UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

BÁRBARA MARIA DE PAULA BOTARO

FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA À INFILTRAÇÃO HÍDRICA DA REGIÃO DO BOTAFOGO, OURO PRETO, MINAS GERAIS

MONOGRAFIA nº 605

OURO PRETO
Setembro 2026

BÁRBARA MARIA DE PAULA BOTARO

FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA À INFILTRAÇÃO HÍDRICA DA REGIÃO DO BOTAFOGO, OURO PRETO, MINAS GERAIS

Monografia do Projeto Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para avaliação da disciplina Projeto Final de Curso II – GEO106, 2025/2.

Orientadora: Profª. Drª. Adivane Teresinha Costa

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves

Prof. Dr. César Falcão Barella

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B748f Botaro, Bárbara Maria de Paula.
Favorabilidade hidrogeológica à Infiltração hídrica da região do Botafogo, Ouro Preto, Minas Gerais. [manuscrito] / Bárbara Maria de Paula Botaro. - 2026.
65 f.: il.: color., tab., mapa. + Equação.

Orientadora: Profa. Dra. Adivane Teresinha Costa.
Coorientadores: Prof. Dr. César Falcão Barella, Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Recursos hídricos. 2. Águas Subterrâneas. 3. Quadrilátero Ferrífero (MG). 4. Minas e recursos minerais. I. Costa, Adivane Teresinha. II. Barella, César Falcão. III. Gonçalves, Leonardo Eustáquio da Silva. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 556.32

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Bárbara Maria de Paula Botaro

Favorabilidade hidrogeológica à infiltração hídrica na Região do Botafogo, Ouro Preto, Minas Gerais.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheira geóloga.

Aprovada em 14 de setembro de 2026

Membros da banca

[Doutorado] - Adivane Terezinha Costa - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutorado] - Luís de Almeida Prado Bacellar (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Doutorado] - Ana Maciel Carvalho (Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri)

Adivane Terezinha Costa, orientadora do trabalho, aprovou a versão fi nal e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/10/2026

Documento assinado eletronicamente por **Adivane Terezinha Costa**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/10/2026, às 12:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **1220536** e o código CRC **09A815EF**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: - www.ufop.br

Dedico este trabalho a minha família pelo apoio inestimável. Mas em especial a minha mãe que sempre me incentivou nos estudos e ao meu pai (*in memorian*) que me ensinou o valor do aprendizado, dedicação e persistência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família, Hélio (*in memorian*), Sônia, Patrícia e Daniel. Aos meus pais, é inestimável pra mim e difícil colocar em palavras todo o privilégio que acredito ter, por ter sido criada por vocês. Tudo o que sou e os lugares que chego, carrego um pouquinho de vocês, com o maior orgulho. Dedico a vocês este trabalho porque além de tudo o que diretamente representa, pra mim também é a finalização de uma jornada que só foi possível pelo apoio, exemplo e amor que sempre me deram. A forma como decidi percorrer esse caminho, a superação dos desafios, persistência e o resultados de onde eles ainda vão me levar terá sempre um pouco de vocês. Então além de saber que sempre tive apoio e vocês sempre comigo, o reflexo de onde ainda chegarei terá vocês como base. Obrigada, por tudo, sei eu nunca conseguiria entregar o tanto que deram pra mim, mas tenho consciência de cada esforço, todo amor e apoio que me sempre me deram. Ao meu pai, espero ter chegado próximo do mínimo e a minha mãe, espero também chegar! Aos meus irmãos agradeço o exemplo do estudo, trabalho, garra e a conciliação de tudo com o lazer, que é para não pirar da cabeça!!

Aos amigos da graduação, do período 18.2 Mariana, Robert e Judithe, Lanita, Gustavo Camargos, Giovana de Paula, Milton, Pedro Cardoso, Bruna Perucci, Diogo, Bruno, e aos demais Vitória Rodrigues, Neres, Victória, Igor Matias, Tatiany, Túlio e Alice. Agradeço profundamente todos os campos, experiências e aprendizados que pude compartilhar com vocês durante esses anos, desejo a todos muito sucesso, na carreira e na vida!

Aos meus amigos de vida Amanda, Isabela, Júlia, Mariana, Emilcy, Mellyssa, Maria Gabriela, Carlos, Maria Eduarda, que acompanharam o ciclo da graduação comigo, sempre me apoiando da forma que podiam. Espero que possamos colher os bons frutos ainda juntos!

As minhas queridas amigas do DEGEO, Amelina, Silvana, Janaína, Tereza, Joana, Márcia e Bia que desde o começo da nossa amizade me acolheram de coração sempre aberto. Eu sou imensamente grata por todos os dias que me chamavam pra tomar café, contar as novidades, todo o apoio que me deram nos momentos difíceis e nas conquistas. Vocês foram fundamentais pra mim durante o curso e é um prazer gigante tê-las na minha vida.

A todos da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Ouro Preto, em especial ao Departamento de Qualidade Ambiental, nas pessoas de Pedro, Marcos, Altimar, Jacqueline, José, Lucas, Leonardo e Nalberth pelos ensinamentos, cuidados, desafios e cafés da tarde.

A Fundação Gorceix, em especial a Ana, Carlos, Carol, Humberto, Braian pelo carinho e atenção durante o tempo que pude ministrar o curso de ArcGIS.

A Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos (SICEG) pelo acolhimento nas chapas Cristalina e Paleozoica.

Ao Programa de Educação Tutorial – PET Engenharia Geologica onde pude aprender e desenvolver os três pilares da educação de qualidade: Ensino Pesquisa e Extensão. Aos amigos petianos e à tutora Adivane os meus sinceros agradecimentos por todas as experiências compartilhadas, que moldaram o meu caminho na graduação e irão guiar minha carreira.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Geologia com quem pude ter aulas, mas especialmente os professores Maximiliano Martins, Luís Bacellar, Lucas Leão, Raquel Cassino, Issamu Endo, Maria Sílvia, Maria Eugênia, Gustavo Coelho e Gláucia Queiroga. A geologia é foda, mas vocês com certeza tornaram pra mim o processo de aprendizagem, de um conteúdo complexo e extenso, muito mais interessante e prazeroso.

À minha orientadora, Profa. Dra. Adivane Costa, e aos coorientadores, Prof. Dr. Leonardo Gonçalves e Prof. Dr. César Barella, pela orientação, disponibilidade e compartilhamento de conhecimentos, essenciais para a realização deste projeto. Estendo ao Prof. Dr. Luís Bacellar e a Profa Estefânia dos Santos, pela participação e relevantes contribuições.

A toda comunidade de Botafogo por me receberem em suas casas com tanta atenção e carinho, além das trocas de conhecimento. Espero que este trabalho renda frutos positivos a vocês. Agradeço também a Líria, pela amizade e inspiração do uso do conhecimento e acessos para lutar por algo que realmente faça sentido.

Ao grupo “Flores de Botafogo” nas pessoas da Maria Tereza, Maria Luisa, Alice, Louise e também a Líria, pelos campos e apoio para confecção deste trabalho.

A turma da disciplina de “Processos Geológicos e Meio Ambiente”, que no período 24.2 iniciou a produção de estudos, do ponto de vista geológico, sobre os conflitos minerários que envolvem a comunidade de Botafogo e fez ser possível aprofundar, por meio deste trabalho, em questões levantadas naquela época.

Ao Ministério Público Federal através do programa Participa Minas e ao Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão Cátedra UNESCO – Água, Mulheres e Desenvolvimento (NUCAT), pelo apoio concedido a este trabalho.

RESUMO

A crescente expansão da atividade minerária no Quadrilátero Ferrífero evidencia a necessidade de compreender os fatores que controlam a infiltração e a recarga das águas subterrâneas. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo elaborar um mapa de favorabilidade hidrogeológica à infiltração hídrica para a localidade de Botafogo, município de Ouro Preto (MG), utilizando técnicas de análise multicritério em ambiente SIG, por meio da técnica de Processo Analítico Hierárquico (AHP). Para isso, foram realizadas campanhas de campo para reconhecimento das principais litologias aflorantes e integradas informações provenientes dos mapas de litologia, densidade de lineamentos estruturais, declividade, índice topográfico de umidade (TWI) e solos. Estes cinco critérios foram ponderados a partir da consulta a três professores especialistas, dando origem a três mapas, que foram unidos e resultaram no mapa final, evidenciando a influência da atribuição de pesos aos critérios na definição das áreas com maior potencial para infiltração e recarga das águas subterrâneas. As áreas de maior infiltração são vistas nas regiões a norte e nordeste da porção superior, bem como algumas regiões a sul e sudoeste da área de estudo. Por fim foi realizada uma análise da relação espacial entre as áreas de maior favorabilidade e as áreas de interesse minerário com concessões de lavra vigentes, e visto que as instalações das empresas Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), HG Mineração S.A., Pradha Participações Ltda. e RS Mineração Ltda., que tem como o mineral minério de interesse o Ferro (Fe), estão sobre as áreas de maior favorabilidade hidrogeológica à infiltração. Essa coincidência não se deve ao acaso, já que além de outros fatores, as rochas itabiríticas, alvo de exploração dos empreendimentos minerários, são responsáveis pela melhor qualidade, armazenamento e abastecimento dos corpos hídricos subterrâneos, indicando potenciais conflitos entre a exploração mineral e a conservação dos recursos hídricos subterrâneos. Nesse contexto, os produtos cartográficos desenvolvidos neste trabalho constituem também uma importante ferramenta de apoio ao planejamento territorial e ambiental, podendo subsidiar órgãos públicos, empresas e comunidades na tomada de decisão quanto ao uso e ocupação do território.

Palavras-chave: Análise multicritério, AHP, Águas subterrâneas, Quadrilátero Ferrífero, Mineração.

ABSTRACT

The increasing expansion of mining activity in the Iron Quadrangle highlights the need to understand the factors that control infiltration and recharge of groundwater. In this context, the present work aimed to develop a hydrogeological favorability map for water infiltration in the locality of Botafogo, municipality of Ouro Preto (MG), using multi-criteria analysis techniques in a GIS environment, through the Analytic Hierarchy Process (AHP) technique. To this end, field campaigns were carried out to identify the main outcropping lithologies and integrated information from lithology maps, density of structural lineaments, slope, topographic wetness index (TWI) and soils. These five criteria were weighted based on consultation with three expert professors, resulting in three maps, which were combined to create the final map, highlighting the influence of assigning weights to the criteria in defining the areas with the greatest potential for infiltration and recharge of groundwater. The areas with the highest infiltration are seen in the northern and northeastern regions of the upper portion, as well as some regions in the south and southwest of the study area. Finally, an analysis of the spatial relationship between the areas of greatest favorability and the areas of mining interest with current mining concessions was carried out. It was observed that the facilities of the companies Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), HG Mineração S.A., Pradha Participações Ltda., and RS Mineração Ltda., whose mineral of interest is iron (Fe), are located in the areas with the greatest hydrogeological favorability for infiltration. This coincidence is not accidental, since, among other factors, the itabirite rocks, the target of mining exploration, are responsible for the better quality, storage, and supply of groundwater bodies, indicating potential conflicts between mineral exploration and the conservation of groundwater resources. In this context, the cartographic products developed in this work also constitute an important tool to support territorial and environmental planning, and can assist public bodies, companies and communities in making decisions regarding land use and occupation.

Keywords: Multicriteria analysis, AHP, Groundwater, Quadrilátero Ferrífero, Mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa referente a localidade de Botafogo - MG. 16
Figura 2 - Tipos de aquíferos subterrâneos 19
Figura 3 - Perfil vertical esquemático evidenciando zona não saturada e saturada 19
Figura 4 - Reconstrução de Gondwana Ocidental, mostrando os crátons do São Francisco e do Congo e a localização do Quadrilátero Ferrífero. 23
Figura 5 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero 24
Figura 6 - Mapa litológico da região de Botafogo. 25
Figura 7 - Mapa de uso e ocupação do solo 33
Figura 8 – Áreas com concessões de lavra vigentes na comunidade de Botafogo, segundo dados do SIGMINE, site da Agência Nacional de Mineração. 34
Figura 9 - Fluxograma que ilustra o processamento dos critérios a serem comparados na análise multicritério. 35
Figura 10 - Parâmetros para o algoritmo de extração de lineamentos no módulo LINE do software PCI Geomática. 39
Figura 11 – Afluente do Ribeirão Funil sobre canga conglomerática. 43
Figura 12 - Blocos rolados de xisto ferruginoso próximo ao Apiário Flores, ao longo de afluente do Ribeirão Funil, com presença de xistosidade anastomosada. 44
Figura 13 - Cachoeira das Margaridas, com queda d´água de aproximadamente 10 metros, sobre xisto ferruginoso, com xistosidade anastomosada bem desenvolvida. 45
Figura 14 – Caverna próximo à Serra do Botafogo de dimensões métricas desenvolvida em quartzito. 46
Figura 15 – Afloramento de itabirito ao lado da Br 356 – Rodovia dos Inconfidentes, com xistosidade bem marcada e consistência friável. 47
Figura 16 - Mapa litológico da área de estudo, com a indicação dos afloramentos visitados. . 49
Figura 17 - Mapa de favorabilidade à infiltração quanto a litologia normalizado, com pesos atribuídos. 50
Figura 18- Mapa de solos da área de estudo. 51
Figura 19 - Mapa de solos normalizado. 51
Figura 20 - Mapa de lineamentos estruturais 52
Figura 21 - Mapa de densidade de lineamentos estruturais normalizado. 53
Figura 22 - Mapa de declividade normalizado. 54
Figura 23 - Mapa TWI normalizado. 55
Figura 24 - Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração (Professor especialista 1) . 56

Figura 25 - Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração (Professor especialista 2) . 57
Figura 26 - Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração (Professor especialista 3) . 57
Figura 27 - Mapa Final da Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração, Botafogo, Ouro Preto (MG) 59
Figura 28 - Análise sobre a relação das instalações minerárias e as regiões favoráveis à infiltração hídrica subterrânea. 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala fundamental de Saaty. 22
Tabela 2 - Atribuição de variáveis numéricas representativas às litologias presentes na área de estudo. 36
Tabela 3 - Pesos representativos para as litologias geradas pelo AHP Calculator. 38
Tabela 4 - Atribuição de variáveis numéricas representativas aos tipos de solos presentes na área de estudo. 41
Tabela 5 - Pesos atribuídos aos critérios pelos especialistas 42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Apresentação 15
1.2 Localização e Vias de Acesso à Área de Estudo 15
1.3 Objetivos 16
1.4 Justificativas 17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração de Água e Recarga dos Aquíferos 18
2.1.1 Aquífero 18
2.1.2 Fluxo de Água Subterrânea 19
2.1.3 Fatores Condicionantes da Infiltração 20
2.1.3.1 Topografia 20
2.1.3.2 Características Solo/Rocha 20
2.1.3.3 Arcabouço Geológico-Estrutural 21
2.2 Análise Multicritério 21
2.2.1 Processo Analítico Hierárquico (AHP) 21
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA 22
3.1 Contexto Geológico 22
3.1.1 SUPERGRUPO MINAS 26
3.1.1.1 Grupo Caraça 26
3.1.1.1.1 Formação Moeda 26
3.1.1.2 Grupo Itabira 26
3.1.1.2.1 Formação Cauê 26
3.1.1.2.2 Formação Gandarela 26
3.1.1.3 Grupo Piracicaba 26
3.1.1.3.1 Formação Cercadinho 26
3.1.1.3.2 Formação Fecho do Funil 26

3.1.1.4 Grupo Sabará 26
3.1.2 DEPÓSITOS SUPERFICIAIS 27
3.1.2.1 Canga 27
3.1.2.2 Aluvião 27
3.2 Contexto Estrutural 27
3.2.1 Estruturas Rúpteis 29
3.3 Contexto Hidrogeológico 29
3.3.1 Sistema Aquífero em Coberturas Sedimentares 30
3.3.2 Sistema Aquífero em Rochas Carbonáticas 30
3.3.3 Sistema Aquífero em Formações Ferríferas 30
3.3.4 Sistema Aquífero em Rochas Quartzíticas 31
3.3.5 Sistema Aquífero em Rochas Metapelíticas 31
3.3.6 Sistema Aquífero em Rochas Xistosas 31
3.4 Contexto Geomorfológico (Relevo) 32
3.5 Contexto Socioambiental e Cultural Local e a Mineração de Ferro e Manganês 32
4 MATERIAIS E MÉTODOS 34
4.1 Campanhas de Campo 35
4.2 Favorabilidade à Infiltração Quanto a Litologia 36
4.3 Favorabilidade à Infiltração Quanto a Densidade de Lineamentos Estruturais 38
4.4 Favorabilidade à Infiltração Quanto a Declividade 40
4.5 Favorabilidade à Infiltração Quanto ao Índice Topográfico de Umidade (TWI) 40
4.6 Favorabilidade à Infiltração Quanto ao Solo 40
4.7 Processo Analítico Hierárquico 41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 42
5.1 Campanhas de Campo e Mapa de Favorabilidade à Infiltração Quanto a Litologia 42
5.2 Mapa de Favorabilidade à Infiltração Quanto ao Solo 50
5.3 Mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais 52

5.4 Mapa de Declividade 53
5.5 Mapa TWI 54
5.6 Resultado da Análise Multicritério 55
5.7 Perigo em Relação ao Comprometimento Hidrogeológico 59
6 CONCLUSÃO 60
7 REFERÊNCIAS 62

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

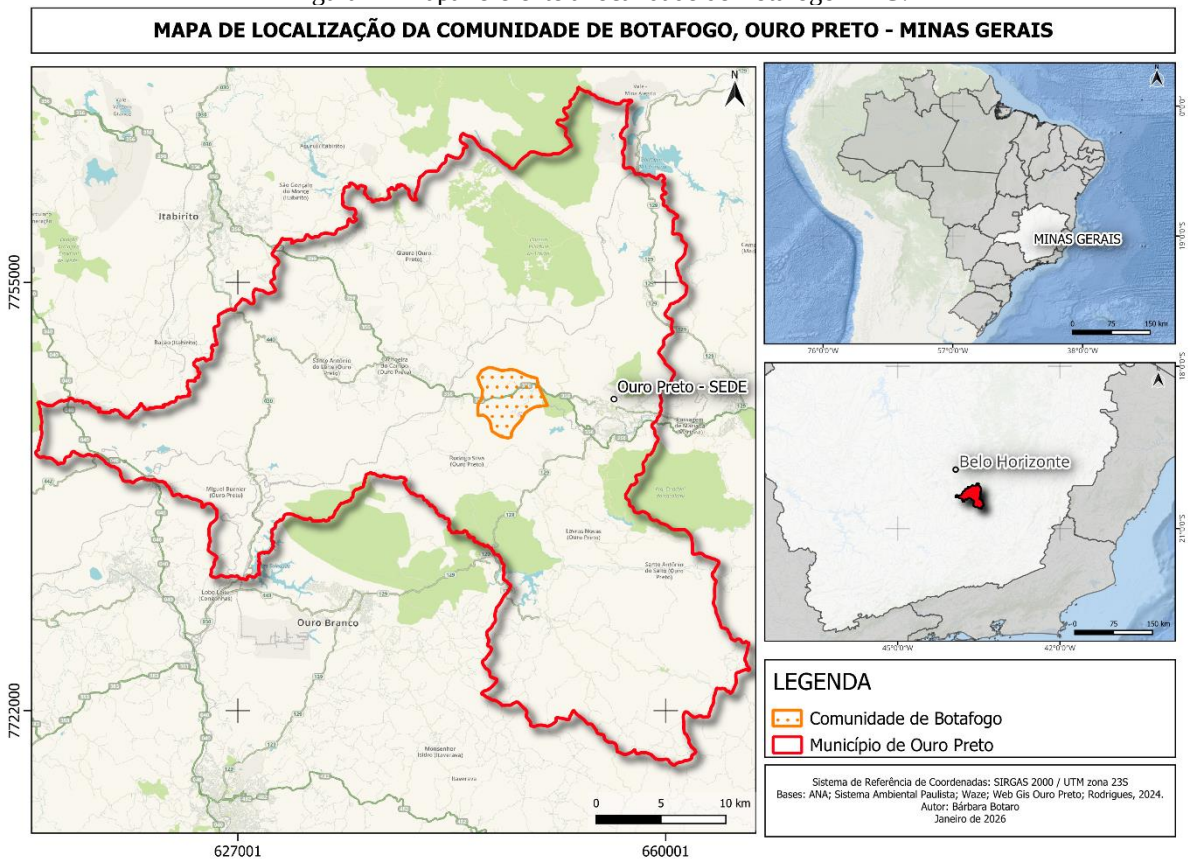
Configurado como sendo um dos subdistritos do município de Ouro Preto (MG), a região de Botafogo encontra-se na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, sobre as unidades geológicas das Formações Moeda, Cauê, Gandarela, Cercadinho e Fecho do Funil e do Grupo Sabará, unidades litoestratigráficas do Supergrupo Minas, além das coberturas aluvionares e de canga, de idade Cenozoica (Dorr, 1969). Localmente, grande parte dessas formações possuem extensos afloramentos de litotipos ferríferos, de elevado interesse para a atividade de mineração de ferro e manganês. Em contrapartida, a expansão de operações minerárias pode representar uma significativa ameaça às principais unidades aquíferas da região, que recebem em sua maioria, nomenclatura homônima às formações geológicas, já que, segundo Mourão (2007) são esses mesmos litotipos ferríferos (itabiritos) são os que melhor respondem a dinâmica hídrica de infiltração e recarga dos corpos hídricos subterrâneos.

