

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Instituto de Geociências Programa de

Pós-Graduação em Geologia

Thomaz Augusto de Vasconcellos Vidal

MODELOS HIDROGEOLÓGICOS DE FLUXO DO HOMOCLINAL SERRA DO  
CURRAL (QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG)

**Belo Horizonte**

**2025**

Thomaz Augusto de Vasconcellos Vidal

MODELOS HIDROGEOLÓGICOS DE FLUXO DO HOMOCLINAL SERRA DO  
CURRAL (QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG)

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula

Coorientadores: Profa. Dra. Marília Carvalhode Melo e Prof. Dr. Pedro Benedito Casagrande

Belo Horizonte

2025

*“Se faltar vento, reme”*

*Amyr Klink*

## AGRADECIMENTOS

*Ao meu orientador, Professor Rodrigo, por ter me convidado a ingressar em um projeto tão desafiador, pela dedicação, compreensão e empenho desde o início. Estendo minha gratidão aos coorientadores, Marília e Pedro, pelo apoio.*

*Agradeço à UFMG e ao Instituto de Geociências pela oportunidade de realizar o mestrado. Ao Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID), pela constante troca de conhecimento e suporte fornecido.*

*Aos órgãos e instituições que contribuíram para esta pesquisa: ao IGAM e à Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais (SEMAD), pelo fornecimento de dados; à Bentley Systems, Inc., pelo acesso ao Leapfrog Geo e Hydro; e à DHI, pela liberação da licença do software Feflow. Também agradeço aos alunos de graduação que participaram ativamente no desenvolvimento do trabalho, como Gabriel, Ricardo, João, Rafael e Ícaro, além de tantos outros de iniciação científica.*

*Sou grato aos meus colegas de trabalho, família BERG, que me suportaram profissionalmente quando necessário e pelos ensinamentos com os softwares.*

*A minha amiga Ana Paula, que sempre esteve presente no desenvolvimento do projeto e ao meu lado nessa longa caminhada.*

*Aos amigos queridos, que acolheram meus desabafos e aguardaram comigo o tão esperado término do mestrado para concretizarmos planos. Em especial, àqueles que, mesmo à distância, permaneceram presentes nos momentos difíceis.*

*E, por fim, aos meus pais, Lycia e Sérgio, por me incentivarem a seguir adiante, sendo exemplos de perseverança e responsabilidade, além de fontes inesgotáveis de carinho e acolhimento. Especialmente a minha querida mãe, que passou por momentos tortuosos ao longo desta jornada, mas que nunca deixou “a peteca cair”.*

## RESUMO

O Homoclinal da Serra do Curral, situado no setor norte do Quadrilátero Ferrífero (MG), abriga o Aquífero Cauê, unidade geológica estratégica tanto para o abastecimento urbano da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) quanto para a exploração mineral. A intensa atividade minerária na região, associada à necessidade de rebaixamento do nível freático, coloca em risco a disponibilidade hídrica subterrânea, gerando potenciais conflitos pelo uso da água. Com o objetivo de caracterizar a dinâmica hidrogeológica e estimar a disponibilidade de água subterrânea, foi desenvolvido um modelo conceitual integrando dados geológicos, hidrodinâmicos e climáticos. A partir de balanços hídricos e estimativas de recarga, comparados às vazões outorgadas, identificaram-se excedentes e déficits hídricos ao longo de duas décadas, demonstrando que, em anos de estiagem, a exploração ultrapassou a capacidade de renovação do sistema. O mapeamento potenciométrico revelou conexões hidráulicas entre o Homoclinal Serra do Curral e os Sinclinais Moeda Leste e Oeste, reforçando a necessidade de gestão integrada. Buscando avaliar cenários futuros e a resposta do sistema à exploração, foi construído um modelo numérico tridimensional de fluxo subterrâneo no software Feflow, calibrado em regimes estacionário e transitório (2000-2020). As simulações preditivas para 19 anos indicaram tendência de agravamento do rebaixamento piezométrico caso se mantenham os níveis atuais de bombeamento, especialmente no Aquífero Cauê. Por outro lado, cenários de paralisação das captações apontaram potencial de recuperação gradual dos níveis d'água, ainda que de forma lenta. Os resultados obtidos demonstram a vulnerabilidade hídrica do Homoclinal Serra do Curral diante da sobreposição de pressões minerárias e urbanas, além de fornecerem subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas e estratégias de gestão sustentável dos recursos subterrâneos no Quadrilátero Ferrífero.

**Palavras-chave:** águas subterrâneas; Homoclinal Serra do Curral; modelo hidrogeológico; mineração; gestão hídrica.

## ABSTRACT

The Serra do Curral Homocline, located in the northern sector of the Quadrilátero Ferrífero (MG), hosts the Cauê Aquifer, a strategic geological unit for both the urban supply of the Belo Horizonte Metropolitan Region (RMBH) and mining activities. Intense mineral exploitation in the area, associated with continuous dewatering practices, threatens groundwater availability and creates potential conflicts over water use. Aiming to characterize hydrogeological dynamics and assess groundwater availability, a conceptual model was developed by integrating geological, hydrodynamic, and climatic data. Water balance calculations and recharge estimates, compared with licensed pumping volumes, revealed surpluses and deficits over two decades, showing that during drought years abstraction exceeded the system's renewal capacity. Potentiometric mapping indicated hydraulic connections between the Serra do Curral Homocline and the Eastern and Western Moeda Synclines, highlighting the importance of integrated management. To evaluate future scenarios and system response to groundwater exploitation, a three-dimensional numerical flow model was built in Feflow software, calibrated in both steady-state and transient regimes (2000-2020). Predictive simulations for 19 years indicated a tendency for further drawdown if current pumping rates are maintained, particularly in the Cauê Aquifer. Conversely, scenarios involving cessation of abstraction showed gradual but limited recovery of water levels. The findings demonstrate the hydrogeological vulnerability of the Serra do Curral Homocline under combined mining and urban pressures and provide a technical basis to support public policies and sustainable groundwater management strategies in the Quadrilátero Ferrífero.

