

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia

Igo de Souza Tavares

**HIDROGEOLOGIA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS DO SINCLINAL DOM BOSCO,
QUADRILÁTERO FERRÍFERO - BRASIL**

Belo Horizonte
2025

Igo de Souza Tavares

**HIDROGEOLOGIA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS DO SINCLINAL DOM BOSCO,
QUADRILÁTERO FERRÍFERO - BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula

Co-Orientador: Prof. Dr. Jorge Geraldo Roncato Júnior

Belo Horizonte
2025

T231h
2025

Tavares, Igo de Souza.

Hidrogeologia dos sistemas aquíferos do Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Brasil [manuscrito] / Igo de Souza Tavares. – 2025.

107 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Co-Orientador: Jorge Geraldo Roncato Júnior.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2025.

Bibliografia: f. 82-94.

Inclui apêndices.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Aquíferos – Minas Gerais – Teses. 3. Hidrodinâmica – Teses. 4. Balanço hidrológico – Teses. 5. Águas subterrâneas – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Roncato, Jorge. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 556.3(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC/UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

**Hidrogeologia dos Sistemas Aquíferos do Sinclinal Dom Bosco,
Quadrilátero Ferrífero - Brasil**

IGO DE SOUZA TAVARES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA (PPGeol), do Instituto de Geociências (IGC), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), como **REQUISITO PARCIAL** para obtenção do grau de Mestre(a) em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do IGC/UFMG.

Aprovada em 19 de setembro de 2025, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador(a)
PPGeol/UFMG

Prof(a). Dr(a). Paulo Henrique Ferreira Galvão
PPGeol/UFMG

Prof(a). Dr(a). Maria Giovana Parizzi
PPGeol/UFMG

Prof(a). Dr(a). Julian Cardoso Eleutério
EE/UFMG

Belo Horizonte, 19 de setembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha mais sincera gratidão ao meu orientador, Rodrigo, pela paciência, confiança e dedicação em todos os momentos desta jornada. Sua postura sempre compreensiva diante dos desafios metodológicos e pessoais foi essencial para que eu pudesse avançar com segurança. Sua busca incansável pela excelência acadêmica serviu como exemplo e inspiração, contribuindo para que este trabalho atingisse um alto nível técnico. Estendo também meus agradecimentos ao meu coorientador, Roncato, cujo suporte metodológico e sensibilidade na interpretação geológica da área de estudo foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço profundamente à Universidade Federal de Minas Gerais, em especial à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, pela oportunidade de crescimento e pelo ambiente acadêmico fértil que possibilitou a concretização deste trabalho. Levo comigo a convicção de que as universidades públicas são pilares indispensáveis para o avanço científico do país, e me orgulho de ter feito parte desta instituição.

Registro também minha gratidão às instituições que colaboraram direta ou indiretamente com este estudo, em especial ao IGAM e à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. Reconheço igualmente a contribuição da Bentley, pelo fornecimento das ferramentas que tornaram possível a execução técnica desta pesquisa.

À minha esposa, Aline, deixo o agradecimento mais especial. Sua presença foi meu alicerce em todos os momentos, do início ao fim desta caminhada. Ela abriu mão de lazer, viagens e de tantos instantes pessoais para estar ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e me lembrando, em cada passo, da importância de persistir. Mais do que companheira, foi parceira de jornada, encorajando-me nos dias difíceis, celebrando comigo cada pequena vitória e me inspirando a ser uma pessoa e um profissional melhor. Este trabalho é também fruto da sua dedicação e amor, e por isso dedico a você, Aline, parte significativa desta conquista.

Agradeço ainda aos meus pais, Murilo e Edmar, que desde sempre colocaram a educação como prioridade em nossa família. Foi o esforço de vocês que pavimentou o caminho até aqui, e sem esse exemplo e incentivo, certamente este momento não seria possível.

Por fim, deixo meu reconhecimento a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que esta dissertação se tornasse realidade. Cada palavra escrita carrega um pouco da força, apoio e generosidade que recebi ao longo desta trajetória.

RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, é uma província de alta relevância histórica e geológica, marcada pela mineração de ouro e ferro e por sua importância hídrica, com contribuição para o abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Inserido nesse contexto, o Sinclinal Dom Bosco, situado na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, permanece relativamente pouco caracterizado do ponto de vista hidrogeológico, apesar de abastecer diretamente centros históricos como Ouro Preto e Mariana. Esta dissertação caracteriza hidrogeologicamente o Sinclinal Dom Bosco por meio da combinação entre a avaliação hidrodinâmica, balanço hídrico espacializado e integração em modelo tridimensional dos sistemas aquíferos, com o propósito de oferecer um quadro consistente de disponibilidade e dinâmica da água subterrânea para suporte à gestão. A abordagem reuniu uma compilação crítica de dados de poços e ensaios, interpretação de testes para estimar os parâmetros e definição das unidades hidroestratigráficas, construção da superfície potenciométrica e apresentação tridimensional, além da equalização do balanço hídrico através de sistemas de informações geográficas, interpolando informações de precipitação, evapotranspiração real e fatores moduladores de recarga. A recarga potencial, agregada por unidade hidroestratigráfica, organiza-se de modo a confirmar a proeminência do Aquífero Cauê ($\approx 33,5\%$) e o papel complementar dos Aquíferos Gandarela ($\approx 25,7\%$) e Moeda ($\approx 23,0\%$), com Itacolomi ($\approx 13,5\%$) e Sabará/Piracicaba ($\approx 12,2\%$) em patamares inferiores, compondo uma hierarquia que orienta decisões de alocação e proteção de zonas de maior índice de recarga. Na avaliação hidrodinâmica, o Aquífero Cauê exibe transmissividade da ordem de 10^{-3} m²/s em poços representativos da porção central do Sinclinal Dom Bosco, explicando sua atratividade operacional e, simultaneamente, a necessidade de atenção a pressões localizadas de bombeamento concentrados nesta unidade. A integração dos produtos cartográficos e dos parâmetros em um modelo tridimensional dos sistemas aquíferos permitiu relacionar o arcabouço estrutural às tendências de escoamento e aos domínios de recarga/descarga, consolidando uma representação coerente da área avaliada.

Palavras-chave: avaliação hidrodinâmica; balanço hídrico; recarga; unidades hidroestratigráficas; água subterrânea.

ABSTRACT

The Iron Quadrangle (Minas Gerais, Brazil) is a province of high historical and geological significance, shaped by gold and iron mining and by its hydrological importance in supplying the Belo Horizonte Metropolitan Region. Within this context, the Dom Bosco Syncline, located in the southwestern Iron Quadrangle, remains relatively undercharacterized from a hydrogeological standpoint despite directly supplying historic centers such as Ouro Preto and Mariana. This dissertation presents a hydrogeological characterization of the Dom Bosco Syncline by combining a hydraulic assessment, a GIS-based spatially distributed water balance, and integration into a three-dimensional aquifer-system model, with the purpose of providing a consistent picture of groundwater availability and dynamics to support management. The approach involved a critical compilation of well and test data, interpretation of pumping tests to estimate parameters and define hydrostratigraphic units, construction of the potentiometric surface and three-dimensional rendering, and water-balance closure using geographic information systems by interpolating precipitation, actual evapotranspiration, and recharge-modulating factors. Potential recharge aggregated by hydrostratigraphic unit confirms the prominence of the Cauê Aquifer ($\approx 33.5\%$) and the complementary roles of the Gandarela ($\approx 25.7\%$) and Moeda ($\approx 23.0\%$) aquifers, with Itacolomi ($\approx 13.5\%$) and Sabará/Piracicaba ($\approx 12.2\%$) at lower levels, establishing a hierarchy that guides allocation decisions and the protection of zones with higher recharge indices. In the hydraulic assessment, the Cauê Aquifer exhibits transmissivity on the order of $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ in representative wells from the central portion of the syncline, which explains its operational appeal while underscoring the need to monitor localized pumping stresses concentrated in this unit. The integration of cartographic products and parameters into a three-dimensional aquifer-system model relates the structural framework to flow tendencies and to recharge and discharge domains, consolidating a coherent representation of the study area.

Keywords: hydraulic assessment; water balance; recharge; hydrostratigraphic units; groundwater.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Apresentação	7
1.2 Relevância	8
1.3 Objetivo	9
1.4 Estrutura da dissertação	10
2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	12
2.1 Localização	12
2.2 Clima	12
2.3 Hidrografia	13
2.4 Geomorfologia.....	14
2.5 Pedologia	15
2.6 Geologia	17
2.6.1 Complexos Metamórficos	19
2.6.2 Supergrupo Rio Das Velhas	19
2.6.3 Supergrupo Minas	20
2.6.4 Supergrupo Estrada Real	22
2.6.5 Unidades sedimentares	22
2.7 Hidrogeologia	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1 Unidades hidroestratigráficas	28
3.2 Propriedades hidrodinâmicas.....	29
3.3 Fluxo subterrâneo	33
3.4 Balanço hídrico.....	35
4 MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1 Banco de dados e consistência dos dados básicos.....	38
4.2 Avaliação hidrodinâmica.....	41
4.2.1 Definição das unidades hidroestratigráficas	41
4.2.2 Fluxo subterrâneo	44
4.3 Balanço hídrico.....	45
4.3.1 Recarga	45
4.4 Modelo dos sistemas aquíferos.....	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 Avaliação hidrodinâmica.....	55
5.1.1 Unidades Hidroestratigráficas	55

5.1.2 Fluxo da água subterrânea	60
5.2 Balanço hídrico	63
5.3 Modelo dos sistemas aquíferos	74
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80
REFERÊNCIAS	82
APÊNDICE	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O Quadrilátero Ferrífero é uma importante região localizada no sul do Cráton São Francisco. Originalmente, no período colonial, foram encontrados abundantes depósitos auríferos que abasteceram a economia do ciclo do ouro. Com o avanço das pesquisas geológicas, essa área apresentou-se como umas das maiores reservas de minério de ferro de alto teor do mundo, além da ocorrência de outros significativos depósitos minerais (Endo *et al.*, 2020).

Além deste destaque mineral, no Quadrilátero Ferrífero estão presentes as cabeceiras de duas importantes bacias hidrográficas do Brasil, sendo as bacias do rio Doce e São Francisco. Estas bacias têm importante contribuição no abastecimento hídrico de parte da Região metropolitana de Belo Horizonte (Azevedo *et al.*, 2012).

Os recursos de águas subterrâneas desempenham um papel crucial ao fornecer água doce para uma parte significativa da população global, além de alimentarem rios e lagos e sustentarem os ecossistemas aquáticos durante períodos de seca. Também são fundamentais para irrigação agrícola, garantindo assim o fornecimento de água fresca para a produção de alimentos (Busico *et al.*, 2021). No entanto, devido à redução dos recursos hídricos superficiais e à ocorrência frequente de secas, tem havido um aumento inevitável na exploração das águas subterrâneas. Portanto, compreender detalhadamente o estado do balanço hídrico das águas subterrâneas torna-se uma questão crucial para a gestão eficaz dos recursos hídricos (Ketabchi *et al.*, 2018; Busico *et al.*, 2021).

O entendimento do fluxo de água subterrânea dos sistemas aquíferos existentes no Quadrilátero ferrífero, não deve ser entendido de forma individualizada, mas sim pela distribuição de suas unidades morfotectônicas integrantes, tais como os sinclinais Moeda, Gandarela, Alegria, Dom Bosco, Ouro Fino e Itabira, e o Homoclinal Serra do Curral. A conjunção de fatores geológicos e distintas características destas unidades, associadas às elevadas precipitações na região, conduzem a compreensão do comportamento de fluxo e descargas de água subterrânea para as principais bacias hidrográficas que têm origem no Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.*, 2020).

O Sinclinal Dom Bosco, área de foco desta pesquisa (Figura 1), localiza-se na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, abrangendo centros históricos como Ouro Preto e Mariana, além de empreendimentos minerários relevantes e uma significativa diversidade de fauna e flora. Essa unidade estrutural apresenta importância regional, conectando-se ao Sinclinal Moeda, a oeste, e ao Sinclinal Santa Rita, a nordeste. Apesar de sua relevância, a região ainda é pouco estudada sob a perspectiva hidrogeológica, em função de suas características geológicas complexas e das lacunas existentes no conhecimento atual. Nesse contexto, o presente projeto busca aprofundar a compreensão hidrogeológica do Sinclinal Dom Bosco, por meio de duas etapas principais de investigação.

A primeira etapa consistirá no levantamento de pesquisa bibliográfica, abrangendo estudos anteriores realizados na área, bem como a coleta de informações disponíveis em domínios públicos e privados que possam contribuir para uma compreensão adequada do comportamento hidrogeológico da região.

A segunda etapa envolverá a avaliação da dinâmica hídrica da região da área de estudo. Isso incluirá a definição das unidades hidroestratigráficas, as propriedades hidrodinâmicas, comportamento de fluxo e balanço hídrico.

1.2 Relevância

Este estudo visa caracterizar a hidrogeologia do Sinclinal Dom Bosco por meio da definição das unidades hidroestratigráficas, com definição das suas propriedades hidrodinâmicas, sistemas de fluxo, características físicas, posteriormente realização de um balanço hídrico, com estabelecimento da taxa de recarga e integração no modelo tridimensional dos sistemas aquíferos. Dessa forma, busca-se suprir uma lacuna relevante no conhecimento hidrogeológico do Sinclinal Dom Bosco, que é uma megaestrutura de grande expressão no Quadrilátero Ferrífero, que permanece carente de investigações abrangentes e robustas sobre as interações entre suas formações geológicas e o regime hidrogeológico local.

O Sinclinal Dom Bosco desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico da região, alimentando importantes corpos d'água, como as nascentes do Ribeirão da Prata e dos córregos Bocaina, Pires Velho, Água Santa, dos Dordeiros e Ponciana, (Endo *et al.*, 2020). Além disso, a área inclui centros urbanos históricos de grande relevância cultural, como Ouro Preto e

Mariana, que dependem das águas subterrâneas para seu abastecimento, além de variadas atividades (*i. e.*, agrícolas e industriais) que necessitam desse recurso.

A motivação central deste trabalho é preencher essa lacuna de conhecimento hidrogeológico do Sinclinal Dom Bosco, uma vez que o aprimoramento da compreensão dessa megaestrutura é fundamental não apenas para caracterizá-la isoladamente, mas também para entender suas conexões no contexto mais amplo do Quadrilátero Ferrífero. Isso inclui as possíveis trocas de águas subterrâneas com o Sinclinal Moeda, a oeste, e com o Sinclinal Santa Rita, a nordeste, o que amplia a relevância da área estudada como elemento-chave nas interações hidrogeológicas regionais.

Por meio desta investigação, espera-se avançar significativamente no entendimento das características hidrogeológicas distintas do Sinclinal Dom Bosco, fornecendo conhecimento técnico sobre a distribuição, o movimento e a quantidade das águas subterrâneas na região. Os resultados têm potencial de subsidiar estratégias eficazes de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, orientando um uso mais sustentável e equitativo. Ao estabelecer uma base sólida de informações hidrogeológicas, este estudo também pretende oferecer subsídios para pesquisas futuras e para intervenções de gestão, promovendo o desenvolvimento sustentável e a preservação de recursos essenciais à manutenção da vida e à integridade dos ecossistemas de longo prazo.

Dessa forma, considerando a relevância hidrogeológica do Sinclinal Dom Bosco e a escassez de estudos integradores sobre a temática para área, este trabalho responde à seguinte pergunta de pesquisa: “Qual é a configuração hidrogeológica e o padrão hidrodinâmico regional do Sinclinal Dom Bosco, obtidos a partir da integração de dados hidroestratigráficos, balanço hídrico (recarga) e representação tridimensional dos sistemas aquíferos?”.

1.3 Objetivo

Este estudo objetiva desenvolver o conhecimento hidrogeológico do Sinclinal Dom Bosco por meio da caracterização de suas unidades hidroestratigráficas, propriedades hidrológicas e hidrodinâmicas, os sistemas de fluxo e da quantificação do balanço hídrico subterrâneo anual, visando compreender dinâmica hidroestratigráfica. O desenvolvimento desse conhecimento inclui os seguintes objetivos específicos:

- Identificar, descrever e avaliar as unidades hidroestratigráficas da área de estudo, integrando dados geológicos, estruturais e hidrogeológicos.
- Definir as propriedades hidrogeológicas e hidrodinâmicas dos sistemas aquíferos presentes no Sinclinal Dom Bosco, a partir da compilação e análise de dados levantados.
- Realizar o balanço hídrico subterrâneo da região, estimando recarga por unidade hidroestratigráfica;
- Fornecer subsídios técnicos para a gestão e proteção dos recursos hídricos subterrâneos do Sinclinal Dom Boco, visando o uso sustentável, a preservação de serviços ecossistêmicos e a segurança hídrica local.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos, dispostos de forma a conduzir o leitor desde o contexto e fundamentação teórica até a análise dos resultados e considerações finais, garantindo coerência lógica e clareza na apresentação do conteúdo.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando o tema, a delimitação da área de estudo e a problemática da pesquisa, destacando a relevância científica e prática do estudo. Nesta seção, apresentou-se a formulação da pergunta científica da pesquisa, a justificativa e a importância do trabalho no contexto da hidrogeologia regional, com foco no Sinclinal Dom Bosco e suas interações hidrogeológicas no Quadrilátero Ferrífero.

O Capítulo 2 apresenta a contextualização da área de estudo, descrevendo as características hidrológicas, geológicas, hidrogeológicas, pedológicas, climáticas da região do Sinclinal Dom Bosco. São apresentados os limites da área, a compartimentação hidroestratigráfica, a rede de drenagem, as unidades litológicas e as principais atividades antrópicas, ressaltando os aspectos que influenciam o regime hídrico subterrâneo.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica da metodologia proposta neste trabalho, reunindo os principais conceitos, teorias e estudos relacionados à hidrogeologia de estruturas adjacentes ao Sinclinal Dom Bosco, à caracterização hidroestratigráfica e aos métodos de estimativa de recarga e balanço hídrico subterrâneo.

O Capítulo 4, metodologia, detalha o conjunto de procedimentos adotados para atingir os objetivos propostos. Inclui a obtenção e tratamento de dados climáticos, geológicos e hidrogeológicos, a definição e caracterização das unidades hidroestratigráficas, os métodos de interpolação e modelagem espacial, o cálculo de balanço hídrico e cálculo de recarga, e a elaboração do modelo tridimensional dos sistemas aquíferos na área de estudo. São descritos ainda os softwares e ferramentas utilizadas (ex.: QGIS, *Google Earth Engine*), assim como os critérios de validação adotados.

O Capítulo 5, discorre sobre os resultados e a discussão deles, apresentando e interpretando os produtos obtidos a partir das análises e modelagens, incluindo mapas produzidos em ambientes SIG, balanço hídrico subterrâneo por sub-bacia e por unidade hidroestratigráfica e materialização de todas essas informações na forma de um modelo do sistema aquífero. Neste capítulo, discorre-se ainda sobre os resultados obtidos neste trabalho, frente aos de outros estudos já realizados no Quadrilátero Ferrífero, além de comparação de coerência com características ambientais e estruturais da região.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações deste trabalho, sintetizando as principais inferências deste trabalho, respondendo à pergunta de pesquisa e avaliando o alcance dos objetivos propostos. Apresenta ainda recomendações para o uso sustentável das águas subterrâneas no Sinclinal Dom Bosco e para o aprimoramento de políticas de gestão hídrica na região.

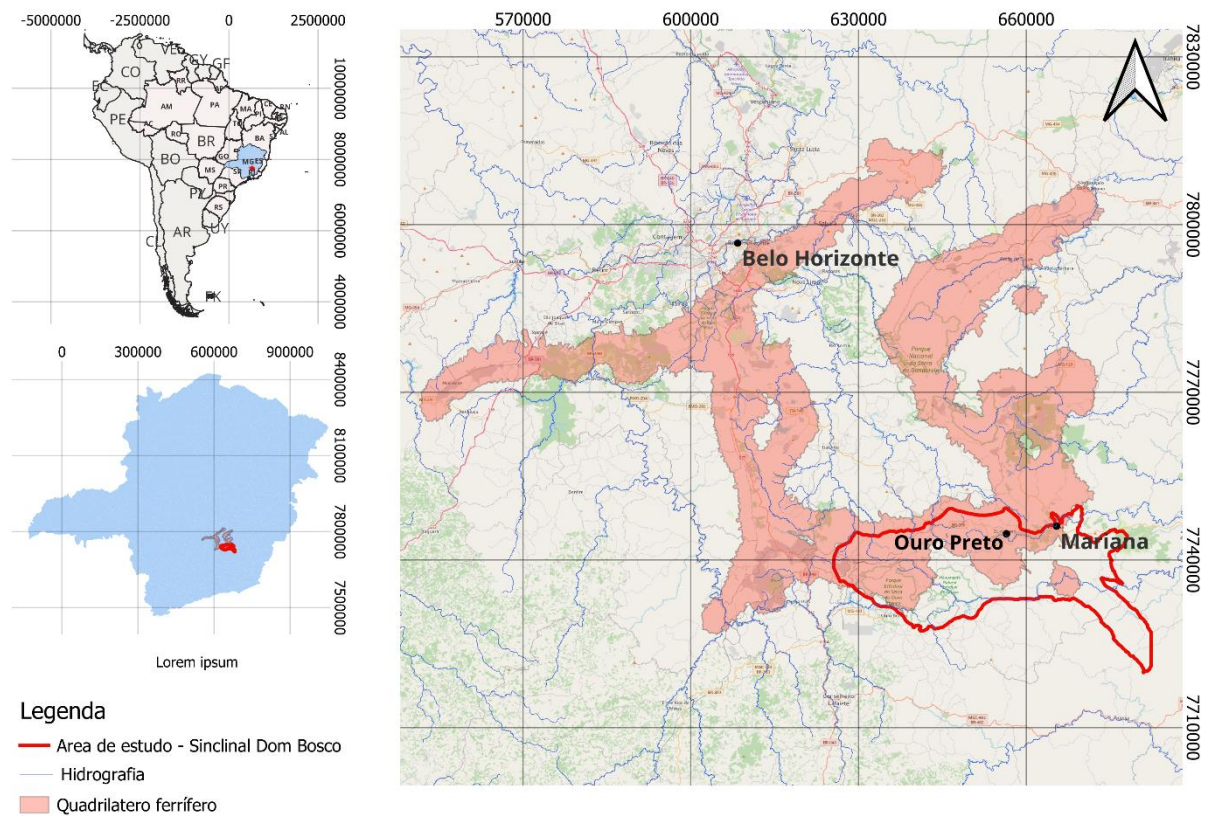
Por fim, são incluídas as Referências Bibliográficas, e os Apêndices com dados complementares, tabelas e outros materiais relevantes para a compreensão e reprodutibilidade do estudo.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

O Sinclinal Dom Bosco, área de estudo foco deste trabalho, está localizado na porção centro-sul do Quadrilátero Ferrífero, abrangendo partes dos municípios de Ouro Preto, Ouro Branco, Mariana e Piranga, no estado de Minas Gerais (Figura 1). O acesso à área a partir da capital mineira, Belo Horizonte, em direção à cidade de Ouro Preto, pode ser feito pela Rodovia Presidente Juscelino Kubitschek (BR-040) até a BR-356. Seguindo essa rodovia e passando pela cidade de Itabirito, chega-se à cidade de Ouro Preto.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, demonstrado a localização do Sinclinal Dom Bosco em relação ao Quadrilátero Ferrífero e cidades no entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 Clima

No que diz respeito ao contexto climático, estudos realizados no Quadrilátero Ferrífero e nas áreas circunvizinhas indicam uma significativa variabilidade ao longo do Quaternário Superior (Gomes *et al.*, 2009). Atualmente, a região apresenta um padrão climático caracterizado por

uma estação chuvosa, que ocorre de outubro a março, seguida por um período de estiagem entre abril e setembro. As variações de altitude do Quadrilátero Ferrífero, exercem influência no surgimento de microclimas com características de temperatura e umidade distintas em relação à média anual da região, que está em torno de 20°C, com índices pluviométricos variando entre 1300 mm e 2100 mm por ano. O clima predominante na região é classificado como temperado-quente e apresenta duas estações bem definidas: um inverno seco e um verão chuvoso (Silva, 2007).

O Quadrilátero Ferrífero representa uma zona de transição entre o Cerrado e a Mata Atlântica, exibindo uma ampla diversidade e complexidade de ambientes e formações vegetais, incluindo matas de galeria, florestas semidecíduais, matas de candeia, campos cerrados, campos rupestres e de altitude (Carvalho Filho; Curi; Shinzato, 2010).

Na região do Sinclinal Dom Bosco, uma análise realizada no Parque Estadual do Itacolomi, localizado na porção leste deste sinclinal, enquadrando o clima da região de acordo com a classificação climática de Köppen, identificando os tipos CWa e CWb. Tratando-se de um clima tropical de altitude, com alta precipitação, especialmente entre os meses de outubro e março. O tipo CWa prevalece em áreas mais elevadas, com verões quentes e chuvosos e uma estação seca curta. O tipo CWb é encontrado em áreas topograficamente mais elevadas e apresenta verões mais amenos (IGA, 1995).

2.3 Hidrografia

No Quadrilátero Ferrífero, encontram-se as nascentes de duas importantes bacias hidrográficas, conhecidas como a bacia do rio São Francisco e a bacia do rio Doce, que desempenham um papel crucial no fornecimento de água para parte da porção sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte. A geologia da região exerce uma influência significativa no traçado dos rios, resultando na formação de trechos com cachoeiras e vales profundos. Isso é particularmente evidente no rio das Velhas, onde as variações altimétricas do terreno são notáveis (Barbosa & Rodrigues, 1967).

Do ponto de vista hidrográfico, o Sinclinal Dom Bosco apresenta nascentes que alimentam estas duas principais bacias hidrográficas do Brasil (rio São Francisco e rio Doce). Segundo Endo *et al.* (2020) o SDB desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico da região,

apresentando importantes corpos d'água, como as nascentes do Ribeirão da Prata e dos córregos Bocaina, Pires Velho, Água Santa, dos Dordeiros e Ponciana.

Os traços das drenagens no interior do Sinclinal Dom Bosco indicam que os cursos de água principais estão encaixados em zonas de fraqueza de direção aproximadamente N-S, que seguem o contorno geral das camadas e das charneiras dos grandes dobramentos. Em sua porção norte, as descargas associadas aos aquíferos Cauê e Gandarela estão localizadas próximas ao núcleo do Sinclinal e associadas a estruturas NNW-SSE (Endo *et al.*, 2020).

2.4 Geomorfologia

As características geomorfológicas de uma bacia desempenham um papel crucial nas condições de fluxo da região. A inclinação do terreno exerce influência significativa no processo de infiltração. Em áreas com encostas íngremes e solos pouco desenvolvidos, as taxas de infiltração tendem a ser baixas. Da mesma forma, em áreas mais planas, como várzeas, terraços fluviais e depressões, onde o fenômeno do fluxo superficial por saturação pode ocorrer, as condições de infiltração também podem ser restritas (Costa, 2005). Conforme apontado por Lacey e Grayson (1998), nas regiões de relevo mais elevado, é mais comum ocorrer a recarga do lençol freático, ao passo que em áreas de menor altitude, a descarga do lençol tende a ser mais prevalente.

A conformação atual do relevo no Quadrilátero Ferrífero é resultado da evolução geomorfológica influenciada pela presença de grandes estruturas dobradas regionais. Essas estruturas extensas, organizadas em forma de anticlinais e sinclinais, foram moldadas por processos erosivos que resultaram na inversão do relevo. Os anticlinais deram origem aos vales dissecados, enquanto os sinclinais, localizados em áreas mais elevadas, formaram as cristas das serras que definem a paisagem da região. Todo esse conjunto encontra-se elevado tectonicamente, com uma variação altimétrica que varia entre 900 e 2000 metros (Carvalho Filho, 2008).

A região do Sinclinal Dom Bosco, localizada ao sul do Quadrilátero Ferrífero, nas proximidades da cidade de Miguel Burnier, é caracterizada por uma altitude geralmente superior a 1200 m, apresentando um relevo montanhoso. Este relevo é delimitado a leste pela região planáltica da Serra do Itacolomi e a oeste por terrenos mais planos nas nascentes do Rio das Velhas e do Rio

Maranhão, um afluente do Rio Paraopeba. Estendendo-se por aproximadamente 17 km na direção leste-oeste, sua área totaliza 111 km². As áreas mais elevadas são compostas por formações ferríferas da Formação Cauê e quartzitos do Grupo Piracicaba (Oliveira; Olivito; Silva, 2011).

2.5 Pedologia

A interpretação pedológica do Sinclinal Dom Bosco, à luz do quadro regional do Quadrilátero Ferrífero, revela um mosaico de solos fortemente condicionado pela variabilidade litológica do Supergrupo Minas, pela estruturação em grandes dobras e por uma longa história de dissecação do relevo. Em consequência, são comuns perfis rasos, com pequeno volume de terra fina e abundância de fragmentos, especialmente onde dominam materiais ferríferos e capeamentos de canga, nesses ambientes, a ocorrência de concreções e níveis petroplínticos é recorrente e confere aos solos coloração intensamente avermelhada, com mineralogia da fração argila dominada por hematita, goethita e maghemita, além de registros de escurecimento associado a compostos de manganês em solos derivados de dolomitos ferruginosos (Formação Gandarela). Esses traços, descritos para ambientes representativos do Quadrilátero Ferrífero, sustentam a presença de Cambissolos e Neossolos de caráter perférico em topos e encostas serranas, Plintossolos Pétricos sobre cangas lateríticas e Latossolos Vermelhos perféricos em posições mais brandas do relevo, compondo topossequências típicas de serras, vertentes e pedimentos (Carvalho Filho, 2008).

No recorte litoestratigráfico do Sinclinal Dom Bosco, a relação entre material de origem e solos é marcada pela expressiva heterogeneidade do Grupo Sabará, cuja revisão para a região de Ouro Preto individualizou as formações Saramenha (metadiamicritos, metarritmitos, metapelitos, clorita-xistos, filitos e lentes de dolomito) e Estrada Real (metarenitos, metaconglomerados, metadiamicritos e delgadas camadas ferríferas). A justaposição desses metassedimentos às unidades adjacentes do Supergrupo Minas (Itabira e Piracicaba), associada a inversões locais de seção e discordâncias erosivas, explica a proximidade espacial, em curtas distâncias, de materiais parentais contrastantes para a gênese dos solos, fator central para a variabilidade pedológica observada no Sinclinal Dom Bosco. Em síntese, o arranjo estrutural e as relações de contato no sinclinal reforçam que os pacotes do Sabará, com forte aporte terrígeno e intercalações ferríferas, constituem uma fonte dominante de materiais para Cambissolos e Neossolos regionais, enquanto as cangas ligadas às formações ferríferas e os quartzitos e

dolomitos contribuem, respectivamente, para Plintossolos concrecionários e para variações locais de cor e teores de manganês (Almeida *et al.*, 2005).

Dados pedológicos de áreas representativas do Quadrilátero Ferrífero convergentes com o contexto do Sinclinal Dom Bosco mostram o predomínio de Cambissolos Háplicos desenvolvidos de metassedimentos, independentemente da fitofisionomia, com baixa fertilidade natural, caráter álico frequente, teores de silte muitas vezes superiores aos de argila e epipedregosidade sob campo cerrado; Latossolos ocorrem de modo pontual, inclusive com horizonte A húmico em posições mais baixas de vertente; e, sobre cangas lateríticas, os Plintossolos Pétricos são exclusivos e muito cascalhentos, exibindo forte variação de atributos mesmo a pequenas distâncias, condição que se associa à heterogeneidade microtopográfica e a micro-habitats distintos na paisagem. Esses resultados, obtidos para Sabará, Nova Lima e Brumadinho, detalham ainda 28 perfis dispostos em topossequências, permitindo relacionar classes e propriedades a relevo, litologia e cobertura, em arranjos que se repetem ao longo do Quadrilátero Ferrífero (Coelho *et al.*, 2017).