Dessa forma, o presente estudo é de grande relevância por abordar a delicada relação entre a geologia local e os recursos hídricos em uma área de crescente pressão minerária. Ao elaborar um mapa de favorabilidade hidrogeológica à infiltração para a localidade de Botafogo, utilizando técnicas de análise multicritério, no projeto são fornecidos subsídios técnicos fundamentais para a proteção dos aquíferos e mananciais. Os resultados esperados visam contribuir diretamente para a gestão ambiental sustentável e para a formulação de políticas públicas de preservação hídrica, além de enfatizar o uso responsável dos recursos naturais em regiões de interesse econômico.

1.2 Localização e Vias de Acesso à Área de Estudo

A comunidade de Botafogo, anteriormente conhecida como Santo Amaro, constitui uma área periurbana da sede do município de Ouro Preto-MG, Brasil (Figura 1). Situa-se a uma distância de 10 Km da sede deste município e dista 85 Km da capital Belo Horizonte, com acesso por meio da BR-356 e BR-040. A fundação da localidade remete ao clímax do ciclo do ouro, no final do século XVII. É, portanto, um dos mais antigos povoados ouropretanos, que hoje constitui-se de aproximadamente 30 famílias (Costa, 2025).

Figura 1 - Mapa referente a localidade de Botafogo - MG.



Fonte: Elaborado pela autora com as bases da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA); Sistema Ambiental Paulista; Waze; Web Gis Ouro Preto; Rodrigues, 2024.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a relação espacial entre as áreas de maior favorabilidade à infiltração de água e as áreas de interesse minerário com concessões de lavra vigentes, visando identificar a sobreposição entre zonas de infiltração hídrica e atividades minerarárias.

Como objetivos específicos, pretende-se elaborar um mapa de favorabilidade hidrogeológica à infiltração para a localidade de Botafogo, município de Ouro Preto (MG), utilizando o método de análise multicritério por meio da técnica do Processo Analítico Hierárquico (AHP); realizar campanhas de campo para o reconhecimento das principais litologias aflorantes; e integrar os mapas de litologia, densidade de lineamentos estruturais, declividade, índice topográfico de umidade (TWI) e solos produzidos para a área de estudo, de modo a identificar áreas com diferentes níveis de potencial para infiltração das águas subterrâneas.

1.4 Justificativas

A recarga hídrica subterrânea é controlada por um conjunto de fatores como a geologia, clima, topografia, vegetação, tipo de solo e evapotranspiração, e tem como principal fonte a precipitação pluviométrica, onde a água meteórica chega até o aquífero por processos de infiltração (Carrera-Hernández et al. 2012). Sendo assim, compreender melhor sobre as áreas de superficiais pode onde a água infiltra e abastece os aquíferos pode ser uma ferramenta fundamental para o gerenciamento sustentável das águas subterrâneas, mitigando a escassez hídrica e seus impactos socioeconômicos.

Em Ouro Preto, a gestão sustentável das águas subterrâneas é crucial para garantir o abastecimento da população, especialmente com as mudanças climáticas e o aumento da demanda hídrica. Recentemente, a cidade firmou uma parceria com o ICLEI para elaborar o Plano Municipal de Ação Climática, visando enfrentar os desafios da emergência climática de forma alinhada às necessidades locais. Ou seja, o tema tem ainda uma relevância social, visto que a escassez de água impacta diretamente o bem-estar da população e a segurança hídrica municipal.

Geologicamente, a Formação Cauê compõe o aquífero mais importante do Quadrilátero Ferrífero, sendo também a principal fonte de minério de ferro. A extração dessa *comodity* causa danos irreversíveis aos topos de morros e aquíferos essenciais para a manutenção dos rios e da captação de água (Rodrigues, 2022, Costa et. al. 2025). Diante desse cenário, torna-se fundamental identificar e compreender as áreas de infiltração hídrica que abastece os aquíferos, especialmente em regiões submetidas à intensa atividade minerária.

Por fim, as bases cartográficas geológicas disponíveis sobre Quadrilátero Ferrífero, são produto do georreferenciamento dos mapeamentos regionais, desde os mais antigos, como de Dorr (1969), aos mais recentes, como o de Endo et al. (2020), e trazem, em sua grande maioria informações sobre as formações litoestratigráficas para os polígonos. As formações são caracterizadas como sendo um conjunto de rochas com relativa uniformidade mineralógica, estrutural, de fósseis ou minerais acessórios (Petri et al. 1986). Para um entendimento melhor da dinâmica de infiltração da água do ponto de vista litológico é importante conhecer qual o exato tipo de rocha, já que as propriedades físicas das mesmas que vão influenciar nessa percolação podem ser variáveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração de Água e Recarga dos Aquíferos

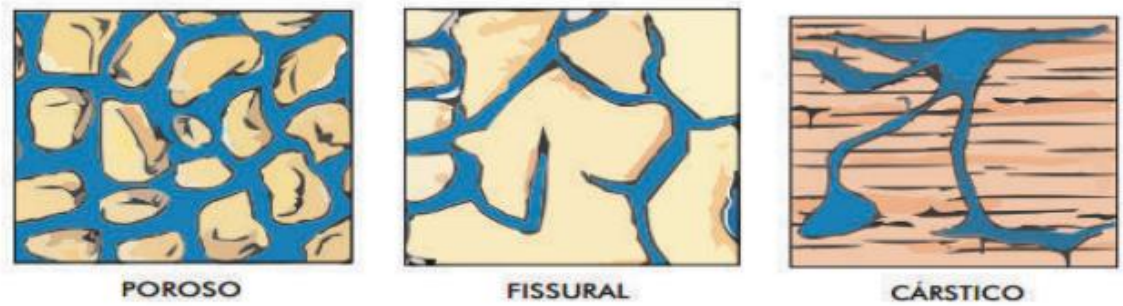
2.1.1 Aquífero

Define-se aquífero como uma formação geológica com capacidade de armazenar e transmitir água, quer seja por sua porosidade primária (poros na matriz), porosidade secundária (fraturas, descontinuidade, condutos) ou terciária (dissolução e formação de cavidades) (Feitosa et al. 2008). Dentre as unidades que podem se comportar como aquíferos, têm-se: areias e cascalhos não consolidados, arenitos, calcários e dolomitos, rochas plutônicas, vulcânicas e metamórficas fraturadas (Fetter, 2001).

As formações geológicas que exibem pouca ou nenhuma capacidade de transmitir água, denominadas camadas confinantes, podem ser divididas em aquífugos, aquicludes e aquitardos. O termo aquífugo pode ser entendido como uma unidade geológica incapaz de armazenar e transmitir água, ou seja, impermeável. Um aquiclude tem a capacidade de armazenamento de água, porém é considerado como um meio impermeável, já que não pode transmitir quantidades consideráveis de água sob gradientes hidráulicos naturais. Já o aquitardo está relacionado às camadas menos permeáveis, sendo capaz de armazenar e transmitir água de uma maneira lenta (Freeze e Cherry 1979, Cleary 1989, Fetter 2014).

Aquíferos podem ser classificados como sendo porosos (ou granulares), fissurais (fraturados) ou cársticos (Figura 2). Segundo Rocha (2005), aquíferos porosos são aqueles que permitem a circulação de água através dos vazios existentes entre os grãos constituintes destes materiais, geralmente sendo rochas sedimentares e sedimentos inconsolidados ou pouco consolidados. Os aquíferos fissurais, por outro lado, são constituídos de rochas cristalinas (ígneas ou metamórficas), que são compactas e não apresentam espaços vazios entre os minerais que as constituem. Por este motivo, a água circula ao longo dos espaços vazios gerados por fraturas. Estas fraturas são quebras, muitas vezes planas ou retilíneas, que se formam após a rocha já ter sido resfriada e consolidada. Os aquíferos cársticos, moldados em rochas como calcários e mármores, são compostos por minerais carbonáticos, os quais passam por dissolução lenta. Isto promove alargamento das fraturas presentes e pode levar à formação de cavernas.

Figura 2 - Tipos de aquíferos subterrâneos



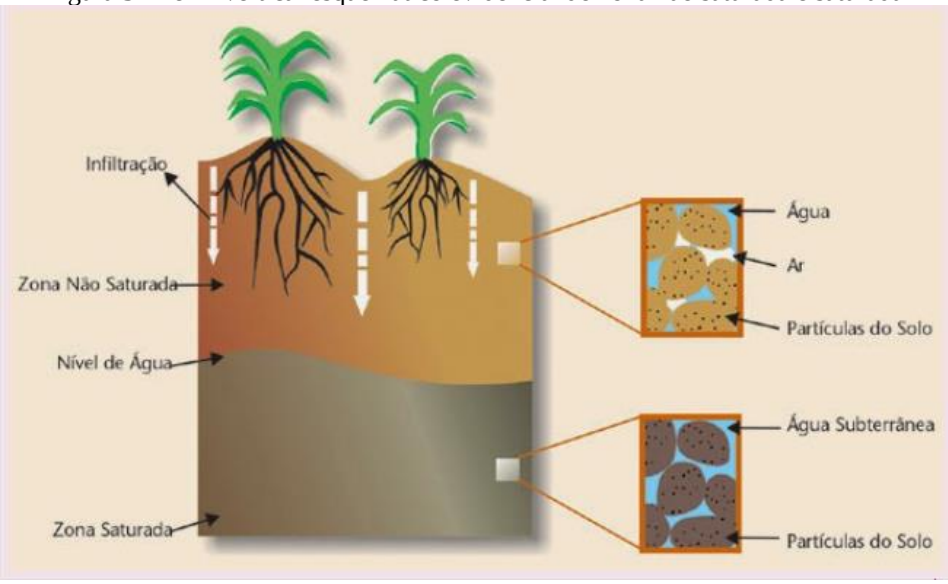
Fonte: Pires, 2014.

2.1.2 Fluxo de Água Subterrânea

Considerando um perfil vertical, a água percorre dois ambientes quando entra em contato com a superfície até chegar no aquífero, que são chamados de zona não saturada e zona saturada (Figura 3).

A zona não saturada, pode ser também chamada de zona vadosa ou de aeração, e está situada entre a superfície do terreno e a superfície freática. É caracterizada pela presença de poros parcialmente preenchidos por água e o restante do espaço poroso é ocupado por gases, especialmente ar e vapor d'água. Já a zona saturada localiza-se abaixo dessa superfície freática onde os poros estão completamente preenchidos por água. Portanto entende-se "água subterrânea" como a água que circula na zona saturada, ainda que toda água situada abaixo da superfície do terreno seja subterrânea, no sentido literal da palavra (Dias, 2021).

Figura 3 - Perfil vertical esquemático evidenciando zona não saturada e saturada



Fonte: GeoConceição, 2014.

2.1.3 Fatores Condicionantes da Infiltração

Para Mourão (2007) os principais fatores que controlam a infiltração correspondem ao clima, topografia, tipos de solo, o arcabouço geológico-estrutural, a cobertura vegetal e as formas de uso e ocupação dos terrenos. Dias (2021) complementa que há uma relação entre a fisiografia da área e as características da zona não saturada por onde a água precisa percolar até chegar ao aquífero. A seguir, são abordados os fatores condicionantes considerados na análise da favorabilidade hidrogeológica à infiltração da área de estudo:

2.1.3.1 Topografia

Para Henriksen (1995), que estudou a relação entre topografia e a vazão de poços em rochas cristalinas da Noruega, a topografia exerce um papel significativo na ocorrência e no movimento da água subterrânea em rochas cristalinas. Em áreas de baixa declividade, a infiltração é maior devido à menor velocidade do escoamento superficial, permitindo maior recarga dos aquíferos. Por outro lado, em terrenos com alta declividade, o escoamento superficial tende a predominar, reduzindo a infiltração efetiva. Além disso, áreas com relevo suave frequentemente apresentam uma cobertura mais espessa de material intemperizado, o que aumenta a capacidade de armazenamento e transmissão de água. Em contraste, regiões íngremes possuem menor desenvolvimento de alteração superficial, limitando o armazenamento subterrâneo.

2.1.3.2 Características Solo/Rocha

Dias (2021) explica que substratos que possuem alta porosidade só serão bons transmissores de água caso seus poros sejam conectados, pois assim permitem o movimento da água em seu interior (condutividade hidráulica), facilitando a chegada dela à zona saturada e, consequentemente, auxiliando na recarga. Segundo Hillel (2004) define-se macroporos quando espaços interagregados constituem as principais vias para a infiltração, a drenagem de água do solo e a aeração. Já os microporos são capilares intra-agregados responsáveis pela retenção de água e solutos. Beven & Germann (1982 apud Dias, 2021) entendem que os macroporos podem se originar pela escavação de animais ou raízes de plantas (bioporos); fissuras que podem ser formadas pela alteração volumétrica de argilas, intemperismo químico de rochas e ciclos térmicos de aquecimento-resfriamento; erosão em subsuperfície de solos permeáveis e pouco coesos quando submetidos a elevados gradientes hidráulicos. E a presença de macroporos pode aumentar a porosidade do meio em até 10% e a infiltrabilidade em 100% ou mais (Hillel, 2004).

Outro fator importante acontece quando há uma dissolução dos minerais na rocha e geração da porosidade granular que são controladas pelas diferenças composicionais das bandas (quartzosas, carbonáticas, hematíticas) (Mourão, 2007)

2.1.3.3 Arcabouço Geológico-Estrutural

Estruturas de descontinuidades representadas tanto pelo próprio acamamento quanto pelas feições tectônicas (falhas, fraturas e clivagens), atuam como canais para a água meteórica facilitando a infiltração pela zona não saturada até chegar a zona saturada, promovendo a recarga (Mourão, 2007).

2.2 Análise Multicritério

Por definição, a Análise Multicritério (AMC) consiste em um conjunto de métodos utilizados quando há necessidade de considerar vários fatores ao mesmo tempo, ou seja, um processamento de tomada de decisão a partir de variáveis complexas e qualitativas (Freitas, 2006), que permite avaliar a influência relativa de cada fator em um determinado problema. De forma mais simplificada, Pompermayer (2007) explica que no processo de tomada de decisão multicritério o decisor procura ordenar elementos de um conjunto de alternativas do "melhor" ao "pior", ou simplesmente escolher o melhor elemento.

É uma metodologia amplamente conhecida no contexto ambiental, seja para identificação de áreas prioritárias para conservação e restauração da água e do solo (Silva, 2025), confecção de modelos de favorabilidade hídrica subterrânea (Brito, 2016 e Oliveira 2020), também usado na elaboração de mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo (Crepani, 2001) ou até mesmo na elaboração de zoneamentos para unidades de conservação (Lopes, 2016).

2.2.1 Processo Analítico Hierárquico (AHP)

Dentre os métodos baseados em análise multicritério, adotou-se neste trabalho o Processo Analítico Hierárquico (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty no final da década de 1970. Esse método consiste na atribuição de pesos às variáveis de entrada a partir de comparações par a par, utilizando uma escala de valores de 1 a 9, que representa a importância relativa entre os critérios (Rodriguez, 2004).

A etapa inicial do método consiste na construção da matriz de comparação par a par, na qual cada variável é comparada com as demais, com base na escala de importância hierárquica de 1 a 9 (Tabela 1). Nessa escala, valores mais baixos indicam igual importância entre os

critérios, enquanto valores mais altos indicam maior influência de um critério sobre o outro (Saaty, 1980). Após o preenchimento da matriz, os valores são normalizados para obtenção dos pesos relativos de cada critério. Esse procedimento permite quantificar a contribuição de cada variável no modelo final, tornando o processo de decisão mais sistemático (Malczewski, 1999).

Tabela 1 - Escala fundamental de Saaty.

Valor	Significado
1	Igual importância
3	Importância moderada
5	Importância forte
7	Importância muito forte
9	Importância extrema
2,4,6,8	Valores intermediários

Fonte: Elaborado pela autora, retirado de Saaty, 1980.

Uma etapa importante do método é a verificação da consistência dos julgamentos realizados. Para isso, calcula-se a Razão de Consistência (RC), que indica o grau de coerência das comparações. Valores de RC inferiores a 0,1 são considerados aceitáveis, garantindo que os pesos atribuídos não apresentam inconsistências significativas (Saaty, 1980).

No contexto hidrogeológico, o uso do AHP permite integrar diferentes variáveis que controlam a infiltração e o fluxo de água subterrânea. Fatores que influenciam o potencial hidrogeológico da área de estudo, como litologia, densidade de lineamentos e declividade foram os critérios escolhidos para serem aplicados ao método AHP. Litologias mais permeáveis, áreas com maior densidade de fraturas, representadas pelos lineamentos, e regiões de baixa declividade tendem a receber maior peso e apresentam maior influência no modelo. Dessa forma, o método contribui para a identificação de áreas com maior potencial de armazenamento hídrico, a partir da integração de dados geológicos e geomorfológicos.