**Keywords:** groundwater; Serra do Curral Homocline; hydrogeological model; mining; water management.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1. Objetivo geral.....	16
2.2. Objetivos específicos .....	16
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
<b>4. ASPECTOS FÍSICOS.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Clima.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2. Geomorfologia.....</b>	<b>28</b>
<b>4.3. Hidrologia.....</b>	<b>29</b>
<b>4.4. Geologia .....</b>	<b>30</b>
<b>4.5. Hidrogeologia.....</b>	<b>34</b>
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
5.1. Banco de Dados.....	41
5.2. Caracterização Hidrodinâmica .....	42
5.3. Balanço Hídrico de Massa .....	46
5.4. Fluxo D'água Subterrânea.....	50
5.5. Modelo Geológico.....	50
5.6. Modelo Hidrogeológico Numérico .....	51
5.6.1. Regime Estacionário .....	53
5.6.2. Regime Transitório.....	54

5.6.3. Simulações .....	55
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
6.1. Caracterização Hidrodinâmica .....	57
6.2. Balanço Hídrico de Massa .....	65
6.3. Fluxo D'água Subterrânea.....	71
6.4. Modelo Geológico.....	73
6.5. Modelo Hidrogeológico Numérico .....	75
6.5.1. Regime estacionário .....	77
6.5.2. Regime transitório .....	80
6.5.3. Simulações .....	84
6.5.3.1. Cenário A – Simulação Rebaixamento .....	85
6.5.3.2. Cenário B – Simulação Recuperação .....	88
<b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>8.AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>92</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>93</b>
<b>10. APENDICE .....</b>	<b>108</b>

## FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo abrangendo a Região Metropolitana de Belo Horizonte e evidenciando sua localização na porção norte do Quadrilátero Ferrífero no centro-sul do estado de Minas Gerais.....	14
Figura 2 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: adaptado de Endo <i>et al.</i> (2019). .....	31

Figura 3 – Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: adaptado de Ramos, Cordeiro e Fernandes, 2020.....	36
Figura 4: Ilustração de hidrograma de monitoramento de nível d’água pelo método do WTF, onde o $\Delta H$ representa a variação do nível freático e o $\Delta t$ representa a variação no tempo. Fonte: adaptado de Healy (2010). .....	48
Figura 5 - Mapas evidenciando distribuição espacial dos poços de bombeamento, instrumentos de nível d’água, nascentes/cabeceiras de drenagens e fluviômetros levantados, analisados e utilizados no estudo.....	57
Figura 6 – Mapa e seções das unidades aquíferas e condições de contorno definidas dentro da área de estudo. Disposição em planta e seções da distribuição hidroestratigráfica das três unidades aquíferas e cinco unidades não aquíferas delimitadas; Apresenta duas condições de contorno tipo 1, restrita as drenagens Rio Paraopeba e Rio das Velhas e inseridas dentro das unidades aquíferas do sistema (linhas amarelas); Apresenta seis contatos com condições de contorno tipo 2, marcando os contatos entre unidades aquíferas e aquíferos (linhas vermelhas); Apresenta condição de contorno tipo 3, tanto localizada na porção central e borda sul, evidencia continuidade das unidades permeáveis no contato entre o Homoclinal Serra do Curral e Sinclinal Serra da Moeda (linha verde), quanto na compartimentação vertical (linha tracejada preta) dentro das unidades aquíferas (linha verde sobre tracejada preta).....	61
Figura 7 - Mapa com delimitação dos polígonos da representatividade em percentual e milímetros de contribuição de cada estação pluviométrica a partir do método dos polígonos de Thiessen (1911), localização das estações, código e município sediado; Apresentação dos pluviogramas de média mensal por estação compreendidos no período de 1991 a 2020; As cores dos gráficos fazem referência a suas respectivas estações demonstradas no mapa, os eixos y referem-se a pluviometria em milímetros, enquanto os eixos x apresentam a média mensal dentro do período levantado; Gráfico do extrato do balanço hídrico, com excedente hídrico (azul) e déficit hídrico (vermelho); Gráfico do balanço hídrico sequencial mensal, apresentando evapotranspiração real e potencial, temperatura e pluviometria média neste período. ....	67
Figura 8 – Gráfico do volume da reserva renovável total (coluna azul), da reserva renovável do Aquífero Cauê (coluna azul clara) e da pluviometria total (coluna azul escura); Excedente e déficit hídrico (colunas verde e amarela, respectivamente) considerando a diferença entre a reserva renovável total e o volume de captações outorgadas (linha vermelha), todos separados pelo volume e precipitação por ano hidrológico dentro das condições de contorno definidas entre os anos de 2000 e 2020; Gráficos <i>boxplot</i> apresentando os volumes de	

bombeamento de cada unidade aquífera compreendida dentro das condições de contorno evidenciando a superioridade de bombeamento outorgado no aquífero Cauê (vermelho). ..... 70

Figura 9 - Mapa da superfície potenciométrica do Homoclinal Serra do Curral, delimitação dos contatos com o Sinclinal Moeda Oeste (laranja) e Sinclinal Moeda Leste (verde), delimitação das condições de contorno interpretadas e principais drenagens da região, rios Paraopeba e das Velhas; Seções hidrogeológicas contendo estruturas geológicas, superfície potenciométrica, compartimentação vertical, sentido de fluxo d'água subterrânea e condições de contornos; A fim de melhorar visualização nas seções H-H' e G-G' foi aplicado exagero vertical de 5 vezes, as demais seções não possuem qualquer tipo de exagero. .... 72

Figura 10 - Modelo geológico 3D com visadas em planta e NNW (exagero vertical 3x), confeccionado no *software Leapfrog<sup>TM</sup>*; Apresenta as 19 seções geológicas paralelas com espaçamento regular de 5 quilômetros e orientadas segundo NNW-SSE, aproximadamente paralelas ao mergulho das unidades geológicas, demonstram a disposição estratigráfica, falhas de empurrão, dobras estruturais e inferência do contato em profundidade (contatos tracejados)..... 74

Figura 11 - Modelo geológico 3D, confeccionado no *software Leapfrog<sup>TM</sup>*; Apresenta a divisão dos setores Oeste, Central e Leste, e respectivas compartimentações verticais, Superior e Inferior, as quais foram utilizadas na calibração do modelo hidrogeológico numérico. .... 75

Figura 12 - Modelo hidrogeológico 3D carimbado no *software Leapfrog Hydro*, apresentando a discretização da malha adotada e extensão vertical das 20 camadas com espessura média de 25m. .... 77

Figura 13 - Mapas apresentando superfície potenciométrica com distribuição espacial dos pontos observados em regime estacionário, equipotenciais, drenagens principais e setores compartimentados (Oeste, Central e Leste); Resultados estatísticos da calibração e gráfico de dispersão comparando a carga hidráulica observada e calculada. .... 78

