

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

Bruno Pandolf Ladeira

**POTENCIAL HÍDRICO SUBTERRÂNEO DO SINCLINAL SANTA RITA –
PROVÍNCIA MINERAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS,
BRASIL**

Belo Horizonte
2025

Bruno Pandolf Ladeira

**POTENCIAL HÍDRICO SUBTERRÂNEO DO SINCLINAL SANTA RITA –
PROVÍNCIA MINERAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS,
BRASIL**

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula

Coorientadora: Profa. Dra. Débora Silvano
Moreira

Belo Horizonte
2025

L154p
2025

Ladeira, Bruno Pandolf.

Potencial hídrico subterrâneo do Sinclinal Santa Rita - Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil [manuscrito] / Bruno Pandolf Ladeira. – 2025.

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

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Co-orientadora: Débora Silvano Moreira.

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

Inclui bibliografias.

Inclui apêndices e anexos.

1. Águas subterrâneas – Teses. 2. Desenvolvimento de recursos hídricos – Teses. 3. Hidrogeologia – Teses. 4. Reservatórios subterrâneos – Teses. 5. Aquíferos – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Moreira, Débora Silvano. 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

Potencial hídrico subterrâneo do sinclinal Santa Rita- Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil

BRUNO PANDOLF LADEIRA

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 em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do IGC/UFMG.

Aprovada em 03 de junho de 2025, pela banca constituída pelos membros:

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

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

Prof(a). Dr(a). Maria Antonieta Alcântara Mourão
CPRM

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

Belo Horizonte, 03 de junho de 2025.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Rodrigo, pela orientação criteriosa, dedicação e apoio ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também à coorientadora Professora Débora, por todo o apoio, valiosos ensinamentos e conselhos.

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências (IGC) da UFMG pela oportunidade de formação acadêmica de excelência, bem como pelo apoio institucional, infraestrutura e ambiente propício à realização deste trabalho.

À Pró-reitoria de Pós-graduação (PRPg) da UFMG pelo apoio financeiro na participação do 51º Congresso Brasileiro de Geologia, pelo Programa de Apoio a Mestrandas(os) (PAME).

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por bolsa em parte dessa trajetória. "O presente trabalho foi realizado com apoio Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001".

Ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) pelo fornecimento dos dados necessários para execução da pesquisa, e parceria com o IGC da UFMG no projeto "Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológica a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero, com foco na região do Sinclinal Moeda, MG"

À Bentley Systems, Inc. que autorizou e cedeu a licença do software Leapfrog Geo.

As alunas Alexa, Izamara, Vitória e outros pelo incentivo, boas conversas e apoio na compilação de dados, interpretação de testes de bombeamento, e elaboração de gráficos para a pesquisa.

À Camila pela orientação no uso do software Leapfrog Geo.

Ao Gilberto pelo detalhamento da figura das seções hidrogeológicas.

À Marília pelo apoio na tradução do texto para o inglês.

Aos colegas do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear e JMendes que me encorajaram e me motivaram ao longo desta jornada.

A minha companheira, Letícia, pelo amor, compreensão e paciência durante todo esse percurso. Sua presença constante, seu apoio nos momentos difíceis e sua confiança foram fundamentais para eu alcançar esta conquista.

À minha irmã, Natália, pelo apoio incondicional e incentivo em todos os momentos desta caminhada.

Aos meus pais, Angela e Josias, pela confiança depositada em mim em cada etapa deste caminho.

RESUMO

O Sinclinal Santa Rita localiza-se na porção leste da Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Essa estrutura geológica é muito relevante do ponto de vista econômico por hospedar grandes jazidas de minério de ferro da Formação Cauê, igualmente importante quanto ao potencial hidrogeológico refletido pelas altas taxas de recarga e excelente produtividade dos poços tubulares. Dadas essas características, é alvo de intensa exploração das reservas hídricas subterrâneas. O quantitativo dessas reservas não era conhecido. Nesse contexto, esse trabalho visa estimar as reservas hídricas subterrâneas renováveis e permanentes, e principalmente, avaliar o potencial hídrico do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita. A pesquisa partiu da definição das unidades aquíferas e não aquíferas desse sinclinal, suas condições de contorno, determinação dos parâmetros hidrodinâmicos de seus aquíferos, e análise do sentido de fluxo da água subterrânea. Foram compartimentados dois sistemas aquíferos nesse sinclinal, Sistema Aquífero Minas, formado pelas unidades aquíferas (Quartzítico Fissural, Cauê, Gandarela) e Sistema Aquífero Estrada Real, composto pelas unidades aquíferas (Sabará e Itacolomi). As unidades não aquíferas que ocorrem no sinclinal são Aquitardo Batatal, Aquitardo Piracicaba e Aquiclude de Metabásica. O Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita é contornado pelo Aquitardo Rio das Velhas, a oeste, e Aquífero Granítico-Gnáissico, a leste. Os resultados foram obtidos por um modelo tridimensional desse sistema aquífero que indicou a renovação da reserva hídrica subterrânea desse sistema aquífero a cada ano, com um volume de $8,6 \times 10^7$ m³/ano. Já o recurso hídrico subterrâneo permanente desse sinclinal é de $1,1 \times 10^9$ m³. Estima-se que no mínimo 72,3% da reserva hídrica renovável desse sinclinal seja direcionada para os cursos d'água, o que indica a importância dela de manter a disponibilidade hídrica local dos cursos d'água que pertencem à bacia hidrográfica do Rio Doce.

Palavras-chave: água subterrânea; hidrogeologia; reserva hídrica; recurso hídrico; Aquífero Cauê.

ABSTRACT

The Santa Rita Syncline is situated in the eastern sector of the Mineral Province of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. This geological structure is of significant economic importance, as it hosts major iron ore deposits of the Cauê Formation. It is equally noteworthy for its hydrogeological potential, characterized by high recharge rates and excellent productivity of tubular wells. Due to these features, the syncline is subject to intense groundwater extraction. The quantity of groundwater reserves was previously unknown. In this context, this study aims to estimate the renewable and permanent groundwater reserves and, more importantly, to evaluate the overall water potential of the Santa Rita Syncline Aquifer System. The research involved the identification of aquifer and non-aquifer units within the syncline, the definition of its hydrogeological boundaries, the determination of the hydrodynamic parameters of its aquifers, and the analysis of groundwater flow. Two distinct aquifer systems were identified: the Minas Aquifer System, consisting of the Fissured Quartzite, Cauê, and Gandarela formations; and the Estrada Real Aquifer System, comprising the Sabará and Itacolomi formations. Non-aquifer units within the syncline include the Batatal and Piracicaba aquitards, as well as the Metabasic Aquiclude. The syncline is bounded by the Rio das Velhas Aquitard to the west and the Granitic-Gneiss Aquifer to the east. Results from a three-dimensional hydrogeological model indicate that the Santa Rita Syncline Aquifer System is recharged annually, with a renewable groundwater volume of approximately 8.6×10^7 m³/year. The estimated permanent groundwater reserve is 1.1×10^9 m³. It is further estimated that at least 72.3% of the renewable groundwater reserve contributes to watercourses within the syncline, highlighting its importance in sustaining streamflow within the Doce River Watershed.

Keywords: groundwater; hydrogeology; water reserves; water resources; Cauê Aquifer.

SUMÁRIO

CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
1.1 Objetivos	12
1.2 Revisão bibliográfica	12
CAPÍTULO 1 - ARTIGO 01	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Coleta de dados	26
3.2 Definição das unidades aquíferas e não aquíferas	27
3.3 Propriedades hidrodinâmicas	29
3.4 Condições de contorno	30
3.5 Análise de fluxo da água subterrânea	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Sistemas aquíferos	35
4.2 Condições de Contorno	43
4.3 Análise de fluxo da água subterrânea	46
5 CONCLUSÃO	49
6 MATERIAL SUPLEMENTAR	49
7 AGRADECIMENTOS	50
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
CAPÍTULO 2 – ARTIGO 2	56
1 INTRODUÇÃO	58
2 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	60
3 MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1 Coleta de dados	65

3.2	Reserva renovável	66
3.3	Reserva permanente	70
3.4	Reserva explorada	73
3.5	Entradas e saídas d'água laterais	73
4	RESULTADOS	79
4.1	Reserva renovável	79
4.2	Reserva permanente	85
4.3	Reserva explorada	89
4.4	Entradas e saídas d'água laterais	91
5	CONCLUSÃO	97
6	MATERIAL SUPLEMENTAR	98
7	AGRADECIMENTOS	99
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	APÊNDICE A – Parâmetros hidrodinâmicos calculados	116
	APÊNDICE B – Seleção de estações fluviométricas para interpretação da reserva renovável	118
	APÊNDICE C – Gráficos de vazão dos cursos d'água analisados e da pluviometria média regional de Thiessen	120
	APÊNDICE D – Informações complementares do cálculo da reserva permanente	121
	APÊNDICE E – Informações complementares do cálculo das entradas e saídas de água laterais (com exemplo do modelo de Kuang e Jiao (2014))	125
	ANEXO A – Análise de ensaios de bombeamento dos poços	130

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A água é um recurso fundamental para a fauna, flora e desenvolvimento antrópico, por promover a manutenção da vida, o bem-estar do homem e a autossuficiência econômica de uma região ou país (PINTO, 2003). Nesse sentido, a gestão dos recursos hídricos é importante para garantir às futuras gerações a necessária disponibilidade hídrica (BRASIL, 1997), com o intuito de preservar os recursos hídricos superficiais e subterrâneos de forma integrada, devido a interação entre esses (MATTIUZI e MARQUES, 2019).

O Sinclinal Santa Rita possui 297 km² e localiza-se na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, província mineral situada na região central do estado de Minas Gerais (MG). Nesse sinclinal, a principal fonte de água subterrânea corresponde ao Aquífero Cauê. No ano de 2020, o total outorgado de uso da água subterrânea nesse sinclinal era 2,4 m³/s (SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÃO AMBIENTAL - SIAM, 2023), com 99,6 % dessa vazão outorgada no Aquífero Cauê. Essa vazão outorgada é cedida principalmente aos empreendimentos de extração do minério de ferro. Empreendimentos esses que são fonte de receita para os municípios de Mariana e de Ouro Preto, onde o sinclinal está inserido (CARVALHO *et al.*, 2012). Por isso, é de grande importância conhecer as reservas hídricas subterrâneas de água do Sinclinal Santa Rita, essenciais para a fauna, a flora, e as comunidades locais que dependem da água subterrânea. Primeiro foi necessário avaliar o potencial hídrico subterrâneo desse sinclinal, dimensionando-o, avaliando sua capacidade produtiva, e estimando o total dessas reservas.

Essa dissertação é dividida em dois capítulos. O primeiro é um artigo intitulado “O relevante potencial de produção da subterrânea do Sinclinal Santa Rita, Quadrilátero Ferrífero, Brasil”. Nele foram estimados os intervalos de condutividade hidráulica e armazenamento das unidades aquíferas e não aquíferas; caracterizadas as condições de contorno; avaliada a dinâmica de fluxo da água subterrânea na região. O segundo é um artigo intitulado “A reserva hídrica subterrânea do sinclinal Santa Rita, Quadrilátero Ferrífero, Brasil”, que apresenta as estimativas das reservas renovável e permanente, e das entradas e saídas laterais de água subterrânea do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita.

A presente pesquisa faz parte do projeto “Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológico a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero, tendo como área piloto a região do Sinclinal Moeda, MG”. Esse projeto é uma iniciativa da parceria do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) e da Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) com o Instituto de Geociências (IGC) da

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Esse trabalho também contou com o apoio da Bentley Systems, Inc. que disponibilizou a licença estudantil do software Leapfrog Geo.

1.1 Objetivos

Objetivo geral:

- Avaliar o potencial hídrico subterrâneo do Sinclinal Santa Rita, dimensionando-o, avaliando sua capacidade produtiva, e estimando o total dessas reservas.

Objetivos específicos:

- Construir o modelo tridimensional de conformação do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita.
- Estimar intervalos de condutividade hidráulica e de armazenamento das unidades aquíferas.
- Caracterizar as condições de contorno do sistema aquífero desse sinclinal.
- Avaliar a dinâmica de fluxo da água subterrânea na região.
- Estimar a reserva renovável e a reserva permanente desse sistema aquífero.
- Estimar as saídas e entradas de água subterrânea pelos limites laterais desse sistema aquífero.

1.2 Revisão bibliográfica

Os estudos hidrogeológicos do Quadrilátero Ferrífero surgiram da necessidade de compreender a influência do uso da água por parte das atividades extrativas minerais sobre a qualidade e disponibilidade hídrica na Região Metropolitana de Belo Horizonte que já foi muito dependente de poços tubulares até a implantação de sistemas de abastecimento de água superficial na década de 1970 (ROSA *et al.*, 1997).

Cabe mencionar estudos de escala estadual que ocorreram nas décadas de 1970 a 1990. A Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA-MG) perfurou poços tubulares e conduziu diversos estudos sistemáticos de recursos hídricos desde 1973, com o objetivo de estabelecer sistemas de abastecimento de água. Sadala e Gonçalves (1980) compilaram as informações de 467 poços perfurados entre 1973 e 1979 no estado de Minas Gerais, e apresentaram um parecer das vazões desses poços em diferentes litotipos. Peixoto *et al.* (1982), técnicos da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), elaboraram o mapa

hidrogeológico de Minas Gerais que incorpora as rochas do Quadrilátero Ferrífero em outras unidades de diferentes localidades, e simplifica a descrição da permeabilidade e qualidade da água das unidades aquíferas. Souza (1995) apresentou uma descrição detalhada de todos os poços perfurados pela COPASA-MG até 1995.

No Quadrilátero Ferrífero já foram executados, ao longo do tempo, diversos estudos hidrogeológicos em unidades extrativas minerais. Vale mencionar o estudo do rebaixamento do lençol freático da mina de Conceição – corpo “C”, de Tárzia, Neto, Santana (1986); o estudo da hidrogeologia e desaguamento da mina de Águas Claras, de Bertachini (1994); o estudo da tipologia dos aquíferos e um modelo hidrogeológico para a região sul de Belo Horizonte, setor setentrional do platô da Moeda, de Amorim e Alkmim (1997); a caracterização preliminar do aquífero Jardim Canadá”, de Lazarim e Loureiro (1998); o estudo dos efeitos da mineração Capão Xavier, um depósito de minério de ferro para o abastecimento de água de Belo Horizonte, de Amorim, Rubio e Alkmim (1999); o estudo do desaguamento da mina de ferro do Pico do Itabirito: um estudo de caso de recuperação ambiental, de Bertachini *et al.* (1999); o estudo do desaguamento de minas de minério de ferro e a capacidade de prever impactos ambientais, experiência da MBR, de Amorim, Grandchamp e Bertachini (2001); o estudo intitulado “Mina de Águas Claras – Uma história de sucesso de desaguamento” de Grandchamp *et al.* (2001); o estudo da determinação do balanço hídrico na recuperação do nível de água do Aquífero Cauê na mina de Águas Claras, Serra do Curral, município de Nova Lima, Minas Gerais, de Grandchamp e Velásquez (2002); o estudo da recuperação do Aquífero Cauê e do enchimento da cava na mina de Águas Claras, Serra do Curral, de Grandchamp (2003); a avaliação preliminar das condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto, MG, de Ferreira e Barcelar (2010); o estudo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de campo em itabiritos brandos da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG, de Mesquita *et al.* (2017); a caracterização hidroquímica e isotópica das águas, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no município de Congonhas-MG, e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema, de Paula *et al.* (2018); a correlação entre dados de perfilagem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, de Dantas *et al.* (2018); o estudo da determinação da condutividade hidráulica do Aquífero Cauê na região oeste do Sinclinal Moeda, Nova Lima, MG, de Bertachini (2020); a datação da água subterrânea usando dados únicos e de séries temporais de trítio ambiental no Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, de Silva e Costa (2021); o mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero, de Fiume *et al.* (2022); a avaliação

do balanço hídrico e modelagem numérica hidrogeológica da formação de lago na cava da mina de Águas Claras, de Pereira (2024).

Entre os estudos anteriores relevantes para o desenvolvimento da pesquisa, destacam-se a avaliação do potencial das águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero, realizada por Silva, Neto e Bertachini (1994); o estudo hidrogeológico na área da Área de Proteção Ambiental (APA) Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte, conduzido por Beato, Monsores e Bertachini (2005); a caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, apresentada por Mourão (2007); a caracterização mecânica e hidrogeológica das minas de Alegria Centro e Sul, conduzida por Carneiro (2013); a avaliação da condutividade hidráulica dos itabiritos das cavas das minas de Alegria Central e Alegria Sul, realizada por Carneiro, Marques e Costa (2015); e o modelo hidrogeológico numérico de fluxo da água subterrânea aplicado à previsão de rebaixamento do Aquífero Cauê na mina de Alegria, desenvolvido por Costa (2017). Destacam-se também os estudos pertencentes ao mesmo projeto deste mestrado, intitulado “Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológica a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero, tendo como áreas piloto as regiões do Sinclinal Moeda e do Homoclinal Serra do Curral”, como as contribuições de Magalhães *et al.* (2022), Andrade (2023), Meireles (2023), Guimarães (2024) e Zupo *et al.* (2025).

O primeiro estudo que tentou quantificar as reservas exploráveis no Quadrilátero Ferrífero foi realizado por Silva, Neto e Bertachini (1994). Os autores sistematizaram informações e dados disponíveis de estudos de desaguamento de minas de ferro e do mapeamento hidrogeológico do município de Belo Horizonte, para avaliar o potencial dos mananciais de águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. Eles identificaram as reservas das unidades aquíferas Moeda, Cauê e Cercadinho como as principais formações aquíferas do Quadrilátero Ferrífero. As reservas exploráveis dessas unidades foram estimadas na ordem de cinco bilhões de metros cúbicos. Na época, os autores consideraram que os recursos hídricos subterrâneos eram muito pouco utilizados na região, e que praticamente não ocorria recarga das águas superficiais para os aquíferos em decorrência da saturação dos reservatórios de água subterrânea.

Beato, Monsores e Bertachini (2005) conduziram um estudo hidrogeológico e hidroquímico na APA Estadual Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul RMBH). O objetivo do trabalho foi avaliar os diferentes tipos de ocorrência de água subterrânea de acordo com as particularidades geológicas, hidrodinâmicas e hidroquímicas da região. Os resultados indicaram que os recursos hídricos da área da APA Sul RMBH estão sujeitos a impactos de diversas naturezas devido à crescente ocupação. Os autores destacaram a

necessidade da continuidade de estudos hidrogeológicos detalhados com séries históricas de monitoramento de níveis piezométricos, vazões e de qualidade da água, para permitir a previsão de impactos e a intervenção de forma oportuna e adequada.

Mourão (2007) conduziu um estudo complementar ao estudo de Beato, Monsore e Bertachini (2005), de conhecimento hidrogeológico integrado na porção setentrional do Sinclinal Moeda e parte do Homoclinal Curral. Nesse estudo, a autora analisou a hidrodinâmica, a recarga e descarga, e a hidroquímica das águas subterrâneas do Homoclinal Serra do Curral, do Sinclinal Moeda e da Faixa Transpressiva Tamanduá-Mutuca, com enfoque no Aquífero Cauê, devido ao seu significativo potencial hidrogeológico, seu aproveitamento para abastecimento de parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte, e sua importância na manutenção das condições ambientais da região.

Carneiro (2013) avaliou a estabilidade e o fluxo subterrâneo dos maciços das cavas em expansão das minas Alegria Centro e Sul, localizadas na área do Sinclinal Santa Rita. Para a caracterização geomecânica, foram realizadas análises das propriedades mecânicas das rochas pelos métodos de classificação geomecânica de massa rochosa (*rock mass rating* – RMR) e do índice de resistência geológica (*geological strength index* – GSI), feitos ensaios físicos para caracterização das propriedades de resistência dos maciços, e executadas análises de estabilidade por equilíbrio limite. A caracterização hidrogeológica envolveu a determinação das condutividades hidráulicas dos maciços rochosos e solos por meio de diferentes métodos, e desenvolvidas análises de fluxos pelo método de elementos finitos através do *software Slide*. Para a caracterização hidrogeológica, foram estimadas condutividades hidráulicas por meio de ensaios de campo que apresentaram resultados próximos dos esperados de ensaios de laboratório, possivelmente devido ao efeito de escala. O autor concluiu que o desaguamento imposto sobre a formação ferrífera pode alterar o comportamento efluente do rio Piracicaba para um comportamento influente em um trecho local próximo a essas duas minas.

Carneiro, Marques e Costa (2015) estimaram a condutividade hidráulica em quatro litotipos diferentes de itabiritos das minas de Alegria Central e Sul. Os métodos de infiltração e *packer tests* indicaram, respectivamente, a mediana da condutividade hidráulica de $1,2 \times 10^{-7}$ m/s e $9,6 \times 10^{-7}$ m/s. O intervalo de condutividades hidráulicas determinado por ambos os métodos variou de $1,3 \times 10^{-8}$ m/s a $7,3 \times 10^{-6}$ m/s. Esses resultados foram corroborados por Costa (2017), que obteve, através de testes de bombeamento executados no próprio poço de bombeamento e em poços de observação, a média de condutividade hidráulica para todos os tipos de itabiritos para a mina de Alegria de $4,42 \times 10^{-6}$ m/s, com resultados que variaram de $1,72 \times 10^{-7}$ m/s a $1,24 \times 10^{-4}$ m/s.

Costa (2017) estimou através de modelo numérico que a vazão de pico de bombeamento da mina de Alegria deverá atingir, até 2042, 3,2 m³/s para o desaguamento da cava. Os métodos de contenção de fluxo da água subterrânea (*cut-off walls*) foram aplicados conjuntamente aos poços, com o objetivo de reduzir o impacto na vazão do rio Piracicaba. Através de simulações desse modelo numérico foi quantificado o volume de água que deverá ser restituído ao rio Piracicaba e afluentes para preservar suas vazões históricas.

Magalhães (2023) construiu um modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda, enquanto Andrade (2023) desenvolveu o mesmo tipo de modelo para o flanco oeste deste sinclinal. Ambos os estudos visaram avaliar a variação regional dos níveis d'água pelo desaguamento por parte de poços outorgados pelo Instituto Mineiro de Gestão de Águas. Os estudos envolveram a construção do modelo hidrogeológico conceitual com a definição de unidades aquíferas e condições de contorno, estimativas de parâmetros hidrodinâmicos, da recarga e do balanço hídrico, e o cálculo da reserva renovável. A partir das informações do modelo conceitual, foram desenvolvidos modelos de fluxo regional para cada flanco através do *software FeflowTM*. Foi avaliado o rebaixamento regional do nível d'água no Aquífero Cauê e nas unidades aquíferas adjacentes, a partir da calibração desses modelos, e simulações da dinâmica de fluxo de 1999 a 2039.

Magalhães *et al.* (2022) e Andrade (2023) propuseram a definição de unidades hidrolíticas e não aquíferas que utilizam homônimos das unidades litoestratigráficas. Nesses trabalhos foi adotado o mesmo método de designação para as unidades aquíferas e não aquíferas do Sinclinal Santa Rita, com a comparação das características hidrogeológicas do Quadrilátero Ferrífero descritas nos estudos anteriormente mencionados.

CAPÍTULO 1 - ARTIGO 01

O relevante potencial de produção de água subterrânea do Sinclinal Santa Rita, Quadrilátero Ferrífero, Brasil

RESUMO

O Sinclinal Santa Rita localiza-se na porção leste da Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Essa estrutura geológica é muito relevante do ponto de vista econômico por hospedar grandes jazidas de minério de ferro da Formação Cauê, explotadas por empreendimentos minerários. Do ponto de vista hidrogeológico, essa unidade é a principal fonte de água subterrânea na região que é também utilizada por esses empreendimentos em suas atividades operacionais. Nesse contexto, esse trabalho visa avaliar o potencial de produção da água subterrânea da formação ferrífera Cauê e demais unidades aquíferas do Sinclinal Santa Rita, com a definição das unidades aquíferas e não aquíferas desse sinclinal, suas condições de contorno, determinação dos parâmetros hidrodinâmicos, e análise do sentido de fluxo da água subterrânea. Foram compartimentados nesse sinclinal dois sistemas aquíferos, Sistema Aquífero Minas, formado pelas unidades aquíferas (Quartzítico Fissural, Cauê, Gandarela) e Sistema Aquífero Estrada Real, composto pelas unidades aquíferas (Sabará e Itacolomi). Esses sistemas aquíferos são separados pelo Aquitardo Piracicaba. Outras unidades não aquíferas que ocorrem no sinclinal são Aquitardo Batatal e Aquiclude de Metabásica. O sistema hidrogeológico do Sinclinal Santa Rita é contornado pelo Aquitardo Rio das Velhas, a oeste, e Aquífero Granítico-Gnáissico, a leste. Esse último está hidráulicamente conectado ao sistema aquífero do sinclinal, o que caracteriza esse sistema hidrogeológico como aberto. A importância do Aquífero Cauê se expressa pela elevada condutividade hidráulica, cuja mediana é $6,22 \times 10^{-6}$ m/s, pelo alto coeficiente de armazenamento, cuja mediana é 12,5%, e por permitir o fluxo da água subterrânea do flanco oeste para o flanco leste do sinclinal. Essa dinâmica de fluxo indica maior tempo de residência das águas subterrâneas profundas do flanco leste.

Palavras-chave: água subterrânea; hidrogeologia; Aquífero Cauê; gestão hídrica.

ABSTRACT

The Santa Rita Syncline, located in the eastern sector of the Mineral Province of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, hosts significant iron ore deposits of the Cauê Formation, exploited by mining operations. From a hydrogeological standpoint, this formation constitutes the main groundwater reservoir in the region, which water is used in mining activities. This study aims to evaluate the groundwater production potential of the Cauê ferriferous formation and other aquifer units of the Santa Rita Syncline by defining aquifer and non-aquifer units, establishing boundary conditions, determining hydrodynamic parameters, and analyzing groundwater flow patterns. Two aquifer systems were identified within the syncline: the Minas Aquifer System, comprising the Fissured Quartzite, Cauê, and Gandarela units; and the Estrada Real Aquifer System, including the Sabará and Itacolomi units. These are separated by the Piracicaba Aquitard. Additional non-aquifer units include the Batatal Aquitard and the Metabasic Aquiclude. The hydrogeological system of the Santa Rita Syncline is bounded by the Rio das Velhas Aquitard to the west and the Granitic–Gneiss Aquifer to the east, the latter being hydraulically connected to the synclinal aquifer system, thus characterizing it as an open hydrogeological system. The Cauê Aquifer plays a key role due to its high hydraulic conductivity (median of 6.22×10^{-6} m/s) and storage coefficient (median of 12.5%), enabling groundwater flow from the western to the eastern flank of the syncline. This flow pattern suggests a longer residence time for deep groundwater in the eastern flank.

Keywords: groundwater; hydrogeology; Cauê Aquifer; water management.

1 INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico representa o fluxo da água nos três estados da matéria na atmosfera, superfície e no meio subterrâneo. A água subterrânea constitui uma fase desse ciclo (TODD e MAYS, 2005), é responsável por armazenar a água das chuvas que infiltra na terra, e por fornecer água às nascentes, surgências e rios (FEITOSA *et al.*, 2008). O processo que direciona a água subterrânea para as fontes d'água superficiais é o fluxo da água subterrânea. Esse é governado pelas cargas hidráulicas desse recurso hídrico, que são o potencial de pressão da água no meio subterrâneo, em conjunto com a condutividade hidráulica e armazenamento de água do meio subterrâneo (FREEZE e CHERRY, 1979). A condutividade hidráulica e armazenamento de água são os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero. Eles são fatores intrínsecos do meio, e indicam o grau de facilidade do escoamento da água subterrânea, e a quantidade dessa em um espaço unitário, respectivamente (FEITOSA *et al.*, 2008). A análise em conjunto da dinâmica de fluxo da água e dos parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos de um sistema aquífero determinam o potencial hídrico subterrâneo desse. Barbosa *et al.* (2017) e Magalhães *et al.* (2022) executaram essa análise para o Sistema Aquífero Centro-Ocidental Urucuia e porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, respectivamente.

A hidrogeologia da formação ferrífera Cauê é muito bem conhecida em outras localidades do Quadrilátero Ferrífero, como no Sinclinal Moeda e Homoclinal Serra do Curral (MAGALHÃES, 2023; ANDRADE, 2023). No Sinclinal Santa Rita, o conhecimento hidrogeológico do aquífero associado a essas rochas é de escala local, como no estudo de Costa (2017) que consiste na aplicação de um modelo de fluxo numérico para previsão de rebaixamento do Aquífero Cauê em um empreendimento minerário do Sinclinal Santa Rita. Por essa razão, a hidrogeologia de todo esse sinclinal é foco desse estudo que abrange o Aquífero Cauê e demais unidades aquíferas e não aquíferas dos supergrupos Minas e Estrada Real.

No Sinclinal Santa Rita, o recurso hídrico subterrâneo associado à formação ferrífera Cauê é principalmente utilizado por empreendimentos de extração de minério de ferro. No ano de 2020, o total outorgado de uso da água subterrânea no Sinclinal Santa Rita era $2,11 \times 10^5$ m³/dia (SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÃO AMBIENTAL - SIAM, 2023), com 99,6% dessa vazão outorgada em locais de ocorrência da formação ferrífera Cauê. Essa vazão é bem superior à demanda hídrica dos municípios próximos, Mariana e Ouro Preto, que possuem, respectivamente, 61.387 e 74.821 habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2023). De acordo com o IBGE (2020), o consumo

per capita médio de água no Brasil é 0,116 m³/habitante/dia, o que indica que os municípios de Mariana e Ouro Preto teriam uma demanda hídrica de 1,58x10⁴ m³/dia.

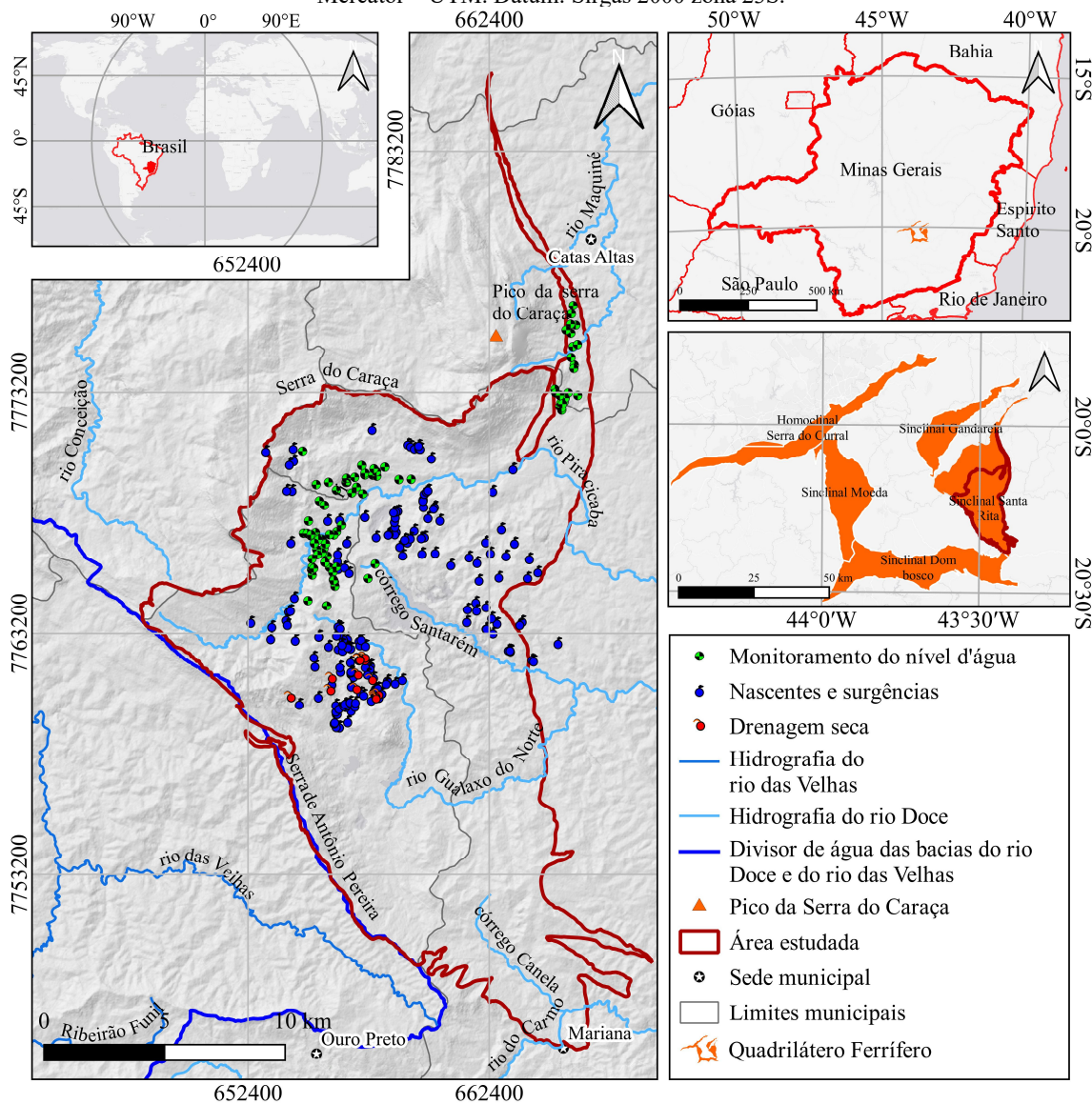
Este estudo visa avaliar a importância hídrica do Sinclinal Santa Rita, com o objetivo de responder à seguinte questão: o potencial de produção da água subterrânea do Aquífero Cauê, no Sinclinal Santa Rita, tem a mesma relevância que em outras regiões, como o Sinclinal Moeda e Homoclinal da Serra do Curral?

Este estudo é o primeiro de caráter regional para o Sinclinal Santa Rita elaborado a partir de dados de monitoramento local, o que amplia o conhecimento da hidrogeológico para o Quadrilátero Ferrífero. De modo específico foi efetuada a avaliação do potencial de produção da água subterrânea do Sinclinal Santa Rita, definidas as unidades aquíferas e não aquíferas, calculados a condutividade hidráulica, o coeficiente de armazenamento e a capacidade específica de poços, caracterizadas as condições de contorno, e determinada a dinâmica de fluxo da água subterrânea na região. Os resultados indicam que essa unidade aquífera apresenta significativo potencial para o abastecimento hídrico da região que compreende os municípios de Mariana e Ouro Preto.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A área estudada, Sinclinal Santa Rita, possui 297 km². Situa-se na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, província mineral de grande relevância nacional, localizado no estado de Minas Gerais, Brasil. A área é limitada a norte pelo divisor hidrográfico da Serra do Caraça, a oeste pelo contato das rochas dos supergrupos Rio das Velhas e Minas na linha de cumeada da serra, conhecida localmente, por Serra de Antônio Pereira, a sul pelo rio do Carmo, e a leste pelo contato com o embasamento granítico-gnáissico (Figura 1).

Figura 1: Localização do Sinclinal Santa Rita com a distribuição dos indicadores de nível d'água (INAs) e piezômetros, de nascentes e surgências e de drenagens secas levantadas. Sistema de Projeção Transversa de Mercator – UTM. Datum: Sirgas 2000 zona 23S.

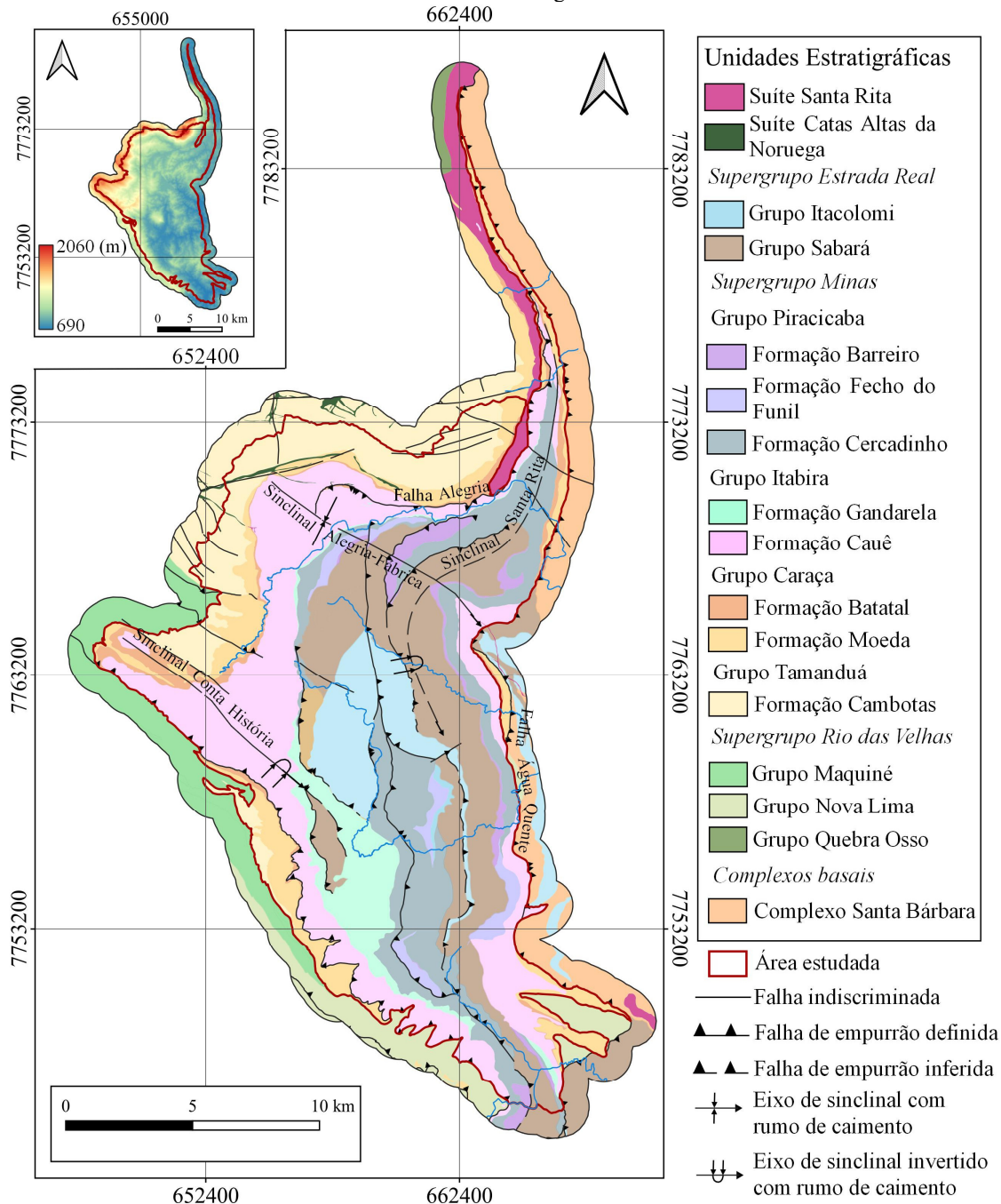


Fonte: Mapa criado a partir dos dados de SIAM (2023), modelo digital de elevação do satélite Alos Palsar de 2011 (JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY - JAXA, 2011) e bases geográficas de Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA, 2023).

A Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero está localizada na borda sul do Cráton São Francisco (ALMEIDA, 1977). Em uma concepção estratigráfica mais atual, Endo *et al.*, (2019), subdividem o Quadrilátero Ferrífero nos complexos metamórficos basais, na sucessão de rochas do Supergrupo Rio das Velhas, na sucessão do Supergrupo Minas, nas rochas do Supergrupo Estrada Real, e em granitoides arqueanos e paleoproterozoicos. As rochas dos supergrupos Minas e Estrada Real constituem o Sinclinal Santa Rita.

O complexo metamórfico basal aflora na porção leste da área, representado pelo Complexo Santa Bárbara de idade arqueana, composto por granitos, gnaisses e migmatitos. Sobreposto, se encontra o Supergrupo Rio das Velhas que ocorre na porção oeste da área. Esse supergrupo é caracterizado da base ao topo por rochas metavulcânicas máfica-ultramáficas do Grupo Quebra Osso, rochas metavulcânicas e metassedimentares do Grupo Nova Lima, e por rochas metassedimentares do Grupo Maquiné (ALKMIM e MARSHAK, 1998; FERNANDES, RONCATO e PAULA, 2023). Em contato discordante com esse supergrupo, ocorrem rochas do Supergrupo Minas, sobre as quais, também em contato discordante, está o Supergrupo Estrada Real (Figura 2).

Figura 2: Mapa geológico simplificado do Sinclinal Santa Rita, com mapa hipsométrico. Projeção Transversa de Mercator – UTM. Datum: Sirgas 2000/zona 23S.



Fonte: adaptado de Endo *et al.*, 2019

O Supergrupo Minas é composto da base ao topo pelos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba (DORR, 1969). O Supergrupo Rio das Velhas e o Complexo Santa Bárbara não afloram na área, portanto não serão descritos.