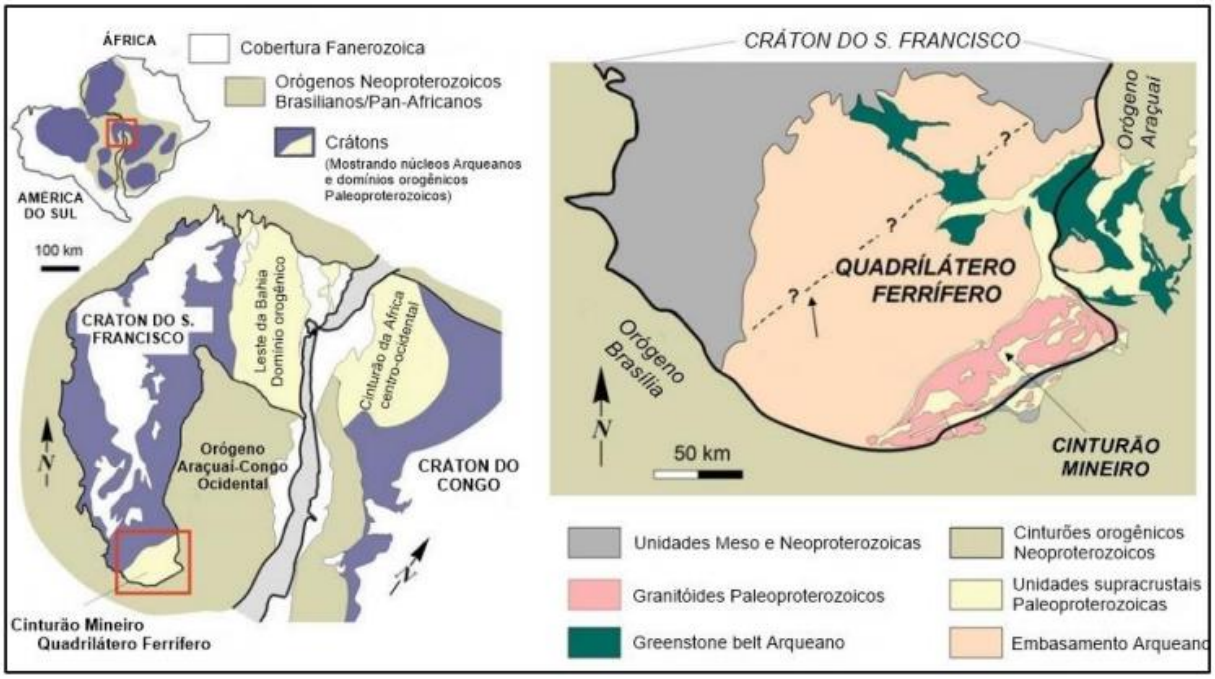
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

3.1 Contexto Geológico

Inserido no contexto geológico do cráton do São Francisco, o Quadrilátero Ferrífero (QFe) está localizado na porção centro-sudeste de Minas Gerais e corresponde a uma das principais províncias minerais do Brasil, com destaque para a ocorrência de depósitos de minério de ferro.

De acordo com Almeida (1977), o cráton do São Francisco (Figura 4) corresponde a uma unidade tectônica estabilizada ao final do ciclo Transamazônico e posteriormente consolidada durante o ciclo Brasiliano. Na sua borda sudeste, ocorre a Faixa Araçuaí, um cinturão orogênico relacionado a esse último evento. Essa região apresenta estruturas como falhas e dobras que afetam tanto os gnaisses do embasamento quanto as rochas metassedimentares Proterozoicas da cobertura. Essas feições são observadas de forma marcante ao longo do Espinhaço Meridional e na porção leste do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 4 - Reconstrução de Gondwana Ocidental, mostrando os crátons do São Francisco e do Congo e a localização do Quadrilátero Ferrífero.



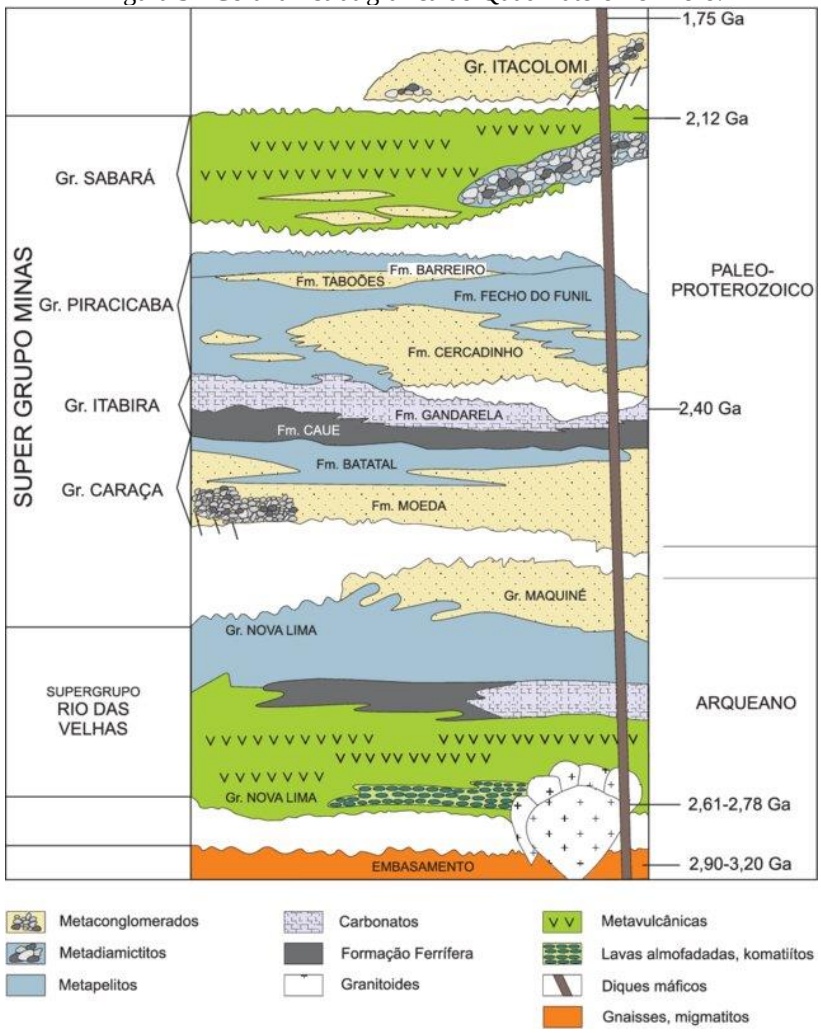
Fonte: Traduzido de Alkmim e Teixeira, 2017.

Do ponto de vista litoestratigráfico, o QFe reúne unidades que vão do Arqueano ao Cenozoico (Endo et al. 2020). Essas unidades passaram por metamorfismo de baixo a médio grau e se organizam em uma sequência que reflete a evolução geológica da região.

Segundo a versão de Dorr (1969), a sequência estratigráfica supracrustal (Figura 5) do Quadrilátero Ferrífero é composta, na base, pelos grupos Nova Lima e Maquiné, pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas, caracterizado por uma associação do tipo *greenstone belt*, formada por xistos, filitos, quartzitos, formações ferríferas, metacherts e rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas, além de níveis carbonosos e conglomeráticos. Sobreposto a essa unidade ocorre o Supergrupo Minas, constituído predominantemente por rochas metassedimentares paleoproterozoicas, incluindo quartzitos, filitos, dolomitos, itabiritos e

formações ferríferas bandadas, distribuídos nos grupos Caraça, Itabira e Piracicaba. Recobrindo discordantemente essas unidades encontra-se o Grupo Itacolomi, composto principalmente por quartzitos, metaconglomerados e filitos quartzosos, interpretados como depósitos clásticos associados a ambientes proximais e de alta energia.

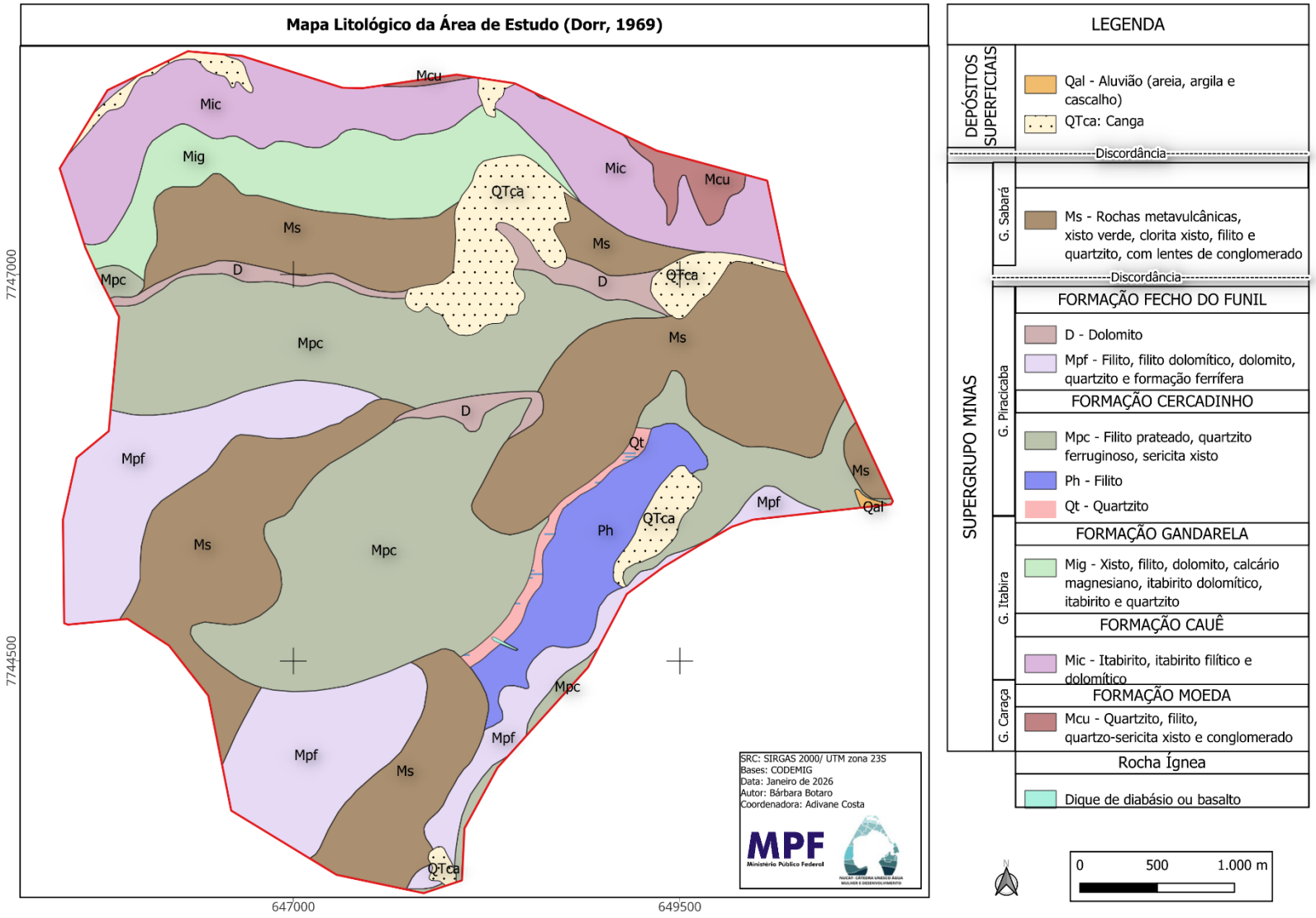
Figura 5 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Alkmim e Marshak, 1998.

A região de estudo deste trabalho se posiciona mais precisamente na porção sudeste do QFe, presente na Quadrícula São Bartolomeu e Santa Rita de Dorr (1969), onde afloram as Formações Moeda, Cauê, Gandarela, Cercadinho, Fecho do Funil e Grupo Sabará, unidades litoestratigráficas do Supergrupo Minas. Além das coberturas Cenozoicas aluvionares e as de canga (Figura 6).

Figura 6 - Mapa litológico da região de Botafogo.



Fonte: Elaborado pela autora, utilizando as bases georreferenciadas da CODEMIG.

3.1.1 SUPERGRUPO MINAS

3.1.1.1 Grupo Caraça

3.1.1.1.1 Formação Moeda

São encontradas na Formação Moeda quartzitos, metarenitos, metaconglomerados e filitos.

3.1.1.2 Grupo Itabira

3.1.1.2.1 Formação Cauê

A Formação Cauê é composta por itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico, com lentes muito pequenas de filito e mármore.

3.1.1.2.2 Formação Gandarela

A Formação Gandarela consiste principalmente de estratos dolomíticos e calcíticos. A rocha mais conspícua na localidade-tipo é o mármore, em sua maior parte dolomítico. Em outras partes da região, filito dolomítico, formação ferrífera dolomítica e filito podem ser os tipos de rocha dominantes.

3.1.1.3 Grupo Piracicaba

3.1.1.3.1 Formação Cercadinho

Quartzito ferruginoso e não ferruginoso, metaconglomerado de seixos, metarenito, filito ferruginoso, "filito prateado", filito dolomítico, dolomito e filito púrpura compõem a Formação Cercadinho. Essas litologias estão intercaladas e fortemente lenticulares; rochas quartzosas em alguns locais apresentam estratificação cruzada. A diversidade de sequências e a presença de quartzito ferruginoso e "filito prateado" são as características distintivas dessa formação.

3.1.1.3.2 Formação Fecho do Funil

A Formação Fecho do Funil é composta por filito dolomítico, filito, siltito e dolomita impura.

3.1.1.4 Grupo Sabará

O Grupo Sabará é constituído por uma sequência de mica e clorita xistos, grauvacas, subgrauvacas e quartzitos, contendo também intercalações de metachert ferruginoso, formações ferríferas lenticulares e diversos níveis de conglomerados (do tipo *sharpstone* e *roundstone*) e tilloides com grandes matacões graníticos.

3.1.2 DEPÓSITOS SUPERFICIAIS

3.1.2.1 Canga

A canga é um aglomerado rochoso constituído principalmente de fragmentos de formação ferrífera e subordinadamente de filito e quartzito cimentados por óxido de ferro, formada por enriquecimento supergênico. Na região do QFe, a canga aflorante é descrita como sendo uma cobertura detrito laterítica que mostra concreções de hidróxido de ferro, essa característica compreende ao conteúdo rochoso uma quantidade de cerca de 20% a 80% de fragmentos detríticos de formação ferrífera com pequena quantidade de quartzo, e que ocorre recobrindo principalmente a Formação Cauê. O teor de ferro nesta canga varia entre 50% a 60% de Fe (Dorr, 1969)

3.1.2.2 Aluvião

Produto do intemperismo e erosão que decompõe a maioria das rochas em partículas do tamanho de argila e silte, as quais são facilmente removidas durante as fortes enxurradas da estação chuvosa, torna incomuns as grandes acumulações de aluvião no Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2020).

3.2 Contexto Estrutural

O arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero é o resultado de diferentes e sucessivos eventos tectônicos, responsáveis pela formação de estruturas dúcteis e rúpteis. As estruturas dúcteis, como dobras e foliações, definem o arranjo regional das unidades geológicas. Já as estruturas rúpteis, representadas por falhas, fraturas e juntas, estão associadas à ruptura das rochas e à geração de descontinuidades.

Atribui-se ao menos dois eventos de grande magnitude que são responsáveis pela configuração atual do QFe. Estes eventos ocorreram durante o Paleoproterozoico (2,1 – 2,0 Ga), na Orogenia Transamazônica e durante o Neoproterozoico (0,8 – 0,6 Ga), durante o evento Brasiliano (Chemale Jr. et al. 1994).

Para Dorr (1969) a evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero pode ser dividida em três eventos deformacionais. Os dois primeiros estão relacionados aos Supergrupos Rio das Velhas e Minas, e o último ocorre após a deposição do Grupo Itacolomi. Ele descreve que o primeiro evento afetou apenas as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, com aumento da deformação de leste para oeste. O segundo está ligado à deformação do Supergrupo Minas, com arqueamento e soerguimento das estruturas. Já o terceiro evento, de maior intensidade, atingiu

e deformou todas as unidades pré-cambrianas, sendo responsável pela configuração atual da região.

Ladeira e Viveiros (1984) descrevem seis eventos tectônicos deformacionais responsáveis pela configuração atual do Quadrilátero Ferrífero. O primeiro afetou apenas o Supergrupo Rio das Velhas, gerando dobras com vergência de SW para NE. Entre o segundo e o quarto evento, formaram-se dobras com orientação E-W e vergência para norte. O quinto evento corresponde a um regime compressional de leste para oeste, com estruturas orientadas N-S. Já o último evento está associado a deformação rúptil, marcada pela geração de fraturas com direções NE-SW, NW-SE, NNW-SSE e E-W, geralmente com alto ângulo de mergulho.

Nos estudos de Chemale et al. (1991, 1994) e Baltazar e Zuchetti (2007), o Quadrilátero Ferrífero resulta também da atuação de dois eventos deformacionais. O primeiro evento ocorre no Paleoproterozoico, durante o ciclo Transamazônico, e está relacionado a um regime extensional com soerguimento de complexos metamórficos e arqueamento de rochas supracrustais. Posteriormente, no Neoproterozoico, a orogenia Brasiliana-Pan Africana promove a compressão dessas unidades. Nesse contexto, o QFe se insere na porção mediana a distal do *front* orogênico formado.

Alkmim e Marshak (1998) propõem um modelo diferente dos autores anteriores. Eles entendem que o evento Transamazônico é dividido em duas fases distintas. Inicialmente ocorre um regime compressional, caracterizado por dobramentos de empurrão com vergência para NW, interpretados como resultado do fechamento de uma bacia de margem passiva. Em seguida, inicia-se um regime extensional, marcado pelo colapso gravitacional das sequências supracrustais, que levou à configuração dos domos e quilhas. Nesse contexto, após o alívio dos esforços compressionais, diferenças mineralógicas e reológicas entre o embasamento cristalino e as coberturas metassedimentares favoreceram a ascensão de domos granito-gnáissicos e o desenvolvimento de calhas sinformais nas unidades supracrustais. Esse processo também está associado à reorganização das estruturas previamente formadas e à geração de zonas de fraqueza nos maciços. Por fim, o evento Brasiliano, com vergência de leste para oeste, atuou sobre esse arranjo estrutural preexistente, promovendo o redobramento e a reativação de estruturas anteriores.

Por outro lado, Almeida (2004) e Endo et al. (2005) trazem uma nova interpretação para a configuração estrutural do QFe. Eles explicam que tal configuração teria sido controlada por duas dobras recumbentes alóctones: Nappe Curral, com transporte para N; e Nappe Ouro Preto, com transporte voltado para S. E que este último conjunto de estruturas, Nappe Ouro Preto, daria origem a uma clivagem espaçada de orientação E-W.

3.2.1 Estruturas Rúpteis

As estruturas rúpteis, do ponto de vista hidrogeológico, têm papel central no controle da permeabilidade em rochas. A infiltração e circulação de água ocorrem principalmente ao longo dessas descontinuidades.

Em um estudo sobre a tectônica de fraturamento do Quadrilátero Ferrífero e em parte do complexo migmatítico granulítico de Minas Gerais, com base em Sensoriamento Remoto, Santos (1986) destacou cinco sistemas principais de fraturamento no QFe, sendo eles NNE-SSW, NE-SW, E-W, NW-SE e NNW-SSE. Completou ainda que as fraturas com orientação NW-SE já apresentavam indícios de atividade desde o Arqueano, durante fases tectônicas rúptil-dúcteis de caráter compressional. Nos seus estudos, pôde observar que as estruturas dúcteis e rúpteis destacam-se nas imagens de radar como alinhamentos lineares no relevo e na drenagem. A pesquisa mostrou ainda a presença de zonas de cisalhamento transcorrentes com movimentação sinistral e orientação preferencial N35-45W, notadas com frequência na região.

3.3 Contexto Hidrogeológico

A hidrogeologia do Quadrilátero Ferrífero pode ser tão complexa quanto a sua história e variabilidade litológica. Segundo Ramos et al. (2020), o avançar dos conhecimentos sobre recursos hídricos subterrâneos no QFe iniciou posteriormente ao mapeamento litológico e estrutural integralizado por Dorr em 1969, e tem crescido cada vez mais nos últimos anos a necessidade de buscar entendimento sobre o funcionamento de rochas armazenadoras e produtoras de água, tanto para o abastecimento humano quanto para o desenvolvimento de atividade minerárias.