Figura 14 - Mapa evidenciando a distribuição dos pontos de monitoramento utilizados para calibração em regime transitório e divididos nos setores, Oeste (vermelho), Central (laranja) e Leste (amarelo) ao longo do Homoclinal Serra do Curral e unidades aquíferas as quais estão instalados. Gráficos do nível d'água dos instrumentos que possuem série histórica de monitoramento ao longo do período analisado. Gráfico a esquerda referente aos instrumentos do Setor Oeste, compreendendo período monitorado entre 2012 e 2020. A direita gráfico referente aos instrumentos do Setor Central, compreendendo período monitorado entre 2005 e 2020. .... 81

Figura 15 – A) Mapa apresentando superfície potenciométrica de setembro de 2020, último dia do modelo em regime transitório, equipotenciais, drenagens principais e setores compartimentados (Oeste, Central e Leste). B) Mapa do rebaixamento calculado em regime transiente para o bombeamento entre outubro de 2000 e setembro de 2020, cujo resultado positivo (tons avermelhados) é a projeção horizontal do cone do rebaixamento do nível d’água subterrâneo nesses vinte anos monitorados. .... 83

Figura 16 – A) Mapa apresentando superfície potenciométrica de setembro de 2039 em regime simulado de rebaixamento contínuo (Cenário A), equipotenciais, drenagens principais e setores compartimentados (Oeste, Central e Leste). B); Resultante entre o regime estacionário calculado (2000) subtraído do regime simulado (2039), cujo resultado positivo (tons avermelhados) é a projeção horizontal do cone do rebaixamento do nível d’água subterrâneo nesses últimos dezenove anos simulados. .... 87

Figura 17 – A) Mapa apresentando superfície potenciométrica de setembro de 2039 em regime simulado de recuperação (Cenário B), equipotenciais, drenagens principais e setores compartimentados (Oeste, Central e Leste). B) Resultante entre o regime transitório calculado (2020) subtraído do regime simulado (2039), cujo resultado positivo é a projeção horizontal da recuperação do nível d’água subterrâneo nesses últimos dezenove anos simulados. .... 89

## TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Cauê. Fonte: Modificado de Magalhães *et al.*, 2022. .... 38

Tabela 2 - Definição e características das unidades aquíferas identificadas no Homoclinal Serra do Curral. (Seção está restrita a área do Homoclinal Serra do Curral, a profundidade pode ser maior devido a extensão de unidades aquíferas na porção centro-sul sentido Sinclinal Moeda). .... 62

Tabela 3 - Parâmetros hidrodinâmicos médios, máximos e mínimos, obtidos para as unidades contidas dentro das condições de contorno do Homoclinal Serra do Curral a partir dos testes de bombeamento analisados. .... 64

Tabela 4 - Comparação entre as taxas de recarga obtidas pelo método WTF e bibliografia. .... 68

Tabela 5 - Condutividade hidráulica e recarga calibrados por unidade aquífera compartimentada em setores. .... 80

Tabela 6 - Valores calibrados de coeficiente de armazenamento e porosidade específica.....	84
Tabela 7 - Dados das estações pluviométricas levantadas.....	108
Tabela 8 - Dados das nascentes/cabeceiras de drenagens levantadas.....	108
Tabela 9 - Dados gerais dos instrumentos de medição de vazão superficial levantados. .....	112
Tabela 10 - Poços com teste de bombeamento utilizados para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos. ....	115
Tabela 11 - Dados gerais de captações superficiais outorgadas. ....	115
Tabela 12 – Dados gerais de todos os poços outorgados e levantados.....	117
Tabela 13 - Dados gerais de todos os instrumentos de nível d'água levantados.....	127
Tabela 14 - Poços outorgados utilizados para calibração em regime transitório.....	133
Tabela 15 - Instrumentos de nível d'água utilizados para calibração em regime transitório.....	137

## 1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero, localizado na porção centro-sul de Minas Gerais, é uma das principais províncias auríferas e ferríferas do território brasileiro, cuja exploração data início no século XX. Com cerca de 7.000 km<sup>2</sup> seu nome provém da geometria das montanhas sustentadas por formações ferríferas dispostas em uma geometria quadrangular. Em 2024, o Brasil produziu 488,7 milhões de toneladas de minério de ferro, sendo Minas Gerais responsável por 39,1% do valor da produção nacional (ANM, 2024). As reservas desta região apresentam destaque mundial, colocando o Brasil como o maior produtor mundial deste metal, em 2008, a sua produção correspondeu a 19% do que foi produzido no mundo, sendo que 70% foram exploradas das minas do Quadrilátero Ferrífero (Azevedo *et al.*, 2012).

Atividades de exploração minerais e industriais são tidas como principais agentes de impactos aos aquíferos, relacionados a sua superexploração, contaminação e rebaixamento do nível d'água. Neste contexto, o Quadrilátero Ferrífero se enquadra em uma região de constante conflito ao uso da água (Mourão, 2007), pois os diversos empreendimentos destinados a extração de ferro, necessitam de grandes quantidades de água e a prática de rebaixamento dos níveis d'água é frequente nestas operações. Conflitos entre a produção de bens minerais e o uso da água atingem diversas comunidades ao redor do mundo, podendo citar na China (Sun *et al.*, 2012), na Austrália (Hancock, 1982), na América Latina (Helwege, 2015) e na África do Sul (Adler *et al.*, 2007).

Diversos autores destinaram esforços na compreensão da dinâmica hídrica do Quadrilátero Ferrífero, podendo citar os trabalhos de Da Silva, Neto & Bertachini (1994) que calcularam as reservas explotáveis das principais formações aquíferas da região; Beato, Monsore & Bertachini (2006) com o estudo sobre o potencial aquífero da região; Mourão (2007) realizou uma caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê; Mesquita *et al.* (2017), Schlumberger (2017) e Bertachini (2020) levantaram os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos da região; Dantas *et al.* (2017), caracterizou os litotipos da Formação Cauê através da relação do bombeamento de poços e a perfilagem geofísica; De Paula *et al.* (2018) realizaram uma caracterização hidroquímica e isotópica das águas na porção sudoeste do Quadrilátero; mais recentemente Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025), realizaram modelos hidrogeológicos de fluxo no Sinclinal Moeda e no aquífero Cauê nesta porção do Quadrilátero Ferrífero.

No extremo norte do Quadrilátero Ferrífero, está localizado o Homoclinal Serra do Curral, área foco deste estudo (Figura 1). Esta região enfrenta demandas significativas por água,

não apenas devido à presença de numerosos empreendimentos de mineração, mas também por sua proximidade com a terceira maior aglomeração urbana do Brasil, a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). A RMBH concentra cerca de 6 milhões de habitantes e apresenta crescimento populacional contínuo, aumentando a demanda por recursos hídricos (IBGE, 2020). O abastecimento dessa região depende majoritariamente das bacias hidrográficas dos rios das Velhas e Paraopeba, cujas vazões são sustentadas em parte pelo Aquífero Cauê. A Formação Cauê, principal unidade geológica que hospeda o minério de ferro do QF, é também a principal unidade hidrogeológica, Aquífero Cauê, responsável pelo abastecimento urbano na região, representando duas das quatro maiores captações de água do estado (Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA, 2024).