O Grupo Tamanduá é dividido pela Formação Cambotas na base e Formação Morro Grande no topo. Na área ocorre apenas a Formação Cambotas, composta essencialmente de quartzitos com intercalações de xistos filíticos e quartzosos, e xistos ferruginosos (ENDO, *et al.*, 2020).

O Grupo Caraça é representado pela Formação Moeda na base e Formação Batatal no topo. A Formação Moeda é formada de quartzitos sericíticos, de granulação fina a grossa, com lentes de metaconglomerado. A Formação Batatal é constituída por filitos sericíticos e filitos grafíticos (SILVA, MONTEIRO e BALTAZAR, 2005).

O Grupo Itabira é a unidade hospedeira das mineralizações de ferro da Formação Cauê, unidade basal desse grupo (RONCATO *et al.*, 2024). É composta de formação ferrífera do tipo Lago Superior, subordinadamente dolomitos e filitos. No topo, ocorre a Formação Gandarela que integra dolomitos, itabiritos dolomíticos e filitos (DORR, 1969).

O Grupo Piracicaba é constituído por quatro formações da mais antiga para a mais nova: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho é caracterizada pela ocorrência de quartzitos ferruginosos, filitos prateados e, subordinadamente, dolomito, xisto sericítico e metaconglomerado. A Formação Fecho do Funil ocorre em contato gradacional com a Formação Cercadinho, sendo formada de filitos, filitos dolomíticos, metassiltitos, dolomitos quartzosos e argilosos. A Formação Taboões é composta de ortoquartzitos, e a Formação Barreiro, de filitos e, subordinadamente, xistos (ENDO *et al.*, 2020).

O Supergrupo Estrada Real foi definido por Teixeira da Costa (1961), e resgatado na estratigrafia regional por Endo *et al.* (2019). Esse supergrupo abrange rochas metassedimentares marinhas do Grupo Sabará e metassedimentares continentais do Grupo Itacolomi. O Grupo Sabará é composto pelas formações Córrego do Germano, Saramenha, e Catarina Mendes. A Formação Córrego do Germano é a unidade basal do grupo. É constituída por xistos, quartzitos e filitos. A Formação Saramenha reúne metagrauvas, quartzitos e formação ferrífera bandada. A Formação Catarina Mendes corresponde à unidade de topo, sendo composta de biotita-quartzo xistos, quartzitos e filitos. O Grupo Itacolomi é representado pela Formação Florália, na base, e a Formação Pico do Itacolomi, no topo.

A Formação Florália consiste em ortoquartzitos, enquanto a Formação Pico do Itacolomi é constituída predominantemente por quartzitos, com ocorrência de metaconglomerados, formações ferríferas e filitos (ENDO *et al.*, 2020).

Na Serra do Caraça, porção norte da área estudada, ocorrem diques de rochas metamáficas da Suíte Catas Altas da Noruega, e metaultramáficas da Suíte Santa Rita, ambas de idade proterozóica (ENDO *et al.*, 2019).

Em relação ao modelo estrutural, o Sinclinal Santa Rita possui eixo de direção norte-sul, com vergência para oeste, e redobramentos de eixos de direção NW-SE, como Sinclinal Conta História e Sinclinal Alegria-Fábrica Nova (DORR, 1969; ENDO *et al.*, 2019). Insere-se na *Nappe* Santa Rita do Sistema de *Nappes* Ouro Preto que possui vergência para SSW. A *Nappe* Santa Rita é delimitada na base pela Falha São Bento, e no topo pela Falha Água Quente (ENDO *et al.*, 2020). Essa última justapõe as rochas do Complexo Santa Bárbara sobre as unidades dos supergrupos Minas e Estrada Real.

O Sinclinal Santa Rita possui vergência para oeste. Sua estratigrafia encontra-se normal a oeste da charneira, e invertida a leste, próximo a Falha de Água Quente (MAXWELL, 1972; FERREIRA FILHO, 1999). O acamamento das rochas desse sinclinal possui mergulho regional para leste, em ângulos de 26 a 65° na porção sul e central, e maior inclinação na terminação norte do sinclinal, próximo a Serra do Caraça. Esses mergulhos mostram pequenas variações na orientação devido aos dobramentos sinuosos do Sinclinal Alegria-Fábrica e Sinclinal Conta História (LOBATO *et al.*, 2005a; LOBATO *et al.*, 2005b; LOBATO *et al.*, 2005c; LOBATO *et al.*, 2005d).

A área estudada possui altos topográficos na porção norte, onde se encontra a Serra do Caraça, com altitudes de até 2060 metros, e na porção oeste, onde está a Serra de Antônio Pereira, com altitudes do cume de 1850 a 1300 metros. Os cumes de ambas as serras são delimitadores hidrográficos, e coincidem em geral com os limites da área estudada. Destaca-se a Serra de Antônio Pereira por ser o divisor de águas da bacia hidrográfica do rio das Velhas, a oeste da área, e a bacia hidrográfica do rio Doce, na qual a área estudada está inserida. O restante da área é caracterizado por um relevo de colinas com cotas de 690 a 1100 metros (DORR, 1969). As menores altitudes ocorrem ao longo do rio do Carmo, ao sul, e nos cursos inferiores do córrego Santarém e rio Gualaxo do Norte, na porção leste. As principais drenagens da região são os rios Maquiné, Piracicaba, Gualaxo do Norte, e do Carmo.

O comportamento hidrogeológico no Quadrilátero Ferrífero é muito diversificado, devido a compartimentação das unidades aquíferas por diques básicos e rochas pouco permeáveis, como os filitos da Formação Batatal e do Grupo Piracicaba (MOURÃO, 2007). Ramos, Cordeiro, Fernandes (2020) propõem uma classificação das unidades hidroestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero em sete grandes sistemas aquíferos: Sistema Aquífero Granítico-Gnáissico, Aquíclode/Aquitardo, Sistema Aquífero Xistoso, Sistema Aquífero Carbonático, Sistema Aquífero Formação Ferrífera, Sistema Aquífero Quartzítico, e Sistema Aquífero Granular. No presente trabalho é proposta uma nova classificação regional para as unidades aquíferas e não aquíferas do Sinclinal Santa Rita.

Cruz *et al.* (2022) estimou que no Sinclinal Moeda, estrutura que compõe a porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, possui pluviometria média anual de 1496,2 mm, com mínimo de 551,9 mm e máxima de 2399,4mm, com base em dados de 1984 a 2019. Essa pluviometria mantém a recarga direta do aquífero pela infiltração (FREITAS, PAULA e ANTUNES, 2025). A recarga pode ocorrer de forma indireta pela transferência lateral de água através de unidades aquíferas vizinhas. A descarga dos aquíferos pode ocorrer em nascentes, ao longo de cursos d'água, onde boa parte da água influi para os rios, e lateral, para outros sistemas aquíferos (RAMOS, CORDEIRO E FERNANDES, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo seguiu as seguintes etapas (i) coleta de dados, (ii) definição das unidades aquíferas e não aquíferas; (iii) levantamento dos valores dos parâmetros hidrodinâmicos e cálculo da capacidade específica dos poços; (iv) identificação das condições de contorno; (v) análise do fluxo da água subterrânea.

3.1 Coleta de dados

A base de dados para entendimento do fluxo da água subterrânea do Sinclinal Santa Rita é composta por séries de níveis d'água resultantes do monitoramento feito a partir de indicadores de nível d'água (INAs) e piezômetros e pelo cadastro de nascentes.

Informações geológicas foram obtidas de Endo *et al.* (2019), a hidrografia foi adquirida no portal da Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável (FBDS, 2018), e a topografia decorre do modelo digital de elevação do levantamento do Alos Palsar 12,5 x 12,5 m (JAXA, 2011), retirado do portal Alaska Satellite Facility (ASF).

Os dados de monitoramento do nível d'água foram obtidos de relatórios de pesquisa hidrogeológica de empreendimentos de extração mineral como exigência para obtenção de outorgas de recursos hídricos e para atendimento a condicionantes estabelecidas pelo órgão público responsável pela gestão dos recursos hídricos, Instituto Mineiro de Gestão de Águas (Igam). Esses relatórios encontram-se disponíveis na documentação de outorga de recursos hídricos do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM, 2023) sob responsabilidade do Igam. Foram analisados 148 INAs e piezômetros, com dados de 2004 a 2020. Houve aumento do número desses instrumentos, apesar de muitos já terem sido desativados. No ano

hidrológico de 2019/2020, havia 90 instrumentos ativos. Os 58 instrumentos restantes foram desativados. Esses dados se encontravam disponíveis como dados tratados ou apresentados em gráficos. Nesse último caso, foi necessário o emprego do *software Engauge Digitizer™* para a extração dos dados contidos nos gráficos. Esse procedimento é considerado representativo para a escala regional do presente estudo.

Dentre os pontos d'água, foram coletados dados de localização, e por vezes de vazões, referente a 233 nascentes e surgências, e 14 pontos de indicação de drenagem seca. Esses levantamentos de pontos d'água foram realizados pelos empreendimentos entre 2004 e 2018. A Figura 1 apresenta a localização de instrumentos de monitoramento do nível d'água e pontos d'água cadastrados utilizados no presente estudo.

3.2 Definição das unidades aquíferas e não aquíferas

A atribuição das unidades aquíferas do Sinclinal Santa Rita se embasou no conceito de aquífero de Lohman *et al.* (1972), adaptado por Gustafson e Krásný (1994), para classificação dos tipos de aquíferos pela porosidade predominante, espessura da unidade geológica, e pelo potencial de produtividade (Tabela 1) em conformidade com o método de Struckmeir e Margat (1995) adaptado por Diniz *et al.* (2012).

A definição de aquífero, adaptada de Lohman *et al.* (1972), é uma formação, grupo de formações ou parte de uma formação geológica saturada de água, suficientemente permeável para fornecer quantidades significativas de água para poços e nascentes. Esse conceito foi adaptado de Gustafson e Krásný (1994) para incluir rochas cristalinas no conceito de aquífero.

Struckmeir e Margat (1995) classificam as unidades aquíferas em seis classes pelo potencial de produtividade. Essas classes são determinadas pelas características hidráulicas do aquífero. Um aquífero de produtividade muito alta possui poços com capacidade específica maior que $1,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou vazões superiores a $2,78 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$; sua condutividade hidráulica pode atingir valores acima de 10^{-4} m/s . Na outra extremidade da classificação, aquíferos pouco produtivos ou não aquíferos possuem condutividades hidráulicas inferiores a 10^{-8} m/s , poços com capacidade específica abaixo de $1,11 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e vazões menores que $2,78 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 1: Proposta de caracterização hidráulica das classes de aquíferos. Vazão específica dos poços (Q/s); Transmissividade (T) e Condutividade hidráulica (K) do aquífero; Vazão de bombeamento do teste de vazão máxima dos poços(Q).

Q/s (m ³ /s/m)(*)	T (m ² /s)	K (m/s)	Q (m ³ /s)(**)	Produtividade (***)	Classe
$Q/s \geq 1,11 \times 10^{-3}$	$T \geq 10^{-2}$	$K \geq 10^{-4}$	$Q \geq 2,78 \times 10^{-2}$	Muito alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destaquem em âmbito nacional	(1)
$5,56 \times 10^{-4} \leq Q/s < 1,11 \times 10^{-3}$	$10^{-3} \leq T < 10^{-2}$	$10^{-5} \leq K < 10^{-4}$	$1,39 \times 10^{-2} \leq Q < 2,78 \times 10^{-2}$	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.	(2)
$2,78 \times 10^{-4} \leq Q/s < 5,56 \times 10^{-4}$	$10^{-4} \leq T < 10^{-3}$	$10^{-6} \leq K < 10^{-5}$	$6,94 \times 10^{-3} \leq Q < 1,39 \times 10^{-2}$	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.	(3)
$1,11 \times 10^{-4} \leq Q/s < 2,78 \times 10^{-4}$	$10^{-5} \leq T < 10^{-4}$	$10^{-7} \leq K < 10^{-6}$	$2,78 \times 10^{-3} \leq Q < 6,94 \times 10^{-3}$	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.	(4)
$1,11 \times 10^{-5} \leq Q/s < 1,11 \times 10^{-4}$	$10^{-6} \leq T < 10^{-5}$	$10^{-8} \leq K < 10^{-7}$	$2,78 \times 10^{-4} \leq Q < 2,78 \times 10^{-3}$	Geralmente baixa, porém localmente muito baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.	(5)
$Q/s < 1,11 \times 10^{-5}$	$T < 10^{-6}$	$K < 10^{-8}$	$Q < 2,78 \times 10^{-4}$	Pouco produtiva ou não aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.	(6)

Fonte: Adaptada de STRUCKMEIR e MARGAT (1995) e de DINIZ *et al.*, (2012).

(*) Valores válidos para testes de bombeamento de 12 horas de duração e rebaixamentos máximos de 25 metros.

(**) Valores calculados utilizando-se um rebaixamento de 25 metros (Diniz *et al.*, 2015).

(***) Na ausência de parâmetros hidráulicos dos aquíferos, a definição de classes de produtividade para os aquíferos cárstico e fissural foi feita apenas com dados de vazão por Diniz *et al.* (2012).

A caracterização hidráulica das unidades aquíferas consistiu na determinação de parâmetros hidrodinâmicos e capacidade específica dos poços, calculados a partir de testes de bombeamento realizados no Sinclinal Santa Rita, de resultados de outros estudos na área estudada e de outras regiões do Quadrilátero Ferrífero, nessa ordem de prioridade. As unidades não aquíferas foram discernidas em aquíclude e aquícardo, com base na condutividade hidráulica e na espessura da unidade geológica, como efetuado por Magalhães *et al.* (2022) e Andrade (2023), que incluíram a espessura do aquífero como critério para definir a capacidade de transmitir água de uma unidade aquífera de baixa permeabilidade.

A classificação das unidades aquíferas foi comparada com classificações desse tipo de outros estudos no Quadrilátero Ferrífero, como em Silva, Neto e Bertachini (1994), Beato,

Monsorens e Bertachini (2005), Mourão (2007), Fiume *et al.* (2022), Magalhães *et al.* (2022), Andrade (2023), e Costa (2017).

O mapa de unidades aquíferas e não aquíferas foi construído a partir do mapa geológico de Endo *et al.* (2019) na escala 1:150.000, sendo que as seções foram exportadas do modelo tridimensional construído para o Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita através do *software* Leapfrog Geo. A representação das cores das unidades aquíferas e não aquíferas foi embasada no esquema de cores da Associação Internacional de Hidrogeologia (AIH) (STRUCHMEIER e MARGAT, 1995) para discretizar as características hidrogeológicas e ocorrência de água subterrânea.

O modelo tridimensional do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita foi construído por meio do *software* Leapfrog Geo, com base nas informações de geologia estrutural de Endo *et al.* (2019), complementadas pelas informações de espessura das unidades geológicas descritas e apresentadas em Dorr (1969), Maxwell (1972), Ferreira Filho (1999), Rossi (2014) e Costa (2017).

3.3 Propriedades hidrodinâmicas

Testes de bombeamento com leituras no poço bombeado e testes de aquífero disponíveis nos documentos de outorga do Igam foram utilizados para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos das unidades aquíferas e não aquíferas na área estudada (condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento). Na falta desses ensaios para unidades aquíferas e não aquíferas discriminadas, optou-se por utilizar parâmetros hidrodinâmicos apresentados em estudos existentes, com preferência a ensaios executados na área estudada.

A análise dos testes de bombeamento foi feita por meio do *software* AquiferTest 2016.1 (Waterloo Hydrogeologic, 2016). Foram analisados 17 ensaios de bombeamento no total, sendo cinco testes de aquíferos e 11 testes de vazão máxima na unidade aquífera Cauê, e um teste de vazão máxima no Aquífero Sabará. Como ambas as unidades correspondem a aquíferos anisotrópicos, e os ensaios foram executados na condição não confinada, foi empregado o método de Neuman (1975). Esse método é indicado para aquíferos livres anisotrópicos.

O teste de aquífero consiste no bombeamento da água subterrânea em um poço e observação do rebaixamento do nível d'água em poços/piezômetros próximos. No teste de vazão máxima, a observação do rebaixamento do nível d'água é feita no próprio poço de bombeamento. A vantagem do teste de aquífero em relação ao teste de vazão máxima, é que o

teste de aquífero permite a obtenção do coeficiente de armazenamento (FEITOSA *et al.*, 2008). A capacidade específica foi calculada pela divisão da vazão do teste de bombeamento pela diferença da profundidade do nível dinâmico pelo nível estático do poço bombeado. Foram utilizados 26 poços para esse cálculo. Alguns desses tinham informações completas do teste de bombeamento, outros tinham informações suficientes apenas para o cálculo da capacidade específica do poço. Foram calculadas capacidades específicas de três poços no Aquífero Sabará, um poço no Aquífero Granítico Gnáissico, e 22 poços no Aquífero Cauê.

3.4 Condições de contorno

O sistema aquífero, composto por um conjunto de unidades aquíferas conectadas hidraulicamente entre si, é delimitado por condições de contorno de fluxo nulo, no entanto, mesmo na presença de fronteiras com entradas e saídas d'água conhecidas, esse ainda pode ser considerado como um sistema aquífero (FEITOSA *et al.*, 2008). Após a construção do modelo tridimensional do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita no *Leapfrog Geo*, foram definidas as condições de contorno no entorno desse sistema aquífero.

A superfície geralmente é uma área onde ocorre a entrada de água pela recarga de origem pluvial. Os afluentes podem ser considerados como saídas da água subterrânea para o escoamento superficial, quando há um fluxo de base para as drenagens. Demais condições de contorno podem ter fluxo nulo e são preferenciais para delimitar a área do modelo hidrogeológico conceitual (ANDERSON e WOESSNER, 1991).

De acordo com Anderson, Woessner e Hunt (2015), do ponto de vista matemático, as condições de contorno podem ser classificadas em três tipos:

- Tipo 1: Carga hidráulica especificada (condição de Dirichlet), onde a carga hidráulica ao longo do contorno é de valor conhecido.
- Tipo 2: Fluxo especificado (condição de Neumann), onde a carga hidráulica é derivada do cálculo de um fluxo especificado. O contorno de fluxo nulo é um caso especial desse tipo de condição de contorno.
- Tipo 3: Fluxo dependente da carga hidráulica (condição de Cauchy), onde o fluxo através do contorno é calculado nos limites do modelo, a partir do gradiente especificado fora dos limites do modelo.

As condições de contorno podem ser designadas como contornos do tipo físico ou hidráulico. Os contornos físicos são relacionados à presença de uma barreira geológica

impermeável ou grandes corpos d'água superficiais que se comportam como níveis de base para o aquífero. Os contornos hidráulicos são determinados pelas condições do fluxo subterrâneo, como os divisores de água e linhas de fluxo. Em ambos os casos, o fluxo é considerado nulo na direção perpendicular ao contorno. Ressalta-se que os contornos hidráulicos não são permanentes (ANDERSON e WOESSNER, 1991). Dessa forma, optou-se por usar contornos físicos como fronteiras do modelo hidrogeológico conceitual, quando não foi possível usar esse tipo de contorno, foram utilizados contornos hidráulicos.

O limite em profundidade das unidades aquíferas foi avaliado de acordo com Kuang e Jiao (2014) e Kuang *et al.* (2021), que discutem a relação das condições de permeabilidade (k) e armazenamento específico (S_s) com a profundidade do aquífero. Foi calculado para cada unidade aquífera, a profundidade que essas deixam de ser suficientemente permeáveis e armazenadoras para uso da água subterrânea. A permeabilidade considerada como limite para unidade aquífera é $1,0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$. Esse coeficiente foi determinado a partir das classes de aquíferos de Struckmeir e Margat (1995) *in* Diniz *et al.* (2012), que indica a condutividade hidráulica de 10^{-8} m/s para unidades aquíferas pouco produtivas ou unidades não aquíferas. A transformação de condutividade hidráulica (m/s) para permeabilidade (m^2) foi feita pela equação 01:

$$k = K\mu/\rho g \quad \text{equação 01}$$

Sendo, k , a permeabilidade intrínseca do aquífero (m^2), K é a condutividade hidráulica (m/s), μ é a viscosidade dinâmica da água a $15,6^\circ\text{C}$ ($1,138 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$), ρ é a massa específica da água a $15,6^\circ\text{C}$ ($999,1 \text{ kg/m}^3$), e g é a gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) (FEITOSA *et al.*, 2008).

As permeabilidades no topo das unidades aquíferas do Sinclinal Santa Rita foram calculadas a partir da condutividade hidráulica média, com exceção dos aquíferos Cauê e Sabará. Foi escolhida a mediana dos resultados de condutividade hidráulica do Aquífero Cauê, por indicar um resultado mais representativo. No caso do Aquífero Sabará, foi obtido apenas um resultado. No caso dos demais aquíferos, os dados provenientes de estudos existentes, indicaram a média do cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos.

A partir do modelo de variação da permeabilidade do aquífero com a profundidade de Kuang e Jiao (2014), foi possível calcular o limite de profundidade das unidades aquíferas quanto à permeabilidade (k). A função do modelo de Kuang e Jiao (2014) foi transformada na equação 02 que determina a profundidade de um aquífero, conhecendo a permeabilidade da

rocha na superfície do terreno (k_s) e a permeabilidade considerada limite para que um aquífero seja considerado como tal, $k = 1,0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$.

$$z = \left(\frac{(\log k - \log k_r)}{(\log k_s - \log k_r)} \right)^{-1/\alpha} \quad \text{equação 02}$$

O termo z é a profundidade a partir da superfície do terreno (km), k é a permeabilidade (m^2) nessa profundidade, ($k_r = 4,0 \times 10^{-26} \text{ m}^2$) é a permeabilidade mínima da crosta no modelo proposto por Kuang e Jiao (2014), k_s (m^2) é a permeabilidade da rocha na superfície, calculada pela equação 01, e ($\alpha = 0,25$) é o índice, de decaimento da permeabilidade com a profundidade.

O modelo de Kuang e Jiao (2014) avaliou a variação da permeabilidade das rochas com a profundidade para a crosta continental em geral, crosta superior continental em geral, a crosta superior formada por rochas de baixa permeabilidade, a crosta continental deformada e crosta oceânica. As constantes empregadas foram do modelo de crosta continental em geral por pertencer ao contexto geológico da área estudada.

Como um aquífero é considerado como tal, se tiver permeabilidade e armazenamento suficientes para serem produtores de água para uso, o mesmo método de cálculo da profundidade limite do aquífero foi feito para o armazenamento específico de cada aquífero.

Método semelhante foi adotado a partir da função modelo para a estimativa da variação do armazenamento específico com a profundidade, proposta por Kuang *et al.* (2021). Essa função foi igualmente utilizada para determinar o limite basal de cada unidade aquífera quanto ao armazenamento específico (S_s). Esse foi considerado como limite para uma unidade aquífera ser produtora de água para uso, quando igual a 10^{-7} m^{-1} . Esse valor foi definido por ser uma unidade decimal inferior ao armazenamento específico do Sistema Aquífero Guarani, maior aquífero subterrâneo transfronteiriço do mundo na condição confinada ($1,43 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$) (WENDLAND, GOMES e PORTO, 2014), e superior em uma unidade decimal ao armazenamento específico mínimo do modelo de crosta terrestre de Kuang *et al.* (2021), $1,6 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$.

O armazenamento específico no topo de cada unidade aquífera foi calculado a partir dos coeficientes de armazenamento, determinados através da equação 03. O armazenamento específico (S_s , unidade m^{-1}) é calculado pela divisão do coeficiente de armazenamento (S , adimensional) pela espessura do aquífero no poço do teste de bombeamento (b , unidade metro)

(FEITOSA *et al.*, 2008). A espessura do aquífero no poço é a altura da coluna d'água dentro desse em regime estático.

$$S_s = S/b$$

equação 03

O armazenamento específico do Aquífero Cauê foi calculado a partir do coeficiente de armazenamento e espessura obtidos dos ensaios de bombeamentos analisados. Os armazenamentos específicos das unidades Gandarela, Moeda e Cambotas foram determinados a partir dos coeficientes de armazenamento e espessura de aquífero extraídos do estudo de Andrade (2023). Os armazenamentos específicos das demais unidades (Itacolomi, Sabará, embasamento cristalino) foram indicados com base nos valores de referência do litotipo predominante apresentados por Kuang *et al.* (2021).

O limite de profundidade das unidades aquíferas quanto ao armazenamento específico (S_s) foi calculado pela equação 04, transformada a partir da função de variação do armazenamento específico pela profundidade do aquífero de Kuang *et al.* (2021):

$$z = \left(\frac{(\log S_s - \log S_{sr})}{(\log S_{s0} - \log S_{sr})} \right)^{-1/\lambda} \quad \text{equação.04}$$

O termo z é a profundidade a partir da superfície do terreno (km), S_s é o armazenamento específico (m^{-1}) nessa profundidade, ($S_{sr} = 1,6 \times 10^{-8} m^{-1}$) é o armazenamento específico mínimo da crosta até 4 km de profundidade pelo modelo proposto por Kuang *et al.* (2021), S_{s0} (m^{-1}) é o armazenamento específico da rocha na superfície, calculado pela equação 03, e ($\lambda = 2,118$) é o índice de decaimento do armazenamento específico com a profundidade.

O modelo de Kuang *et al.* (2021) avaliou a variação do armazenamento específico com a profundidade para a crosta continental (< 1 km) e crosta continental (> 1 km). As constantes empregadas foram do modelo de crosta continental (> 1 km).

A profundidade limite dos aquíferos do Sinclinal Santa Rita foi definida com base no arredondamento para a centena mais próxima do valor calculado de profundidade, seja a partir da permeabilidade ou armazenamento específico, com exceção do Aquífero Gandarela. Este último, por ser um aquífero cárstico fissural, não se adequa às premissas dos modelos de Kuang e Jiao (2014) e Kuang *et al.* (2021), que desconsideram a anisotropia e heterogeneidade desse tipo aquífero. Dessa forma, a profundidade máxima adotada para o Aquífero Gandarela foi

1.000 metros, valor intermediário aos calculados pelas equações 2 e 4, e aproximado do algarismo ordinal do milhar.

3.5 Análise de fluxo da água subterrânea

O fluxo da água subterrânea no Sinclinal Santa Rita foi representado por um mapa de superfície potenciométrica do nível d'água que indica o fluxo regional da água subterrânea ao final do período seco de 2020, ano mais recente com dados de monitoramento disponíveis.

Na construção do mapa de superfície potenciométrica de 2020 foram utilizados níveis d'água medidos em piezômetros e INAs, e a cota de cursos d'água perenes correspondentes às drenagens a jusante de nascentes e surgências. Foram desconsideradas as drenagens localizadas em áreas aterradas ou escavadas, observadas em imagens de satélite de dezembro de 2020 do Google Earth (2025). A superfície do nível d'água subterrâneo teve a cota da superfície topográfica do Alos Palsar de 2011 (JAXA, 2011), como cota máxima, com a interseção entre as duas apenas nos cursos d'água perenes.

A representação da superfície do nível freático (superfície potenciométrica de aquífero livre) utilizou, para sua elaboração, das cotas de nível d'água indicada em INAs e cotas das drenagens perenes. A superfície potencial de aquíferos confinados foi estimada com base na interpolação das unidades aquíferas em condição de não confinamento nos flancos opostos do Sinclinal Santa Rita, de forma que o gradiente hidráulico entre os dois flancos fosse constante. Nesse último caso, foram desconsideradas para representar a cota da superfície potenciométrica, as drenagens perenes em áreas de unidades não aquíferas. Essas drenagens podem se manter perenes, devido ao assoalho do leito dos cursos d'água ser de material não drenante, e conseqüentemente, estarem desconectadas do nível d'água subterrâneo. O mapa de superfície potenciométrica foi utilizado para interpretar a rede de fluxo da água subterrânea do Sinclinal Santa Rita.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As relações de fluxo das unidades aquíferas do Sinclinal Santa Rita permitiram compartimentar a hidroestratigrafia do Sinclinal Santa Rita em dois sistemas aquíferos parcialmente interconectados: o Sistema Aquífero Minas e o Sistema Aquífero Estrada Real. Com base no conjunto de informações do comportamento e características hidrodinâmicas

desses sistemas aquíferos foi possível determinar as condições de contorno da água subterrânea no sinclinal, além de permitir interpretar a rede de fluxo subterrânea regional.

4.1 Sistemas aquíferos

As unidades aquíferas e não aquíferas definidas do Sinclinal Santa Rita possuem caráter regional e foram classificadas conforme as unidades litoestratigráficas de Endo *et al.* (2019). Essas unidades são limitadas, a oeste, pelo Supergrupo Rio das Velhas e, a leste, pelo Complexo Santa Bárbara.

O Complexo Santa Bárbara foi classificado como unidade aquífera Granítico-Gnáissico de porosidade fissural e caráter anisotrópico e heterogêneo (FIUME *et al.*, 2022). A capacidade específica foi calculada em $9,17 \times 10^{-5}$ m³/s/m, correspondente a aquíferos de geralmente baixa, porém localmente muito baixa produtividade.

As rochas do Supergrupo Rio das Velhas foram agrupadas no Aquitardo Rio das Velhas, conforme também proposto por Magalhães *et al.* (2022). Essa designação é sustentada por Andrade (2023) que atribui à essa unidade a classe não aquífera, e nos baixos valores de capacidade específica dos poços ($6,94 \times 10^{-6}$ a $3,25 \times 10^{-4}$, com mediana de $3,33 \times 10^{-5}$ m³/s/m) de Beato, Monsores e Bertachini (2005), os quais indicam que a unidade é de baixa produtividade a não aquífera, o que a caracteriza como aquitardo.

As rochas das formações Cambotas e Moeda foram agrupadas na unidade aquífera Quartzítico Fissural. Segundo Magalhães *et al.* (2022), a unidade apresenta parâmetros hidrodinâmicos indicativos de condição de fluxo moderada e boa capacidade de armazenamento. A condutividade hidráulica média é $2,59 \times 10^{-7}$ m/s e o coeficiente de armazenamento médio é 0,14 (MAGALHÃES *et al.*, 2022). Essas características são compatíveis com a classificação de um aquífero de produtividade baixa, porém localmente moderada. Mourão (2007) relata que há ocorrências locais de poços de muita alta produtividade nessa unidade no Sinclinal Moeda.

A Formação Batatal foi classificada como Aquitardo Batatal devido a reduzida espessura, em torno de 40 a 80 metros, e a possibilidade de ocorrência de fluxo através de fraturas entre as unidades de topo e base (VENTURA e BACELLAR, 2011). De acordo com Costa (2017), essa unidade possui condutividade hidráulica média de $1,0 \times 10^{-9}$ m/s, valor característico de unidades de pouca produtividade ou não aquíferas.

A Formação Cauê foi associada ao Aquífero Cauê, caracterizado por dupla porosidade, e ser heterogêneo e anisotrópico (SILVA, NETO e BERTACHINI, 1994; MOURÃO, 2007;

COSTA, 2017; MAGALHÃES *et al.*, 2022; ANDRADE, 2023). Os parâmetros hidrodinâmicos e os valores de capacidade específica obtidos indicam boas condições de fluxo e armazenamento. A condutividade hidráulica mediana de $6,22 \times 10^{-6}$ m/s e a capacidade específica mediana de $4,64 \times 10^{-4}$ m³/s/m são indicativos de uma produtividade moderada dessa unidade aquífera. Devido a heterogeneidade e anisotropia desse aquífero, há possibilidade de os poços, nessa unidade, apresentarem baixa ou muito alta produtividade, conforme indicado pela variação da capacidade específica dos poços estudados $8,06 \times 10^{-5}$ a $4,61 \times 10^{-3}$ m³/s/m. De acordo com Zupo *et al.* (2025), a boa condição de fluxo dessa unidade é um fator determinante para sua alta vulnerabilidade, o que reforça sua grande importância do ponto de vista produtivo e ambiental.

A Formação Gandarela foi classificada em Aquífero Gandarela de porosidade fissural-cárstica, caracterizado como heterogêneo e anisotrópico (SILVA, NETO e BERTACHINI, 1994); MAGALHÃES *et al.*, 2022; ANDRADE, 2023). De acordo com Magalhães *et al.* (2022) e Andrade (2023), essa unidade apresenta baixa a moderada capacidade de fluxo. A condutividade hidráulica média é $7,38 \times 10^{-8}$ m/s, variando de 10^{-6} a 10^{-10} m/s (MAGALHÃES *et al.*, 2022). Essa variação na capacidade de fluxo reflete na produtividade dos poços. De acordo com Beato, Monsorens e Bertachini (2005), há poços de muito baixa a muito alta produtividade nessa unidade, com capacidades específicas que variam de $6,67 \times 10^{-6}$ a $2,42 \times 10^{-2}$ m³/s/m.

As rochas do Grupo Piracicaba foram agrupadas em uma única unidade não aquífera, o Aquitardo Piracicaba, devido ao difícil discernimento em escala regional das intercalações de quartzitos e filitos. Essa unidade apresenta condutividade média de $1,0 \times 10^{-8}$ m/s (COSTA, 2017) e capacidade específica média dos poços de $1,11 \times 10^{-5}$ m³/s/m (BEATO, MONSORES e BERTACHINI, 2005), características de unidades aquíferas pouco produtivas ou não aquíferas.

O Grupo Sabará aflora ao longo do eixo de dobra do Sinclinal Santa Rita. Ele foi classificado como unidade aquífera Sabará de porosidade fissural predominante, heterogêneo e anisotrópico (MOURÃO, 2007; FIUME *et al.*, 2022). Apresenta poços com capacidade específica de ($4,17 \times 10^{-5}$ a $3,14 \times 10^{-4}$, com média de $1,42 \times 10^{-4}$ m³/s/m), e de acordo com Beato, Monsorens e Bertachini (2005), há nascentes com vazões em média de $3,06 \times 10^{-4}$ m³/s, o que indicam produtividade baixa a muito baixa, como interpretado por Fiume *et al.* (2022). De acordo com Mourão (2007), a vazão máxima registrada em nascentes do Sinclinal Moeda nessa unidade chega a $4,17 \times 10^{-2}$ m³/s, o que corrobora com as características heterogêneas e anisotrópicas dessa unidade.

Na porção central do sinclinal afloram rochas do Grupo Itacolomi, atribuídas à unidade aquífera Itacolomi. A sua designação foi embasada na descrição de Mourão (2007), Fiume *et al.* (2022) e Andrade (2023). É caracterizada por escoamento preferencialmente fissural, podendo ocorrer dupla porosidade, sendo considerada, heterogênea e anisotrópica, com produtividade geralmente baixa, porém localmente moderada.

O Sinclinal Santa Rita foi dividido em dois sistemas aquíferos após compartimentação hidrogeológica, Sistema Aquífero Minas e Sistema Aquífero Estrada Real. O Sistema Aquífero Minas é formado por três unidades aquíferas (Aquífero Gandarela, Aquífero Cauê e Aquífero Quartzítico Fissural), uma unidade não aquífera (Aquitardo Batatal). Parcialmente isolado desse sistema aquífero, está o Sistema Aquífero Estrada Real, formado pelos aquíferos Itacolomi e Sabará. Entre os dois sistemas aquíferos está o Aquitardo Piracicaba, que compartimenta as unidades hidroestratigráficas do Sinclinal Santa Rita nesses dois sistemas aquíferos. No sinclinal há também intrusivas verticalizadas classificadas como Aquiclude de Metabásica.

Entre o Aquífero Quartzítico Fissural e o Cauê ocorre o Aquitardo Batatal. Esse possui espessura de 40 a 80 metros, e permite a drenança entre esses dois aquíferos em zonas mais alteradas e fraturadas. Por isso entende-se que essas três unidades fazem parte de um mesmo sistema aquífero.

O Sistema Aquífero Estrada Real está isolado parcialmente do Sistema Aquífero Minas pelo Aquitardo Piracicaba que possui espessura de 50 a 700 metros. O fluxo entre esses dois sistemas aquíferos ocorre onde a espessura desse aquitardo é menor, ou na sua ausência, como ocorre na porção sul do flanco oeste do Sinclinal Santa Rita.

O Aquífero Quartzítico Fissural ocorre em condição livre na porção leste do sinclinal, e em condição de confinamento na maior parte da área sob o Aquitardo Batatal. Está interconectado localmente, através de falhas e fraturas, com o Aquífero Cauê, de maior capacidade de armazenamento, maior espessura, e permeabilidade em relação às demais unidades aquíferas. Os aquíferos Cauê e Gandarela encontram-se em condição de aquífero livre na porção oeste e leste da área estudada, e em condição de confinamento, sotoposto ao Aquitardo Piracicaba, na porção central do Sinclinal Santa Rita e ao longo do eixo desse. Condição semelhante foi observada no Sinclinal Moeda por Magalhães *et al.* (2022), e no Sinclinal Santa Rita por Costa (2017). O Aquífero Gandarela encontra-se mais espesso na porção oeste, com adelgaçamento na direção leste. Ele não está aflorante no flanco invertido do sinclinal, na porção leste. Sobreposto ao Aquitardo Piracicaba, ocorrem os aquíferos Sabará e Itacolomi em condição livre. O Aquiclude de Metabásica ocorre em diques verticais na Serra

do Caraça. Atua, em alguns trechos, como barreira física para a água subterrânea proveniente da Serra do Caraça.

A Tabela 2 apresenta um resumo das características hidráulicas dessas unidades aquíferas e não aquíferas.

Tabela 2: Tabela de classificação das unidades aquíferas e não aquíferas do Sinclinal Santa Rita.

Unidades hidroestratigráficas	Unidades litoestratigráficas	Profundidade do aquífero (m)	Características
Unidade aquífera de Metabásica	Suítes Santa Rita e Catas Altas da Noruega	-	Barreira hidráulica ^(1,4) de rochas metabásicas. Unidade pouco produtiva ou não aquífera ⁽⁶⁾ .
Unidade aquífera Itacolomi	Grupo Itacolomi	50 - 250	Aquífero livre poroso ⁽³⁾ a fissural ^(3,4,6) , heterogêneo e anisotrópico ^(3,6) , constituído por quartzito com lentes de filito e metaconglomerado. Produtividade geralmente baixa, porém localmente moderada ⁽⁶⁾ .
Unidade aquífera Sabará	Grupo Sabará	50 - 700	Aquífero livre, localmente confinado, fissural ⁽⁴⁾ , heterogêneo e anisotrópico ⁽⁶⁾ , constituído por xistos, quartzitos, filitos, metagrauvascas e formações ferríferas. Produtividade muito baixa a baixa ⁽⁶⁾ .
Unidade aquífero Piracicaba	Grupo Piracicaba	-	Unidade não aquífera ^(1,2,3) , constituída quartzitos e filitos nas formação Cercadinho, predominantemente, filitos nas formações Fecho do Funil e Barreiro, e quartzitos da Formação Taboões. Unidade pouco produtiva ou não aquífera ⁽⁶⁾ .
Unidade aquífera Gandarela	Formação Gandarela	50 - 1000	Aquífero livre a confinado, fissural-cárstico ^(2,3,4,8) , heterogêneo e anisotrópico ^(2,3,5,8) , constituído por dolomitos, itabiritos dolomíticos e filitos. Produtividade muito baixa a muito alta.
Unidade aquífera Cauê	Formação Cauê	100 - 1300	Aquífero livre a confinado ^(5,8) , poroso e fissural ^(1,2,3,4,5,8) , heterogêneo e anisotrópico ^(1,2,3,4) , constituído predominantemente por formações ferríferas. Produtividade baixa a muito alta.
Unidade aquífero Batatal	Formação Batatal	-	Unidade não aquífera ^(1,2,3,4) , constituída por filitos. Unidade pouco produtiva ou não aquífera ⁽⁶⁾ .
Unidade aquífera Quartzítico Fissural	Formações Moeda e Cambotas	50 - 700	Aquífero ^(2,3,4,5,8) livre a confinado, fissural ^(4,5,8) , constituído por quartzitos da Formação Moeda, e quartzitos e xistos da Formação Cambotas. Produtividade baixa, porém localmente moderada ⁽⁶⁾ . Há poços de produtividade muito alta ⁽⁴⁾ .
Unidade aquífero Rio das Velhas	Supergrupo Rio das Velhas	-	Unidade não aquífera ⁽³⁾ , constituída por rochas metavulcânicas máfica-ultramáficas do grupo Quebra Osso, rochas metavulcânicas e metassedimentares do Grupo Nova Lima, e por rochas metassedimentares não marinhas do Grupo Maquiné ⁽⁷⁾ . Baixa produtividade a não aquífera.
Unidade aquífera Granítico-Gnáissico	Complexo Santa Bárbara	1000	Aquífero livre, fissural, heterogêneo e anisotrópico ^(5,6) , constituído por granitos, gnaisses e migmatitos. Produtividade muito baixa a baixa ⁽⁶⁾ .

Fonte: Elaborado pelo autor.

- (1) Costa (2017);
- (2) Magalhães *et al.* (2022);
- (3) Andrade (2023);
- (4) Mourão (2007);
- (5) Beato, Monsorens e Bertachini (2005);
- (6) Fiume *et al.* (2022);
- (7) Alkmim e Marshak (1998);
- (8) Silva, Neto, Bertachini (1994);
- (9) Beato *et al.* (2001);

Testes de bombeamento foram analisados pelo método de Neuman (1975) para os aquíferos Cauê e Sabará. Os resultados dessas análises em cada poço são apresentados no Apêndice A. As interpretações dessas análises foram exportadas do *software* AquiferTest 2016.1 em relatórios que são apresentados no Anexo A.