Neste item, para o entendimento da dinâmica hidrogeológica do Quadrilátero Ferrífero, assim como em Beato et al. (2005), Mourão (2007) e Brito (2019), seguirá o padrão de classificação dos aquíferos imposto por Rebouças (1994), que utiliza a denominação Sistema Aquífero para um conjunto formado por uma ou mais unidades litoestratigráficas que apresentem condutividade hidráulica, características hidrodinâmicas, condições de recarga, circulação e descarga e de qualidade de água semelhantes. Ou seja, será feita uma associação do caráter litológico, comportamento hidrodinâmico e tipos de permeabilidade (primária ou secundária) às unidades geológicas principais descritas por Dorr (1969).

3.3.1 Sistema Aquífero em Coberturas Sedimentares

As coberturas cenozoicas, formadas por depósitos sedimentares aluviais e lacustrinos e também materiais detrito lateríticos e elúvio-coluviais, estão associadas a aquíferos livres com porosidade intersticial. Essa porosidade e permeabilidade variam conforme as características físico-químicas dos sedimentos e o grau de meteorização das rochas. A canga laterítica apresenta alta porosidade e permeabilidade, permitindo que a maior parte da água precipitada infiltre. Já sedimentos com maior teor de argila possuem baixa permeabilidade, o que reduz a infiltração e o fluxo de água no subsolo (Beato et al. 2005).

3.3.2 Sistema Aquífero em Rochas Carbonáticas

O sistema é representado pelo predomínio de rochas calcárias (calcítico e dolomítico), predominantemente pela Formação Gandarela. Quando representado em dominância por rochas calcíticas, pode apresentar feições cársticas expressivas e constituir bons aquíferos (Ramos et al. 2020). Já para aquíferos com assinaturas dolomíticas que, segundo Brito (2019), é o caso da maior parte das rochas calcárias do QFe, a sua menor solubilidade limita o desenvolvimento de estruturas cársticas mais expressivas, o que influencia o armazenamento e a circulação de água subterrânea. Portando, este aquífero apresenta porosidade secundária do tipo fissural e também porosidade terciária associada ao carste, que é gerada pela dissolução dos carbonatos nas zonas de fraqueza da rocha dolomítica. A condutividade hidráulica desse aquífero é considerada moderada, marcada entre $1{,}0 \times 10^{-06}$ a $1{,}0 \times 10^{-04}$ (cm/s).

3.3.3 Sistema Aquífero em Formações Ferríferas

As formações ferríferas metamorfizadas (presença de itabiritos diversos, como goethíticos, anfibolíticos e carbonáticos) no Quadrilátero Ferrífero estão principalmente associadas ao aquífero Cauê, que hospeda corpos de minério de ferro, unidade geológica representada pela Formação Cauê. Esse aquífero apresenta forte compartimentação, relacionada a falhas, diques básicos e à presença de rochas com menor permeabilidade. O fluxo de água ocorre ao longo das camadas, devido à dissolução e lixiviação dos minerais, e também através de descontinuidades, como fraturas, clivagens e falhas. Este aquífero, de ocorrência livre a confinada, exibe uma dupla porosidade, intergranular e fissural, devido à ocorrência de rochas friáveis a compactas, que depende da intensidade do processo supergênico e da dissolução de quartzo e carbonato da rocha reservatório em questão (MYR Projetos Sustentáveis, 2013; Brito, 2016). A água apresenta condições redutoras e concentração de metais dissolvidos, principalmente ferro (Mourão 2007), e alta condutividade hidráulica com intervalos entre 1,0 x

10^{-05} a 1,0 x 10^{-02} (cm/s). As zonas de recarga relacionam-se às porções com cotas topográficas mais elevadas (geralmente cobertas por cangas e lateritas), sendo as principais zonas de descarga correspondentes às porções de contato com unidades menos permeáveis (Ramos et al. 2020).

3.3.4 Sistema Aquífero em Rochas Quartzíticas

Esse sistema está associado a diferentes unidades geológicas com predominância de quartzitos, podendo incluir níveis intercalados de filito ou dolomito. Os aquíferos são descontínuos, do tipo fissural, e podem ocorrer como livres ou confinados pelos metapelitos interestratificados de baixa permeabilidade. Apresentam comportamento anisotrópico e heterogêneo. A porosidade e a permeabilidade são secundárias e estão relacionadas a estruturas geradas por esforços tectônicos. O potencial hidrogeológico é considerado relativamente alto, já que a água circula e é armazenada principalmente nas descontinuidades, como fraturas, fissuras interligadas e falhas em diferentes escalas e moderada condutividade hidráulica com intervalos entre 1,0x10^{-05} a 1,0x10^{-03}(cm/s). A recarga ocorre de forma direta, por infiltração da água da chuva (Ramos et al. 2020).

3.3.5 Sistema Aquífero em Rochas Metapelíticas

Abrange os aquicludes/aquitardos, compostos majoritariamente por filitos, metapelitos, siltitos e argilitos de diferentes tipos, como sericíticos, grafitosos e dolomíticos, que se comportam como unidades com pouca circulação de água. Isso ocorre porque essas rochas apresentam pouco desenvolvimento de permeabilidade secundária. Embora os argilominerais nesta unidade armazenem água, eles não são capazes de transmiti-la, o que reflete em valores baixos para condutividade hidráulica entre 5,0 x 10^{-08} a 5,0 x 10^{-06} (cm/s) (Ramos et al. 2020). Além disso, a mineralogia favorece a alteração para argilas e um comportamento mais plástico, o que tende a manter as fraturas pouco abertas ou fechadas (MYR Projetos Sustentáveis, 2013).

3.3.6 Sistema Aquífero em Rochas Xistosas

De forma geral, esse sistema que ocorre principalmente em xistos apresenta porosidade do tipo fissural, com baixo potencial hidrogeológico. Isso pode ser observado pela baixa produtividade de poços tubulares e pelas vazões reduzidas em nascentes. Sua condutividade hidráulica é vista entre 1,0 x 10^{-08} a 1,0 x 10^{-06} (cm/s), sendo considerada baixa. Trata-se de um meio heterogêneo, devido à presença de diferentes litotipos intercalados, como metarenitos,

metagrauvacas e formações ferríferas. A recarga ocorre principalmente pela infiltração da água da chuva nas unidades superficiais conectadas às fraturas. A circulação da água acompanha as principais direções de fraturamento e também os planos de acamamento (Ramos et al. 2020).

3.4 Contexto Geomorfológico (Relevo)

No estudo de Varajão sobre a correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero (1991), que buscou estudar e compreender melhor a relação entre as superfícies de erosão e as diferentes altitudes que exibem um nítido controle litoestrutural, entende-se que as superfícies de aplainamento podem ser definidas em três níveis geomorfológicos. O primeiro corresponde às cristas com as maiores cotas do QFe, onde afloram itabiritos e quartzitos; o intermediário considera as áreas onde ocorrem xistos e filitos, normalmente preenchendo calhas de estruturas topograficamente invertidas e o terceiro nível aquele que classifica as áreas mais erodíveis, de baixas altitudes, sendo representadas por gnaisses e migmatitos do embasamento. Além disso, a longa evolução do Quadrilátero, desde o Paleozóico, é caracterizada por "cicatrizes" representadas por coberturas sedimentares e lateríticas, e eventos tectônicos e magmáticos que atestam esta evolução.

3.5 Contexto Socioambiental e Cultural Local e a Mineração de Ferro e Manganês

O processo de fixação do povoado da comunidade de Botafogo ocorreu em meados do século XVII. Conhecida anteriormente como Santo Amaro, teve seu nome alterado para Botafogo, devido a presença de abundantes afloramentos de Canga na região, conhecido como pedra Botafogo, devido a sua capacidade de produzir faíscas em reação à fricção (Amaro e Redini, 2015).

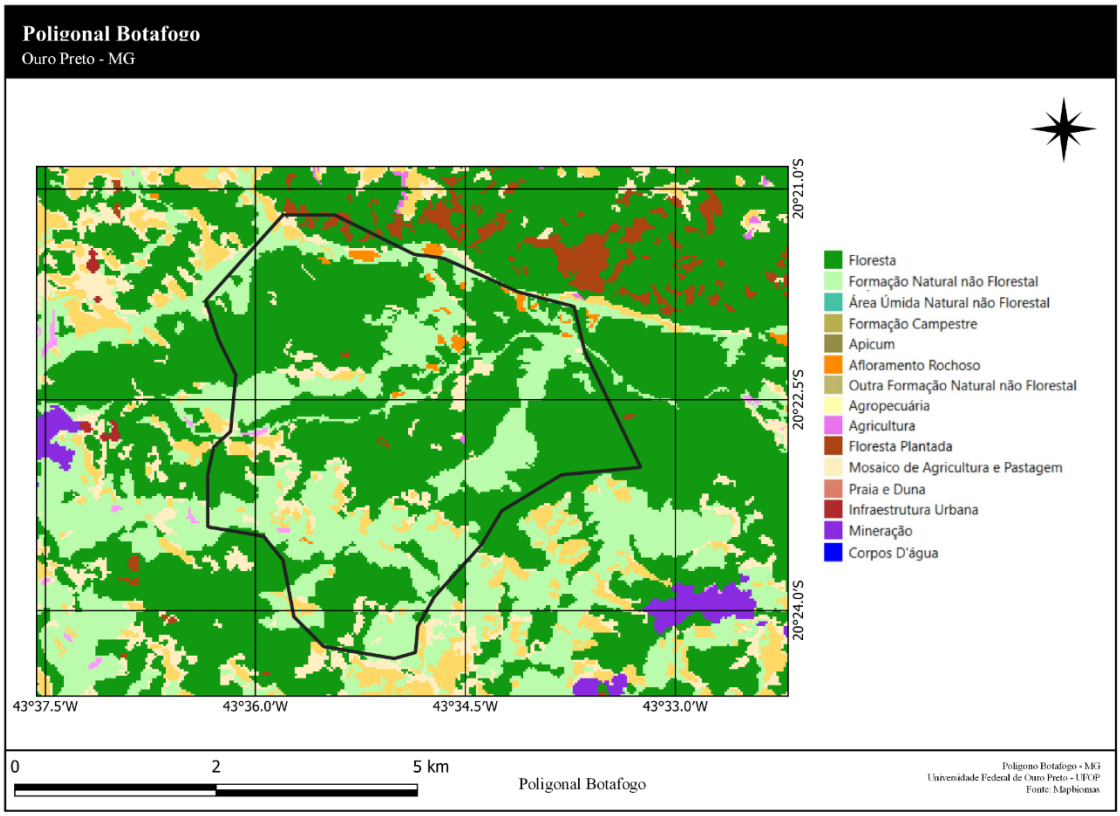
Nos primeiros anos, a economia da região girava em torno das práticas de agricultura e pecuária, em regime de subsistência. Há registros de atividades mineradoras no local durante os séculos XVII, XIX e boa parte do século XX. Segundo Amaro e Redini (2015) no início do século XX, com a extração de minério, o terreno que compunha o patrimônio da capela foi arrendado por empresas interessadas na exploração, e por volta de 1950-1960, a CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), se instalou na localidade. Desta forma, ocorreu a formação de uma vila de operários que trabalhavam na exploração mineral e que aumentou o número de habitantes locais, fato que refletiu em algumas modificações no contexto social, econômico, geográfico e cultural da região.

Do ponto de vista sociocultural, a região de Botafogo apresenta relevante patrimônio histórico, refletindo sua antiga ocupação e importância para a formação do município de Ouro

Preto. Entre os principais bens históricos destacam-se a Capela de Santo Amaro, atualmente em processo de tombamento e construída durante o período de formação do povoado; a antiga Estação de Topázio, pertencente ao Ramal Ponte Nova, que evidencia a importância da ferrovia para o desenvolvimento regional; e a Rota Imperial, integrante da Estrada Real, construída no início do século XIX para conectar Ouro Preto ao litoral do Espírito Santo. Esses elementos demonstram a relevância histórica da comunidade e seu papel como importante eixo de circulação, ocupação e desenvolvimento regional (Amaro e Redini, 2015; Carneiro, 2020).

Atualmente, o povoado é ocupado por aproximadamente por 30 famílias que abrangem um contingente populacional de aproximadamente 90 habitantes, entre crianças, jovens e adultos. O uso e ocupação do solo da comunidade (Figura 7) é destinado a ocupação residencial, representada por pequenas moradias, sítios e chácaras. As atividades comerciais são incipientes, destacam o Apiário Flores, o Espaço Saramenha Artes e Ofícios, e o Pouso de Santo Amaro. A produção agrícola é destinada à agricultura familiar, apresentando pequenas áreas com horticultura e frutíferas. É uma localidade bastante arborizada, com áreas de mata fechada, típica da Mata Atlântica (Costa et al. 2024).

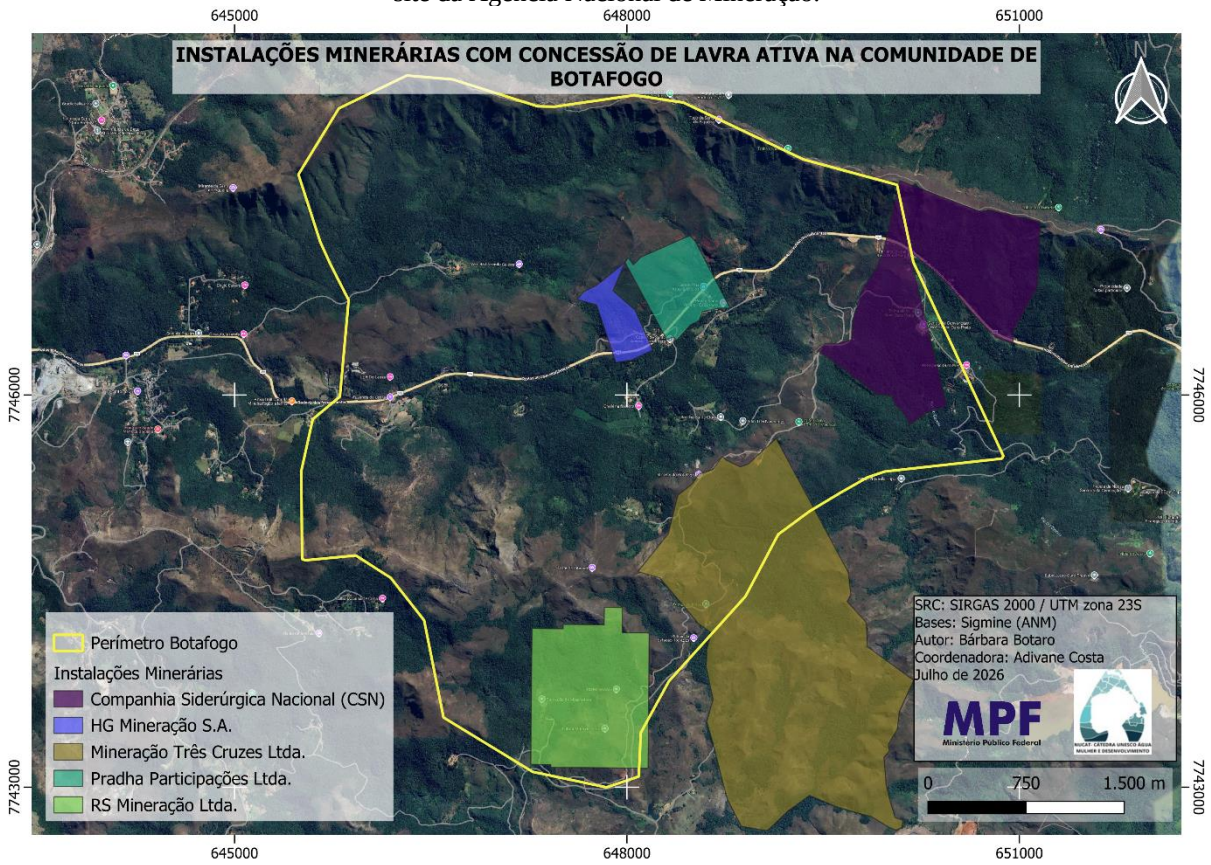
Figura 7 - Mapa de uso e ocupação do solo



Fonte: Costa et el. 2024.

Recentemente, a região de Botafogo tem sido marcada pela expansão das atividades de mineração de ferro e manganês, favorecida pela ocorrência dos itabiritos e canga aflorantes. Durante o desenvolvimento deste trabalho, segundo dados do SIGMINE, site de dados geográficos da Agência Nacional de Mineração, as áreas com concessões de lavra vigentes correspondem aos empreendimentos da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), HG Mineração S.A., Mineração Três Cruzes Ltda., Pradha Participações Ltda. e RS Mineração Ltda. Dentro do polígono que compreende a área da comunidade, esses empreendimentos ocupam cera de 16, 92% da área total. (Figura 8).

Figura 8 – Áreas com concessões de lavra vigentes na comunidade de Botafogo, segundo dados do SIGMINE, site da Agência Nacional de Mineração.



Fonte: Elaborada pela autora, no QGIS.

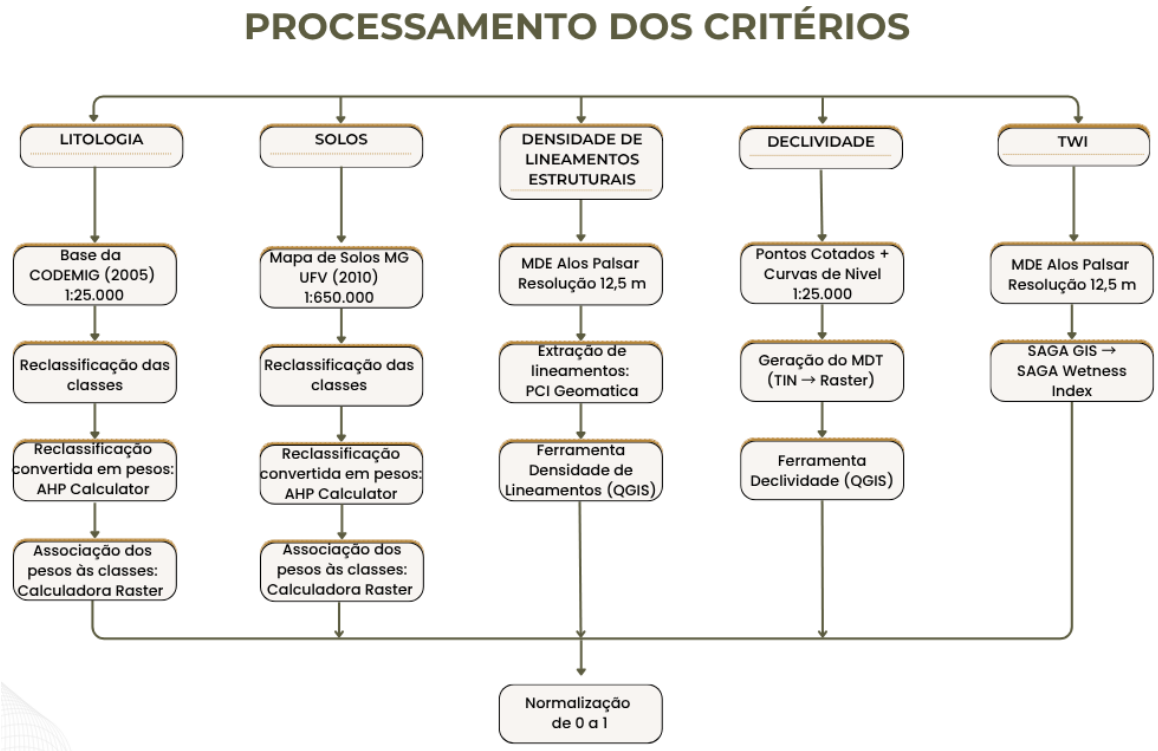
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos para a elaboração deste trabalho se organizaram a partir de campanhas de campo e processamento indireto de informações disponíveis em banco de dados, conforme ilustra o fluxograma a seguir (Figura 9).