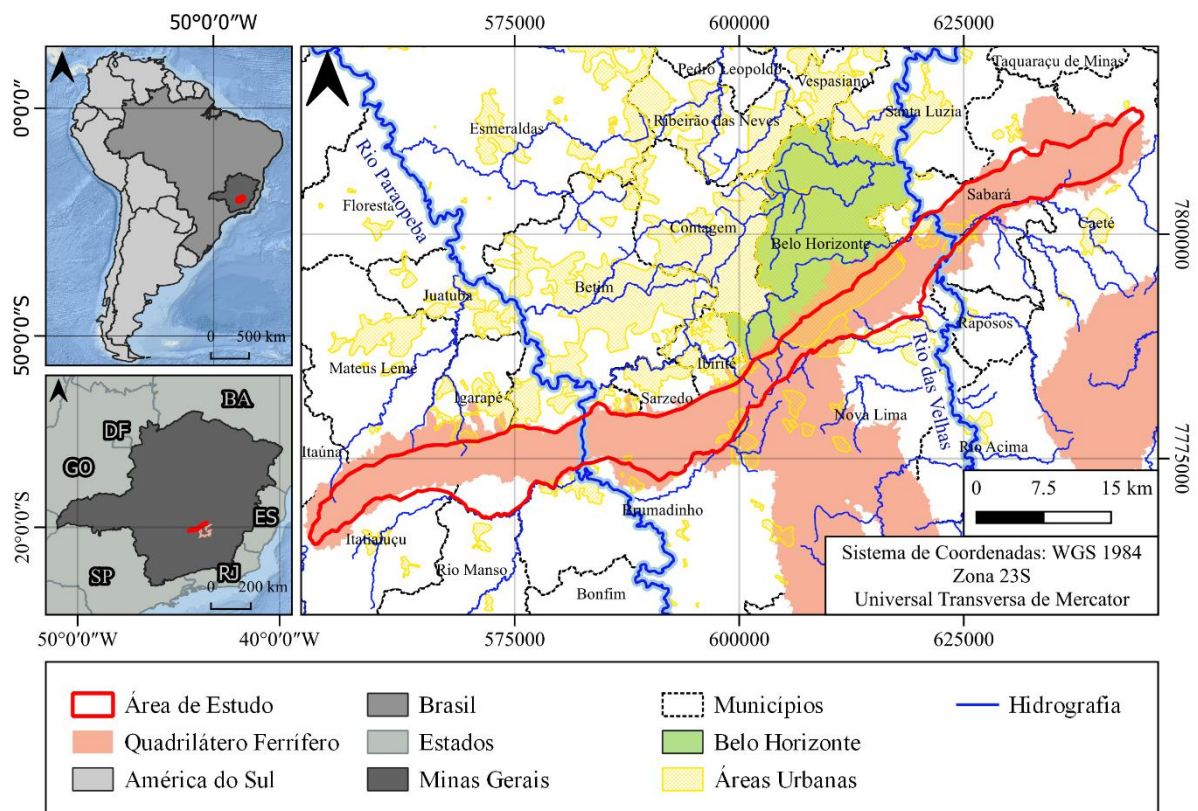


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo abrangendo a Região Metropolitana de Belo Horizonte e evidenciando sua localização na porção norte do Quadrilátero Ferrífero no centro-sul do estado de Minas Gerais.

Na Serra da Moeda (adjacente a Serra do Curral), Magalhães *et al.* (2022) apontou a importância das águas subterrâneas para a manutenção das vazões de drenagem que abastecem a RMBH ao longo do ano, totalizando um índice de fluxo base de 63%. Em relação a exploração minerária das águas, a mesma autora, calcula que ultrapassa em 50% da reserva renovável do aquífero Cauê, apontando que esta exploração afeta a reserva permanente, o escoamento superficial e as unidades adjacentes a este aquífero. Mourão (2007), calcula que na Serra da

Moeda, 54,2% de toda a água captada é destinada ao abastecimento público e 26,7% é utilizada nas atividades de mineração.

Diante desse cenário, torna-se necessário compreender de forma integrada a dinâmica hidrogeológica do Homoclinal Serra do Curral e avaliar os efeitos da exploração de água subterrânea em escala regional. A análise dos volumes de bombeamento outorgados concomitante com o volume da reserva renovável calculada para as unidades aquíferas permite calcular o excedente hídrico da área de estudo. De maneira a poder indicar possíveis impactos regionais devido à exploração e fomentar base técnica para políticas hídricas por parte dos órgãos responsáveis. Para tanto, esta dissertação foi estruturada em duas partes, sendo a primeira relacionada ao tratamento e obtenção de dados para construção do modelo conceitual da região e a segunda a realização da parte computacional para confecção de modelos tridimensionais os quais representem a geologia e a hidrogeologia da região.

A construção do modelo hidrogeológico conceitual, buscou caracterizar as unidades aquíferas e aquíferos da região, definir condições de contorno, parâmetros hidrodinâmicos e direção do fluxo d'água subterrânea, além de calcular o balanço hídrico e a reserva renovável. Essa etapa permitiu identificar excedentes e déficits ao longo de duas décadas, revelando que, em períodos de estiagem, a exploração superou a capacidade de renovação natural do sistema, além de mapear o fluxo subterrâneo e suas conexões com os Sinclinais Moeda Leste e Oeste.

Com base nesse arcabouço conceitual, foi possível realizar a modelagem numérica tridimensional do fluxo subterrâneo, desenvolvida no *software Feflow<sup>TM</sup>*. O modelo foi calibrado em regimes estacionário e transitório (2000–2020) e, posteriormente, utilizado em simulações preditivas para os 19 anos seguintes (2020–2039). Os resultados apontaram tendência de agravamento do rebaixamento piezométrico caso as atuais taxas de bombeamento sejam mantidas, enquanto cenários de paralisação das captações indicaram recuperação gradual, embora lenta, dos níveis d'água.