A condutividade hidráulica mediana determinada para o Aquífero Cauê foi de $6,22 \times 10^{-6}$ m/s, com mínimos e máximos variando da ordem de 10^{-6} a 10^{-4} m/s. Já a transmissividade mediana determinada para esse aquífero foi de $6,28 \times 10^{-4}$ m²/s, com mínimos e máximos variando da ordem de 10^{-4} a 10^{-1} m²/s. Essa diferença de três casas decimais, se deve a heterogeneidade e anisotropia do Aquífero Cauê, conforme já destacado por Carneiro (2013). A anisotropia e heterogeneidade são atribuídos por Mesquita *et al.* (2017) à porosidade fissural que exerce controle sobre o fluxo. Carneiro, Marques e Costa (2015) associam essa característica às distintas permeabilidades dos diferentes litotipos desse aquífero, determinadas pela porosidade intergranular. Costa (2017) interpreta que a porosidade fissural é determinante para o escoamento subterrâneo, como observado em nascentes de alta vazão, e indicou que diferentes litotipos do Aquífero Cauê podem favorecer, ou não, o escoamento subterrâneo. O coeficiente de armazenamento do Aquífero Cauê possui mediana de 12,5%, e varia de 8,7 a 21,4%, característica de um aquífero livre, com água liberada sob gravidade. Esses resultados são condizentes com os resultados obtidos por Costa (2017) que calculou a condutividade hidráulica e armazenamento do Aquífero Cauê com 23 testes de aquíferos. Seus resultados indicaram condutividade hidráulica média de $4,42 \times 10^{-6}$ m/s e coeficiente de armazenamento de, aproximadamente, 9,8%. Estudos realizados em outras estruturas do Quadrilátero Ferrífero indicam para essa unidade, coeficiente de armazenamento médio de 28,6% (MAGALHÃES *et al.*, 2022) e mediana de 0,2% (ANDRADE, 2023). Esses resultados indicam a alta variabilidade de armazenamento do Aquífero Cauê por conta do grau de alteração que as formações ferríferas passaram, seja por processos supergênicos ou hidrotermais.

A condutividade hidráulica determinada para o Aquífero Sabará foi $3,41 \times 10^{-7}$ m/s e a transmissividade $5,89 \times 10^{-5}$ m²/s. Apesar de constituírem valores únicos para condutividade e transmissividade, o que não representa a heterogeneidade e anisotropia dessa unidade aquífera, são os primeiros resultados de parâmetros hidrodinâmicos estimados para essa unidade aquífera no Quadrilátero Ferrífero.

Foram calculadas as capacidades específicas a partir de 22 poços instalados no Aquífero Cauê. A capacidade específica mediana dessa unidade é de $4,64 \times 10^{-4}$ m³/s/m, e varia de $8,06 \times 10^{-5}$ a $4,61 \times 10^{-3}$ m³/s/m. Devido à alta heterogeneidade dessa unidade aquífera, há poços de baixa a muito alta produtividade aquífera. Essa heterogeneidade é devido aos diferentes

litotipos do Aquífero Cauê que podem favorecer o desenvolvimento da porosidade efetiva, como itabiritos brandos, ou desfavorecer a formação dessa porosidade, como itabiritos carbonáticos (DANTAS *et al.*, 2018).

Foram calculadas as capacidades específicas de três poços instalados no Aquífero Sabará. A capacidade específica do Aquífero Sabará varia de $4,17 \times 10^{-5}$ a $5,92 \times 10^{-4}$ m³/s/m, cuja mediana ($6,67 \times 10^{-5}$ m³/s/m) é coerente com a apresentada por Beato, Monsores e Bertachini (2005). Entende-se que há poços de alta produtividade no Aquífero Sabará, mas pela capacidade específica mediana e pela condutividade hidráulica, considera-se que o aquífero em geral possui produtividade muito baixa a baixa, de acordo com a classificação de Struckmeir e Margat (1995) *in* Diniz *et al.* (2012).

A capacidade específica do Aquífero Granítico-Gnáissico de um poço próximo a área estudada é $9,17 \times 10^{-5}$ m³/s/m. Essa capacidade específica é indicativa de produtividade baixa, porém localmente muito baixa, de acordo com a classificação de Struckmeir e Margat (1995) *in* Diniz *et al.* (2012). A interpretação desse dado auxiliou na designação do embasamento cristalino do Complexo Santa Bárbara como unidade aquífera. Apesar de ser um único dado, é um resultado coerente aos encontrados por Beato *et al.* (2001) e Beato, Monsores e Bertachini (2005) na região do Quadrilátero Ferrífero.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros hidrodinâmicos mínimos, máximos e médios de estudos anteriores utilizados e os calculados no presente estudo para classificação de unidades aquíferas e não aquíferas.

Tabela 3: Valores máximos, médios, medianas e mínimos de parâmetros hidrodinâmicos e da capacidade específica, calculados no presente estudo e em estudos anteriores para as unidades aquíferas e não aquíferas do Quadrilátero Ferrífero.

Unidades hidroestratigráficas	Transmissividade (m ² /s)	Condutividade hidráulica (m/s)	Coefficiente de armazenamento (Sy)	Capacidade específica (m ³ /s/m)
Unidade aquíclude de metabásica	-	média 2,7x10 ⁻¹⁰⁽⁴⁾	-	-
Unidade aquífera Itacolomi	-	-	-	-
Unidade aquífera Sabará	5,89x10 ⁻⁵⁽¹⁰⁾	3,41x10 ⁻⁷⁽¹⁰⁾	-	4,17x10 ⁻⁵⁽¹⁰⁾ a 3,14x10 ⁻⁴⁽¹⁰⁾ mediana 6,67x10 ⁻⁵⁽¹⁰⁾
Unidade aquífero Piracicaba	-	média 1,0x10 ⁻⁸⁽¹⁾	-	média 1,11x10 ⁻⁵⁽⁵⁾
Unidade aquífera Gandarela	1,16x10 ⁻⁶⁽²⁾ a 1,51x10 ⁻⁵⁽²⁾ média 5,71x10 ⁻⁶⁽²⁾	4,0x10 ⁻⁹⁽³⁾ a 3,0x10 ⁻⁶⁽³⁾ média 7,38x10 ⁻⁸⁽²⁾	3,87x10 ⁻⁸⁽²⁾ a 5,00x10 ⁻¹⁽³⁾ média 0,056 ⁽²⁾	6,67x10 ⁻⁶⁽⁵⁾ a 2,42x10 ⁻²⁽⁵⁾ mediana 7,06x10 ⁻⁴⁽⁵⁾
Unidade aquífera Cauê	1,96x10 ⁻⁴⁽¹⁰⁾ a 1,32x10 ⁻¹⁽¹⁰⁾ mediana 6,28x10 ⁻⁴⁽¹⁰⁾	1,44x10 ⁻⁶⁽¹⁰⁾ a 9,79x10 ⁻⁴⁽¹⁰⁾ mediana 6,22x10 ⁻⁶⁽¹⁰⁾	8,69x10 ⁻²⁽¹⁰⁾ a 2,14x10 ⁻¹⁽¹⁰⁾ mediana 1,25x10 ⁻¹⁽¹⁰⁾	8,06x10 ⁻⁵ a 4,61x10 ⁻³⁽¹⁰⁾ mediana 4,64x10 ⁻⁴⁽¹⁰⁾
Unidade aquífero Batatal	-	média 1,0x10 ⁻⁹⁽¹⁾	-	-
Unidade aquífera quartzítica fissural	8,34x10 ⁻⁷⁽²⁾ a 1,62x10 ⁻⁴⁽²⁾ média 4,6x10 ⁻⁵⁽²⁾	2,15x10 ⁻⁸⁽²⁾ a 5,35x10 ⁻⁷⁽²⁾ média 2,59x10 ⁻⁷⁽²⁾	9,34x10 ⁻⁴⁽²⁾ a 5,0x10 ⁻¹⁽²⁾ média 0,14 ⁽²⁾	máximo 1,39x10 ⁻³⁽⁴⁾
Unidade aquífero Rio das Velhas	-	-	-	6,94x10 ⁻⁶ a 3,25x10 ⁻⁴⁽⁵⁾ mediana 3,33x10 ⁻⁵⁽⁵⁾
Unidade aquífera granítico-gnáissico	8,56x10 ⁻⁶⁽⁹⁾ a 4,14x10 ⁻⁴⁽⁹⁾	2,03x10 ⁻⁷⁽⁹⁾ a 1,03x10 ⁻⁵⁽⁹⁾	-	9,17x10 ⁻⁵⁽¹⁰⁾

Fonte: Elaborado pelo autor.

- (1) Costa (2017);
- (2) Magalhães *et al.* (2022);
- (3) Andrade (2023);
- (4) Mourão (2007);
- (5) Beato, Monsores e Bertachini (2005);
- (6) Fiume *et al.* (2022);
- (7) Alkmin e Marshak (1998);
- (8) Silva, Neto, Bertachini (1994);
- (9) Beato *et al.* (2001);
- (10) Calculado no presente trabalho;

O limite basal do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita foi delimitado pelas condutividades hidráulicas e armazenamentos específicos mínimos de uma unidade aquífera calculados pelos métodos de Kuang e Jiao (2014) e Kuang *et al.* (2021), respectivamente. Esses métodos possibilitaram estimar a profundidade que as unidades aquíferas do Sinclinal Santa Rita passariam a comportar-se como unidades não aquíferas do ponto de vista hidrodinâmico. Como o Aquífero Rio das Velhas, Aquífero Batatal, Aquífero Piracicaba e Aquíclude de Metabásica são unidades não aquíferas, esse limite não foi calculado para essas unidades.

A Tabela 4 mostra as profundidades das unidades aquíferas calculadas pela permeabilidade e pelo armazenamento específico das unidades aquíferas. Essas profundidades representam a profundidade máxima para a referida unidade continuar a ser classificada como unidade aquífera. Abaixo dessa profundidade, essa é interpretada como uma unidade não aquífera.

Tabela 4: Armazenamento específico e permeabilidade no topo das unidades aquíferas, e profundidade máxima calculada dos aquíferos.

Unidade aquífera	Armazenamento específico no topo do aquífero (m^{-1})	Permeabilidade no topo do aquífero (m^2)	Profundidade máxima calculada pela permeabilidade (m)	Profundidade máxima calculada pelo armazenamento específico (m)	Profundidade considerada para o aquífero (m)
Aquífero Itacolomi	$7,0 \times 10^{-4(1)}$	$3,0 \times 10^{-14(4)}$	696	1294	700
Aquífero Sabará	$1,0 \times 10^{-5(1)}$	$4,0 \times 10^{-14(3)}$	765	807	700
Aquífero Gandarela	$2,8 \times 10^{-4(2)}$	$8,6 \times 10^{-15(2)}$	405	1199	1000
Aquífero Cauê	$7,9 \times 10^{-4(3)}$	$7,2 \times 10^{-13(3)}$	1632	1306	1300
Aquífero Quartzítico Fissural	$7,0 \times 10^{-4(2)}$	$3,0 \times 10^{-14(2)}$	696	1294	700
Aquífero Granítico-Gnáissico	$4,0 \times 10^{-5(1)}$	$1,2 \times 10^{-13(5)}$	1056	981	1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

(1) Kuang *et al.* (2021);

(2) Calculado a partir dos parâmetros hidrodinâmicos de Magalhães *et al.* (2022);

(3) Calculado a partir dos parâmetros hidrodinâmicos do presente estudo;

(4) Foi utilizado os mesmos parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Quartzítico Fissural, por o Aquífero Itacolomi ser composto predominantemente por quartzitos;

(5) Calculado a partir da condutividade hidráulica de Beato *et al.* (2001);

4.2 Condições de Contorno

A área estudada foi delimitada a norte pelo divisor de águas da Serra do Caraça, a oeste pelo contato das unidades do Sistema Aquífero Minas com o Aquitardo do Rio das Velhas, e a leste pelo contato do Sistema Aquífero Minas com o Aquífero Granítico-Gnáissico que possui condicionamento livre (Figura 3).

O divisor de águas da Serra do Caraça separa as águas das bacias do rio Conceição e do rio Piracicaba. Esse divisor foi considerado coincidente com o divisor da água subterrâneo por sua elevada cota topográfica. Dessa forma, não há troca de água subterrânea nesse limite, caracterizado como uma condição de contorno hidráulica do tipo 02, de fluxo nulo.

O contato oeste da área é uma condição de contorno física, por o Aquitardo Rio das Velhas não recarregar o Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita lateralmente. Além disso, esse contato é subparalelo ao divisor de águas das bacias regionais do rio Doce e do rio das

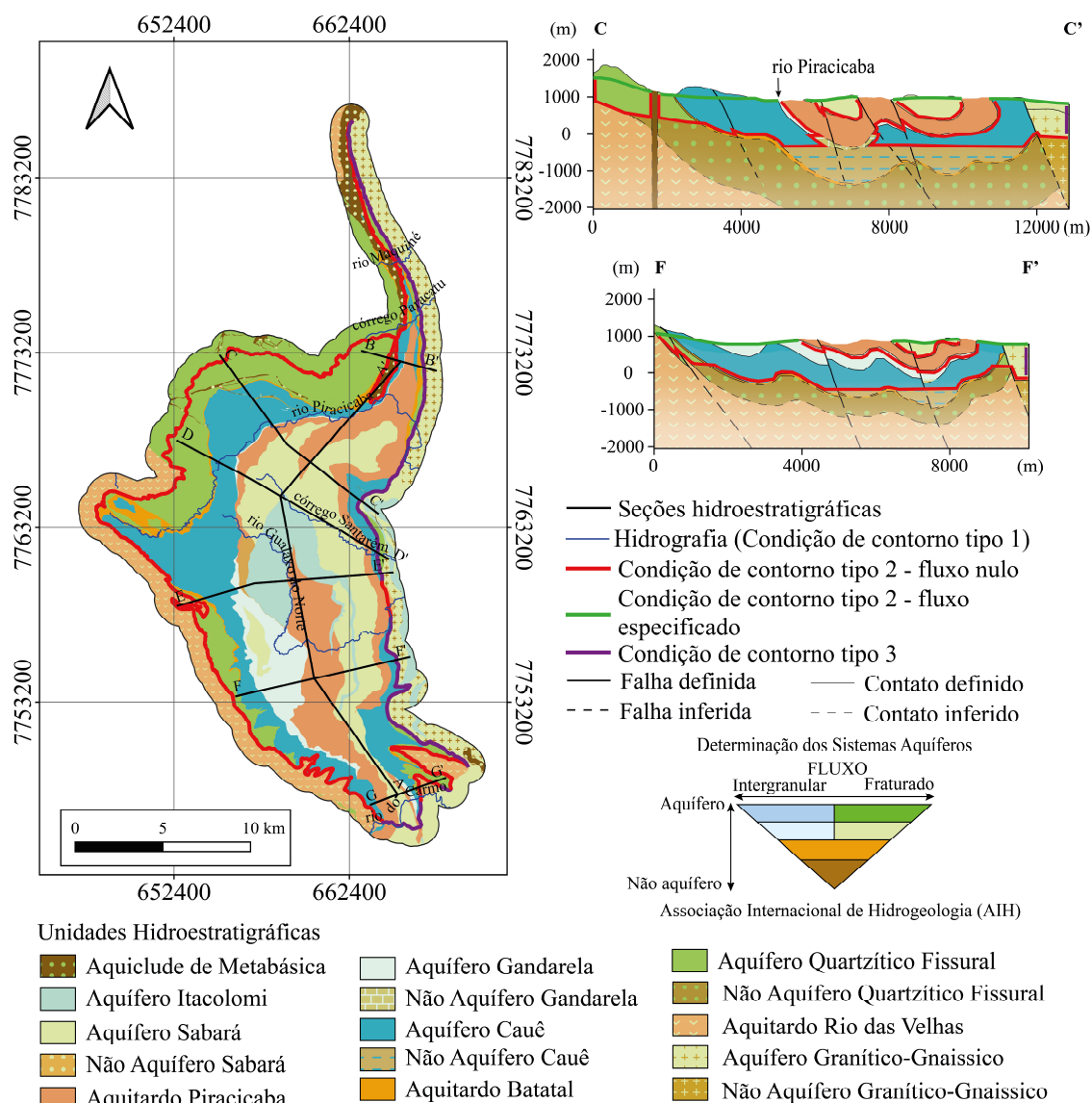
Velhas. Então, há uma condição de contorno hidráulica próxima a esse limite, além da condição contorno física (Figura 1). Dessa forma esse limite é caracterizado por uma condição de contorno tipo 02, de fluxo nulo.

O limite leste é o contato dos aquíferos Cauê e Quartzítico Fissural com o Aquífero Granítico-Gnáissico. Nesse contato há uma descarga do Sistema Aquífero Minas para o Aquífero Granítico-Gnáissico. Dessa forma, esse contato é caracterizado por uma condição de contorno tipo 03, onde o fluxo por esse contato é dependente do gradiente hidráulico subterrâneo.

O limite sul foi delimitado na charneira da dobra entre o Sinclinal Santa Rita e o Sinclinal Dom Bosco. Esse limite se localiza próximo ao rio do Carmo e representa uma condição de contorno tipo 03, onde há fluxo da água subterrânea dependente do gradiente hidráulico.

A Figura 3 apresenta o mapa hidroestratigráfico do Sinclinal Santa Rita, e duas seções do Sinclinal Santa Rita de orientação NW-SE e W-E, onde é indicado as condições de contorno dos sistemas aquíferos Minas e Estrada Real.

Figura 3: Mapa das unidades aquíferas e não aquíferas do Sinclinal Santa Rita, com base na classificação de cores da Associação Internacional de Hidrogeologia (AIH). Seção CC' de orientação NW-SE, e Seção FF' de orientação W-E. Sem exagero vertical. As demais seções são apresentadas na Figura 5. Projeção Transversa de Mercator – UTM. Datum: Sirgas 2000 zona 23S.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As calhas dos córregos e rios também são condições de contorno. Essas podem ser contornos de saída da água subterrânea para o escoamento superficial, conhecidas também como drenagens efluentes. Essas condições de contorno são do tipo 01, com a carga hidráulica na cota do nível d'água do córrego ou rio. Em drenagens intermitentes, considera-se a superfície do nível d'água subterrâneo em cota inferior da calha córrego, o que caracteriza uma drenagem influente e uma condição de contorno do tipo 03, com o fluxo dependente da carga. Nas demais superfícies onde afloram unidades aquíferas, temos a entrada da água de origem pluvial no meio

subterrâneo, através do processo de recarga. Essas áreas representam condições de contorno do tipo 02, onde um percentual da pluviometria infiltra no meio subterrâneo e recarrega os aquíferos. O restante da água escoar superficialmente.

O contato entre as unidades aquíferas do Sinclinal Santa Rita e o Aquitardo Piracicaba é uma condição de contorno de barreira física. Essa condição de contorno isola parcialmente as unidades aquíferas Sabará e Itacolomi das unidades aquíferas Gandarela e Cauê. Por isso, o presente trabalho, dividiu as unidades hidroestratigráficas do Sinclinal Santa Rita em Sistema Aquífero Minas e Sistema Aquífero Estrada Real.

4.3 Análise de fluxo da água subterrânea

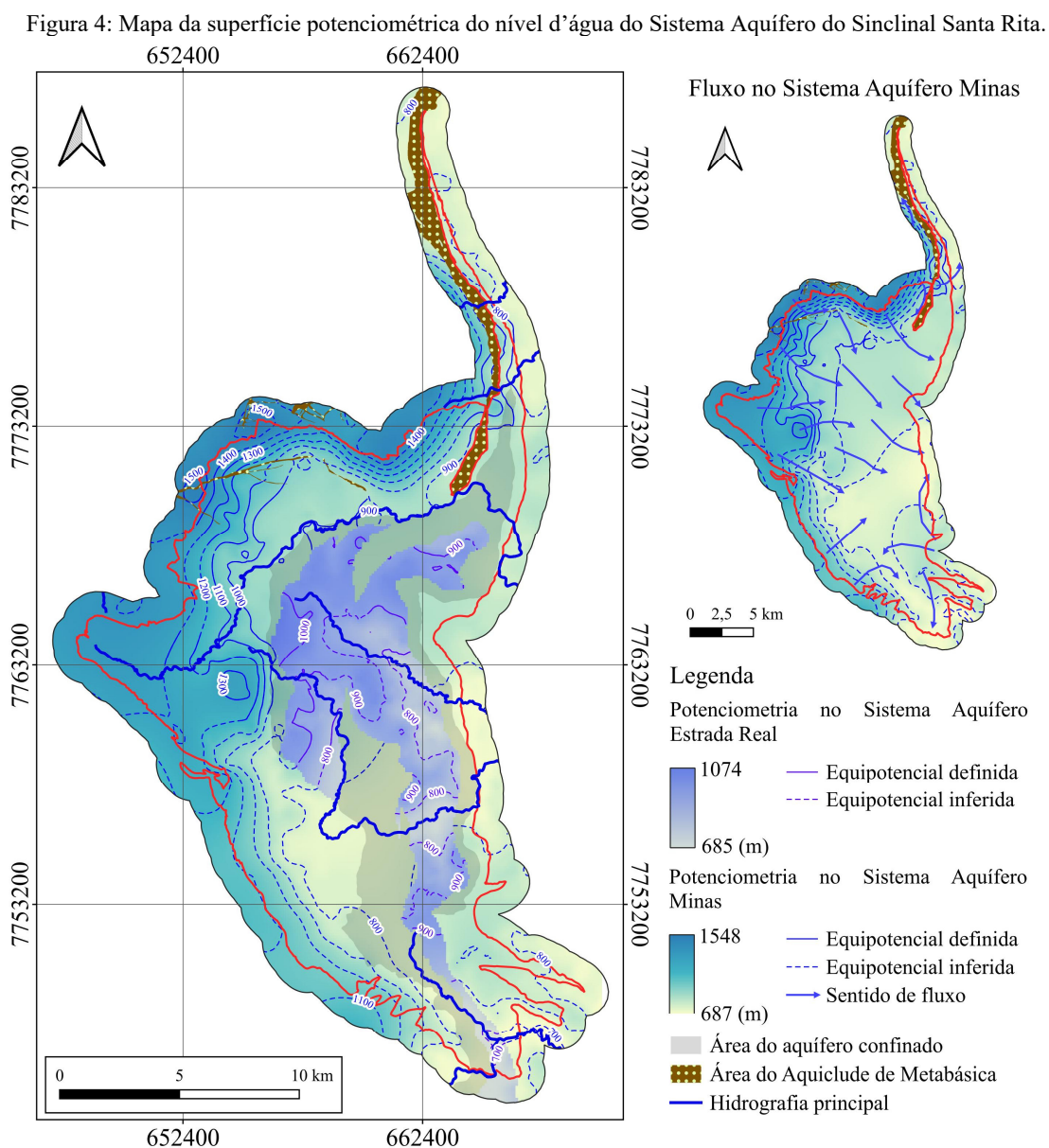
O fluxo da água subterrânea do Sinclinal Santa Rita ocorre de forma distinta no Sistema Aquífero Minas, formado pelos aquíferos Quartzítico Fissural, Cauê e Gandarela, e no Sistema Aquífero Estrada Real, formado pelos aquíferos Sabará e Itacolomi. Nesse último, o fluxo ocorre inteiramente em condição livre. O fluxo regional se direciona em sentido aos cursos d'água principais do córrego Santarém e rio Gualaxo do Norte, e o local em direção aos afluentes perenes desses cursos d'água (Figura 4).

No Sistema Aquífero Minas, parte do aquífero encontra-se em condição de aquífero livre nos flancos oeste e leste do sinclinal, mas parte se encontra em condição de confinamento sob o Aquitardo Piracicaba. O fluxo regional desse sistema aquífero ocorre, na porção setentrional, em direção ao exutório dos cursos d'água principais citados. Na porção meridional, o fluxo subterrâneo se direciona para o córrego Canela e rio Gualaxo do Norte. O fluxo do Sistema Aquífero Minas em condição de confinamento transmite água do flanco oeste para o flanco leste do sinclinal. Ele ocorre em profundidades de até 1000 a 1300 metros, onde o armazenamento e condutividade hidráulicas são bem baixos, próximos aos limites considerados para unidades não aquíferas. Entende-se que esse fluxo seria extremamente lento, e ocorreria na escala de tempo geológico (PAULA *et al.*, 2018). No flanco leste do sinclinal, a água subterrânea do Sistema Aquífero Minas descarrega lateralmente no Aquífero Granítico-Gnáissico (Figura 5).

No estreitamento da porção norte da área, o Aquiclude de Metabásica é uma barreira física da água subterrânea proveniente da Serra do Caraça (Figura 3). Essa se divide próxima ao aquiclude para as direções norte e sul. A leste do aquiclude, o fluxo subterrâneo regional

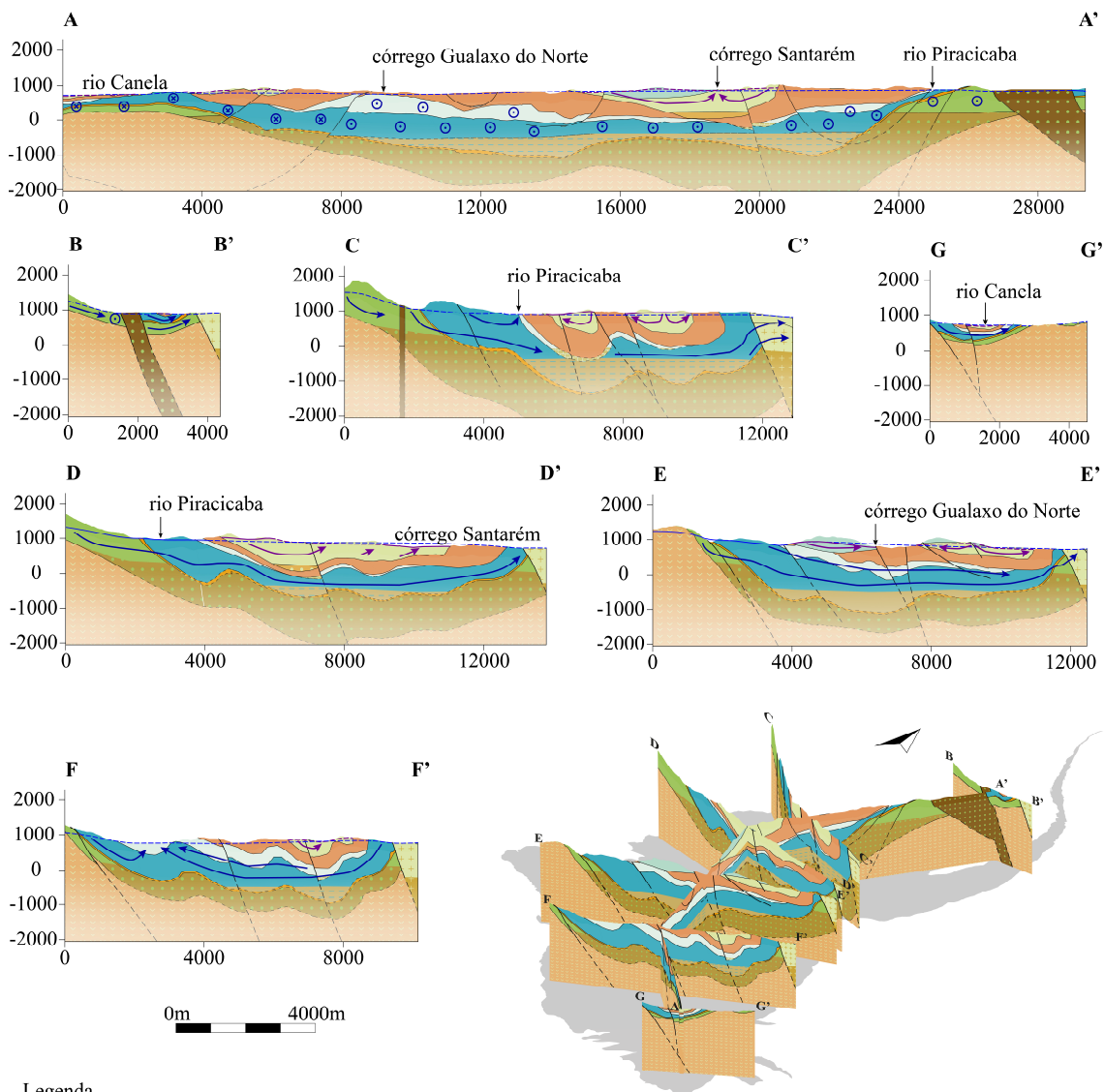
segue de oeste para leste, e o local converge em direção aos cursos d'água, descarregando a água subterrânea na calha desses.

Os maiores gradientes de fluxo estão na Serra do Caraça e na Serra de Antônio Pereira, com gradientes hidráulicos de 0,1 a 0,4. O fluxo subterrâneo se direciona dos divisores hidrográficos dessas serras de cotas de 1530 a 1100 metros em direção ao pé da serra, com nível d'água na cota de 1000 metros. A partir dessa cota, há uma suavização dos gradientes hidráulicos, com eles variando de 0,05 a 0,2. A cota mais baixa do nível d'água está no exutório do rio Gualaxo do Norte, na cota 720 metros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5: Seções hidrogeológicas do Sinclinal Santa Rita com destaque para a profundidade onde as unidades aquíferas se tornam não aquíferas. Sem exagero vertical.



Legenda

- | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Aquícludc de Metabásica | Aquífero Cauê | Equipotencial Estrada Real definida |
| Sistema Aquífero Estrada Real | Não Aquífero Cauê | Equipotencial Estrada Real inferida |
| Aquífero Itacolomi | Aquífero Batatal | Equipotencial Minas definida |
| Aquífero Sabará | Aquífero Quartzítico fissural | Equipotencial Minas inferida |
| Não Aquífero Sabará | Não Aquífero Quartzítico fissural | Sentido de fluxo Minas |
| Aquífero Piracicaba | Não Aquífero Quartzítico fissural | Sentido de fluxo Estrada Real |
| Sistema Aquífero Minas | Aquífero Rio das Velhas | |
| Aquífero Gandarela | Aquífero Granítico-Gnaissico | |
| Não Aquífero Gandarela | Não Aquífero Granítico-Gnaissico | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Os sistemas aquíferos Minas e Estrada Real são os dois compartimentos armazenadores e escoadores da água subterrânea do Sinclinal Santa Rita. Esses sistemas estão parcialmente desconectados pelo Aquitardo Piracicaba que confina parte do Sistema Aquífero Minas. Essa conformação permite o fluxo da água subterrânea entre os flancos do sinclinal, com a recarga no flanco oeste e descarga no flanco leste. O Aquífero Cauê é a principal unidade que recarrega esse flanco, por ser a unidade mais permeável, com condutividade hidráulica mediana de $6,22 \times 10^{-6}$ m/s, e a melhor armazenadora da água subterrânea, com a mediana do coeficiente de armazenamento igual a 12,5%. Essa condutividade e esse armazenamento diminuem com a profundidade, até que elas se tornam tão pequenas que a unidade Cauê passa a se comportar como uma unidade não aquífera a partir de 1300 metros de profundidade.

A alta condutividade e armazenamento da unidade aquífera Cauê conferem um papel muito relevante na produção de poços tubulares na região. Os poços tubulares perfurados nessa unidade possuem capacidade específica mediana de $4,64 \times 10^{-4}$ m³/s/m. Além de haver poços com capacidade específica de até $4,61 \times 10^{-3}$ m³/s/m, o que caracteriza a unidade Cauê como bastante heterogênea e anisotrópica, e como excelente fonte de água subterrânea para uso. Essa unidade alimenta os cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Doce junto com as demais unidades aquíferas. Essas características indicam o relevante potencial de produção da água subterrânea do Aquífero Cauê no Sinclinal Santa Rita para abastecimento hídrico da região.

Recomenda-se aprofundar a pesquisa hidrogeológica do Sinclinal Santa Rita com o cálculo da reserva renovável da água subterrânea desse sinclinal, para melhor entendimento do potencial hídrico desse recurso. A partir da reserva renovável é possível conhecer o volume de água que é recarregado no aquífero em um ano hidrológico. O volume de água restante dos aquíferos do Sinclinal Santa Rita é conhecido como reserva geológica da água subterrânea. Essa permanece nos períodos de estiagem do ano hidrológico.

6 MATERIAL SUPLEMENTAR

O Apêndice A apresenta os parâmetros hidrodinâmicos calculados (transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento) e a capacidade específica de cada poço.

O Anexo A apresenta a interpretação dessas análises em relatórios exportados do *software* AquiferTest 2016.1. Neles é possível verificar a superposição de curvas de rebaixamento do nível d'água x tempo dos testes de bombeamento interpretados com as curvas padrão de Neuman (1975).

7 AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) e a Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) pela parceria com o Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) no projeto “Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológica a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero, com foco na região do Sinclinal Moeda, MG”, e pela disponibilização dos dados necessários para a execução dessa pesquisa pelo portal do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM).

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGEOL) do Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo apoio institucional à pesquisa; à Bentley Systems, Inc. por disponibilizar licença estudantil do *software* Leapfrog Geo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida F.F.M. 1977. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7:349-364.
- Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90:29–58.
- Anderson M.P. & Woessner W.W. 1991. *Applied groundwater modeling— simulation of flow and advective transport*. San Diego, Academic Press, 381 p.
- Anderson M.P. Woessner W.W. Hunt R.J. 2015. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. San Diego, Academic Press, 2 ed., 630 p.
- Andrade I.B. 2023. *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), Programa de pós-graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 114 p.
- Barbosa N.S., Leal L.R.B., Mello J.C., Peixinho M.A.L., Santos C.B., Santos R.L.S., Barbosa N.S. 2017. Modelo hidrogeológico conceitual do Sistema Aquífero Urucuia Centro-Ocidental, Brasil. *Águas Subterrâneas*, 30(1):1-19.
- Beato, D.A.C., Dutra, G.M., Medeiros, M.J., Drews, M.G.P., Rocha, G.S., Cruz, W.B., Patrus, M.L.R.A., Nagem, R.L., Oliveira, V. 2001. Estudo hidrogeológico da Bacia da Lagoa da Pampulha. Belo Horizonte, CPRM/PBH. Relatório final, 151p.
- Beato D.A.C., Monsorens A.L.M., Bertachini A.C. 2005. Hidrogeologia. In: Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte, CPRM/SEMAD. Texto explicativo, 8 v. 116 p.
- Carneiro S.R.C. 2013. *Caracterização mecânica e hidrogeológica dos maciços das cavas de Alegria Centro e Sul, Samarco Mineração S.A.*, Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 199 p.
- Carneiro S.R.C., Marques E.A.G., Costa J.P.C. 2015. Evaluation of Hydraulic Conductivity of Itabirites of the Alegria Centro and Alegria Sul Open Pits, Samarco Mineração S.A., Minas Gerais State, Brazil. *Mine Water and a Environment*, 35:136-144.
- Costa J.P.C. 2017. *Numerical groundwater flow modeling applied to dewatering prediction of Cauê aquifer in Alegria mine, east of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia), Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 117 p.
- Cruz C.E., Caetano I.S.H., Mota A.C.V., Ferreira J.J., Souza J.V.F., Velásquez L.N.M., Paula R.S. 2022. Caracterização pluviométrica do Quadrilátero Ferrífero na região do Sinclinal Moeda – Minas Gerais. *Alemur*, 7(1):17-35.

Dantas J.C.M., Mesquita D.C., de Paula S.R., Guerra, K.J. 2018. Correlação entre dados de perfilagem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Águas Subterrâneas*, 32(1):140-153.

Diniz J.A.O., Monteiro A.B., Feitosa F.A.C., Freitas M.A., Peixinho F.C. 2012. Metodologia para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos. In: ABAS, 17º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e 18º Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Bonito, MS. Resumos Expandidos... p. 1-4.

Diniz J.A.O., de Paula T.L.F, Monteiro A.B., Feitosa F.A.C., Cardoso A.C. 2015. Taxonomia hidrogeológica – Unidades básicas de referência. In: ABAS, 18º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Belo Horizonte, MG. Anais... p. 1-10.

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

Endo I., Galbiatti H.F., Delgado C.E.R., Freire de Oliveira M.M., Zapparoli A.C., de Moura L.G.B., Peres G.G., Henrique de Oliveira A.H., Zavaglia G., Danderfer F.A., Gomes C.J.S., Carneiro M.A., Nalini Júnior H.A., Castro P.T.A., Suita M.T.F., Tazava E., Lana C.C., Martins-Neto M.A., Martins M.S., Ferreira F.F.A., Franco A.P., Almeida L.G., Rossi D.Q., Angeli G., Madeira T.J.A., Piassa L.R.A., Mariano D.F., Carlos D.U. 2019. *Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Ouro Preto, Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Escala 1:150.000.

Endo I., Machado R., Galbiatti H.F., Rossi D.Q., Zapparoli A.C., Delgado C.E.R., Castro P.T.A., Oliveira M.M.F. 2020. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Castro P.T.A., Endo I., Gandini A.L. (org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte, 3i Editora, p. 70-113.

Feitosa F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa E. C., Demétrio J. G.A. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 3 ed., 812 p.

Fernandes R.C., Roncato J., Paula R.S. 2023. Structural model and features of the world-class Cuiabá orogenic gold deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero region, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 123:1-25.

Ferreira Filho F.A. 1999. *Análise estrutural qualitativa do sistema de falhas Água Quente, borda leste do Quadrilátero Ferrífero – MG*. Dissertação (Mestrado em Geologia), Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 161 p.

Fiume B. (coord), Nascimento F.M.F., Miranda J.S.N., de Paula T.L.F. 2022. *Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero*. Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil. 1 mapa. Escala 1:100.000.

Freeze R.A., Cherry J.A. 1979. *Groundwater*. Eaglewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc. 1ed., 624 p.

Freitas A.R., Paula R.S., Antunes I.M.H.R. 2025. Water Resources Availability on a River Watershed in a Relevant Mineral Province (Minas Gerais, Brazil): An Integrated Approach to Water Resources Management. *Water*, 17(4): 1-25. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w17040532>. Acesso em: 16 mar. 2025.

Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS). 2018. *Hidrografia*. Shapes de rios simples. Disponível em: <https://geo.fbds.org.br/>. Acesso em: 16 dez. 2023.

Gustafson G. & Krásný J. 1994. Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. *Hydrogeology Journal*, Berlin, 2(2):64-75.

Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema). 2023. *Hidrografia, localidades e limites*. Belo Horizonte. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 01 dez. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2020. *Contas econômicas ambientais da água: Brasil 2013-2017*. Rio de Janeiro, IBGE/ANA. Texto informativo, 12 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2023. *Censo 2022: População e domicílios - primeiros resultados - atualizado em 22/12/2023*. Rio de Janeiro, IBGE. Dados de 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>. Acesso em: 01 dez. 2024.

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). 2011. *Advances Land Observing Satellite The Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR)*. Imagem de satélite. Radar de Abertura Sintética em Banda L. Datas de Aquisição: 16 de março e 15 de fevereiro de 2011. Resolução espacial: 12,5 metros. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 16 dez. 2023.

Kuang X. & Jiao J.J. 2014. An integrated permeability-depth model for Earth's crust. *Geophysical Research Letters*, 41:7539-7545.

Kuang X., Zheng C., Jiao J.J., Cherry J.A., Chen J. 2021. An empirical specific storage-depth model for the Earth's crust. *Journal of Hydrology*, 592: 1-10.

Lobato L.M. (coord.), Achtschin A.B., Baars F.J., Baltazar O.F., Timbó M.A., Reis L.B., Voll E., Voll K., Silva S.L., Berni G.V., Silveira V.D., Versiani de Mendonça B.R., Ferreira D.V. 2005a. *Mapa geológico Catas Altas*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). Escala 1:50.000.

Lobato L.M. (coord.), Achtschin A.B., Baars F.J., Baltazar O.F., Timbó M.A., Reis L.B., Voll E., Voll K., Silva S.L., Berni G.V., Silveira V.D., de Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005b. *Mapa geológico Gandarela*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). Escala 1:50.000.

Lobato L.M. (coord.), Achtschin A.B., Baars F.J., Baltazar O.F., Timbó M.A., Reis L.B., Voll E., Voll K., Silva S.L., Berni G.V., Silveira V.D., de Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005c. *Mapa geológico Mariana*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). Escala 1:50.000.

Lobato L.M. (coord.), Achtschin A.B., Baars F.J., Baltazar O.F., Timbó M.A., Reis L.B., Voll E., Voll K., Silva S.L., Berni G.V., Silveira V.D., de Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005d. *Mapa geológico Ouro Preto*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). Escala 1:50.000.

Lohman S.W., Bennet R.R., Brown R.H., Cooper H.H., Drescher W.J., Ferris J.G., Johnson A.I., Mc. Guinness C.L., Piper A.M., Rorabaugh M.I., Stallman R.W., Theis C.V. 1972. Definitions of selected ground-water terms – revisions and conceptual refinements. USGS – Water-Supply Paper 1988, Washington DC.