Em relação ao processamento de cada critério optou-se por fazer a normalização direta dos rasters de declividade, TWI e de densidade de lineamentos, já que são contínuos. Os rasters

de litologias e solos, que são categóricos, primeiro foram reclassificados conforme a equação 1 e 3, respectivamente, e depois normalizados. A ideia é que no fim todos os critérios estivessem em uma mesma escala, que neste trabalho variou entre 0 e 1.

Figura 9 - Fluxograma que ilustra o processamento dos critérios a serem comparados na análise multicritério.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1 Campanhas de Campo

As atividades de campo tiveram por finalidade o reconhecimento dos principais litotipos aflorantes na área de estudo. Entretanto, como alguns locais eram de difícil acesso ou inviáveis, seja em função da cobertura vegetal ou de serem áreas privadas, tais como áreas de mineração, apoiou-se majoritariamente na cartografia geológica base elaborada por Dorr (1969). A partir das informações cartográficas da literatura, elaborou-se o mapa da Figura 6. Entretanto, ressalta-se que as unidades discriminadas, englobam muitas vezes vários tipos de rocha. Dessa maneira, a validação em campo dos litotipos dominantes fez-se necessária, visto que do ponto de vista hidrogeológico, podem apresentar favorabilidade distinta à infiltração.

Além disso foram acrescentadas descrições feitas pelo coorientador deste trabalho, em visitas de campo feitas na região leste e sul da área de estudo, realizadas previamente a execução deste projeto, com as turmas da disciplina de Geologia de Campo.

4.2 Favorabilidade à Infiltração Quanto a Litologia

Para estruturar o mapa de favorabilidade à infiltração quanto a litologia, foram integradas as informações coletadas durante as campanhas de campo realizadas na área de estudo e os mapas das campanhas de mapeamento geológico regional do Quadrilátero Ferrífero, confeccionados por Dorr (1969), em parceria com o Ministério de Minas e Energia do Brasil e o Departamento do Interior dos Estados Unidos - Serviço Geológico.

Na tentativa de georreferenciar as quadrículas da região de estudo (quadrícula número 41 nomeada "Ouro Preto" unida com a número 46 nomeada "Santa Rita de Ouro Preto" e a quadrícula número 36 nomeada "São Bartolomeu", todas em escala 1:25.000, mapeadas por Barbos, 1969), notaram-se algumas diferenças cartográficas entre as camadas vetorizadas e as do mapa. Foram então utilizadas as bases da CODEMIG do ano de 2005, projeto que teve como principal objetivo reduzir justamente essas incompatibilidades cartográficas.

A etapa de processamento para a análise multicriterial, feita no ambiente SIG, consistiu em atribuir variáveis numéricas representativas a cada litologia, de acordo com a sua influência sobre favorabilidade à infiltração hídrica dentro da área. Os valores foram definidos com base em informações de campo, quando acessível, e dados da referência bibliográfica, quando o local não possuía viabilidade, como segue a Tabela 2. Para essa etapa, foi adotada a escala fundamental de Saaty (1980), utilizando valores inteiros de 1 a 9 para representar a importância relativa de cada unidade litológica. As litologias consideradas mais favoráveis para a infiltração hídrica receberam valores mais elevados, enquanto as rochas com menor favorabilidade receberam valores mais baixos (Tabela 2).

Tabela 2 - Atribuição de variáveis numéricas representativas às litologias presentes na área de estudo.

Litologia	**Caracterização hidrogeológica no QFe/ na área de estudo**	**Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração**	**Valores Representativos**
Aluvião: areia, argila e cascalho	Sedimentos inconsolidados com porosidade e permeabilidade moderada devido a alto teor de argila (Beato et al. 2005)	Baixa a moderada	3
Dolomito (F. Fecho do Funil)	Capacidade de armazenamento moderada, visto que pode variar localmente, a depender do nível de fraturamento (Beato et al. 2005; Silva, 1993)	Moderada	5
Quartzito (F. Cercadinho)	Rocha quartzítica intensamente fraturada (Silva, 1993)	Alta	7

Itabirito (F. Cauê)	Formação ferrífera bandada com elevada permeabilidade e condutividade hidráulica (Mourão, 2007)	Muito Alta	9
Dolomito; Itabirito Dolomítico (F. Gandarela)	Unidade heterogênea limitada a fraturas, em baixa quantidade (Silva, 1993)	Moderada	5
Quartzito; Conglomerado (F. Moeda)	Permeabilidade moderada, mas que pode variar de acordo com a localidade (Beato, 2005)	Moderada a alta	7
Canga	Associada às unidades ferruginosas e apresentam comumente elevada porosidade e condutividade hidráulica (Mourão 2007)	Muita Alta	9
Dique de diabásio	Referidos como barreiras hidráulicas, mas que permitem o escoamento da água subterrânea (Mourão 2007)	Muito baixa a baixa	3
Itabirito; Xisto (G. Sabará)	Localmente, na área de estudo, é visto maior presença de itabirito friável fraturado	Alta a Muito Alta	9
Xisto Ferruginoso, Filito Prateado, Quartzito Ferruginoso (F. Cercadinho)	Localmente o Xisto Ferruginoso fraturado é predominante, sendo visto em cachoeiras e associado a nascentes. Vê-se pouco quartzito.	Alta	7
Filito; Filito Dolomítico (F. Fecho do Funil	Unidade com baixa permeabilidade (Silva, 1993)	Muito baixo	1
Filito (F. Cercadinho)	Litologia de boa permeabilidade em zonas de fraturas (Silva, 1993)	Moderado	5

Fonte: Elaborada pela autora com dados de campo e referências bibliográficas.

Com os valores numéricos representativos previamente atribuídos, foi realizada a construção da matriz de comparação pareada no método AHP, por meio da plataforma online AHP Calculator, disponível em https://bpmsg.com/ahp/, que permitiu a obtenção dos pesos de cada classe litológica, bem como a verificação da razão de consistência de 2,9% (Tabela 3):

Tabela 3 - Pesos representativos para as litologias geradas pelo AHP Calculator.

Litologia	Rank	Pesos (%)
Aluvião	10	1.9
Canga	1	19.0
Dique de Diabásio	10	1.9
Dolomito (Fecho do Funil)	7	4.0
Dolomito (Gandarela)	7	4.0
Filito (Cercadinho)	7	4.0
Filito (Fecho do Funil)	12	1,1
Itabirito (Cauê)	1	19.0
Itabirito (Sabará)	1	19.0
Quartzito (Cercadinho)	5	8.7
Quartzito (Moeda)	5	8.7
Xisto Ferruginoso (Cercadinho)	5	8.7

Fonte: AHP Calculator

Por fim, no ambiente SIG, os valores originalmente atribuídos às classes litológicas (de 1 a 9) foram convertidos, conforme a Equação 1, para pesos calculados pelo método AHP por meio da ferramenta “Calculadora Raster” do QGIS, com resolução espacial de 12,5m.

$$("litologia" = 9) * 0.19 + ("litologia" = 7) * 0.087 + ("litologia" = 5) * 0.04 + ("litologia" = 3) * 0.019 + ("litologia" = 1) * 0.011 \quad (1)$$

O último passo, foi realizar a normalização do raster para uma escala comum entre 0 e 1, onde valores próximos a 1 são os valores mais altos, nesse caso referente às litologias mais favoráveis hidrogeologicamente à infiltração, também por meio da ferramenta “Calculadora Raster”.

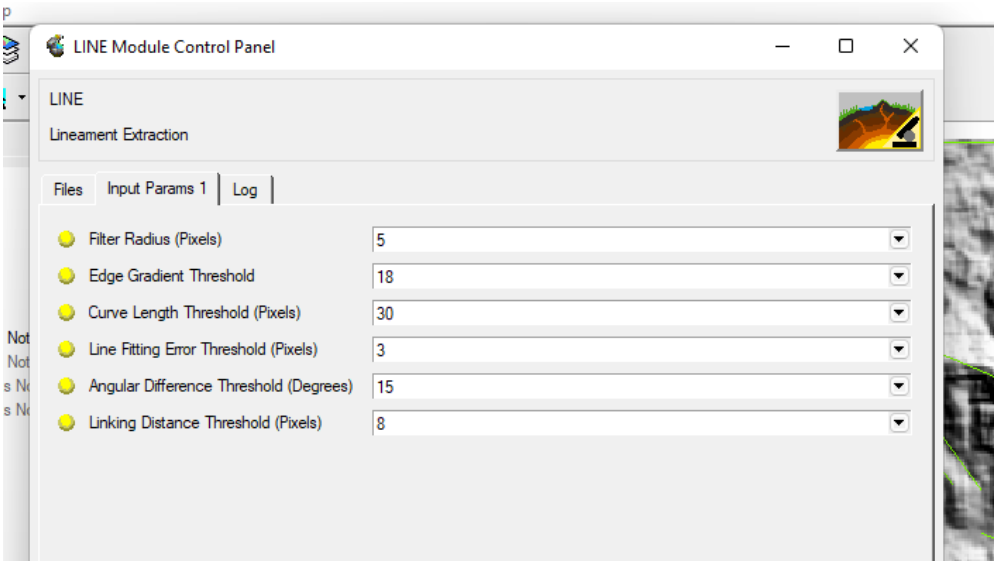
4.3 Favorabilidade à Infiltração Quanto a Densidade de Lineamentos Estruturais

Inicialmente foi selecionado o Modelo Digital de Elevação (MDE) Alos Palsar, com resolução espacial de 12,5m da área de estudo. A partir do MDE foram geradas imagens de relevo sombreado, por meio do software QGIS, com diferentes azimutes de iluminação (45°, 90°, 315° e 360°). A utilização desses diferentes azimutes reflete as direções preferencias de fraturamento no QFe (Santos, 1986), onde a incidência da luz tende a realçar essas feições no relevo. Dessa forma, a análise conjunta dessas imagens permite evidenciar os lineamentos estruturais da região de estudo.

Posteriormente, a extração automática dos lineamentos foi realizada no módulo "*Line*" do software PCI Geomática. Cada imagem de *hillshade*, com seus específicos azimutes de iluminação, foi processada individualmente, gerando conjuntos independentes de lineamentos.

O algoritmo de extração foi executado utilizando os seguintes parâmetros: *Filter Radius* = 5; *Edge Gradient Threshold* = 18; *Curve Length Threshold* = 30 pixels; *Line Fitting Error Threshold* = 3 pixels; *Angular Difference Threshold* = 15°; e *Linking Distance Threshold* = 8 pixels (Figura 10). A definição desses valores foi realizada a partir de testes autorais de calibração, que buscou uma configuração que permitisse reduzir a detecção de ruídos, ao mesmo tempo em que preservasse os lineamentos mais expressivos.

Figura 10 - Parâmetros para o algoritmo de extração de lineamentos no módulo LINE do software PCI Geomática.



Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo assim, as quatro *shapefiles* com os lineamentos foram unificadas e procedeu-se à geração de um raster de densidade de lineamentos, por meio da ferramenta "Densidade da linha", disponível no conjunto de algoritmos de análise raster do QGIS. A densidade é calculada considerando um raio de busca ao redor de cada célula do raster, e nesse trabalho foi adotado um raio de pesquisa de 300 metros. Em seguida a camada foi normalizada de 0 a 1, por meio da ferramenta "Calculadora Raster", onde os valores próximos a 1 representam maiores valores de concentração de lineamentos.

4.4 Favorabilidade à Infiltração Quanto a Declividade

O mapa de declividade foi elaborado a partir da interpolação de curvas de nível e pontos cotados da área de estudo, obtidos no Banco de Dados Geográficos do Exército (BDGEx), disponibilizado pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), provenientes da carta topográfica vetorial na escala 1:25.000. No software ArcGIS, esses dados altimétricos foram utilizados para a construção de uma Rede Triangular Irregular (TIN – Triangulated Irregular Network), posteriormente convertida para o formato raster, resultando em um Modelo Digital do Terreno (MDT). A partir do MDT, foi aplicada a ferramenta "Declividade" do software QGIS, configurada para expressar os resultados em graus.

Como menores declividades tendem a favorecer a infiltração da água e a recarga dos aquíferos, enquanto áreas mais íngremes favorecem o escoamento superficial, optou-se por realizar uma normalização linear inversa, de forma que as menores declividades recebessem valores próximos de 1 e as maiores declividades valores próximos de 0.

4.5 Favorabilidade à Infiltração Quanto ao Índice Topográfico de Umidade (TWI)

O Índice Topográfico de Umidade (*Topographic Wetness Index* – TWI) foi utilizado como um dos critérios por representar a tendência de acumulação de água na paisagem em função das características topográficas do terreno. É definido algebricamente conforme a Equação 2, onde *a* é a área de contribuição específica, isto é, a área de captação específica a montante da célula, e *b* representa o ângulo de inclinação local da vertente (Barella, 2016):

$$WI = ln(a/tan\, b) \quad (2)$$

A geração do TWI foi realizada diretamente no software SAGA GIS (*System of Automated Geoscientific Analyses*), utilizando como dado de entrada o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo e seguindo os comandos a seguir:

Geoprocessing → Terrain Analysis → Hydrology → SAGA Wetness Index

Em seguida, procedeu-se à normalização dos valores do raster para a escala entre 0 e 1, onde os maiores valores indicam maior potencial de concentração de fluxo e acúmulo de umidade e os menores valores onde há tendência de escoamento superficial.

4.6 Favorabilidade à Infiltração Quanto ao Solo

A base cartográfica de solos utilizada neste trabalho foi obtida a partir do mapa de solos do Estado de Minas Gerais, elaborado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em escala 1:650.000. Embora essa base apresente uma escala regional, foi possível identificar na área de

estudo, a ocorrência de três classes de solos: Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Litólico.

Com o objetivo de representar a influência de cada classe de solo quanto a sua favorabilidade hidrogeológica à infiltração, foram consultadas referências bibliográficas que descrevem suas características físicas e hidrológicas, especialmente quanto à drenagem interna. A partir dessas informações, foi atribuída uma classificação com variáveis numéricas representativas para cada classe, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Atribuição de variáveis numéricas representativas aos tipos de solos presentes na área de estudo.

Ordem	**Subordem**	**Sigla**	**Drenagem Interna**	**Valores Representativos**
Cambissolo	Háplico	CX	Boa	7
Latossolo	Vermelho-Amarelo	LVA	Muito boa	9
Neossolo	Litólico	RL	Moderada	5

Fonte: Silva, 2008.

Por fim, os valores representativos atribuídos às classes de solo foram convertidos em pesos novamente por meio da plataforma AHP Calculator. Posteriormente, utilizando a ferramenta Calculadora Raster do software QGIS, esses pesos foram associados às respectivas classes, conforme a Equação 3, resultando em uma nova camada raster.

$$("solo" = 9) * 0.625 + ("solo" = 7) * 0.238 + ("solo" = 5) * 0.137 \qquad (3)$$

Em seguida, a camada foi submetida ao processo de normalização para uma escala entre 0 e 1, de modo que os maiores valores correspondessem às classes de solo com maior capacidade de infiltração.

4.7 Processo Analítico Hierárquico

Por fim, realizou-se a definição da importância relativa dos cinco critérios processados (litologia, densidade de lineamentos estruturais, declividade, índice topográfico de umidade e solos). Para isso, foram realizadas consultas a professores especialistas com experiência na área de hidrogeologia, os quais contribuíram com o julgamento da importância relativa entre os critérios, conforme a escala fundamental proposta por Saaty (1980). Sendo assim, foi

novamente utilizada a plataforma AHP Calculator e, após a validação da consistência da matriz, foram obtidos os pesos finais atribuídos a cada critério, conforme segue a tabela 5, a seguir:

Tabela 5 - Pesos atribuídos aos critérios pelos especialistas.

Critérios	Pesos – Especialista 1	Pesos – Especialista 2	Pesos – Especialista 3
Litologia	53,8%	28%	25,0%
Densidade de Lineamentos	26,1%	12,0%	47,1%
Declividade	8,1%	49,8%	15,4%
TWI	8,3%	6%	8,3%
Solos	3,6%	3,4%	4,3%

Fonte: Elaborada pela autora.

Posteriormente, os mapas temáticos foram integrados no software QGIS, por meio da ferramenta *Calculadora Raster*, na qual cada camada foi multiplicada pelos respectivos pesos atribuídos pelos professores especialistas.

Por fim os três mapas foram unidos foram unidos através da soma das três camadas rasters na *Calculadora Raster*, dando origem ao mapa final de favorabilidade hidrogeológica à infiltração hídrica subterrânea para a localidade de Botafogo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Campanhas de Campo e Mapa de Favorabilidade à Infiltração Quanto a Litologia

A partir de uma investigação preliminar em campo, foram reconhecidas cinco litologias na área de estudo, com descrições citadas a seguir.

A primeira litologia descrita é de canga laterítica (Figura 11), encontrada na Vila dos Jacarés, ao lado da Br 356 – Rodovia dos Inconfidentes. A canga possui coloração cinza escura a avermelhada e aflora como uma rocha formada por fragmentos de itabirito, sendo descrita como canga conglomerática.

Figura 11 – Afluente do Ribeirão Funil sobre canga conglomerática.



Fonte: Imagem autoral.

Localizada próximo ao Apiário Flores, encontra-se aflorante um quartzo-mica xisto (ou xisto ferruginoso) de coloração arroxeada, granulação fina (Figura 12). É possível caracterizar a presença de quartzo, mica branca e quantidade significativa de óxidos, além de se observar uma xistosidade anastomosada.

Figura 12 - Blocos rolados de xisto ferruginoso próximo ao Apiário Flores, ao longo de afluente do Ribeirão Funil, com presença de xistosidade anastomosada.



Fonte: a) Alice Mendes; b) Líria Barros.

Sustentando a Cachoeira das Margaridas, próximo a comunidade de Botafogo, encontra-se aflorante um xisto ferruginoso de tonalidade cinza escura e granulação fina (Figura 13).

Composto de mica, óxidos e intercalações de veios de quartzo, com xistosidade anastomosada bem marcada, por vezes dobrada.

Figura 13 - Cachoeira das Margaridas, com queda d´água de aproximadamente 10 metros, sobre xisto ferruginoso, com xistosidade anastomosada bem desenvolvida.



Fonte: Imagem autoral.

Localizada próximo à Serra do Botafogo, foi possível fazer a caracterização de uma caverna sustentada por uma rocha de coloração majoritariamente clara, e em algumas porções cinza escura, composta por quartzo e mica branca. Nota-se a presença de bolsões de rocha xistosa e fraturas preenchidas por quartzo. A xistosidade se apresenta de forma bem marcada, sendo caracterizado como um quartzito micáceo (Figura 14).

Figura 14 – Caverna próximo à Serra do Botafogo de dimensões métricas desenvolvida em quartzito.



Fonte: Líria Barros.

Próximo ao SESC, ao lado da Br 356 – Rodovia dos Inconfidentes, aflora um itabirito de tonalidade cinza escura, granulação média, composta por bandas de quartzo e hematita especular, apresentando xistosidade bem marcada e aspecto friável. O maciço apresenta famílias de fraturas em diversas direções (Figura 15).

Figura 15 – Afloramento de itabirito ao lado da Br 356 – Rodovia dos Inconfidentes, com xistosidade bem marcada e consistência friável.