Assim, esta dissertação, vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao projeto de pesquisa do professor Rodrigo de Paula – 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 – busca fornecer subsídios técnicos para a gestão sustentável das águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero, em especial no Homoclinal Serra do Curral. O trabalho contou com apoio do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), da Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais (SEMAD), do Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID) e de bolsa de estudos da Coordenação de Aperfeiçoamento de

Pessoal de Nível Superior (CAPES), além da parceria com as empresas *DHI Group* e *Bentley Systems Inc.*, que possibilitaram a capacitação e o uso das ferramentas computacionais necessárias ao desenvolvimento dos modelos.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Avaliar a dinâmica hidrogeológica subterrânea de água no Homoclinal Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, MG, a partir da confecção de modelos hidrogeológicos de fluxo conceitual e numérico.

### 2.2. Objetivos específicos

- Caracterização hidrodinâmica do Homoclinal Serra do Curral, definindo as unidades aquíferas e não aquíferas da região, respectivos parâmetros hidrodinâmicos e as condições de contorno hidrogeológicas;
- Calcular o balanço hídrico de massa, estimar a recarga e a reserva renovável do sistema aquífero;
- Delimitar a rede de fluxo d'água subterrâneo tendo como base as cargas hidráulicas da região e identificar conexões hidráulicas com os Sinclinais Moeda Leste e Oeste;
- Construir modelos numéricos tridimensionais, geológico e hidrogeológicos de fluxo, definindo os compartimentos das unidades aquíferas, com calibração em regime estacionário e transitório;
- Simular cenários preditivos de exploração entre 2020 e 2039, avaliando a evolução do rebaixamento piezométrico;
- Estimar a capacidade de recuperação dos níveis d'água em cenários de paralisação do bombeamento.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos hidrogeológicos do Quadrilátero Ferrífero remontam ao século XIX, quando o Barão de Eschwege (1833) já registrava a presença de água subterrânea em escavações na região (Ramos, Cordeiro e Fernandes, 2020). A partir da década de 1990, diversas pesquisas foram realizadas para compreender a dinâmica hídrica associada às atividades minerárias e ao abastecimento público.

Os primeiros estudos sistemáticos sobre a evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero foram realizados por Dorr (1969), que descreveu de forma abrangente a fisiografia, a estratigrafia e a estruturação regional do domínio arqueano-proterozoico. O autor reconheceu a importância da deformação compressiva e das estruturas dobradas na configuração das unidades litológicas e na gênese das mineralizações ferríferas. Essa compartimentação estrutural, marcada por falhas e lineamentos regionais, também exerce influência direta sobre o comportamento hidrogeológico atual, condicionando a circulação subterrânea e a compartimentação dos aquíferos fissurais.

A arquitetura do Quadrilátero Ferrífero (QF) não é apenas um registro de deformação compressiva, mas uma complexa história de eventos de contração e extensão crustal que culminaram na configuração dome-and-keel. Marshak e Alkmim (1989) realizaram uma síntese fundamental da evolução proterozoica da porção sul do Cráton do São Francisco, identificando quatro eventos tectônicos principais subsequentes à deposição do Supergrupo Minas. O primeiro evento foi a formação de um fold-thrust belt com vergência para noroeste, essencialmente compressivo. Contudo, o segundo evento, caracterizado pela ascensão de domos de embasamento e falhas de alto ângulo, introduz o conceito de reativação crustal que culminaria na arquitetura dominante do QF. O trabalho ressalta que as estruturas de falhamento, muitas vezes reativadas, são cruciais para o entendimento da compartimentação de toda a região.

Endo (1997) aprofundou a análise dos regimes tectônicos atuantes durante o Arqueano e o Proterozoico na porção interna da placa São-Franciscana, correlacionando a evolução das estruturas regionais ao desenvolvimento das bacias do Quadrilátero Ferrífero. O autor enfatizou o papel da reativação de zonas de cisalhamento antigas na compartimentação da crosta e na gênese das megaestruturas dobradas, como o Homoclinal Serra do Curral. Essas zonas reativadas serviram como condutos preferenciais de fluxo subterrâneo e definiram heterogeneidades hidráulicas observadas nas unidades ferríferas e quartzíticas da região.

Posteriormente, Endo (2005) caracterizou a Nappe Curral como uma megaestrutura alóctone que condiciona não apenas a deformação das unidades supracrustais, mas também a distribuição das mineralizações e o comportamento hidrogeológico local. A estrutura empurrada sobre o Cráton São Francisco promoveu o desenvolvimento de zonas de cisalhamento e de fraturamento intenso, que ampliaram a permeabilidade secundária da Serra do Curral. Esse arcabouço tectônico explica, em parte, a expressiva produtividade do Aquífero Cauê em setores estruturados por falhas inversas e planos de empurrão, evidenciando o papel da tectônica na formação de zonas de alta condutividade hidráulica.

Os estudos de Dorr (1963), Marshak, Alkmim e Jordt-Evangelista (1989, 1992) e Farina et al. (2016) demonstram que a gênese da estrutura domo-e-quilha (dome-and-keel) é o produto de uma complexa sucessão de eventos de contração (Orogênese Transamazônica) e extensão crustal. As zonas de contato entre os domos do embasamento (Complexo Bação e Complexo Rio das Velhas) e as quilhas do Supergrupo Minas (onde se insere a Formação Cauê, principal aquífero, conforme Ramos et al., 2020) são, inevitavelmente, as áreas de maior fraqueza mecânica. Essas zonas, reativadas por falhas e cisalhamentos (e.g., Chemale Jr. et al., 1992), funcionam como compartimentos hidroestruturais, quebrando a continuidade hidráulica e determinando os padrões de fluxo de forma decisiva, como observado em sistemas comparáveis por Giardin e Faccini (2004).

O modelo de Chemale Jr., Rosière e Endo (1992) descreve que a compressão gerou um conjunto de falhas de empurrão (thrusts) e zonas de cisalhamento. Estas zonas, como as que margeiam o Homoclinal Serra do Curral (Alkmim e Marshak, 1998), são áreas de alta permeabilidade se estiverem abertas e não preenchidas, servindo como condutos preferenciais (pipelines) de fluxo rápido.

O evento de extensão crustal (D3), caracterizado pela formação de falhas normais e intrusões máficas (Marshak e Alkmim, 1989), reativou muitas estruturas pré-existentes. As falhas de alto ângulo podem gerar compartimentos onde o rejeito vertical é significativo, colocando diferentes litologias em contato direto (e.g., Cauê sobre o embasamento). Giardin e Faccini (2004), estudando o Aquífero Guarani, demonstraram que falhamentos com rejeito superior à espessura do aquífero compartimentam o sistema em blocos isolados, evidenciando a necessidade de mapeamento estrutural detalhado. No QF, um falhamento de alto ângulo pode ser a diferença entre um poço de alta vazão no itabirito fraturado e um poço seco no filito adjacente.