A literatura regional destaca, adicionalmente, que os solos de constituição ferruginosa apresentam teores muito elevados de óxidos de ferro, intensa cor vermelha e elevada concentração de maghemita, com abundância de petroplintita em frações cascalho e calhau; tais feições, embora levem ao enquadramento taxonômico como Plintossolos Pétricos em diversos sítios, podem coexistir com forte evolução pedogenética expressa por atributos morfológicos, químicos e mineralógicos típicos de horizonte B latossólico em alguns perfis sob floresta, evidenciando a natureza peculiar desses materiais no Quadrilátero Ferrífero (Carvalho Filho, 2008).

Em setores serranos, topos e cristas abrigam com frequência Neossolos e Cambissolos muito rasos e pedregosos; nas encostas, os Cambissolos seguem dominantes, por vezes com horizonte concrecionário e, no sopé, rampas coluvionares acolhem Latossolos Vermelhos perférricos, também relatados em depressões suaves com perfis profundos e porosos. Há registros, em pequenas depressões de topo de serra do Quadrilátero Ferrífero, de nível freático próximo da superfície mesmo na estação seca em Latossolos Vermelhos perférricos, o que ilustra a forte conexão solo–relevo–água em escala local (Carvalho Filho, 2008).

Do ponto de vista funcional para esta dissertação, a combinação entre solum delgado, elevada pedregosidade e declividades acentuadas em segmentos serranos foi associada na literatura a maior suscetibilidade à erosão e à formação de voçorocas quando há concentração de escoamento, exigindo manejo cuidadoso do traçado de estradas e da drenagem superficial, por sua vez, pedimentos com Latossolos perférricos profundos e muito porosos configuram compartimentos pedológicos contrastantes na paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Carvalho Filho, 2008; Coelho *et al.*, 2017; Almeida *et al.*, 2005).

Em síntese, a pedologia aplicável ao Sinclinal Dom Bosco descreve um sistema em que Cambissolos e Neossolos rasos de caráter perférrico dominam segmentos elevados e dissecados, Plintossolos Pétricos acompanham as cangas lateríticas e Latossolos perférricos ocupam posições de menor energia de relevo, todos fortemente modulados por materiais do Grupo Sabará e das formações ferríferas do Supergrupo Minas (Carvalho Filho, 2008; Coelho *et al.*, 2017; Almeida *et al.*, 2005). A compreensão desses arranjos, sustentada por perfis e relações solo–paisagem publicados para o Quadrilátero Ferrífero, oferece a base pedológica necessária para integrar recarga, armazenamento e escoamento no arcabouço hidrogeológico conceitual do Sinclinal Dom Bosco.

2.6 Geologia

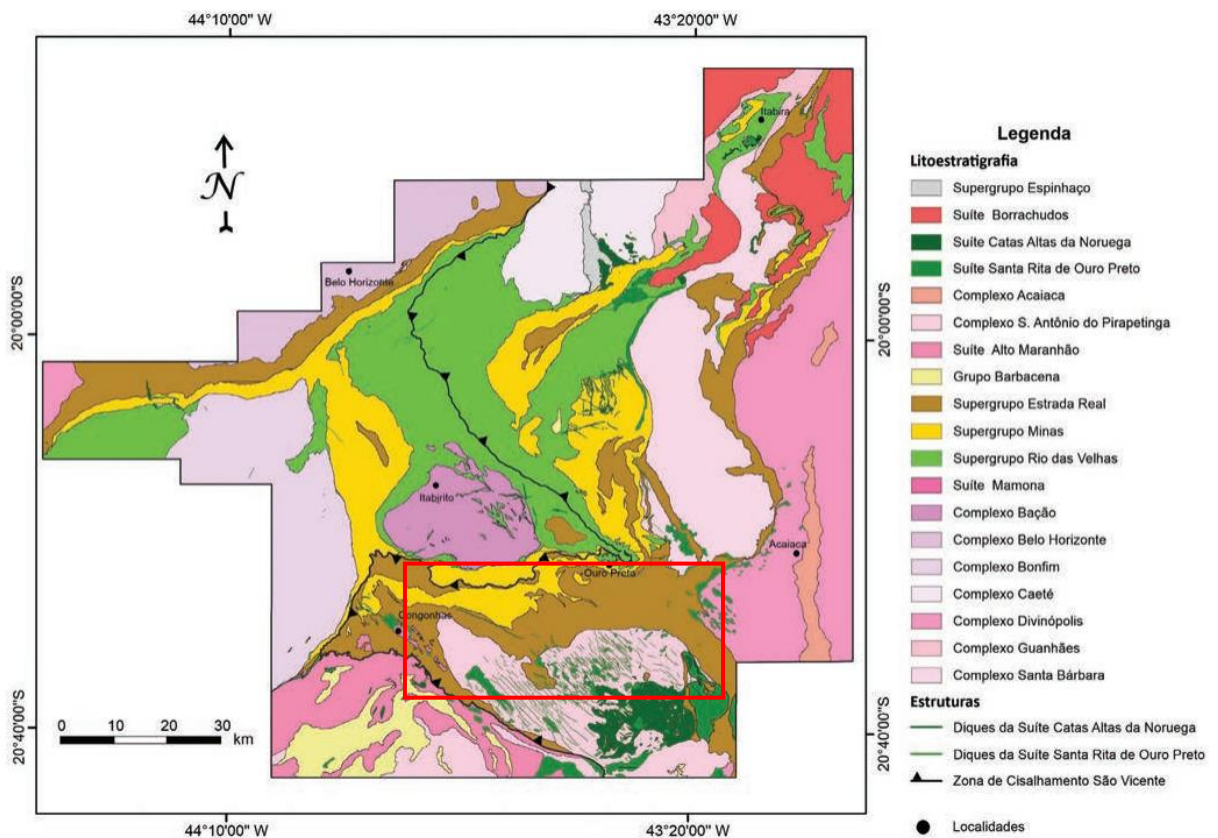
Segundo Almeida (1977) do ponto de vista geotectônico, o Quadrilátero Ferrífero trata-se de uma unidade que se comportou relativamente estável frente aos esforços tectônicos atuantes em suas bordas do Cráton São Francisco no neoproterozóico

As análises de Endo (1997), Alkmim e Marshak (1998), e Baltazar e Zucchetti (2007) oferecem uma compreensão abrangente por vezes divergentes da evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero. Endo (1997) identifica três ciclos tectono-deformacionais distintos, destacando o Ciclo Orogênico Jequié, o Ciclo Orogênico Transamazônico e o Ciclo Orogênico Brasileiro, cada um com suas características específicas de deformação. Por sua vez, Alkmim e Marshak (1998) descrevem seis fases desde a formação do *Greenstone Belt* do Rio das Velhas até o evento compressivo do Brasileiro. Enquanto isso, Baltazar e Zucchetti (2005) identificam três eventos de deformação, evidenciando o evento Rio das Velhas, o Transamazônico e o Brasileiro, cujos padrões e direções de deformação são distintos e refletem a complexidade da evolução tectônica da região.

Segundo Dorr (1969) o Quadrilátero Ferrífero pode ser compartimentado em dez megaestruturas, sendo o Domo de Bonfim (DB) os Sinclinais Moeda (SM), Dom Bosco (SDB), Gandarela (SG), Vargem do Lima (SVL), Santa Rita (SSR) e Ouro Fino (SOF), O Homoclinal Serra do Curral e os Anticlinais Mariana (AM) e Furquim (AF).

A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero compreende diversas unidades litoestratigráficas que remontam ao Arqueano, Paleoproterozóico, Mesoproterozóico e Cenozoico, as quais se dividem em: Complexos Metamórficos, Supergrupo Rios das Velhas, Supergrupo Minas, Supergrupo Estrada Real, Grupo Barbacena, Supergrupo Espinhaço e Unidades Sedimentares (Endo *et al.*, 2020). A Figura 2 apresenta o mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, demonstrando em vermelho a região do Sinclinal Dom Bosco, área foco desta pesquisa.

Figura 2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero com a indicação da área de estudo situada na porção sul (em vermelho).



Fonte: Modificado de Endo *et al.* (2019)

2.6.1 Complexos Metamórficos

Macroscopicamente, os complexos metamórficos são compostos por uma variedade de rochas, incluindo ortognaisses bandados, anfibolitos, migmatitos, granitoides leucocráticos, veios aplíticos e diques máficos (Farina *et al.*, 2016). Esses complexos exibem dobramentos e foliação gnáissica plano-axial de dobras transpostas, com domínios migmatíticos definindo zonas de charneiras antiformais (Endo *et al.*, 2020).

2.6.2 Supergrupo Rio Das Velhas

Dorr (1969) propôs a divisão clássica do Supergrupo Rio das Velhas em Grupo Nova Lima (inferior) e Grupo Maquiné (superior).

O Grupo Nova Lima é predominantemente formado por rochas sedimentares e vulcânicas que foram transformadas em xistos, xistos cloríticos e filitos, com ocorrência ocasional de filitos grafitosos, formações ferríferas, dolomititos e quartzo-ankerita xisto. Já o Grupo Maquiné é uma unidade molássica composta pelas formações Palmital e Casa Forte, caracterizadas por sericita filito, quartzo-clorita xisto, quartzitos, metaconglomerados e metadiamicititos. No vale do Rio das Velhas, o Grupo Maquiné se inclina para sudeste e entra em contato gradacional com os xistos e filitos do Grupo Nova Lima, com uma espessura estimada em 3.400 m (Dorr, 1969; Vial *et al.*, 2007).

A sucessão de rochas do Supergrupo Rio das Velhas é caracterizada por litofácies que incluem rochas metavulcânicas máficas-ultramáficas e félsicas, metavulcanoclásticas, metavulcanossedimentares químicas e metassedimentares clásticas marinhas e não-marinhas (Baltazar; Zucchetti, 2007).

No Sinclinal Dom Bosco o Supergrupo Rio das Velhas está localizado na porção centro-sul, conforme proposto por Dorr (1969), é composto por uma variedade de xistos, incluindo sericita-xistos, sericita-quartzo-xisto, clorita-sericita-quartzo-xisto, quartzo-xistos e clorita-xistos, com uma predominância observada nos clorita-xistos, além de quartzitos e formações ferríferas bandadas. Tanto o quartzito quanto a formação ferrífera ocorrem em pacotes contínuos e intercalados com os xistos, em camadas que variam de poucos centímetros a alguns metros. Os xistos, geralmente intemperizados, exibem uma coloração avermelhada, com nuances que

podem tender para tons róseos. A área de ocorrência dessas rochas é caracterizada pela presença de intrusões de rochas graníticas, pegmatitos e veios de quartzo.

Segundo identificado por Johnson (1962) e Barbosa (1968) a transição entre o Supergrupo Rio das Velhas e o Supergrupo Minas é definida por uma discordância estrutural.

2.6.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é formado pelos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba, organizados em uma sequência continental-marinha com uma espessura mínima de 3.424 metros (Dorr, 1969). Esta sucessão representa uma etapa crucial na evolução de uma bacia de margem passiva (Alkmim; Martins Neto, 2012).

Os conjuntos Tamanduá e Caraça são constituídos principalmente por psamitos e, em menor medida, por pelitos e conglomerados aluviais a marinhos, refletindo a fase de rifte e a transição para o desenvolvimento da margem passiva (Alkmim; Marshak, 1998). O Grupo Tamanduá é caracterizado, da base para o topo, por uma sequência espessa (1.037 m) (Dorr, 1969) de quartzitos, ortoquartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas, xistos quartzosos e argilosos da Formação Cambotas (inferior), seguida por xistos filíticos e quartzosos, xistos ferruginosos e formação ferrífera dolomítica da Formação Morro Grande (superior) (Endo *et al.* 2019b). O Grupo Caraça é predominante composto de quartzitos, quartzitos sericíticos, filitos e metaconglomerados da Formação Moeda (inferior) com 500 m de espessura (Dorr, 1969). A Formação Batatal, com 700 m de espessura, compreende filitos e, em menor grau, formações ferríferas bandadas, metacherts, filitos grafitosos e mármores dolomíticos (Dorr, 1969).

O Grupo Itabira é composto por rochas metassedimentares marinhas com uma espessura de 1.100 m, representando o registro completo da bacia de margem passiva (Alkmim; Marshak, 1998). Inclui itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfíbolíticos e, em menor proporção, filitos, quartzitos e mármores da Formação Cauê com 350 m de espessura. A sobreposição é composta por mármores dolomíticos, filitos dolomíticos, dolomitos ferruginosos, filitos e itabiritos da Formação Gandarela (Spier *et al.*, 2007).

O Grupo Piracicaba consiste em rochas metassedimentares marinhas com uma espessura de 1.280 m, organizadas em quatro formações, da mais antiga para a mais recente: Cercadinho,

Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho é composta por quartzitos ferruginosos, filitos prateados e, em menor quantidade, dolomitos, xistos sericíticos e metaconglomerados. Ela é sobreposta, de forma gradual, por filitos, filitos dolomíticos, metassiltitos, dolomitos quartzosos e argilosos da Formação Fecho do Funil. O grupo é complementado pelos ortoquartzitos da Formação Taboões e pelos filitos grafitosos, filitos e xistos da Formação Barreiro (Dorr *et al.*, 1957).

O Sinclinal Dom Bosco é composto majoritariamente de rochas do Supergrupo Minas, com predominância de rochas dos grupos Itabira, Piracicaba e Sabará. Segundo Almeida (2004) a distribuição dessas rochas no Sinclinal Dom Bosco é predominantemente na forma de corpos alongados na direção leste-oeste. No entanto, na extremidade leste, esses corpos apresentam uma inflexão, assumindo predominantemente uma direção NW-SE ou N-S.

Na área de estudo é possível observar partes aflorantes do Grupo Itabira na porção centro-oeste com uma extensão que diminui em direção ao setor leste, uma interpretação corroborada por Johnson (1962) e Almeida (2004), além disso também é possível observar porções aflorantes em quase todo limite norte da área de estudo. Em alguns afloramentos, a exposição da zona de contato entre a formação ferrífera (Formação Cauê) e os dolomitos ferruginosos (Formação Gandarela) revela indícios de um contato normal gradativo (Almeida, 2004).

Formação Cauê é principalmente composta por itabiritos e metacherts, com ocorrências secundárias de bandas ricas em minerais ferrosos, quartzo de granulação fina e um material argiloso escuro, rico em manganês. Os itabiritos consistem em intercalações típicas de lâminas ou bandas quartzosas hematíticas com espessura da ordem de milímetros (Almeida, 2004). Johnson (1962) observou que as relações de contato do itabirito Cauê nesta região não são claras.

A Formação Gandarela é composta principalmente por dolomito ferruginoso e metarritmito, os quais frequentemente exibem um alto grau de intemperismo. A alteração do dolomito resulta em um solo de cor escura, ocasionalmente associado a um metapelito de grão muito fino e cor palha (Almeida, 2004).

Na área do Sinclinal Dom Bosco o Grupo Piracicaba é a unidade com a maior extensão de área e diversidade litológica, compreendendo xistos, filitos, quartzitos puros e ferruginosos,

formações ferríferas e rochas carbonáticas. Alguns pesquisadores (Johnson, 1962; Garcia *et al.*, 1988) enfrentaram desafios ao identificar as formações desse grupo devido à presença frequente de graduações laterais e verticais entre as diferentes litologias. Almeida (2004) identificou na área litologias correlatas as formações Cercadinhos e Fecho do Funil.

2.6.4 Supergrupo Estrada Real

O Supergrupo Estrada Real é constituído pelos conjuntos Sabará e Itacolomi, conforme sugerido por Teixeira da Costa (1961). No âmbito do Grupo Sabará, conforme definido por Gair (1958), estudos estratigráficos e estruturais realizados na porção centro-leste do Sinclinal Dom Bosco identificaram duas unidades litoestratigráficas: a Formação Saramenha (inferior), previamente definida por Barbosa (1968), composta majoritariamente por clorita-xisto, podendo ocorrer ainda sericita-xisto, sericita-clorita-xisto e quartzo-sericita-clorita-xisto (Reis, 2001), e a Formação Estrada Real (superior), constituída predominantemente por metarenitos que transicionam para metaconglomerados polimíticos, intercalados com camadas métricas a decamétricas de metadiamicititos (Almeida, 2004).

2.6.5 Unidades sedimentares

Os principais constituintes das unidades sedimentares no Quadrilátero Ferrífero são os depósitos de idade cenozoica, constituídos por cangas, aluviões e elúvio/colúvio.

A canga é um tipo de rocha composta principalmente de fragmentos de formação ferrífera, filito e quartzo, ligados por óxido de ferro (Dorr, 1964). Grandes concentrações de sedimentos aluvionares no Quaternário Ferrífero são pouco comuns, principalmente devido à maioria dos leitos dos rios estarem situados acima dos níveis de base regionais. Os depósitos elúvio-coluvionares estão distribuídos em todo o Quaternário Ferrífero, especialmente em áreas elevadas, onde são suportados pela presença de formações ferríferas e quartzitos. (Endo *et al.*, 2020). No Sinclinal Dom Bosco é observado ocorrências de Cangas e depósitos coluvionares e eluvionares.

2.7 Hidrogeologia

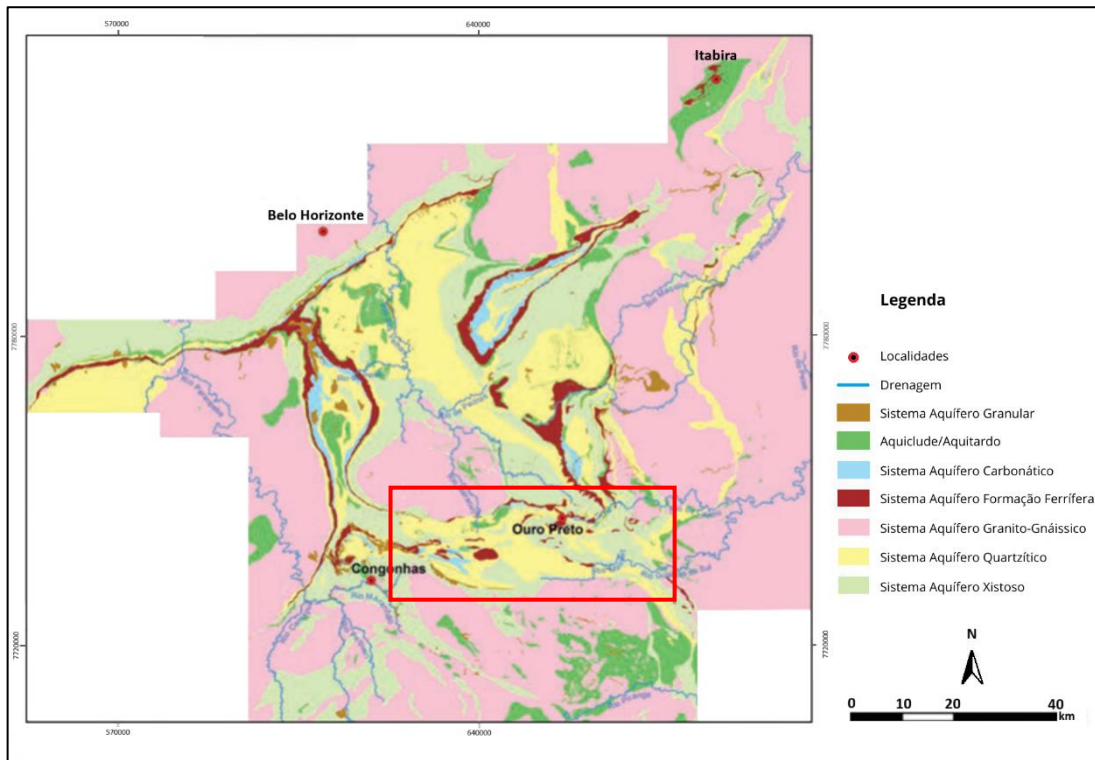
A presença de cadeias de montanhas e outras características topográficas desempenha um papel significativo na criação e distribuição da precipitação. Tanto a água corrente quanto a

subterrânea são agentes geológicos importantes na formação da paisagem. O movimento e a qualidade da água subterrânea são profundamente influenciados pela geologia (Fetter, 2018).

As águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero vêm sendo usadas desde o período colonial, para abastecimento de vilas, povoados e minerações. A cidade De Ouro Preto por exemplo até hoje é abastecida por águas provenientes de nascentes desde o século XVII e aduzidas através de tubulações de pedra sabão. Estas águas também foram usadas também foram usadas para lavagem de ouro e geração de energia mecânica para as minerações (Silva; Neto; Bertachini, 1994).

A Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero possui grandes reservas explotáveis de águas subterrâneas em diversas formações geológicas, com destaque algumas unidades do Supergrupo Minas, as formações ferríferas da formação Cauê, os quartzitos ferruginosos da formação Cercadinho, os dolomitos da formação Gandarela e os quartzitos da formação Moeda (Silva; Neto; Bertachini, 1994). Ramos, Cordeiro e Fernandes (2020) classificam essas unidades em três grandes sistemas aquíferos, relacionados às formações ferríferas (Cauê), quartzíticas (Moeda e Cercadinho) e carbonáticas (Gandarela). Outros tipos de rochas, como rochas pelíticas (Batatal, Fecho do Funil e Barreiro) e intrusivas básicas (diques), desempenham um papel importante na compartimentação do fluxo das águas subterrâneas na região do Quadrilátero Ferrífero. A Figura 3 apresenta o mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero com destaque em vermelho para área de estudo.

Figura 3- Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero demonstrando a área de estudo desta pesquisa demarcada em vermelho.



Fonte: Modificado de Endo, *et al.* 2020 in Dorr (1969), Beato *et al.* (2005) e Mourão (2007)

Mourão (2007) realizou uma caracterização na região norte do Sinclinal Moeda, identificando sete unidades hidrogeológicas distintas: aquíferos inconsolidados, aquíferos quartzíticos, aquífero carbonático, aquíferos em formações ferríferas, aquíferos em xistos, aquíferos em rochas granito-gnáissicas e unidades confinantes. Cada uma dessas unidades foi discriminada com base nos nomes das formações geológicas que as compõem. Beato, Monsore e Bertachini (2017) identificou nove unidades hidrogeológicas entre sistemas aquíferos e aquíardos, na região da APA Sul situada na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, sendo eles denominados: Sistema aquífero granito-gnáissico, Sistema aquífero xistoso, Sistema aquífero formação ferrífera, Sistema aquífero itabirítico, Sistema aquífero carbonático, Sistema aquífero quartzito cercadinho, Sistema aquífero granular e os aquíardos formados pela Formação Batatal (Grupo Caraça) e Formação Barreiro (Grupo Piracicaba).

Magalhães *et al.* (2022) caracterizou hidrogeologicamente o flanco leste do Sinclinal Moeda e Andrade *et al.* (2025) caracterizou o flanco oeste desta mesma estrutura. As estruturas geológicas e litologias presentes na parte sul do Sinclinal Moeda apresenta uma linearidade com as do Sinclinal Dom Bosco, por vezes causando divergências de entendimentos dos limites

de ambos. Essa linearidade pode ser observada também através de levantamentos geofísicos, evidenciando uma interconexão de fluxos subterrâneos entre estas duas megaestruturas.

Magalhães *et al.* (2022) identificou quatro unidades aquíferas e quatro aquíferos no flanco leste do Sinclinal Moeda. Essas unidades são os aquíferos Aluvionar, Gandarela, Cauê e Moeda, e os aquíferos Piracicaba, Batatal, Nova Lima e Complexo Bação. Por outro lado, Andrade *et al.* (2025) caracterizou cinco unidades aquíferas e cinco unidades não aquíferas no flanco oeste do Sinclinal Moeda. Entre as unidades aquíferas estão o Aquífero Moeda, Aquífero Cauê, Aquífero Gandarela, Aquífero Itacolomi e Aquífero das Coberturas. Quanto às unidades não aquíferas, incluem-se os aquícludes Sabará, Piracicaba, Supergrupo Rio das Velhas, e os aquíferos Batatal e do Complexo Bação.

O Aquífero Gandarela é composto por rochas carbonáticas, como calcários e dolomitos, com características fissurais e cársticas, sendo heterogêneo e anisotrópico (Andrade *et al.*, 2025; Magalhães *et al.*, 2022). Ele pode ser classificado como aquífero livre ou confinado, dependendo da presença do aquíclude Piracicaba ou Sabará. A espessura do Aquífero Gandarela varia na região: ao norte, chega a aproximadamente 750 metros, dobrando de espessura na região central do Sinclinal e reduzindo-se ao sul (Andrade *et al.*, 2025).

O Aquífero Cauê se destaca por sua abundante riqueza hídrica, evidenciada pelo elevado número de poços produtivos em comparação com outras unidades aquíferas. Caracterizado por formações ferríferas bandadas, apresenta uma porosidade que varia entre granular e fissural, o que, juntamente com as variações litológicas e complexidade estrutural, o torna um aquífero heterogêneo e anisotrópico (Mourão, 2007; Andrade *et al.*, 2025). Este aquífero emerge nas porções norte, central e sul do Sinclinal Moeda, geralmente estando em condição livre, mas pode assumir um caráter confinado quando coberto pelo aquíclude Piracicaba, especialmente na parte sul da área de estudo (Andrade *et al.*, 2025).

De Paula *et al.* (2018) subdividiram o Aquífero Cauê localizado na região sul do Sinclinal Moeda e oeste do Sinclinal Dom Bosco, identificando estratos com águas de diferentes idades para evidenciar a taxa de renovação das águas em profundidades variadas. Águas jovens predominam acima de 1000 metros, exceto na Serra do Mascate, considerada zona de recarga local. Águas intermediárias são encontradas entre 850 e 1000 metros, enquanto águas antigas estão abaixo de 850 metros, com níveis de trítio abaixo do limite de detecção. Anomalias após

essa separação estão associadas a fluxo em falhas, indicando um aquífero poroso fissural, influenciado pela atividade de mineração local.

O Aquífero Moeda, encontrado na borda ocidental do flanco e ao longo da crista da Serra da Moeda, exibe uma espessura que varia ao longo da estrutura, indo de 1000 m no Norte a 200 m no centro e 500 m no sul (Andrade *et al.*, 2025). Composta principalmente por quartzitos e conglomerados, essa formação confere ao aquíferos características de heterogeneidade e anisotropia (Magalhães *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2025).

O aquífero Itacolomi é formado por quartzitos intercalados com filitos, apresentando características heterogêneas e anisotrópicas. Embora os poços mostrem capacidade específica de até 5 m³/h/m, seu potencial ainda é pouco compreendido (Mourão, 2007). Este aquífero, predominantemente livre, também exibe aspectos de heterogeneidade e anisotropia. Sua exposição ocorre localmente na porção sul do Sinclinal Moeda (Andrade *et al.*, 2025).

Os aquíferos das Coberturas são caracterizados como aquíferos livres, descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos, associados a depósitos sedimentares aluviais, lacustres e detrito-lateríticos. Possuem uma capacidade de armazenamento significativa e são importantes zonas de recarga, com aqueles relacionados a formações ferríferas exibindo alta condutividade hidráulica (Mourão, 2007; Andrade *et al.*, 2025). No entanto, Magalhães *et al.* (2022) observou que, do ponto de vista regional, a baixa espessura das coberturas aluvionares em comparação com outras unidades as torna menos relevantes, considerando-as principalmente como unidades de armazenamento e facilitadoras de recarga para as unidades subjacentes.

O aquífero do Complexo Bação é fissural e anisotrópico, com um manto de intemperismo que contribui para a recarga das fraturas na rocha sã. Composto por rochas graníticas-gnáissicas, possui baixo potencial hidrogeológico e constitui o embasamento da região. Já os aquíferos Piracicaba e Sabará são predominantemente constituídos por xistos metassedimentares e metavulcânicos, além de quartzitos, metassiltitos e filitos do Grupo Piracicaba e Sabará. Apresentam porosidade fissural, heterogeneidade e anisotropia, com poços pouco produtivos variando de 0,04 a 0,58 m³/h/m. Quanto ao aquífero Batatal, composto por filitos homogêneos, embora possua boa capacidade de armazenamento de água, não consegue transmiti-la eficientemente. Atuando como confinante do Aquífero Moeda na porção oeste do Sinclinal

Moeda, essa unidade é pouco espessa, aproximadamente 100 m, e ocorre de forma descontínua nessa região (Andrade *et al.*, 2025).

O Sinclinal Dom Bosco, situado na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, apresenta um traço axial que varia de leste/oeste para noroeste/sudeste, acompanhado por um complexo sistema de falhas de traço curvo (Rolim; Alkmim, 2004).

Na porção oeste do Sinclinal, observam-se mergulhos para leste/nordeste em ambos os flancos. Nessa região do Sinclinal Dom Bosco, as unidades do Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi são sobrepostas pela unidade Nova Lima e/ou pelas unidades Minas inseridas no Sinclinal Moeda. Essa configuração condiciona um fluxo hídrico preferencial e subterrâneo em direção ao interior do Sinclinal Dom Bosco, seguindo predominantemente estruturas NW/SE, como indicado pelos cursos d'água na área (córregos Água Santa, do Cedro, Poço Fundo e do Meio), que são considerados zonas de descarga dos sistemas aquíferos envolvidos (Endo *et al.*, 2020).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Unidades hidroestratigráficas

A delimitação de unidades hidroestratigráficas parte da identificação de corpos cartografáveis que exibem comportamento hidráulico coerente, isto é, padrões relativamente homogêneos de transmissão e armazenamento de água, e não apenas homogeneidade litológica, pois contraste hidráulico é o critério que governa o fluxo subterrâneo útil à análise regional (Seaber, 1988). Em termos práticos, descrevem-se espessura, extensão areal, continuidade vertical e lateral, e relações de contato com unidades adjacentes, explicitando a heterogeneidade e a anisotropia que condicionam as trajetórias de fluxo (Seaber, 1988; De Marsily, 1986).

A atribuição de parâmetros hidráulicos fundamenta-se em dados de campo e de laboratório, testes de bombeamento permitem estimar transmissividade (T) e armazenamento (S) sob hipóteses claramente declaradas de regime e geometria, enquanto *slug tests* e ensaios de permeâmetro aportam estimativas locais de condutividade (K), compondo um quadro paramétrico consistente com a escala do estudo (Kruseman; De Ridder, 1990; Fetter, 2001). A literatura de base em hidrogeologia aplicada descreve as soluções analíticas e limites de aplicabilidade dos métodos (por exemplo, Neuman, Theis, Cooper-Jacob e Hvorslev) oferecendo referência para a consistência das estimativas e para o controle de qualidade das séries temporais usadas na interpretação (Fetter, 2001; Hvorslev, 1951).

A geologia e a estrutura orientam a compartimentação hidráulica: variações de fácies, grau de cimentação, porosidade efetiva e padrões de fraturamento introduzem heterogeneidade e anisotropia que podem cruzar fronteiras puramente litoestratigráficas, exigindo que as unidades sejam definidas com base em evidências de condutividade e conectividade hidráulica, e não apenas em litologia nominal (De Marsily, 1986; Bear, 1972). Em meios fraturados, a orientação e a conectividade das descontinuidades controlam a direcionalidade de K e, portanto, a coerência hidráulica usada para delimitar a unidade, especialmente quando há anisotropia marcante entre os eixos horizontal e vertical (Bear, 1972; Fetter, 2001).