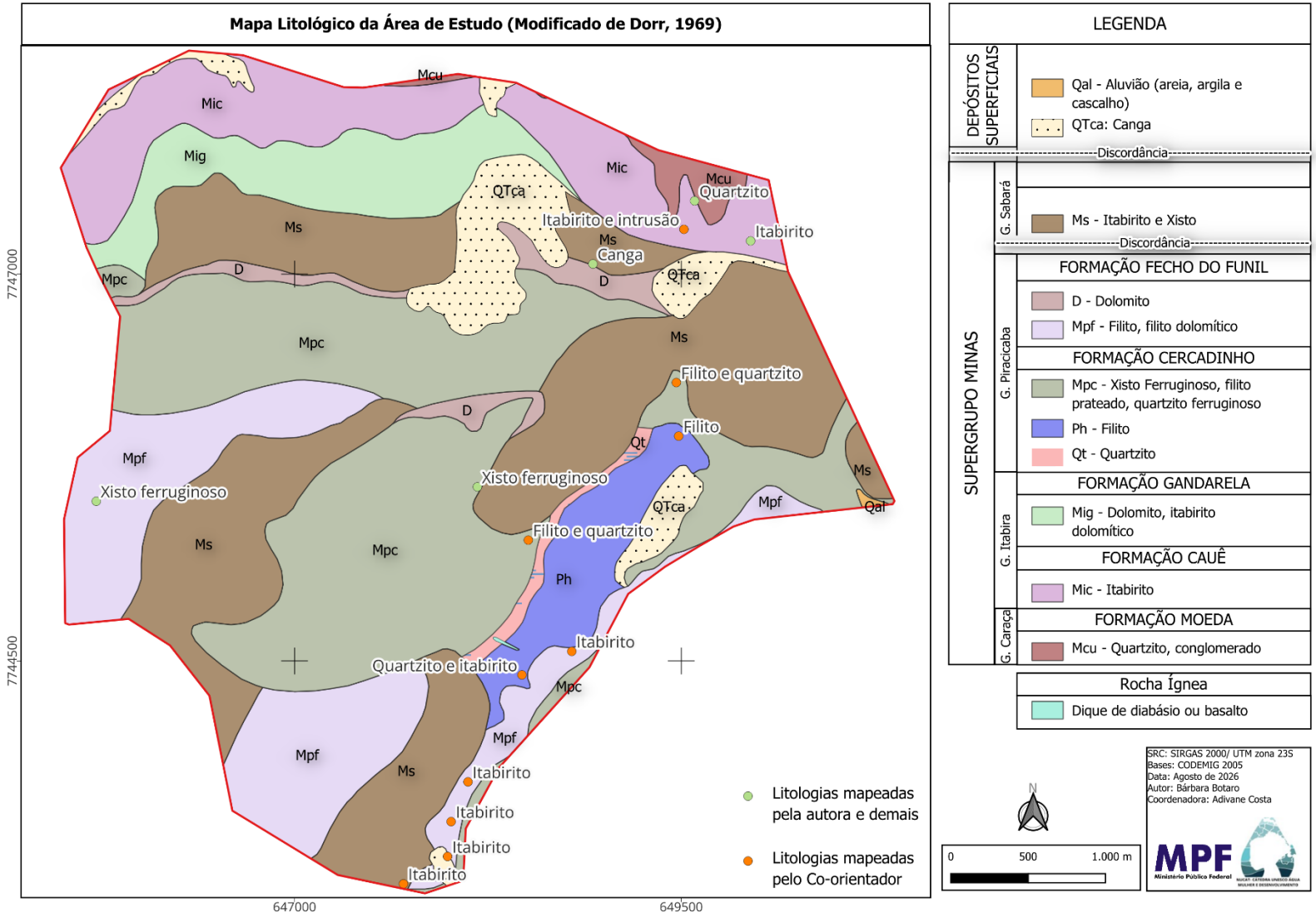
Fonte: Adivane Costa.

Ao unificar as informações coletadas nas visitas de campo feitas pela autora e as do coorientador deste projeto, foi possível notar que em algumas regiões houve concordância de descrições com a base cartográfica, e em outras, divergência. Dessa forma, algumas alterações foram feitas no mapa, no que se refere a escolha da litologia dominante para os polígonos que, pela base cartográfica, apresentavam mais de um tipo de rocha. Optou-se então por definir que:

- A rocha itabirito é a que melhor representa o polígono do Grupo Sabará, visto que aparece com maior frequência na área de estudo.
- A ordem escolhida para representar o polígono da Formação Cercadinho, da rocha de maior abundância para a menor é: o xisto ferruginoso, filito prateado e quartzito ferruginoso, respectivamente.

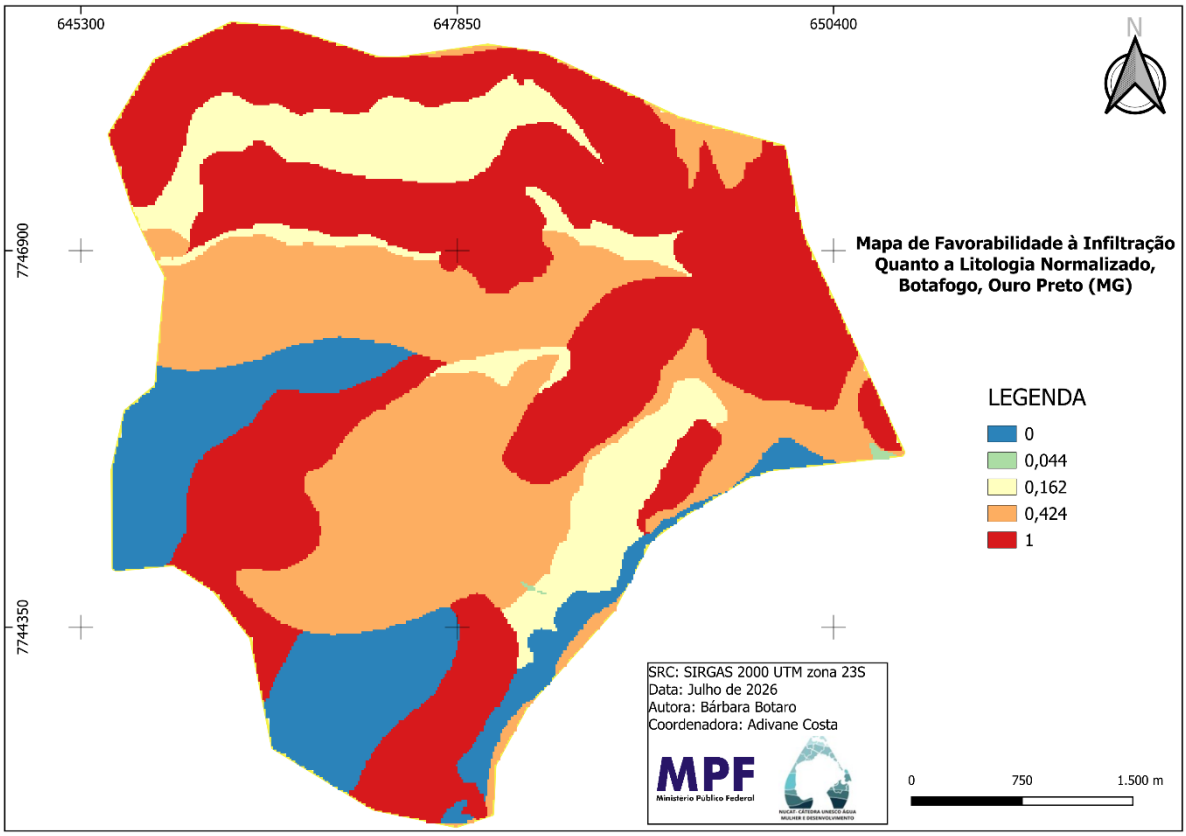
Com as litologias definidas (Figura 16), as classes de rocha receberem seus respectivos pesos, já aqui apresentados, e o mapa foi normalizado, como mostra a Figura 17:

Figura 16 - Mapa litológico da área de estudo, com a indicação dos afloramentos visitados.



Fonte: Elaborado pela autora, modificado de Dorr (1969).

Figura 17 - Mapa de favorabilidade à infiltração quanto a litologia normalizado, com pesos atribuídos.

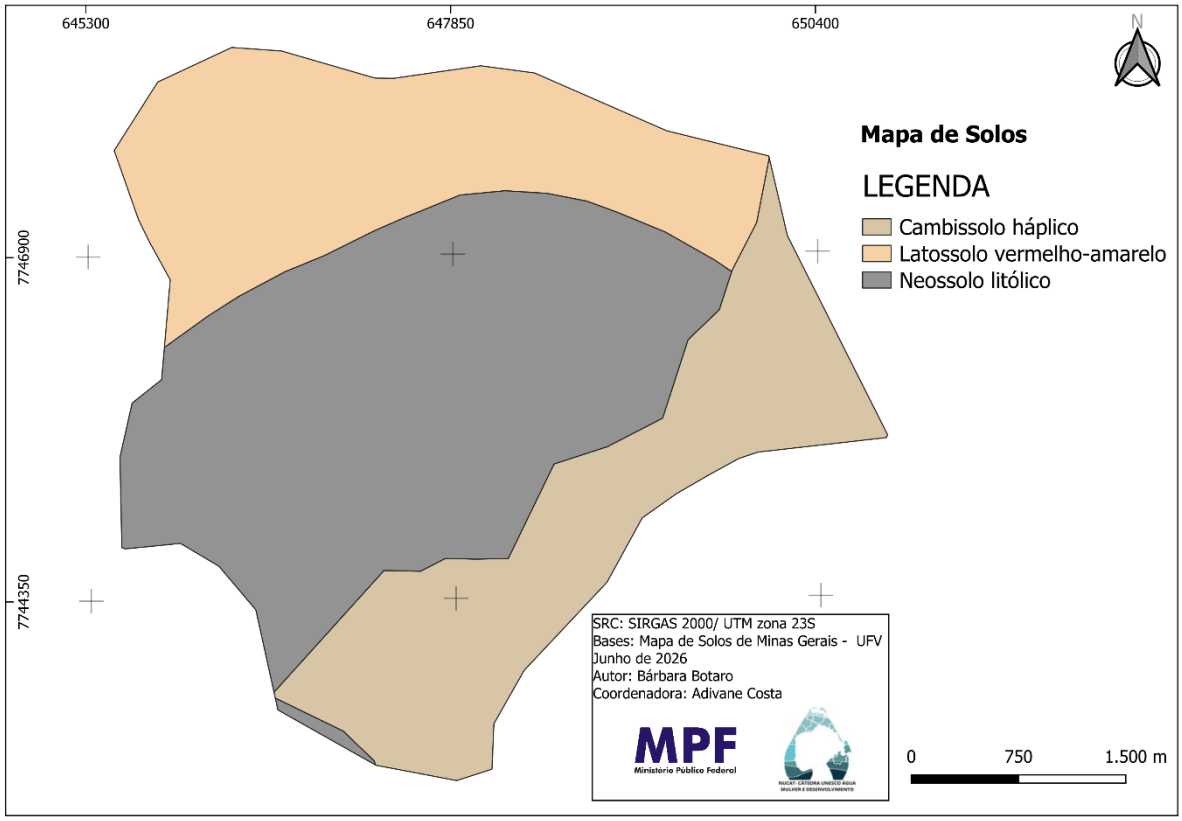


Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 Mapa de Favorabilidade à Infiltração Quanto ao Solo

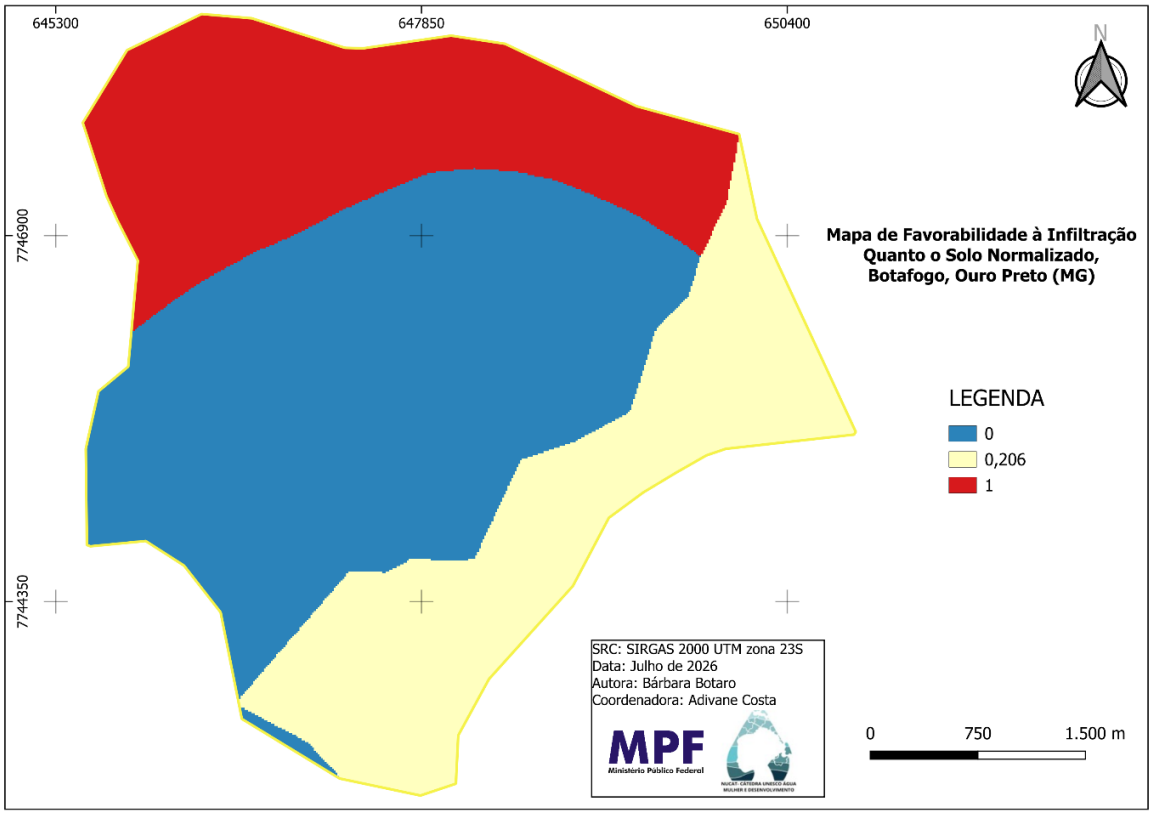
O mapa de solos apresentado na Figura 18 passou por reclassificação de suas classes, e posteriormente foi atribuído o procedimento de normalização, conforme exibido na Figura 19.

Figura 18- Mapa de solos da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

Figura 19 - Mapa de solos normalizado.

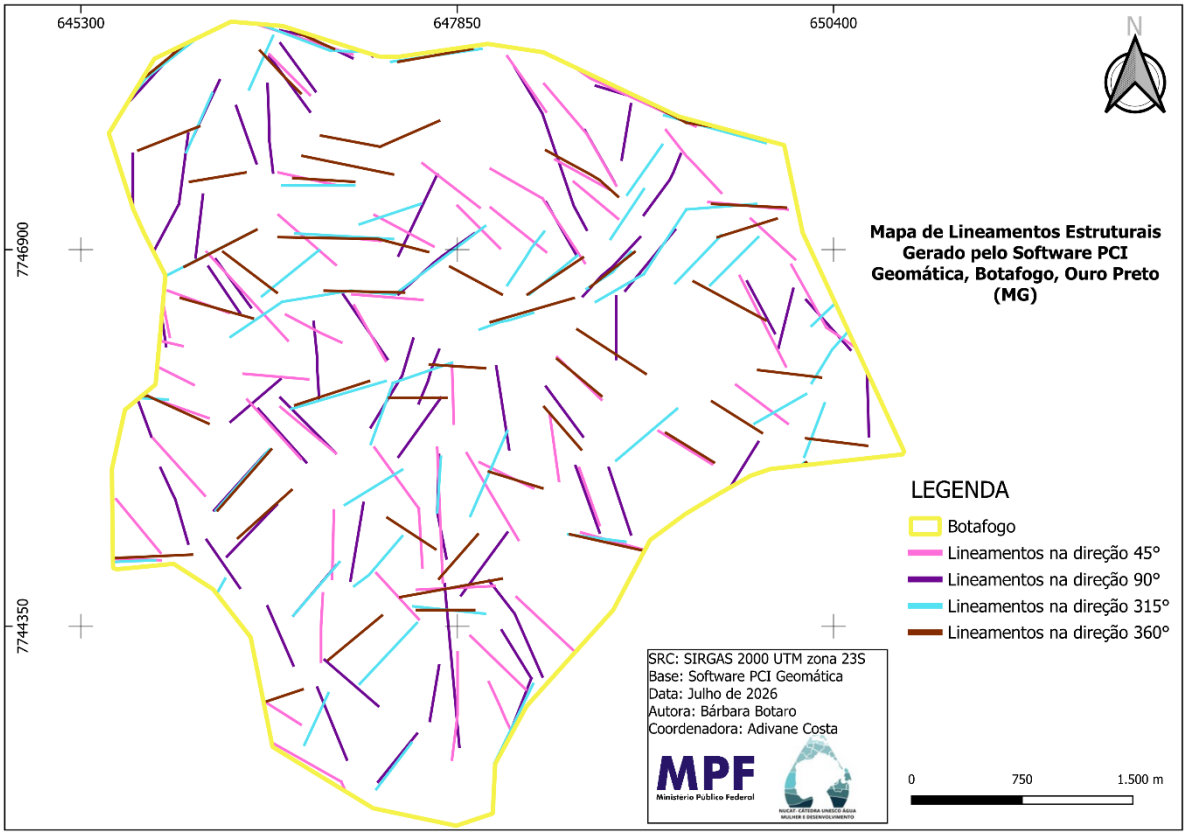


Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

5.3 Mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais

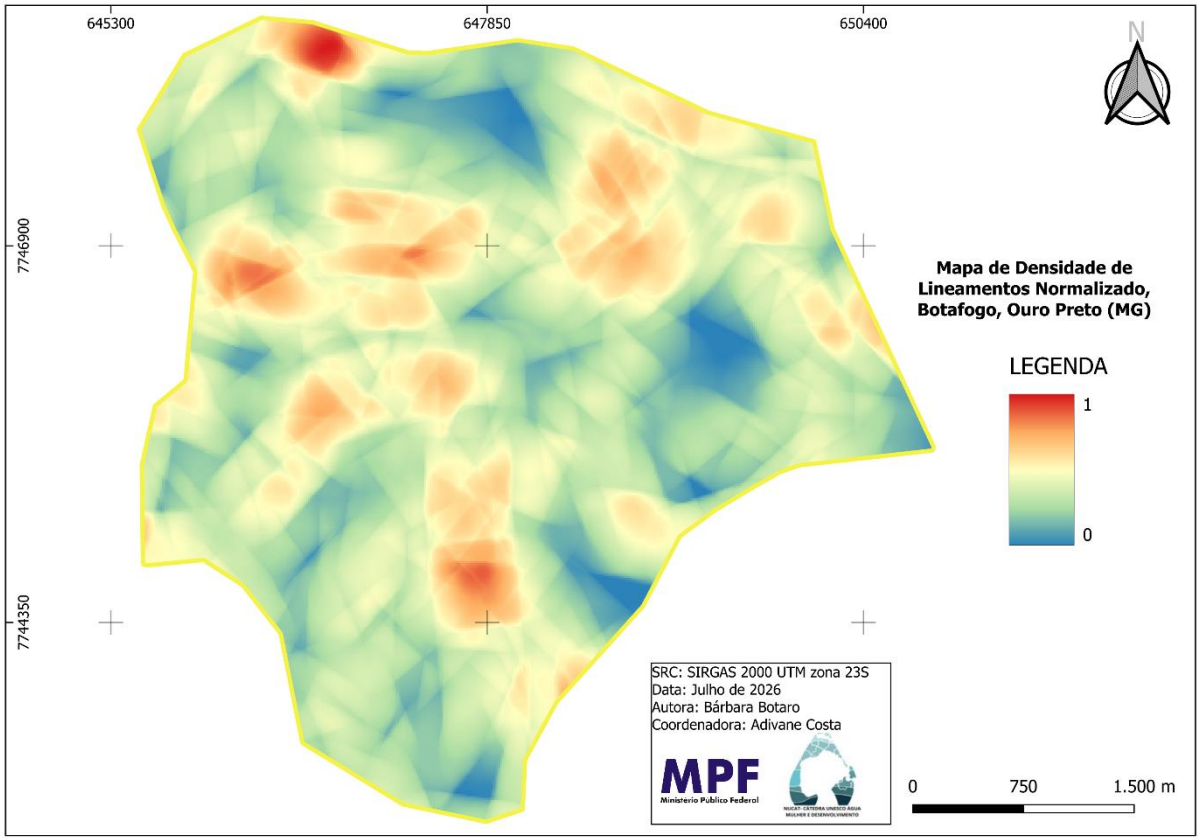
Apresentado na Figura 200, o mapa de lineamentos estruturais gerado pelo software PCI Geomática, com os azimutes de iluminação nas direções 45°, 90°, 315° e 360°. Já na Figura 21 o mesmo mapa após a aplicação da ferramenta “Densidade de Linha” e normalização, respectivamente.