Magalhães C.C.C., Melo M.C., Guiguer N., de Paula R.S. 2022. The Cauê Aquifer on the eastern limb of Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in an area west of Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 52, n. 4, p. 1-19. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220005>. Acesso em: 25 mar. 2024.

Magalhães C.C.C. 2023. *Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero – MG): Caracterização, impactos e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê*. Dissertação na Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 78 p.

Maxwell C.H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brazil. United States Government Printing Office, Washington DC. (Relatório n. 78-185981).

Mesquita D.C., Dantas J.C.M., de Paula R.S., Guerra, K.J. 2017. Estudo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de campo em itabiritos brandos da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Geonomos*, 25(2):12-19.

Mourão M.A.A. 2007. *Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 287 p.

Neuman S.P. 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, 11(2):329-342.

Paula S.R., Mesquita, D.C., Dantas J.C.M., Guerra, K.J. 2018. Caracterização hidroquímica e isotópica das águas, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no município de Congonhas-MG, e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema. *Revista Águas Subterrâneas*, 32(1):140-153.

Ramos M.L.S., Cordeiro V.F., Fernandes R.A. 2020. Histórico e arcabouço hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. In: Castro, P.T.A., Endo, I., Gandini, A.L. (eds.). *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Ouro Preto, 3i Editora, p. 380-414;

Roncato J., Barbosa L.S., Ribeiro G.H., Mendes K.F., Carvalho M.V.M., Paula R.S., Knauer L.G. 2024. Geochemistry and mineralogy of the banded iron formation, west Moeda syncline, Quadrilátero Ferrífero region. *Revista Geociências*, São Paulo, 42(3):333-350.

Rossi D.Q. 2014. *Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação no Programa de Pós-Graduação em

Evolução Crustal e Recursos Naturais, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 129 p.

Silva A.B., Neto A.F.S., Bertachini A.C. 1994. Potencial de águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. In: ABAS, 8º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife. Anais... p. 264-273.

Silva S.L., Monteiro, E.A., Baltazar O.F. 2005. Estratigrafia. In: Silva S.L., Baltazar O.F., Zucchetti M.. *Projeto APA Sul RMBH: geologia, mapa geológico, escala 1:50.000 em 3 partes*. Belo Horizonte, CPRM, p. 61.

Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM). 2023. Outorgas dos processos: 07721/2011, 23778/2015, 21694/2015, 28093/2017, 16775/2015, 09226/2017, 04068/2018, 04067/2018, 23093/2015. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/siam/processo/index.jsp>. Acesso em 10 de novembro de 2023.

Struckmeir W.F. & Margat, J. 1995. Hydrogeological maps: a guide and a standard legend. IAH - International Contributions to Hydrogeology. International Association of Hydrogeologists, v. 17.

Teixeira da Costa M. 1961. Sedimentação e orogênese da Série de Minas. Ouro Preto, Semana de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos (SICEG). Soc. Interc. Cult. e Est. Geol., nº. 1, p. 55-61.

Todd D.K., Mays L.W. *Groundwater Hydrology*. John Wiley e Sons, 3 ed., 652 p.

Ventura L.C. & Bacellar L.A.P. 2011. Influência de filitos no padrão de fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto. *Geotecnia*, 121:71-88.

Waterloo Hydrogeologic. 2016. AquiferTest Pro v. 2016.1: Pumping & Slug Test Analysis, Interpretation & Visualization Software. Waterloo, Canada: Waterloo Hydrogeologic.

Wendland, E., Gomes, L.H., Porto R.M. 2014. Use of convolution and geotechnical rock properties to analyse free flowing discharge test. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 86(1):117-126.

Zupo A., Paula R.S., Sampaio J.L.D., Júnior J.G.R., Melo M.C. 2025. Comparative study of standard and modified groundwater vulnerability methods in the gold and iron mining regions of Western Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*. 270:1-18.

CAPÍTULO 2 – ARTIGO 2

A reserva hídrica subterrânea do Sinclinal Santa Rita, Quadrilátero Ferrífero, Brasil

RESUMO

As águas subterrâneas são recursos estratégicos para o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental. No Sinclinal Santa Rita, localizado na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, sudeste do Brasil, há um elevado potencial de produção das águas subterrâneas. A relevância desse sistema aquífero se deve ao seu acentuado uso antrópico, cujo total licenciado para uso da água corresponde a $7,7 \times 10^7$ m³/ano. Diante disso, esse estudo visa estimar a quantidade de água que renova esse sistema aquífero anualmente, a quantidade de água que permanece nesse meio subterrâneo no tempo geológico, e a quantidade de água que entra e sai desse sistema. Para isso, foram aplicados métodos que estimaram o volume da reserva renovável e permanente da água subterrânea desse sistema aquífero, e vazão que escoava lateralmente desse sistema. Esse sinclinal renova sua reserva hídrica subterrânea a cada ano, com um volume de $8,6 \times 10^7$ m³/ano, suficiente para alimentar 15 municípios dos quais está localizado, Ouro Preto e Mariana. A sua reserva hídrica subterrânea permanente possui um volume de $1,1 \times 10^9$ m³. No período de 2008 a 2020, essa reserva diminuiu $1,3 \times 10^6$ m³/ano, o equivalente a 0,134% do seu total, após crescente aumento do uso da água subterrânea na região. No início desse período em 2008, o volume de água subterrânea bombeado era em torno de $8,8 \times 10^6$ m³/ano. Até 2020, esse total aumentou 2,5 vezes, para cerca de $2,2 \times 10^7$ m³/ano, dentro dos limites do volume outorgado para uso da água subterrânea. O volume de água bombeado nesse último ano é a metade da reserva renovável da unidade mais influenciada pela exploração da reserva hídrica permanente, o Aquífero Cauê. Por isso, é necessário o contínuo monitoramento e gestão hídrica dessa reserva. Além da saída da água pela exploração de poços tubulares, ocorre a saída por meio de descargas naturais. Essas descargas naturais são responsáveis por manter o sistema hídrico subterrâneo em equilíbrio e a disponibilidade hídrica nos cursos d'água naturais proveniente da água subterrânea, com no mínimo $5,7 \times 10^7$ m³/ano. Os resultados obtidos sobre o ciclo hidrológico subterrâneo do Sinclinal Santa Rita reforçam a sua importância para as comunidades da região.

Palavras-chave: água subterrânea; hidrogeologia; aquífero Cauê; reserva hídrica; recurso hídrico.

ABSTRACT

Groundwater is a strategic resource for economic development and environmental preservation. In the Santa Rita Syncline, located in the eastern portion of the Quadrilátero Ferrífero, sudeste do Brazil, there is a high groundwater production potential. The relevance of this aquifer system is due to its significant anthropogenic use, with a total licensed water use of 7.7×10^7 m³/year. Therefore, this study aims to estimate the annual recharge volume amount of this aquifer system, the amount of water stored in the subsurface over geological time scales, and the inflow and outflow rates that govern its hydrological balance. To achieve this, methods were applied to estimate the volume of renewable and permanent groundwater reserves, as well as the lateral flow rate within the system. The syncline renews its groundwater reserves annually, with a volume of 8.6×10^7 m³/year, sufficient to supply the 15 municipalities within its area, including Ouro Preto and Mariana. The permanent groundwater reserve is estimated at 1.1×10^9 m³. Between 2008 to 2020, this reserve declined by 1.3×10^6 m³/year, equivalent to 0.134% of the total volume, following an increase in groundwater use in the region. In 2008, the volume of groundwater pumped was approximately 8.8×10^6 m³/year. By 2020, this total had increased 2.5 times, reaching about 2.2×10^7 m³/year, still within the limits of the licensed groundwater use volume. The volume of groundwater extracted in 2020 represents half of the renewable reserve of the hydrogeological unit most affected by groundwater exploitation, the Cauê Aquifer. Therefore, it's necessary the continuous monitoring and water management of this reserve. In addition to groundwater outflow by pumping wells, there is also natural discharge. These natural discharges are responsible for maintaining the hydrodynamic equilibrium of the aquifer system and sustaining baseflow contributions to surface watercourses, with a minimum of 5.7×10^7 m³/year. The findings on groundwater cycle of the Santa Rita highlight its importance for the communities in the region.

Keywords: groundwater; hydrogeology; Cauê aquifer; water reserves; water resources.

1 INTRODUÇÃO

A água é recurso fundamental para a fauna, flora e desenvolvimento antrópico, por manter o bem-estar do homem, a manutenção da vida, e autossuficiência econômica de uma região ou país (PINTO, 2003). É de suma importância a gestão dos recursos hídricos para garantir às futuras gerações a necessária disponibilidade hídrica (BRASIL, 1997). Os recursos hídricos são divididos entre recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Ambos representam a água armazenada disponível para uso antrópico e ecológico. A diferença entre eles é o local onde estão armazenados. O recurso hídrico superficial está armazenado sobre a superfície, e o recurso hídrico subterrâneo está armazenado sob a superfície (FEITOSA *et al.*, 2008). Um recurso influencia diretamente o outro, e a gestão hídrica deve atuar de forma integrada para a preservação de ambos (MATTIUIZI e MARQUES, 2019).

Por isso é importante o entendimento dos processos que ocorrem entre esses recursos. Um desses processos envolve a entrada da água no meio subterrâneo, conhecido como recarga. Essa pode ocorrer lateralmente, de uma unidade aquífera para outra, pela entrada do recurso hídrico superficial ou de parcela da água pluvial no meio subterrâneo (FREEZE e CHERRY, 1979). A saída da água do meio subterrâneo pode ocorrer em direção ao recurso hídrico superficial, ou lateralmente para outra unidade aquífera (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983).

O volume total de recarga que adentra no meio subterrâneo de uma localidade em um ano hidrológico é conhecido como reserva renovável (BOGOMOLOV e PLOTNIKOV, 1956). Esse volume representa a quantidade de água que pode ser explorada dos aquíferos sem impactar a reserva permanente, volume de água que permanece no aquífero no tempo geológico e não varia em função da sazonalidade pluviométrica e descargas naturais (PLOTNIKOV, 1962). Parte desse volume pode ser explorado, de forma a não trazer efeitos indesejados (CONKLING, 1946). A soma do volume de água dessas duas reservas é o volume total de água do recurso hídrico subterrâneo (FEITOSA *et al.*, 2008).

O volume do recurso hídrico subterrâneo da Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero foi primeiro estimado por Silva, Neto e Bertachini (1994). Essa é uma importante província mineral regional, por seu relevante potencial hídrico para manutenção de nascentes e cursos d'água, e para uso da água subterrânea por empreendimentos minerários da região (LADEIRA *et al.*, 2025). A fim de complementar o conhecimento científico e apoiar a gestão hídrica do recurso hídrico subterrâneo nessa região, Freitas *et al.*, (2025) estimou o volume da reserva renovável e da reserva permanente sob uma área de bacia hidrográfica no Quadrilátero Ferrífero.

O presente estudo foca no Sinclinal Santa Rita, localizado na porção leste do Quadrilátero Ferrífero. Região influenciada por empreendimentos minerários que são fonte de receita para os municípios de Mariana e Ouro Preto, onde o sinclinal está inserido (CARVALHO *et al.*, 2012). Esses municípios possuem, respectivamente, 61.387 e 74.821 habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2023).

Na região ocorre elevada exploração da água subterrânea, principalmente do Aquífero Cauê, por meio de poços tubulares, com vazão outorgada no ano de 2020 de $7,7 \times 10^7$ m³/ano (SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÃO AMBIENTAL - SIAM, 2023). Esse volume é retirado diretamente das reservas hídricas subterrâneas (COSTA, 1998). Por isso, é importante conhecer as reservas de água do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita, essenciais para a fauna e a flora, e para as comunidades locais que dependem da água subterrânea.

Por isso, o presente estudo visa essas reservas, e responder à seguinte questão: Qual é a quantidade de água subterrânea armazenada no Sinclinal Santa Rita? Qual o volume de água que entra e sai dos sistemas aquíferos desse sinclinal, e a relevância da manutenção desse volume? A resposta a essas perguntas contribuirá para a gestão do recurso hídrico subterrâneo, e tomadas de decisão quanto ao uso da água subterrânea.

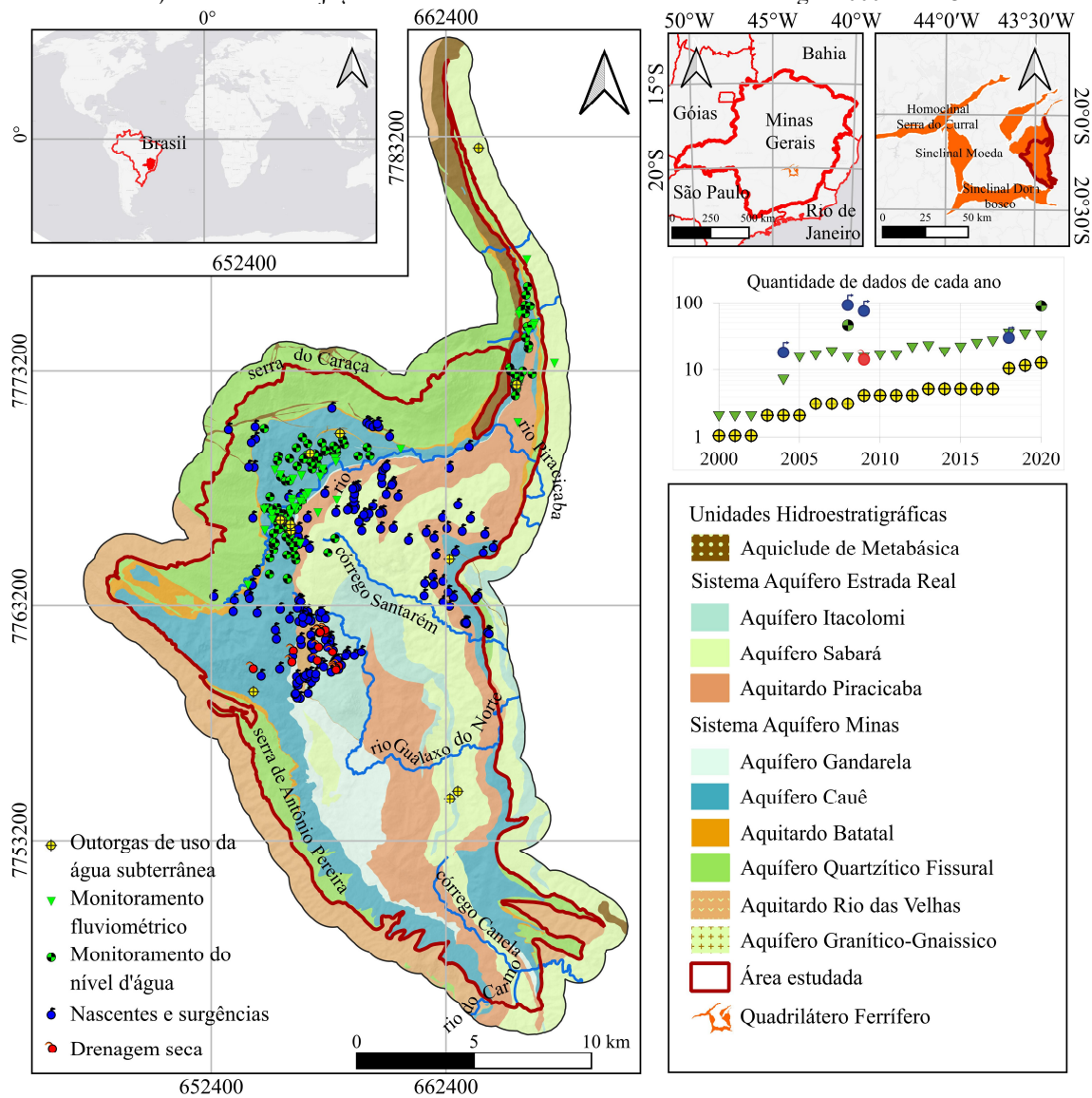
O estudo objetiva estimar a reserva renovável e permanente do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita, e a quantidade de água que entra e sai desse sistema. Para isso, foram aplicados métodos que estimaram a taxa de recarga das unidades aquíferas, a reserva renovável e permanente da água subterrânea dessa estrutura, e vazão que escoava lateralmente desse sistema.

A taxa de recarga de cada unidade aquífera do sistema aquífero Sinclinal Santa Rita foi calculada pelo método de separação de hidrógradas de Lyne e Hollick (1979), adaptado por Smakhtin (2001). A partir dessa taxa de recarga, foi estimada a reserva renovável de todo o sinclinal. A reserva permanente foi estimada a partir de um modelo de blocos do armazenamento da água subterrânea no *software* Leapfrog Geo, utilizando uma adaptação do modelo de variação do armazenamento específico (Ss) com a profundidade de Kuang *et al.* (2021). A vazão de entrada e saída lateral do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita foi estimada através da lei de Darcy (1856), em conjunto com quatro métodos de estimativa da variação da permeabilidade do aquífero com a profundidade, Manning e Ingebritsen (1999), Kuang e Jiao (2014), Scibek (2019) e Dou *et al.* (2024), aplicados em um modelo de blocos de condição de contorno de fluxo do tipo 3 no Leapfrog Geo.

2 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

O Sinclinal Santa Rita localiza-se no Brasil, no estado de Minas Gerais, mais especificamente, na porção leste do Quadrilátero Ferrífero. Ele possui 297 km², e é delimitado pelo divisor hidrográfico das serras do Caraça, a norte, e de Antônio Pereira, a oeste. O seu limite leste é o contato das rochas metassedimentares desse sinclinal com o embasamento granítico-gnáissico, e o limite sul é o rio do Carmo. A Figura 1 apresenta a localização desse sinclinal e a localização dos dados utilizados na pesquisa. Foram utilizados dados de 2000 a 2020, de outorgas de uso da água subterrânea, monitoramento fluviométrico, monitoramento do nível d'água, cadastro de nascentes, surgências e drenagem seca. Nesse mesmo período, houve aumento da quantidade de dados de monitoramento. Todos esses dados estão em disponibilidade pública, e foram obtidos de estudos executados por empreendimentos minerários.

Figura 1 Mapa hidrogeológico com localização dos dados trabalhados na pesquisa (Outorgas de uso da água subterrânea, monitoramento fluviométrico, monitoramento do nível d'água, nascentes e surgências e drenagem seca). Sistema de Projeção Transversa de Mercator – UTM. Datum: Sirgas 2000 zona 23S.

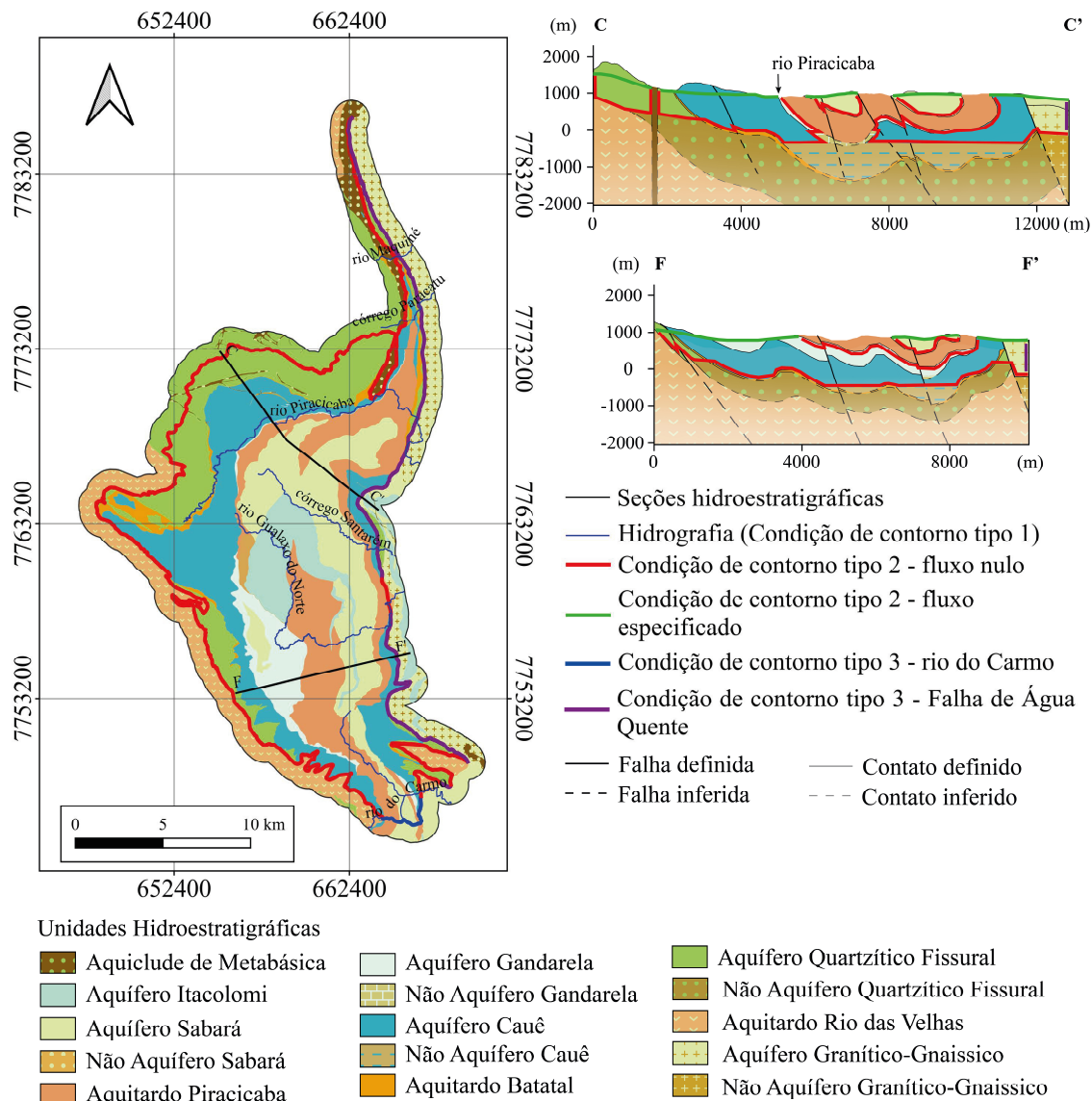


Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Ladeira *et al.* (2025), no sinclinal ocorrem dois sistemas aquíferos parcialmente conectados, o Sistema Aquífero Minas e o Sistema Aquífero Estrada Real. O primeiro é composto pelo Aquífero Quartzítico Fissural na base, separado parcialmente do Aquífero Cauê pelo Aquitardo Batatal. No topo desse sistema aquífero está o Aquífero Gandarela. O Sistema Aquífero Estrada Real ocorre na porção central do sinclinal, e é parcialmente separado do Sistema Aquífero Minas pelo Aquitardo Piracicaba. Esse sistema aquífero é formado pelos aquíferos Sabará, na base, e Itacolomi, no topo. Ele é delimitado por

condições de contorno com padrão de fluxo ou ausência desse bem definidos. O limite leste do Sinclinal Santa Rita é coincidente com a Falha de Água Quente que é o contato do Aquífero Granítico-Gnáissico com o Sistema Aquífero Minas. Como ambos são aquíferos, ocorre troca de água entre eles, característica de uma condição de contorno do tipo 3. O mesmo não ocorre no limite oeste, delimitado pelo contato do Sistema Aquífero Minas com o Aquitardo Rio das Velhas. O aquitardo troca água em um fluxo lento o suficiente, para ser considerado nulo, característica de uma condição de contorno tipo 2 de fluxo nulo. O fluxo da água subterrânea escoava regionalmente de oeste para leste na porção setentrional do sinclinal. Na porção meridional do sinclinal, a água subterrânea escoava para a direção sul, em sentido ao rio do Carmo. Dessa forma, o limite sul do sinclinal é uma condição de contorno tipo 3. A superfície do sinclinal recebe água através da recarga. Como esse volume pode ser determinado, esse limite é caracterizado como uma condição de contorno tipo 2 de fluxo especificado. O limite basal do sinclinal é o Aquitardo Rio das Velhas e a profundidade na qual as unidades aquíferas mudam para o comportamento hidrodinâmico de unidades não aquíferas, segundo o modelo hidrogeológico conceitual do Sinclinal Santa Rita desenvolvido por Ladeira *et al.* (2025).

Figura 2: Mapa hidrogeológico com as condições de contorno de fluxo. Seção CC' de orientação NW-SE, e Seção FF' de orientação W-E. Sem exagero vertical. Sistema de Projeção Transversa de Mercator – UTM. Datum: Sirgas 2000 zona 23S.



Fonte: Adaptado de Ladeira *et al.* (2025).

O Aquífero Granítico-Gnáissico é constituído por granitos, gnaisses e migmatitos, possui características de um aquífero livre, fissural, heterogêneo e anisotrópico (BEATO, MONSORES e BERTACHINI, 2005). Ele permite fluxo da água subterrânea com as demais unidades aquíferas do Sinclinal Santa Rita, e possui produtividade muito baixa a baixa (FIUME *et al.*, 2022).

O Aquitardo Rio das Velhas é composto por rochas metavulcânicas máfica-ultramáfica, e metassedimentares (ALKMIM E MARSHAK, 1998; FERNANDES, RONCATO e PAULA,

2023). Ele é uma unidade não aquífera por sua muito baixa produtividade de poços, o que o caracteriza como uma barreira física subterrânea de fluxo nulo com unidades aquíferas vizinhas (ANDRADE, 2023).

O Aquífero Quartzítico Fissural é constituído predominantemente por quartzitos, e em menor proporção, xistos (BEATO, MONSORES E BERTACHINI, 2005). Ele ocorre em condição livre ou confinada, quando sotoposto pelo Aquitardo Piracicaba, e possui características de um aquífero fissural, heterogêneo e anisotrópico (COSTA, 2017). Ele se encontra parcialmente interconectado com o Aquífero Cauê por falhas e fraturas (ANDRADE, 2023), e possui produtividade baixa, porém localmente moderada (FIUME *et al.*, 2022). Há ocorrências de poços de até muito alta produtividade construídos nesse aquífero (MOURÃO, 2007).

O Aquitardo Batatal é constituído por filitos, e é não produtivo (FIUME *et al.*, 2022; RONCATO *et al.*, 2024). Ele isola parcialmente o Aquífero Quartzítico Fissural do Aquífero Cauê, mas permite o fluxo da água subterrânea entre essas duas unidades através de falhas e fraturas, devido a sua menor espessura comparada aos demais aquíferos (ANDRADE, 2023; ZUPO *et al.*, 2025).

O Aquífero Cauê é a principal unidade aquífera do Sinclinal Santa Rita. Essa unidade está interconectada ao Aquífero Gandarela (PAULA *et al.*, 2018), e em parte da área ambos são confinados pelo Aquitardo Piracicaba (COSTA, 2017). Ele é composto por formações ferríferas, encontra-se em condição livre a confinada, caracteriza-se por ser heterogêneo e anisotrópico (MESQUITA *et al.*, 2017; DANTAS *et al.*, 2018; MAGALHÃES *et al.*, 2022). Devido a heterogeneidade e anisotropia, ele possui produtividade baixa a muito alta (LADEIRA *et al.*, 2025).

O Aquífero Gandarela é constituído por dolomitos, filitos e itabiritos dolomíticos, se encontra em condição livre a confinado, e é caracterizado como um aquífero fissural-cárstico, heterogêneo e anisotrópico (MAGALHÃES *et al.*, 2022). Devido ao aquífero ser fissural-cárstico há poços construídos nesse aquífero de muito baixa a muito alta produtividade (LADEIRA *et al.*, 2025).

O Aquitardo Piracicaba isola parcialmente os aquíferos Gandarela e Cauê dos aquíferos Sabará e Itacolomi. Ele é constituído por quartzitos e filitos, e é considerado uma unidade não produtiva (COSTA, 2017).

O Aquífero Sabará é composto por xistos, quartzitos, filitos, metagrauvacas e formações ferríferas, se encontra livre, e localmente confinado, possui características de um aquífero fissural de muito baixa a baixa produtividade (FIUME *et al.*, 2022).

O Aquífero Itacolomi é constituído por quartzitos com lentes de filito e metaconglomerado, é caracterizado por condição livre, poroso a fissural, heterogêneo e anisotrópico (ANDRADE, 2023). Ele possui produtividade geralmente baixa, porém localmente moderada (FIUME *et al.*, 2022).

As altitudes mais altas do Sinclinal Santa Rita estão na Serra do Caraça, com pico de 2060 metros, e na Serra de Antônio Pereira com altitudes que variam de 1300 a 1800 metros. A maior parte do sinclinal é caracterizada por um relevo de colinas com cotas de 700 a 1100 metros (DORR, 1969). O clima local é do tipo Cwa, tropical semiúmido, com verão chuvoso e um inverno seco (KÖPPEN, 1948). A temperatura média compensada local é de 18,6°C (INMET, 2020). Os rios principais da área são os rios Maquiné, Piracicaba, Gualaxo do Norte, e do Carmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo consiste na estimativa da reserva hídrica subterrânea, e do volume de entradas e saídas de água subterrânea do Sinclinal Santa Rita, e seguiu as seguintes etapas: (i) coleta de dados, (ii) cálculo da reserva renovável dos sistemas aquíferos, (iii) estimativa da reserva permanente dos sistemas aquíferos, (iv) cálculo da reserva explorada entre 2008 e 2020, (v) cálculo das entradas e saídas d'água subterrânea.

3.1 Coleta de dados

A base de dados consiste em séries históricas de monitoramento de vazões de cursos d'água, do monitoramento de instrumentos indicadores de nível d'água (INAs) e piezômetros, do monitoramento da vazão bombeada por poços tubulares profundos, em dados pluviométricos, e cadastro de nascentes. A grande maioria desses dados foi extraída de gráficos e tabelas de relatórios de pesquisa hidrogeológica com a finalidade de obtenção de outorgas de recursos hídricos, ou atendimento a condicionantes exigidas pelo órgão ambiental responsável pela gestão dos recursos hídricos, Instituto Mineiro de Gestão de Águas (Igam). Esses relatórios são disponibilizados pelo Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM, 2023) sob responsabilidade do Igam. O método empregado para extração de dados de gráficos foi o de amostragem e mapeamento de gráficos através do *software Engauge DigitizerTM*. Essa amostragem atende a escala regional do presente estudo. Demais informações de vazão de

poços de bombeamento foram obtidas de documentação de outorgas de empreendimentos menores, e os dados de pluviometria foram obtidos do portal Hidroweb, sob responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA).

Foram coletadas séries históricas de vazões de cursos d'água de 44 pontos de monitoramento de vazão da água superficial, de frequência amostral mensal. Os dados desse monitoramento se estendem de 2000 a 2020, com maior concentração de informação de 2012 a 2020. Os dados de séries históricas de monitoramento do nível d'água foram obtidos de 148 INAs e piezômetros, com dados de 2004 a 2020. Foram coletados dados de localização, e por vezes vazão, de 236 pontos de nascentes e surgências, e 14 pontos de indicação de drenagem seca. Esses levantamentos de pontos d'água foram realizados entre 2004 e 2018. Foram coletados dados de até 40 anos de monitoramento, de 1980 a 2020, da pluviometria mensal de três estações.

As informações cartográficas de geologia foram obtidas de Endo *et al.* (2019), a hidrografia foi adquirida no portal de Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais (IDE-SISEMA, 2023), e a topografia foi obtida do modelo digital de elevação do levantamento do Alos Palsar 12,5 x 12,5 m (JAXA, 2011), retirado do portal Alaska Satellite Facility (ASF).

3.2 Reserva renovável

A reserva renovável representa a variação média do volume de água no meio subterrâneo em um ano hidrológico (BOGOMOLOV e PLOTNIKOV, 1956). A reserva renovável foi estimada pela somatória do produto da área aflorante de cada unidade aquífera, pela taxa de recarga média de cada unidade aquífera, pela precipitação média anual (COSTA, 1998), equação 01

$$R_r = A_a \cdot \bar{p}_a \cdot i_a \quad \text{equação 1}$$

R_r é a reserva renovável da unidade aquífera (m³/ano); A_a é área da unidade aquífera (m²); \bar{p}_a é a precipitação média anual de Thiessen no período de 1990 a 2020 (m/ano); i_a é taxa de recarga média de cada unidade aquífera (%).

A primeira etapa do cálculo da reserva renovável foi a estimativa da pluviometria média regional a partir de três estações pluviométricas próximas da área estudada, estações Fazenda

Água Limpa Jusante (2043056) com dados de 1984 a 2020, Colégio Caraça (2043059) com dados de 1983 a 2020, e Estação da Fazenda Paraíso (2043011) com dados de 1981 a 2020. Foi utilizado o método de Thiessen (CHOW, MAIDMENT E MAYS, 1988) para separar cada domínio representativo da média regional de pluviometria (\bar{p}). Essa foi calculada pela média ponderada da área do polígono de Thiessen, equação 02, e foi empregada para determinar o volume precipitado em cada sub-bacia monitorada por um vertedouro ou *flowtracker*, sem influência antrópica verificada pelo histórico de imagens de satélite do Google Earth (2025).

$$\bar{p}_j = \sum_{i=0}^n \frac{(p_i \cdot A_{ti})}{A_{ti}} \quad \text{equação 2}$$

\bar{p}_j é a precipitação média regional de Thiessen no período de 1990 a 2020 (mm/mês); p_i é a precipitação mensal de 1990 a 2020 da estação pluviométrica analisada (mm/mês); A_{ti} é a área do polígono Thiessen da estação pluviométrica analisada (m²); i é cada estação pluviométrica; j é cada mês de 1990 a 2020.

A taxa de recarga foi estimada pelo método de separação de hidrógradas de escoamento de Lyne e Hollick (1979), adaptado por Smakhtin (2001). Esse método consiste na separação do escoamento superficial de origem direta da precipitação, da contribuição da água subterrânea no curso d'água (fluxo de base) (NATHAN e MCMAHON, 1990). Esse método foi escolhido por poder ser empregado com dados de vazão superficial de intervalo amostral mensal, caso dos dados obtidos no presente estudo (SMAKHTIN, 2001; TEIXEIRA *et al.*, 2023). Foram delimitadas sub-bacias com exutório na estação fluviométrica ou ponto de monitoramento por *flowtracker*, inseridas predominantemente em uma única unidade aquífera, para determinar a taxa de recarga da unidade aquífera que a bacia está inserida. Após avaliação visual do uso e ocupação da área de cada sub-bacia, constatou-se que algumas teriam influência de ação antrópica que alterou o terreno. As estações fluviométricas ou pontos de monitoramento que estão sob essa influência foram desconsiderados da análise. Foram consideradas para análise apenas as sub-bacias que tinham uma unidade aquífera. As sub-bacias com uma unidade aquífera e outra unidade não aquífera também foram consideradas, por a unidade não aquífera não representar a recarga da água subterrânea. Nesse último caso, a área da sub-bacia considerada para o cálculo de recarga foi apenas a área aflorante da unidade aquífera.

Dentre os dados de séries históricas de 44 pontos de monitoramento de vazão de cursos d'água, foram selecionados 17 pontos, através de avaliação visual do histórico de imagens do Google Earth (2025) que, em pelo menos um ano de seu monitoramento, não tiveram qualquer

influência antrópica no uso e ocupação do solo da bacia que monitoram, seja por construção de estruturas ou escavações que influenciam no fluxo natural do curso d'água. Dentre os 17 pontos selecionados, 10 pontos monitoravam bacias com zonas de recarga em áreas de mais de uma unidade aquífera. A interpretação desses pontos indica a taxa de recarga resultante das taxas de recarga de cada aquífero. Dentre os sete pontos restantes possíveis de indicar a recarga individual de uma unidade aquífera dentro da área da bacia monitorada, um ponto obteve uma taxa de recarga na ordem de 90% da precipitação média anual da área da bacia. Dessa forma, foi interpretado que boa parte da influência da água subterrânea nesse curso d'água era proveniente da água subterrânea provinda de áreas de fora da bacia analisada. Por isso, esse ponto foi desconsiderado no resultado final. Foram considerados apenas os seis pontos restantes, para a estimativa da recarga dos aquíferos do Sinclinal Santa Rita.

O Apêndice B apresenta as coordenadas de cada estação fluviométrica ou ponto de monitoramento analisado, a quantidade de aquíferos na área da bacia hidrográfica monitorada, a comparação do período de monitoramento interpretado sem interferência antrópica com o período total do monitoramento.

O método de Lyne e Hollick (1979), calcula primeiro a contribuição do escoamento superficial na vazão do curso d'água (q_i), equação 03, depois calcula a contribuição do escoamento subterrâneo na vazão do curso d'água (QB_i), equação 04. Smakhtin (2001) adaptou esse método para ser utilizado com dados mensais. Em regiões, como na área estudada, onde a precipitação é maior que 1100 mm, o coeficiente do filtro (a) deve ser igual a 0,925 reduzido em 2%, o que resulta em um coeficiente de filtro ($a=0,906$).

$$\text{Se } \begin{cases} q_i \geq 0, & q_i = a \cdot q_{i-1} + 0,5 \cdot (1 + a) \cdot (Q_i - Q_{i-1}) \\ q_i < 0, & q_i = 0 \end{cases} \quad \text{equação 3}$$

$$QB_i = Q_i - q_i \quad \text{equação 4}$$

q_i é a contribuição do escoamento superficial à vazão do curso d'água (m^3/s); a é o coeficiente do filtro (adimensional); Q é a vazão do curso d'água (m^3/s); QB é a contribuição do escoamento subterrâneo à vazão do curso d'água ou fluxo de base (m^3/s); i é o índice do mês calculado na série histórica de dados; $i-1$ é o índice do mês anterior ao calculado na série histórica de dados.

A recarga na área da sub-bacia analisada é considerada igual ao volume de água do fluxo de base no período analisado (TEIXEIRA *et al.*, 2023). No presente estudo, esse período foi considerado para os primeiros dados de vazões do curso d'água cuja variação pela sazonalidade tinha uma tendência estável, e quando, não foi identificado uso e ocupação do solo na sub-bacia. Esse volume foi calculado pela média anual da somatória de Riemann das vazões de fluxo de base desse período (STEWART, 2013), equação 05 e 06.

$$\overline{QB}_{\text{anual}} = \frac{QB_{\text{soma}} \cdot 31.536.000\text{s/ano} \cdot 10^3\text{mm/m}}{\sum_{i=0}^n t_i \cdot A_{\text{sb}}} \quad \text{equação 5}$$

$$QB_{\text{soma}} = \sum_{i=0}^n \frac{(QB_i + QB_{i-1})}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad \text{equação 6}$$

$\overline{QB}_{\text{anual}}$ é o fluxo de base médio anual da sub-bacia (mm/ano); QB_{soma} é o volume de contribuição da água subterrânea no curso d'água em n dias (m^3); $\sum_{i=0}^n t_i$ é o período total analisado (s); A_{sb} é a área da sub-bacia (m^2); QB é a contribuição do escoamento subterrâneo à vazão do curso d'água ou fluxo de base (m^3/s); t é o tempo (s); i é o índice do mês calculado na série histórica de dados; $i-1$ é o índice do mês anterior ao calculado na série histórica de dados.

O Apêndice C apresenta os gráficos de separação de hidrógradas de cada estação fluviométrica analisada, e o gráfico de precipitação média regional de Thiessen.

A taxa de recarga de cada unidade aquífera foi calculada pela divisão do fluxo de base médio anual da sub-bacia pela precipitação média anual de Thiessen para cada estação fluviométrica analisada (CASTANY, 1967), equação 07. As sub-bacias analisadas não englobaram todas as unidades aquíferas da área de estudo. Então, foi considerado as taxas de recarga calculadas por outros estudos na região do Quadrilátero Ferrífero.

$$i_a = \frac{\overline{QB}_{\text{anual}}}{\bar{p}_e} \quad \text{equação 7}$$

i_a é a taxa de recarga (%), $\overline{QB}_{\text{anual}}$ é o fluxo de base médio anual da sub-bacia (mm/ano); \bar{p}_e é a precipitação média anual de Thiessen para cada estação fluviométrica analisada (mm/ano).

3.3 Reserva permanente

A reserva permanente é o volume de água armazenada no tempo geológico que não varia em função da sazonalidade pluviométrica e descargas naturais (PLOTNIKOV, 1962). A reserva permanente (R_p) foi determinada a partir de um modelo hidrogeológico tridimensional do *software* Leapfrog Geo e dos armazenamentos específicos (S_s) dos aquíferos do Sinclinal Santa Rita de Ladeira *et al.* (2025). Ela foi calculada no Leapfrog Geo pela soma do produto de um modelo de blocos de armazenamentos específicos (S_s), pela espessura de cada bloco (b), pelo volume de cada bloco (V_b), equação 08. A base desse cálculo é a definição operacional do armazenamento específico como volume de água liberado ou adicionado por uma unidade de volume do aquífero devido ao decréscimo ou acréscimo unitário de carga hidráulica (BEAR, 1979), equação 09. Essa estimativa da reserva permanente considera o aquífero como elástico. Quando um volume de água sai do aquífero e posteriormente retorna com a mesma distribuição espacial, as condições de carga hidráulica permanecem iguais às iniciais. Esse método pode ser utilizado como uma estimativa do volume total de água liberada pela drenância, caso esse volume seja muito superior ao volume de água liberada por compressibilidade da matriz ou da água (BEAR, 1979). Dessa forma, o armazenamento específico de referência (S_s) considera o volume de água liberada durante testes de bombeamento, sem considerar a variação do armazenamento pela compressibilidade da matriz ou da água. Na escala do bloco, quando é retirada toda água desse por gravidade, a variação da carga hidráulica é a coluna de água inicial nesse (b). É desconsiderada a variação do volume da matriz ou da água pela descompressão, devido ao volume de água liberada pela drenância ser considerado muito superior ao armazenamento pela compressibilidade da água e da matriz de aquíferos. Dessa forma, o volume estimado do armazenamento do aquífero pela água liberada pela drenância é considerado bem representativo desse. Outros estudos aplicaram o princípio desse cálculo, como Silva, Neto e Bertachini (1994); Costa (1998); Steiakakis (2018); Cândido *et al.* (2019); Freitas, De Paula e Antunes (2025).