A superfície potenciométrica e seus gradientes oferecem verificação independente das fronteiras propostas e mapas equipotenciométricos bem controlados temporalmente permitem inferir zonas de continuidade hidráulica e descontinuidades, além de indicar áreas de recarga e

descarga coerentes com a arquitetura estratigráfica e estrutural mapeada (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001). A coerência entre linhas de fluxo inferidas, observações de vazão de base e padrões hidroquímicos auxilia na validação do recorte adotado para cada unidade (Domenico; Schwartz, 1990).

A distinção entre unidades aquíferas e unidades de confinamento decorre do contraste de permeabilidade e resposta hidráulica, em que aquíferos são volumes saturados capazes de fornecer vazões úteis a poços e surgências, enquanto aquíferos transmissíveis transmitem água lentamente e restringem o fluxo, e aquícluses são camadas de permeabilidade muito baixa que atuam como selos hidráulicos em muitas configurações de campo. Ao estabelecer o mosaico hidroestratigráfico, é crucial documentar o grau de confinamento (livre, semiconfinado, confinado) e as possíveis fugas entre unidades, pois esses elementos condicionam a interpretação de recarga, armazenamento e trocas com a rede superficial (Freeze; Cherry, 1979).

A escala de observação e a noção de volume elementar representativo (REV) determinam os parâmetros que fazem sentido atribuir a cada unidade e a estabilidade do contraste hidráulico observado, pois médias efetivas dependem do tamanho do elemento considerado e da organização espacial da heterogeneidade (Bear, 1972; De Marsily, 1986). Assim, relatórios hidroestratigráficos robustos explicitam critérios de escala, incerteza associada aos parâmetros e limites de validade das generalizações, evitando inferências que extrapolem a resolução dos dados disponíveis (Anderson; Woessner, 1992; Anderson; Hunt; Woessner, 2015).

Por fim, a documentação cartográfica deve seguir convenções de simbologia e escala que preservem a legibilidade entre geologia, hidroestratigrafia e hidrodinâmica, declarando fontes de dados, métodos de interpolação e critérios usados para traçar contatos e limites (Diniz *et al.*, 2014; CPRM, 2018). Esse registro transparente sustenta a reprodutibilidade do quadro hidroestratigráfico e a sua evolução à medida que novas observações se tornam disponíveis (CPRM, 2018).

3.2 Propriedades hidrodinâmicas

A quantificação das propriedades hidrodinâmicas de um aquífero, como transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, é essencial para compreender o comportamento do fluxo subterrâneo e planejar o uso sustentável dos recursos hídricos (Freeze;

Cherry, 1979; Feitosa *et al.*, 2008). Na literatura internacional, existem diversas metodologias consagradas para se obter tais parâmetros, dentre as quais se destacam os testes de bombeamento convencionais, que permitem estimar a resposta do sistema aquífero à extração de água (Fetter, 2001; Todd; Mays, 2005). Em particular, Theis (1935) propôs um modelo analítico para aquíferos confinados, no qual a variação de rebaixamento é associada ao fluxo radial de água em direção ao poço. Cooper e Jacob (1946) simplificaram a solução de Theis para tempos tardios, facilitando a interpretação gráfica em escala semilogarítmica.

Apesar de amplamente utilizados, os ensaios de bombeamento executados de forma direta para fins de outorga podem apresentar limitações quando se busca caracterizar detalhadamente as condições do aquífero (Driscoll, 1986). Em muitos casos, tais testes têm como objetivo precípuo determinar a vazão a ser concedida para uso, com menor foco na investigação pormenorizada dos parâmetros que descrevem a dinâmica do fluxo (Feitosa *et al.*, 2008). Diversos pesquisadores defendem que procedimentos como os testes escalonados (*step-drawdown tests*) ou a combinação de teste de bombeamento seguido pela análise da recuperação fornecem informações mais robustas sobre o comportamento do aquífero, uma vez que permitem isolar efeitos de perdas de carga no poço, avaliar o regime transiente em diferentes estágios e, de modo geral, minimizar incertezas (Kruseman; De Ridder, 1990; Feitosa *et al.*, 2008).

Os métodos de Hantush (1960) e Neuman (1975) incorporam, respectivamente, as influências de vazamento vertical (aquíferos semiconfinados) e de drenagem por gravidade (aquíferos não confinados), expandindo o arcabouço teórico iniciado por Theis (1935). Em complemento, Hantush (1961) trata explicitamente de poços parcialmente penetrantes, caso relevante em muitas aplicações. Essas formulações são especialmente pertinentes em sistemas fraturados ou sobrepostos por camadas geológicas de permeabilidade reduzida, cenários em que o rebaixamento tende a não obedecer estritamente ao comportamento idealizado de um aquífero confinado homogêneo (Freeze; Cherry, 1979; Hantush, 1960).

Em ambientes geologicamente complexos, como o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, a combinação de metassedimentos e rochas ferríferas fraturadas exige abordagens que considerem as estruturas de fraturamento e a heterogeneidade do meio (Dorr, 1969; CPRM, 2018). Nesse sentido, Feitosa *et al.* (2008) destacam a importância de testes de campo conduzidos em diferentes condições de vazão, bem como de análises de recuperação após o

desligamento da bomba, para se reduzir a margem de erro na estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos.

Quando os testes disponíveis são justamente aqueles utilizados para estimar a vazão de outorga, a aplicação das metodologias clássicas (Neuman, Theis, Cooper-Jacob, ou mesmo Hantush, caso haja evidências de semiconfinamento) pode ser uma alternativa viável, desde que se reconheçam as limitações inerentes ao método. Os valores de transmissividade e condutividade hidráulica obtidos devem ser comparados àqueles descritos na literatura para sistemas geológicos semelhantes, e sua consistência precisa ser avaliada com base em dados de litologia, fraturamento e hidroestratigrafia, de forma a mitigar interpretações incorretas (Fetter, 2001; Feitosa *et al.*, 2008).

No contexto nacional, Feitosa *et al.* (2008) reforçam que, embora boa parte dos estudos hidrogeológicos em rochas do embasamento ou em terrenos metamórficos e sedimentares utilize as equações clássicas da hidrogeologia teórica, há crescente preocupação em adequar as metodologias às características locais, seja por meio de testes escalonados, seja pelo monitoramento de múltiplos piezômetros ou pela integração de métodos geofísicos. Tais práticas estão em consonância com as recomendações de Kruseman; De Ridder (1990) e Todd; Mays (2005), que valorizam a importância de validar o modelo adotado com observações de campo, ajustando-se, quando necessário, para condições menos ideais, como heterogeneidade ou anisotropia marcantes.

Em síntese, o referencial teórico que fundamenta a determinação de parâmetros hidrodinâmicos em aquíferos, particularmente a transmissividade e a condutividade hidráulica, apoia-se em um conjunto de métodos consolidados. Contudo, a escolha de cada metodologia e a credibilidade dos resultados obtidos dependem diretamente do rigor no planejamento e na execução dos ensaios de bombeamento, bem como da correlação entre os dados brutos e as características peculiares de cada ambiente geológico (Feitosa *et al.*, 2008; Driscoll, 1986; Freeze; Cherry, 1979).

Os parâmetros hidrodinâmicos que são usualmente extraídos destes testes são a condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) armazenamento (S) e capacidade específica (Q/s). Segundo Freeze; Cherry (1979) a condutividade hidráulica (K) e a transmissividade (T) descrevem a capacidade do meio em transmitir água sob gradiente de carga, enquanto o

coeficiente de armazenamento (S) expressa a variação volumétrica por unidade de área associada à mudança de carga, ambos são parâmetros centrais para descrever fluxo em aquíferos porosos e fraturados e variam conforme litologia, estrutura e estado de fraturamento, que impõem heterogeneidade e anisotropia em múltiplas escalas.

Em estudos aplicados, ensaios de bombeamento constituem o método mais difundido para estimar T e S sob hipóteses de regime/geométricas bem definidas. A solução clássica de Theis (1935) para aquífero confinado e sua aproximação de tempos tardios proposta por Cooper e Jacob (1946) viabilizam interpretações gráficas e analíticas robustas. Impossibilidades práticas de executar testes ideais demandam cuidado com controle de vazão, estabilização e correção de perdas de carga de poço, além de análise da recuperação, para refinar estimativas (Driscoll, 1986; Kruseman; De Ridder, 1994).

Quando o sistema apresenta fugas através de camadas de baixa permeabilidade (semiconfinamento), a resposta de rebaixamento pode divergir do caso confinado ideal; formulações que incorporam vazamento vertical permitem reconhecer esse comportamento e ajustar as estimativas de T e S (Hantush, 1960). Em aquíferos não livres de efeitos de não-linearidade em tempos iniciais (por exemplo, drenança de poros em aquíferos livres), o enquadramento conceitual deve ser explicitado antes da escolha da solução analítica, evitando-se extrapolações indevidas (Feitosa *et al.*, 2008; Fetter, 2001).

Em meios fraturados, a anisotropia direcional de K e a conectividade de descontinuidades governam o escoamento efetivo; por isso, valores de T estimados em poço único requerem confronto com espessura saturada efetiva e com a geologia estrutural (falhas, fraturas abertas), reconhecendo-se a natureza heterogênea do meio (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001).

A capacidade específica (Q/s) pode ser correlacionada empiricamente com a transmissividade quando o banco de dados é limitado a testes de produção/outorga; tal uso deve vir acompanhado de ressalvas e de verificação de plausibilidade frente a faixas típicas por litotipo (Driscoll, 1986; Kruseman; De Ridder, 1994; Feitosa *et al.*, 2008). De modo geral, compêndios técnicos apresentam intervalos de K e T por materiais (areias/cascalhos, rochas fraturadas, pelitos), úteis como checagem de consistência (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001; Feitosa *et al.*, 2008).

Assim, a determinação confiável de K, T e S resultam da combinação de ensaios bem documentados (bombeamento/recuperação), da interpretação analítica apropriada ao conceito hidroestratigráfico (confinado, semiconfinado, livre), e da validação geológica/estrutural e comparação com faixas de referência, sempre com declaração explícita de limitações e incertezas.

3.3 Fluxo subterrâneo

O fluxo subterrâneo é descrito pela combinação entre a lei de Darcy, que relaciona a vazão específica ao gradiente de carga hidráulica, e a equação de continuidade aplicada a meios porosos que podem ser heterogêneos e anisotrópicos (Darcy, 1856; Bear, 1972; Freeze; Cherry, 1979). A lei de Darcy aplica-se apenas a escoamentos laminares (Feitosa *et al.*, 2008). A carga hidráulica integra componentes de pressão e de posição, e sua distribuição espacial governa a direção e a intensidade médias do escoamento em aquíferos porosos e fraturados (Bear, 1972; Freeze; Cherry, 1979). O potencial hidráulico, no sentido de Hubbert, é uma grandeza mensurável em cada ponto do escoamento e o fluxo ocorre dos pontos de maior para os de menor potencial, independentemente da direção (Feitosa *et al.*, 2008).

A superfície potenciométrica é a representação cartográfica de linhas de igual carga hidráulica e constitui ferramenta central para inferir direções médias de fluxo em escala de aquífero, admitindo, como primeira aproximação, escoamento perpendicular às equipotenciais no sentido de cargas decrescentes (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001). A compreensão da potenciométrica envolve três conceitos: superfície potenciométrica, superfície equipotencial e linha equipotencial. Superfície potenciométrica é o lugar geométrico dos pontos que marcam as alturas potenciométricas de um aquífero, referidas a uma dada profundidade. Em aquíferos livres, as superfícies potenciométricas descrevem aproximadamente a superfície freática e possuem representação real (Feitosa *et al.*, 2008).

As superfícies equipotenciais e as linhas de fluxo completam a leitura do campo de cargas. Superfícies equipotenciais são superfícies virtuais do aquífero, nas quais todos os pontos possuem o mesmo potencial hidráulico, isto é, a mesma carga hidráulica. Em meios porosos homogêneos e isotrópicos, as equipotenciais interceptam ortogonalmente as linhas de fluxo. A linha equipotencial corresponde à projeção, em planta, da intersecção de uma superfície potenciométrica com um plano de cota potenciométrica definida. As projeções dessas

intersecções para diferentes cotas formam o conjunto de linhas equipotenciais conhecido como mapa potenciométrico (ou mapa de fluxo subterrâneo). Uma superfície potenciométrica horizontal pode indicar igualdade de cargas no nível de referência e, assim, ausência de fluxo subterrâneo. Quando há componente vertical de fluxo, interpretações e cálculos baseados apenas em superfícies potenciométricas podem produzir erros significativos (Feitosa *et al.*, 2008).

A construção de um mapa potenciométrico requer que as medidas de nível d'água sejam referidas a um mesmo *datum* altimétrico e agrupadas por unidade aquífera, evitando misturar observações de sistemas distintos (Fetter, 2001). As cargas hidráulicas (ou potenciais hidráulicos) são expressas em metros acima de um referencial e também são chamadas de cotas potenciométricas. O referencial adotado costuma ser o nível do mar, embora outro referencial possa ser utilizado (Feitosa *et al.*, 2008). A sincronia temporal das medições é determinante, pois variações sazonais e perturbações transitórias, como bombeamentos, podem distorcer o campo de cargas; por isso, campanhas sinóticas ou séries ajustadas a um período comum são recomendáveis (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 2001). Procedimentos por imagens podem apresentar erro inferior a 5 m nos casos relatados e são viáveis e econômicos para obter cotas das bocas dos poços em diversas situações (Feitosa *et al.*, 2008).

O contorno da superfície de carga exige critérios de interpolação compatíveis com a densidade e a distribuição espacial dos dados, com reconhecimento da incerteza associada a lacunas de amostragem e a tendências estruturais do aquífero (De Marsily, 1986; Fetter, 2001). Métodos determinísticos e geoestatísticos podem ser aplicados para estimar superfícies contínuas a partir de pontos discretos, desde que as hipóteses sobre continuidade espacial e anisotropia sejam explicitadas e testadas frente ao contexto geológico (De Marsily, 1986). Independentemente do método, a coerência entre o contorno resultante e a arquitetura hidroestratigráfica mapeada deve ser verificada como parte do controle de qualidade (Fetter, 2001).

O mapa potenciométrico permite derivar gradientes hidráulicos e identificar zonas de recarga e descarga coerentes com a compartimentação hidroestratigráfica e com os limites hidráulicos do sistema (Freeze; Cherry, 1979). A diferença de cargas ($h_1 - h_2$), dividida pelo comprimento do trajeto (L), define a taxa de perda de carga por unidade de percurso, denominada gradiente hidráulico (Feitosa *et al.*, 2008). Redes de fluxo formadas por linhas de corrente e equipotenciais aproximadamente ortogonais oferecem visualização qualitativa do escoamento

e apoiam verificações de consistência entre geologia, topografia e padrões de nível d'água (Fetter, 2001). Em bacias com relevo contrastado, a distribuição de cargas pode refletir sistemas de fluxo local, intermediário e regional, condicionados pela relação entre topografia, permeabilidade e geometria do aquífero (Tóth, 1963).

A interpretação do mapa deve considerar condições de contorno plausíveis: rios e lagos com controle hidráulico podem atuar como limites de carga aproximadamente constante; divisores topográficos e estruturas de baixa permeabilidade podem funcionar como limites de fluxo nulo; e zonas de troca difusa podem ser representadas por condições proporcionais ao desnível hidráulico (Fetter, 2001; Reilly; Harbaugh, 2004). A identificação explícita desses limites reforça a rastreabilidade do quadro conceitual e previne inferências espúrias sobre direcionamento e fechamento de balanços (Reilly; Harbaugh, 2004).

3.4 Balanço hídrico

O balanço hídrico decorre do princípio da conservação de massa, no qual a diferença entre entradas e saídas corresponde à variação do armazenamento do sistema. Em bacias hidrográficas, essa formulação é conveniente porque permite tratar a precipitação como principal entrada e quantificar a descarga no exutório. Na prática, a equação torna-se o balanço entre precipitação, evapotranspiração, escoamentos afluentes/efluentes e variação de armazenamento (Feitosa *et al.*, 2008).

A execução do balanço exige coleta, seleção e análise de dados climáticos e hidrológicos com qualidade e cobertura compatíveis com a escala e os objetivos do estudo. Em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), os dados são organizados em camadas temáticas (precipitação, geologia, drenagem, modelos digitais de elevação, aquíferos, pontos d'água) e vinculados a uma localização conhecida na superfície, possibilitando sobreposição e relacionamento espacial/topológico. O geoprocessamento, apoiado por SIG, integra dados de múltiplas fontes e viabiliza análises complexas para suporte à decisão, além de favorecer a automação de tarefas e a difusão dos resultados (Feitosa *et al.*, 2008).

Para a precipitação média areal, a literatura cartográfica emprega isoietas e polígonos de Thiessen, sendo as isoietas precisas quando bem executadas e com rede adequada de postos. A estimativa por isoietas decorre de uma combinação ponderada das áreas entre curvas de igual

precipitação, constituindo insumo direto para a entrada do balanço espacializado (Feitosa *et al.*, 2008).

Um dos principais desafios na estimativa do balanço hídrico das águas subterrâneas é lidar com as incertezas nas taxas de entrada e saída, decorrentes de diversas propriedades climáticas e do solo, assim como da natureza complexa do movimento da água tanto na superfície quanto nos sistemas subterrâneos (Crosbie *et al.*, 2018). A taxa de recarga das águas subterrâneas é um componente crucial nos estudos de balanço hídrico, pois indica a presença de recursos hídricos renováveis (Thivya *et al.*, 2016).

A recarga de água tanto pelo solo saturado quanto pelo não saturado é influenciada por diversos fatores, como topografia, geologia, vegetação e clima. Nas regiões próximas à rede de drenagem, que representam as áreas mais úmidas das bacias hidrográficas, observa-se um aumento nos fluxos hidrológicos de superfície, como evaporação e escoamento (Kim *et al.*, 1999). Por outro lado, em áreas com topografia mais suave ou plana, o escoamento é mínimo e a infiltração da chuva é mais intensa. Isso resulta em uma profundidade variável do lençol freático devido à capacidade de infiltração que varia em paisagens complexas (Izbicki, 2002).

A interpretação do hidrograma fornece informações sobre a partição do escoamento e os volumes restituídos pelos aquíferos à rede de drenagem, permitindo isolar a descarga de base. A forma da hidrógrafa responde, entre outros fatores, à intensidade e duração da chuva, à taxa/volume de infiltração e ao déficit hídrico do solo, condicionando a contribuição relativa dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo (Feitosa *et al.*, 2008). Revisões metodológicas recomendam selecionar técnicas de recarga compatíveis com a escala e os objetivos (por exemplo, balanço, flutuação do nível freático, traçadores, modelagem), com hipóteses e limitações explicitadas (Scanlon; Healy; Cook, 2002).

Na terminologia de águas subterrâneas, “reservas” referem-se a volumes armazenados, ao passo que “recursos” correspondem a descargas ou vazões. Essa distinção decorre de que exploração e recarga ocorrem a uma taxa temporal, caracterizando recursos como fluxos. A avaliação de recursos renováveis pode usar variações sazonais de níveis potenciométricos, análise de recessão de cursos d’água e interpretação do mapa potenciométrico (também referido como mapa de fluxo), consoante disponibilidade e escala dos dados (Feitosa *et al.*, 2008). Em termos

conceituais, os métodos de balanço tratam a recarga como produto quando os demais termos são estimados independentemente (Healy, 2010).

A recarga subterrânea é descrita como o processo pelo qual a água se move em direção à zona saturada sob influência das forças gravitacionais ou por condicionamento hidráulico específico, representando a quantidade que aumenta a reserva permanente ou temporária do aquífero; quando temporária, é usualmente considerada reserva reguladora ou renovável e, em geral, explorável (Vasconcelos, 1999).

O Sistema de Informação Geográfica tem sido amplamente utilizado na estimativa de recarga com diferentes métodos e técnicas, permitindo considerar a distribuição espacial e temporal dos fatores controladores e realizar cálculos cartográficos de maneira eficiente (Machiwal; Jha, 2015). Nesse contexto, o SIG destaca-se como ferramenta que integra geoprocessamento e geração de mapas temáticos, potencializando a estimativa de recarga (Baalousha; Bath; Ramasomanana, 2018).

No enquadramento SIG, a espacialização dos termos do balanço por álgebra de mapas e a integração de camadas (clima, relevo, geologia/solos, uso e cobertura, drenagem, piezometria) produzem superfícies compatíveis com a compartimentação hidroestratigráfica e com os limites de bacias e sub-bacias. O uso de bancos geoespaciais e de identificadores únicos de feições favorece padronização, rastreabilidade e difusão de resultados (Feitosa *et al.*, 2008).

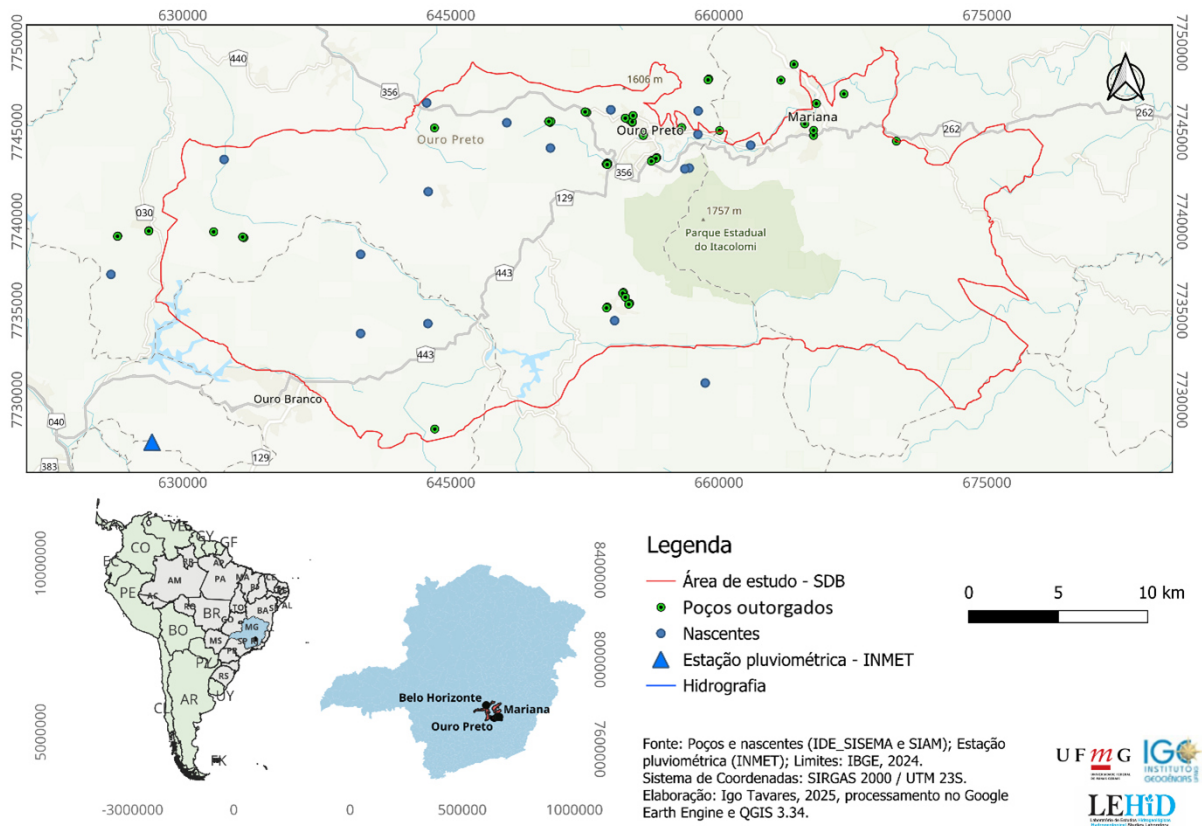
Após estimar a recarga no período de referência, a determinação da reserva renovável (no sentido de recurso anual do aquífero) consiste em integrar espacialmente essa recarga sobre a área de ocorrência/afloramento de cada unidade hidroestratigráfica, obtendo-se um volume por unidade de tempo reportável por unidade e por bacia, procedimento consagrado na tradição ibérica de avaliação de recursos descrita por Custódio e Llamas (1983). Para evitar ambiguidade terminológica, distingue-se recurso renovável (fluxo anual associado à recarga efetiva) de reserva (volume armazenado no aquífero), devendo os resultados de disponibilidade anual serem apresentados como fluxos e não como estoques. A operacionalização moderna faz uso de SIG para somar/agregar a recarga mapeada por polígonos de unidades e sub-bacias (álgebra de mapas e estatística zonal), garantindo rastreabilidade e coerência espacial dos totais anuais (Feitosa *et al.*, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Banco de dados e consistência dos dados básicos

O banco de dados utilizado neste estudo foi estruturado de forma a atender a sequência metodológica definida para o trabalho, contemplando inicialmente a definição das unidades hidroestratigráficas, seguida da caracterização das propriedades hidrodinâmicas, da modelagem hidroestratigráfica, por fim, dos insumos necessários às análises de fluxo e ao balanço hídrico. Para a caracterização hidrodinâmica, reuniram-se informações provenientes de instrumentos hídricos constantes em processos de outorga e cadastros institucionais. Foram extraídos dados do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento de Minas Gerais (SEMAD), Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), conforme demonstrado na Figura 4 e na íntegra no Apêndice A. Incluindo coordenadas geográficas, cota de referência, profundidade total, nível estático, nível dinâmico, vazão bombeada, duração do teste e condições de realização. Essa base serviu de entrada para as interpretações com soluções analíticas clássicas, garantindo que apenas ensaios com metadados completos e confiáveis fossem incluídos. No Apêndice B encontra-se os dados completos dos testes bombeamento reinterpretados nesta pesquisa.

Figura 4 – Instrumentos hidrogeológicos e hidrológicos levantados na área de estudo e suas adjacências.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a definição das unidades hidroestratigráficas e construção do modelo geométrico hidroestratigráfico, foram integrados dados cartográficos e estruturais. O mapa geológico regional, em escala 1:150.000, foi obtido de Endo *et al.* (2019), constituindo a base para a compartimentação litoestrutural do Sinclinal Dom Bosco e para a identificação de limites estratigráficos e estruturais relevantes. As feições estruturais, como falhas e dobras, foram digitalizadas e georreferenciadas a partir dessa base e de camadas auxiliares de interpretação de relevo derivadas do ALOS PALSAR RTC (12,5 m), fornecido pela ASF/NASA, assegurando compatibilidade espacial com os índices geomorfológicos utilizados.

As informações de solos foram extraídas do Mapa de Solos de Minas Gerais, na escala 1:500.000 (FEAM/UFV/UFLA/CETEC), compatível com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). Essa base permitiu a parametrização de propriedades físicas e a associação com a condutividade hidráulica saturada. O uso e cobertura da terra foi mapeado a partir de imagens Sentinel-2A (10 m), mantendo-se a classificação

original utilizada no projeto para assegurar coerência com o fator C e com as parametrizações hidrogeológicas/hidrológicas subsequentes.

Para os insumos climáticos e hidrológicos, a precipitação média anual recente foi obtida do CHIRPS v2 (0,05°), referência primária para a climatologia 2000–2024, conforme documentação técnica e avaliação metodológica apresentadas por Funk *et al.* (2015). A climatologia de longo termo e a estrutura orográfica de grande escala foram ancoradas no *WorldClim* v2 (BIO12, ~1 km, ref. 1970–2000), seguindo as orientações de geração de superfícies climáticas de Fick e Hijmans (2017). O refinamento topográfico local utilizou o SRTM GL1 v003 (30 m) como variável explicativa na etapa geoestatística (regression-kriging), conforme uso consolidado descrito por Farr *et al.* (2007). A evapotranspiração real média anual foi derivada do produto PML-V2/MODIS (500 m; composições de 8 dias, 2002–2019), que acopla Penman–Monteith–Leuning à produtividade primária líquida e particiona a evapotranspiração real (ET_r) em transpiração, evaporação do solo e evaporação de interceptação, conforme Zhang *et al.* (2019).

As séries observacionais do INMET (estações meteorológicas) e da Agência Nacional de Águas (ANA/Hidroweb, para pluviometria) foram utilizadas para calibração multiplicativa dos campos de precipitação derivados de satélite, empregando interpolação IDW de fatores de ajuste calculados individualmente para cada estação e limitados aos percentis 5–95 para mitigação de *outliers*.

Todos os dados foram reprojatados para SIRGAS 2000 / UTM 23S. O processamento foi realizado no QGIS 3.34, com registro de dos dados para reprodutibilidade.

Tabela 1 -Fontes e metadados do banco de dados utilizado neste estudo.

Tipo	Produto/escala	Período/Resolução	Uso neste estudo	Referência principal
Precipitação	CHIRPS v2 (0,05°)	2000–2024, diário	Climatologia de P; base da regressão-kriging	Funk <i>et al.</i> (2015)
Climatologia	WorldClim v2 (BIO12, ~1 km)	1970–2000	Âncora climatológica para P	Fick; Hijmans (2017)
Altimetria	SRTM GL1 v003 (30 m)	Contínuo	Preditor altimétrico (regression-kriging)	Farr <i>et al.</i> (2007)
ET _r	PML-V2/MODIS (500 m)	2002–2019	Superfície ET _r média anual	Zhang <i>et al.</i> (2019)
MDE	ALOS PALSAR RTC (12,5 m)	Contínuo	Derivação geomorfológica e compatibilização	ASF/NASA

Tipo	Produto/escala	Período/Resolução	Uso neste estudo	Referência principal
Geologia	Mapa geológico QF (1:150.000)	—	Base para UHs e 3D	Endo <i>et al.</i> (2019)
Solos	Mapa de Solos de MG (1:500.000)	—	Insumos hidrológicos e PF	FEAM/UFV/UFLA/CETEC
Uso/Cobertura	Sentinel-2A (10 m)	2020–2024	Fator C e insumos de RF	—
Observado	INMET; ANA/Hidroweb	variado	Calibração/controle	INMET; ANA
Poços/outorgas	IGAM; SIAGAS/CPRM; IDE-SISEMA	2005 - 2024	Propriedades hidrodinâmicas	IGAM; SIAGAS/CPRM IDE-SISEMA

4.2 Avaliação hidrodinâmica

4.2.1 Definição das unidades hidroestratigráficas

As unidades hidroestratigráficas foram definidas neste estudo partindo do princípio do entendimento clássico de que aquíferos são formações ou grupos de formações geológicas capazes de armazenar e transmitir a água em quantidades suficiente para aproveitamento, ao passo que os aquíferos são unidades de baixa permeabilidade que armazenam e transmitem lentamente, os aquíferos armazenam mas não transmitem de forma significativa e aquíferos não armazenam nem transmitem, distinções conceituais estabelecidas na literatura de referência em hidrogeologia (Freeze; Cherry, 1979; Todd; Mays, 2005).

Com vistas a sintetizar os valores orientadores para a classificação das unidades segundo a sua produtividade, elaborou-se a Tabela 2 a partir de CPRM (2022). Nessa tabela, apresentam-se intervalos usuais de permeabilidade e de vazão, acompanhados das respectivas classes de produtividade (CPRM, 2022). Para orientar a leitura dos resultados, utilizaram-se faixas típicas de condutividade hidráulica (K), transmissividade (T), vazão (Q) e capacidade específica (Q/s). Como não se dispunha de séries completas de rebaixamento/recuperação que permitissem estimar com robustez T e S, adotou-se a classificação de produtividade proposta por Diniz (2012) e utilizada pela CPRM (2022), conforme sintetizado na Tabela 2, a qual organiza os aquíferos em classes a partir de intervalos de Q e Q/s e permite comparação direta com os registros de outorga.