O embasamento do QF, composto pelo Complexo Bação e pelo Supergrupo Rio das Velhas (Gnaisses, Migmatitos e Greenstone Belts), define a arquitetura dos domos (estruturas elevadas) e, em termos hidrogeológicos, atua majoritariamente como um aquífugo ou aquíclode regional (Ramos, Cordeiro e Fernandes, 2020). Apesar da baixa porosidade primária, a sua condutividade hidráulica, quando existente, é quase que exclusivamente dependente da densidade e abertura de fraturas e zonas de cisalhamento. A ascensão desses corpos arqueanos, conforme descrito por Marshak, Alkmim e Jordt-Evangelista (1992), impulsionou a estruturação da bacia sedimentar e definiu os limites de fluxo dos aquíferos Paleoproterozoicos. A interface entre o embasamento e o Supergrupo Minas, frequentemente uma zona de cisalhamento milonítica (Almeida, 2004), é um ponto de extrema heterogeneidade, podendo

atuar tanto como conduto preferencial em caso de alto cisalhamento quanto como barreira hidráulica em caso de preenchimento mineral.

No contexto proterozoico, Dussin (1990) analisou a compartimentação estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais, com ênfase nos Grupos Diamantina e Conselheiro Mata. O autor destacou a natureza rifteada das bacias mesoproterozoicas, formadas por esforços distensivos no interior da placa São-Franciscana. Essa tectônica extensiva resultou na formação de sequências quartzíticas espessas e de elevado grau de anisotropia estrutural, cuja deformação posterior condicionou a permeabilidade e o fluxo de água subterrânea nos domínios elevados do Espinhaço Meridional, conectando-se com as cabeceiras hidrográficas do Quadrilátero Ferrífero.

Em estudo complementar, Dussin e Dussin (1995) propuseram um modelo de evolução geodinâmica para o Supergrupo Espinhaço, interpretando-o como resultado de sucessivos eventos extensionais entre 1,7 e 0,9 Ga, seguidos por inversão tectônica durante a Orogênese Brasileira. Segundo os autores, o adelgaçamento litosférico e a formação de riftes intracratônicos foram determinantes para o estabelecimento das principais bacias sedimentares do sudeste do Cráton do São Francisco. Esses processos não apenas moldaram a arquitetura estrutural da região, mas também definiram zonas preferenciais de recarga e circulação hídrica, hoje observadas nas porções serranas e sinclinais do Quadrilátero Ferrífero.

A Formação Moeda, basal ao Supergrupo Minas, é composta predominantemente por quartzitos e conglomerados (Dorr, 1963). O quartzito, por sua natureza sílica-cimentada, possui baixa porosidade primária. No entanto, é um corpo litológico competente que reage à tensão tectônica com o desenvolvimento de fraturas abertas e persistentes. A importância hidrogeológica do Moeda reside na sua geometria e competência: ele suporta a espessa coluna sedimentar e, em zonas de dobra ou falha (como no Homoclinal Serra do Curral), pode desenvolver um sistema de fraturas (aquífero fissural) de alto potencial, principalmente ao longo de zonas de quebra de talude e thrust faults (Alkmim e Marshak, 1998).

A Formação Cauê é a unidade de maior destaque hidrogeológico. É constituída por itabiritos e lentes de hematita, com espessuras que chegam a centenas de metros (Dorr, 1963). Seu elevado potencial não deriva da porosidade primária (que é mínima nas porções mais compactas), mas sim da porosidade secundária resultante de dois processos inter-relacionados:

As unidades superiores, como o Grupo Piracicaba, são compostas por xistos, dolomitos e filitos (Formação Gandarela) e metassedimentos clásticos (Formação Sabará). O dolomito da Gandarela é potencialmente cárstico, mas a intercalação com rochas de baixa permeabilidade, como os filitos, impõe uma compartimentação hidroestratigráfica vertical. A Formação Sabará,

sendo um corpo mais pelítico e menos competente, atua como um aquíclode/aquitardo que confina o sistema Cauê/Moeda em muitas áreas do QF (Dorr, 1963).

Ladeira et al. (2025) identificam no Sinclinal Santa Rita uma compartimentação vertical marcada pela separação entre o Sistema Aquífero Minas e o Sistema Aquífero Estrada Real, divididos pelo aquíardo Piracicaba, que limita o fluxo entre os sistemas. O Aquífero Cauê apresenta alta produtividade nas porções superiores, mas a condutividade e o armazenamento decrescem com a profundidade, caracterizando um comportamento livre a semiconfinado e definindo o limite inferior funcional do sistema em torno de 1.300 m.

O conjunto de evidências apresentadas por Dorr (1969), Chemale Jr., Rosière e Endo (1992), Rossi (2014) e Maxwell (1972) demonstra que a estruturação geológica do QF não pode ser dissociada do entendimento de sua hidrogeologia. As formações ferríferas bandadas da Formação Cauê, associadas aos quartzitos do Grupo Caraça e às rochas carbonáticas e filitos do Grupo Piracicaba, apresentam comportamento hidroestrutural diferenciado, resultante tanto das propriedades intrínsecas das litologias quanto da reativação tectônica ao longo do tempo. Esse contexto gera uma complexa rede de condutividade hidráulica, onde o fluxo subterrâneo é controlado por fraturas, planos de acamamento e contatos litológicos reativados.

A análise integrada dos estudos geológicos e hidrogeológicos do Quadrilátero Ferrífero (QF) revela que essa província constitui um sistema natural de grande complexidade, onde a interação entre fatores estruturais, litológicos e climáticos define o comportamento dos aquíferos e sua resposta às pressões antrópicas. A evolução tectono-estrutural, desde o Arqueano até o Neoproterozoico, moldou um mosaico de unidades rochosas com propriedades hidráulicas contrastantes, no qual zonas de cisalhamento, falhas inversas e dobras desempenham papel fundamental no controle da recarga e do fluxo subterrâneo.

A partir das observações estruturais de Rossi (2014) e Maxwell (1972), é possível inferir que a heterogeneidade hidráulica do QF está fortemente associada à tectônica rúptil e dúctil. A evolução deformacional gerou um mosaico de blocos estruturais, separados por zonas de cisalhamento, cuja conectividade hidráulica varia conforme o grau de fraturamento e a litologia predominante. Tal complexidade reforça a importância de estudos integrados que associem dados geológicos, geofísicos e hidrogeológicos para a compreensão da circulação subterrânea regional e da resposta do sistema frente às perturbações antrópicas.