Figura 20 - Mapa de lineamentos estruturais



Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

Figura 21 - Mapa de densidade de lineamentos estruturais normalizado.

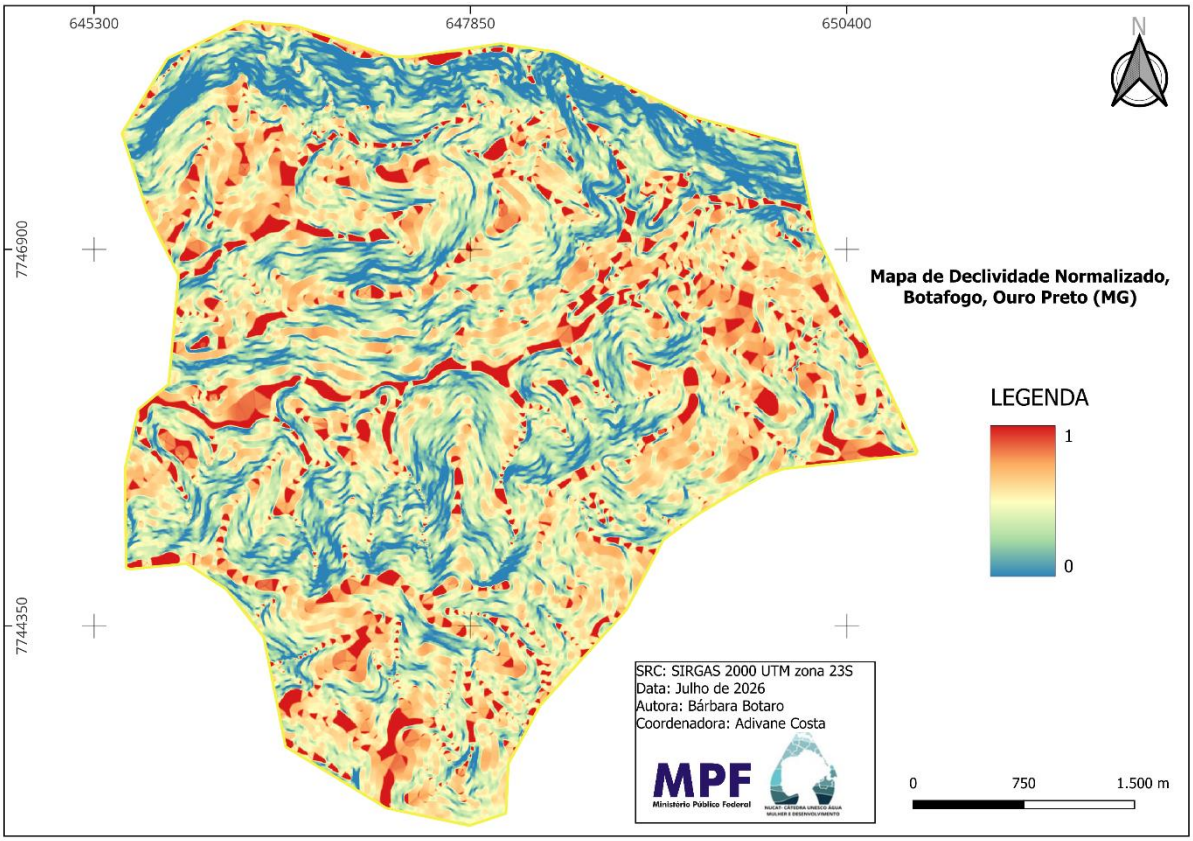


Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

5.4 Mapa de Declividade

Mapa de declividade após passar pelo procedimento de normalização. Neste mapa as cores quentes, que recebem os maiores valores, assumem região de baixa declividade e as cores frias, que recebem valores baixos, evidenciam regiões íngremes (Figura 22).

Figura 22 - Mapa de declividade normalizado.

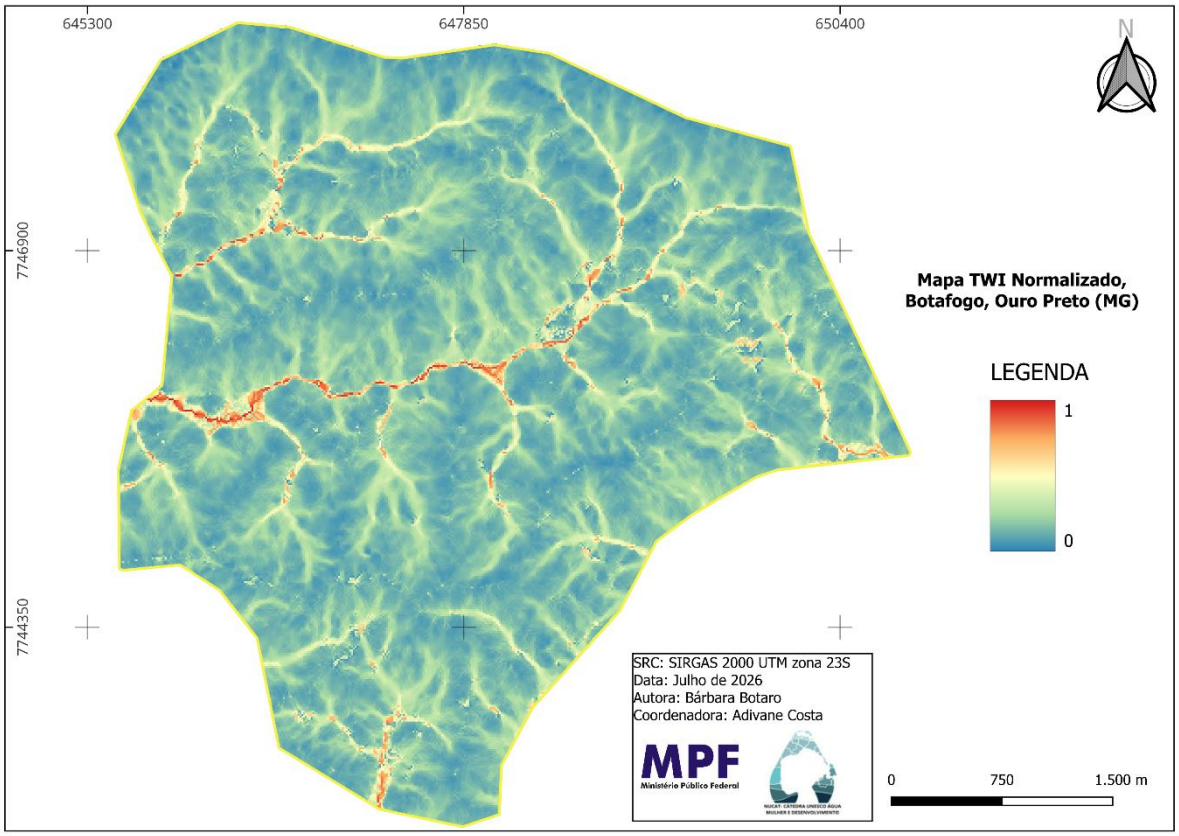


Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

5.5 Mapa TWI

Mapa do Índice Topográfico de Umidade normalizado. As cores quentes representam regiões com maior potencial de acúmulo de umidade enquanto cores frias baixo potencial de acúmulo de água de acordo com as características topográficas (Figura 23).

Figura 23 - Mapa TWI normalizado.

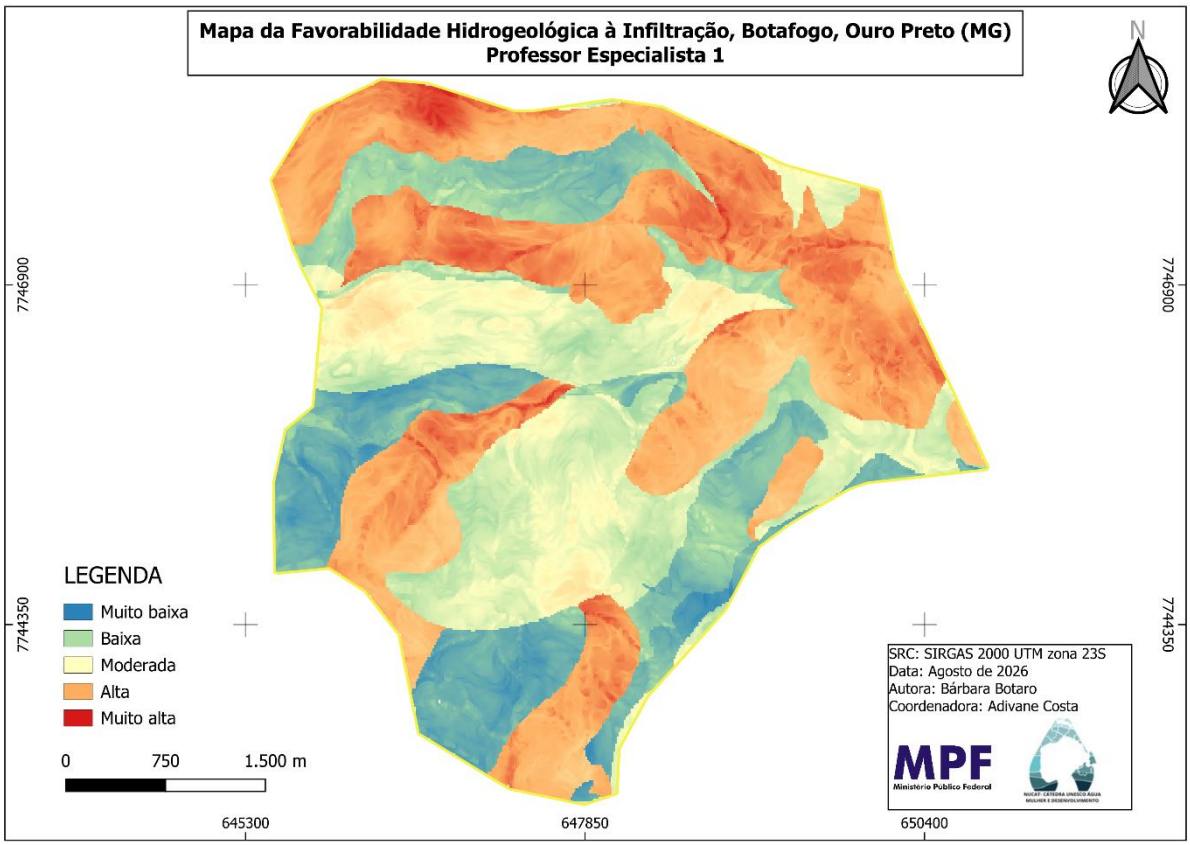


Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

5.6 Resultado da Análise Multicritério

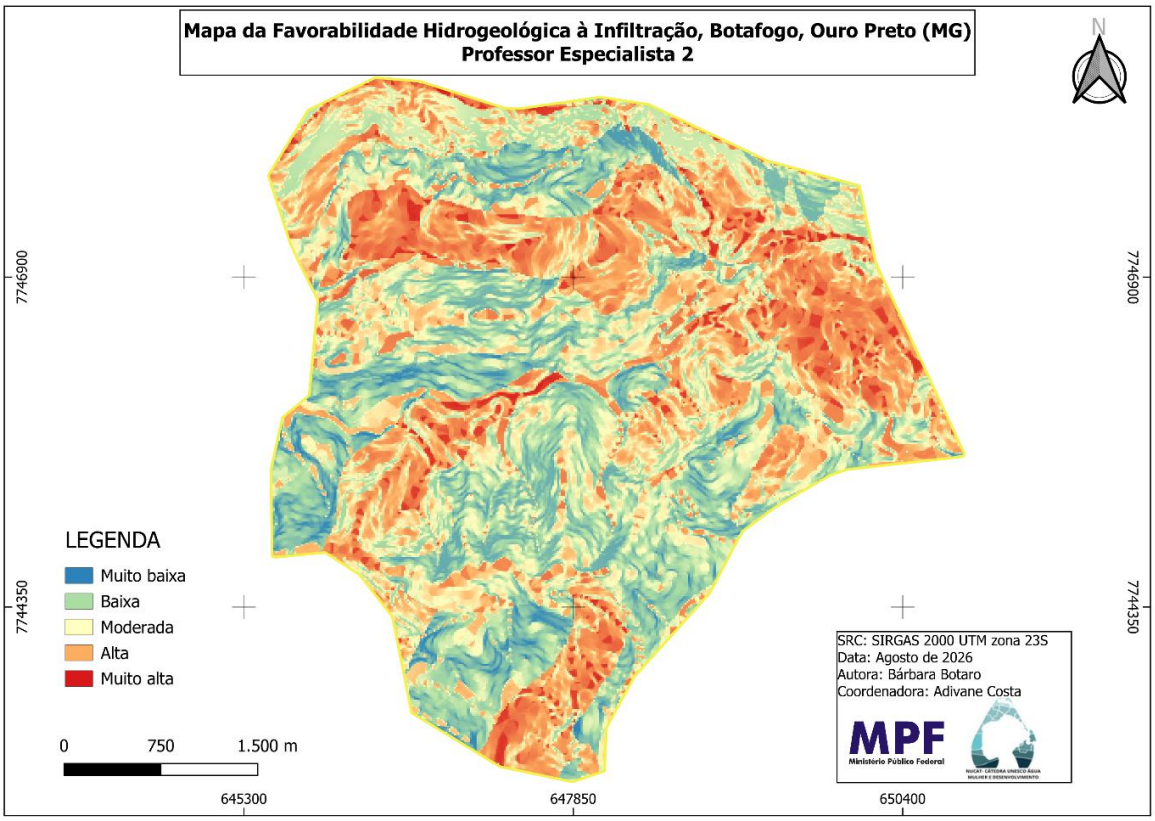
Tem-se como produto três mapas de favorabilidade hidrogeológica à infiltração (Figuras 24, 25 e 26) para a localidade de Botafogo, confeccionados com base no julgamento de dos especialistas, sobre a importância relativa dos seguintes critérios: i) litologia; ii) densidade de lineamentos estruturais; iii) declividade; iv) índice topográfico de umidade (TWI); e v) mapa de solos:

Figura 24 - Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração (Professor especialista 1)



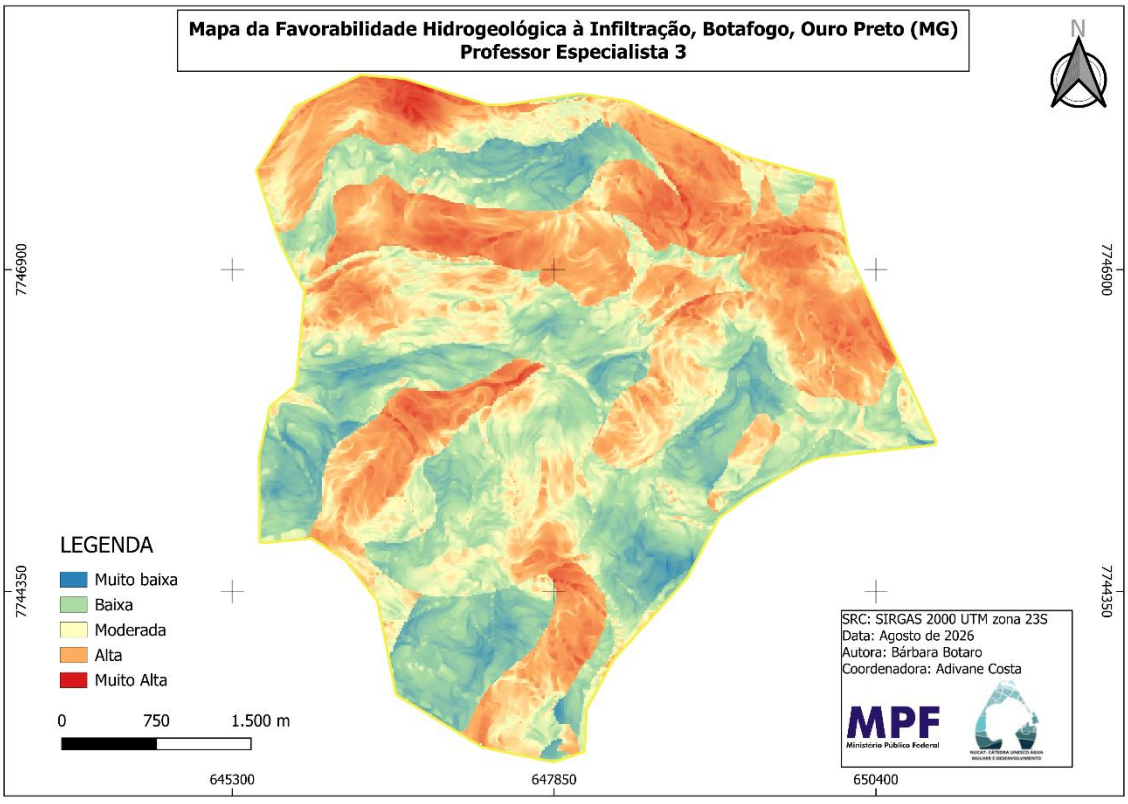
Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

Figura 25 - Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração (Professor especialista 2)



Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

Figura 26 - Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração (Professor especialista 3)



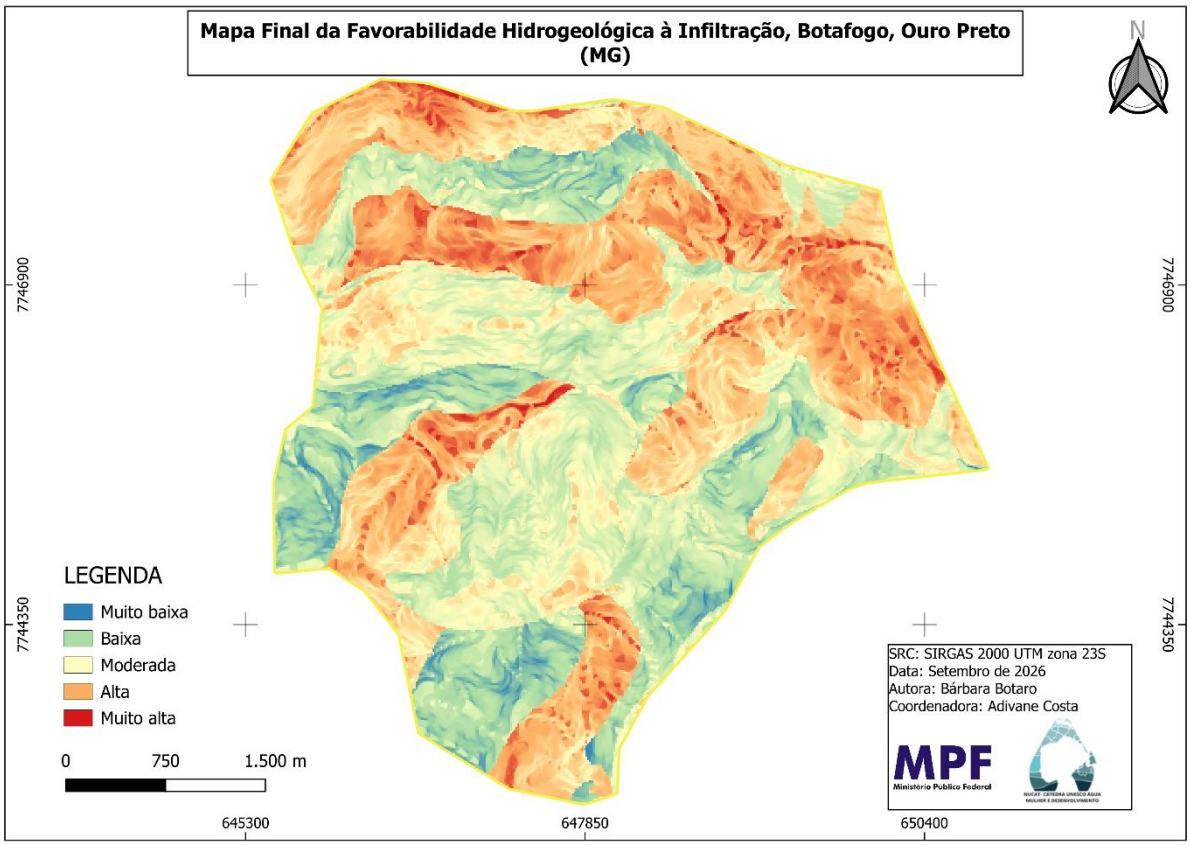
Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

