro de Geologia; 38. Camburiú, 1994. Anais...Camburiú, SBG,p.443-444.
- ANA (Agência Nacional De Águas). Dados Hidrológicos da ANA. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: março de 2022.
- ANA (Agência Nacional de Águas). Relatório Final do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema. ANA, 2016. 335 p.
- ANA (Agência Nacional de Águas). Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce: Relatório executivo / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2013. 129 p. ISBN: 978-85-8210-022-6.
- ANDRADE, C. F. (2012). Relevo antropogênico associado à mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero: uma análise espaço-temporal do complexo Itabira (Município de Itabira - MG). Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Geografia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- ARRAES, Tássia de Melo; CAMPOS, José Elói Guimarães. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, Brasília, v. 1, n. 37, p. 81-89, mar. 2007.
- BEATO, D.A.C., BERTACHINI, A.C. **Projeto APA Sul RMBH: Estudos do Meio Físico**. Belo Horizonte: 2005. v.8, 67 p., parte C.
- BERTACHINI, A. C. Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmida, na região de Jundiá, em São Paulo. 1987. 128 f. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.
- BRASIL. 1997. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
- BRASIL. 1999. Lei nº 13.199 de 29 de janeiro de 1999. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e da outras providências.
- BRASIL. 2018. Resolução Nº 202, de 28 de junho de 2018. Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplem a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão.
- 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.
- CARVALHO, A. M. de; FILHO, J. L. A; TERREL, D; DEHIRA, L. K; AZEVEDO, A.A. Aplicação de Métodos de Interpretação de Imagens na Caracterização de Modelo de Circulação das Águas Subterrâneas em Aquíferos Fraturados e Avaliação de Impactos Hidrogeológicos da Construção de Túneis. 2015. XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

CHEREPANSKY, M. M.; Vsevolozhsky, V. A.; Zektser, I.S. Interconnection of Surface and Groundwater. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS): Types and Properties of Water**, Belarus, v. 1, p. 1-10, 2005. Disponível em: <https://www.eolss.net/sample-chapters/c07/E2-03-01-05.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2022.

CPRM. Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil. Escala: 1:2.500.000. 2007.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000. Nota explicativa, São Paulo, DAEE, n. 374 2020 108.

DINGMAN, S. L. (2002). **Physical Hydrology**. 2ª Edição. Nova Jersey: Prantice Hall, p. 646.

ENDO et al. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero. Escala 1:150.000: Revisado e Atualizado. 2019.

FEITOSA, Fernando A.C. Hidrogeologia: conceitos e aplicações / organização e coordenação científica / Fernando A. C. Feitosa ... [et al.] ... – 3. Ed. Ver e ampl. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FERNANDES M. L. S., Marciano V. R. P. R., Oliveira R. C., Correia Neves J. M., Dilascio M. V. 1994 · Granitos Borrachudos: um exemplo de granitogênese anorogênica na porção central do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte. Geonomos, 2, 2: 23-29

FETTER, C. W. Applied Hydrogeology. Prentice Hall, 598p. (2001).

FOSSEN, Haakon. **Geologia estrutural**. 2017. São Paulo: Oficina de Textos. Acesso em: 01 set. 2022.

GONÇALVES, José; ALMEIDA, Milena; FERREIRA, Mariana; PAIVA, Brenda. 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.

GUIMARÃES, Borba Vilar, P; Rios Ribeiro, M. M. (2008). Águas Subterrâneas: Aspectos Compartilhados da Gestão de Recursos Hídricos na Legislação Brasileira.

GUIMARÃES, P. B. V. Avaliação de políticas públicas para a gestão integrada de recursos hídricos sob a ótica das dimensões institucional e ambiental. 2010. 179 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2010.

GOULART, Catherine Vargas. Avaliação de métodos para a extração automática de lineamentos morfoestruturais e magnéticos na região sudoeste do escudo sul-riograndense. 2021. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, CEP SRM. 96f.

HIDROVIA. 2014. Estudos das conexões hídricas entre o ribeirão das Lajes e as cavidades CAV 0001a e CAV-0001b através de traçadores corantes. Relatório Técnico, Belo Horizonte.

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.

IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas). 2018. Compartilhando experiências das águas de Minas Gerais – Brasil. Correia, C.M.C., Melo, M.C., Santos., N.A.P. (Org). Belo Horizonte. v.1.

JAKEMAN, A.J. & Barreteau, Olivier & Hunt, Randall & Rinaudo, Jean-Daniel & Ross, Andrew & Arshad, Muhammad & Hamilton, Serena. (2016). Integrated Groundwater Management: **An Overview of Concepts and Challenges**. 10.1007/978-3-319-23576-9\_1.

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(46):427-437.

Lima, T. M. 1997. Geologia, estratigrafia e petrologia da porção sul do Complexo Máfico-ultramáfico de Canabrava, Goiás. Universidade de Brasília - Instituto de Geociências. Dissertação de Mestrado n° 118.

Lima et al. 2003. Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do Rio das Fêmeas – BA. Resumo Executivo do Relatório Final. Subprojeto 3.2. Salvador, Bahia.