No método empregado, o armazenamento específico foi ajustado pela profundidade, de acordo com o modelo de Kuang *et al.* (2021) que representa a variação do armazenamento específico de aquíferos livres e confinados com a profundidade.

$$R_p = \sum_{i=0}^n S_s \cdot b \cdot V_b$$

equação 8

$$\Delta V_1 = Ss \cdot \Delta h \cdot V_b \quad \text{equação 9}$$

R_p é a reserva permanente (m^3); Ss é o armazenamento específico (m^{-1}); b é a aresta vertical de cada bloco (m); V_b é o volume de cada bloco (m^3); i é cada bloco; ΔV_1 é a variação do volume de água do aquífero (m); Δh é a variação da carga hidráulica. A aresta de cada bloco é de 50 metros, representativa para a escala do modelo regional. Dessa forma o volume de cada bloco é $125.000 m^3$.

Primeiro foi calculado o armazenamento específico de cada bloco (Ss), considerando a unidade aquífera que ele está inserido e a profundidade do bloco em relação a topografia (z), utilizando o método de Kuang *et al.* (2021). Nesse método é proposta uma curva modelo da diminuição do armazenamento específico com a profundidade, equação 10.

$$\log Ss = \log Ssr + (\log Ss_0 - \log Ssr) \cdot (1 + z)^{-\lambda} \quad \text{equação 10}$$

Ss é o armazenamento específico (m^{-1}); Ssr é o armazenamento específico residual (m^{-1}); Ss_0 é o armazenamento específico na superfície do terreno (m^{-1}); z é a profundidade em relação a topografia (km); λ é o índice de declínio (adimensional). Ssr e λ são valores empíricos no modelo de Kuang *et al.* (2021) para aquíferos com profundidades maiores que 1 km, e menores que 4 km. $Ssr = 1,6 \times 10^{-8} m^{-1}$ e $\lambda = 2,118$.

O modelo de Kuang *et al.* (2021) apresenta a variação do armazenamento específico com a profundidade para a crosta continental ($< 1 km$) e crosta continental ($1 km < z < 4km$). As constantes utilizadas foram do modelo de crosta continental ($1 km < z < 4km$).

Após a primeira aplicação do método de Kuang *et al.* (2021), com os valores de armazenamentos específicos na profundidade mais rasa (Ss_{+r}) como Ss_0 , foi constatado que o armazenamento específico foi subestimado com a profundidade. Já que o Ss_{+r} já representa um armazenamento específico que diminuiu até a profundidade final do poço bombeado durante o teste de bombeamento. Dessa forma, foram calculados os valores dos armazenamentos específicos na superfície do terreno de cada unidade aquífera (Ss_0) pelo método de Kuang *et al.* (2021), equação 11.

$$\log Ss_{0calc} = \frac{(\log Ss_{+r} - \log Ssr)}{(1 - z_{+r})^{-\lambda}} + \log Ssr \quad \text{equação 11}$$

$Ss0_{calc}$ é o armazenamento específico calculado para a superfície do terreno (m^{-1}); Ss_{+r} é o armazenamento específico na profundidade mais rasa (m^{-1}); Ssr é o armazenamento específico residual (m^{-1}); z_{+r} é a profundidade de Ss_{+r} em relação a topografia (km); λ é o índice de declínio (adimensional).

Mas para algumas unidades, o $Ss0$ foi superdimensionado. Dessa forma, o modelo do cálculo do armazenamento específico pela profundidade seguiu a equação 10, quando $z > z_{+r}$, e Ss foi considerado igual a Ss_{+r} , quando $z \leq z_{+r}$. A equação 12 apresenta a função do modelo considerada representativa para calcular o armazenamento específico pela profundidade.

$$Se \begin{cases} z \leq z_{+r}, & \log Ss = \log Ss_{+r} \\ z > z_{+r}, & \log Ss = \log Ssr + (\log Ss0_{calc} - \log Ssr) \cdot (1 + z)^{-\lambda} \end{cases} \quad \text{equação 12}$$

z é a profundidade em relação a topografia (km); z_{+r} é a profundidade de Ss_{+r} em relação a topografia (m); Ss é o armazenamento específico (m^{-1}); Ssr é o armazenamento específico residual (m^{-1}); $Ss0_{calc}$ é o armazenamento específico calculado para a superfície do terreno (m^{-1}); λ é o índice de declínio (adimensional). Ss_{+r} é o armazenamento específico na profundidade mais rasa (m^{-1}). Ssr e λ são valores empíricos no modelo de Kuang *et al.* (2021) para aquíferos com profundidades maiores que 1 km, e menores que 4 km. $Ssr = 1,6 \times 10^{-8} m^{-1}$ e $\lambda = 2,118$.

Os blocos do modelo que calcularam essas equações, primeiramente, foram carimbados pela cota da topografia logo acima (Z_{ij}), utilizando a interpolação do vizinho mais próximo com elipsoide de busca com raios de $x = 200$ m; $y = 200$ m; $z = 50.000$ m. A interpolação foi executada dessa forma, para que todos os blocos da mesma coluna tivessem os mesmos valores de cota da topografia. Esses valores carimbados foram utilizados para calcular a profundidade de cada bloco em relação à topografia (z) através da equação 13.

$$z = Z_{ij} - B_z \quad \text{equação 13}$$

Z_{ij} é a cota topográfica logo acima do bloco e carimbada nesse (m); B_z é a cota do centro do bloco (m); z é a profundidade do bloco em relação a topografia (m); i é a coordenada x; j é a coordenada y.

O Apêndice D apresenta a aplicação dessas equações no modelo de blocos do Leapfrog Geo para os aquíferos Granítico Gnáissico, Quartzítico Fissural, Cauê, Gandarela, Sabará e

Itacolomi do Sinclinal Santa Rita. É apresentado também os valores estimados de $Ss0_{calc}$ pela equação 11.

3.4 Reserva explotada

A reserva explotada do Sinclinal Santa Rita é o volume de água da reserva permanente extraído entre 2008 e 2020. A fim de dimensionar essa reserva, foi estimado o volume da reserva permanente consumida a partir da delimitação de capa do nível d'água potenciométrico do período seco de 2020, e de lapa, do nível d'água potenciométrico do período seco de 2008. O nível d'água potenciométrico de 2008 foi escolhido, por ser o ano mais antigo com dados para elaboração dessa superfície, e com menos interferências de uso e ocupação do solo identificadas por imagens do Google Earth (2025). Essa superfície foi elaborada a partir de dados de nível d'água de 2008 de 46 INAs e PZs, cadastro de 185 nascentes de 2004 a 2009 e da hidrografia perene de 2008. A superfície do nível d'água potenciométrico de 2020 foi elaborada por Ladeira *et al.* (2025). A estimativa do volume de água removido da reserva permanente foi calculada pelas equações 08 a 13.

Esse volume é considerado o volume mínimo explotado da reserva permanente, por os dados de monitoramento do nível d'água englobarem muito bem a região norte e oeste, onde há outorgas de uso da água subterrânea. Mas não englobar uma parte da porção leste, onde também há outorga de uso da água subterrânea. Dessa forma, a análise da reserva explotada foi realizada para a quase totalidade da área estudada, com exceção dessa parte na porção leste.

Esse volume foi comparado com o total bombeado por poços tubulares e o total outorgado da água subterrânea no Sinclinal Santa Rita.

3.5 Entradas e saídas d'água laterais

A recarga alóctone é o volume de água que entra no sistema aquífero lateralmente através do escoamento subterrâneo em um determinado intervalo de tempo. Quando ocorre a saída lateral de água desse sistema, define-se esse volume de saída em um intervalo de tempo, como descarga lateral (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983). A vazão dessas entradas e saídas de água do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita foi estimada através da lei de Darcy (1856), equações 14 a 17, e de um modelo de blocos de permeabilidade do aquífero no Leapfrog Geo. Essa última é uma propriedade intrínseca do aquífero, derivada da condutividade hidráulica que

leva em consideração as propriedades do líquido. A relação das duas é apresentada pela equação 17, (DARCY, 1856).

$$Q = K \cdot A \frac{\Delta h}{L} \quad \text{equação 14}$$

$$q = K \frac{\Delta h}{L} \quad \text{equação 15}$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad \text{equação 16}$$

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad \text{equação 17}$$

Q é a vazão do escoamento subterrâneo (m³/s) ao longo de uma face de área (A, m²); K é a condutividade hidráulica do aquífero (m/s); Δh é diferença de cargas hidráulicas (m); h₁ é a carga hidráulica de menor potencial (m); h₂ é a carga hidráulica de maior potencial (m); L é a distância dos pontos dessas duas cargas hidráulicas (m); Δh/L é o gradiente hidráulico (adimensional); q é a velocidade aparente da água subterrânea (m/s). É dito velocidade aparente, por ser a velocidade média da água subterrânea para chegar de um ponto a outro. Ela não considera todo o trajeto percorrido pela água através da porosidade. k é a permeabilidade do aquífero (m²); ρ é a densidade da água a 15,6°C (999,1 kg/m³); g é a gravidade (9,8m/s²); μ é a viscosidade dinâmica da água a 15,6°C (1,138x10⁻³ kg/m·s). De acordo com Feitosa *et al.* (2008), a temperatura de 15,6°C representa bem a temperatura das águas subterrâneas.

O modelo de blocos, foi construído na condição de contorno tipo 3 interpretada por Ladeira *et al.* (2025). Essa condição de contorno é definida como a fronteira onde o fluxo é calculado a partir de gradiente hidráulico especificado (ANDERSON, WOESSNER e HUNT, 2015). Essa condição de contorno foi interpretada como o contato do Sistema Aquífero Minas com o Aquífero Granítico-Gnáissico ao longo da Falha Água Quente, e a fronteira sul do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita, localizada sob o rio do Carmo. Mas para representar a área de escoamento subterrâneo da Falha de Água Quente, o modelo de blocos não seguiu a estrutura da falha. Ele foi construído com blocos dispostos em colunas, de forma a não ocorrer blocos duplicados um atrás do outro.

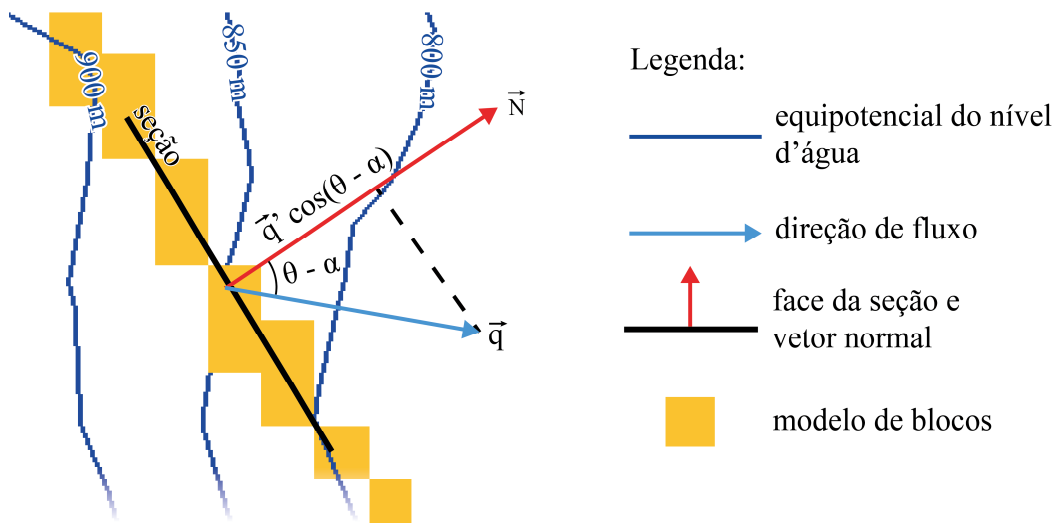
As equações 18 e 19 foram utilizadas para calcular a saída e a entrada de água ao longo dessa condição de contorno. Elas consideraram a direção e sentido de fluxo perpendicular às equipotenciais, o gradiente hidráulico, a orientação da face de escoamento em relação a direção de fluxo, a área média da face de escoamento dos blocos do modelo para cada aquífero, e a permeabilidade das unidades aquíferas. Na condição de contorno da Falha de Água Quente, o Aquífero Granítico-Gnáissico foi considerado limitante do fluxo, quando em contato com o Aquífero Cauê. Devido à permeabilidade do primeiro ser menor que a permeabilidade do segundo aquífero. No contato entre o Aquífero Quartzítico Fissural e o Aquífero Granítico-Gnáissico nessa mesma condição de contorno, a permeabilidade do primeiro foi considerada limitante, por ser menor que a permeabilidade do segundo.

$$Q = -\frac{k\rho g}{\mu} \cdot A \cdot \cos(\theta - \alpha) \cdot (\tan \beta) \cdot 31.536.000\text{s/ano} \quad \text{equação 18}$$

$$q = -\frac{k\rho g}{\mu} \cdot \cos(\theta - \alpha) \cdot (\tan \beta) \cdot 31.536.000\text{s/ano} \quad \text{equação 19}$$

Q é a vazão do escoamento subterrâneo (m³/ano) ao longo de uma seção de área (A, m²); k é a permeabilidade do aquífero (m²); ρ é a densidade da água a 15,6°C (999,1 kg/m³); g é a gravidade (9,8m/s²); μ é a viscosidade dinâmica da água a 15,6°C (1,138x10⁻³ kg/m·s). De acordo com Feitosa *et al.* (2008), a temperatura de 15,6°C representa bem a temperatura das águas subterrâneas. θ é o azimute do vetor normal à condição de contorno tipo 3; α é o azimute do vetor fluxo da água subterrânea; cos(θ- α) é a função para o cálculo do componente de fluxo perpendicular a seção da condição de contorno tipo 3, conforme Figura 3; β é o ângulo de mergulho da superfície potenciométrica sobre o bloco; tan β é o gradiente hidráulico (adimensional); q é a velocidade aparente da água subterrânea (m/ano). É dito velocidade aparente, por ser a velocidade média da água subterrânea chegar de um ponto a outro. Ela não considera todo o trajeto percorrido pela água através da porosidade.

Figura 3 Esquema do ajuste da área da seção do bloco que escoar a água subterrânea. O fluxo de água contabilizado que transpassa a seção de cada bloco é proporcional a $\cos(\theta - \alpha)$, sendo θ , o azimute do vetor normal à condição de contorno tipo 3; α , o azimute do vetor fluxo da água subterrânea.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tóth (1963) elaborou um modelo matemático para os diferentes casos de declividade, sinuosidade e profundidade do aquífero. Nesse modelo, o fluxo regional ocorre abaixo de 300 metros de profundidade e o fluxo local acima dessa profundidade. Esse conceito foi aplicado no presente estudo, que diferenciou o fluxo para a estimativa de entradas e saídas de água através da condição de contorno tipo 3 em fluxo local e regional na profundidade de 300 metros. Foi utilizada a potenciometria do nível d'água com equipotenciais de 10 em 10 metros para representar o fluxo local, e a potenciometria com equipotenciais de 50 em 50 metros para representar o fluxo regional. O azimute da direção de fluxo dessas duas potenciometrias (α) e a inclinação delas (β) foram carimbados no modelo de blocos por meio da interpolação do vizinho mais próximo com elipsoide de busca com raios de $x = 1000$ m; $y = 1000$ m; $z = 50.000$ m, para a potenciometria do nível d'água com equipotenciais de 10 em 10 metros, e raios de $x = 2000$ m; $y = 2000$ m; $z = 50.000$ m, para a potenciometria com equipotenciais de 50 em 50 metros. A interpolação foi executada dessa forma, para que todos os blocos da mesma coluna tivessem os mesmos valores de azimute. Foi necessário aumentar os raios do elipsoide de busca da potenciometria do nível d'água com equipotenciais de 50 em 50 metros no plano horizontal, porque os pontos com esses valores estão mais distantes entre si comparado à potenciometria com equipotenciais de 10 em 10 metros.

O mesmo procedimento de carimbo dos blocos foi executado para o azimute do vetor normal a condição de contorno tipo 3, e para a cota da topografia logo acima. O elipsoide de

busca do azimute do vetor normal da condição de contorno tipo 3 foi $x = 500$ m; $y = 500$ m; $z = 50.000$ m. O elipsoide de busca da cota da topografia foi $x = 200$ m; $y = 200$ m; $z = 50.000$ m. A profundidade de cada bloco em relação a topografia (z) foi calculada através da equação 13.

Foram utilizados três modelos diferentes que estimam a variação da permeabilidade com a profundidade (MANNING e INGEBRITSEN, 1999; KUANG e JIAO, 2014; SCIBEK, 2019) e um modelo que estima a variação da condutividade hidráulica com a profundidade (DOU *et al.*, 2024), para calcular as saídas e as entradas de água através da condição de contorno tipo 3 (Tabela 1). Os resultados desses quatro modelos foram comparados. O modelo de Manning e Ingebritsen (1999) é um modelo logarítmico que descreve a variação permeabilidade do aquífero em rochas metamórficas, conhecendo a permeabilidade a 1000 metros de profundidade, equação 20. Como não é usual determinar a permeabilidade do aquífero nessa profundidade, essa incógnita foi isolada e calculada pela permeabilidade e profundidade dessa conhecida, equação 21. O mesmo procedimento foi aplicado para os outros três métodos a fim de conhecer a permeabilidade e profundidade de referência para aplicação.

O modelo de Kuang e Jiao (2014) é um modelo de potência que descreve a variação da permeabilidade do aquífero, conhecendo a permeabilidade na superfície, equação 22. A função desse modelo é semelhante a função de Kuang *et al.* (2021) que descreve a variação do armazenamento específico com a profundidade. As permeabilidades da superfície foram calculadas a partir das permeabilidades e profundidades conhecidas através da equação 23. Foram utilizadas as constantes propostas para o modelo de crosta continental em geral e crosta continental superior em geral que possuem valores iguais.

O modelo de Scibek (2019) é uma derivação do modelo de Manning e Ingebritsen (1999), a ser aplicado em regiões de falha. Scibek (2019) comparou a curva de diferentes modelos com dados de permeabilidade e profundidade em zonas deformadas por falhamento, e concluiu que o modelo que melhor se encaixava era o de Manning e Ingebrisen (1999) com um acréscimo de 0,1 na profundidade para representar melhor a inflexão em profundidades mais rasas, equação 24. A equação 25 foi utilizada para determinar a permeabilidade a 1000 metros de profundidade de acordo com esse modelo.

Scibek (2019) afirma que as falhas possuem um núcleo com permeabilidade três ordens de magnitude menor comparado a zonas não falhadas, devido ao processo de diminuição do grão e formação de argilas nesse núcleo. Enquanto na zona de dano de falha, a permeabilidade é uma ordem de vezes maior, devido a formação de canais drenantes pelas fraturas. Dou *et al.* (2024) verificou essa variação, e percebeu que por conta de haver duas características

hidrogeológicas em zonas de falha, a permeabilidade pode aumentar em profundidade sem seguir um padrão. Como, não havia uma equação modelo de Dou *et al.* (2024) para o cálculo da variação da permeabilidade com a profundidade em zonas de falha, optou-se por seguir o modelo desses autores para rochas metamórficas, por serem o tipo de rochas da condição de contorno da Falha de Água Quente, e por possuírem as constantes que tendiam a vazão para valores menores, considerados em fronteiras de falha, equação 26. A permeabilidade na superfície foi calculada pela equação 27.

Os cálculos de permeabilidade com a profundidade dos modelos de Scibek (2019) e Dou (2019) também foram aplicados, com as mesmas constantes, na condição de contorno sob o rio do Carmo, para fins de comparação, mesmo que essa condição de contorno esteja localizada em uma zona não deformada.

Tabela 1: Equações 22 a 29 para o cálculo da variação da permeabilidade (k) pela profundidade (z).

Modelo	Fórmula do modelo	Fórmula para calcular permeabilidade ou condutividade hidráulica de referência (k_{1km} , k_s e K_s)
Manning e Ingebritsen (1999)	$\log k = -3,2 \log z + \log k_{1km}$ equação 20	$\log k_{1km} = 3,2 \log z + \log k$ equação 21
Kuang e Jiao (2014)	$\log k = \log k_r + (\log k_s - \log k_r) \cdot (1 + z)^{-\lambda}$ equação 22	$\log k_s = \frac{(\log k_{+r} - \log k_r)}{(1 + z_{+r})^{-\lambda}} + \log k_r$ equação 23
Scibek (2019)	$\log k = -3,2 \log (z + 0,1) + \log k_{1km}$ equação 24	$\log k_{1km} = 3,2 \log (z + 0,1) + \log k$ equação 25
Dou <i>et al.</i> (2024)	$\log K = \log K_r + (\log K_s - \log K_r) \cdot e^{-\alpha z}$ equação 26	$\log K_s = \frac{(\log K_{+r} - \log K_r)}{e^{-\alpha z_{+r}}} + \log K_r$ equação 27

Fonte: Elaborado pelo autor.

k é a permeabilidade (m^2); z é a profundidade em relação a topografia (km); k_{1km} é a permeabilidade a 1 km de profundidade (m^2); k_r é a permeabilidade residual (m^2); k_s é a permeabilidade na superfície do terreno (m^2); λ é o índice de declínio (adimensional); k_{+r} é a permeabilidade na profundidade mais rasa (m^2); z_{+r} é a profundidade de (k_{+r} ou K_{+r}) em relação a topografia (m); K é a condutividade hidráulica (cm/s); K_r é condutividade hidráulica residual (cm/s); K_s é a condutividade hidráulica na superfície do terreno (cm/s); α é o índice de declínio (adimensional); K_{+r} é a condutividade hidráulica na profundidade mais rasa (cm/s). k_r e λ são valores empíricos no modelo de Kuang e Jiao (2014) para a crosta continental em geral. $k_r = 10^{-25,4} m^2$ e $\lambda = 0,25$. K_r e α são valores empíricos no modelo de Dou *et al.* (2024) para rochas metamórficas. $K_r = 10^{-7,26} cm/s$ e $\alpha = 0,00431$.

Como as permeabilidades e condutividades hidráulicas de referência (k_{1km} , k_s e K_s) foram calculadas pelos próprios métodos, a permeabilidade e condutividade hidráulica acima da profundidade desses parâmetros conhecidos foram consideradas com o valor conhecido, como feito para o armazenamento específico da equação 12. Dessa forma, quando $z \leq z_{+r}$, aplicou-se os métodos das equações 20 a 27. Quando $z > z_{+r}$, $k = k_{+r}$ e $K = K_{+r}$.

Diferente dos modelos numéricos conhecidos que aplicam a lei de Darcy com o princípio da continuidade. A estimativa de entrada e saída d'água do método proposto no presente estudo, não é embasada em fatores de calibração e incertezas numéricas. Ela é embasada na aplicação direta da lei de Darcy, parâmetros hidrodinâmicos calculados e na superfície de nível d'água interpretada. Informações essas que são utilizadas para validar modelos numéricos.

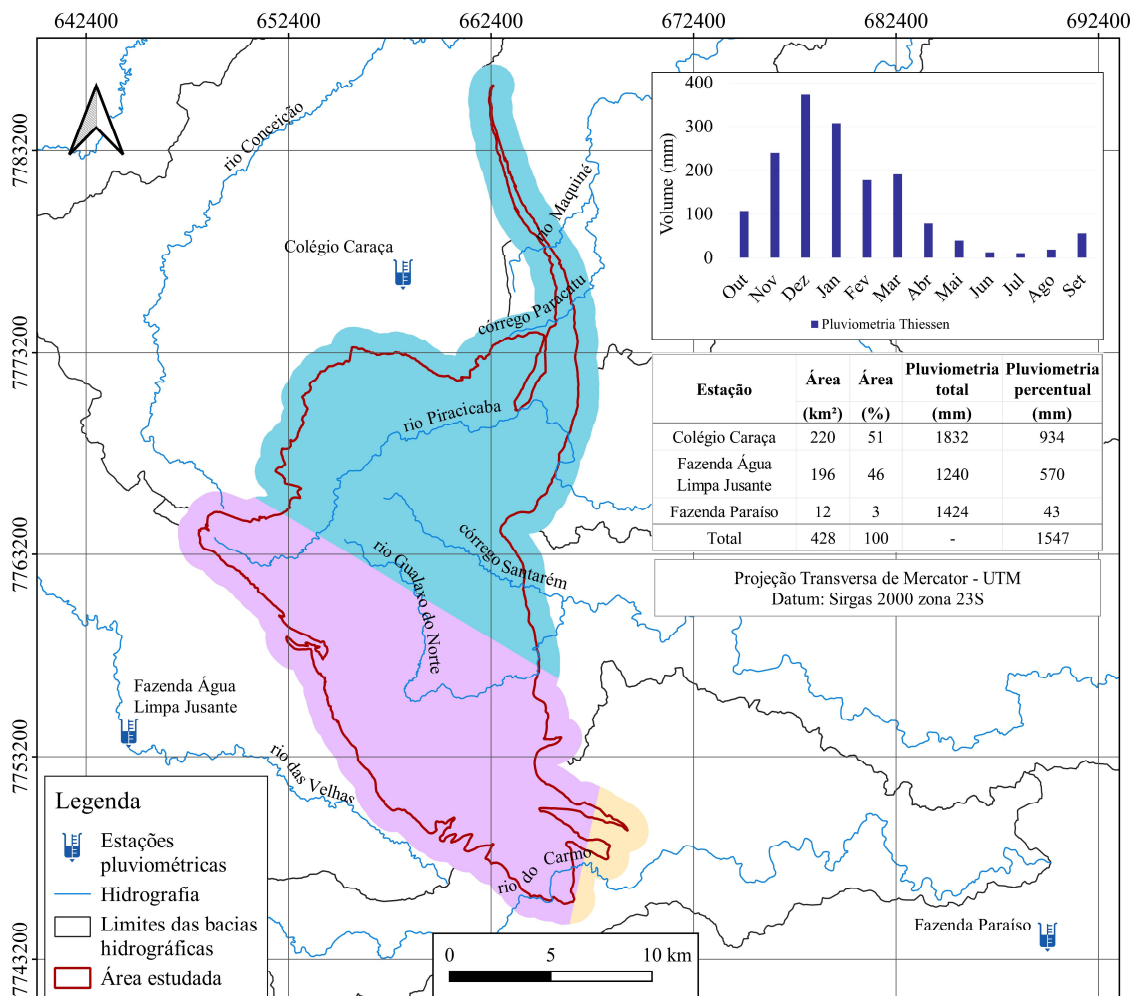
O Apêndice E apresenta a aplicação dessas equações no modelo de blocos do Leapfrog Geo para os aquíferos Granítico Gnáissico, Quartzítico Fissural, Cauê, Gandarela e Sabará do Sinclinal Santa Rita. É apresentado também os valores estimados de k_{1km} dos modelos de Manning e Ingebritsen (1999) e Scibek (2019), equações 21 e 25, respectivamente; de k_s do modelo de Kuang e Jiao (2014), equação 23; de K_s do modelo de Dou *et al.* (2024), equação 25.

4 RESULTADOS

4.1 Reserva renovável

A reserva renovável foi estimada pela recarga anual de cada unidade aquífera do Sinclinal Santa Rita. Primeiramente, foi calculada a contribuição pluviométrica regional para essa recarga pelo método de Thiessen. A Figura 4 apresenta os resultados da aplicação desse método, com os domínios pluviométricos definidos.

Figura 4: Mapa de pluviometria Thiessen com três estações pluviométricas (Colégio Caraça, Fazenda Água Limpa Jusante e Fazenda Paraíso). Sistema de Projeção Transversa de Mercator – UTM. Datum: Sirgas 2000 zona 23S.



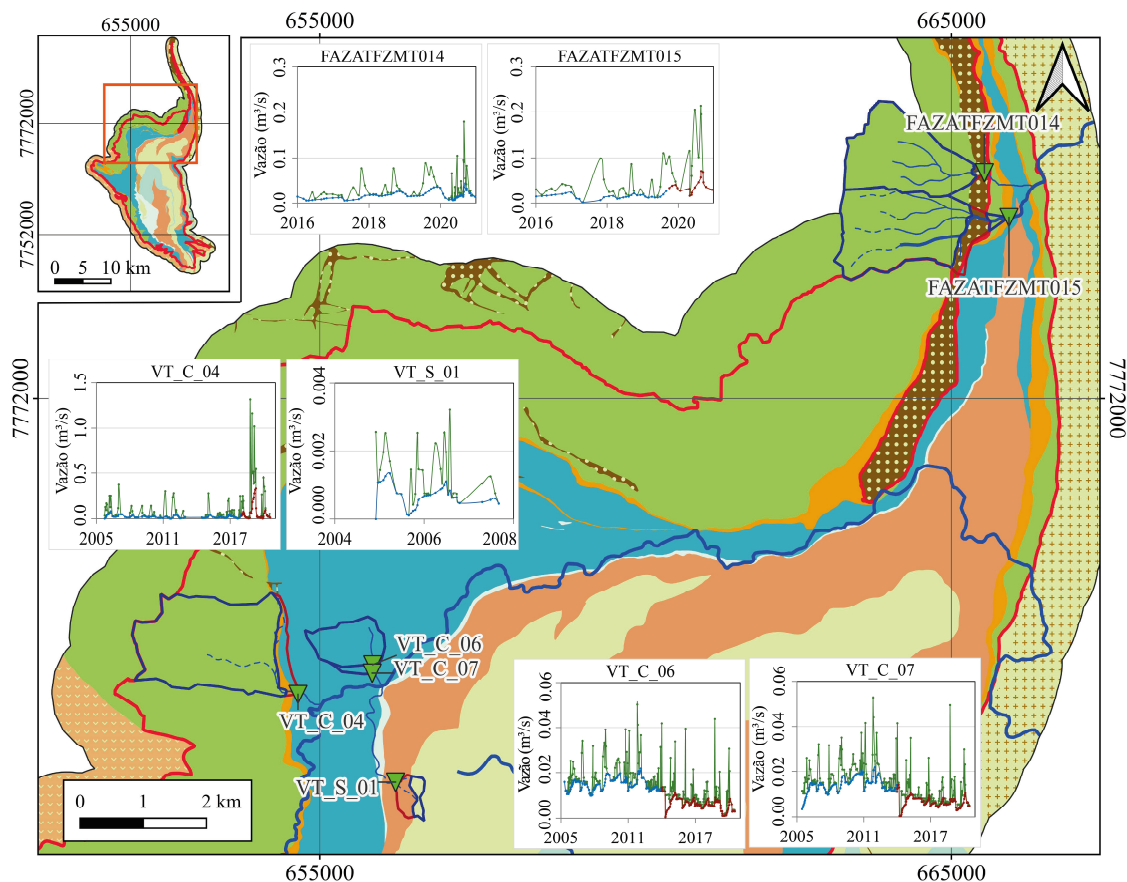
Fonte: Elaborado pelo autor.

As estações Colégio Caraça e Fazenda Água Limpa Jusante representam mais a precipitação do Sinclinal Santa Rita, uma vez que o domínio da primeira abrange 51% da área, e o domínio da segunda abrange 46% da área. A estação Fazenda Paraíso abrange apenas 3% da área. A estação Colégio do Caraça está a 1283 metros de altitude. Ela se encontra atrás da Serra do Caraça com 1500 a 2060 metros de altitude ao longo do divisor das bacias do rio Piracicaba e do rio Conceição. A pluviometria dessa estação é a maior dentre as três, ela possui média de 1832 mm/ano, pois a estação está em cota altimétrica maior. A estação Fazenda Água Limpa Jusante está a 947 metros de altitude, atrás da Serra de Antônio Pereira que é o divisor de águas das bacias regionais do rio das Velhas e do rio Doce. A cota de cume dessa serra varia de 1300 a 1850 metros de altitude. A precipitação média dessa estação é a menor dentre as três,

1240 mm/ano, por estar atrás dessa serra em cota altimétrica intermediária. A estação Fazenda Paraíso, não possui nenhuma barreira geográfica em seu entorno, está a 461 metros de altitude, e possui precipitação média de 1424 mm/ano. A precipitação média anual do Sinclinal Santa Rita é de 1547 mm/ano, com mínimo de 909 mm/ano e máximo de 2215 mm/ano, de 1990 a 2020.

As taxas de recarga das unidades aquíferas do Sinclinal Santa Rita foram determinadas a partir do método de separação de hidrógradas de Lyne e Hollick (1979) com coeficiente de Smakhtin (2001). Foram analisados seis pontos de monitoramento. Um indicou a recarga de uma bacia sobre o Aquífero Sabará. Dois indicaram a recarga de bacias sobre o Aquífero Cauê. Três indicaram a recarga em bacias sobre o Aquífero Quartzítico Fissural. A localização das bacias analisadas, dos pontos de monitoramento e das hidrógradas são apresentados na Figura 5. As marcas de escala das hidrógradas representam o primeiro dia de janeiro do ano apresentado.

Figura 5: Mapa de separação de hidrógradas pelo método de Lyne e Hollick (1979), adaptado por Smakhtin (2001). Estimativa do fluxo de base médio dos pontos FAZATFZMT014, FAZATFZMT015, VT_C_04, VT_S_01, VT_C_06, VT_C_07. Sistema de Projeção Transversa de Mercator – UTM. Datum: Sirgas 2000 zona 23S.



Legenda

Unidades Hidroestratigráficas	Aquitardo Batatal	Hidrografia intermitente de afluente analisado
Aquiclude de Metabásica	Aquífero Quartzítico	Bacia monitorada
Sistema Aquífero Estrada Real	Fissural	Zona de recarga da bacia monitorada
Aquífero Itacolomi	Aquitardo Rio das Velhas	Área estudada
Aquífero Sabará	Aquífero Granítico-Gnaissico	Vazão do curso d'água
Aquitardo Piracicaba	Monitoramento fluviométrico	Fluxo de base
Sistema Aquífero Minas	Hidrografia principal	Fluxo de base sob influência antrópica
Aquífero Gandarela	Hidrografia perene de afluente analisado	
Aquífero Cauê		

Fonte: Elaborado pelo autor.

O período das hidrógradas analisadas para a estimativa do fluxo de base foi considerado com base na avaliação visual do uso e ocupação do solo com imagens de satélite do Google Earth (2025). Foi considerado o período sem intervenção antrópica no uso e ocupação do solo na área da bacia hidrográfica.

De acordo com Domenico e Schwartz (1997), a recarga de aquíferos e aquíferos é possível, mas extremamente lenta. Dessa forma, apenas as superfícies das unidades aquíferas foram consideradas zonas de recarga. Por isso, as zonas de recarga dos pontos FAZATFZMT014, FAZATFZMT015, e VT_S_01 foram consideradas como a área da bacia monitorada sobre a unidade aquífera. A zona de recarga da bacia VT_C_04 foi considerada a área sobre o Aquífero Quartzítico Fissural, pois o ponto de monitoramento está localizado sobre o Aquífero Batatal, e a água do fluxo de base desse córrego é proveniente apenas do Aquífero Quartzítico Fissural. Na borda leste da bacia hidrográfica desse ponto, parte da água infiltra no Aquífero Cauê, mas não tem influência no ponto monitorado que está assentado no Aquífero Batatal. Por isso, a porção da bacia sobre o Aquífero Cauê não foi considerada como zona de recarga. A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de separação de hidrógradas.

Tabela 2: Resultados da separação de hidrógradas pelo método de Lyne e Hollick (1979), adaptado por Smakhtin (2001). Estimativa do fluxo de base médio, precipitação média e taxa de recarga dos pontos FAZATFZMT014, FAZATFZMT015, VT_C_04, VT_S_01, VT_C_06, VT_C_07.

Ponto	Período analisado	Área da bacia (m ²)	Zona de recarga (m ²)	Fluxo de base (mm/ano)	Precipitação média do período analisado (mm/ano)	Taxa de recarga (%)
FAZATFZMT014	2016-2020	2,0x10 ⁶	2,0x10 ⁶	263	1220	21,5
FAZATFZMT015	2016-2019	2,6x10 ⁶	2,0x10 ⁶	232	1214	19,1
VT_C_04	2005-2017	3,4x10 ⁶	3,0x10 ⁶	226	1447	15,6
VT_S_01	2004-2007	2,5x10 ⁵	9,5x10 ⁴	217	1526	14,3
VT_C_06	2005-2013	7,0x10 ⁵	7,0x10 ⁵	673	1593	42,3
VT_C_07	2005-2013	7,8x10 ⁵	7,8x10 ⁵	571	1593	35,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

A reserva renovável representa a variação média do volume de água no meio subterrâneo em um ano hidrológico (BOGOMOLOV e PLOTNIKOV, 1956). As taxas de recargas calculadas foram utilizadas para estimar a taxa de recarga média dos aquíferos Sabará, Cauê e Quartzito Fissural. As taxas de recarga das demais unidades aquíferas foram obtidas de Andrade (2023) e Mourão (2007). Essas taxas de recarga foram utilizadas para indicar a variação média do volume de água subterrânea em um ano hidrológico, o que representa a reserva renovável de cada unidade aquífera do Sinclinal Santa Rita (Tabela 3).

Tabela 3: Resultados de taxa de recarga e reserva renovável de cada unidade aquífera do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita.

Unidades Hidroestratigráficas	n° de bacias	Recarga (%)	Área de recarga (m ²)	Reserva renovável (m ³ /ano)
Unidade aquífera Itacolomi	1 ⁽²⁾	15 ⁽²⁾	2,1x10 ⁷	4,9x10 ⁶
Unidade aquífera Sabará	1 ⁽¹⁾	14 ⁽¹⁾	5,5x10 ⁷	1,2x10 ⁷
Unidade aquífera Gandarela	2 ⁽²⁾	18 - 45 ⁽²⁾	1,7x10 ⁷	7,3x10 ⁶
		média 28 ⁽²⁾		
Unidade aquífera Cauê	2 ⁽¹⁾	36 - 42 ⁽¹⁾	7,4x10 ⁷	4,5x10 ⁷
		média 39 ⁽¹⁾		
Unidade aquífera Quartzítica Fissural	3 ⁽¹⁾	16 - 22 ⁽¹⁾	5,7x10 ⁷	1,7x10 ⁷
		média 19 ⁽¹⁾		
Unidade aquífera Granítico-Gnáissico	1 ⁽³⁾	<30 ⁽³⁾	-	-
Fonte: Elaborado pelo autor.			Total	8,6x10 ⁷

(1) Calculado no presente trabalho;
 (2) Andrade (2023).
 (3) Mourão (2007)

O Aquífero Itacolomi possui taxa de recarga de 15% (ANDRADE, 2023). O Aquífero Sabará possui taxa de recarga semelhante com 14%. O Aquífero Gandarela possui taxa de recarga média de 28%, variando de 18 a 45% (ANDRADE, 2023). Mourão (2007) atribuiu a variabilidade da recarga dessa unidade à presença de diferentes tipos de coberturas. Ela verificou predomínio de taxas de recarga superiores a 39%. Outros autores atribuíram taxa de recarga média mais baixa para essa unidade. Meireles (2023) calculou a recarga média para 2 bacias, e obteve 17,20%. Freitas, de Paula e Antunes (2025) obteve recarga média de 16,52% para esse aquífero. Magalhães *et al.* (2022) calculou a recarga do Gandarela de 16,52% com 1 bacia. Essa variabilidade de recargas é devido ao desenvolvimento do epicarste em cada uma dessas áreas analisadas. Quanto maior a espessura do epicarste e menor quantidade de dolinas, mais lenta será a recarga comparado a áreas com epicarste menos espesso, e maior quantidade de dolinas (GALVÃO, 2015). Optou-se por seguir os dados de Andrade (2023), por esses estarem mais próximos de Mourão (2007) que calculou a recarga para uma maior quantidade de bacias.

O Aquífero Cauê possui taxa de recarga média de 39%, variando de 36 a 42%. De acordo com Costa (2017), que realizou análises de hidrógradas e balanço de massa em uma parte do Sinclinal Santa Rita, a taxa de recarga calculada para esse aquífero foi 31%. A recarga média calculada no presente trabalho está de acordo com a taxa de recarga média desse aquífero calculada com 5 bacias por Magalhães *et al.* (2022), média de 38,67%. Também está de acordo com Freitas, de Paula e Antunes (2025) que obteve taxa de recarga média de 38,47% para o Aquífero Cauê. Mourão (2007) atribui as taxas de recargas dessa unidade superiores a 39%,

com preponderâncias de taxas superiores a 44%. Em decorrência de solos menos permeáveis pode ocorrer entre 28 e 38%. Meireles (2023) calculou a recarga média desse aquífero com 4 bacias, e obteve 27,7%. Andrade (2022) obteve 26% de recarga média do Cauê com 11 bacias.