Tabela 2 - Classes das unidades hidroestratigráficas com base na sua produtividade.

Classe	Q (m ³ /h)	Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	Produtividade
(1)	$Q \geq 100$	$Q/s \geq 4,00$	$T \geq 10^{-2}$	$K \geq 10^{-4}$	Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destaquem em âmbito nacional.
(2)	$50 \leq Q < 100$	$2,00 \leq Q/s < 4,00$	$1,0 \times 10^{-3} \leq T < 1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-5} \leq K < 1,0 \times 10^{-4}$	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.
(3)	$25 \leq Q < 50$	$1,00 \leq Q/s < 2,00$	$1,0 \times 10^{-4} \leq T < 1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-6} \leq K < 1,0 \times 10^{-5}$	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades e irrigação em áreas restritas.
(4)	$10 \leq Q < 25$	$0,40 \leq Q/s < 1,00$	$1,0 \times 10^{-5} \leq T < 1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-7} \leq K < 1,0 \times 10^{-6}$	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.
(5)	$1 \leq Q < 10$	$0,04 \leq Q/s < 0,40$	$1,0 \times 10^{-6} \leq T < 1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-8} \leq K < 1,0 \times 10^{-7}$	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.
(6)	$Q < 1$	$Q/s < 0,04$	$T < 1,0 \times 10^{-6}$	$K < 1,0 \times 10^{-8}$	Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em SGB/CPRM (2022), *Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero*, e Struckmeier e Margat (1995).

A partir desses referenciais, a definição das unidades aquíferas foi realizada através de uma abordagem integrada, combinando informações obtidas do banco de dados levantados de dados de instrumentos hidrogeológicos presentes na área de estudo. Além disso, para suprir eventuais lacunas de conhecimento, que não puderam ser completamente preenchidas pelos dados locais, foram utilizadas informações de estudos anteriores que caracterizaram as propriedades hidrodinâmicas (Silva; Neto; Bertachini, 1994; Mourão, 2007; Guerra, 2010; Schlumberger, 2017; Beato, Monsore e Bertachini, 2017; De Paula *et al.*, 2018;) e unidades aquíferas (Andrade *et al.*, 2025; Magalhães *et al.*, 2022), presentes em megaestruturas semelhantes no Quadrilátero Ferrífero, as quais compartilham características geológicas com o Sinclinal Dom Bosco.

A determinação das propriedades hidrodinâmicas fundamentou-se na reinterpretação de testes de bombeamento obtidos em processos de outorga, integrada a informações construtivas e descrições litológicas dos poços, todos os dados foram padronizados quanto a unidades, verificados quanto ao tempo zero e consistência temporal, e triados para eliminar leituras espúrias antes da análise. Segundo Kruseman; De Ridder (1994) esse procedimento segue recomendações clássicas para análise de ensaios com base no comportamento transiente e no uso criterioso dos trechos interpretáveis das séries observadas.

A capacidade específica (Q/s) foi calculada como parâmetro indicativo da capacidade de produção dos poços, sendo utilizada de forma complementar às estimativas obtidas por métodos transientes e como base comparativa frente a valores documentados em estudos científicos conduzidos em estruturas geológicas adjacentes ao Sinclinal Dom Bosco. Essa abordagem possibilitou uma análise de plausibilidade e robustez relativa dos resultados, alinhada à prática recomendada de confrontar indicadores simplificados com referências regionais para melhor contextualização hidrogeológica (Razack; Huntley, 1991; Kruseman; De Ridder, 1994).

Para a interpretação dos ensaios transientes, adotou-se a formulação analítica de Neuman para aquíferos livres, a qual descreve o fluxo a poços total ou parcialmente penetrantes em meios homogêneos e anisotrópicos incorporando a drenagem gravitacional retardada da superfície freática e o armazenamento elástico da zona saturada. No regime inicial, a resposta se aproxima do comportamento confinado, em tempos intermediários, ocorre a “resposta retardada por gravidade” à medida que a drenagem da zona não saturada se estabelece e, em tempos tardios, o rebaixamento passa a refletir o rendimento específico (Neuman, 1975).

A opção por formulação de Neuman se justifica pelo caráter majoritariamente livre dos poços inventariados na área de estudo, evidenciado nas descrições construtivas e no enquadramento hidroestratigráfico regional uma condição na qual soluções para aquíferos confinados podem não representar adequadamente os testes em aquíferos livres, ao passo que a estrutura de Neuman foi concebida para esse contexto e tem ampla aplicação prática em ferramentas de análise (Neuman, 1975; Halford; Kuniansky, 2002).

Em casos nos quais a inclinação do rebaixamento diminuiu sistematicamente ao longo do tempo, o comportamento foi interpretado à luz da teoria de aquíferos semiconfinados, cuja formulação clássica foi desenvolvida por Hantush e Hantush–Jacob, sem, contudo, derivar parâmetros de fuga quando os dados não oferecem suporte para tanto (Hantush; Jacob, 1955; Hantush, 1960).

A conversão de transmissividade (T) em condutividade hidráulica (K) foi realizada pela relação $K=T/b$, adotando-se b como a espessura saturada efetiva do intervalo produtor definida por integração geológica e dados construtivos (Fetter, 2001). A seleção de b considerou o arcabouço litológico e estrutural descrito para o Sinclinal Dom Bosco, sem extrapolações de natureza hidráulica a partir desses documentos geológicos.

Por fim, as estimativas dos parâmetros hidrodinâmicos interpretados neste trabalho, foram consolidadas por unidade hidroestratigráfica e confrontadas com o enquadramento hidrogeológico regional do Quadrilátero Ferrífero, assegurando coerência entre parâmetros hidráulicos, intervalos produtores e geometria das unidades.

4.2.2 Fluxo subterrâneo

A elaboração do mapa potenciométrico envolveu a integração de diferentes fontes de dados e o uso de ferramentas computacionais para interpolação e modelagem espacial. Inicialmente, consultou-se bases oficiais, como o Sistema Integrado de Informações Ambientais (SIAM) e o IDE-SIDEMA, visando à obtenção de dados de nível estático de poços de monitoramento e produção, mapeamento de nascentes demais instrumentos de controle hídrico.

Em seguida, organizou-se todo o material coletado em planilhas eletrônicas, verificando-se a consistência e a coerência dos dados. Posteriormente, essas informações foram importadas para o QGIS, que serviu como plataforma de integração e tratamento preliminar, incluindo correção de coordenadas e padronização de projeções cartográficas. A partir desse processo inicial, procedeu-se à geração de camadas vetoriais e matriciais que representassem poços, nascentes, curvas de nível e elementos de drenagem.

Na etapa seguinte, empregou-se o software *Leapfrog* para criar um modelo espacial mais detalhado, possibilitando a interpolação dos valores de nível d'água e a geração de superfícies potenciométricas. Esse modelo combinou dados de poços, nascentes e, quando pertinente, estimativas de nível d'água derivadas de elementos topográficos e hidrográficos. A construção da superfície potenciométrica considerou métodos de interpolação adequados à distribuição dos pontos de medição, como *Krigagem*, cuja escolha foi orientada pela variabilidade e quantidade de dados disponíveis.

Após a construção da superfície em *Leapfrog*, exportaram-se os resultados para o QGIS, possibilitando a conversão em linhas equipotenciais. Com a criação dessas linhas, foi possível definir a direção do fluxo subterrâneo e as áreas de recarga e descarga prováveis, sempre confrontando os resultados com as observações dos dados e com a interpretação geológica e estrutural da região. Em casos de discrepâncias ou incongruências, realizaram-se ajustes nos

parâmetros de interpolação ou descartaram-se pontos considerados atípicos, de modo a garantir maior consistência aos resultados obtidos.

Por fim, validou-se o mapa gerado por meio de comparação com níveis de água medidos em poços selecionados, a fim de verificar se as linhas equipotenciais apresentavam coerência com os dados medidos. Foi também realizada uma análise geológica e hidrogeológica para avaliar a plausibilidade das direções de fluxo e a compatibilidade com feições estruturais conhecidas na área. A abordagem desse trabalho segue as recomendações de autores como Freeze e Cherry (1979), Domenico e Schwartz (1990) e Feitosa *et al.* (2008), que enfatizam a importância de integrar múltiplas fontes de informações e checar a qualidade dos resultados por meio de validação e ajustes iterativos. O produto final, consistente com as bases de dados disponíveis, subsidiará a discussão dos resultados e a compreensão do fluxo subterrâneo da região estudada.

4.3 Balanço hídrico

O balanço hídrico é definido como a equação das quantidades de água que entram e saem de uma unidade hidrogeológica em um período específico. Ele segue o princípio da conservação de massa, onde a diferença entre as entradas e saídas de água reflete a variação de armazenamento do sistema. Assim, as relações entre a precipitação, as águas superficiais e subterrâneas que chegam à área (entradas), e a evapotranspiração, escoamento superficial e subterrâneo (saídas), são atribuídas às bacias delimitadas (Feitosa *et al.*, 2008; Healy, 2010; De Paula, 2019).

4.3.1 Recarga

A estimativa espacialmente distribuída da recarga potencial no Sinclinal Dom Bosco foi conduzida em ambiente SIG tomando como arcabouço o balanço hídrico em bacias e a integração multicritério de fatores físico-ambientais. O procedimento adotado combina (i) um termo climático, representado pelo balanço da precipitação média (P) menos a evapotranspiração real (ET_r), derivado de séries remotas com calibração por estações, (ii) um fator de escoamento superficial (RF) que acopla uso/cobertura e controle topográfico (LS), (iii) um fator de percolação (PF) construído a partir da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) parametrizada por lógica fuzzy e, (iv) um fator geológico (GF) que pondera favorabilidade

litológica e densidade de estruturas fraturadas, seguindo o arranjo metodológico aplicado por Costa *et al.* (2019) e estendido para incluir geologia em Tenenwurcel (2021).

Os insumos e fontes primárias utilizados foram organizados para garantir rastreabilidade e reprodutibilidade no QGIS 3.30.3, com toda a base espacial normalizada para SIRGAS 2000 / UTM fuso 23S (EPSG: 31983).

A construção do campo de precipitação anual consistiu em três passos. Primeiro, obteve-se a média recente 2000–2024 do CHIRPS v2, um produto quase global que combina estimativas por infravermelho com dados de pluviômetros, próprio para monitoramento de extremos e climatologias de alta resolução (Funk *et al.*, 2015). A seguir, aplicou-se uma ancoragem climatológica multiplicativa com o WorldClim 2 (BIO12), prática consolidada para compatibilizar padrões de longo prazo a campos recentes de satélite (Fick; Hijmans, 2017). A razão climatológica foi definida por (1):

$$ratio = \frac{P_{WC}}{P_{CHIRPS, clim}} \quad (1)$$

e o campo escalonado por (2):

$$P_{scaled} = P_{CHIRPS} \times ratio \quad (2)$$

Sendo:

$P_{\{CHIRPS, clim\}}$ = Precipitação climatológica do CHIRPS (média histórica);

$P_{\{CHIRPS\}}$ = Precipitação recente do CHIRPS;

$P_{\{scaled\}}$ = Precipitação do CHIRPS ajustada pela razão climatológica;

$P_{\{WC\}}$ = Precipitação do WorldClim (climatologia de longo prazo);

ratio = Fator de correção (relação entre WorldClim e CHIRPS).

Depois, refinou-se a estrutura espacial por regressão com altitude do SRTM GL1 v003, calculando um plano de tendência $P = \alpha + \beta z$ e um residual $\varepsilon = P_{scaled} - \widehat{P}_{1 km}$, o residual foi

reamostrado e adicionado à tendência avaliada sobre o SRTM, etapa equivalente ao esquema de *regression-kriging* (Hengl; Heuvelink; Stein, 2004), com documentação do SRTM em Farr *et al.* (2007). Em que z corresponde à altitude extraída do modelo SRTM, α (alfa) representa o intercepto da regressão, β (beta) o coeficiente associado à variação da precipitação com a altitude, ε (épsilon) o resíduo da regressão e P_{1km} a precipitação estimada no plano de tendência com resolução espacial de 1 km.

A calibração espacial refinada utilizou médias plurianuais em postos INMET/ANA, para cada estação, definiu-se e espacializou-se por ponderação inversa da distância (IDW, $p=2$), técnica originalmente proposta para dados irregulares por Shepard (1968), com limitação aos percentis 5–95 para mitigar valores extremos. Todos os cálculos climáticos observaram a diretriz de que ao menos 80 % do período compoña a normal (WMO, 2017).

Para a calibração espacial aplicou-se IDW ($p=2$) a fatores multiplicativos calculados por estação INMET/ANA, limitados aos percentis 5–95 para mitigar extremos, conforme literatura de SIG (Burrough; McDonnell, 2015). Em termos de consistência externa, o CHIRPS apresenta boa correlação regional com observações e tende a subestimar máximos em áreas montanhosas, mitigável por calibração com pluviômetros (Funk *et al.*, 2015).

Em termos de consistência externa, estudos no sul-sudeste de Minas indicam que o CHIRPS apresenta boa correlação com observações do INMET, embora tenda a subestimar os maiores totais em áreas montanhosas, limitação que é reduzida com calibração via pluviômetros (Funk *et al.*, 2015). A aplicação de fatores multiplicativos derivados de estações INMET/ANA, espacializados por IDW com limitação a percentis, ajustou os valores à realidade medida, preservando o gradiente definido pelo *WorldClim*.

A evapotranspiração real (ETr) foi derivada do PML-V2 aplicado a composições MODIS, agregando-se o período 2002–2019 para médias anuais e posterior interpolação por krigagem ordinária. O PML-V2 acopla o esquema físico de Penman–Monteith–Leuning à produtividade primária via condutância do dossel e particiona a ETr em transpiração, evaporação do solo e evaporação de interceptação, o que aumenta a consistência biofísica em mosaicos serranos (Zhang *et al.*, 2019).

O fator de escoamento superficial (RF) foi obtido pela combinação de um coeficiente de escoamento (C), atribuído por classe de uso/cobertura, com o fator topográfico comprimento-declividade (LS) normalizado por lógica fuzzy. O cálculo do LS empregou o método de Desmet e Govers (1996) implementado no módulo SAGA “*LS Factor*”, reconhecido por representar comprimento efetivo de rampa e declividade em terrenos complexos. Para comparação metodológica e parâmetros regionais, tomou-se como referência também Panagos *et al.* (2015). A expressão aplicada foi (3):

$$RF = 1 - (C + LS_{Fuzzy}) \quad (3)$$

Onde:

RF = fator de escoamento superficial;

C = coeficiente de escoamento superficial;

LS Fuzzy = fator LS ajustado entre 0 e 1 adotando lógica fuzzy.

A Tabela 3 apresenta os coeficientes C adotados por classe na área de estudo. Os valores derivam de faixas clássicas para o Método Racional (ASCE/WEF, Manual of Practice nº 37, 1969; Haan *et al.*, 1994), harmonizados às categorias mapeadas no Sinclinal Dom Bosco e compatíveis com valores empregados por Costa *et al.* (2019) e Tenenwurcel (2021) em Minas Gerais.

Tabela 3 - Coeficientes de escoamento superficial (C) por classe de uso/cobertura.

Classe de uso/cobertura	C (adim.)	Fontes adotadas
Floresta nativa / Mata	0,15	ASCE/WEF (1969)
Cerradão / Campo arborizado	0,50	Tenenwurcel (2021)
Silvicultura (Eucalyptus/Pinus)	0,14	Tenenwurcel (2021)
Pastagem extensiva	0,35	ASCE/WEF (1969)
Solo exposto	0,7	Tenenwurcel (2021)
Área urbanizada	0,85	Tenenwurcel (2021)

Área antropizada	0,6	Tenenwurcel (2021)
Formação rochosa	0,75	Tenenwurcel (2021)

O LS numérico calculado sobre o MDE ALOS PALSAR (12,5 m) foi convertido para LS_{Fuzzy} por normalização linear no intervalo [0,1], conforme prática de padronização em modelos ambientais que alimentam índices compostos. Sobre a qualidade do MDE, empregaram-se produtos Radiometricamente Corrigido pelo Terreno (RTC) em GeoTIFF com correções geométricas e radiométricas padronizadas, conforme guias do ASF/DAAC (NASA EARTHDATA/ASF, 2015–2024).

O fator de percolação (PF) parte da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), compilada por classe de uso/cobertura e por classe de solo, e transformada para escala adimensional [0,1] por lógica fuzzy. A decisão metodológica foi privilegiar o K_{sat} como variável de primeira ordem para representar a facilidade de transporte vertical no perfil, aderente às recomendações para estudos de reconhecimento em hidrogeologia (Feitosa *et al.*, 2008). O índice adotado de acordo com a fórmula (4):

$$PF = PUC_{Fuzzy} \times K_{S_{Fuzzy}} \quad (4)$$

Em que a nota do parâmetro PUC_{Fuzzy} corresponde às notas do parâmetro de Recarga Hídrica obtidas pelo método PUC, ajustadas para uma escala adimensional variando entre 0 e 1. Essa normalização segue a abordagem proposta por Costa *et al.* (2019) e Tenenwurcel *et al.* (2020), permitindo a compatibilização do parâmetro com a lógica fuzzy e sua integração ao cálculo do fator de percolação.

$K_{S_{Fuzzy}}$ (adimensional) é a condutividade hidráulica do solo ajustada para uma faixa de 0 a 1 através da lógica fuzzy, quanto mais próximo de 1, maior será a condutividade hidráulica do solo na classe específica (Costa *et al.*, 2019).

A Tabela 4 apresenta os valores de K_{sat} utilizados como referência neste estudo.

Tabela 4 - Condutividade hidráulica saturada (Ksat) em mm h⁻¹ e nota PUC adotada, e seus respectivos ajustes por lógica fuzzy.

Classe de uso/solo	Ksat	PUC	Valor Fuzzy
Área antropizada ¹	4,02	-	0,2
Floresta plantada ¹	11,43	-	0,6
Floresta nativa (natural) ¹	17,11	-	0,9
Vegetação savânica ¹	7,70	-	0,4
Formação rochosa ¹	2	-	0,1
Solo exposto ¹	1,5	-	0,07
Estradas pavimentadas / Área urbana ¹	1,00	-	0,05
Corpos hídricos ¹	0,00	-	0,00
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) ¹	-	4,3	0,9
Latossolo Vermelho (LVd) ¹	-	4,3	0,9
Neossolo Regolítico (RRd) ¹	-	2,7	0,08
Cambissolo Háplico Distrófico (CXbd) ¹	-	3	0,2
Cambissolo Háplico Eutrófico (CXbe) ¹	-	3	0,2

Notas: (i) valores convertidos para mm h⁻¹ quando da transformação fuzzy e reescalados para [0,1]; (ii) outliers recortados no P95.

Fonte: ¹ Tenenwurcel (2021)

A inclusão do controle geológico seguiu o racional de vulnerabilidade hidrogeológica e fraturamento do método DRASTIC, no qual maior densidade de fraturas e maior permeabilidade litológica tendem a intensificar a circulação e a vulnerabilidade do aquífero (Aller *et al.*, 1987). Assim, definiu-se o fator geológico como a média das notas litológicas e das notas de densidade de fraturas, com posterior normalização para [0,1], sendo calculado pela fórmula (5):

$$GF = \left(\frac{Notas_{lito} + Notas_{fraturas}}{2} \right)_{Fuzzy} \quad (5)$$

Onde: GF é o fator geológico, $Notas_{lito}$ são as notas de 1 a 10 adotadas ao litotipos da bacia e $Notas_{fraturas}$ são as notas de 1 a 10 adotadas as densidades de falhas na bacia e Fuzzy são os resultados da média ponderada ajustada entre valores de 0 e 1 sob lógica fuzzy

Para as unidades hidroestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero presentes no Sinclinal Dom Bosoco, aplicaram-se notas fuzzy de favorabilidade baseadas em faixas dominantes de

permeabilidade reportadas para os aquíferos Cauê, Gandarela, Moeda, Itacolomi e Sabará/Piracicaba, definidas neste estudo e em congruência com sínteses regionais que indicam condutividades mais elevadas no Cauê e menores para as rochas das formações Piracicaba e Sabará (Mourão, 2007; Magalhães *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2025).

Tabela 5 - Notas litológicas para favorabilidade de recarga já normalizadas em escala fuzzy.

Unidade litológica	Nota fuzzy (adim.)	Motivo / faixa dominante
Grupo Itacolomi	0,4	K moderado; produtividade localmente limitada.
Grupos Sabará/Piracicaba	0,1	Aquitardos regionais de baixa permeabilidade
Formação Gandarela	0,4	Sistema fissuro cárstico heterogêneo; K variável.
Formação Cauê	0,76	Condutividades elevadas reportadas no QF; porosidade secundária/fraturamento.
Formação Moeda	0,3	Meio fraturado com K típico menor que Cauê.

A rede de estruturas foi compilada a partir de bases CODEMIG/CPRM e sobre referência cartográfica de Endo *et al.* (2020), reprojeta para EPSG: 31983 e filtrada para falhas/fraturas. A densidade (km km^{-2}) foi estimada por janela móvel de raio 1 km e normalizada pelo máximo local, em seguida categorizada conforme intervalos da Tabela 6.

Tabela 6 - Densidade de fraturas (km km^{-2}) e notas.

Intervalo km km^{-2}	Nota
< 0,18	2
0,18 – 0,48	3
0,48 – 0,79	4
0,79 – 1,15	5
> 1,15	6

Com os fatores construídos, a recarga potencial foi calculada célula-a-célula como:

$$RPot = [(P - ETr) \times RF \times PF \times GF] \quad (6)$$

Onde: RPot - potencial de recarga aquífera (mm/ano); P - precipitação média anual (mm/ano); ETr - evapotranspiração real média anual (mm/ano); RF - fator escoamento superficial; PF - fator de percolação; GF - fator geológico.

A distribuição espacial resultante foi, então, integrada por unidade hidroestratigráfica (UH) mediante estatística zonal, produzindo para cada UH a área (km²), o RPot médio e a recarga total anual em porcentagem. A participação relativa de cada UH foi obtida por (7):

$$\%Recarga_{UH} = \frac{\sum(RPot \times \text{Área}_{\text{célula}})}{\sum_{\text{bacia}}(RPot \times \text{Área}_{\text{célula}})} \times 100 \quad (7)$$

procedimento de integração espacial coerente com a estatística de áreas em hidrogeologia regional.

Do ponto de vista de controle de qualidade e reprodutibilidade, manteve-se conformidade espacial (extensão, projeção e resolução) entre todos os grids, verificou-se o domínio [0,1] de LSfuzzy, RF, PF, GF e registraram-se dados de processamento. Limitou-se a calibração pluviométrica à aplicação de fatores multiplicativos IDW (p=2), estratégia direta e transparente que preserva o gradiente orográfico introduzido por WorldClim e SRTM (Fick; Hijmans, 2017; Farr *et al.*, 2007). Em termos de consistência externa, estudos no Sudeste brasileiro relatam boa correlação do CHIRPS com postos de superfície e desempenho comparável ao TRMM, com tendência de subestimativa em áreas montanhosas mitigável por calibração com pluviômetros, conforme caracterização metodológica em Funk *et al.* (2015).

Por fim, destaca-se que a parametrização hidrogeológica está ancorada nas definições calculadas e definidas neste trabalho e em consonância com sínteses hidrogeológicas do Quadrilátero Ferrífero, nas quais o Aquífero Cauê apresenta maiores condutividades e taxas relativas de recarga quando comparado a Gandarela e Moeda, ao passo que as unidades Sabará/Piracicaba funcionam como unidades poucos produtivas ou não aquíferas, o que respalda as notas da Tabela 4 na escala fuzzy adotada.

4.4 Modelo dos sistemas aquíferos

A definição da geometria das unidades aquíferas foi realizada com base em perfis litológicos provenientes de prospecções geológicas, mapas e perfis geofísicos, além de mapas isopacos e de contorno estrutural. Segundo CPRM (2018) a partir dessas fontes de informação, é possível determinar a geometria do aquífero, identificando características como profundidades, estreitamentos, espessuras, aprofundamentos, alargamentos, entre outros.

De acordo com as informações e metodologia esculpida neste trabalho e no mapa do Quadrilátero Ferrífero proposto por Endo *et al.* (2019) em escala de 1:150.000, além da definição das unidades aquíferas, foram elaborados 14 perfis ao longo da área de estudo, sendo 10 deles predominante N-S de forma a projetar perpendicularmente as rochas dessa estrutura que ocorrem, em sua maioria, como corpos alongados na direção E-W. Além disso foi feito também mais 4 perfis cortando a área na direção E-W de forma a representar e proporcionar maior visualização aquelas estruturas não passíveis de serem representadas nos demais perfis, uma vez que na extremidade leste do Sinclinal Dom Bosco os corpos rochosos apresentam inflexão, passando a apresentar direção majoritária NW-SE ou N-S. Os perfis na integra estão apresentados no Apêndice C.

A partir dessas seções, foi possível desenvolver um modelo tridimensional dos sistemas aquíferos definidos neste trabalho, com o objetivo de obter as dimensões físicas das unidades hidroestratigráficas delineados na área de estudo, proporcionando uma maior robustez ao modelo hidrogeológico conceitual. O modelo hidroestratigráfico da área foi elaborado utilizando o software *Leapfrog Geo* versão 2023.2.1, empregando a metodologia de modelagem implícita.

Para a construção do modelo, foram utilizados 3 elementos: O mapa geológico da área em escala de 1:150.000, os perfis transversais e longitudinais previamente desenhados e as linhas (e pontos), como elementos principais da modelagem. O fluxograma abaixo (Figura 5) mostra o procedimento utilizado na modelagem numérica.

Figura 5 - Fluxograma de trabalho que foi seguido para elaboração do modelo geológico.



Fonte: Elaborado pelo autor

A adoção da modelagem implícita proporciona aos modeladores a oportunidade de dedicar mais tempo à reflexão e análise das características geológicas. Esse método elimina a trabalhosa tarefa manual ao empregar ferramentas matemáticas para derivar o modelo a partir dos dados disponíveis. Um modelo matemático é então desenvolvido, permitindo a visualização dos

diversos aspectos dos dados em três dimensões. O *Leapfrog Geo* utiliza o algoritmo *FastRBF™*, baseado em funções de base radial, que utiliza os dados e parâmetros fornecidos pelo geólogo para derivar uma série de variáveis a serem incorporadas ao modelo. Tanto variáveis discretas, como litologias, quanto variáveis contínuas, como teores de minério, podem ser eficientemente modeladas, proporcionando uma representação mais precisa e detalhada da realidade geológica (*Leapfrog, 2024*).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação hidrodinâmica

5.1.1 Unidades Hidroestratigráficas

As unidades hidroestratigráficas da área de estudo foram classificadas de acordo com suas propriedades produtivas, a partir de suas características litológicas e hidrogeológicas. Essa classificação considerou os dados produzidos pelos ensaios interpretados e pelas análises realizadas neste trabalho, bem como informações complementares provenientes de caracterizações hidrogeológicas em estruturas adjacentes ao Sinclinal Dom Bosco, no Quadrilátero Ferrífero. Essa integração permitiu definir as principais unidades aquíferas representativas da área de estudo, que fundamentam a análise comparativa e a discussão das propriedades hidrodinâmicas. Essas unidades, com seus respectivos parâmetros levantados, estão sistematizadas na Tabela 7 a seguir.

A partir da análise dos ensaios de bombeamento escalonado e de vazão constante, além da sistematização dos dados de poços presentes no Sinclinal Dom Bosco e em áreas adjacentes, calcularam-se as propriedades hidrodinâmicas das principais unidades hidrogeológicas. Os parâmetros determinados incluem a condutividade hidráulica (K), a transmissividade (T), o coeficiente de armazenamento (S) e a capacidade específica (Q/s). A interpretação desses parâmetros foi realizada com a formulação de Neuman, uma vez que os poços avaliados, em sua maioria, representam condição de aquífero não confinado, sendo assim a formulação que apresentou melhor ajuste. Complementando os dados gerados neste trabalho, procedeu-se à comparação com parâmetros hidrodinâmicos reportados na literatura para as mesmas unidades hidroestratigráficas em estruturas adjacentes ao Sinclinal Dom Bosco.

Tabela 7 – Propriedades hidrodinâmicas calculadas neste trabalho e de levantadas das unidades hidrogeológicas definidas neste estudo, através de dados de estruturas do Quadrilátero Ferrífero, adjacentes ao Sinclinal Dom Bosco.

Unidades Hidroestratigráficas	Grupo	Formação	K (m/s)	T (m ² /s)	S	Capacidade específica (m ³ /h/m)
Aquífero Aluvionar: depósitos aluviais rasos, de porosidade intergranular elevada; atuam, em geral, como aquíferos livres, com alta capacidade de armazenamento e distribuição pontual/heterogênea no QF.	-	-	5×10^{-4} a 5×10^{-2} ⁽³⁾	-	-	-
Aquífero Itacalomi: aquífero fissurado desenvolvido em quartzitos e metaconglomerados; predominantemente livre (podendo ocorrer trechos semiconfinados), heterogêneo e anisotrópico, com produtividade condicionada às fraturas.	Grupo Itacalomi	Formação pico do Itacolomi e Florália	5×10^{-6} a 5×10^{-4} ⁽⁵⁾	$4,37 \times 10^{-6}$ ⁽⁹⁾	-	0,1 a 6,98 ⁽⁹⁾ 5 ⁽⁸⁾
Aquífero Sabará/Piracicaba: conjunto dominado por filitos, xistos e outras rochas pelíticas/turbidíticas finas, de baixa permeabilidade; atua como aquífero regional e pode confinar localmente os aquíferos do Itabira.	Sabará e Piracicaba	Formação Catarina Mendes, Saramenha e Córrego do Germano	-	$2,43 \times 10^{-6}$ a $8,26 \times 10^{-6}$ ⁽⁹⁾ $1,1 \times 10^{-6}$ ⁽⁴⁾	-	0,03 a 2,6 ⁽⁹⁾ 0,04 a 0,58 ⁽⁸⁾
Aquífero Gandarela: sistema fissural com trechos cársticos nos dolomitos da Formação Gandarela; usualmente livre, mas localmente confinado por níveis argilosos; fortemente heterogêneo e anisotrópico.	Itabira	Gandarela	1×10^{-7} a 9×10^{-6} ⁽³⁾ $3,35 \times 10^{-8}$ a $1,69 \times 10^{-7}$ ⁽⁷⁾ 4×10^{-9} a 8×10^{-6} ⁽⁸⁾ 1×10^{-9} a 1×10^{-6} ⁽¹⁾ 1×10^{-6} ⁽²⁾	1×10^{-4} ⁽³⁾ $1,16 \times 10^{-6}$ a $1,51 \times 10^{-5}$ ⁽⁷⁾ 2×10^{-6} ⁽⁸⁾ $7,7 \times 10^{-3}$ ⁽⁹⁾	$3,87 \times 10^{-8}$ a $1,78 \times 10^{-1}$ ⁽⁷⁾ 8×10^{-5} a 5×10^{-1} ⁽⁸⁾ $3,09 \times 10^{-9}$ a 5×10^{-1} ⁽⁷⁾ 5×10^{-13} a 9×10^{-1} ⁽⁸⁾	0,2 ⁽⁹⁾ 2,8 ⁽³⁾ 1 a 31,36 ⁽⁹⁾
Aquífero Cauê: aquífero em itabiritos/hematitas com dupla porosidade (intergranular na zona alterada e fraturada em profundidade); em geral livre a localmente confinado e de alta condutividade hidráulica no contexto do QF.	Itabira	Cauê	$1,5 \times 10^{-4}$ a 1×10^{-6} m/s ⁽⁵⁾ $2,4 \times 10^{-8}$ a $5,62 \times 10^{-6}$ ⁽⁷⁾ 3×10^{-10} a 2×10^{-2} ⁽⁸⁾	$8,34 \times 10^{-7}$ a $1,62 \times 10^{-4}$ ⁽⁷⁾ 4×10^{-9} a 3×10^{-1} ⁽⁸⁾		
Aquífero Batatal: unidade filítica do Grupo Caraça, de baixa permeabilidade, comportando-se como aquífero.	Caraça	Batatal	1×10^{-8} a 1×10^{-6} ⁽³⁾	-	-	-

Unidades Hidroestratigráficas	Grupo	Formação	K (m/s)	T (m ² /s)	S	Capacidade específica (m ³ /h/m)
Aquífero Moeda: aquífero fissural em quartzitos e metaconglomerados; livre a localmente confinado, anisotrópico e com produtividade controlada pela densidade/conectividade de fraturas.	Caraça	Moeda	3,5 x 10 ⁻⁹ (3)	7 x 10 ⁻³ (1)	9,34 x 10 ⁻⁴	-
			2,15 x 10 ⁻⁸ a	8,34 x 10 ⁻⁷ a	a	
			5,35 x 10 ⁻⁷ (7)	1,62 x 10 ⁻⁴ (7)	5 x 10 ⁻¹ (7)	
Aquitardo Nova Lima: rochas metavulcanossedimentares (xistos e filitos) de baixa permeabilidade; usualmente desempenham papel de aquífero/baixa produtividade.	Nova Lima	-	-	-	-	0,02 a 0,07 (9)

Fonte: (1) Bertachini (1994); (2) Guerra (2010); (3) Mourão (2007); (4) Ferreira e Bacellar (2010); (5) Schlumberger (2017); (6) Endo *et al.* (2019); (7) Magalhães *et al.* (2022); (8) Andrade *et al.* (2025); (9) Autoria própria (2025).