MACHADO SÁ, M. F. **Patrimônio natural dos campos gerais paraná**. 1. ed. Capítulo 6. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2014.

MORAES, L. Seminário dos estudos para a implementação da gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas na bacia do rio São Francisco: **Sub-bacias dos rios verde grande e carinhanha**. 2018. [PowerPoint slides].

MOODY, J.D., HILL, M.J. 1956. Wrench-fault tectonics. *Bulletin of the Geological Society of America*, v.67, p. 1207-1246

MOURÃO, M. A. A. (2007). Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 297 P.

MULDOON, Maureen; BRADBURY, Ken. (2005). **Site Characterization in Densely Fractured Dolomite: Comparison of Methods. Ground water**. 43. 863-76. 10.1111/j.1745-6584.2005.00091.

NETO, A. F. S., Bertachini, A. C., Girodo, A. C. & Almeida, D. C. (2001). Hydrogeological Model of the Itabira iron ore district. IMWA - International Mine Water Association Symposium, Belo Horizonte, Brazil.

NEVES, Mirna Aparecida. Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na Bacia do Rio Jundiáí (SP). 2005. xiv, 200 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/103008>>.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, D. D.; POHN, A. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Bulletin Geological Society of America*, New York, v. 87, n. 10, p. 1207-1248, 1976.

OLIVEIRA, F. Membros do CBHSF discutem a importância da gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos em Plenária. CBHSF, Lagoa da Prata. [Entrevista concedida a] Luiz Ribeiro. 2018. Acesso em: 11 jan. 2021.

OLIVEIRA, F.R., CARDOSO, F.B.F., NETO, P.L.V. Panorama da gestão integrada água subterrânea/água superficial no Brasil. In: XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços e I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, 2007, Gramado. **Anais...** Gramado/RS: ABAS, 2007.

POETER, Eileen; FAN, Ying; CHERRY, John; WOOD, Warren; MACKAY, Douglas. Groundwater in our water cycle: getting to know Earth's most important fresh water source. Ontario: **The Groundwater Project**, 2020. 136 p. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-1-3>.

Projeto MapBiomas – Coleção 7.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, 1985-2021, acessado em 01/05/2023 através do link: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>.

RAPOSO F. O. 1991. Estratigrafia, petrografia e petrologia. In: Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, Brasília, DF. Folha Rio Espera. Parte II, Capítulo 2. p. 27-88. CPRM/DNPM;

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.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, North-Holland, v. 48, p. 9-26, 1991.

SANTOS, Michele. Estruturas Sedimentares, você conhece os principais tipos?. 2018. Igeológico.

SILVA, Liliane Ferreira da. Modelo conceitual do aquífero fraturado da área da jazida de urânio de Caetité, Bahia: implicações para o fluxo subterrâneo. 2015. ix, 147 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SINGHAL, B.B.S.; GUPTA, R.P. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999. 400 p.

SINGHAL, B.B.S.; GUPTA, R.P. 2010. Fractures and discontinuities. *In*: Singhal, B.B.S.; Gupta, R. P. *Applied Hydrogeology of fractured rocks*. Second edition, Springer Science & Business Media, p. 13-33.

SNIRH. Sistemas Aquíferos. 2015. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/arquivos/atlasrh2013/4-III-TEXT0.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2022.

SIQUEIRA, L. Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino. R. Água Subterrânea, Recife, v. 2, n. 9, p. 1-29, 1967.

SOARES, P. C; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia Geomorfológica, Campinas, v. 32, n. 16, p. 71-104, 1976.

SOPHOCLEOUS, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. **Hydrogeologic Journal**. Vol.10, p.52-67.

TEIXEIRA, WILSON (ORGS.) et al. Decifrando a Terra. 2.ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. 623 p. ISBN 9788504014396.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance Centerton**, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1).

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação, Editora UFRGS, Porto Alegre - RS, 1995.

TUNDISI, J.G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 31-33, out./dez. 2003. UN-Water (2008). Status Report on IWRM and Water Efficiency Plans for CSD16.

TUNDISI, José Galizia. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 22, n. 63, p. 7-16, 10 jul. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/7gyMPtTzfkYfWWsMHqVLTqm/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 jun. 2022.

UNESCO. Connor, Richard e Miletto, Michela. Unesco - World Water Assessment Programme. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2022**: águas subterrâneas: tornar visível o invisível; resumo executivo. Brasília, 2022. 12 p. Disponível em: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726\\_por](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_por). Acesso em: 17 jun. 2022.

UN-WATER (2008). Status Report on Integrated Water Resources Management and Water Efficiency Plans for CSD16.

VALE (Brasil). Sobre a Vale: Espaço Memória. 2014. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/Paginas/espaco-memoria.aspx>. Acesso em: 14 mar. 2022.

Winge, M. et. al. 2001. Glossário Geológico Ilustrado. Acesso em: 10 set. 2022.

WINTER. Thomas C. *et al.* U.S. Geological Survey. Ground Water and Surface Water: **a single resource**. Serviço Geológico dos EUA, Denver, Colorado, p. 1-79, 1998. ISBN 0-607-89339-7. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/pdf/circ1139.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2022.