O Aquífero Quartzítico Fissural possui taxa de recarga de 19%, variando de 16 a 22%. Mourão (2007) atribuiu taxas de recargas para unidade equivalente ao Aquífero Quartzítico Fissural de 23 a 26%. Ela justifica que essas taxas de recarga são reduzidas, porque essa unidade ocorre geralmente onde há afloramentos rochosos e em terrenos de alta declividade. Meireles (2023) calculou a recarga média para essa unidade e obteve 21,36%.

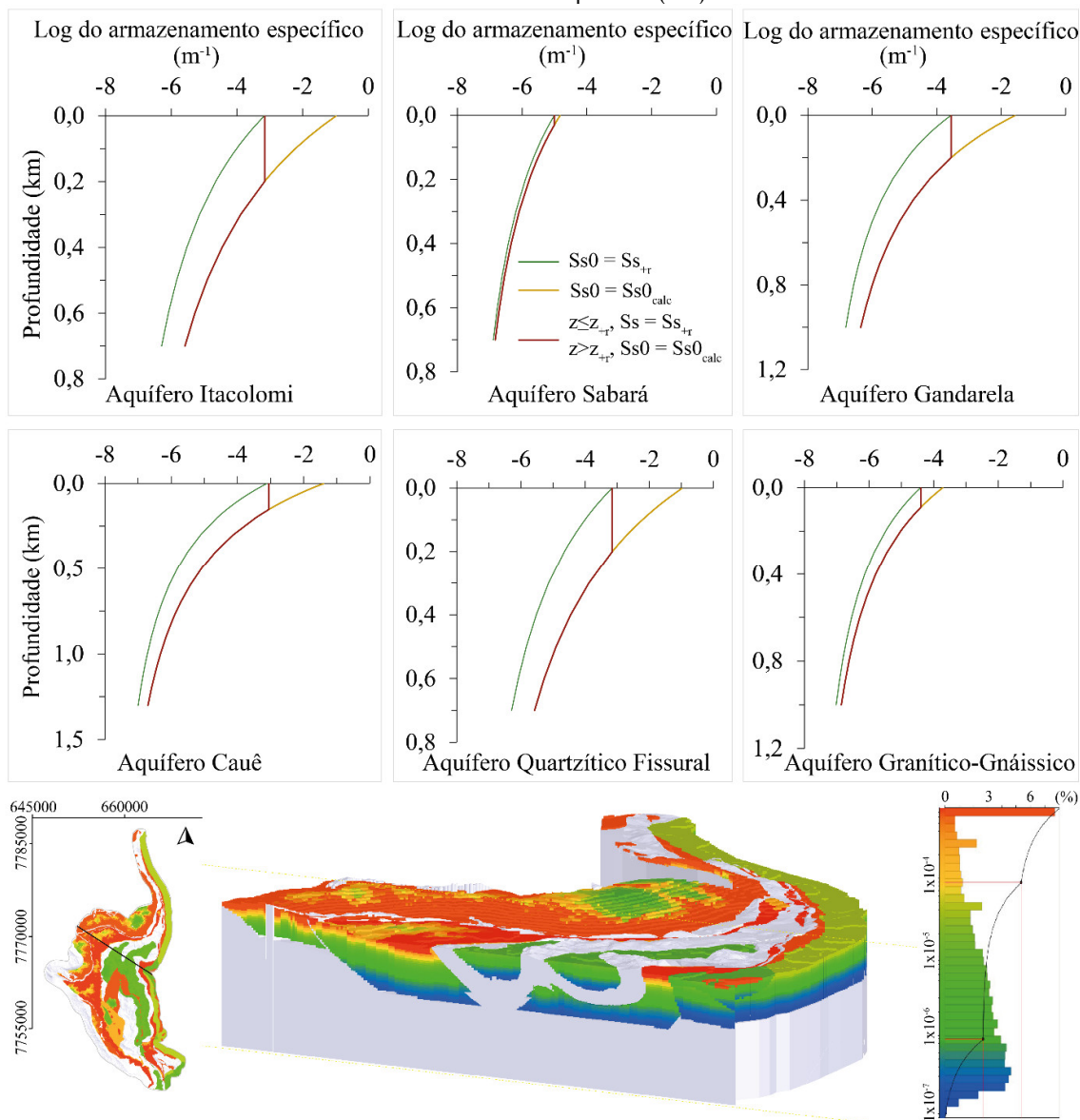
Mourão (2007) atribuiu taxas de recargas inferiores a 30% à unidade equivalente ao Aquífero Granítico-Gnaisse.

A reserva renovável do Sinclinal Santa Rita calculada é $8,6 \times 10^7$ m³/ano. Esse volume é o suficiente para abastecer 2,1 milhão de pessoas, 15 vezes a população local de Mariana e Ouro Preto (IBGE, 2023).

4.2 Reserva permanente

A reserva permanente foi calculada a partir da definição operacional de armazenamento específico que é o volume de água liberado ou adicionado por uma unidade de volume de um aquífero devido a um decréscimo ou aumento unitário de carga hidráulica (BEAR, 1979). A variação desse armazenamento com a profundidade foi testada de três formas. Na primeira forma, o armazenamento específico conhecido (S_{s+r}) foi considerado igual ao armazenamento na superfície (S_{s0}). O resultado obtido indicou um armazenamento subestimado em profundidade. Na segunda forma, foi calculado o armazenamento específico na superfície a partir da equação 11 ($S_{s0}=S_{s0_{calc}}$). O resultado obtido indicou que o armazenamento específico próximo à superfície foi superestimado. Na terceira forma, foi considerado ($S_s=S_{s+r}$) para profundidades menores que a profundidade (z_{+r}), e ($S_{s0}=S_{s0_{calc}}$) para profundidades maiores que (z_{+r}). Essa forma foi considerada a mais representativa da variação do armazenamento com a profundidade (equação 12) (Figura 6).

Figura 6: Gráficos da variação do armazenamento específico com a profundidade de cada unidade, e modelo de blocos do armazenamento específico do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita, com histograma de frequência de armazenamento específico (m^{-1}).



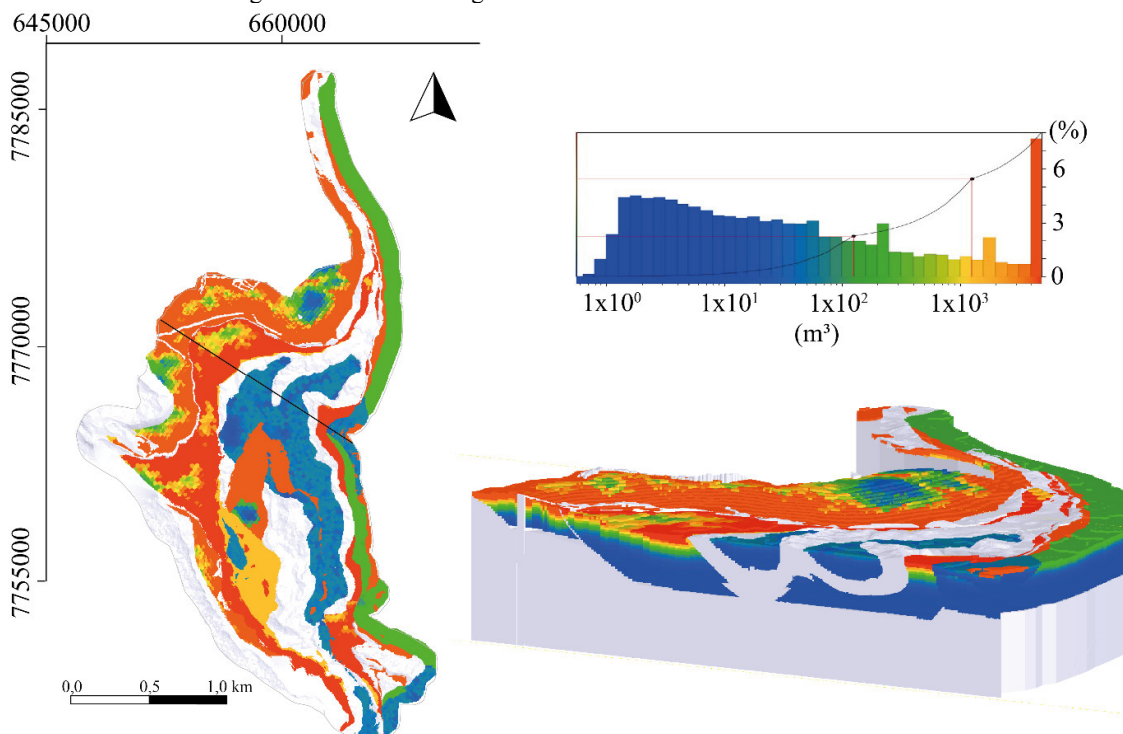
Fonte: Elaborado pelo Autor.

O armazenamento específico do Aquífero Itacolomi varia de 10^{-3} a $10^{-6} m^{-1}$ com o aumento da profundidade. O armazenamento específico do Aquífero Sabará varia de 10^{-5} a $10^{-7} m^{-1}$ de acordo com a profundidade. O Aquífero Gandarela é um aquífero cárstico fissural. O modelo de Kuang *et al.* (2021) não prevê a formação de condutos cársticos próximos à superfície. O presente estudo, considerou esse método aplicável para esse aquífero, por ele se estender até 1000 metros de profundidade, e a influência de condutos e cavernas ser menor em profundidades maiores. O armazenamento específico do Aquífero Gandarela considerado varia

de 10^{-7} a 10^{-3} m^{-1} . O Aquífero Cauê possui variação do armazenamento específico com a profundidade de 10^{-7} a 10^{-3} m^{-1} . O armazenamento específico do Aquífero Quartzítico Fissural varia de 10^{-3} a 10^{-6} m^{-1} com a profundidade. O armazenamento específico do Aquífero Granítico-Gnáissico varia de 10^{-4} a 10^{-7} m^{-1} com o aumento da profundidade.

Há no Sinclinal Santa Rita, uma maior frequência de armazenamentos específicos maiores, porque os aquíferos Itacolomi, Quartzítico Fissural e Cauê possuem armazenamentos específicos maiores próximos à superfície, e juntos ocupam 68% da área do sinclinal. Esse armazenamento decresce com a profundidade, mas há um aumento da quantidade de blocos em profundidade com armazenamentos específicos menores, consequentemente, a frequência de armazenamentos específicos menores volta a aumentar. Outra contribuição são os armazenamentos específicos mais baixos do Aquífero Sabará que ocorrem na porção central do sinclinal. Essa distribuição de armazenamentos específicos direcionou o cálculo da reserva permanente do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita (Figura 7).

Figura 7: Modelo de blocos do volume armazenado de água do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita, com histograma de volume de água armazenada em cada bloco de 125.000 m^3 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os aquíferos Cauê e Quartzítico Fissural possuem o maior volume de água armazenada, com 86% do total de água armazenada do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita. Esses dois

aquíferos possuem quantidade semelhante de água armazenada, e concentram os maiores volumes próximos à superfície. A Tabela 4 apresenta o volume de água armazenada em cada aquífero, o volume total dos aquíferos e o percentual médio de água armazenada neles.

Tabela 4: Resultados do volume total do aquífero, volume de água armazenada no aquífero, e percentual de armazenamento de água médio.

Unidades aquíferas	Volume total do aquífero (m ³)	Volume de água armazenada (m ³)	Armazenamento de água médio (%)
Aquífero Itacolomi	2,8x10 ⁹	8,0x10 ⁷	2,87
Aquífero Sabará	2,1x10 ¹⁰	3,0x10 ⁶	0,01
Aquífero Gandarela	1,5x10 ¹⁰	6,3x10 ⁷	0,41
Aquífero Cauê	1,2x10 ¹¹	4,8x10 ⁸	0,40
Aquífero Quartzítico Fissural	5,2x10 ¹⁰	4,6x10 ⁸	0,87
Aquífero Granítico-Gnáissico	3,7x10 ¹⁰	1,3x10 ⁷	0,03
Total	2,5x10 ¹¹	1,1x10 ⁹	0,44

Fonte: Elaborado pelo autor.

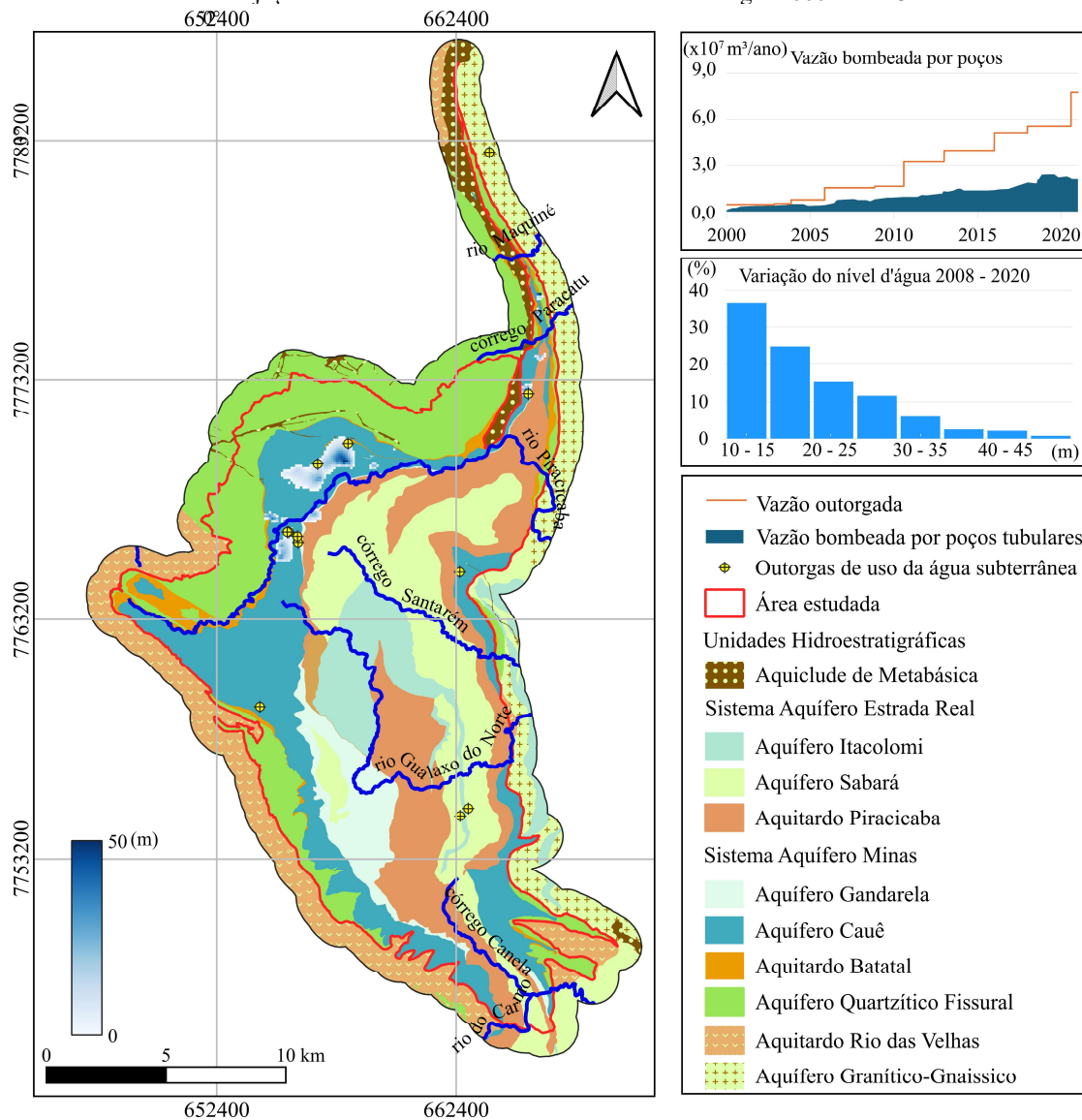
O Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita possui 1,1x10⁹m³ de água armazenada na reserva permanente. Silva, Neto e Bertachini (1994) calcularam a reserva explorável, que é parte da reserva permanente mais a reserva renovável, para parte das unidades aquíferas do Quadrilátero Ferrífero como um todo: Aquífero Cauê; unidade Cercadinho que compõe o aquífero Piracicaba, e unidade Moeda que compõe o Aquífero Quartzítico Fissural. Eles obtiveram 5x10⁹ m³ de água para a reserva explorável do Quadrilátero Ferrífero. A estimativa desses autores da água explorável levou em conta a disponibilidade de exploração da água por poços perfurados na época. Não foi considerado que a exploração da reserva permanente leva em consideração evitar efeitos indesejados (CONKLING, 1946). Mas esse volume pode ser comparado com o volume da reserva permanente calculado no presente estudo, porque o método usado no cálculo desses autores foi semelhante ao empregado no presente estudo. De acordo com Silva, Neto e Bertachini (1994), a área do Sinclinal Santa Rita representa 15% da área do Quadrilátero Ferrífero. Dessa forma, a reserva explorável do Sinclinal Santa Rita, calculada por Silva, Neto e Bertachini (1994), representa 7,6x10⁸ m³. Esse volume é 69% da reserva hídrica permanente do Sinclinal Santa Rita calculada no presente trabalho.

4.3 Reserva explotada

Na porção setentrional, há uma relevante quantidade de dados de nível d'água por instrumentos de indicadores de nível d'água e piezômetros, o que possibilitou avaliar a diferença de nível d'água de 2020 em relação ao período mais antigo com boa quantidade de dados, 2008. Quando analisado, a diferença da potenciometria do nível d'água desses anos, é verificado que na maior parte da área, 98,3% dessa, não houve variação do nível d'água. Apenas variações superiores a 10 metros foram consideradas devido a escala regional do trabalho.

Em 5,0 km², houve uma variação do nível d'água de 10 a 50 metros, com 61,6% dessa variação entre 10 e 20 metros, e menos de 3% com variações superiores a 40 metros. Essa variação do nível d'água de 10 a 50 metros, ocorreu em 1,7% da área do Sinclinal Santa Rita, o que indica que o rebaixamento ocorreu de forma localizada. A maior parte dessa variação do nível d'água ocorreu na área aflorante do Aquífero Cauê (Figura 8). Essa variação local do nível d'água no Aquífero Cauê foi prevista por Costa (2017) através de simulação de um modelo numérico hidrogeológico. Nessa simulação, foi previsto, para 2020, a variação do nível d'água de 5 a 20 metros a sul da Serra do Caraça, na área do Aquífero Cauê. Os dados observados de 2020 indicam que a simulação foi assertiva em sua previsão. De acordo com Carneiro (2013), é esperado uma variação maior do nível d'água nessa mesma localidade, com esse alcançando a cota de até 700 metros. Atualmente o nível d'água dessa localidade está entre as cotas 900 e 1000 metros.

Figura 8: Mapa de dimensionamento da variação do nível d'água de 2008 a 2020, com gráfico da vazão bombeada e vazão outorgada, e histograma de frequência de variação do nível d'água entre 2008 e 2020. Sistema de Projeção Transversa de Mercator – UTM. Datum: Sirgas 2000 zona 23S.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa variação do nível d'água sobre a reserva permanente é devido a uma exploração que supera a manutenção da reserva renovável nas localidades representadas na Figura 8. Entre o período de 2008 a 2020, o volume de água retirado da reserva permanente do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita foi $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3$, e o Aquífero Cauê foi o mais influenciado pela exploração dessa reserva (Tabela 5). Em 2008, o volume de água subterrânea bombeado na região era em torno de $8,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Até 2020, esse total aumentou 2,5 vezes, para cerca de

$2,2 \times 10^7$ m³/ano, dentro dos limites do volume outorgado para uso da água subterrânea. Essa vazão é metade da reserva renovável do Aquífero Cauê no Sinclinal Santa Rita, $4,5 \times 10^7$ m³/ano

Além disso, a vazão média bombeada em 2020 corresponde a 28,3% da vazão outorgada de $7,7 \times 10^7$ m³/ano, que, em sua quase totalidade, está no Aquífero Cauê. Isso indica que a concessão de uso da água subterrânea é superior à reserva renovável do Sinclinal Santa Rita, e localmente há extração de água subterrânea da reserva renovável e parte da reserva permanente. Mas de modo geral, essa extração está dentro do volume estimado de reserva renovável.

Tabela 5: Resultados do volume da reserva permanente das unidades influenciadas pelo bombeamento de água subterrânea, volume de água explorada e percentual de água explorada.

Unidades aquíferas	Volume da reserva permanente (m ³)	Volume de água explorada (m ³)	Percentual de água explorada (%)
Aquífero Gandarela	$6,3 \times 10^7$	$1,5 \times 10^4$	0,024
Aquífero Cauê	$4,8 \times 10^8$	$1,3 \times 10^6$	0,274
Aquífero quartzítico fissural	$4,6 \times 10^8$	$9,4 \times 10^3$	0,002
Total	$9,9 \times 10^8$	$1,3 \times 10^6$	0,134

Fonte: Elaborado pelo autor.

O volume de água explorado da reserva permanente do Aquífero Cauê no período de 2008 a 2020 representa 0,274% da reserva permanente dessa unidade. O volume total explorado, no mesmo período, da reserva permanente do Sinclinal Santa Rita representa 0,134% da reserva permanente desse como um todo. De um ponto de vista regional, esse volume é pequeno, mas do ponto de vista local, é necessária uma atenção à gestão hídrica desse recurso.

Principalmente, porque há uma tendência de aumento da vazão bombeada no Sinclinal Santa Rita, a qual, mesmo sendo a metade da reserva renovável do Aquífero Cauê, foi suficiente para provocar a exploração parcial da reserva permanente dessa unidade.

Além disso, as vazões outorgadas aumentaram de 2000 a 2020 em um fator de 15 vezes. Enquanto as vazões bombeadas aumentaram pela metade desse fator. Dessa forma, a implantação da estrutura não acompanhou a concessão ao bombeamento da água subterrânea.

4.4 Entradas e saídas d'água laterais

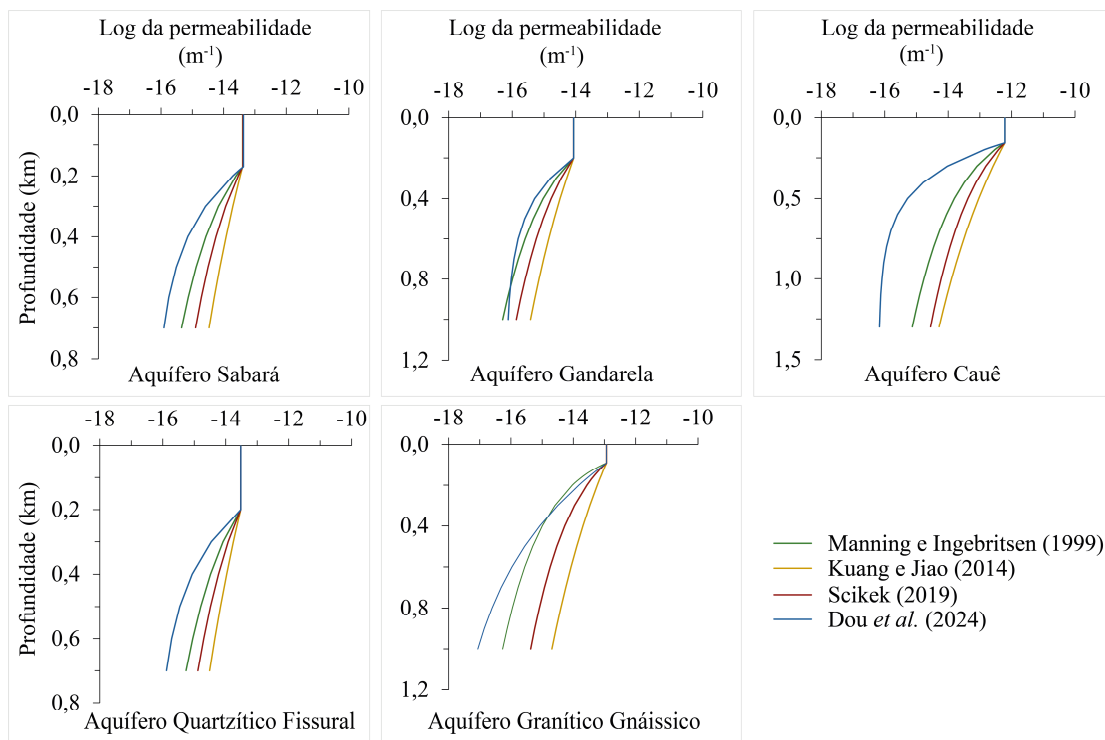
As entradas e saídas d'água laterais foram estimadas nas condições de contorno tipo 3 definidas por Ladeira *et al.* (2025). Essas entradas representam a recarga alóctone que é o volume de água que entra no sistema aquífero lateralmente através do escoamento subterrâneo

por um intervalo de tempo. Essa recarga é uma recarga complementar à recarga autóctone que foi estimada pela reserva renovável no presente estudo. As saídas de água laterais representam parte do volume que sai do sistema aquífero pelo escoamento subterrâneo. Esse volume é complementar ao fluxo de base dos cursos d'água que representam uma saída da água subterrânea para o escoamento superficial na área estudada (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983).

As entradas e saídas laterais de água no Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita ocorreram ao longo da Falha Água Quente, que representa o contato do Sistema Aquífero Minas com o Aquífero Granítico Gnáissico, e sob o rio do Carmo, onde não há contato entre aquíferos distintos, mas o fluxo da água subterrânea converge em direção ao rio, e abastece esse.

Foram empregados quatro métodos diferentes para estimar essas entradas e saídas laterais de água. Os métodos de Manning e Ingebritsen (1999), Kuang e Jiao (2014), Scibek (2019), Dou *et al.* (2024) estimaram a variação da permeabilidade das unidades aquíferas com a profundidade. A Figura 9 apresenta a variação da permeabilidade com a profundidade em cada um desses métodos para as unidades aquíferas presentes nas condições de contorno tipo 3 do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita. Essas unidades aquíferas são os aquíferos Granítico Gnáissico, Quartzítico Fissural, Cauê, Gandarela e Sabará.

Figura 9: Gráficos da variação da permeabilidade com a profundidade das cinco unidades presentes nas condições de contorno tipo 3 do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

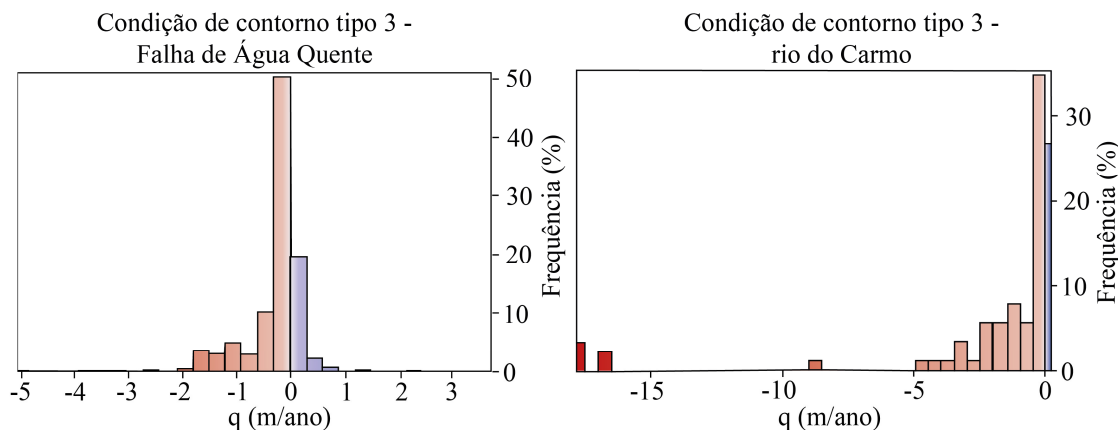
O modelo de Kuang e Jiao (2014) foi o modelo que apresentou a menor variabilidade da permeabilidade com a profundidade em todas as unidades aquíferas analisadas, seguido pelo modelo de Scikek (2019). O modelo de Dou *et al.* (2014) foi o modelo que apresentou a maior variabilidade da permeabilidade com a profundidade, com exceção do Aquífero Gandarela no qual o modelo de Manning e Ingebritsen (1999) indicou a menor permeabilidade na maior profundidade do aquífero a 1000 metros.

O Aquífero Sabará possui permeabilidades que variam de 10^{-13} a $10^{-16} m^{-1}$ com o aumento da profundidade. O Aquífero Gandarela possui permeabilidades que variam de 10^{-14} a $10^{-16} m^{-1}$ com a profundidade. O Aquífero Cauê possui permeabilidades que variam de 10^{-12} a $10^{-16} m^{-1}$ com a profundidade. Carneiro, Marques e Costa (2015) estimaram a variação da condutividade hidráulica com a profundidade nas rochas do Aquífero Cauê em zonas não falhadas. Eles afirmam que a condutividade permanece constante nas rochas desse aquífero até 400 metros de profundidade, devido ao grau de fraturamento das rochas permanecer homogêneo até essa profundidade. O modelo que melhor representa essa constância para essa unidade aquífera em zonas não falhadas é o de Kuang e Jiao (2014).

O Aquífero Quartzítico Fissural possui permeabilidades que variam de 10^{-13} a 10^{-16} m^{-1} com a profundidade. O Aquífero Granítico Gnáissico possui permeabilidades que variam de 10^{-13} a 10^{-17} m^{-1} com a profundidade.

Essa estimativa da variação da permeabilidade com a profundidade foi fundamental para o cálculo da velocidade de fluxo aparente nas condições de contorno tipo 3 pela lei de Darcy (1856). A Figura 10 apresenta dois histogramas das velocidades de fluxo aparente calculadas pelo modelo de blocos das condições de contorno do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita, ao longo da Falha de Água Quente e sob o rio do Carmo. Esses resultados apresentados consideram a variação da permeabilidade com a profundidade pelo modelo de Kuang e Jiao (2014).

Figura 10: Histograma das velocidades de fluxo aparente nas condições de contorno tipo 3 do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita, ao longo da Falha de Água Quente e sob o rio do Carmo. Velocidades calculadas a partir do modelo de variação da permeabilidade com a profundidade de Kuang e Jiao (2014).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao longo da Falha de Água Quente, predominaram fluxos de saída da água subterrânea. As velocidades da água tanto nas frentes de saída quanto de entrada da água subterrânea estão em sua maioria abaixo de 1 m/ano. Em contrapartida, na condição de contorno sob o rio do Carmo, a saída da água predomina mais em relação à entrada de água, e as velocidades da água podem atingir até 17 m/ano. Essa diferença na velocidade de fluxo nessas duas condições de contorno é devido a dois fatores. A permeabilidade no núcleo de falha é até três ordens de magnitude menor que em zonas não falhadas (SCIBEK, 2019). Por isso, no contato entre o Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita e o Aquífero Granítico-Gnáissico, optou-se por utilizar a permeabilidade da unidade aquífera menos permeável no cálculo. O outro fator é que o rio do Carmo é uma zona de descarga da água subterrânea para o escoamento superficial. As Tabela

6 e Tabela 7 apresentam as vazões registradas de saída, entrada e resultante para cada uma dessas condições de contorno tipo 3.

Tabela 6: Resultados da vazão de saída, vazão de entrada e vazão resultante na condição de contorno tipo 3 ao longo da Falha de Água Quente.

Método	Vazão de saída (m ³ /ano)	Vazão de entrada (m ³ /ano)	Resultante (m ³ /ano)
Manning e Ingebritsen (1999)	-4,5x10 ⁶	6,4x10 ⁵	-3,9x10 ⁵
Kuang e Jiao (2014)	-6,0 x10 ⁶	1,0x10 ⁶	-5,0x10 ⁶
Scibek (2019)	-5,0 x10 ⁶	7,6x10 ⁵	-4,2x10 ⁶
Dou <i>et al.</i> (2024)	-3,8 x10 ⁶	5,3x10 ⁵	-3,3x10 ⁶

Fonte: Elaborado pelo autor.

As vazões de saída e entrada ao longo da condição de contorno tipo 3 da Falha de Água Quente ficam na mesma ordem de grandeza, variando de -3,8x10⁶ a -6,0x10⁶ m³/ano para a saída, e 5,3x10⁵ a 1,0x10⁶ m³/ano para a entrada. As vazões de saída da água subterrânea representam de 6 a 7,2 vezes o volume correspondente de entrada. Dessa forma, o volume de água resultante que atravessa essa condição de contorno é a saída de -3,3x10⁶ a -5,0x10⁶ m³/ano.

Tabela 7: Resultados da vazão de saída, vazão de entrada e vazão resultante na condição de contorno tipo 3 ao longo do rio do Carmo.

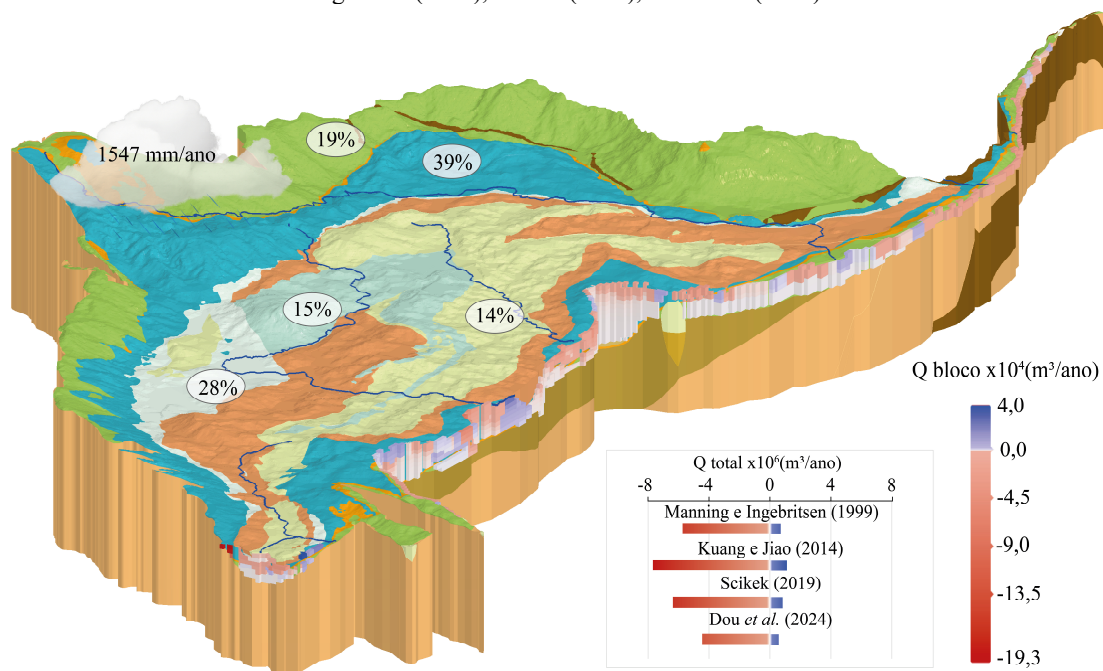
Método	Vazão de saída (m ³ /ano)	Vazão de entrada (m ³ /ano)	Resultante (m ³ /ano)
Manning e Ingebritsen (1999)	-1,4x10 ⁶	3,5x10 ³	-1,4 x10 ⁶
Kuang e Jiao (2014)	-1,7 x10 ⁶	1,4x10 ⁴	-1,7 x10 ⁶
Scibek (2019)	-1,5 x10 ⁶	7,2x10 ³	-1,5 x10 ⁶
Dou <i>et al.</i> (2024)	-6,7 x10 ⁵	6,0x10 ⁰	-6,7 x10 ⁵

Fonte: Elaborado pelo autor.

As vazões de saída e entrada ao longo da condição de contorno tipo 3 do rio do Carmo são menores que as respectivas vazões ao longo da condição do contorno da Falha de Água Quente. A vazão de saída estimada varia de -6,7x10⁵ a -1,7x10⁶ m³/ano para a saída, e alcançam até 1,4x10⁴ m³/ano para a entrada. A razão de saída para entrada de água nessa condição de contorno é superior a 120 vezes. Dessa forma, o volume de água resultante que atravessa essa condição de contorno é predominantemente a saída de -6,7 x10⁵ a -1,7x10⁶ m³/ano.

As entradas e saídas das condições de contorno tipo 3 ao longo da Falha de Água Quente e sob o rio do Carmo foram comparadas à recarga autóctone, e são apresentadas na Figura 11.

Figura 11: Modelo de blocos das condições de contorno tipo 3 do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita, ao longo da Falha de Água Quente e sob o rio do Carmo, com a vazão de entradas e saídas de água (Q) pelo modelo de Kuang e Jiao (2014). Gráfico comparativo dos resultados dos métodos de Manning e Ingebritsen (1999), Kuang e Jiao (2014), Scikek (2019), Dou *et al.* (2024).



Legenda

- | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| ■ Aquiclude de Metabásica | Sistema Aquífero Minas | ■ Não Aquífero Quartzítico Fissural |
| ■ Sistema Aquífero Estrada Real | ■ Aquífero Gandarela | ■ Aquífero Rio das Velhas |
| ■ Aquífero Itacolomi | ■ Aquífero Cauê | — Hidrografia |
| ■ Aquífero Sabará | ■ Aquífero Batatal | ○ Taxa de infiltração média |
| ■ Aquífero Piracicaba | ■ Aquífero Quartzítico Fissural | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação às vazões que atravessam cada unidade aquífera, os aquíferos Sabará e Gandarela possibilitam a troca da água subterrânea apenas ao longo da condição de contorno tipo 3 do rio do Carmo. Esses dois aquíferos têm pouca influência na troca de água através dessa condição de contorno, por eles possibilitarem a saída de $-1,4 \times 10^4$ e $-1,8 \times 10^3$ m³/ano, respectivamente, e não possibilitarem a entrada de água. Além disso, as vazões de entrada e saída através desses aquíferos tiveram o mesmo resultado pelos quatro métodos, por eles serem relativamente rasos nessa fronteira.

Os aquíferos Cauê e Quartzito Fissural têm papéis mais relevantes na troca de água nas duas fronteiras da condição de contorno tipo 3. Sob o rio do Carmo, 97 a 99% da saída de água ocorre através do Aquífero Cauê, sendo esse o principal aquífero que possibilita a saída de água nessa fronteira. A entrada de água através dessa condição de contorno é muito baixa, inferior a $1,4 \times 10^4$ m³/ano. Ao longo da Falha de Água Quente, a maior parte da água sai através do

Aquífero Quartzítico Fissural. A vazão de saída através dessa unidade varia de 50 a 70% do total da saída nessa fronteira. Enquanto a entrada de água ocorre principalmente através do Aquífero Cauê. A vazão de entrada através dessa unidade varia de 74 a 81% do total de entrada nessa condição de contorno.

Dessa forma, as saídas de água pelo escoamento subterrâneo ocorrem principalmente através do Aquífero Cauê na fronteira do rio do Carmo, e através dos contatos dos aquíferos Cauê e Quartzítico Fissural com o Aquífero Granítico Gnáissico ao longo da Falha de Água Quente. Enquanto as entradas da água subterrânea ocorrem principalmente entre o contato do Aquífero Cauê com o Aquífero Granítico Gnáissico. Isso se deve a esse segundo contato representar o fluxo local que predomina entradas de água no Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita. O contato do Aquífero Quartzítico Fissural com o Aquífero Granítico-Gnáissico é frequentemente mais profundo, e representa o fluxo regional de saída de água desse sistema. Por isso, ocorre elevada saída de água do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita através desse contato.

As vazões resultantes, tanto da fronteira do rio do Carmo, quanto da Falha de Água Quente, são de $-4,0 \times 10^6$ a $-6,6 \times 10^6$ m³/ano, cerca de 4,6 a 7,7% da reserva renovável de $8,6 \times 10^7$ m³/ano. Entende-se que os demais volumes de 92,3 a 95,4% da reserva renovável saem do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita através da influência da água subterrânea no escoamento de base dos cursos d'água, e do bombeamento de poços. Como o sistema não está em equilíbrio, porque ocorre perda do volume da reserva geológica por parte da vazão dos poços de bombeamento, estima-se que o escoamento de base da saída de água do Sinclinal Santa Rita por cursos d'água, seja no mínimo a diferença da vazão bombeada em 2020 pelos 92,3% da reserva renovável. Dessa forma, a vazão mínima de fluxo de base dos cursos d'água é $5,7 \times 10^7$ m³/ano, o que representa 72,3% da reserva renovável.

5 CONCLUSÃO

A reserva renovável do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita representa a manutenção do aquífero. Ela foi estimada em $8,6 \times 10^7$ m³/ano, volume 15 vezes necessário para abastecer a população dos municípios de Ouro Preto e Mariana no qual a área estudada está inserida. Esse volume também é relevante para a manutenção dos cursos d'água perenes, essenciais para o sustento da fauna e flora, e demais usos antrópicos.