O trabalho de Endo et al. (2019) apresenta uma atualização detalhada da cartografia geológica do Quadrilátero Ferrífero (QF) em escala 1:150.000, consolidando informações sobre a estratigrafia, estrutura e evolução tectônica da região. O mapa integra dados de mapeamentos recentes e reinterpretados, oferecendo uma visão unificada dos principais domínios

litoestruturais, como os complexos arqueanos e as sequências metavulcanossedimentares do Supergrupo Minas. A obra destaca a complexa compartimentação estrutural resultante de múltiplos eventos deformacionais, fundamentais para a compreensão da gênese mineral e da compartimentação hidrogeológica do QF, tornando-se referência essencial para estudos geológicos e ambientais na região.

Fernandes et al. (2023) apresenta um modelo estrutural detalhado para o depósito de ouro Cuiabá, localizado no Quadrilátero Ferrífero (MG), integrando análises de campo, petrografia e geocronologia. Os autores identificam um arcabouço tectônico complexo, marcado por múltiplos eventos deformacionais e zonas de cisalhamento dúcteis-rúpteis, que controlam a distribuição do minério e a compartimentação das rochas hospedeiras. O trabalho evidencia que a estruturação do embasamento e a reativação de falhas arqueanas e paleoproterozoicas exerceram papel fundamental na formação e preservação do depósito. Por analogia, as conclusões reforçam que a estruturação geológica do QF, incluindo a Serra do Curral, influencia não apenas a metalogênese, mas também o comportamento hidrogeológico, uma vez que a deformação e o fraturamento condicionam a conectividade e o fluxo subterrâneo.

Os estudos mais localizados corroboram essa complexidade. Freitas (2019), ao caracterizar a litoestratigrafia da porção central do Sinclinal Dom Bosco, detalhou a relação entre as rochas metassedimentares da Unidade Catarina Mendes e a evolução geotectônica do QF, destacando a importância da foliação milonítica e das lineações minerais na estruturação local. A atuação das zonas de cisalhamento é fundamental para delimitar os domínios de deformação e a distribuição das unidades, exercendo um controle direto sobre as propriedades de porosidade e permeabilidade secundária.

A hidrogeologia do Quadrilátero Ferrífero (QF) tem sido amplamente estudada devido à sua importância para o abastecimento hídrico da região metropolitana de Belo Horizonte e à intensa atividade minerária que demanda volumes expressivos de água. Magalhães et al. (2022) desenvolveram um modelo conceitual de fluxo hidrogeológico para o flanco leste do Sinclinal Moeda, destacando a relevância do Aquífero Cauê, que apresenta as maiores condutividades hidráulicas médias ( $9,45 \times 10^{-7}$  m/s) e as taxas de recarga mais elevadas, correspondendo a cerca de 38,7% da precipitação anual. O estudo também evidenciou o rebaixamento significativo do nível freático entre 2000 e 2019, consequência direta do aumento da exploração de água subterrânea para suprir a crescente demanda da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Mourão (2007) caracterizou o aquífero Cauê na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, destacando forte heterogeneidade e anisotropia hidráulica controladas por falhas, fraturas e variações litológicas. O fluxo subterrâneo regional é compartimentado em três blocos principais

– Homoclinal Serra do Curral, Sinclinal da Moeda e Faixa Tamanduá-Mutuca – com conectividade limitada entre eles. O estudo mostra que as zonas mais intemperizadas e friáveis possuem maior condutividade e porosidade, favorecendo o fluxo preferencial ao longo do acamamento e das descontinuidades. As taxas de recarga são elevadas (até  $\approx 38\%$  da precipitação), enquanto o Batatal atua como aquífero regional, restringindo a percolação vertical. Análises isotópicas revelam fluxos locais e intermediários com tempos de residência de 50 a 300 anos. O autor propõe um modelo hidrogeológico integrado, no qual a estrutura tectônica é o principal fator de compartimentação e controle do fluxo no aquífero Cauê.

Andrade et al. (2025) indicam que o Aquífero Cauê é a principal unidade hidrogeológica do flanco oeste do Sinclinal Moeda, devido aos seus maiores valores de condutividade hidráulica, transmissividade e armazenamento. A análise regional revelou que o aquífero Batatal, embora localmente atue como confinante, permite trocas de fluxo entre os aquíferos Moeda e Cauê, integrando-os hidráulicamente. A compartimentação em setores norte, central e sul evidenciou a influência das atividades minerárias, com rebaixamento acentuado dos níveis d'água e reversão de fluxo subterrâneo desde 2009, quando o bombeamento passou a exceder a recarga natural. O estudo conclui que a exploração contínua ameaça a reserva permanente do Cauê, podendo comprometer a sustentabilidade hídrica regional. Os autores recomendam o aprimoramento da gestão e monitoramento hidrogeológico, com políticas públicas voltadas à conservação e uso racional da água subterrânea no Quadrilátero Ferrífero, especialmente em áreas de alta pressão minerária como a Serra da Moeda.

Estudos mais recentes, como os de Mesquita et al. (2017), Schlumberger (2017) e Bertachini (2020), ampliaram o conhecimento sobre a heterogeneidade e compartimentação hidroestrutural da região, levantando parâmetros hidrodinâmicos em diferentes setores do QF. Dantas et al. (2017) correlacionaram litotipos da Formação Cauê com a resposta hidráulica de poços e perfilagens geofísicas, concluindo que litotipos hematíticos tendem a armazenar mais água do que os itabiríticos compactos. Esses resultados reforçam a importância da integração entre dados geofísicos e hidrodinâmicos para o aprimoramento dos modelos conceituais de fluxo subterrâneo.

No contexto específico do Homoclinal Serra do Curral, Bertachini (1994) descreveu as condições hidrogeológicas da Mina de Águas Claras, pioneira no registro de desaguamento sistemático da Formação Cauê. Grandchamp e Velásquez (2002) e Grandchamp (2003) estudaram a recuperação piezométrica e o enchimento da cava após o encerramento da mina, fornecendo subsídios para compreender a resiliência do sistema aquífero. Trabalhos

posteriores, como Gonçalves et al. (2019) e Borelli (2022), reforçaram a importância da aplicação de modelos de dupla porosidade (Moench, 1984) para representar a interação entre fraturas e matriz porosa nos aquíferos da região.

De Paula et al. (2018) caracterizaram hidroquimicamente e isotopicamente as águas subterrâneas do Aquífero Cauê na região de Congonhas. Eles identificaram águas predominantemente bicarbonatadas cálcicas e magnesianas, levemente ácidas a neutras. A análise isotópica revelou heterogeneidade na concentração de trítio, com valores variando de 1,8 a menos de 0,2 UT, sugerindo a coexistência de águas modernas e antigas. Este estudo também destacou o papel das falhas estruturais no controle do fluxo subterrâneo, reforçando a complexa interação entre estruturas geológicas e o regime hidrodinâmico regional.