Os três mapas revelam aspectos diferentes, pois são baseados na importância relativa dos critérios processados. Durante as pesquisas, foi possível observar que mesmo sendo da mesma área, os especialistas apresentavam contribuições distintas sobre os fatores que favorecem a infiltração de água. Inicialmente todos concordaram que o solo é um fator fundamental para a permeabilidade, porém, como a base cartográfica escolhida era regional, deveria o menor peso. Para o professor especialista 1, o tipo de rocha é o fator mais favorável hidrogeologicamente, e não fica distante dos lineamentos estruturais uma vez que a compactação das rochas pelo metamorfismo, que é presente em todo o Quadrilátero Ferrífero (Alkmim e Marshak, 1998) pode inviabilizar a percolação de água. Porém o fraturamento marcante, presente nas rochas da região, que pôde ser delineado pela ferramenta do software PCI Geomática, marca um terreno fraturado, evidenciando que a percolação de água acontece por meio dessas estruturas rúpteis. Por fim o critério de declividade e TWI recebem importâncias parecidas. Já para o professor especialista 2 a declividade do terreno recebe o maior peso em relação à infiltração, defendendo que em terrenos íngremes acontece o escoamento superficial. Explica ainda que, mesmo a base cartográfica de solos sendo regional, ocasionando perda de informação, pode-se fazer uma associação direta do solo com a declividade, uma vez que em terrenos íngremes, não há formação significativa de camada de alteração da rocha. Julga, portanto, o critério de litologia como segundo mais favorável, seguido das estruturas e o índice topográfico de umidade. Por fim o especialista 3 entende que as estruturas tem um papel primordial na infiltração de água no solo, na região de Botafogo, seguido da litologia, que também se comporta como um critério importante, controlando as regiões altas e baixas, e dessa forma recebe um peso um pouco maior que a declividade. Assim, o TWI e solo recebendo os menores valores.

Desta forma, é possível notar que mesmo com diferenças nos pesos dos critérios, há um padrão de áreas semelhantes que são favoráveis à dinâmica hidrogeológica de infiltração de água, sendo elas as regiões a norte e nordeste da porção superior, bem como algumas regiões a sul e sudoeste da área de estudo.

Sendo assim, afim de obter uma visão conjunta e reduzir a dependência de um único resultado foi feita a união desses três mapas, apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Mapa Final da Favorabilidade Hidrogeológica à Infiltração, Botafogo, Ouro Preto (MG)

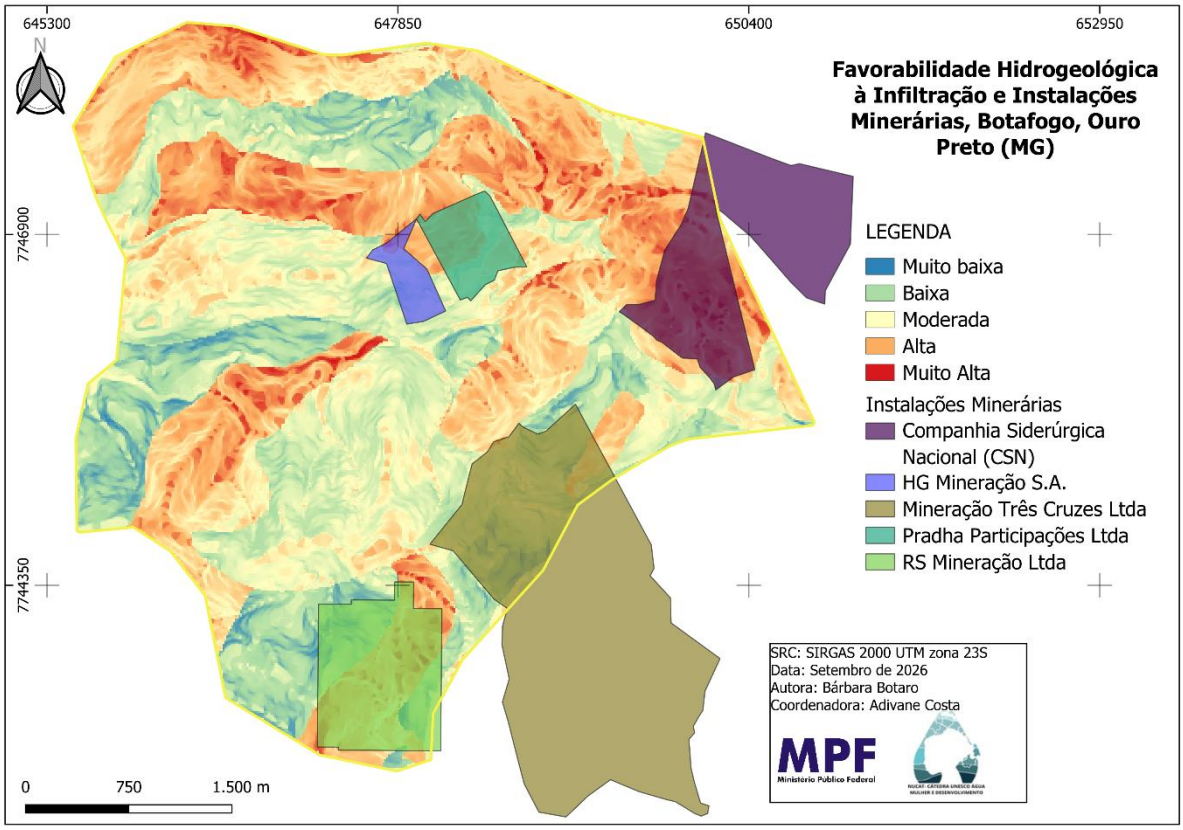


Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

5.7 Perigo em Relação ao Comprometimento Hidrogeológico

Com a finalidade de se fazer uma análise sobre a relação das instalações de empresas minerárias e as regiões de infiltração hídrica, as *shapefiles* dos processos minerários com Concessão de Lavra ativa na região de Botafogo foram baixadas no site da ANM (Sigmine) e colocadas sobre o mapa final de favorabilidade hidrogeológica à infiltração gerado (Figura 28).

Figura 28 - Análise sobre a relação das instalações minerárias e as regiões favoráveis à infiltração hídrica subterrânea.



Fonte: Elaborado pela autora, no QGIS.

Pode-se observar uma clara superposição entre os locais das instalações das empresas Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), HG Mineração S.A., Pradha Participações Ltda. e RS Mineração Ltda., que tem como o mineral minério de interesse o Ferro (Fe), e as áreas de maior favorabilidade hidrogeológica à infiltração. Essa coincidência não se deve ao acaso, já que além de outros fatores, as rochas itabiríticas que são alvo de exploração dos empreendimentos minerários, são responsáveis pela melhor qualidade, armazenamento e abastecimento dos corpos hídricos subterrâneos. Portanto, as características físicas e químicas descritas para o itabirito no Quadrilátero Ferrífero (Mourão, 2008) conduz ao conceito de tratar o QFe como Quadrilátero Aquífero-Ferrífero, corroborando Rodrigues (2024) e Costa et al. (2025).

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu a elaboração de mapas de favorabilidade hidrogeológica à infiltração para a localidade de Botafogo por meio da integração, em ambiente SIG, dos seguintes critérios: i) litologia; ii) densidade de lineamentos estruturais; iii) declividade; iv) índice topográfico de umidade (TWI); e v) mapa de solos. A aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP) demonstrou que a atribuição dos pesos influencia diretamente o resultado

final, produzindo diferentes cenários de favorabilidade conforme a interpretação dos especialistas consultados.

As campanhas de campo foram fundamentais para validar as informações obtidas a partir das bases cartográficas, permitindo reconhecer as principais litologias aflorantes e compreender melhor o comportamento hidrogeológico da área de estudo. Além disso, a utilização de três especialistas para a atribuição dos pesos aos critérios possibilitou avaliar que, embora tenha ocorrido diferenças na importância relativa atribuída aos critérios, os cenários finais apresentaram comportamento espacial semelhante, conferindo maior confiabilidade ao modelo elaborado.

Foi possível também notar que as instalações das mineradoras na área de estudo, tendem a se concentrar sobre áreas de maior favorabilidade à infiltração d'água, uma vez que o sistema hidroferruginoso, constituído por cangas e rochas itabiríticas, alvo das mineradoras, são responsáveis pela melhor qualidade, armazenamento e abastecimento dos corpos hídricos. Verificou-se que a análise multicritério constitui uma ferramenta eficiente na identificação de áreas com potencial para infiltração hídrica, representando um importante subsídio para estudos hidrogeológicos e para o planejamento territorial da região e do QFe, contribuindo para a gestão e a conservação dos recursos hídricos em áreas submetidas à crescente pressão da atividade minerária.

Nesse contexto, os produtos cartográficos desenvolvidos neste trabalho constituem também uma importante ferramenta de apoio ao planejamento territorial e ambiental, podendo subsidiar órgãos públicos, empresas e comunidades na tomada de decisão quanto ao uso e ocupação do território. Os mapas também podem contribuir para a definição de áreas prioritárias para conservação, monitoramento e estudos hidrogeológicos mais detalhados.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros incorporem novos critérios ao modelo, como dados hidrogeológicos de poços, informações geofísicas, espessura do manto de alteração, parâmetros climáticos e séries históricas de precipitação, além da validação dos resultados por meio de testes de campo e monitoramento hidrogeológico. Essas informações poderão reduzir as incertezas inerentes à análise multicritério e aperfeiçoar o modelo de, tornando-o ainda mais representativo das condições naturais da região.

7 REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, Amsterdam, v. 90, p. 29–58, 1998.

ALKMIM, F. F.; TEIXEIRA, W. The Paleoproterozoic Mineiro Belt and the Quadrilátero Ferrífero. In: TEIXEIRA, W. et al. (ed.). *São Francisco Craton, Eastern Brazil: tectonic genealogy of a miniature continent*. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 71–94.

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 7, n. 4, p. 349–364, 1977.

ALMEIDA, L. G. *Estratigrafia e geologia estrutural da porção central do Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais*. 2004. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

AMARO, M. A. P.; REDINI, L. L. S. A Capela de Santo Amaro de Botafogo: reminiscência de um povoado. In: SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO ARQUITETURA E DOCUMENTAÇÃO, 4., 2015, Belo Horizonte. *Anais [...]*. Belo Horizonte, 2015.

BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, Amsterdam, v. 32, p. 471–499, 2007.

BARELLA, C. F. *Abordagens estatísticas aplicadas ao mapeamento de susceptibilidade a movimentos de massa: análise de diferentes técnicas no contexto do Quadrilátero Ferrífero*. 2016. 253 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

BEATO, D. A. C.; MONSORES, A. L. M.; BERTACHINI, A. C. Hidrogeologia. In: PROJETO APA SUL RMBH. *Estudos do meio físico: Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte*. Belo Horizonte: CPRM; SEMAD; CEMIG, 2005. v. 9, parte A.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. *Manual de irrigação*. 8. ed. atual. e ampl. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006.

BRITO, T. P. *Análise geofísica para a prospecção de água nas proximidades de Itabirito (MG)*. 2016. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

BRITO, T. P. *Avaliação do potencial hídrico de aquíferos fissurais dos complexos Bação e Bonfim Setentrional, Quadrilátero Ferrífero – MG*. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CARNEIRO, B. L. *A comunidade do Botafogo, Ouro Preto e a Capela de Santo Amaro: relações simbólicas e medidas de proteção*. 2020. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso

Superior de Tecnologia em Conservação e Restauro) – Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

CARRERA-HERNÁNDEZ, J. J.; SMERDON, B. D.; MENDOZA, C. A. Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *Journal of Hydrology*, v. 452–453, p. 90–101, 2012.

CHEMALE JUNIOR, F.; ROSIÈRE, C. A.; ENDO, I. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero: um modelo. *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 104–127, 1991.

CHEMALE JUNIOR, F.; ROSIÈRE, C. A.; ENDO, I. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, Amsterdam, v. 65, p. 25–54, 1994.

CLEARY, R. W. Águas subterrâneas. In: RAMOS, F. et al. *Engenharia hidrológica*. Rio de Janeiro: ABRH; Editora UFRJ, 1989. v. 2, p. 293–404.

COSTA, A. T.; BOTARO, B. M. P.; CORDEIRO, D. C.; NASCIMENTO, D. H.; BARCELEIRO, G. G.; RIBEIRO, K. D. *Relatório Pesquisa Botafogo – Ouro Preto (MG)*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geologia, 2024.

COSTA, A. T.; SANTOS, A. M.; BOTARO, B. M. P.; BOSZE, H. A.; CARMO, I. S. C.; CUNHA, L. M. B. R.; BARROS, L.; FERREIRA, L. A.; SILVA, N. A.; ABREU, V. E.; FRANÇA, V. R.; CAMPOS, W. G. *Patrimônio hídrico da Serra de Botafogo: aquíferos ameaçados pela expansão da mineração*. Ouro Preto: Cátedra UNESCO Água, Mulher e Desenvolvimento, 2025.

DIAS, J. C. S. *Avaliação da dinâmica de infiltração e caracterização das cangas de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. 131 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

DORR II, J. V. N. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1969. (Geological Survey Professional Paper, 641-A).

ENDO, I.; OLIVEIRA, A. H.; PERES, G. G.; GUIMARÃES, M. L. V.; LAGOEIRO, L. E.; MACHADO, R.; ZAVAGLIA, G.; ROSAS, C. F.; MELO, R. J. Nappe Curral: uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 10.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECTONICS, 4., 2005, Curitiba. *Boletim de resumos expandidos*. Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, 2005. p. 279–281.

ENDO, I.; MACHADO, R.; GALBIATTI, H. F.; ROSSI, D. Q.; ZAPPAROLI, A. C.; DELGADO, C. E. R.; CASTRO, P. T. A.; OLIVEIRA, M. M. F. de. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: CASTRO, P. T. A.; ENDO, I.; GANDINI, A. L. (org.). Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Belo Horizonte: 3i Editora, 2020. p. 70–113.

FEITOSA, F. A. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: LABHID, 2008. 812 p. ISBN 978-85-7499-061-3

FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*. 4. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*. 4. ed. Harlow: Pearson, 2014.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.

FREITAS, A. L. P.; MARINS, C. S.; SOUZA, D. O. A metodologia multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, Bauru, p. 51–60, 2006.

GEOCONCEIÇÃO. Lençol freático. GeoConceição, 2014. Disponível em: https://geoconceicao.blogspot.com/2014/05/lencol-freatico.html.

HENRIKSEN, H. Relation between topography and well yield in boreholes in crystalline rocks, Sogn og Fjordane, Norway. *Ground Water*, v. 33, n. 4, p. 635–643, 1995.

HILLEL, D. 2004. Introduction to Environmental Soil Physics, (4ed). California, Elsevier Academic Press. 484p

LADEIRA, A. E.; VIVEIROS, J. F. M. *Hipótese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base nos dados disponíveis*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Minas Gerais, 1984. (Boletim, n. 4).

LOPES, E. R. N.; LOURENÇO, R. W.; REUSS-STRENZEL, G. M. Análise multicriterial aplicada à elaboração de zoneamento de unidade de conservação na zona costeira da Bahia, Brasil. *Ra'e Ga: O Espaço Geográfico em Análise*, Curitiba, v. 37, p. 65–90, 2016. DOI: 10.5380/raega.v37i0.40662.

MALCZEWSKI, J. *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1999.

MOURÃO, M. A. *Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. 2007. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MYR PROJETOS SUSTENTÁVEIS. *Produto 3: estudos hidrológicos e hidrogeológicos da bacia do rio Itabirito e dos cenários de outorgas de recursos hídricos*. Belo Horizonte: MYR Projetos Sustentáveis, 2013. Disponível em: [documento do CBH Rio das Velhas].

OLIVEIRA, N. C. M. et al. Aplicação do método AHP para confecção de modelo de favorabilidade hídrica subterrânea de aquíferos fraturados. *Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 90–102, 2020.

PETRI, S.; COIMBRA, A. M.; AMARAL, G.; OJEDA Y OJEDA, H.; FÚLFARO, V. J.; PONÇANO, W. L. Código Brasileiro de Nomenclatura Estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 370–415, 1986.

PIRES, R. S. C. *Metodologias para cálculo de reservas de água subterrânea: estudo de caso da bacia hidrográfica do entorno da represa de Três Marias – MG*. 2014. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geociências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2014.

POMPERMAYER, R. S.; PAULA JÚNIOR, D. R.; CORDEIRO NETTO, O. M. Análise multicritério como instrumento de gestão de recursos hídricos: o caso das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 117–127, jul./set. 2007.

RAMOS, M. L. S.; CORDEIRO, V. F.; FERNANDES, R. A. Histórico e arcabouço hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. In: CASTRO, P. T. A.; ENDO, I.; GANDINI, A. L. (org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte: 3i Editora, 2020. p. 380–413.

REBOUÇAS, A. C. Sistema Aquífero Botucatu no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8., 1994, Recife. *Anais [...]*. Recife: ABAS; DNPM; CPRM, 1994.

ROCHA, G. *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000: nota explicativa*. São Paulo: DAEE; Instituto Geológico; IPT; CPRM, 2005.

RODRIGUEZ, C. C. *Métodos multicritério discretos*. Huelva: Universidad de Huelva, 2004.

RODRIGUES, C. H. P. *Análise expedita dos cenários hidroambientais relativos aos projetos de mineração de ferro na região da Comunidade de Botafogo, município de Ouro Preto (MG)*. 2024. Relatório técnico.

SAATY, T. L. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980.

SANTOS, A. R. *Estudos sobre a tectônica de fraturamento na região do Quadrilátero Ferrífero e em partes do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais, com base em sensoriamento remoto*. 1986. 172 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

SILVA, C. R. *Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro*. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

SILVA, J. T. G. *Highway corridor selection using Geographic Information Systems: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil*. 1993. Tese (Doutorado) – Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 1993.

SILVA, S. P. A. *Mapeamento para conservação e recuperação de água e solo: subsídio para o Plano Municipal da Mata Atlântica de Ouro Preto*. 2025. 44 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

VARAJÃO, C. A. C. 1991. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Revista Brasileira de Geociências. 21(2):138-145.