A reserva permanente desse sistema aquífero foi estimada em $1,1 \times 10^9$ m³. Parte desse volume foi extraído do meio subterrâneo no período de 2008 a 2020, cerca de $1,3 \times 10^6$ m³. Isso indica que esse sistema aquífero está em regime transiente, o que representa um ponto de atenção para a gestão hídrica desse recurso. Ainda mais que o Aquífero Cauê é o mais influenciado por essa retirada. Apesar do volume bombeado ser menor que a metade da reserva renovável desse aquífero, ele foi suficiente para extrair a água subterrânea da reserva subterrânea em escala local. Além disso, houve um aumento mais acentuado da vazão outorgada em relação a vazão bombeada de 2000 a 2020. Nesse último ano, a vazão outorgada superou em duas vezes o volume de manutenção do Aquífero Cauê.

A estimativa da vazão de entrada e saída lateral desse sistema pelo escoamento subterrâneo indicou uma fração de 4,6 a 7,7% da reserva renovável, $-4,0 \times 10^6$ a $-6,6 \times 10^6$ m³/ano. O processo principal de descarga da água subterrânea é pela influência da água subterrânea nos cursos d'água do sinclinal. A vazão dessa saída é no mínimo $5,7 \times 10^7$ m³/ano, o que representa 72,3% do total de água que sai desse sistema.

Não foi possível calcular o balanço de massa desse sistema, porque faltaram informações da vazão dos cursos d'água principais na saída do sinclinal. A partir desses dados é possível estimar a descarga da água subterrânea nos cursos d'água, e fechar um balanço de massa do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita. Recomenda-se a execução desse estudo, para suporte às tomadas de decisão da gestão dos recursos hídricos.

6 MATERIAL SUPLEMENTAR

O Apêndice B apresenta para cada estação fluviométrica, as coordenadas, a quantidade de aquíferos na área da bacia hidrográfica, o período de monitoramento e o período de monitoramento sem interferência antrópica, para interpretação da reserva renovável.

O Apêndice C apresenta os gráficos de vazão dos cursos d'água analisados e da pluviometria média regional de Thiessen.

O Apêndice D apresenta a aplicação do cálculo da reserva permanente do Sinclinal Santa Rita no modelo de blocos do Leapfrog Geo.

O Apêndice E apresenta a aplicação do cálculo de entradas e saídas d'água laterais do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita no modelo de blocos do Leapfrog Geo.

7 AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) e a Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) pela parceria com o Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) no projeto “Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológica a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero, com foco na região do Sinclinal Moeda, MG”, e pela disponibilização dos dados necessários para a execução dessa pesquisa pelo portal do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM).

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGEOL) do Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo apoio institucional à pesquisa; à Bentley Systems, Inc. por disponibilizar licença estudantil do software Leapfrog Geo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90:29–58.

Anderson M.P. Woessner W.W. Hunt R.J. 2015. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. San Diego, Academic Press, 2 ed., 630 p.

Andrade I.B. 2023. 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), Programa de pós-graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 114 p.

Beato D.A.C., Monsoreo A.L.M., Bertachini A.C. 2005. Hidrogeologia. In: Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: Área de Proteção Ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte, CPRM/SEMAD. Texto explicativo, 8 v. 116 p.

Bear J. 1979. *Hydraulics of groundwater*. New York, McGraw-Hill, 596 p.

Bogomolov G.V. & Plotnikov N.A. 1956. Classification des ressources d'eau souterraines et évaluation de leurs reserves. In: Symposia Darcy, Dijon, International Association Scientific Hydrology Publication, n. 41, p. 263-271.

Brasil. 1997. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 08 jan. 1997.

Cândido M.O., Beato D.A.C., Fiume B., Scudino P.C.B., Carneiro F.A., Nascimento F.M.F., Coutinho, M.M., Almeida C.S.C., Socorro A.S., Santana M.S., *et al.* 2019. Relatório de integração. Projeto Águas do Norte de Minas – PANM: Estudo da disponibilidade hídrica subterrânea do Norte de Minas Gerais. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

Carneiro S.R.C. 2013. *Caracterização mecânica e hidrogeológica dos maciços das cavas de Alegria Centro e Sul, Samarco Mineração S.A.*. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 199 p.

Carneiro S.R.C. Marques E.A.G. Costa J.P.C. 2015. Evaluation of Hydraulic Conductivity of Itabirites of the Alegria Centro and Alegria Sul Open Pits, Samarco Mineração S.A., Minas Gerais State, Brazil. *Mine Water and a Environment*, 35:136-144.

Carvalho C.G., Silva J.M., Curi A., Flores J.C.C. 2012. A dependência da arrecadação do município de Ouro Preto do setor mineral. *Revista Escola de Minas*, 65(3):385-392.

Castany G. 1967. *Traité pratique des eaux souterraines*. Paris, Dunod, 2ed., 661 p.

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. 1988. *Applied hydrology*. McGraw-Hill Book Company, 571p.

- Conkling H. 1946. Utilization of groundwater storage in stream system development. *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, 111:275-305.
- Costa W.D. 1998. Avaliação de Reservas, Potencialidade e Disponibilidade de Aquífero. In: ABAS, 10º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Paulo, Brasil. Anais... p. 1-11.
- Costa J.P.C. 2017. *Numerical groundwater flow modeling applied to dewatering prediction of Cauê aquifer in Alegria mine, east of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia), Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 117 p.
- Custódio E. & Llamas M.R. 1983. *Hidrologia Subterrânea*. Barcelona, Ed. Omega, 2. ed., v. 1, 1157 p.
- Dantas J.C.M., Mesquita D.C., de Paula S.R., Guerra, K.J. 2018. Correlação entre dados de perfilagem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Águas Subterrâneas*, 32(1):140-153.
- Darcy H. 1856. *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 ed., 659 p.
- Domenico P.A., Schwartz F.W. 1997. *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York, John Wiley & Sons, 2ed., 528 p.
- Dorr J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Washington, DC, Geological Survey Professional Paper. (Relatório 641-A).
- Dou Z., Huang X., Wan W., Zeng F. Wang C. 2024. Development and application of a new exponential model for hydraulic conductivity with depth of rock mass. *Water*, 16: 1-19.
- Endo I., Galbiatti H.F., Delgado C.E.R., Freire de Oliveira M.M., Zapparoli A.C., de Moura L.G.B., Peres G.G., Henrique de Oliveira A.H., Zavaglia G., Danderfer F.A., Gomes C.J.S., Carneiro M.A., Nalini Júnior H.A., Castro P.T.A., Suita M.T.F., Tazava E., Lana C.C., Martins-Neto M.A., Martins M.S., Ferreira F.F.A., Franco A.P., Almeida L.G., Rossi D.Q., Angeli G., Madeira T.J.A., Piassa L.R.A., Mariano D.F., Carlos D.U. 2019. *Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Ouro Preto, Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Escala 1:150.000.
- Feitosa F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa E.C., Demétrio J.G.A. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 3 ed., 812 p.
- Fernandes R.C., Roncato J., Paula R.S. 2023. Structural model and features of the world-class Cuiabá orogenic gold deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero region, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 123:1-25.

Fiume B. (coord), Nascimento F.M.F., Miranda J.S.N., de Paula T.L.F. 2022. *Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero*. Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil. 1 mapa. Escala 1:100.000.

Freeze R.A., Cherry J.A. 1979. *Groundwater*. Eaglewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc. 1ed., 624 p.

Freitas A.R., Paula R.S., Antunes I.M.H.R. 2025. Water Resources Availability on a River Watershed in a Relevant Mineral Province (Minas Gerais, Brazil): An Integrated Approach to Water Resources Management. *Water*, 17(4): 1-25. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w17040532>. Acesso em: 16 de março de 2025.

Galvão P.H.F. 2015. *Hydrogeological conceptual model of Sete Lagoas (MG) and associated implications of urban development in karst region*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 136.

Google Earth. 2025. Localização: Sinclinal Santa Rita, MG. Imagem de satélite: dez. 2020; dez. 2016; dez. 2012; dez. 2008; dez. 2004; dez. 2000. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em 12 mar. 2025.

Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema). 2023. Hidrografia, localidades e limites. Belo Horizonte. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 01 dez. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2023. Censo 2022: População e domicílios - primeiros resultados - atualizado em 22/12/2023. Rio de Janeiro, IBGE. Dados de 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). 2011. *Advances Land Observing Satellite The Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR)*. Imagem de satélite. Radar de Abertura Sintética em Banda L. Datas de Aquisição: 16 de março e 15 de fevereiro de 2011. Resolução espacial: 12,5 metros. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 16 de dezembro de 2023.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). 2020. Banco de dados meteorológico – Estações A513 – Dados de 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 27 mar. 2024.

Köppen W. 1948. *Climatologia: con un estudio de los climas de la Tierra*. México, Fondo de Cultura Económica, 479 p.

Kuang X. & Jiao J.J. 2014. An integrated permeability-depth model for Earth's crust. *Geophysical Research Letters*, 41:7539-7545.

Kuang X., Zheng C., Jiao J.J., Cherry J.A., Chen J. 2021. An empirical specific storage-depth model for the Earth's crust. *Journal of Hydrology*, 592:1-10.

Ladeira B.P, Moreira, A.C.T., Verteiro, I.M., Macedo, V.G., Tavares I.S., Reis L.A., Vidal T.A.V., Moreira D.S., Galvão P.H.F., de Paula R.S. 2025. O relevante potencial de produção da água subterrânea do sinclinal Santa Rita, Quadrilátero Ferrífero, Brasil. *Journal of Hydrology*, Submitted.

Lyne V. & Hollick M. 1979. Stochastic Time-Variable Rainfall-Runoff Modeling. In: Institute of Engineers Australia National Conference, Org. Institute of Engineers Australia National Conference. p. 89– 93.

Magalhães C.C.C., Melo M.C., Guiguer N., de Paula R.S. 2022. The Cauê Aquifer on the eastern limb of Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in an area west of Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 52, n. 4, p. 1-19. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220005>. Acesso em: 25 mar. 2024.

Manning C.E., Ingebritsen S.E. 1999. Permeability of the continental crust: Implications of geothermal data and metamorphic systems. *Reviews of Geophysics*, 37(1):127-150.

Mattiuzi C.D.P., Marques G.F. 2019. Gestão integrada dos recursos hídricos: Avaliação dos benefícios do uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas em uma região no sul do Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, 33(4):340-353.

Meireles L.M.F. 2023. *Balço hídrico e análise de fluxo da junção homoclinal Curral e sinclinal Moeda*. Monografia (graduação em Geologia), Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 167 p.

Mesquita D.C., Dantas J.C.M., de Paula R.S., Guerra, K.J. 2017. Estudo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de campo em itabiritos brandos da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Geonomos*, 25(2):12-19.

Mourão M.A.A. 2007. *Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 287 p.

Nathan R.J., McMahon T.A. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. *Water resources research*, 26(7):1465-1473.

Paula S.R., Mesquita, D.C., Dantas J.C.M., Guerra, K.J. 2018. Caracterização hidroquímica e isotópica das águas, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no município de Congonhas-MG, e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema. *Revista Águas Subterrâneas*, 32(1):140-153.

Pinto L.V.A. 2003. *Caracterização física da sub-bacia do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG, e propostas de recuperação de suas nascentes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 165 p.

Plotnikov N.A. 1962. *Ressources en eaux souterraines: Classification et méthodes d'évaluation*. Paris, Gauthier Villars, 194 p.

Roncato J., Barbosa L.S., Ribeiro G.H., Mendes K.F., Carvalho M.V.M., Paula R.S., Knauer L.G. 2024. Geochemistry and mineralogy of the banded iron formation, west Moeda syncline, Quadrilátero Ferrífero region. *Revista Geociências, São Paulo*, 42(3):333-350.

Silva A.B., Neto A.F.S., Bertachini A.C. 1994. Potencial de águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. In: ABAS, 8º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife. Anais... p. 264-273.

Scibek J. 2019. *Global compilation and analysis of fault zone permeability*. Thesys (Phd), Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, Montreal, 327 p.

Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM). 2023. Outorgas dos processos: 07721/2011, 23778/2015, 21694/2015, 28093/2017, 16775/2015, 09226/2017, 04068/2018, 04067/2018, 23093/2015. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/siam/processo/index.jsp>. Acesso em 10 de novembro de 2023.

Smakhtin V.U. 2001. Estimating continuous monthly baseflow time series and their possible applications in the context of the ecological reserve. *Water Sa*, 27(2):213-218.

Steiakakis, E. 2018. Evaluation of exploitable groundwater reserves in Karst Terrain: A Case Study from Crete, Greece. *Geosciences*, 8(19):1-13.

Stewart J. 2013. *Cálculo* - volume 1. São Paulo, Cengage Learning, 7 ed., 664 p.

Teixeira G.M., Sérgio de Paula R., Velasquez L.N.M., Andrade, I.B., Neto W.M.P. 2023. Evaluation of recharge estimation methods Applied to fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. *Hydrological Processes*, 37(8):1-21.

Tóth J. 1963. A Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of geophysical research*, 68(16):4795-4812.

Zupo A., Paula R.S., Sampaio J.L.D., Júnior J.G.R., Melo M.C. 2025. Comparative study of standard and modified groundwater vulnerability methods in the gold and iron mining regions of Western Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*. 270:1-18.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa da hidrodinâmica do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita objetivou estimar o potencial hídrico subterrâneo desse sinclinal. O desenvolvimento dessa pesquisa alcançou os resultados esperados para esse objetivo, superou as expectativas ao definir uma classificação mais evidente das unidades hidroestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero, guiou um melhor entendimento das condições de fluxo do sistema aquífero desse sinclinal ao produzir uma nova abordagem quantitativa dos métodos de estimativa das reservas hídricas subterrâneas e do método de estimativa da entrada e saída d'água de um sistema aquífero por escoamento subterrâneo.

A primeira parte da pesquisa demonstrou que o Aquífero Cauê no Sinclinal Santa Rita é um potencial hídrico para abastecimento na região dos municípios de Mariana e Ouro Preto. Além disso, ela compartimentou o Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita em dois sistemas aquíferos, o Sistema Aquífero Minas e o Sistema Aquífero Estrada Real. Esses dois sistemas são parcialmente interconectados, o que pode ocorrer nas demais estruturas do Quadrilátero Ferrífero. Esse resultado é acompanhado do cálculo e compilação de resultados de estudos anteriores de parâmetros hidrodinâmicos das unidades aquíferas dessa região, da interpretação das condições de contorno do sistema aquífero como um todo, e da análise de fluxo da água subterrânea.

A segunda parte da pesquisa se apoiou nesses resultados e no modelo hidrogeológico tridimensional gerados no primeiro artigo, para dimensionar a quantidade de água subterrânea do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita, e quanta água entra e sai desse sistema. O resultado foi que o uso da água subterrânea alcança a reserva geológica, mesmo com parte da reserva renovável disponível na região. Além disso, esse resultado foi obtido a partir de uma nova abordagem quantitativa das reservas hídricas, e entradas e saídas laterais do sistema aquífero pelo escoamento subterrâneo.

A pesquisa indicou que o recurso hídrico subterrâneo do Sinclinal Santa Rita é uma fonte importante para uso antrópico, e para a manutenção de cursos d'água perenes da região. Apesar do grande potencial hídrico desse sinclinal, parte da reserva permanente do Aquífero Cauê está sendo explorada com uma vazão inferior a metade de sua reserva renovável. Além disso, a vazão da concessão de uso da água subterrânea supera a reserva renovável dessa unidade aquífera, o que é um ponto de atenção para a gestão hídrica desse recurso.

A pesquisa não conseguiu concluir o balanço hídrico subterrâneo do Sinclinal Santa Rita, por ser necessário dados históricos de monitoramento de vazão dos cursos d'água

principais nos limites do sinclinal. Esses dados são monitorados pelas estações 56590100, 56156100, 56336100, sob a gestão de empreendimentos privados da região, sendo necessário parceria com esses para conclusão desse balanço. O entendimento do balanço hídrico contribuiria para a avaliação da reserva explotável do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita, volume de água que pode ser explotado do meio subterrâneo sem trazer efeitos indesejados.

Recomenda-se também, simular os efeitos da explotação da água subterrânea até 2039, considerando o aumento da vazão bombeada na região. Afinal, com as outorgas de 2020, é possível bombear mais de três vezes o que foi bombeado até esse ano. Essa simulação contribuirá para a avaliação da reserva explotável do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita. É recomendado que essa avaliação objetive o uso sustentável desse recurso hídrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida F.F.M. 1977. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7:349-364.
- Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90:29–58.
- Amorim L.Q. & Alkmim F.F. 1997. Tipologia dos aquíferos e um modelo hidrogeológico para a região sul de Belo Horizonte, setor setentrional do platô Moeda. In: SBG, 9º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Ouro Preto. Anais... boletim 14, p. 145-147.
- Amorim L.Q., Rubio R.F., Alkmim F.F. 1999. The effects of mining Capão Xavier iron ore deposit on the water supply of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. In: IMWA, 1º Mine, water & environment congress, Sevilla, Spain. Anais... v.1, p. 359-366.
- Amorim L.Q., Grandchamp C.A P., Bertachini A C. 2001. Dewatering of iron ore mines and capability to predict environmental impacts- The experience of MBR. In: IMWA, Mine water & environment symposia, Belo Horizonte, Brasil. Anais... p.1-14.
- Anderson M.P. & Woessner W.W. 1991. *Applied groundwater modeling— simulation of flow and advective transport*. San Diego, Academic Press, 381 p.
- Anderson M.P. Woessner W.W. Hunt R.J. 2015. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. San Diego, Academic Press, 2 ed., 630 p.
- Andrade I.B. 2023. *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), Programa de pós-graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 114 p.
- Barbosa N.S., Leal L.R.B., Mello J.C., Peixinho M.A.L., Santos C.B., Santos R.L.S., Barbosa N.S. 2017. Modelo hidrogeológico conceitual do Sistema Aquífero Urucuia Centro-Occidental, Brasil. *Águas Subterrâneas*, 30(1):1-19.
- Beato, D.A.C., Dutra, G.M., Medeiros, M.J., Drews, M.G.P., Rocha, G.S., Cruz, W.B., Patrus, M.L.R.A., Nagem, R.L., Oliveira, V. 2001. Estudo hidrogeológico da Bacia da Lagoa da Pampulha. Belo Horizonte, CPRM/PBH. Relatório final, 151p.
- Beato D.A.C., Monsoreo A.L.M., Bertachini A.C. 2005. Hidrogeologia. In: Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: Área de Proteção Ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte, CPRM/SEMAD. Texto explicativo, 8 v. 116 p.
- Bear J. 1979. *Hydraulics of groundwater*. New York, McGraw-Hill, 596 p.
- Bertachini A.C. 1994. Hidrogeologia e Desaguamento da Mina de Águas Claras. In: ABAS, 8º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Belo Horizonte. Anais... p. 274-283.

Bertachini A.C., Grandchamp A.P. Girodo A.C. Souza K. 1999. Dewatering of the Pico the Itabirito iron ore Mine and environmental reclamations case study. In: IMWA, Mine water & environmental symposia. Sevilla, Spain. Anais... v.1, p. 339-345.

Bertachini M.N.A. 2020. *Determinação da condutividade hidráulica do Aquífero Cauê na região oeste do Sinclinal Moeda Nova Lima/MG*. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas), Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 77 p.

Bogomolov G.V. & Plotnikov N.A. 1956. Classification des ressources d'eau souterraines et évaluation de leurs reserves. In: Symposia Darcy, Dijon, International Association Scientific Hydrology Publication, n. 41, p. 263-271.

Brasil. 1997. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 08 jan. 1997.

Cândido M.O., Beato D.A.C., Fiume B., Scudino P.C.B., Carneiro F.A., Nascimento F.M.F., Coutinho, M.M., Almeida C.S.C., Socorro A.S., Santana M.S., *et al.* 2019. Relatório de integração. Projeto Águas do Norte de Minas – PANM: Estudo da disponibilidade hídrica subterrânea do Norte de Minas Gerais. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

Carneiro S.R.C. 2013. *Caracterização mecânica e hidrogeológica dos maciços das cavas de Alegria Centro e Sul, Samarco Mineração S.A.*, Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 199 p.

Carneiro S.R.C. Marques E.A.G. Costa J.P.C. 2015. Evaluation of Hydraulic Conductivity of Itabirites of the Alegria Centro and Alegria Sul Open Pits, Samarco Mineração S.A., Minas Gerais State, Brazil. *Mine Water and a Environment*, 35:136-144.

Carvalho C.G., Silva J.M., Curi A., Flores J.C.C. 2012. A dependência da arrecadação do município de Ouro Preto do setor mineral. *Revista Escola de Minas*, 65(3): 385-392.

Castany G. 1967. *Traité pratique des eaux souterraines*. Paris, Dunod, 2ed., 661 p.

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. 1988. *Applied hydrology*. McGraw-Hill Book Company, 571p.

Conkling H. 1946. Utilization of groundwater storage in stream system development. *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, 111:275-305.

Costa W.D. 1998. Avaliação de Reservas, Potencialidade e Disponibilidade de Aquífero. In: ABAS, 10º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Paulo, Brasil. Anais... p. 1-11.

Costa J.P.C. 2017. *Numerical groundwater flow modeling applied to dewatering prediction of Cauê aquifer in Alegria mine, east of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia), Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 117 p.

Cruz C.E., Caetano I.S.H., Mota A.C.V., Ferreira J.J., Souza J.V.F., Velásquez L.N.M., Paula R.S. 2022. Caracterização pluviométrica do Quadrilátero Ferrífero na região do Sinclinal Moeda – Minas Gerais. *Alemur*, 7(1):17-35.

Custódio E. & Llamas M.R. 1983. *Hidrologia Subterránea*. Barcelona, Ed. Omega, 2. ed., v. 1, 1157 p.

Dantas J.C.M., Mesquita D.C., de Paula S.R., Guerra, K.J. 2018. Correlação entre dados de perfilação geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Águas Subterrâneas*, 32(1):140-153.

Darcy H. 1856. *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 ed., 659 p.

Diniz J.A.O., Monteiro A.B., Feitosa F.A.C., Freitas M.A., Peixinho F.C. 2012. Metodologia para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos. In: ABAS, 17º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e 18º Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Bonito, MS. Resumos Expandidos... p. 1-4.

Diniz J.A.O., de Paula T.L.F, Monteiro A.B., Feitosa F.A.C., Cardoso A.C. 2015. Taxonomia hidrogeológica – Unidades básicas de referência. In: ABAS, 18º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Belo Horizonte, MG. Anais... p. 1-10.

Domenico P.A., Schwartz F.W. 1997. *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York, John Wiley & Sons, 2ed., 528 p.

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

Dou Z., Huang X., Wan W., Zeng F. Wang C. 2024. Development and application of a new exponential model for hydraulic conductivity with depth of rock mass. *Water*, 16: 1-19.

Endo I., Galbiatti H.F., Delgado C.E.R., Freire de Oliveira M.M., Zapparoli A.C., de Moura L.G.B., Peres G.G., Henrique de Oliveira A.H., Zavaglia G., Danderfer F.A., Gomes C.J.S., Carneiro M.A., Nalini Júnior H.A., Castro P.T.A., Saita M.T.F., Tazava E., Lana C.C., Martins-Neto M.A., Martins M.S., Ferreira F.F.A., Franco A.P., Almeida L.G., Rossi D.Q., Angeli G., Madeira T.J.A., Piassa L.R.A., Mariano D.F., Carlos D.U. 2019. *Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Ouro Preto, Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Escala 1:150.000.

Endo I., Machado R., Galbiatti H.F., Rossi D.Q., Zapparoli A.C., Delgado C.E.R., Castro P.T.A., Oliveira M.M.F. 2020. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Castro P.T.A., Endo I., Gandini A.L. (org.). *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte, 3i Editora, p. 70-113.

Feitosa F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa E. C., Demétrio J. G.A. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 3 ed., 812 p.

Fernandes R.C., Roncato J., Paula R.S. 2023. Structural model and features of the world-class Cuiabá orogenic gold deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero region, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 123:1-25.

Ferreira Q.C.G. & Bacellar L.A.P. 2010. Avaliação preliminar das condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto, MG. *Geonomos*, Belo Horizonte, 18(2):13-21.

Ferreira Filho F.A. 1999. *Análise estrutural qualitativa do sistema de falhas Água Quente, borda leste do Quadrilátero Ferrífero – MG*. Dissertação (Mestrado em Geologia), Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 161 p.

Fiume B. (coord), Nascimento F.M.F., Miranda J.S.N., de Paula T.L.F. 2022. *Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero*. Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil. 1 mapa. Escala 1:100.000.

Freeze R.A., Cherry J.A. 1979. *Groundwater*. Eaglewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc. 1ed., 624 p.

Freitas A.R., Paula R.S., Antunes I.M.H.R. 2025. Water Resources Availability on a River Watershed in a Relevant Mineral Province (Minas Gerais, Brazil): An Integrated Approach to Water Resources Management. *Water*, 17(4): 1-25. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w17040532>. Acesso em: 16 de março de 2025.

Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS). 2018. *Hidrografia*. Shapes de rios simples. Disponível em: <https://geo.fbds.org.br/>. Acesso em: 16 de dezembro de 2023.

Galvão P.H.F. 2015. *Hydrogeological conceptual model of Sete Lagoas (MG) and associated implications of urban development in karst region*. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 136.

Google Earth. 2025. Localização: Sinclinal Santa Rita, MG. Imagem de satélite: dez. 2020; dez. 2016; dez. 2012; dez. 2008; dez. 2004; dez. 2000. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em 12 mar. 2025.

Grandchamp C.A.P., Bertachini A.C., Sperling E., Almeida D.C. 2001. Águas Claras Mine – A successful dewatering story. In: IMWA, Mine water & environmental symposia, Belo Horizonte, Brasil. Anais... p. 1-8.

Grandchamp C.A.P. & Velásquez L.N.M. 2002. Determinação do balanço hídrico na recuperação do nível de água do aquífero Cauê na mina de Águas Claras, serra do Curral, município de Nova Lima, Minas Gerais. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Florianópolis. Anais... p. 1-14.

Grandchamp C.A. 2003. *Estudo da Recuperação do Aquífero Cauê e do Enchimento da Cava na Mina de Águas Claras, Serra do Curral, Município de Nova Lima, MG*. Dissertação em geologia econômica e aplicada, Instituto de Geociências, UFMG, Belo Horizonte, MG.

Guimarães, A.Z. 2024. *Análise de risco à contaminação do sistema aquífero do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal de Minas Gerais.

Gustafson G. & Krásný J. 1994. Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. *Hydrogeology Journal*, Berlin, 2(2):64-75.

Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema). 2023. Hidrografia, localidades e limites. Belo Horizonte. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 01 dez. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2020. Contas econômicas ambientais da água: Brasil 2013-2017. Rio de Janeiro, IBGE/ANA. Texto informativo, 12 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2023. Censo 2022: População e domicílios - primeiros resultados - atualizado em 22/12/2023. Rio de Janeiro, IBGE. Dados de 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>. Acesso em: 01 dez. 2024.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). 2020. Banco de dados meteorológico – Estações A513 – Dados de 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 27 mar. 2024.

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). 2011. *Advances Land Observing Satellite The Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR)*. Imagem de satélite. Radar de Abertura Sintética em Banda L. Datas de Aquisição: 16 de março e 15 de fevereiro de 2011. Resolução espacial: 12,5 metros. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 16 de dezembro de 2023.

Köppen W. 1948. *Climatología: con un estudio de los climas de la Tierra*. México, Fondo de Cultura Económica, 479 p.

Kuang X. & Jiao J.J. 2014. An integrated permeability-depth model for Earth's crust. *Geophysical Research Letters*, 41:7539-7545.

Kuang X., Zheng C., Jiao J.J., Cherry J.A., Chen J. 2021. An empirical specific storage-depth model for the Earth's crust. *Journal of Hydrology*, 592: 1-10.

Ladeira B.P, Moreira, A.C.T., Verteiro, I.M., Macedo, V.G., Tavares I.S., Reis L.A., Vidal T.A.V., Moreira D.S., Galvão P.H.F., de Paula R.S. 2025. O relevante potencial de produção da água subterrânea do sinclinal Santa Rita, Quadrilátero Ferrífero, Brasil. *Journal of Hydrology*. Submitted.

Lazarim H.A. & Loureiro C.O. 1998. Caracterização preliminar do aquífero Jardim Canadá. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 10., Recife. Anais... Recife, p. 1-12.

Lyne V. & Hollick M. 1979. Stochastic Time-Variable Rainfall-Runoff Modeling. Institute of Engineers Australia National Conference, Org. Institute of Engineers Australia National Conference, p. 89– 93.

Lobato L.M. (coord.), Achtschin A.B., Baars F.J., Baltazar O.F., Timbó M.A., Reis L.B., Voll E., Voll K., Silva S.L., Berni G.V., Silveira V.D., Versiani de Mendonça B.R., Ferreira D.V.

2005a. *Mapa geológico Catas Altas*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). Escala 1:50.000.

Lobato L.M. (coord.), Achtschin A.B., Baars F.J., Baltazar O.F., Timbó M.A., Reis L.B., Voll E., Voll K., Silva S.L., Berni G.V., Silveira V.D., de Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005b. *Mapa geológico Gandarela*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). Escala 1:50.000.

Lobato L.M. (coord.), Achtschin A.B., Baars F.J., Baltazar O.F., Timbó M.A., Reis L.B., Voll E., Voll K., Silva S.L., Berni G.V., Silveira V.D., de Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005c. *Mapa geológico Mariana*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). Escala 1:50.000.

Lobato L.M. (coord.), Achtschin A.B., Baars F.J., Baltazar O.F., Timbó M.A., Reis L.B., Voll E., Voll K., Silva S.L., Berni G.V., Silveira V.D., de Mendonça B.R.V., Ferreira D.V. 2005d. *Mapa geológico Ouro Preto*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG). Escala 1:50.000.

Lohman S.W., Bennet R.R., Brown R.H., Cooper H.H., Drescher W.J., Ferris J.G., Johnson A.I., Mc. Guinness C.L., Piper A.M., Rorabaugh M.I., Stallman R.W., Theis C.V. 1972. Definitions of selected ground-water terms – revisions and conceptual refinements. USGS – Water-Supply Paper 1988, Washington DC.

Magalhães C.C.C., Melo M.C., Guiguer N., de Paula R.S. 2022. The Cauê Aquifer on the eastern limb of Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in an area west of Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 52, n. 4, p. 1-19. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-4889202220220005>. Acesso em: 25 mar. 2024.

Magalhães C.C.C. 2023. *Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero – MG): Caracterização, impactos e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê*. Dissertação na Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 78 p.

Manning C.E., Ingebritsen S.E. 1999. Permeability of the continental crust: Implications of geothermal data and metamorphic systems. *Reviews of Geophysics*, 37(1):127-150.

Mattiuzi C.D.P., Marques G.F. 2019. Gestão integrada dos recursos hídricos: Avaliação dos benefícios do uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas em uma região no sul do Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, 33(4):340-353.

Maxwell C.H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brazil. United States Government Printing Office, Washington DC. (Relatório n. 78-185981).

Meireles L.M.F. 2023. *Balanço hídrico e análise de fluxo da junção homoclinal Curral e sinclinal Moeda*. Monografia (graduação em Geologia), Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 167 p.

Mesquita D.C., Dantas J.C.M., de Paula R.S., Guerra, K.J. 2017. Estudo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de campo em itabiritos brandos da porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Geonomos*, 25(2):12-19.

Mourão M.A.A. 2007. *Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 287 p.

Nathan R.J., McMahon T.A. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. *Water resources research*, 26(7):1465-1473.

Neuman S.P. 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, 11(2):329-342.

Paula S.R., Mesquita, D.C., Dantas J.C.M., Guerra, K.J. 2018. Caracterização hidroquímica e isotópica das águas, na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero no município de Congonhas-MG, e sua correlação com a localização em cota das unidades aquíferas deste sistema. *Revista Águas Subterrâneas*, 32(1):140-153.

Peixoto C.A.M., Costa P.C.G., Nunes de Carvalho S., Cavanellas A.P.P., Magalhães P.N. 1982. *Mapa hidrogeológico do estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). 1 mapa. Escala 1:1.000.000.

Pereira B.A. 2024. *Avaliação do balanço hídrico e modelagem numérica hidrogeológica da formação de lago em cava: O caso da mina de Águas Claras*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 105 p.

Pinto L.V.A. 2003. *Caracterização física da sub-bacia do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG, e propostas de recuperação de suas nascentes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 165 p.

Plotnikov N.A. 1962. *Ressources en eaux souterraines: Classification et méthodes d'évaluation*. Paris, Gauthier Villars, 194 p.

Ramos M.L.S., Cordeiro V.F., Fernandes R.A. 2020. Histórico e arcabouço hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. In: Castro, P.T.A., Endo, I., Gandini, A.L. (eds.). *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Ouro Preto, 3i Editora, p. 380-414.

Roncato J., Barbosa L.S., Ribeiro G.H., Mendes K.F., Carvalho M.V.M., Paula R.S., Knauer L.G. 2024. Geochemistry and mineralogy of the banded iron formation, west Moeda syncline, Quadrilátero Ferrífero region. *Revista Geociências*, São Paulo, 42(3):333-350.

Rosa E.S. (ed.), Azevedo Júnior M.T., Gomes M.C.A., Gustin F.M.S., Campos M.V., Pedersoli A., Cândido M.I., Gonçalves da Cruz, M.V., Lima M.G.A.T., Caravelli V., Reis do Couto G., Franco J.M.L., Machado J.N.A. Chumbinho M.I.L., Silva R.S., Tibiriçá W.P., Vieira F.L.N., Clementino Filho P.V., Bottaro W., Sperling F.V., Ennes Y.M., Martins de Araújo, M.M., Gomes, A.C., Schrim H, Costa de Queiroz A., Santos C.R., Chaves L.A., Marques R.S., Jesus dos Santos, W. 1997. *Saneamento básico em Belo Horizonte: trajetória em 100 anos - os serviços de água e esgoto*. Belo Horizonte, Fundação João Pinheiro, 311 p.

Rossi D.Q. 2014. *Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação no Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 129 p.

Sadala J. & Gonçalves R.D. 1980. Experiência da COPASA MG na Utilização de Água Subterrânea para Abastecimento Urbano. I Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, (p. 4). Recife-PE.

Silva A., Cota, S. 2021. Groundwater age dating using single and time-series data of environmental tritium in the Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 107:1-12.

Silva A.B., Neto A.F.S., Bertachini A.C. 1994. Potencial de águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. In: ABAS, 8º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife. Anais... p. 264-273.

Silva S.L., Monteiro, E.A., Baltazar O.F. 2005. Estratigrafia. In: Silva S.L., Baltazar O.F., Zucchetti M. Projeto APA Sul RMBH: geologia, mapa geológico, escala 1:50.000 em 3 partes. Belo Horizonte, CPRM, p. 61.

Scibek J. 2019. *Global compilation and analysis of fault zone permeability*. Thesis (Phd), Department of Earth and Planetary Sciences, McGill University, Montreal, 327 p.

Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM). 2023. Outorgas dos processos: 07721/2011, 23778/2015, 21694/2015, 28093/2017, 16775/2015, 09226/2017, 04068/2018, 04067/2018, 23093/2015. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/siam/processo/index.jsp>. Acesso em 10 de novembro de 2023.

Smakhtin V.U. 2001. Estimating continuous monthly baseflow time series and their possible applications in the context of the ecological reserve. *Water Sa*, 27(2):213-218.

Souza S.M.T. 1995. Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: HIDROSISTEMAS/COPASA, 525p.

Steiakakis, E. 2018. Evaluation of exploitable groundwater reserves in Karst Terrain: A Case Study from Crete, Greece. *Geosciences*, 8(19):1-13.

Stewart J. 2013. *Cálculo* - volume 1. São Paulo, Cengage Learning, 7 ed., 664 p.

Struckmeir W.F. & Margat, J. 1995. Hydrogeological maps: a guide and a standard legend. IAH - International Contributions to Hydrogeology. International Association of Hydrogeologists, v. 17.

Tárcia R.F., Neto A.F., Santana F.C. 1986. Rebaixamento do Lençol Freático da Mina de Conceição – Corpo “C”. In: ABAS: 4º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais... p. 550-562.

Teixeira da Costa M. 1961. Sedimentação e orogênese da Série de Minas. Ouro Preto, Semana de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos (SICEG). Soc. Interc. Cult. e Est. Geol., nº. 1, p. 55-61.

Teixeira G.M., Sérgio de Paula R., Velasquez L.N.M., Andrade, I.B., Neto W.M.P. 2023. Evaluation of recharge estimation methods Applied to fissure and karst aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. *Hydrological Processes*, 37(8):1-21.

Todd D.K., Mays L.W. *Groundwater Hydrology*. John Wiley e Sons, 3 ed., 652 p.

Tóth J. 1963. A Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of geophysical research*, 68(16):4795-4812.

Ventura L.C. & Bacellar L.A.P. 2011. Influência de filitos no padrão de fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto. *Geotecnia*, 121:71-88.

Waterloo Hydrogeologic. 2016. AquiferTest Pro v. 2016.1: Pumping & Slug Test Analysis, Interpretation & Visualization Software. Waterloo, Canada: Waterloo Hydrogeologic.

Wendland, E., Gomes, L.H., Porto R.M. 2014. Use of convolution and geotechnical rock properties to analyse free flowing discharge test. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 86(1):117-126.

Zupo A., Paula R.S., Sampaio J.L.D., Júnior J.G.R., Melo M.C. 2025. Comparative study of standard and modified groundwater vulnerability methods in the gold and iron mining regions of Western Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Journal of Contaminant Hydrology*. 270:1-18.

APÊNDICE A – Parâmetros hidrodinâmicos calculados

Tabela 1: Parâmetros hidrodinâmicos calculados com dados de teste de vazão de poços para as unidades aquíferas Sabará, Cauê e Granítico Gnáissico.

AQ	Poço de bombeamento	Instrumento de observação	Transmissividade (m ² /s)	Condutividade Hidráulica (m/s)	Coefficiente de armazenamento (%)	Capacidade específica (m ³ /s/m)
SB	Poco_03	-	5,89x10 ⁻⁵	3,41x10 ⁻⁷	-	6,66x10 ⁻⁵
	Poco_04	-	-	-	-	3,14x10 ⁻⁴
	09226/2017	-	-	-	-	4,30x10 ⁻⁵
CA	PTR-01	-	1,18x10 ⁻³	7,12x10 ⁻⁶	-	6,07x10 ⁻⁴
	PTR-02	-	3,08x10 ⁻³	1,78x10 ⁻⁵	-	1,59x10 ⁻³
	PTR-03	-	6,55x10 ⁻⁴	3,45x10 ⁻⁶	-	2,81x10 ⁻⁴
	PTR-04	-	5,51x10 ⁻⁴	3,25x10 ⁻⁶	-	4,49x10 ⁻⁴
	PTR-05	-	1,96x10 ⁻⁴	1,45x10 ⁻⁶	-	2,22x10 ⁻⁴
	PTR-05	INA50	1,32x10 ⁻¹	9,79x10 ⁻⁴	12,50	-
	PTR-05	INA84	1,51x10 ⁻²	1,12x10 ⁻⁴	9,20	-
	PTR-06	-	3,29x10 ⁻⁴	1,74x10 ⁻⁶	-	5,14x10 ⁻⁴
	PTR-07	-	3,08x10 ⁻³	1,56x10 ⁻⁵	-	1,67x10 ⁻³
	PTR-08	-	2,18x10 ⁻³	2,06x10 ⁻⁵	-	1,32x10 ⁻³
	PTR-08	INA-S-84	3,97x10 ⁻²	3,77x10 ⁻⁴	19,70	-
	PTR-09	-	4,64x10 ⁻⁴	1,84x10 ⁻⁵	-	4,84x10 ⁻⁴
	PTR-10	-	3,29x10 ⁻⁴	1,44x10 ⁻⁶	-	4,15x10 ⁻⁴
	PTR-10	INA-85	3,91x10 ⁻⁴	1,72x10 ⁻⁶	21,40	-
	PTR-11	-	6,00x10 ⁻⁴	5,32x10 ⁻⁶	-	4,78x10 ⁻⁴
	PTR-12	-	4,64x10 ⁻⁴	2,57x10 ⁻⁶	-	5,74x10 ⁻⁴
	PTR-12	INA-51	5,18x10 ⁻⁴	2,87x10 ⁻⁶	8,69	-
	PALR-01	-	-	-	-	3,42x10 ⁻⁴
	PALR-02	-	-	-	-	5,53x10 ⁻⁴
	PALR-03	-	-	-	-	4,61x10 ⁻³
	PALR-04	-	-	-	-	3,44x10 ⁻⁴
PALR-05	-	-	-	-	4,06x10 ⁻⁴	
PALR-06	-	-	-	-	8,06x10 ⁻⁵	
PALR-07	-	-	-	-	6,39x10 ⁻⁴	
PALR-08	-	-	-	-	2,19x10 ⁻⁴	
PALR-09	-	-	-	-	1,58x10 ⁻⁴	
PFZR01	-	-	-	-	2,96x10 ⁻⁴	
GG	23093/2015	-	-	-	-	9,09x10 ⁻⁵

Fonte: Elaborado pelo autor.

AQ: Aquífero;

SB: Aquífero Sabará;

CA: Aquífero Cauê;

GG: Aquífero Granítico Gnáissico.