Os resultados obtidos neste estudo indicam ampla variabilidade dos parâmetros hidrodinâmicos entre as diferentes unidades hidroestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero e interpretadas para o Sinclinal Dom Bosco, reflexo das características litológicas, do grau de fraturamento e da alteração intempérica. Correlacionando estes dados com a metodologia de classificação apresentada anteriormente (Tabela 2), para definição das unidades hidroestratigráficas neste trabalho, procedeu-se à classificação de cada unidade, buscando coerência interna entre as medições de campo, a interpretação dos ensaios e o enquadramento tipológico adotado.

No Aquífero Itacolomi, os valores de condutividade hidráulica obtidos ($K = 4,37 \times 10^{-6}$ m/s) situam-se no intervalo inferior reportado por Schlumberger (2017), que varia de 5×10^{-6} a 5×10^{-4} m/s, sugerindo condições menos favoráveis a produtividade na área analisada. A capacidade específica apresentou valores entre 0,1 e 6,98 m³/h/m, em boa concordância com Andrade *et al.* (2025), que relatou valores médios próximos de 5 m³/h/m. Considerando o parâmetro capacidade específica, foram identificados e classificados poços como “Pouco produtivo ou não aquífero” e “Geralmente muito baixa, porém localmente baixa”, o que indica um desempenho menos favorável deste sistema aquífero na área de estudo. Entretanto, esses resultados devem ser interpretados com cautela, pois todos os poços classificados como pouco produtivos concentram-se em uma mesma região, com relativa proximidade entre si, o que pode apontar uma característica local. Estudos em estruturas adjacentes, como o de Andrade *et al.* (2025), demonstraram melhores propriedades hidrodinâmicas para esta unidade. Diante disso, adotou-se, para fins de classificação, a média máxima das classes obtidas, enquadrando este aquífero como de produtividade “Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado”.

A unidade aquífera Sabará/Piracicaba apresentou condutividades hidráulicas relativamente baixas ($2,43 \times 10^{-6}$ a $8,26 \times 10^{-6}$ m/s), próximas do valor de $1,1 \times 10^{-6}$ m/s descrito por Ferreira e Bacellar (2010). Os baixos valores de capacidade específica (0,03 a 2,6 m³/h/m) reforçam a natureza pouco produtiva desta unidade, comportamento também destacado por Andrade *et al.* (2025). Com base na capacidade específica, foram encontrados e classificados poços como “Pouco produtivo ou não aquífero”, “Geralmente muito baixa, porém localmente baixa” e “Geralmente baixa, porém localmente moderada”, tanto nas formações do Grupo Sabará quanto nas do Grupo Piracicaba, o que evidencia um caráter globalmente menos favorável a produtividade hídrica do sistema. Assim, considerou-se a média das classificações apuradas e classificou-se este sistema aquífero como de produtividade “Geralmente muito baixa, porém localmente baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos”.

O Aquífero Gandarela, localmente carstificado, apresentou baixa condutividade hidráulica neste trabalho, da ordem de 10^{-7} m/s, mas com variabilidade significativa relatada em estudos anteriores. Mourão (2007) registrou valores de até 9×10^{-6} m/s, enquanto Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025) reportaram faixas ainda mais amplas, entre 10^{-9} e 10^{-8} m/s. Essa dispersão expressa a heterogeneidade intrínseca do sistema carbonático, com zonas de alta permeabilidade, governado pelo sistema carste, que contrastam com blocos praticamente impermeáveis. A capacidade específica medida neste estudo (0,2 m³/h/m) é inferior à reportada por Mourão (2007), que alcançou 2,8 m³/h/m. Ressalta-se, porém, que o valor obtido neste trabalho deriva de um único poço, o que representa escala muito localizada e não captura adequadamente o caráter carstificado da estrutura. Desse modo, optou-se por sustentar a caracterização com base nos dados de condutividade hidráulica de Andrade *et al.* (2025) e Magalhães *et al.* (2022), obtidos para o Sinclinal Moeda em área adjacente ao Sinclinal Dom Bosco, classificando-se esta unidade como de produtividade “Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades e irrigação em áreas restritas”.

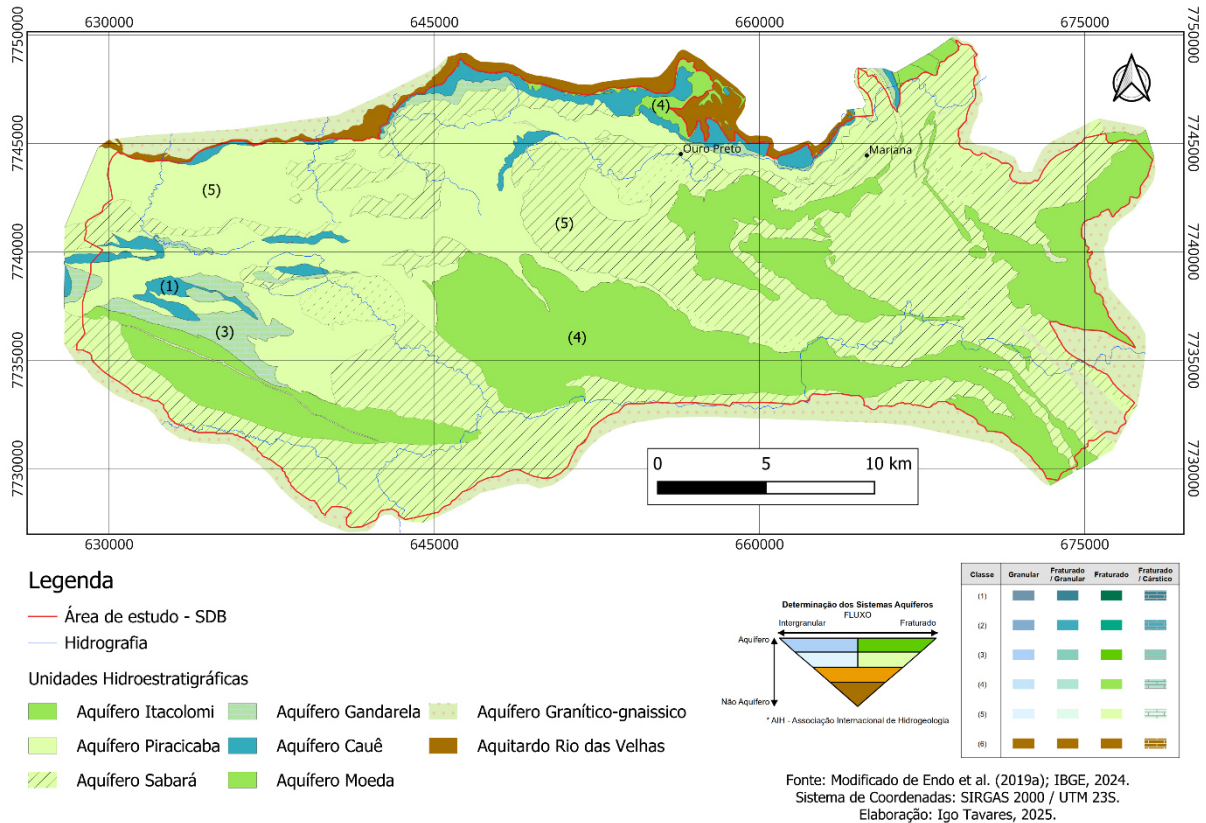
Para o aquífero Cauê foram interpretados os dados de 10 poços, a demonstrou valor de transmissividade elevada ($7,7 \times 10^{-3}$ m/s), obtida via interpretação de um teste bombeamento escalonado, esse valor é superior às faixas usualmente reportadas na literatura para esta unidade (Guerra, 2010; Magalhães *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2025), o que pode refletir condições locais favoráveis, mas tem que ser extrapolado com cautela para o âmbito regional. A capacidade específica obtida destes poços, apresentou uma alta variação (entre 1 e 31,36 m³/h/m), reforçando a intensa variabilidade hidrogeológica desta estrutura. Com base na

capacidade específica, foram identificados poços nas classes “Geralmente muito baixa, porém localmente baixa”, “Geralmente baixa, porém localmente moderada”, “Moderada”, “Alta” e “Muito Alta”, com predominância da classe muito alta. Em consequência, este sistema foi classificado como de produtividade “Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destaquem em âmbito nacional”. Dessa forma, permanece evidente a forte heterogeneidade interna, com variação que abrange desde situações de baixa produtividade até cenários de desempenho elevado, embora com predominância no quartil superior, o que confirma o Aquífero Cauê como o de maior relevância produtiva na área de estudo.

Nas demais unidades, como os aquíferos Batatal e Nova Lima e o Aquífero Moeda, o conjunto de dados disponível ainda é limitado e não sustenta caracterização robusta. Os valores de capacidade específica medidos para o Nova Lima (0,02 a 0,07 m³/h/m) são compatíveis com o enquadramento como unidade de baixa produtividade ou não aquífera, o que corrobora a interpretação conservadora adotada.

De modo geral, os resultados confirmam a heterogeneidade hidrogeológica da região do Quadrilátero Ferrífero, refletida no Sinclinal Dom Bosco pela ampla variação de transmissividade, vazão e capacidade específica. Essa variabilidade está consonante no que vem sendo reiterado pela literatura especializada (Mourão, 2007; Ferreira e Bacellar, 2010; Schlumberger, 2017; Andrade *et al.*, 2025; Magalhães *et al.*, 2022) e expressa tanto a complexidade estrutural das formações quanto os diferentes graus de alteração intempérica e fraturamento que controlam o fluxo subterrâneo.

Figura 6 – Mapa hidrogeológico apresentando as unidades hidroestratigráficas definidas na área de estudo no Sinclinal Dom Bosco.



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.2 Fluxo da água subterrânea

A superfície potenciométrica construída para o Sinclinal Dom Bosco (Figura 7) revela um sistema hidrogeológico complexo, controlado simultaneamente pela topografia regional, pelo arcabouço estrutural do Sinclinal Dom Bosco e pelas diferenças de permeabilidade entre as unidades hidroestratigráficas aflorantes. Os valores do potencial hidráulico variam de aproximadamente 1550 m nos setores topograficamente mais elevados da unidade Sabará/Piracicaba até cerca de 660–760 m nas porções mais rebaixadas, associadas a zonas de drenagem e ao Aquífero Aluvionar. Essa amplitude de quase 900 m define gradientes inclinados para ENE e para SSE, indicando que as cristas estruturais agem como zonas principais de recarga, enquanto os vales drenados por cursos de água funcionam como áreas preferenciais de descarga.

As linhas equipotenciais definidas (contínuas) apresentam espaçamento variável, encontram-se mais densas no centro-oeste da área, onde se concentram poços cadastrados no SIAM e IDE-SIDEMA, e tornam-se mais espaçadas nas bordas leste e sudeste, onde prevalecem valores

inferidos (linhas tracejadas). Esse padrão reforça a confiabilidade dos dados no núcleo da malha de monitoramento e ressalta a necessidade de novas medições nas zonas periféricas para reduzir a incerteza da interpolação.

A distribuição das equipotenciais denota dois domínios de escoamento principais. O primeiro, situado sobre os quartzitos do Aquífero Moeda (cotas entre 1460 m e 1160 m), apresenta gradientes relativamente suaves e fluxo predominantemente SSW–NNE, drenado em direção externa ao Sinclinal Dom Bosco, compatível com a orientação do eixo do Sinclinal e com o alto grau de fraturamento observado nesse quartzito. O segundo domínio, que engloba os itabiritos do Aquífero Cauê (1450 m–760 m), mostra gradientes mais acentuados e linhas de fluxo convergindo para os principais córregos, a o que sugere maior condutividade hidráulica local e conectividade com a drenagem superficial.

No Aquitardo Nova Lima (1450 m–771 m) e no Aquífero Itacolomi (1470 m–758 m) verifica-se um padrão de equipotenciais relativamente paralelo aos contatos litológicos, indicando que essas unidades menos permeáveis atuam como barreiras parciais, desviando o fluxo lateralmente e restringindo as trocas verticais entre aquíferos. Já o Aquífero Gandarela (1360 m–1060 m) funciona como elemento intermediário, recebendo recarga lateral do Cauê e descarregando-se, em parte, para as aluviões quaternárias que preenchem o fundo dos vales.

O sentido de fluxo observado a partir do gradiente hidráulico indica convergência para cinco zonas principais de descarga. (i) No vale central, a drenância dirige-se para noroeste, com convergência ao Rio Gualaxo do Sul, onde o lençol freático, quando aflorante, alimenta numerosas nascentes. (ii) Na porção oriental há um divisor de águas, em que a metade norte drena para o nordeste da área e a metade sul para o sudoeste por meio dos ribeirões Burnier, Colônia e Ouro Branco, que atuam como pontos de descarga dos aquíferos Gandarela e Cauê. Nos contatos da Formação Cauê com sedimentos aluvionares, o fluxo subterrâneo descarrega para o sistema hídrico de ordem superior associado ao Rio Maranhão. (iii) Na porção sudoeste, os aquíferos Sabará/Piracicaba, Gandarela e Cauê drenam pelos vales do Ribeirão Mango e do Ribeirão Maracujá, e os afloramentos de itabiritos fraturados favorecem surgências localizadas. Na porção norte, o Aquífero Cauê comporta-se como um divisor de águas regional. (iv) Em sua face voltada ao Aquífero Moeda, o escoamento subterrâneo dirige-se às cabeceiras do Rio das Velhas. (v) Em sua porção inferior, o fluxo drena para os aquíferos Gandarela e

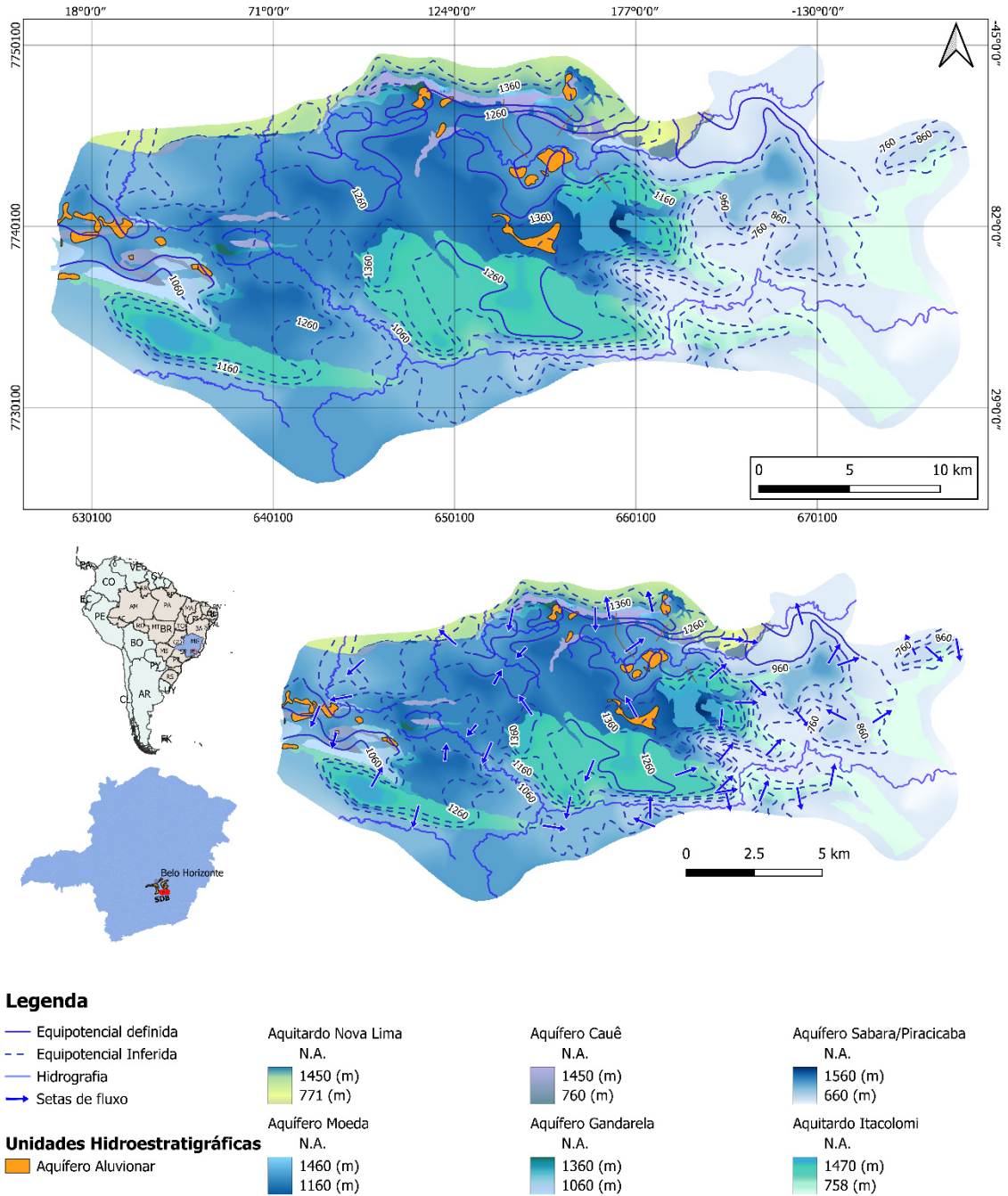
Sabará/Piracicaba, que alimentam afluentes formadores do Rio do Carmo, com o sistema de descarga convergindo para o extremo nordeste da área.

A comparação entre as altitudes do nível potenciométrico e a topografia evidencia que, na maior parte da área, o lençol freático se mantém a menos de 30 m da superfície, condição propícia à interação forte entre os sistemas subterrâneo e superficial. Nas porções montanhosas, contudo, profundidades superiores a 60–80 m indicam zonas de infiltração dominadas por fluxo vertical descendente, corroborando a indicação das áreas de recarga delineadas.

O recurso de inferir níveis d'água em pontos onde curvas topográficas interceptam drenagens foi utilizado de maneira restrita, apenas para complementar vazios de informação, seu efeito sobre o contorno geral da superfície potenciométrica revelou-se marginal.

Em síntese, o mapa potenciométrico demonstra que o fluxo de água subterrânea no Sinclinal Dom Bosco é fortemente controlado pelas formações ferríferas e quartzíticas, pelas barreiras relativas impostas pelas formações menos produtivas como o Piracicaba/Sabará e pela topografia que favorece a drenagem para os vales principais. Esses resultados oferecem base sólida para a avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea, para o planejamento de captações e para a definição de estratégias de proteção de mananciais na região.

Figura 7 – Mapa potenciométrico elaborado par a área de estudo no Sinclinal Dom Bosco, representado por unidade hidroestratigráfica.



Fonte: Elaborado pelo autor

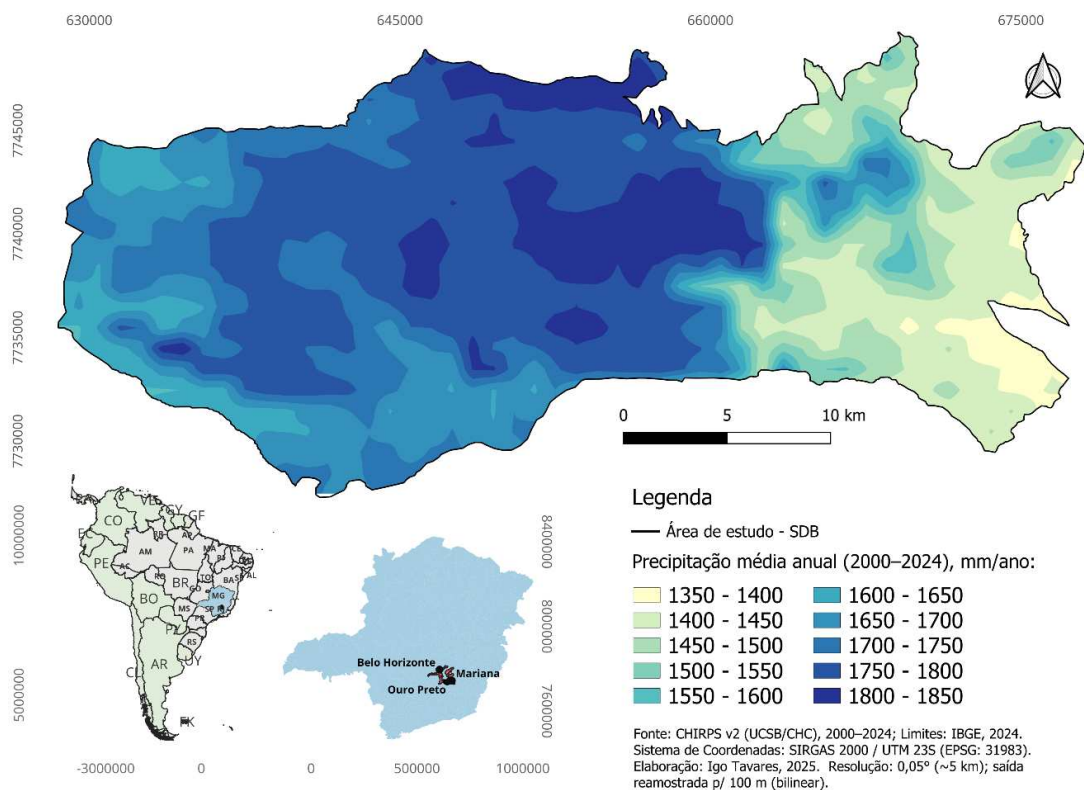
5.2 Balanço hídrico

A caracterização hidrogeológica do Sinclinal Dom Bosco à luz de um balanço hídrico espacialmente distribuído de alta resolução oferece, pela primeira vez, um retrato quantitativo da recarga natural em um dos setores menos estudados do Quadrilátero Ferrífero. O presente

capítulo descreve e discute cada produto cartográfico derivado da metodologia aqui utilizada para equalização do balanço hídrico, sendo a precipitação média (P), evapotranspiração real (ET_r), excedente hídrico (P – ET_r) e os fatores moduladores de percolação, escoamento superficial e geológico, além do mapa final de recarga potencial (RPot), relacionando-os a condicionantes fisiográficos e a investigações análogas conduzidas em estruturas adjacentes ao Sinclinal Dom Bosco no Quadrilátero Ferrífero.

Como resultado da primeira etapa da metodologia de recarga empregada neste trabalho, observou-se que a precipitação média anual mapeada para o período de 2000–2024 no Sinclinal Dom Bosco varia entre 1.350 e 1.850 mm ano⁻¹, com máximos concentrados no setor central, associados aos altos topográficos, e mínimos em direção ao leste/sudeste, conforme apresentado na Figura 8. Esse intervalo enquadra-se no espectro de 1.300–2.100 mm ano⁻¹ reportado para o Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, caracterizado por sazonalidade marcada e pela influência orográfica que gera microclimas e modula temperatura e umidade (Gomes *et al.*, 2009; Silva, 2007).

Figura 8 – Precipitação média anual (2000–2024) no Sinclinal Dom Bosco (QF–MG), estimada pelo CHIRPS v2.



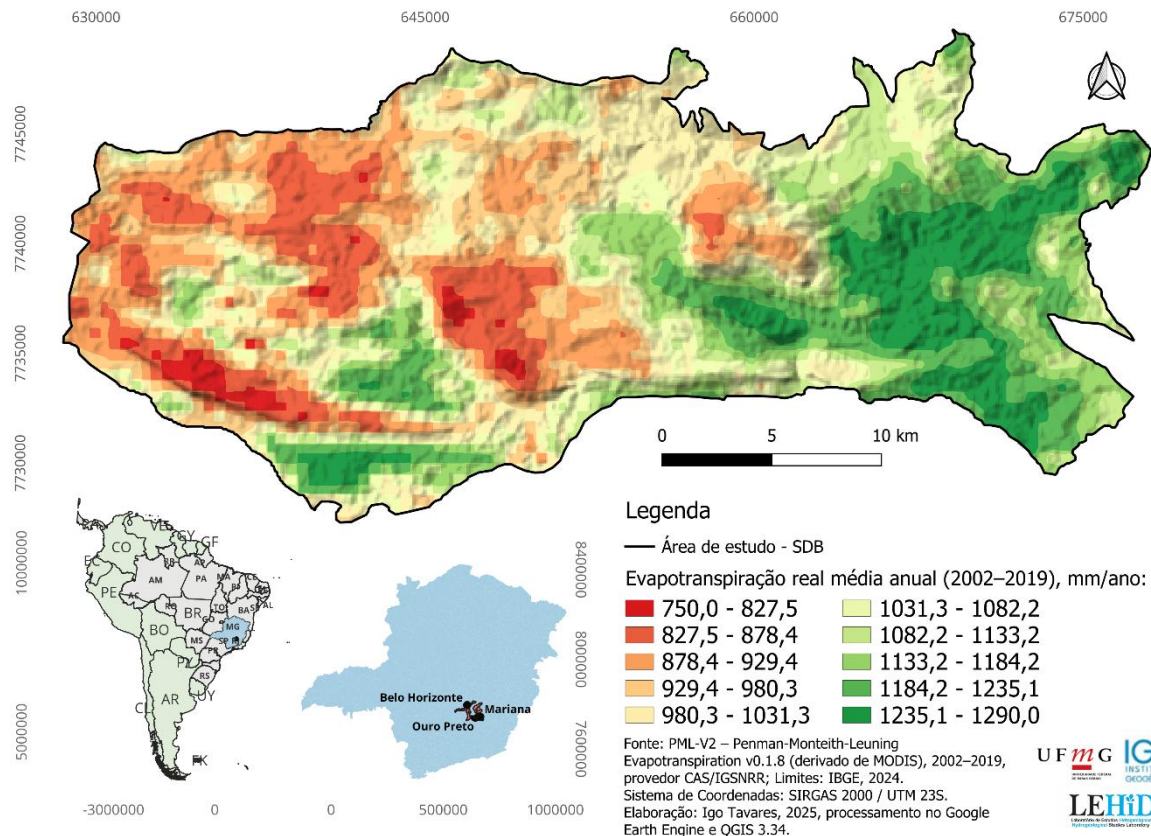
Fonte: Elaborado pelo autor

A superfície de evapotranspiração real média anual (ET_r) do Sinclinal Dom Bosco, estimada a partir do PML-V2/MODIS (500 m; composições de 8 dias, 2002–2019), apresenta um gradiente de ~750 a ~1.280 mm ano⁻¹ (Figura 9). As maiores taxas concentram-se em trechos com dossel arbóreo contínuo e silvicultura, enquanto os menores valores predominam em áreas de solo exposto e pastagens. Nesse padrão espacial, encostas e patamares florestados se situam majoritariamente nas faixas ≥ 1.150 mm ano⁻¹, ao passo que rampas com cobertura aberta ocupam o intervalo de 750–950 mm ano⁻¹.

Em escala regional, essa distribuição é compatível com o regime sazonal do Quadrilátero Ferrífero. Para a Serra do Curral, Freitas, De Paula e Galvão (2024) registraram, com base na estação Cercadinho (INMET) e em um balanço hídrico de Thornthwaite–Mather, déficit entre abril e outubro e excedente entre novembro e março. Para o período 2014–2023, obtiveram ET_r média anual $\approx 797,2$ mm, excedente $\approx 496,8$ mm e déficit $\approx 116,6$ mm. Esse valor médio pontual situa-se no terço inferior do espectro observado no Sinclinal Dom Bosco, o que é compatível com a existência, em nosso domínio, de extensos setores florestados que elevam a evapotranspiração real média anual local em relação a áreas urbanas e aflorantes do Curral, ao mesmo tempo, diferenças de escala (mapa espacializado \times série pontual), período de referência e cobertura do solo impedem qualquer equivalência numérica mais estrita entre os dois cenários, devendo a comparação ser lida como concordância de magnitude e sazonalidade hidrológica regional.

Ainda no Quadrilátero Ferrífero, medições derivadas de sensoriamento remoto em Santa Bárbara (porção leste do Quadrilátero) documentaram, para uma imagem de setembro de 2003, taxas horárias de evapotranspiração estimadas pelo algoritmo SEBAL variando de 0–0,56 mm h⁻¹ em solo com pouca cobertura, 0,56–0,73 mm h⁻¹ sobre um corpo hídrico e 0,73–0,92 mm h⁻¹ em superfícies vegetadas (Moreira *et al.*, 2010). Embora se trate de estimativas instantâneas/horárias (e não anuais), os valores mostram, que a maior demanda evaporativa e transpirativa associada aos alvos vegetados em relação a superfícies expostas, o mesmo contraste que estrutura as classes do nosso mapa anual no Sinclinal Dom Bosco.

Figura 9 – Evapotranspiração real média anual (2002–2019) no Sinclinal Dom Bosco.



Fonte: Elaborado pelo autor

A superfície do fator de escoamento superficial (RF) no Sinclinal Dom Bosco apresenta um padrão espacial dominado por valores altos (0,8–1,0) sobre grande parte dos interflúvios e patamares, com manchas e faixas de valores baixos (0,0–0,3 e 0,3–0,4) organizadas principalmente ao longo de corredores antrópicos e em segmentos de maior declividade no terço sul e em setores centrais da área (Figura 10). Para orientar a leitura do mapa, recorda-se que, na convenção adotada neste trabalho, o RF é calculado como $RF = 1 - (C + LS_fuzzy)$ onde C é o coeficiente de escoamento superficial por classe de uso/cobertura e LS é o comprimento-declividade normalizado por lógica fuzzy, nessa definição, valores altos de RF indicam menor propensão ao escoamento superficial (soma C + LS menor), enquanto valores baixos sinalizam maior propensão ao escoamento (soma C + LS maior).