Tabela 2: Estatísticas de média e mediana dos parâmetros hidrodinâmicos calculados.

Aquífero	Estatística	Transmissividade (m ² /s)	Condutividade Hidraulica (m/s)	Coefficiente de armazenamento (%)	Capacidade específica (m ³ /s/m)
Sabará	média	5,89x10 ⁻⁵	3,41x10 ⁻⁷	-	1,41x10 ⁻⁴
	mediana				6,66x10 ⁻⁵
Cauê	média	1,25x10 ⁻²	9,80x10 ⁻⁵	14,30	7,39x10 ⁻⁴
	mediana	6,28x10 ⁻⁴	6,22x10 ⁻⁶	12,50	4,63x10 ⁻⁴
Granítico Gnáissico	-	-	-	-	9,09x10 ⁻⁵

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – Seleção de estações fluviométricas para interpretação da reserva renovável

Foram coletados dados de vazão de cursos d'água de 44 estações no Sinclinal Santa Rita. Essas estações foram selecionadas para interpretação da recarga individual de uma unidade aquífera, para calcular a reserva renovável do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita. Foram filtradas as estações que tivessem apenas um aquífero aflorante na área da bacia hidrográfica a montante do ponto de monitoramento, e que tivessem um período de monitoramento sem interferência antrópica na área da bacia. Essas interferências antrópicas foram identificadas por picos de vazão que não seguiram a sazonalidade. Muito provavelmente a adição de água por meio do lançamento de efluentes. Também foram analisados o histórico de imagens de satélite do Google Earth (2025). Foi considerado interferência antrópica, quando identificado uma escavação ou aterramento na área da bacia hidrográfica a montante do ponto de monitoramento. A Tabela 3 apresenta o compilado de informações utilizadas na análise da seleção das bacias para o cálculo da recarga de cada aquífero do Sinclinal Santa Rita.

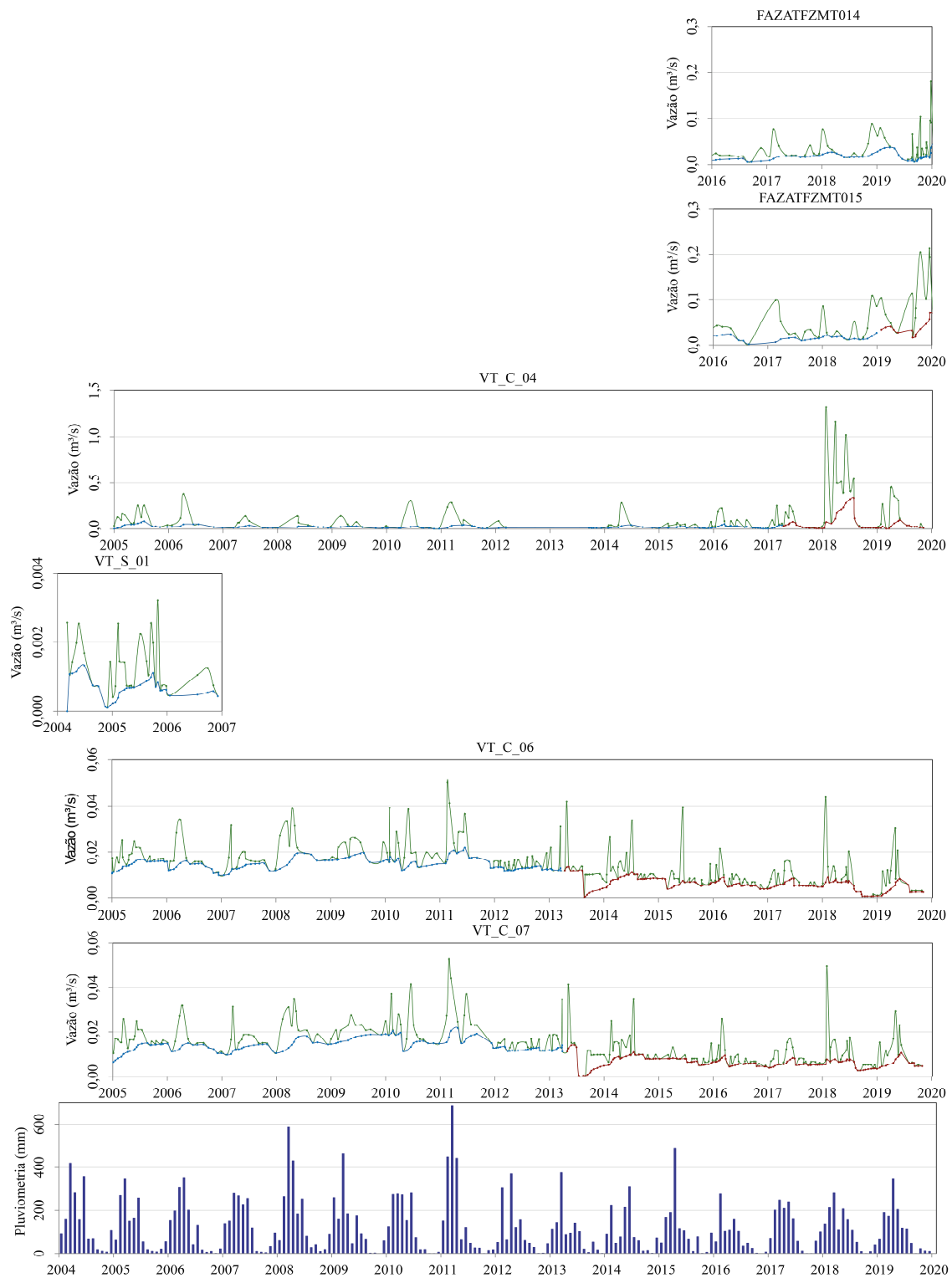
Tabela 3 - Estações fluviométricas do Sinclinal Santa Rita, com a quantidade de aquíferos na área da bacia hidrográfica, o período de monitoramento, e o período sem interferência antrópica na bacia hidrográfica.

Código	UTM-E	UTM-N	Quantidade de aquíferos na área da bacia	Período sem interferência antrópica	Período de monitoramento
VT_S_01	656200	7765883	1	2004 - 2007	2004 - 2007
VT_S_02	655783	7767116	3	-	2004 - 2020
VT_S_03	656008	7767344	2	2004 - 2011	2004 - 2015; 2020
VT_C_04	654655	7767286	1	2005 - 2017	2005 - 2020
VT_S_05	654987	7767109	2	2005 - 2017	2005 - 2020
VT_C_06	655839	7767756	1	2005 - 2013	2005 - 2020
VT_C_07	655830	7767622	1	2005 - 2013	2005 - 2020
VT_JM_10	656260	7768749	2	-	2004 - 2005
VT_N_11	657042	7768687	3	2004 - 2011	2004 - 2020
VT_N_12	657687	7769470	1	-	2005 - 2013; 2018
VT_S_13	656333	7767775	3	2004 - 2008	2004 - 2020
VT_JM_14	656242	7768729	2	-	2005 - 2006
VT_N_16A	657675	7769454	1	-	2005 - 2007
VT_N_16B	657675	7769454	1	-	2005 - 2013; 2017 - 2018
VT_JM_17	655884	7768589	2	-	2017 - 2020

Código	UTM-E	UTM-N	Quantidade de aquíferos na área da bacia	Período sem interferência antrópica	Período de monitoramento
EF_01_PIRA	655005	7766869	2	2007 - 2012	2007 - 2013; 2015 - 2020
EF_02_PIRA	655935	7767405	2	2007 - 2012	2007 - 2013; 2015 - 2018
EF_03_PIRA	656427	7767891	3	2007 -2009	2007 - 2013; 2015 - 2018
EF_04_PIRA	653967	7764091	2	2018 - 2020	2018 - 2020
EF_05_PIRA	654685	7766425	2	-	2018 - 2020
EF_06_PIRA	656199	7767656	3	-	2018 - 2020
EF_07_PIRA	656532	7768009	3	-	2018 - 2020
FT-02	655112	7768969	2	2012 - 2017	2012 - 2020
FT-03	655354	7768764	2	-	2018 - 2019
FT-04	657155	7769005	2	-	2012 - 2014; 2016 - 2017
FT-05	656949	7767157	2	-	2012 - 2020
FT-08	655935	7767405	2	-	2012 - 2013; 2014 - 2020
FT-09	655005	7766869	2	-	2012 - 2013; 2014 - 2020
FT-13	653967	7764091	2	2018 - 2020	2018 - 2020
FT-14	654685	7766425	2	-	2018 - 2020
FT-15	656199	7767656	3	-	2018 - 2020
Almas	660476	7769872	2	-	2016 - 2020
ALGATALMT_001	657669	7769435	1	-	2006 - 2020
ALGATALMT_002	657715	7769315	1	-	2010 - 2016
ALGATALMT_003	657715	7769315	1	-	2014
FAZATFZMT001	667223	7773331	1	2007 - 2020	2007 - 2020
FAZATFZMT002	667025	7773513	3	-	2018 - 2020
FAZATFZMT005	665847	7777921	2	-	2017 - 2019
FAZATFZMT008	666183	7775227	2	-	2013 - 2020
FAZATFZMT009	666151	7775131	2	-	2013 - 2017; 2019 - 2020
FAZATFZMT011	665470	7770999	4	-	2013 - 2020
FAZATFZMT014	665524	7775598	1	2016 - 2020	2016 - 2020
FAZATFZMT015	665913	7774881	1	2016 - 2019	2016 - 2019
Estação Barragem Campo Grande	657755	7767715	1	-	2000 - 2004

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – Gráficos de vazão dos cursos d'água analisados e da pluviometria média regional de Thiessen



Fonte: Elaborado pelo Autor.

APÊNDICE D – Informações complementares do cálculo da reserva permanente

O cálculo da reserva permanente, se embasou na aplicação da equação 08, para determinar a soma do quantitativo de água de cada bloco do modelo de blocos do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita. A premissa é que o armazenamento específico do aquífero decresce com a profundidade de acordo com o modelo de Kuang *et al.* (2021), adaptado pela equação 12.

Antes, foi necessário determinar o armazenamento específico calculado para a superfície do terreno (Ss_{0calc}) a partir da equação 11. Essa utilizou o armazenamento específico na profundidade mais rasa (Ss_{+r}) e a profundidade de Ss_{+r} em relação a topografia (z_{+r}) como variáveis no cálculo (Tabela 4).

Tabela 4: Profundidade de Ss_{+r} em relação a topografia, armazenamento específico na profundidade mais rasa e armazenamento específico calculado para a superfície do terreno.

Unidade aquífera	z_{+r} (m)	Ss_{+r} (m^{-1})	Ss_{0calc} (m^{-1})
Aquífero Itacolomi	200	$7,0 \times 10^{-4(4)}$	$1,1 \times 10^{-1}$
Aquífero Sabará	30	$1,0 \times 10^{-5(1)}$	$1,5 \times 10^{-5}$
Aquífero Gandarela	200	$2,8 \times 10^{-4(2)}$	$2,8 \times 10^{-2}$
Aquífero Cauê	159	$7,9 \times 10^{-4(3)}$	$4,1 \times 10^{-2}$
Aquífero Quartzítico Fissural	200	$7,0 \times 10^{-4(2)}$	$1,1 \times 10^{-1}$
Aquífero Granítico-Gnáissico	91	$4,0 \times 10^{-5(1)}$	$2,0 \times 10^{-4}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

(1) Kuang *et al.* (2021);

(2) Calculado a partir do coeficiente de armazenamento de Magalhães *et al.* (2022);

(3) Calculado a partir do coeficiente de armazenamento do presente estudo;

(4) Foi utilizado o armazenamento específico do Aquífero Quartzítico Fissural, por o Aquífero Itacolomi ser composto predominantemente por quartzitos;

No modelo de blocos do Sistema Aquífero do Sinclinal Santa Rita do Leapfrog Geo, no campo “Calculations e Filters”, foram criadas seis variáveis para calcular, pela equação 12, essa variação do armazenamento, uma para cada aquífero (Quadro 1). Os valores logarítmicos do armazenamento específico na profundidade mais rasa (Ss_{+r}), do armazenamento específico calculado para a superfície do terreno (Ss_{0calc}) e do armazenamento específico residual (Ssr) foram calculados antes de montar as equações.

Quadro 1: Aplicação da equação 12, cálculo da variação do log do armazenamento específico, para cada aquífero.

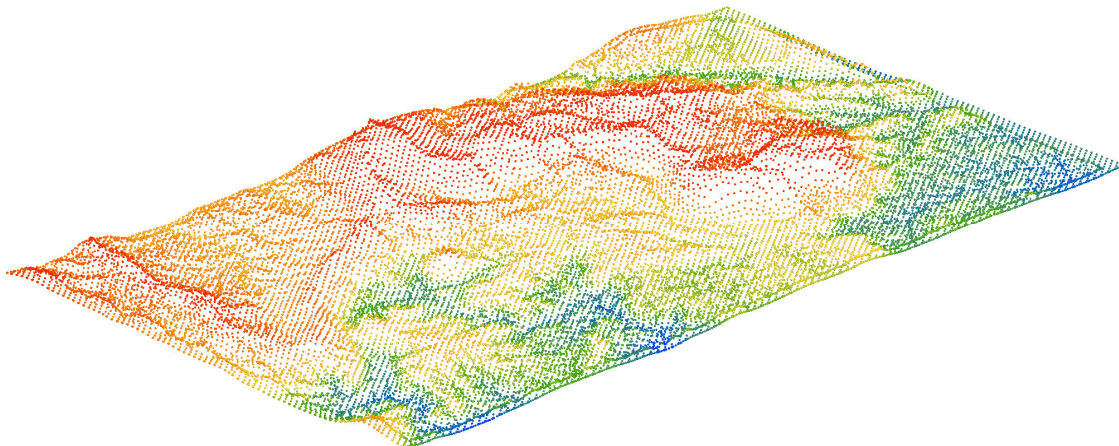
Log S _{Aquífero Itacolomi} =	Se $z \leq 200\text{m}$	→	-3,1549
	$z > 200\text{m}$	→	$-7,8 + (-0,9656 + 7,8) \cdot (1 + z)^{-2,118}$
Log S _{Aquífero Sabará} =	Se $z \leq 30\text{m}$	→	-5,0000
	$z > 30\text{m}$	→	$-7,8 + (-4,8191 + 7,8) \cdot (1 + z)^{-2,118}$
Log S _{Aquífero Gandarela} =	Se $z \leq 200\text{m}$	→	-3,5528
	$z > 200\text{m}$	→	$-7,8 + (-1,5511 + 7,8) \cdot (1 + z)^{-2,118}$
Log S _{Aquífero Cauê} =	Se $z \leq 159\text{m}$	→	-3,1039
	$z > 159\text{m}$	→	$-7,8 + (-1,3834 + 7,8) \cdot (1 + z)^{-2,118}$
Log S _{Aquífero Quartzítico Fissural} =	Se $z \leq 200\text{m}$	→	-3,1549
	$z > 200\text{m}$	→	$-7,8 + (-0,9656 + 7,8) \cdot (1 + z)^{-2,118}$
Log S _{Aquífero Granítico Gnáissico} =	Se $z \leq 91\text{m}$	→	-4,3979
	$z > 91\text{m}$	→	$-7,8 + (-3,7088 + 7,8) \cdot (1 + z)^{-2,118}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A profundidade z foi calculada através da equação 13, pela diferença da cota da topografia logo acima do bloco com a profundidade do bloco. Para atribuir a cota da topografia logo acima do bloco, foi utilizada a ferramenta estimativa do Leapfrog Geo.

Primeiro, foram extraídos os vértices da superfície da topografia (Figura 1).

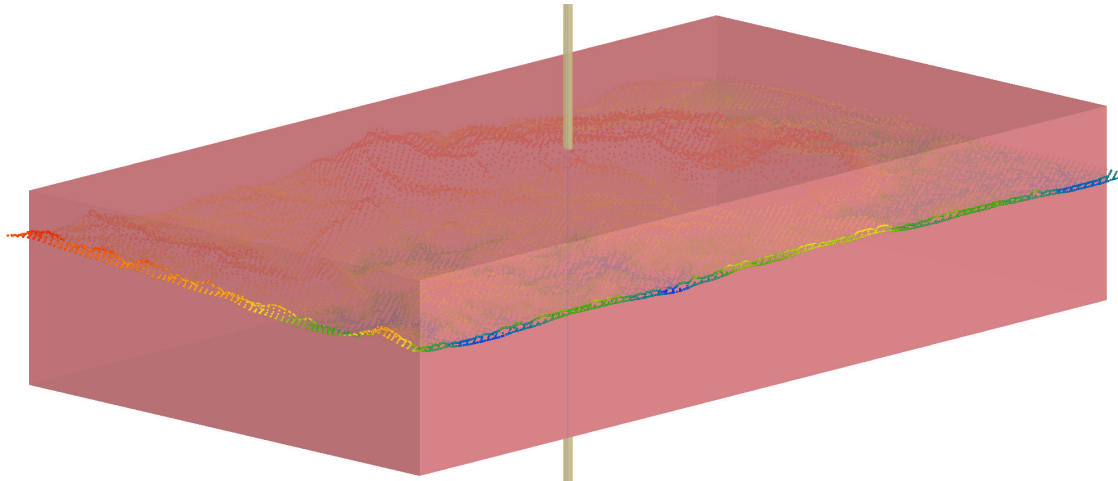
Figura 1: Vértices da topografia utilizada para o cálculo da profundidade z de cada bloco no Leapfrog Geo. A cor do espectro de cores indica a elevação do vértice. Vértices mais próximos ao vermelho são mais elevados, e vértices mais próximos do azul são os mais baixos;



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As cotas desses vértices foram carimbadas no modelo de blocos do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita através do interpolador do vizinho mais próximo, utilizando o elipsoide de busca de raio de 200 metros no plano horizontal, e raio de 50.000 metros no eixo maior vertical. Foi estabelecida essa configuração, para que dentro da área do estimador, o elipsoide de busca tivesse o formato de um cilindro (Figura 2).

Figura 2: Domínio do modelo de blocos de rosa com elipsoide de buscas de cor verde, e vértices da topografia dentro do domínio do modelo de blocos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O volume de água armazenada em cada bloco foi calculado por seis variáveis, uma para cada aquífero, através da equação 09 (Quadro 2).

Quadro 2: Aplicação da equação 09 para cada aquífero.

$\Delta V_1 \text{ Aquífero Itacolomi} = 10^{\text{Log Ss Aquífero Itacolomi}} \cdot 50\text{m} \cdot 125.000\text{m}^3$
$\Delta V_1 \text{ Aquífero Sabará} = 10^{\text{Log Ss Aquífero Sabará}} \cdot 50\text{m} \cdot 125.000\text{m}^3$
$\Delta V_1 \text{ Aquífero Gandarela} = 10^{\text{Log Ss Aquífero Gandarela}} \cdot 50\text{m} \cdot 125.000\text{m}^3$
$\Delta V_1 \text{ Aquífero Cauê} = 10^{\text{Log Ss Aquífero Cauê}} \cdot 50\text{m} \cdot 125.000\text{m}^3$
$\Delta V_1 \text{ Aquífero Quartzítico Fissural} = 10^{\text{Log Ss Quartzítico Fissural}} \cdot 50\text{m} \cdot 125.000\text{m}^3$
$\Delta V_1 \text{ Aquífero Granítico Gnáissico} = 10^{\text{Log Ss Aquífero Granítico Gnáissico}} \cdot 50\text{m} \cdot 125.000\text{m}^3$

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A atribuição do volume de água em cada bloco foi feita na variável “*numeric calculation*” da ferramenta “*calculations e filters*” do Leapfrog Geo. Essa atribuição seguiu uma série de condições. A profundidade z deveria ser maior que zero. Dessa forma limita a atribuição do valor de volume de água do aquífero apenas para os blocos abaixo da topografia.

Como o volume de água armazenada foi estimado apenas para a zona saturada do meio subterrâneo, foi atribuído em conjunto a condição anteriormente descrita, que a carimbagem do volume de água armazenada fosse feita dentro do volume de cada aquífero do modelo hidrogeológico tridimensional do Leapfrog Geo. Dessa forma, a atribuição dos volumes de água armazenada seguiu a regra do Quadro 3.

Quadro 3: Condições para carimbo em cada bloco do modelo de blocos de armazenamento de água subterrânea do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita.

$\Delta V_{1,xyz} = \text{Se } z > 0 \text{ e}$	Bloco _{xyz} \in Aquífero Itacolomi	—>	$\Delta V_{1 \text{ Aquífero Itacolomi}}$
	Bloco _{xyz} \in Aquífero Sabará	—>	$\Delta V_{1 \text{ Aquífero Sabará}}$
	Bloco _{xyz} \in Aquífero Gandarela	—>	$\Delta V_{1 \text{ Aquífero Gandarela}}$
	Bloco _{xyz} \in Aquífero Cauê	—>	$\Delta V_{1 \text{ Aquífero Cauê}}$
	Bloco _{xyz} \in Aquífero Quartzítico Fissural	—>	$\Delta V_{1 \text{ Aquífero Quartzítico Fissural}}$
	Bloco _{xyz} \in Aquífero Granítico Gnáissico	—>	$\Delta V_{1 \text{ Aquífero Granítico Gnáissico}}$

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a atribuição dos volumes de água em cada bloco, a soma dos volumes da água de cada bloco classificados pelos aquíferos (equação 08) foi obtida pela tabela de estatísticas do Leapfrog Geo.

APÊNDICE E – Informações complementares do cálculo das entradas e saídas de água laterais (com exemplo do modelo de Kuang e Jiao (2014))

O cálculo das entradas e saídas de água laterais do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita, se embasou na aplicação da equação 18, para determinar a vazão do escoamento subterrâneo ao longo de uma seção da condição de contorno tipo 3 desse sistema aquífero. A premissa é que a permeabilidade ou condutividade hidráulica do aquífero decresce com a profundidade de acordo com os modelos de Manning e Ingebritsen (1999), Kuang e Jiao (2014), Scibek (2019), Dou *et al.* (2024), equações 20, 22, 24 e 26.

Antes, foi necessário determinar as permeabilidades calculadas para a profundidade de 1km nos modelos de Manning e Ingebritsen (1999) e Scibek (2019), equações 21 e 25, respectivamente; a permeabilidade calculada para a superfície do terreno no modelo de Kuang e Jiao (2014), equação 23; a condutividade hidráulica calculada para a superfície do terreno no modelo de Dou *et al.* (2024), equação 25. Foram utilizadas essas correções quando $z \leq z_{+r}$. Quando $z > z_{+r}$, $k = k_{+r}$ e $K = K_{+r}$. A Tabela 5 apresenta os valores calculados para essas constantes.

Tabela 5: Profundidade de k_{+r} e K_{+r} em relação a topografia, permeabilidade na profundidade mais rasa, condutividade hidráulica na profundidade mais rasa, permeabilidade calculada para a profundidade de um km, de acordo com o modelo de Manning e Ingebritsen (1999), permeabilidade calculada para a superfície do terreno, de acordo com o modelo de Kuang e Jiao (2014), permeabilidade calculada para a profundidade mais rasa, de acordo com o modelo de Scibek (2019), condutividade hidráulica calculada para a superfície do terreno, de acordo com o modelo de Dou *et al.* (2024).

Unidade aquífera	z_{+r} (m)	k_{+r} (m ²)	K_{+r} (cm/s)	k_{1km} (m ²) - Manning e Ingebritsen (1999)	k_s (m ²) - Kuang e Jiao (2014)	k_{1km} (m ²) - Scibek (2019)	K_s (cm/s) - Dou <i>et al.</i> (2024)
Aquífero Sabará	173	$4,0 \times 10^{-14(3)}$	$3,4 \times 10^{-5(1)}$	$1,4 \times 10^{-16}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$6,2 \times 10^{-16}$	$4,2 \times 10^{-2}$
Aquífero Gandarela	200	$8,6 \times 10^{-15(2)}$	$7,4 \times 10^{-6(2)}$	$5,0 \times 10^{-17}$	$2,9 \times 10^{-14}$	$1,8 \times 10^{-16}$	$6,0 \times 10^{-3}$
Aquífero Cauê	159	$7,2 \times 10^{-13(3)}$	$6,2 \times 10^{-4(1)}$	$2,0 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-12}$	$9,6 \times 10^{-15}$	$6,1 \times 10^0$
Aquífero Quartzítico Fissural	200	$3,0 \times 10^{-14(2)}$	$2,6 \times 10^{-5(2)}$	$1,7 \times 10^{-16}$	$1,1 \times 10^{-13}$	$6,4 \times 10^{-16}$	$1,2 \times 10^{-1}$
Aquífero Granítico-Gnáissico	91	$1,2 \times 10^{-13(4)}$	$1,0 \times 10^{-4(4)}$	$5,4 \times 10^{-17}$	$2,2 \times 10^{-13}$	$5,8 \times 10^{-16}$	$7,5 \times 10^{-4}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

- (1) Condutividade hidráulica do presente trabalho;
- (2) Calculado a partir da condutividade hidráulica de Magalhães et al. (2022);
- (3) Calculado a partir da condutividade hidráulica do presente estudo;
- (4) Calculado a partir da condutividade hidráulica de Beato et al. (2001);

As vazões de entradas e saídas de águas laterais do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita foram calculadas através das equações 14 a 27 que incluem a adaptação dos modelos de variação da permeabilidade com a profundidade de Manning e Ingebritsen (1999), Kuang e Jiao (2014), Scibek (2019) e Dou *et al.* (2024). Nesse apêndice é tratado esse cálculo através do modelo adaptado de variação da permeabilidade de Kuang e Jiao (2014) (equações 22 e 23). No modelo de blocos do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita do Leapfrog Geo, no campo “Calculations e Filters”, foram criadas seis variáveis para calcular a variação da permeabilidade com a profundidade de acordo a regra, quando $z \leq z_{+r}$, aplicou-se a equação 22. Quando $z > z_{+r}$, $k = k_{+r}$ (Quadro 4).

Sendo z , a profundidade do bloco em relação a topografia (m), z_{+r} é a profundidade de (k_{+r}) em relação a topografia (m), k_{+r} é a permeabilidade na profundidade mais rasa (m^2). A profundidade z foi calculada no Leapfrog Geo da mesma forma como descrito no APÊNDICE D.

Quadro 4: Aplicação da equação 12, cálculo da variação do log do armazenamento específico, para cada aquífero.

Log $k_{\text{Aquífero Sabará}} =$	Se $z \leq 173m$	→	-13,402
	$z > 173m$	→	$-25,4 + (-12,914 + 25,4) \cdot (1 + z)^{-0,25}$
Log $k_{\text{Aquífero Gandarela}} =$	Se $z \leq 200m$	→	-14,067
	$z > 200m$	→	$-25,4 + (-13,538 + 25,4) \cdot (1 + z)^{-0,25}$
Log $k_{\text{Aquífero Cauê}} =$	Se $z \leq 159m$	→	-12,141
	$z > 159m$	→	$-25,4 + (-11,643 + 25,4) \cdot (1 + z)^{-0,25}$
Log $k_{\text{Aquífero Quartzítico Fissural}} =$	Se $z \leq 200m$	→	-13,521
	$z > 200m$	→	$-25,4 + (-12,967 + 25,4) \cdot (1 + z)^{-0,25}$
Log $k_{\text{Aquífero Granítico Gnáissico}} =$	Se $z \leq 91m$	→	-12,935
	$z > 91m$	→	$-25,4 + (-12,660 + 25,4) \cdot (1 + z)^{-0,25}$

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O cálculo da vazão de entrada e saída de água pela condição de contorno tipo 3 foi feito através da equação 18. Ela foi aplicada de forma diferente para cada aquífero; e pela profundidade que o fluxo ocorria, se era em uma profundidade maior ou menor que 300 metros. Dessa forma, foram atribuídas 10 variáveis para o cálculo da vazão de entrada e saída na fronteira.

Quadro 5: Aplicação da equação 18, cálculo da vazão de escoamento subterrâneo de cada bloco do modelo de vazão da água subterrânea nas condições de contorno tipo 3.

$Q_{\text{Aquífero Sabará raso}}$	$=$	$-k_{\text{Aquífero Sabará}} \cdot (92039/7)m^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{raso}}) \cdot (\tan \beta_{\text{raso}}) \cdot 8603848,86m^{-1}s^{-1} \cdot 31536000s/\text{ano}$
$Q_{\text{Aquífero Sabará profundo}}$	$=$	$-k_{\text{Aquífero Sabará}} \cdot (92039/7)m^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{profundo}}) \cdot (\tan \beta_{\text{profundo}}) \cdot 8603848,86m^{-1}s^{-1} \cdot 31536000s/\text{ano}$
$Q_{\text{Aquífero Gandarela raso}}$	$=$	$-k_{\text{Aquífero Gandarela}} \cdot (66222/4)m^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{raso}}) \cdot (\tan \beta_{\text{raso}}) \cdot 8603848,86m^{-1}s^{-1} \cdot 31536000s/\text{ano}$

Q _{Aquífero Gandarela profundo}	=	$-k_{\text{Aquífero Gandarela}} \cdot (66222/4)\text{m}^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{profundo}}) \cdot (\tan \beta_{\text{profundo}}) \cdot 8603848,86\text{m}^{-1}\text{s}^{-1} \cdot 31536000\text{s/ano}$
Q _{Aquífero Cauê raso}	=	$-k_{\text{Aquífero Cauê}} \cdot (11961780/1102)\text{m}^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{raso}}) \cdot (\tan \beta_{\text{raso}}) \cdot 8603848,86\text{m}^{-1}\text{s}^{-1} \cdot 31536000\text{s/ano}$
Q _{Aquífero Cauê profundo}	=	$-k_{\text{Aquífero Cauê}} \cdot (11961780/1102)\text{m}^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{profundo}}) \cdot (\tan \beta_{\text{profundo}}) \cdot 8603848,86\text{m}^{-1}\text{s}^{-1} \cdot 31536000\text{s/ano}$
Q _{Aquífero Quartz. Fiss. raso}	=	$-k_{\text{Aquífero Quartz. Fiss.}} \cdot (9079870/911)\text{m}^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{raso}}) \cdot (\tan \beta_{\text{raso}}) \cdot 8603848,86\text{m}^{-1}\text{s}^{-1} \cdot 31536000\text{s/ano}$
Q _{Aquífero Quartz. Fiss. profundo}	=	$-k_{\text{Aquífero Quartz. Fiss.}} \cdot (9079870/911)\text{m}^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{prof.}}) \cdot (\tan \beta_{\text{prof.}}) \cdot 8603848,86\text{m}^{-1}\text{s}^{-1} \cdot 31536000\text{s/ano}$
Q _{Aquífero Granit. Gnais. raso}	=	$-k_{\text{Aquífero Granit. Gnais.}} \cdot (9079870/911)\text{m}^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{raso}}) \cdot (\tan \beta_{\text{raso}}) \cdot 8603848,86\text{m}^{-1}\text{s}^{-1} \cdot 31536000\text{s/ano}$
Q _{Aquífero Granit. Gnais. profundo}	=	$-k_{\text{Aquífero Granit. Gnais.}} \cdot (11478000/1050)\text{m}^2 \cdot \cos(\theta - \alpha_{\text{prof.}}) \cdot (\tan \beta_{\text{prof.}}) \cdot 8603848,86\text{m}^{-1}\text{s}^{-1} \cdot 31536000\text{s/ano}$

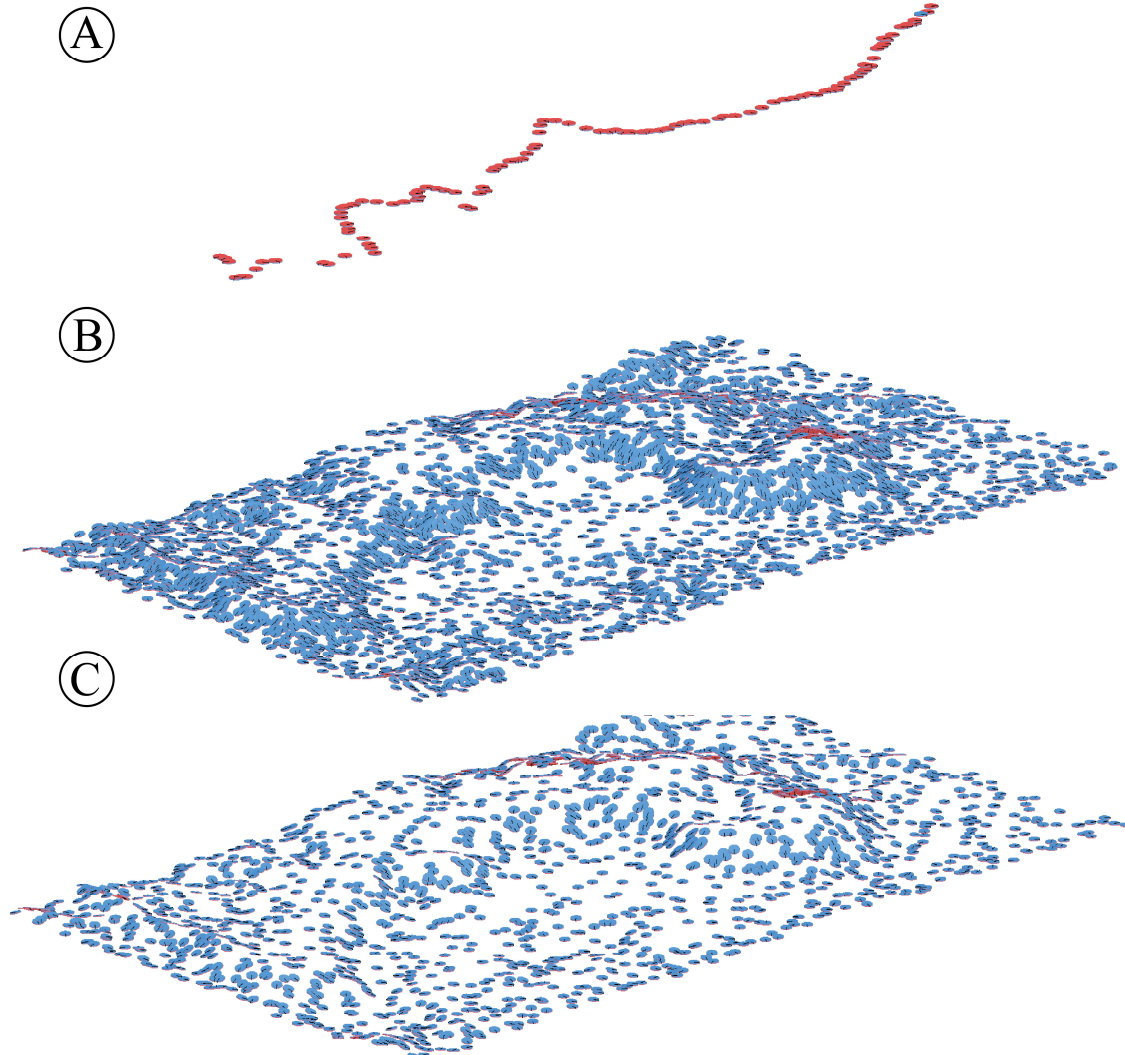
Fonte: Elaborado pelo autor.

A área ao longo da seção de cada bloco foi calculada pela divisão da área da seção do aquífero na condição de contorno tipo 3 pela quantidade de blocos que pertencem àquele aquífero nessa fronteira.

O azimute do vetor normal à condição de contorno tipo 3 (θ), o azimute do vetor fluxo da água subterrânea (α) e o ângulo de mergulho da superfície potenciométrica (β) foram carimbados no modelo de blocos a partir de malhas de pontos com esses atributos.

Através da ferramenta “Structural Modeling” foram extraídos dados planares estruturais do vetor normal a condição de contorno tipo 3 e da superfície de potencial de nível d’água. Os dados planares estruturais do vetor normal a condição de contorno tipo 3 foram locados um a um, com azimute perpendicular à condição de contorno tipo 3 no sentido para fora do Modelo Hidrogeológico do Sinclinal Santa Rita (Figura 3A). Os dados planares da superfície potencial de nível d’água foram obtidos a partir do mergulho e azimute dos vértices dessa superfície com equipotenciais de nível d’água a cada 10 metros (Figura 3B). A fim de obter uma superfície mais suavizada que representasse o fluxo regional em profundidade superior a 300 metros, a superfície de nível d’água foi reinterpolada considerando as equipotenciais do nível d’água principais a cada 50 metros (Figura 3C). Os dados estruturais foram extraídos como pontos, para que fossem carimbados no modelo de blocos, da mesma maneira, como explicado, para a cota da altitude da topografia no APÊNDICE D.

Figura 3 – (A) Dados planares estruturais do vetor normal a condição de contorno tipo 3; (B) Dados planares estruturais da superfície de potencial de nível d'água com intervalos de cota de 10 em 10 metros; (C) Dados planares estruturais da superfície de potencial de nível d'água com intervalos de cota de 50 em 50 metros.



O elipsoide de busca da interpolação do azimute do vetor normal a condição de contorno tipo 3 possui raio de 500 metros no plano horizontal, e 50.000 metros no vetor maior vertical. O elipsoide de busca da interpolação do azimute e mergulho dos vértices da superfície de nível d'água, com equipotenciais a cada 10 metros, possui raio de 1000 metros no plano horizontal, e 50.000 metros no vetor maior vertical. O elipsoide de busca da interpolação do azimute e mergulho dos vértices da superfície de nível d'água do fluxo regional possui raio de 2000 metros no plano horizontal, e 50.000 metros no vetor maior vertical.

A atribuição da vazão de entrada e saída de água da condição de contorno em cada bloco foi feita pela variável “numeric calculation” da ferramenta “calculations e filters” do Leapfrog

Geo. As condições para o carimbo dessas vazões em cada bloco foram o aquífero que a condição de contorno fazia parte, e qual dinâmica de fluxo o aquífero fazia parte, local ou regional. A dinâmica de fluxo foi considerada local, quando mais rasa que 300 metros de profundidade em relação a topografia, e ela foi considerada regional, quando mais profunda que 300 metros de profundidade em relação à topografia. O Quadro 6 apresenta as regras de carimbagem dos blocos da condição de contorno tipo 3.

Quadro 6 - Condições para carimbo em cada bloco do modelo de blocos da vazão de entradas e saídas d'água laterais do Sistema Aquífero Sinclinal Santa Rita.

Q _{xyz} = Se	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Sabará e z<300m	→	Q Aquífero Sabará raso
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Gandarela e z<300m	→	Q Aquífero Gandarela raso
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Cauê Água Quente e z<300m	→	Q Aquífero Granit. Gnais. raso
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Cauê Rio dos Carmo e z<300m	→	Q Aquífero Cauê raso
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Cauê Água Quente e z≥300m	→	Q Aquífero Granit. Gnais. prof.
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Cauê Rio dos Carmo e z≥300m	→	Q Aquífero Cauê profundo
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Quartzítico Fissural Água Quente e z<300m	→	Q Aquífero Quartz. Fiss. raso
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Quartzítico Fissural Rio dos Carmo e z<300m	→	Q Aquífero Quartz. Fiss. prof.
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Quartzítico Fissural Água Quente e z≥300m	→	Q Aquífero Quartz. Fiss. raso
	Bloco _{xyz} ∈ Aquífero Quartzítico Fissural Rio dos Carmo e z≥300m	→	Q Aquífero Quartz. Fiss. prof.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como não há ocorrência dos aquíferos Sabará e Gandarela em profundidades maiores que 300 metros na condição de contorno tipo 3, foi carimbado nesses aquíferos apenas a vazão rasa calculada para esses.

Na condição de contorno da Falha de Água Quente, foi atribuída a vazão calculada para o aquífero com menor permeabilidade nos contatos entre Aquífero Quartzítico Fissural com Aquífero Granítico Gnáissico, e entre Aquífero Cauê com Aquífero Granítico Gnáissico. Dessa forma, o aquífero com menor permeabilidade é o limitante da vazão no fluxo subterrâneo no contrato entre essas unidades aquíferas. No contato entre Aquífero Quartzítico Fissural com Aquífero Granítico Gnáissico, foi considerada a vazão calculada para o Aquífero Quartzítico Fissural. No contato entre Aquífero Cauê com Aquífero Granítico Gnáissico, foi considerada a vazão calculada para o Aquífero Granítico Gnáissico.

ANEXO A – Análise de ensaios de bombeamento dos poços

Os relatórios de análise de ensaios de bombeamento foram extraídos do *software* AquiferTest 2016.1. Os resultados foram obtidos a partir da sobreposição da inflexão da curva do teste de bombeamento sobre a curva padrão do modelo de Neuman (1975). O software pede que a curva seja ajustada pelo coeficiente de armazenamento (*Specif Yield*). Mas o resultado do coeficiente de armazenamento só pode ser considerado em um teste de aquífero, onde a variação do nível d'água é observada em um instrumento de observação. Dessa forma, foram apenas considerados os coeficientes de armazenamento de testes de aquífero.

Após conferência dos resultados, foi constatado que a análise do ensaio de bombeamento do poço PTR-04 através do *software* AquiferTest 2016.1 foi interpretada errada. Por isso, a transmissividade e a condutividade hidráulica calculadas através do ensaio de bombeamento desse poço foram removidas dos resultados.