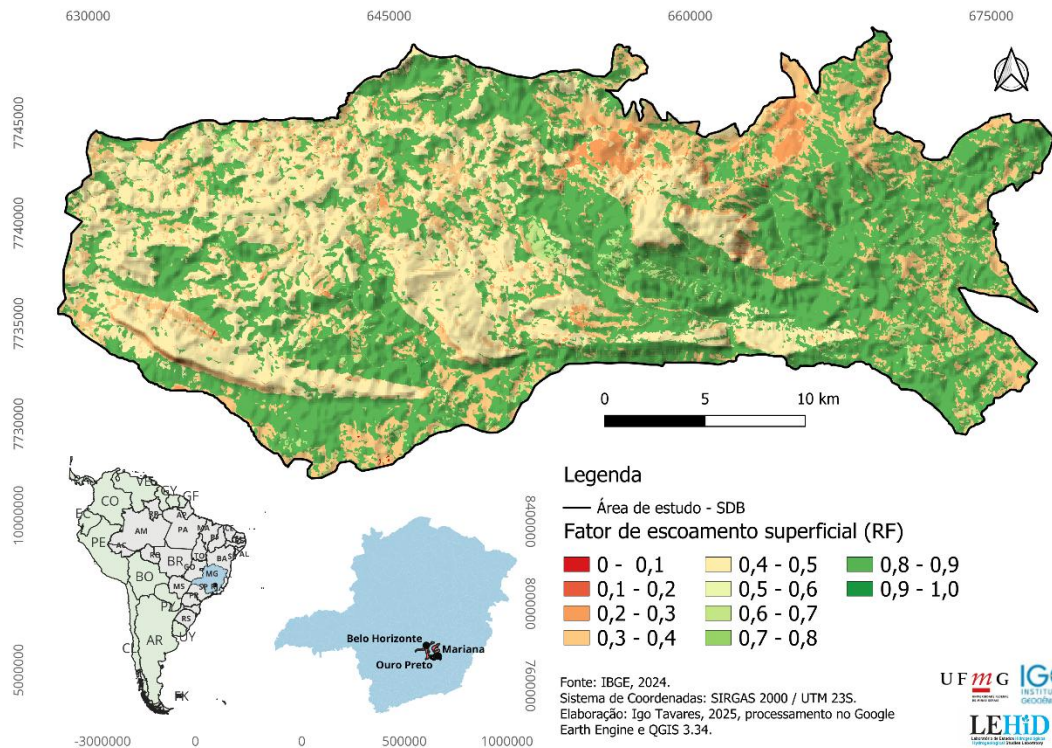
A hierarquia por cobertura que aparece no Sinclinal Dom Bosco é coerente com os valores-tipo de C documentados e aplicados no estado de Minas Gerais, nos quais formações florestais recebem $C \approx 0,10$, áreas urbanizadas recebem $C \approx 0,85$, e solo exposto/vegetação rasteira ficam em $C \approx 0,60$ (UFMG/IGC, 2022). Assim, para um mesmo relevo (mesmo LS), trechos florestados tendem a apresentar RF mais altos (menor propensão ao escoamento), enquanto

rampas sob pastagens rasas, solo exposto ou urbanização tendem a apresentar RF mais baixos, similar a distribuição observada nas manchas de menor RF do mapa gerado nesta etapa.

No contexto do Quadrilátero Ferrífero a literatura pedogeomorfológica registra explicitamente a dominância de relevos ondulados a montanhosos em vários compartimentos serranos e, em perfis representativos, ocorrência de erosão em sulcos em terços de encosta, descrição compatível com ambientes de maior geração de escoamento superficial quando a cobertura é aberta (embora o documento não modele RF, esses traços morfológicos são relatados textualmente). Esse registro aparece, por exemplo, em Sabará e Brumadinho, onde perfis em terços médios de vertente são caracterizados como “relevo local, forte ondulado” e “erosão, moderada em sulcos” (EMBRAPA, 2017). A presença desse tipo de relevo no Quadrilátero ferrífero corrobora o padrão que o seu RF cartografa no Sinclinal Dom Bosco, em que manchas de baixo RF associadas a rampas e a usos de maior C, e campos de alto RF sobre superfícies mais suaves com cobertura florestal (EMBRAPA, 2017).

Dessa forma, a coerência interna do mapa gerado nesta etapa é clara e está documentalmente respaldada: (i) a orientação do índice ($RF = 1 - (C + LS_fuzzy)$) e a matriz de C por classe (floresta 0,10; solo exposto/vegetação rasteira 0,60; urbano 0,85) são explicitamente publicadas (UFMG/IGC, 2022); e (ii) o cálculo do LS para paisagens topograficamente complexas segue procedimento consagrado (Desmet; Govers, 1996). Esses elementos justificam, tecnicamente, a leitura espacial observada no Sinclinal Dom Bosco.

Figura 10 – Escoamento (RF) do Sinclinal Dom Bosco.



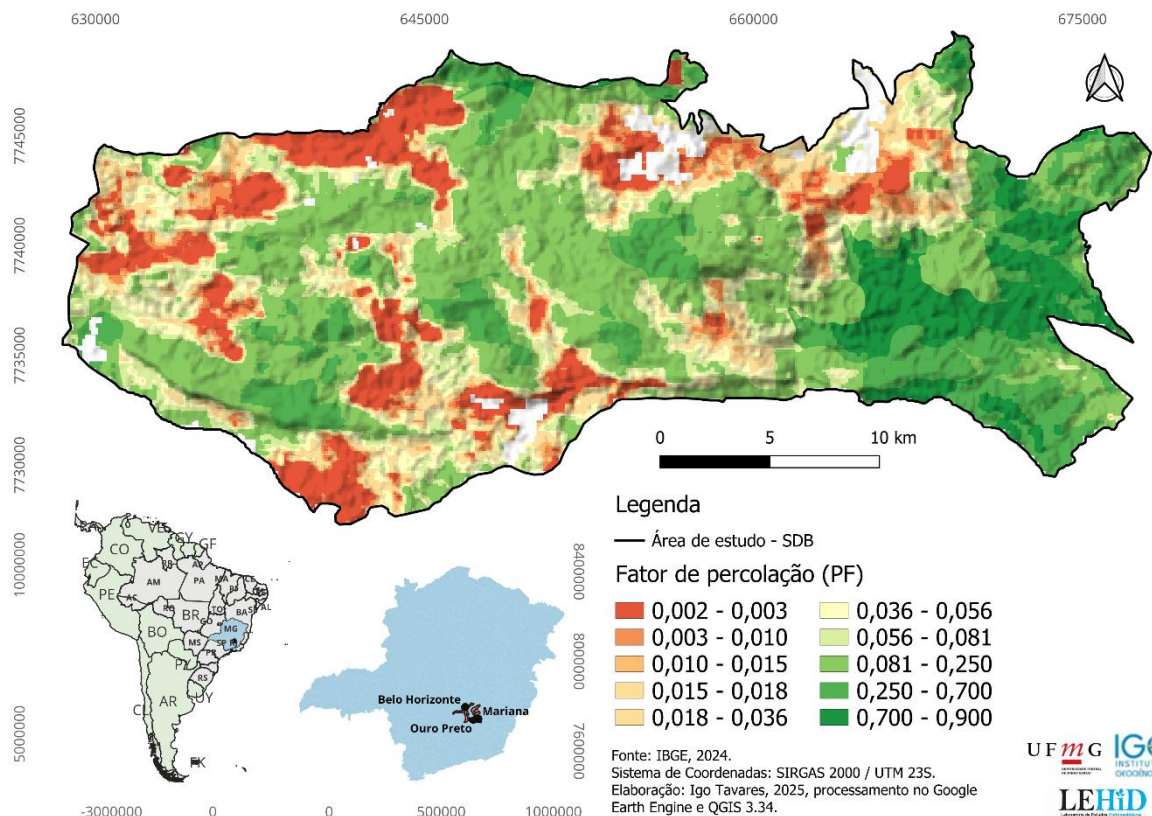
Fonte: Elaborado pelo autor

O fator de percolação (PF) obtido para o Sinclinal Dom Bosco variou entre 0,00 e 0,90 (adimensional), refletindo a combinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) derivada da PTF de Cosby e das notas do PUC, ambas reescaladas para o intervalo 0–1 (Figura 11). Patamares mais elevados concentram-se nas abas colúvias suaves que margeiam o flanco oriental do Sinclinal, onde predominam Latossolos Vermelho-Amarelos desenvolvidos sobre regolitos espessos e cobertos por formações florestais secundárias. Em contrapartida, manchas inferiores a 0,10 dominam os topos quartzíticos, as cristas expostas do Grupo Piracicaba e os contatos litológicos onde afloram Cambissolos e Neossolos rasos sob pastagens ou solo exposto. Entre esses extremos, faixas intermediárias (0,15 – 0,40) acompanham vertentes com cobertura mista de cerrado-campo e solos lixiviados moderadamente argilosos.

A distribuição espacial obtida é coerente com o arcabouço hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. Nas porções de maior fator de percolação, o controle litológico-geomórfico coincide com áreas descritas por Andrade *et al.* (2025) onde recargas superiores a 38 % da precipitação ocorrem sobre regolitos lateríticos espessos do aquífero Cauê, favorecidos por alta porosidade e condutividade hidráulica. O mesmo padrão de “pulsos” de infiltração em posições colúvias foi interpretado por Gonçalves *et al.* (2021) para sistemas gnáissico-graníticos adjacentes, em

que o espesso manto de alteração promove percolação intensificada e sustenta nascentes de base de vale. Em contraste, os menores índices de PF ($\leq 0,03$) concentram-se sobre topos quartzíticos recobertos por Cambissolos rasos e Neossolos litólicos. Essa condição repete o padrão pedogeomórfico descrito por Figueiredo *et al.* (2004) para o Complexo Bação, onde os perfis de solo nos segmentos de alta vertente são pouco desenvolvidos, com reduzida profundidade efetiva, restringindo a infiltração vertical e reforçando o escoamento superficial.

Figura 11 – Distribuição espacial do Fator de Percolação (PF) do Sinclinal Dom Bosco.



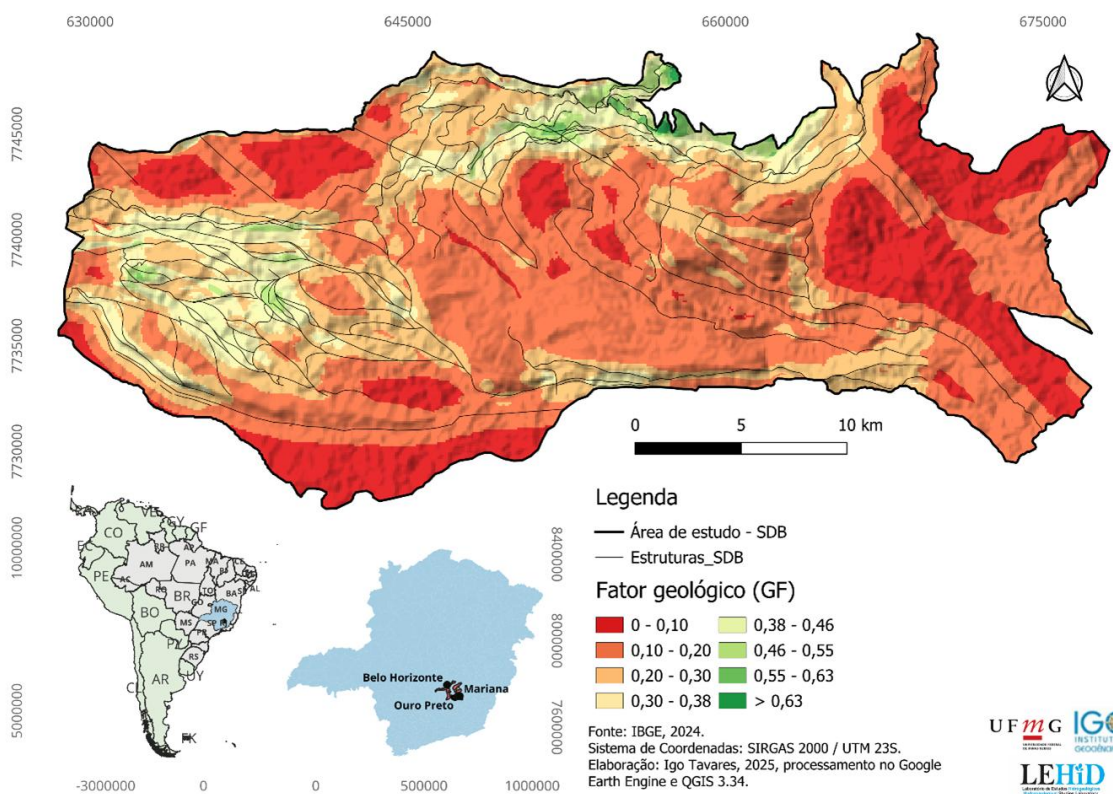
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 12 apresenta a distribuição espacial do fator geológico (GF) calculada para o Sinclinal Dom Bosco. O mapa de fator geológico revela predomínio de classes baixas a intermediárias ($\approx 0,10-0,38$) no interior pelítico do Sinclinal, enquanto faixas e núcleos de fator geológico elevado ($\geq 0,55$, com picos $> 0,63$) acompanham cristas e ombreiras onde se combinam unidades hidroestratigráficas mais favoráveis (quartzitos e formações ferríferas) e corredores de fraturamento mapeados. O alinhamento dessas faixas segue o grão estrutural NW–SE típico do Quadrilátero Ferrífero, associado a dobras e zonas de cisalhamento que orientam o relevo e a rede de drenagem (Dorr, 1969; Chauvet *et al.*, 1994). Nas porções onde os lineamentos

estruturais se adensam sobre substratos competentes (Cauê, Gandarela, Moeda), observa-se a elevação do Fator Geológico por incremento da permeabilidade efetiva fissural.

Em síntese, o mapa de fator geológico do Sinclinal Dom Bosco (Figura 12), materializa a superposição das unidades hidroestratigráficas e dos lineamentos estruturais. Como resultado observa-se uma forte influência dos lineamentos estruturais, principalmente quando intercepta o aquífero Cauê, gerando as faixas de fator geológico do terço superior da escala de cores. Já as zonas de maior densidade de lineamentos estruturais interceptando os aquíferos Gandarela, Moeda, Itacolomi e o Aquífero Sabará/Piracicaba, apresentaram um fator geológico intermediário, ou seja, quando um dos componentes (geologia ou estrutural) foi favorável, mas o outro foi moderado. Por fim, os valores de fator geológico do terço inferior, da escala de cores, predominou nas regiões da unidade Sabará e Piracicaba e em bordas com fraturamento difuso, coerente com a classificação regional de baixa produtividade dessas unidades.

Figura 12 – Distribuição espacial do Fator Geológico (GF) do Sinclinal Dom Bosco.



Fonte: Elaborado pelo autor

O mapa de recarga potencial anual (RPot) do Sinclinal Dom Bosco (Figura 13) evidencia um gradiente espacial, onde valores baixos ($\leq 150 \text{ mm ano}^{-1}$) se estendem de forma mais predominante pelos setores sul e leste, enquanto valores moderados ($\geq 150 \text{ mm ano}^{-1}$)

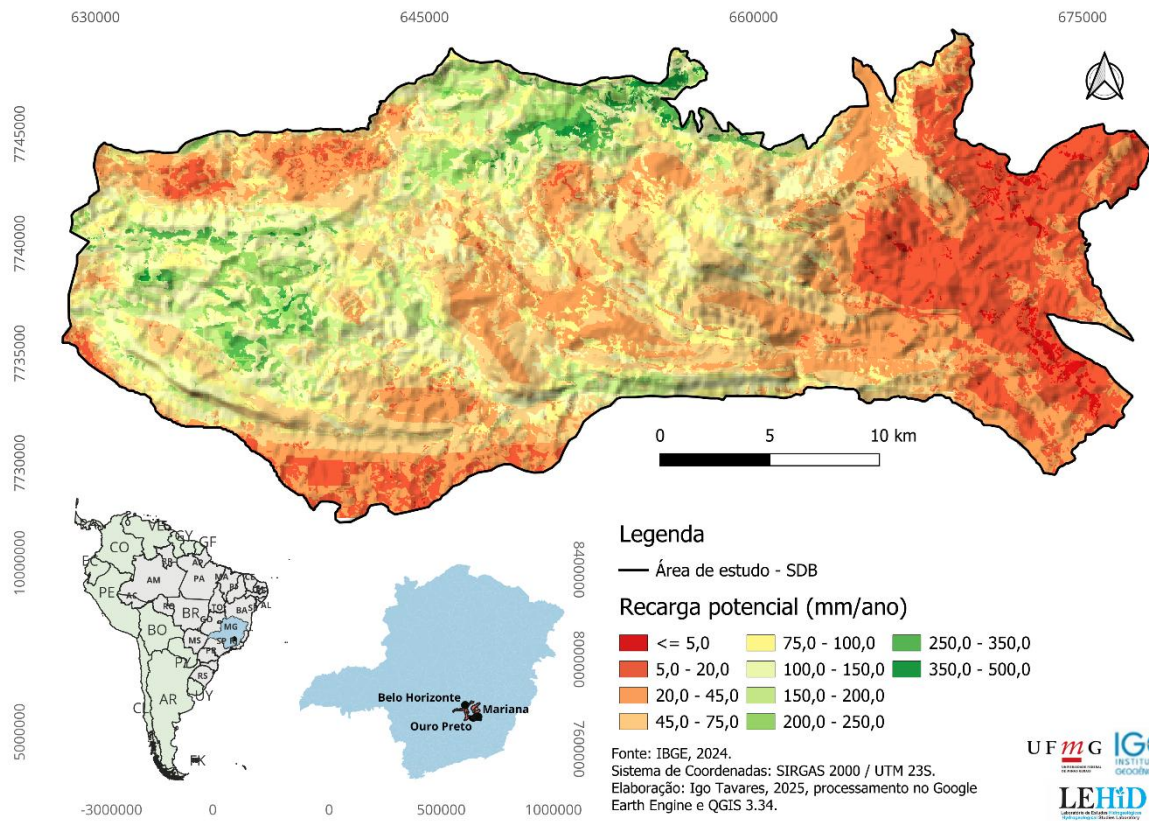
prevalecem no oeste–noroeste, com manchas verdes ancoradas em interflúvios elevados. A organização em faixas NW–SE acompanha o grão estrutural regional, sinalizando que a anisotropia de dobras e fraturas condiciona o relevo e, por consequência, o padrão do excedente P–ET convertido em potencial de recarga.

Além do controle climático de primeira ordem, orografia modulando a precipitação e a evapotranspiração na escala do Quadrilátero Ferrífero, os máximos de recarga potencial surgem sobre substratos de maior permeabilidade efetiva, com destaque para afloramentos da Formação Cauê (itabiritos/hematitas), cuja literatura registra condutividade hidráulica mais alta e taxas de recarga relativas elevadas em segmentos do Quadrilátero Ferrífero (Magalhães *et al.*, 2022). Essa coerência entre litologia ferrífera e picos de recarga potencial reforça que a infiltração profunda é favorecida em domínios de itabiritos/hematitas com fraturamento expressivo e porosidade efetiva associada à textura e ao intemperismo desses litotipos.

Os valores intermediários de recarga potencial acompanham faixas alongadas segundo o mesmo rumo NW–SE, sugerindo reforço da percolação ao longo de zonas de fratura e cisalhamento que canalizam o fluxo vertical-descendente, arranjo compatível com a anisotropia estrutural clássica do Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969). Por contraste, mínimos de recarga potencial dominam o leste e o sul da área, coincidindo com domínios das rochas do Grupo Sabará e Piracicaba e coberturas mais finas/argilosas, materiais que segundo Fonseca *et al.* (2005) são propensos a maior escoamento superficial e menor condutividade do meio fraturado raso.

Em síntese, o mapa de recarga potencial gerado para área de estudo do Sinclinal Dom Bosco (Figura 13) reflete a superposição das camadas, com estrutura (bandamento NW–SE e canalização ao longo de fraturas), litologia (máximos sobre Cauê e quartzitos, mínimos sobre Piracicaba/Sabará) e balanço climático (orografia modulando P e ET). Esse panorama estabelece a base para, nas seções seguintes, quantificar a taxa média de recarga por unidade hidroestratigráfica e a contribuição relativa de cada domínio ao balanço anual.

Figura 13 – Distribuição espacial da recarga potencial (mm/ano) da área de estudo do Sinclinal Dom Bosco.



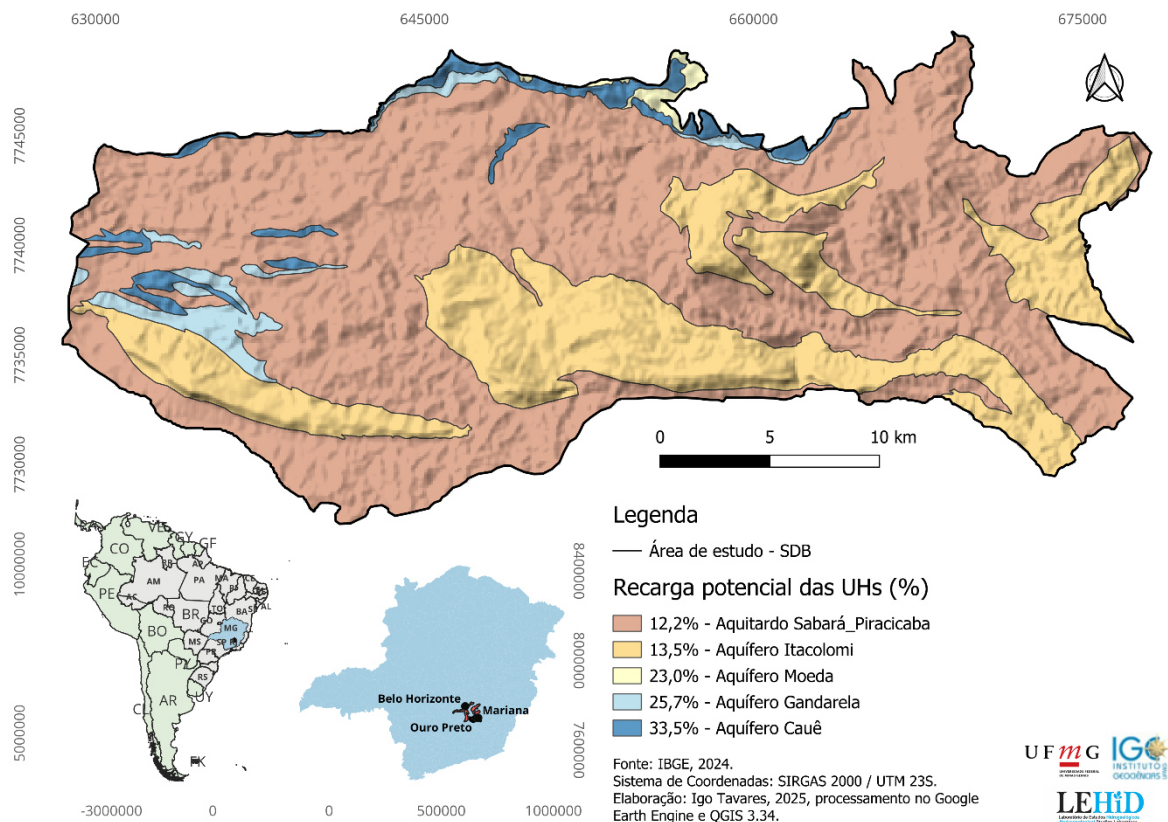
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 14 apresenta o mapa-síntese da razão $RPot/P$ (%) agregada por unidade hidroestratigráfica da área de estudo no Sinclinal Dom Bosco (média espacial por polígono). As médias indicam a hierarquia Cauê $\approx 33\text{--}34\%$, Gandarela $\approx 25\text{--}26\%$, Moeda $\approx 23\%$, Itacolomi $\approx 13\text{--}14\%$ e Sabará–Piracicaba $\approx 12\text{--}13\%$. Esses valores são coerentes com a hidrogeologia regional, onde a Formação Cauê (itabiritos/hematitas) figura como o aquífero mais produtivo, combinando porosidade fissural e, localmente, granular, com variação controlada por litofácies e grau de intemperismo. Em escala regional, Magalhães *et al.* (2022) estimou 38,67% de recarga relativa para o Cauê no flanco leste do Sinclinal Moeda, enquanto Andrade *et al.* (2025) obteve média de 26% para o Cauê no flanco oeste, valores muito próximos às classes encontradas para o Sinclinal Dom Bosco, neste trabalho, reforçando a consistência dos resultados.

Para as demais unidades hidroestratigráficas, os patamares médios também se alinham ao que se conhece no Quadrilátero Ferrífero. Gandarela (predomínio carbonático/dolomítico) apresenta $\sim 26\%$, compatível com a média de 28% reportada por Andrade *et al.* (2025) no flanco oeste do Sinclinal Moeda. Moeda (quartzitos) surge com $\sim 23\%$, dentro do intervalo 3–46%

(média 18%) estimado por separação de escoamento de base no mesmo estudo Andrade *et al.* (2025). Já Itacolomi (quartzitos mais finos, localmente caulíníticos) e Sabará–Piracicaba (metapelitos/grauvacas) mantêm as menores taxas ($\approx 13\text{--}14\%$ e $\approx 12\text{--}13\%$), coerentes com os valores obtidos para essas unidades, classificando como aquíferos ou de baixa produtividade (Magalhães *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2025).

Figura 14 – Recarga potencial média das Unidades Hidroestratigráficas (UHs) do Sinclinal Dom Bosco traduzidas em percentual médio de recarga, considerando a média anual (2000–2024) apresentada no mapa de precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 8 sintetiza as médias de recarga potencial relativa (RPot/P, %) calculadas por unidade hidroestratigráfica no SDB e as confronta com estimativas de estudos realizados em segmentos vizinhos do Quadrilátero Ferrífero (Magalhães *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2025).

Em conjunto, o padrão espacial por unidade hidroestratigráfica, Cauê > Gandarela > Moeda > Itacolomi \approx Sabará/Piracicaba, apresenta coerência com os resultados de outros trabalhos realizados no Quadrilátero Ferrífero, em que o Cauê apresenta maior fração de recarga do balanço (Magalhães *et al.*, 2022) e faixas/medianas de recarga relativas reportadas por Andrade *et al.* (2025), nas quais as médias, calculadas neste trabalho, por unidade hidroestratigráficas,

se inserem, com diferenças locais esperadas pelo regime pluviométrico, orografia, estrutura e cobertura do solo específicos do Sinclinal Dom Bosco. Além disso nota-se que a área de estudo compartilha estruturas na porção norte com a área estudada por Magalhães *et al.* (2022) e na porção oeste com o trabalho de Andrade *et al.* (2025), e observou-se que os resultados encontrados neste trabalho por vezes apresentaram resultados numa média desses dois trabalhos.

Tabela 8 - Comparação dos valores médios de recarga calculados neste trabalho com o referencial bibliográfico de trabalhos similares realizados em estruturas adjacentes do Quadrilátero Ferrífero.

Unidades Hidroestratigráficas	Recarga calculada (%)	Recarga (%) Magalhães <i>et al.</i> (2022)	Recarga (%) Andrade <i>et al.</i> (2025)
Aquífero Itacolomi	13,5	-	15
Aquífero Sabará/Piracicaba	12,2	12,42 ¹	-
Aquífero Cauê	33,5	38,67	26
Aquífero Gandarela	25,7	16,52	28
Aquífero Moeda	23,0	-	18

¹ Piracicaba.

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Modelo dos sistemas aquíferos

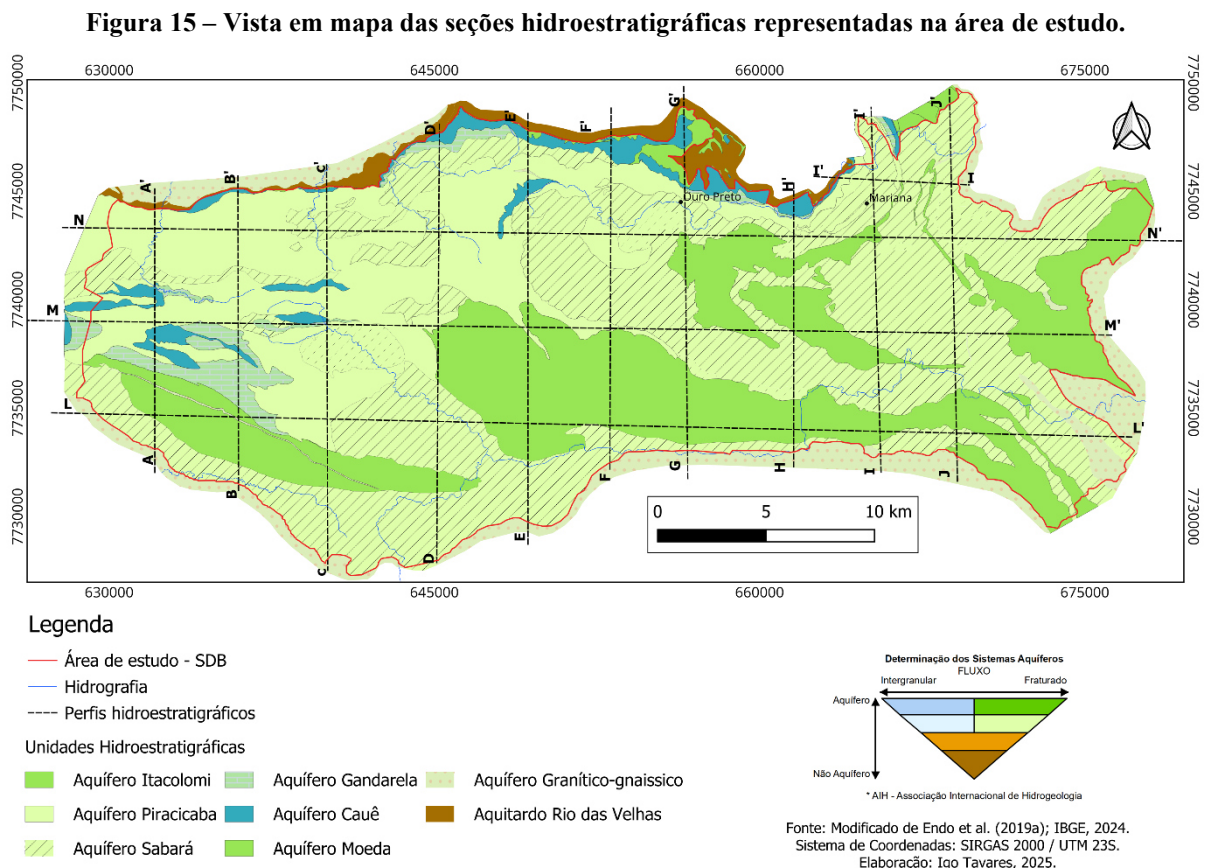
O modelo tridimensional dos sistemas aquíferos do Sinclinal Dom Bosco foi construído para integrar, em uma única representação coerente, a geometria hidroestratigráfica, os resultados da avaliação hidrodinâmica e a espacialização do balanço hídrico, de modo a sustentar a interpretação do padrão regional de fluxo e das zonas preferenciais de recarga e descarga. Essa abordagem organizou as interpretações de campo e de gabinete em volumes contínuos, assegurando o encadeamento lógico entre litologia, estrutura e parâmetros hidráulicos discutidos nos capítulos anteriores.

Conforme apresentado na metodologia deste trabalho, os 14 perfis hidroestratigráficos elaborados alimentou o modelo tridimensional dos sistemas aquíferos. Assim, os perfis foram desenhados considerando o agrupamento das litologias de acordo com as unidades hidroestratigráficas definidas anteriormente. Todos os perfis na integra, podem ser observados no Apêndice C.

Os domínios do modelo foram setorizados da seguinte forma, da base para o topo:

- Aquitardo Nova Lima
- Aquífero Moeda
- Aquífero Cauê
- Aquífero Gandarela
- Aquífero Sabará/Piracicaba
- Aquífero Itacolomi
- Aquífero Aluvionar

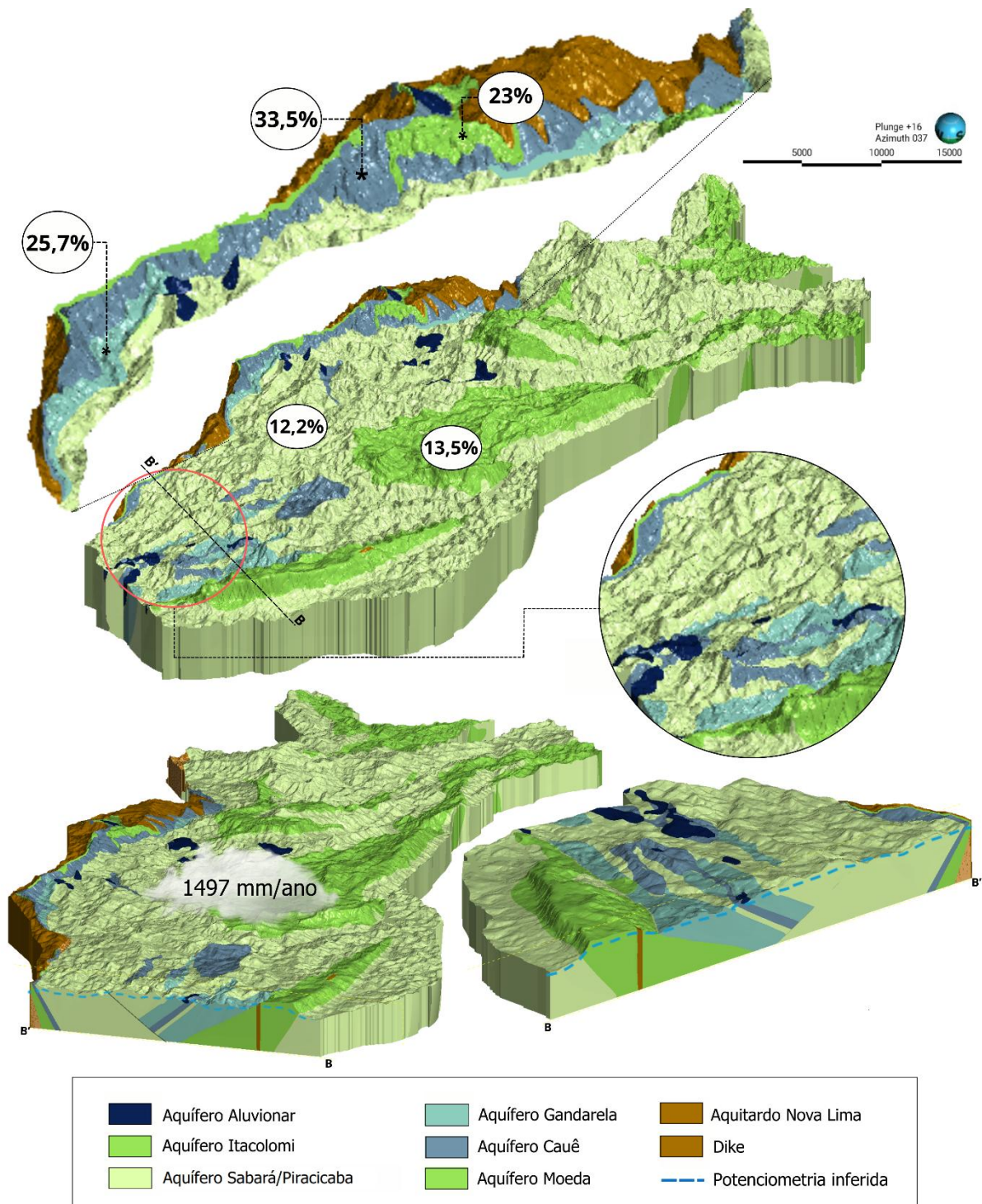
A Figura 15 a seguir, apresenta a localização dos 14 perfis que foram desenhados e utilizados como base para confecção neste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor

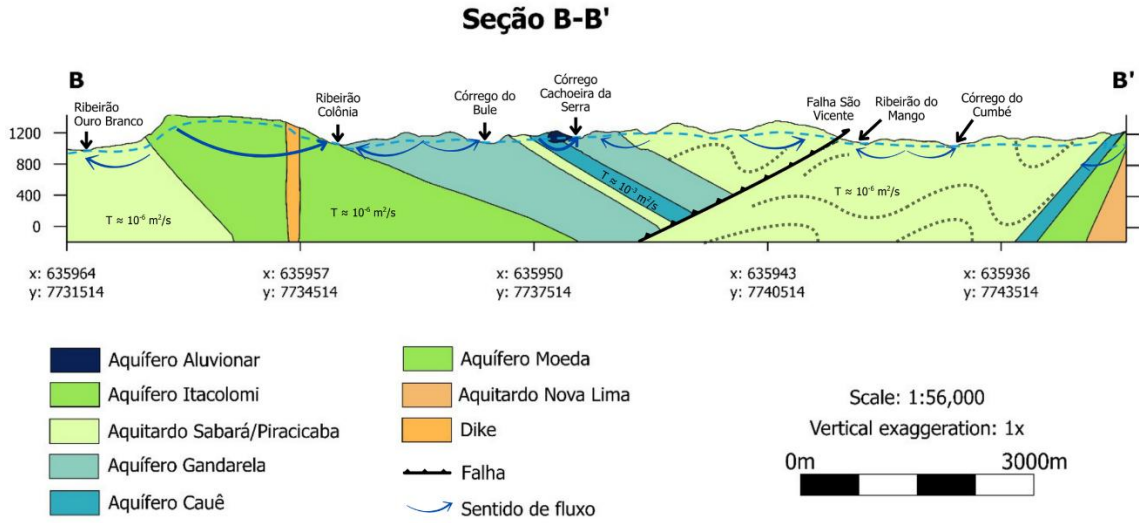
A Figura 16 representa o modelo tridimensional dos sistemas aquíferos do Sinclinal Dom Bosco, com a sintetização dos principais dados gerados neste relatório e a Figura 17 e Figura 18 apresenta os perfis hidroestratigráficos na posição B-B' e F-F', respectivamente.

Figura 16 – Vista tridimensional do modelo dos sistemas aquíferos demonstrando as unidades hidroestratigráficas presentes na área de estudo, os valores de recarga potencial média e precipitação média (2007-2023) e a pontenciometria inferida.



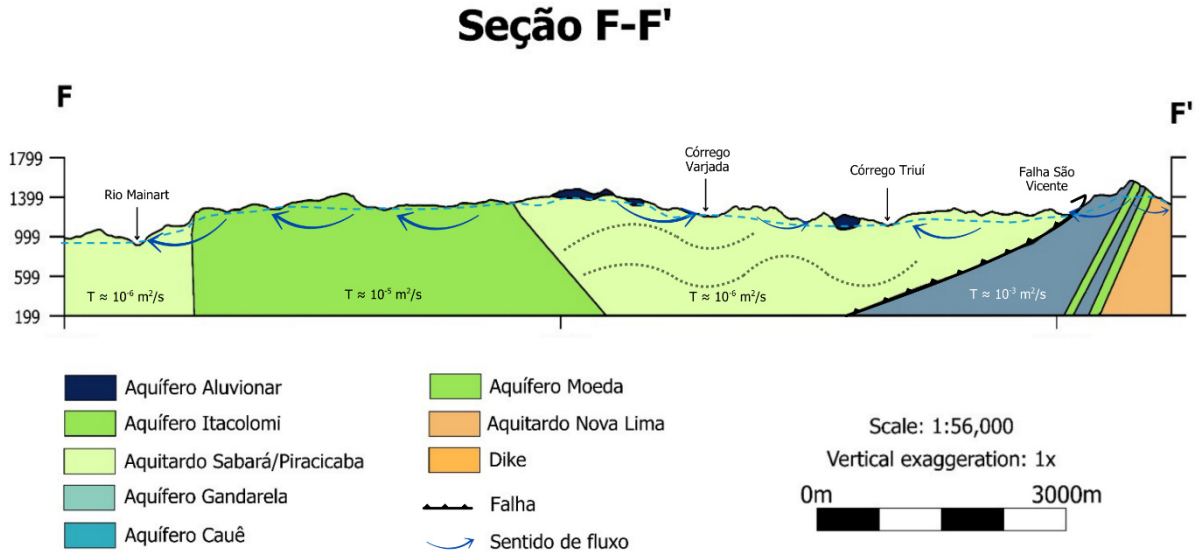
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 - Vista da seção B-B' do modelo hidrogeológico, demonstrando as unidades aquíferas observadas nesta seção e seus sistemas de fluxo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 - Vista da seção F-F' do modelo hidrogeológico, demonstrando as unidades aquíferas observadas nesta seção e seus sistemas de fluxo.



Fonte: Elaborado pelo autor

A organização espacial evidencia a posição estrutural do aquífero Cauê no Sinclinal Dom Bosco, que ocorre na parte centro-oeste, acompanhando a zona de charneira dessa estrutura e na extremidade norte, com mergulho predominante N-S, possui espessura variável ao longo dessa estrutura, variando de 100 a 1000 metros na porção central e de poucos metros a 1200 metros nas porções mais espessas na extremidade norte. Este aquífero caracteriza-se pelas

rochas da Formação Cauê, que é constituído por itabiritos silicosos, dolomíticos e ansiolíticos, hematíticos, mármores ferruginosos e filitos ferruginosos. Observou-se em poços localizados na porção central, transmissividade na ordem de 10^{-3} , vazões de estabilização em teste de bombeamento de 200 m³/hora e capacidade específica de aproximadamente 11 m³/h/m, demonstrando boas condições hidráulicas desse aquífero.

Andrade *et al.* (2025) levantou perfis geológicos de poços localizados na área do Flanco Oeste do Sinclinal Moeda, que apresenta conexão em partes com aquífero Cauê do Sinclinal Dom Bosco, em que se observou que a Formação Cauê, na porção setentrional do Sinclinal Moeda, possui profundidade mínima de 225 m, enquanto na porção sul, próximo do Sinclinal Dom Bosco, sua profundidade alcança 360 m. Dessa forma, visando representar as unidades hidrogeológicas definiu-se, pelos perfis elaborados, uma profundidade média de 1000 m.

O aquífero Gandarela no Sinclinal Dom Bosco ocorre na parte centro-oeste, acompanhando a zona de charneira dessa estrutura e na extremidade norte, com mergulho predominante N-S, possui espessura variável ao longo dessa estrutura, atingindo nas partes mais espessas 1800 metros na porção central e de 500 metros nas porções mais espessas na extremidade norte. Este aquífero caracteriza-se pelas rochas da Formação Gandarela, que é constituído por mármores, mármores ferruginosos, itabiritos dolomíticos e silicosos.

A integração da superfície potenciométrica inferida ao arcabouço 3D explica a direção do fluxo subterrâneo como resposta combinada do relevo e da estrutura. Os maiores potenciais hidráulicos ocorrem nos interflúvios elevados, com gradiente decrescendo em direção às calhas drenantes e ao Aquífero Aluvionar, o que caracteriza cristas estruturais e topográficas como zonas preferenciais de recarga e vales como áreas de descarga. Esse padrão é reforçado pela disposição de faixas de recarga potencial que acompanham o bandamento de rumo noroeste-sudeste e por indícios de canalização vertical-descendente ao longo de zonas de fratura e cisalhamento, enquanto mínimos de recarga coincidem com os domínios das formações Sabará e Piracicaba. A geração da superfície potenciométrica combinou dados de poços, nascentes e elementos topográficos por procedimentos de interpolação espacial, etapa em que a distribuição dos pontos observacionais orientou os parâmetros geoestatísticos e respalda a recomendação de adensar medições em setores menos amostrados para reduzir incertezas locais.

O modelo incorpora, ainda, a síntese do balanço hídrico espacializado e suas razões de recarga potencial em relação à precipitação por unidade hidroestratigráfica, o que confere consistência física à interpretação geométrica.

Como fechamento, o modelo do sistema aquífero do Sinclinal Dom Bosco materializa um arcabouço em que a posição estrutural e a litologia controlam a conectividade hidráulica e a produtividade, com o Cauê destacando-se tanto pela geometria favorável quanto por parâmetros de campo que incluem transmissividade da ordem de 10^{-3} m²/s, vazões estabilizadas em torno de 200 metros cúbicos por hora e capacidade específica próxima de 11 metros cúbicos por hora por metro em poços representativos da porção central da área. Em paralelo, o Gandarela apresenta heterogeneidade fissural a cárstica e o conjunto Sabará/Piracicaba atua como aquífero de baixa produtividade regional, modulando trechos localmente confinados. O resultado é um modelo operacional, apto a orientar a leitura do fluxo regional e a priorização de ações, entre elas o adensamento de monitoramento potenciométrico em setores menos amostrados, a realização de novos ensaios de bombeamento e de resposta a estresse nas unidades mais heterogêneas e a proteção de faixas de recarga mapeadas nos altos estruturais. Essas recomendações derivam diretamente das evidências apresentadas e preservam a consistência com a escala de análise e com a base de dados efetivamente disponível para o Sinclinal Dom Bosco.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A integração de dados hidroestratigráficos, parâmetros hidrodinâmicos, balanço hídrico espacializado e modelagem tridimensional permitiu construir uma leitura coerente do funcionamento do sistema subterrâneo no Sinclinal Dom Bosco, elevando o conhecimento hidrogeológico desta área. O encadeamento metodológico adotado, partindo da organização do banco de dados à síntese em sistemas de informações geográficas e ao modelo dos sistemas aquíferos, garantiu rastreabilidade e coesão entre as etapas, de modo a sustentar interpretações consistentes na escala regional trabalhada e preparar o terreno para inferências de gestão. Com isso, os resultados apresentados nos capítulos de avaliação hidrodinâmica, balanço hídrico e modelo dos sistemas aquíferos atendem diretamente aos objetivos da pesquisa e oferecem um quadro integrado, compatível com a complexidade geológica do Quadrilátero Ferrífero.

A avaliação hidrodinâmica confirmou contrastes marcantes entre as unidades. No Aquífero Cauê, destacaram-se transmissividade da ordem de 10^{-3} m²/s, vazões outorgadas em torno de 200 m³/h em poços representativos da porção central desta estrutura, valores que explicam a recorrente atratividade dessa unidade para captações e corroboram seu papel de maior produtividade na área de estudo.

O balanço hídrico espacialmente distribuído evidenciou um regime pluviométrico entre 1.350 e 1.850 mm/ano e evapotranspiração real média de 750 a 1.280 mm/ano, com máximos de precipitação associados a altas topográficas e padrões de ETr modulados pela cobertura da terra. A recarga potencial reflete a superposição de estrutura, litologia e clima: máximos tendem a acompanhar faixas quartzíticas e ferruginosas e mínimos se concentram sobre domínios das formações Piracicaba e Sabará, padrão alinhado ao bandamento estrutural de rumo noroeste-sudeste. Ao integrar a recarga por unidades hidroestratigráficas por estatística zonal, delineou-se hierarquia relativa que organiza a disponibilidade espacial: Cauê cerca de 33,5%, Gandarela aproximadamente 25,7%, Moeda em torno de 23,0%, Itacolomi perto de 13,5% e Sabará/Piracicaba em torno de 12,2%. Tal arranjo é coerente com o conhecimento hidrogeológico regional do quadrilátero ferrífero, no qual o Cauê figura como aquífero de maior produtividade e as formações Piracicaba e Sabará se comportam como unidades menos favoráveis, o que consolida a robustez física do balanço empregado.

O modelo tridimensional dos sistemas aquíferos sintetizou o arcabouço hidroestratigráfico do Sinclinal Dom Bosco da base para o topo, com o Aquitardo Nova Lima, os aquíferos Moeda, Cauê e Gandarela, o domínio Sabará/Piracicaba, o Aquífero Itacolomi e os depósitos aluvionares. No modelo, o Cauê acompanha a zona de charneira e a extremidade norte, com espessura variável que alcança centenas de metros e localmente excede um quilômetro, enquanto o Gandarela mostra ligeiras variações associadas ao controle estrutural. A superfície potenciométrica indica dois domínios de escoamento principais: sobre o Moeda, gradientes mais suaves orientam fluxos com tendência regional para fora do Sinclinal e no Cauê, gradientes mais acentuados convergem em direção às drenagens principais, reforçando o papel das cristas como áreas de recarga e dos vales como zonas preferenciais de descarga.

Diante desse conjunto, responde-se à pergunta de pesquisa ao caracterizar a configuração hidrogeológica e o padrão hidrodinâmico regional do Sinclinal Dom Bosco como um sistema organizado em unidades com contrastes hidráulicos delineados, com destaque para a maior produtividade do Cauê e menor para as formações do grupo Piracicaba e Sabará, sob controle estrutural marcante e gradientes que conectam cristas de recarga a zonas de drenagem. Recomenda-se, em consequência, fortalecer a rede piezométrica nas porções leste e nordeste, realizar novos ensaios de bombeamento e de resposta a estresse no Gandarela e no Moeda, e priorizar a proteção de áreas de maiores recargas mapeadas, inclusive com ajustes operacionais sazonais em estiagens e redistribuição de novas outorgas em favor de unidades com menor pressão de exploração. Essas ações são aderentes aos resultados obtidos e às limitações explicitadas quanto à escala anual e à heterogeneidade de meios fraturados, assegurando que a gestão hídrica desta estrutura avance sem extrapolações indevidas e com base no melhor sinal físico disponível.

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*, v. 90, p. 29–58, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00032-1).
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. *Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil*. *Marine and Petroleum Geology*, v. 33, p. 127–139, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.12.010>.
- ALMEIDA, L. G.; CASTRO, P. T. A.; ENDO, I.; FONSECA, M. A. *O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco (Quadrilátero Ferrífero, MG): estratigrafia e sistemas deposicionais*. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 2, p. 177–186, 2005. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2005352177186>.
- ANDERSON, M. P.; HUNT, R. J.; WOESSNER, W. W. *Hydrogeologic conceptual model building and testing: a review*. *Journal of Hydrology*, v. 535, p. 12–25, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.003>.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego: *Academic Press*, 1992.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Transport in the Groundwater System*. 2. ed. Amsterdam: Academic Press/Elsevier, 2015.
- ANDRADE, I. B. *Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco oeste do Sinclinal Moeda: passado, presente e futuro do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, Brasil*. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/63320>. Acesso em: 7 set. 2025.
- ANDRADE, I. B.; PAULA, R. S. de; TEIXEIRA, G. M.; NOVO, T. A.; MELO, M. C. de; COSTA, F. A. *Investigação do Fluxo no Sistema Aquífero do Flanco Oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 18, n. 05, p. 3350–3376, 2025.
- ANGELI, G. *Arcabouço estrutural e contribuição à estratigrafia do Grupo Maquiné, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais: idade e controle da mineralização aurífera*. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/5886/1/DISSERTAÇÃO%20ArcabouçoEstruturalContribuição.pdf>. Acesso em: 7 set. 2025.
- AZEVEDO, U. R.; BOURNONVILLE JR., B.; CASTRO, P. T. A.; COSTA, C. M.; FONSECA, M. A.; RENGER, F. E. *Quadrilátero Ferrífero (MG)*. In: SCHOBENHAUS,

C.; SILVA, C. R. (org.). *Geoparques do Brasil: propostas*. v. 1. Rio de Janeiro: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2012.

BAALOUSHA, H. M.; BARTH, N.; RAMASOMANANA, F. H.; AHZI, S. *Groundwater recharge estimation and its spatial distribution in arid regions using GIS: a case study from Qatar karst aquifer*. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 4, p. 1319–1329, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0503-4>.

BABINSKI, M.; CHEMALE JR., F.; VAN SCHMUS, W. R. *A idade das formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas e sua correlação com aquelas da África do Sul e Austrália*. In: *Simpósio do Cráton do São Francisco*, 2., 1993, Salvador. Anais... Salvador: SBG – Núcleo Bahia/Sergipe, 1993. p. 152–153.

BABINSKI, M.; CHEMALE JR., F.; VAN SCHMUS, W. R. *The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. *Precambrian Research*, v. 72, p. 235–245, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(94\)00091-5](https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)00091-5).

BALTAZAR, O. F.; BAARS, F. J.; LOBATO, L. M.; REIS, L. B.; ACHTSCHIN, A. B.; BERNI, G. V.; SILVEIRA, V. D. *Mapa geológico na escala 1:50.000 com nota explicativa*. In: LOBATO, L. M. et al. *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa*. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. CD-ROM.

BALTAZAR, O. F.; ROSIÈRE, C. A.; CORRÊA NETO, A. V.; SILVA, J. N. *Geologia estrutural do Grupo Maquiné, Supergrupo Rio das Velhas, na porção central do Quadrilátero Ferrífero (MG)*. In: *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 5., 1995, Gramado. Anais... Gramado: SBG, 1995. p. 11–13.

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*, v. 32, p. 471–499, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.03.021>.

BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. *Rio das Velhas Greenstone Belt structural evolution, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. In: *International Geological Congress*, 31., 2000, Rio de Janeiro. Abstracts... Rio de Janeiro.

BARBOSA, A. L. M. *Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero*. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 1968.

BARBOSA, G. V.; RODRIGUES, D. M. dos S. *Quadrilátero Ferrífero*. Belo Horizonte: UFMG, 1967.

BARBOSA, L. H. do C. *Serra do Itacolomi revisitada: estratigrafia, arcabouço estrutural e aplicação de métodos geofísicos, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

BEAR, J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: American Elsevier, 1972.

BEATO, D. A. C.; MONSORES, A. M.; BERTACHINI, A. C. *Potencial aquífero nos metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero – região da APA Sul RMBH – MG*. In: *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 14., 2006, Curitiba. Anais... Disponível em: <http://aguassubterraneas.abas.org>. Acesso em: 7 set. 2025.

BEATO, D. A. C.; MONSORES, A. M.; BERTACHINI, A. C. *Projeto APA Sul RMBH: hidrogeologia, mapa hidrogeológico, escala 1:50.000 em 3 partes*. Belo Horizonte: CPRM, 2005.

BOHNER, J.; SELIGE, T. *Previsão espacial de atributos do solo usando análise de terreno e regionalização climática*. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, v. 115, p. 13–27, 2002.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. *Principles of Geographical Information Systems*. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

BUSICO, G.; NTONA, M. M.; CARVALHO, S. C. P. et al. Simulating future groundwater recharge in coastal and inland catchments. *Water Resources Management*, v. 35, p. 3617–3632, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02907-2>.

CABRAL, A. R.; ZEH, A.; VIANNA, N. C.; ACKERMAN, L.; PAŠAVA, J.; LEHMANN, B.; CHRASTNÝ, V. *Molybdenum-isotope signals and cerium anomalies in Palaeoproterozoic manganese ore survive high-grade metamorphism*. *Scientific Reports*, v. 9, 4570, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40998-5>.

CARVALHO FILHO, A. de. *Solos e ambientes do Quadrilátero Ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos Tabuleiros Costeiros*. 2008. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

CARVALHO FILHO, A.; CURI, N.; SHINZATO, E. *Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 8, p. 903–916, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000800017>.

CBH RIO DAS VELHAS. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas: resumo executivo*. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixe vivo.org.br/media/2020/06/RESUMO-EXECUTIVO-PDRH-VELHAS-2015.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2025.

CHAUVET, A.; BARBOSA, J. S. F.; LADEIRA, E. *A three-stage structural evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil)*. *Precambrian Research*, v. 65, p. 139–155, 1994.

CHEMALE JR., F.; ROSIÈRE, C. A. *Arquitetura de domo e bacia no Quadrilátero Ferrífero e suas implicações na deformação das formações ferríferas do Proterozóico Inferior*. In: *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 4., 1987, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: SBG – Núcleo MG, 1987. v. 12, p. 172–175.

CLEARY, R. W. *Hidrologia de águas subterrâneas*. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. *Engenharia hidrológica 2*. Rio de Janeiro: ABRH; Ed. UFRJ, 1989.

CODEMIG; CPRM. Geological map of Minas Gerais, Brazil. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>. Acesso em: 7 set. 2025.

COOPER, J.; JACOB, C. E. *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history*. Eos, Transactions, American Geophysical Union, v. 27, n. 4, p. 526–534, 1946. DOI: <https://doi.org/10.1029/TR027i004p00526>.

COSTA, A. M. da; SALIS, H. H. C. de; VIANA, J. H. M.; PACHECO, F. A. L. *Groundwater recharge potential for sustainable water use in urban areas of the Jequitibá River Basin, Brazil*. *Sustainability*, v. 11, n. 10, p. 2955, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11102955>.

COSTA, A.M. da; Viana, J.H.M.; Evangelista, L.P.; et al. *Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais*. *Geografias* 2017, 14, 118–134.

COSTA, F. M. *Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas: estudo de casos no Quadrilátero Ferrífero (MG)*. 2005. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. *Projeto Quadrilátero Ferrífero: mapeamento geológico e recursos minerais*. Belo Horizonte: CPRM, 2011.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Guia para Elaboração de Modelos Hidrogeológicos Conceituais*. Brasília, 2018. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22505>. Acesso em: 2 ago. 2025.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Guia para elaboração de modelos hidrogeológicos conceituais*. Brasília, 2018. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22505>. Acesso em: 2 ago. 2025.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero*. Escala 1:100.000. Brasília: SGB/CPRM, 2022. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/23006>. Acesso em: 2 ago. 2025.

CROSBIE, R. S.; PEETERS, L. J. M.; HERRON, N.; et al. *Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: Use of regression kriging and the chloride mass balance method*. *Journal of Hydrology*, v. 561, p. 1063–1080, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.003>.

CROSBIE, R. S.; VAN NIELE, D. C.; DUGDALE, A. M.; et al. *A global database of groundwater recharge estimates and a comparison with available groundwater models*.

Journal of Hydrology, v. 567, p. 336–350, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.003>.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. *Hidrología Subterránea*. 1983

DA COSTA, V. S.; BRESSIANI, D. D.; CRUZ, R. C.; AUGUSTO FILHO, O. *Water resources sustainability based on groundwater recharge evaluated by different methods. Sustainability*, v. 11, n. 10, 2955, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11102955>.

DA SILVA, A. B.; NETO, A. F. S.; BERTACHINI, A. C. *Potencial de águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero – Estado de Minas Gerais*. Águas Subterrâneas, 1994. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24425>. Acesso em: 7 set. 2025.

DARCY, H. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*. Paris: Victor Dalmont, 1856. Disponível em: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k624312>.

DE MARSILY, G. *Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers*. Orlando: Academic Press, 1986.

DE PAULA, R. S.; MESQUITA, D. C.; DANTAS, J. C. M.; GUERRA, K. J. *Caracterização hidroquímica e isotópica das águas na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (Congonhas-MG) e sua correlação com a cota das unidades aquíferas*. Águas Subterrâneas, v. 32, n. 1, p. 150–153, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.29017>.

DE PAULA, R. S.; VELÁSQUEZ, L. N. M. *Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais*. Águas Subterrâneas, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29502>. Acesso em: 7 set. 2025.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation*, v. 51, n. 5, p. 427–433, 1996.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York: John Wiley & Sons, 1990.

DORR, J. V. N. II. *Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. U.S. Geological Survey Professional Paper 641-A. Washington, 1969. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/pp/0641a/report.pdf>. Acesso em: 7 set. 2025.

DRISCOLL, F. G. *Groundwater and Wells*. 2. ed. St. Paul: Johnson Filtration Systems, 1986.

EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA. *Solos do Quadrilátero Ferrífero sob diferentes coberturas vegetais e materiais de origem*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 130 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 264). Disponível em: <https://www.embrapa.br/infoteca>. Acesso em: 2 ago. 2025.

ENDO, I. *Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais*. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

ENDO, I.; CASTRO, P. T. A.; GANDINI, A. L. et al. *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.

ENDO, I.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F. et al. *Estratigrafia e arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero: nota explicativa do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (escala 1:150.000)*. Ouro Preto: UFOP, 2019. Disponível em: <https://www.qfe2050.ufop.br>. Acesso em: 7 set. 2025.

FARINA, F.; ALBERT, C.; MARTÍNEZ-DOPICO, C.; et al. *The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brazil): current models and open questions*. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 68, p. 4–21, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.01.010>.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; et al. *The Shuttle Radar Topography Mission. Remote Sensing of Environment*, v. 121, p. 118–131, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.013>.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (org.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14818>. Acesso em: 7 set. 2025.

FERNANDES, A. S. *Pluviometria na região da Serra do Caraça e influência da orografia sobre a distribuição das chuvas no Quadrilátero Ferrífero*. *GEOUSP – Espaço e Tempo*, v. 27, n. 3, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2023.206219>. Acesso em: 2 ago. 2025.

FERREIRA, Q. C. G.; BACELLAR, L. A. P. *Avaliação preliminar das condições hidrogeológicas no município de Ouro Preto, MG*. *Geonomos*, v. 18, p. 13–21, 2010.

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

FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 5. ed. Long Grove, IL: Waveland Press, 2018.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. *WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas*. *International Journal of Climatology*, v. 37, p. 4302–4315, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. *WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology*, v. 37, p. 4302–4315, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice-Hall*, 1979. Disponível em: <https://gw-project.org/books/groundwater/>. Acesso em: 7 set. 2025.
- FREITAS, A. R. de; DE PAULA, R. S.; GALVÃO, P. H. F. *Avaliação do balanço hídrico e recarga do Aquífero Gandarela na Serra do Curral, MG (2014–2023): resultados climatológicos (ETR, excedente, déficit) a partir da estação Cercadinho/INMET e método Thornthwaite–Mather. In: 51º Congresso Brasileiro de Geologia – CBG 2024. Trabalhos aprovados – na íntegra, 2024. Disponível em: <https://51cbg.com.br/evento/cbg2024/trabalhosaprovados/naintegra/890>. Acesso em: 2 ago. 2025.*
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; *et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data*, v. 2, 150066, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- GAIR, J. E. *The Sabará Formation. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, v. 7, n. 2, p. 68–69, 1958.
- GALDINO, S.; SANO, E. E.; ANDRADE, R. G.; *et al. Large-scale modeling of soil erosion with RUSLE for conservationist planning of degraded cultivated Brazilian pastures. Land Degradation & Development*, v. 27, p. 773–784, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2414>.
- GARCIA, R.; TEIXEIRA, W.; PIMENTEL, M. M.; *et al. Geologia e geocronologia em rochas metabásicas e metassedimentares da sequência do Grupo Sabará na região de Ouro Preto, Minas Gerais. Acta Geológica Leopoldensia*, v. 27, n. 11, p. 83–108, 1998.
- GOMES, M. O. S.; RODRIGUES, M. F.; DELICIO, M. P. *Evolução paleoclimática e paleoecológica da bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto (MG), com base na microflora. In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 21., 2009, Belém. Anais... Belém, p. 37.*
- GOMES, M. O. S.; RODRIGUES, M. F.; DELICIO, M. P. *Evolução paleoclimática e paleoecológica da bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto (MG), com base na microflora. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 21., 2009, Belém. Anais. Belém, 2009. p. 37.*
- GOOGLE EARTH ENGINE. *PML_V2 v0.1.8 – Coupled Evapotranspiration and Gross Primary Production (GPP) (2000–2023)*. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS_IGSNRR_PML_V2_v018. Acesso em: 2 ago. 2025.
- GUERRA, K. J. *Aplicação de método geofísico em estudo hidrogeológico no município de Nova Lima–MG: caracterização de aquíferos em área urbana. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.*

GUERRA, K. J. Aplicação de método geofísico em estudo hidrogeológico no município de Nova Lima, MG: caracterização de aquíferos em área urbana. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. San Diego: Academic Press, 1994.

HALFORD, K. J.; KUNIANSKY, E. L. *Spreadsheets for the Analysis of Aquifer-Test and Slug-Test Data*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 02–197, 2002. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr02197/>. Acesso em: 11 set. 2025.

HANTUSH, M. S. *Modification of the theory of leaky aquifers*. *Journal of Geophysical Research*, v. 65, n. 11, p. 3713–3725, 1960. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ065i011p03713>.

HANTUSH, M. S.; JACOB, C. E. *Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer*. *Transactions, American Geophysical Union*, v. 36, n. 1, p. 95–100, 1955. DOI: <https://doi.org/10.1029/TR036i001p00095>.

HARBAUGH, A. W. *MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model — the Ground-Water Flow Process*. (USGS Techniques and Methods 6-A16). Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2005. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16>.

HARBAUGH, A. W.; BANTA, E. R.; HILL, M. C.; McDONALD, M. G. *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model — User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process*. (USGS Open-File Report 00-92). Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2000. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/2000/0092>.

HEALY, R. W. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745>.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; STEIN, A. *A generic framework for spatial prediction by regression-kriging*. *Geoderma*, v. 120, p. 75-93, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00247-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00247-7).

HILL, M. C.; TIEDEMAN, C. R. *Effective Groundwater Model Calibration: With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.

HU, K.; AWANGE, J. L.; FOROOTAN, E.; GONCALVES, R. M.; FLEMING, K. *Hydrogeological characterisation of groundwater over Brazil using remotely sensed and model products*. *Science of the Total Environment*, v. 599–600, p. 372–386, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.188>.

HVORSLEV, M. J. *Time lag and soil permeability in ground-water observations*. Bulletin 36. Vicksburg: U.S. Army Waterways Experiment Station, 1951.

IGA. *Desenvolvimento ambiental de Ouro Preto – Microbacia do Ribeirão do Funil*. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Minas Gerais/CETEC, 1995. 363 p.

IZBICKI, J. A. *Geologic and hydrologic controls on the movement of water through a thick, heterogeneous unsaturated zone underlying an intermittent stream in the Western Mojave Desert, southern California*. *Water Resources Research*, v. 38, n. 3, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000WR000197>.

JENSEN, J. R.; EPIPHANIO, J. C. N. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, 2011.

JOHNSON, R. F. *Geology and ore deposits of the Cachoeira do Campo, Dom Bosco and Ouro Preto quadrangles, Minas Gerais, Brazil*. U.S. Geological Survey, Professional Paper 341-B, 1962.

KETABCHI, H.; MAHMOUDZADEH, D.; GHADIMI, S.; SAGHI JADID, M. *A review of evaluating groundwater balance in Iran: Methods and suggestions*. Tehran: Islamic Parliament Research Center of the Islamic Republic of Iran, 2018.

KIM, C. P.; SALVUCCI, G. D.; ENTEKHABI, D. *Groundwater–surface water interaction and the climatic spatial patterns of hillslope hydrologic response*. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 3, n. 3, p. 375–384, 1999. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-3-375-1999>.

KRUSEMAN, G. P.; DE RIDDER, N. A. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. 2. ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), 1990. (Publication 47).

LACEY, G. C.; GRAYSON, R. B. *Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia*. *Journal of Hydrology*, v. 204, p. 231–250, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00124-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00124-8).

LANA, C.; ALKMIM, F. F.; ARMSTRONG, R.; et al. *The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil*. *Precambrian Research*, v. 231, p. 157–173, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.02.016>.

MACHADO, N.; NOCE, C. M.; LADEIRA, E. A.; OLIVEIRA, O. A. B. *U-Pb geochronology of the Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco craton, Brazil*. *Geological Society of America Bulletin*, v. 104, p. 1221–1227, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<1221:UGOTAM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<1221:UGOTAM>2.3.CO;2).

MACHIWAL, D.; JHA, M. K. *GIS-based water balance modeling for estimating regional specific yield and distributed recharge in data-scarce hard-rock regions*. *Journal of Hydro-Environment Research*, v. 9, p. 554–568, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.12.001>.

MAGALHÃES, C. C. *Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero-MG): caracterização, impactos e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê*. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/54865>. Acesso em: 7 set. 2025.

MAGALHÃES, C. C.; MELO, M. C.; GUIGER, N.; PAULA, R. S. *The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil*. *Brazilian Journal of Geology*, v. 52, n. 4, e20220005, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjgeo/a/Tnm4vscJMtNs3BkYXVHhK5t/>. Acesso em: 2 ago. 2025.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. *Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos*. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 13, p. 53–64, 2009.

MESQUITA, D. C.; DANTAS, J. C. M.; DE PAULA, R. S.; GUERRA, K. J. *Estudos dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de campo em itabiritos brandos da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG*. *Geonomos*, v. 25, n. 2, p. 12–19, 2017.

MILLER, J. A. *Introduction and National Summary*. In: USGS. *Ground Water Atlas of the United States*. Reston: U.S. Geological Survey, 1999. Disponível em: http://capp.water.usgs.gov/gwa/ch_a/index.html. Acesso em: 7 set. 2025.

MOECK, C.; GRECH-CUMBO, N.; PODGORSKI, J.; et al. *A global-scale dataset of direct natural groundwater recharge rates: a review of variables, processes and relationships*. *Science of the Total Environment*, v. 717, 137042, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137042>.

MOREIRA, L. C. J.; DURAND, B. J.; TEIXEIRA, A. dos S.; ANDRADE, E. M. *Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL*. *Engenharia Agrícola*, v. 30, n. 6, p. 1170–1184, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000600007>. Acesso em: 2 ago. 2025.

MOURÃO, M. A. *Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/261>. Acesso em: 7 set. 2025.

NEUMAN, S. P. *Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response*. *Water Resources Research*, v. 11, n. 2, p. 329–342, 1975. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/WR011i002p00329>.

OLIVEIRA, O. A. B.; OLIVITO, J. P. R.; SILVA, D. R. *Caracterização da unidade espeleológica e das unidades geomorfológicas da região do Quadrilátero Ferrífero–MG*. 2011. Relatório técnico.

OTTONI, M. V. *et al.* Saturated hydraulic conductivity and steady-state infiltration rate database for Brazilian soils (Ksat-SSIR-DB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2025.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K. A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water. *Geosciences*, v. 5, n. 2, p. 117–126, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>.

PIRES, C. A. *et al.* Litho-structural conditioning in the exploration of fractured aquifers: case study in Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 29, p. 1657-1678, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02312-4>.

RAZACK, M.; HUNTLEY, D. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. *Ground Water*, v. 29, n. 6, p. 856–861, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1991.tb00556.x>.

REBOUÇAS, A. C. Importância da água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C. (org.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008. p. 23–26.

REILLY, T. E.; HARBAUGH, A. W. *Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038, 2004. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/sir/2004/5038>. Acesso em: 7 set. 2025.

REIS, L. A. *A bacia de antepaís paleoproterozóica Sabará, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil: tectônica, sedimentação, estratigrafia e petrogênese*. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADO, N. *Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. *Geonomos*, v. 2, p. 1–11, 1994.

ROLIM, V. K.; ALKMIM, F. F. Geometria 3D de falhas de empurrão e dobras associadas como expressões da morfologia do descolamento basal: resultados de uma simulação computacional. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 3, p. 295–302, 2004.

SCHLUMBERGER WATER SERVICES. *Estudo hidrogeológico: Coca-Cola FEMSA – unidade Itabirito*. Rio de Janeiro, 2017. Relatório técnico.

SEABER, P. R. *Hydrogeologic Units of the United States*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2222, 1988.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB/CPRM. *Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero*. Carta hidrogeológica; escala 1:100 000; nota explicativa. Brasília: SGB/CPRM, 2022. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/23414>. Acesso em: 9 set. 2025.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: ACM NATIONAL CONFERENCE, 23., 1968. *Proceedings*. [S.l.]: ACM, 1968. p. 517–524.

SILVA, F. R. *A paisagem do Quadrilátero Ferrífero, MG: potencial para o uso turístico da sua geologia e geomorfologia*. 2007. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUZA, S. M. T. *Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais*. 1. ed. Belo Horizonte: Hidrosistemas, 1995. 125 p.

SPIER, C.; OLIVEIRA, S.; SIAL, A.; RÍOS, F. *Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. *Precambrian Research*, v. 152, p. 170–206, 2007.

STRUCKMEIER, W.; MARGAT, J. *Hydrogeological Maps: A Guide and a Standard Legend*. Hannover: Verlag Heinz Heise (International Association of Hydrogeologists – International Contributions to Hydrogeology, 17), 1995.

TEIXEIRA DA COSTA, M. *Sedimentação e orogênese da Série de Minas*. Ouro Preto: SICEG – Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos, 1961.

TENENWURCEL, S. *Estimativa da recarga potencial e avaliação de sustentabilidade do uso de águas subterrâneas em bacias tropicais*. 2021. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

THEIS, C. V. *The relation between the lowering of the Piezometric Surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage*. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, v. 16, n. 2, p. 519–524, 1935. DOI: <https://doi.org/10.1029/TE016i002p00519>.

THIVYA, C.; CHIDAMBARAM, S.; RAO, M. S.; *et al.* *Identification of recharge processes in groundwater in hard rock aquifers of Madurai District using stable isotopes*. *Environmental Processes*, v. 3, p. 463–477, 2016.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. *The Water Balance*. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. (Publications in Climatology, v. VIII, n. 1).

TODD, D. K.; MAYS, L. W. *Groundwater hydrology*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

TÓTH, J. *A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins*. *Journal of Geophysical Research*, v. 68, n. 16, p. 4795–4812, 1963. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>.

UFMG – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. *Relatório Final – Subprojeto 1c (Solos): Modelagem de recarga potencial e fatores condicionantes*. Belo Horizonte: IGC/UFMG, 2022.

UFV – UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Soil map of Minas Gerais, Brazil. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.ufv.br/>. Acesso em: 7 set. 2025.

VASCONELOS, S. M. S. *Recarga do aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza, CE*. 1999. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

VIAL, D. S.; DE WITT, E.; LOBATO, L. M.; THORMAN, C. H. *The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 511–542, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2004.12.008>.

ZHANG, Y.; KONG D.; GAN R.; CHIEW F. H. S. *Global parameterization and validation of a two-source evapotranspiration model: PML-V2*. *Remote Sensing*, v. 11, n. 11, 1315, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11111315>.

APÊNDICE A – Instrumentos hidrológicos e hidrogeológicos levantados neste trabalho

Número outorga	E_31983	N_31983	Vazão (m³/h)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica	Tipo de aquífero	Classificação
00011/2020	664196.00	7748787.00	3,2	54	73,4	0,1649	Sabará/Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
01136/2018	655779.00	7744868.00	6,44	4,41	33,46	0,2217	Sabará/Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
04642/2018	652601.00	7746096.00	3,5	4	39	0,1000	Piracicaba (Cercadinho-mpc)	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
04877/2016	656259.00	7743418.00	5	6	47,5	0,1205	Sabará/Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
1016/2010	654953.95	7735351.24	0,9	8	90	0,0110	Itacolomi	Pouco Produtivo ou Não Aquífera
10308/2013	653691.45	7743204.10	95	5,39	41,58	2,6250	Itacolomi	Alta
10310/2013	653749.15	7743172.83	150	1,91	23,38	6,9865	Itacolomi	Muito Alta
10813/2011	654611.80	7735969.36	0,8	6	47	0,0195	Itacolomi	Pouco Produtivo ou Não Aquífera
11802/2015	633351.86	7739123.02	100	16,32	25,14	11,3379	Cauê	Muito Alta
12073/2008	663463.00	7747902.00	6,769	1	102,1	0,0670	Nova Lima	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
16055/2012	631731.00	7739412.00	0,942	10,9	40,8	0,0315	Piracicaba	Pouco Produtivo ou Não Aquífera
25093/2020	654769.00	7735744.00	2,1	7,33	13,8	0,3246	Itacolomi	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
25603/2023	665448.87	7746592.30	5	4	8	1,2500	Sabará	Geralmente baixa, porém localmente moderada
3187/2015	654953.95	7735351.24	1	8	89	0,0123	Itacolomi	Pouco Produtivo ou Não Aquífera
36817/2015	665294.95	7745094.00	14,5	0	13,45	1,0781	Sabará	Geralmente baixa, porém localmente moderada
36820/2015	660038.13	7745086.63	6	13,1	44,65	0,1902	Piracicaba (mpf)	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
44335/2020	628108.00	7739470.00	33	64,73	70,4	5,8201	Cauê	Alta
44335/2020	628099.90	7739455.24	7,2	N/A	N/A	-	Cauê	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
47924/2022	626352.13	7739160.15	616	35,86	55,5	31,3646	Cauê	Muito Alta
50346/2021	626352.13	7739160.15	216,1	35,86	55,5	11,0031	Cauê	Muito Alta
5737/2016	659388.78	7747918.53	1,8	2	76	0,0243	Nova Lima	Pouco Produtivo ou Não Aquífera
5743/2009	653706.02	7735147.26	2	2	105	0,0194	Itacolomi	Pouco Produtivo ou Não Aquífera
60489/2023	657914.22	7745248.68	36	-	-	-	Cauê	Moderada
636/2011	659388.78	7747918.53	100	16,32	25,14	11,3379	Cauê	Muito Alta
70738/2023	654761.35	7745777.10	2,48	30	76	0,0539	Piracicaba (Cercadinho-mpc)	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
72603/2023	655153.79	7745565.99	0,88	5	37	0,0275	Piracicaba (Cercadinho-mpc)	Pouco Produtivo ou Não Aquífera
73183/2023	655765.12	7744809.52	20	3,4	120,5	0,1708	Sabará/Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
75126/2023	655196.16	7745922.32	40,5	-	-	-	Cauê	Moderada
7902/2014	650479.90	7745592.23	5,657	0	48	0,1179	Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
7903/2014	650551.81	7745538.23	5,426	9	44	0,1550	Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
8818/2009	656477.57	7743517.16	4	0	60	0,0667	Sabará/Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
907/2007	656215.26	7743365.79	3	16	60	0,0682	Sabará/Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
09336/2010	650595.87	7745591.21	9,569	5,5	15,4	0,9666	Cauê	Geralmente baixa, porém localmente moderada
09334/2010	650479.90	7745592.23	9,569	5,5	15,4	0,9666	Cauê	Geralmente baixa, porém localmente moderada
03895/2006	652514.35	7746127.78	3,5	21	68,5	0,0737	Piracicaba	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
05622/2007	664802.92	7745460.68	9,22	2,83	59,12	0,1638	Gandarela	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
08706/2020	669925.89	7744488.15	2,7	4,8	51,7	0,0576	Itacolomi	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa
14561/2014	644100.66	7728365.76	8,056	7,5	39,2	0,2541	Sabará	Geralmente muito baixa, porém localmente baixa

APÊNDICE B – Testes de bombeamento

Poço: 636/2011						
Rebaixamento				Recuperação		
Tempo (min)	Hora Local	ND (m)	Vazão (l/h)	Tempo (min)	Hora Local	N.A. (m)
1	14:01	17,65	-	1	08:01	17,6
1,5	14:01:30	17,77	-	1,5	08:01:30	17,93
2	14:02	18,13	-	2	08:02	16,88
3	14:03	18,87	-	3	08:03	16,85
4	14:04	19,37	-	4	08:04	16,83
5	14:05	19,88	-	5	08:05	16,82
6	14:06	19,9	46.000	6	08:06	16,81
8	14:08	20,93	-	8	08:08	16,81
10	14:10	20,99	-	10	08:10	16,78
12	14:12	21,6	-	12	08:12	16,73
14	14:14	21,7	-	14	08:14	16,73
16	14:16	21,88	-	16	08:16	16,7
18	14:18	22	-	18	08:18	16,69
20	14:20	22,36	72.000	20	08:20	16,67
25	14:25	22,83	72.000	25	08:25	16,61
30	14:30	23,04	72.000	30	08:30	16,58
40	14:40	23,14	79.000	40	08:40	16,59
60	15:00	23,63	100.000	60	09:00	16,59
90	15:30	24,43	100.000	90	09:30	16,48
120	16:00	24,49	100.000	120	10:00	16,45
150	16:30	24,59	100.000	150	10:30	16,41
180	17:00	24,66	100.000	180	11:00	16,39
210	17:30	24,6	100.000	210	11:30	
240	18:00	24,66	100.000	240	12:00	
270	18:30	24,7	100.000	270	12:30	
300	19:00	24,75	100.000	300	13:00	
330	19:30	24,81	100.000	330	13:30	
360	20:00	24,85	100.000	360	14:00	
390	20:30	24,9	100.000	390	14:30	
420	21:00	24,95	100.000	420	15:00	
450	21:30	24,99	100.000	450	15:30	
480	22:00	25,09	100.000	480	16:00	
510	22:30	25,04	100.000	510	16:30	
540	23:00	25,07	100.000	540	17:00	
570	23:30	25,09	100.000	570	17:30	
600	00:00	25,1	100.000	600	18:00	
630	00:30	25,11	100.000	630	18:30	
660	01:00	25,13	100.000	660	19:00	
690	01:30	25,14	100.000	690	19:30	
720	02:00	25,16	100.000	720	20:00	
750	02:30	25,17	100.000	750	20:30	
780	03:00	25,17	100.000	780	21:00	
810	03:30	25,18	100.000	810	21:30	
840	04:00	25,19	100.000	840	22:00	

870	04:30	25,2	100.000	870	22:30	
900	05:00	25,2	100.000	900	23:00	
930	05:30	25,2	100.000	930	23:30	
960	06:00	25,21	100.000	960	00:00	
990	06:30	25,21	100.000	990	00:30	
1020	07:00	25,2	100.000	1020	01:00	
1050	07:30	25,19	100.000	1050	01:30	
1080	08:00	25,19	100.000	1080	02:00	
1110	08:30	25,18	100.000	1110	02:30	
1140	09:00	25,18	100.000	1140	03:00	
1170	09:30	25,17	100.000	1170	03:30	
1200	10:00	25,16	100.000	1200	04:00	
1230	10:30	25,16	100.000	1230	04:30	
1260	11:00	25,15	100.000	1260	05:00	
1290	11:30	25,16	100.000	1290	05:30	
1320	12:00	25,14	100.000	1320	06:00	
1350	12:30	25,15	100.000	1350	06:30	
1380	13:00	25,14	100.000	1380	07:00	
1410	13:30	25,14	100.000	1410	07:30	
1440	14:00	25,14	100.000	1440	08:00	

Poço:7903-2014						
Tempo (min)	Hora local	ND (m)	Vazão (l/h)	Tempo (min)	Hora local	N.A. (m)
1	08:01	9	9.000	1	08:01	44
1,5	08:01:30	9,7	9.658	1,5	08:01:30	43,3
2	08:02	10,3	9.103	2	08:02	42,7
3	08:03	11,5	8.898	3	08:03	41,9
4	08:04	12,4	8.703	4	08:04	41,6
5	08:05	13,3	8.515	5	08:05	41,2
6	08:06	14,4	8.515	6	08:06	40,7
8	08:08	15,2	8.425	8	08:08	40,2
10	08:10	16,3	8.336	10	08:10	39,5
12	08:12	17,4	8.330	12	08:12	39,1
14	08:14	18,3	8.250	14	08:14	38,5
16	08:16	19,1	8.081	16	08:16	37,9
18	08:18	20,2	7.841	18	08:18	37,4
20	08:20	21	7.689	20	08:20	36,4
25	08:25	23,2	7.615	25	08:25	35,2
30	08:30	24,2	7.542	30	08:30	35,2
40	08:40	26,7	7.266	40	08:40	34,7
60	09:00	26,9	7.135	60	09:00	33,6
90	09:30	27,4	7.008	90	09:30	33,1
120	10:00	27,4	7.008	120	10:00	32,4
150	10:30	28,2	6.827	150	10:30	31,7
180	11:00	29,2	6.711	180	11:00	31,3
210	11:30	30,2	6.491	210	11:30	31
240	12:00	31,1	6.338	240	12:00	30,4
270	12:30	33,2	6.140	270	12:30	28,1

300	13:00	34,6	5.910	300	13:00	27
330	13:30	35,4	5.823	330	13:30	25,1
360	14:00	36,5	5.739	360	14:00	22,9
390	14:30	37,2	5.657	390	14:30	20,7
420	15:00	38,4	5.617	420	15:00	18,3
450	15:30	39,7	5.538	450	15:30	16,4
480	16:00	41,2	5.500	480	16:00	14,1
510	16:30	42,9	5.460	510	16:30	12,4
540	17:00	44	5.426	540	17:00	10,4
570	17:30	44	5.426	570	17:30	9,6
600	18:00	44	5.426	600	18:00	9
630	18:30	44	5.426	630	18:30	
660	19:00	44	5.426	660	19:00	
690	19:30	44	5.426	690	19:30	
720	20:00	44	5.426	720	20:00	
750	20:30	44	5.426	750	20:30	
780	21:00	44	5.426	780	21:00	
810	21:30	44	5.426	810	21:30	
840	22:00	44	5.426	840	22:00	
870	22:30	44	5.426	870	22:30	
900	23:00	44	5.426	900	23:00	
930	23:30	44	5.426	930	23:30	
960	00:00	44	5.426	960	00:00	
990	00:30	44	5.426	990	00:30	
1020	01:00	44	5.426	1020	01:00	
1050	01:30	44	5.426	1050	01:30	
1080	02:00	44	5.426	1080	02:00	
1110	02:30	44	5.426	1110	02:30	
1140	03:00	44	5.426	1140	03:00	
1170	03:30	44	5.426	1170	03:30	
1200	04:00	44	5.426	1200	04:00	
1230	04:30	44	5.426	1230	04:30	
1260	05:00	44	5.426	1260	05:00	
1290	05:30	44	5.426	1290	05:30	
1320	06:00	44	5.426	1320	06:00	
1350	06:30	44	5.426	1350	06:30	
1380	07:00	44	5.426	1380	07:00	
1410	07:30	44	5.426	1410	07:30	
1440	08:00	44	5.426	1440	08:00	

Poço: 8818-2009									
Tempo (minutos)	Hora	N.D. (m)	Vazão (l/h)	Tempo (minutos)	Hora	N.D. (m)	Vazão (l/h)	Tempo (minutos)	N.A. (m)
1	08:01	10,1 9	14,666	510	16:30	60	4	1	58,9
1,5	08:01:30	18,4 3	14,666	540	17:00	104, 79	4	1,5	57,85
2	08:02	23,3 5	14,666	570	17:30	104, 92	4	2	56,25

3	08:03	26,3 5	14,666	600	18:00	105, 1	4	3	54,89
4	08:04	29,2 5	14,666	630	18:30	105, 28	4	4	51,35
5	08:05	30,9 6	14,666	660	19:00	105, 39	4	5	48,96
6	08:06	31,6 9	14,666	690	19:30	105, 61	4	6	45,69
8	08:08	33,0 2	14,666	720	20:00	105, 73	4	8	41,56
10	08:10	34,0 1	14,666	750	20:30	105, 84	4	10	37,45
12	08:12	34,9 5	14,666	780	21:00	105, 91	4	12	34,65
14	08:14	35,2 5	14,666	810	21:30	106, 07	4	14	32,12
16	08:16	36,0 2	14,666	840	22:00	106, 07	4	16	30,45
18	08:18	36,8 5	14,666	870	22:30	106, 07	4	18	28,52
20	08:20	37,4 5	6,6	900	23:00	106, 07	4	20	25,96
25	08:25	38,2 6	6,34	930	23:30	106, 07	4	25	23,45
30	08:30	40,1 2	6,19	960	00:00	106, 07	4	30	21,36
40	08:40	41,2 5	6,05	990	00:30	106, 07	4	40	20,36
60	09:00	43,6 5	5,91	1020	01:00	106, 07	4	60	18,21
90	09:30	45,1 2	5,74	1050	01:30	106, 07	4	90	16,36
120	10:00	47,6 5	5,54	1080	02:00	106, 07	4	120	14,23
150	10:30	49,6 9	5,25	1110	02:30	106, 07	4	150	12
180	11:00	51,2 5	4,8	1140	03:00	106, 07	4	180	9,96
210	11:30	53,2 5	4,17	1170	03:30	106, 07	4	210	7,2
240	12:00	54,2 5	4	1200	04:00	106, 07	4	240	5,1
270	12:30	55,3 6	4	1230	04:30	106, 07	4	270	3,65
300	13:00	56,7 4	4	1260	05:00	106, 07	4	300	3
330	13:30	57,4 5	4	1290	05:30	106, 07	4	330	2,1
360	14:00	58,1	4	1320	06:00	106, 07	4	360	1,65
390	14:30	59	4	1350	06:30	106, 07	4	390	1,2
420	15:00	59,4 2	4	1380	07:00	106, 07	4	420	0,9

450	15:30	59,6 5	4	1410	07:30	106, 07	4	450	0,46
480	16:00	60	4	1440	08:00	106, 07	4	480	0,08

Poço: 907-2007									
Tempo (minutos)	Hora	N.D. (m)	Vazão (l/h)	Tempo (minutos)	Hora	N.D. (m)	Vazão (l/h)	Tempo (minutos)	N.A. (m)
1	07:01	19,35		510	15:30	60	3000	1	58,8
1,5	07:01:30		5860	540	16:00	60	3000	1,5	56,45
2	07:02			570	16:30	60	3000	2	54,19
3	07:03	24,1	5405	600	17:00	60	3000	3	49,85
4	07:04			630	17:30	60	3000	4	47,86
5	07:05			660	18:00	60	3000	5	43,07
6	07:06			690	18:30	60	3000	6	41,35
8	07:08	31,12	5015	720	19:00	60	3000	8	40,52
10	07:10			750	19:30	60	3000	10	40,11
12	07:12	35,41	4901	780	20:00	60	3000	12	38,51
14	07:14	37,18	4848	810	20:30	60	3000	14	36,2
16	07:16	39,85	4610	840	21:00	60	3000	16	33,67
18	07:18	42,1	4435	870	21:30	60	3000	18	31,65
20	07:20	44,15	4191	900	22:00	60	3000	20	28,8
25	07:25	49,9	3780	930	22:30	60	3000	25	25,71
30	07:30	55,3	3448	960	23:00	60	3000	30	23,14
40	07:40	58,41	3116	990	23:30	60	3000	40	19,77
60	08:00	59,85	3081	1020	00:00	60	3000	60	17,4
90	08:30	60	3000	1050	00:30	60	3000	90	16,15
120	09:00	60	3000	1080	01:00	60	3000	120	16,03
150	09:30	60	3000	1110	01:30	60	3000	150	
180	10:00	60	3000	1140	02:00	60	3000	180	
210	10:30	60	3000	1170	02:30	60	3000	210	
240	11:00	60	3000	1200	03:00	60	3000	240	
270	11:30	60	3000	1230	03:30	60	3000	270	
300	12:00	60	3000	1260	04:00	60	3000	300	
330	12:30	60	3000	1290	04:30	60	3000	330	
360	13:00	60	3000	1320	05:00	60	3000	360	
390	13:30	60	3000	1350	05:30	60	3000	390	
420	14:00	60	3000	1380	06:00	60	3000	420	
450	14:30	60	3000	1410	06:30	60	3000	450	
480	15:00	60	3000	1440	07:00	60	3000	480	

Poço 3187-2015									
Tempo (minutos)	Hora	N.D. (m)	Vazão (l/h)	Tempo (minutos)	Hora	N.D. (m)	Vazão (l/h)	Tempo (minutos)	N.A. (m)
1	14:01	64,24	10,22	510	22:30	89	1	1	30,1
1,5	14:01:30	68,4	9,2	540	23:00	89	1	1,5	24,52
2	14:02	73,54	8,894	570	23:30	89	1	2	22,19
3	14:03	75,1	8,7	600	00:00	89	1	3	21,32
4	14:04	77,2	7,314	630	00:30	89	1	4	20

5	14:05	79,05	6,025	660	01:00	89	1	5	19,24
6	14:06	82	5,8	690	01:30	89	1	6	18,13
8	14:08	84,23	6,285	720	02:00	89	1	8	17,24
10	14:10	86,46	6,158	750	02:30	89	1	10	16,4
12	14:12	86,72	6,153	780	03:00	89	1	12	15,3
14	14:14	86,99	6,1	810	03:30	89	1	14	14,1
16	14:16	89	6,025	840	04:00	89	1	16	13,3
18	14:18	89,1	6	870	04:30	89	1,2	18	12,6
20	14:20	89,1	5,9	900	05:00	89	1	20	11,5
25	14:25	89,1	5,7	930	05:30	89	1	25	10,4
30	14:30	89,1	5,542	960	06:00	89	1	30	9,84
40	14:40	89,1	5,317	990	06:30	89	1	40	9
60	15:00	89	5,108	1020	07:00	89	1	60	8,24
90	15:30	89	4,8	1050	07:30	89	1	90	8
120	16:00	89	4,8	1080	08:00	89	1	120	
150	16:30	89	3,4	1110	08:30	89	1	150	
180	17:00	89	2,769	1140	09:00	89	1	180	
210	17:30	89	2,6	1170	09:30	89	1	210	
240	18:00	89	2,6	1200	10:00	89	1	240	
270	18:30	89	1,6	1230	10:30	89	1	270	
300	19:00	89	1,31	1260	11:00	89	1	300	
330	19:30	89	1,31	1290	11:30	89	1	330	
360	20:00	89	1,3	1320	12:00	89	1	360	
390	20:30	89	1	1350	12:30	89	1	390	
420	21:00	89	1	1380	13:00	89	1	420	
450	21:30	89	1	1410	13:30	89	1	450	
480	22:00	89	1	1440	14:00	89	1	480	

Poço: 1016-2010			
Tempo de funcionamento	Vazão (L/h)	Rebaixamento (m)	Recuperação (m)
00:01 minuto	5700	10,6	
00:30 minutos	3400	38,5	17,7
01:00 hora	2600	56,3	9,6
01:30 hora	2000	67,4	
02:00 horas	1600	73,8	
03:00 horas	1300	77,6	
04:00 horas	1200	79,2	
05:00 horas	1000	80	
06:00 horas	1000	80	
10:00 horas	900	81	
12:00 horas	900	81	
24:00 horas	900	81	

Poço: 5743-2009			
Tempo de Funcionamento	Vazão (litros/hora)	Rebaixamento (m)	Recuperação (m)
00:01 MINUTO	4200	6,3	
00:30 MINUTOS	2700	62,4	28,5

01:00 HORA	2500	85,6	3,3
01:30 HORA	2300	93,7	
02:00 HORAS	2200	99,8	
03:00 HORAS	2000	102,5	
04:00 HORAS	2000	103	
05:00 HORAS	2000	103	
06:00 HORAS	2000	103	
12:00 HORAS	2000	103	
18:00 HORAS	2000	103	
24:00 HORAS	2000	103	