Para a caracterização hidroestrutural do Quadrilátero Ferrífero (QF) e a posterior modelagem do fluxo, é imperativo utilizar a terminologia e os modelos que descrevem o comportamento hidrodinâmico em rochas cristalinas e metassedimentares. Lohman (1972) estabeleceram as definições conceituais fundamentais de termos técnicos em águas subterrâneas que guiam a ciência moderna, como condutividade hidráulica e transmissividade. A correta aplicação desses conceitos em ambientes geologicamente complexos, como o QF, permite a quantificação dos parâmetros hidrogeológicos e a comparação entre diferentes domínios estruturais.

No contexto da caracterização hidrodinâmica, Kruseman e De Ridder (1990) enfatizam a relevância dos ensaios de bombeamento como ferramenta fundamental para a determinação dos parâmetros hidráulicos de aquíferos. Esses testes permitem estimar a transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e o coeficiente de armazenamento (S), os quais são essenciais para a calibração de modelos numéricos de fluxo. Em meios fraturados como os do QF, os autores destacam que as interpretações devem considerar a anisotropia e a dupla porosidade, já que o comportamento hidráulico resulta tanto da matriz rochosa quanto da rede de fraturas interconectadas.

A metodologia de Kruseman e De Ridder (1990) tem sido amplamente utilizada em estudos recentes no Quadrilátero Ferrífero para a caracterização da Formação Cauê e de outras unidades ferríferas. A análise conjunta de testes de bombeamento e perfisagens geofísicas permite delinear zonas de maior transmissividade associadas a estruturas tectônicas, confirmando a correlação entre o arcabouço estrutural e a produtividade hidrogeológica. Assim, o conhecimento detalhado dos parâmetros hidráulicos torna-se indispensável para o delineamento de zonas de recarga e descarga, bem como para a gestão racional da exploração subterrânea.

Do ponto de vista da modelagem hidrogeológica, Enemark et al. (2019) realizaram uma ampla revisão sobre a construção e o teste de modelos conceituais, destacando que esses representam hipóteses estruturadas sobre o funcionamento de sistemas subterrâneos. Os autores enfatizam que a incerteza conceitual é uma das principais fontes de erro em modelos numéricos e que abordagens multimodelo, com hipóteses alternativas, são fundamentais para reduzir tais incertezas. Essa perspectiva metodológica tem sido incorporada em estudos recentes do Quadrilátero Ferrífero, nos quais modelos conceituais integrados são utilizados como base para simulações numéricas de fluxo, calibradas a partir de dados hidrogeológicos e estruturais de alta resolução.

A quantificação da recarga hídrica é um elemento chave na construção de modelos hidrogeológicos conceituais e numéricos, sendo essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, conforme enfatiza Brassington (2017). A recarga, definida como a água que se move abaixo da zona não saturada para se juntar ao aquífero, é influenciada por uma série de fatores, incluindo as características físicas do solo, cobertura vegetal, uso do solo, topografia e clima. O autor destaca que, no estudo de campo, o conhecimento da recarga é parte fundamental da etapa de *desk study*, auxiliando na identificação dos aquíferos e na compreensão dos níveis de água subterrânea.

O processo de recarga pode ser estimado por diversas metodologias, incluindo balanço hídrico, métodos de precipitação-recarga e o uso de traçadores. No entanto, a variação espacial da recarga, particularmente em ambientes geologicamente heterogêneos como o QF, representa um desafio significativo, sendo que a recarga focalizada em áreas de depressão, devido ao escoamento superficial de áreas circundantes, é um fator local importante que afeta a variabilidade do processo. Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998) detalham planilhas para o cálculo de balanços hídricos (Normal, Sequencial) que permitem estimar a recarga, embora o balanço seja sensível à escala. Delin et al. (2007) compararam estimativas de recarga entre escalas locais e regionais, demonstrando que a escolha da metodologia e a heterogeneidade espacial causam grandes divergências. No QF, a recarga sobre os Domos (embasamento) é mínima, enquanto as áreas de afloramento do quartzito e do itabirito fraturado (quilhas) podem concentrar recarga elevada. A modelagem precisa da recarga exige a desagregação do QF em unidades hidrogeológicas funcionais, que correspondem diretamente aos compartimentos estruturais.

Diversos estudos complementares reforçam a importância de compreender os fatores ambientais e estruturais que controlam o comportamento hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero e suas áreas adjacentes. A pesquisa de Alvares et al. (2014) fornece uma base climática essencial ao apresentar o mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil, com

resolução espacial aprimorada, permitindo uma análise detalhada das variações microclimáticas que influenciam diretamente a recarga de aquíferos e o balanço hídrico regional. De acordo com o estudo, a região central de Minas Gerais, onde se insere o Quadrilátero Ferrífero, enquadra-se predominantemente em climas do tipo Cwa e Cwb, caracterizados por verões úmidos e invernos secos — condições que controlam sazonalmente a infiltração, a evapotranspiração e o fluxo subterrâneo.

No que se refere às condições climáticas e sua influência sobre o ciclo hidrológico, registros históricos como o *Monthly Weather Review* (Thiessen & Alter, 1911) fornecem evidências de variações significativas nos padrões de precipitação e temperatura em regiões áridas e montanhosas. Esses estudos demonstram que fatores como altitude, relevo e distância de corpos d'água determinam a distribuição espacial da precipitação e, conseqüentemente, a disponibilidade hídrica. A compreensão dessas variações é crucial para a calibração de modelos de recarga aquífera, especialmente em sistemas heterogêneos como os do QF, onde a infiltração e o armazenamento de água subterrânea são fortemente controlados por descontinuidades estruturais. Esses dados históricos, embora oriundos de outro contexto geográfico, ilustram a importância de séries temporais climáticas na definição de parâmetros de recarga e na previsão de cenários de disponibilidade hídrica. A incorporação de análises pluviométricas e evapotranspirativas, aliada a registros isotópicos e hidrodinâmicos, possibilita um entendimento mais robusto das respostas do sistema aquífero às variações sazonais e climáticas de longo prazo.

O contexto geomorfológico do QF, caracterizado por serras como a do Curral, da Moeda e do Caraça, condiciona tanto os processos erosivos quanto a distribuição das nascentes e aquíferos. Os estudos de geomorfologia apresentados no relatório da CPRM (2005) sobre a Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul RMBH) destacam que a região é caracterizada por relevos montanhosos, fortemente estruturados pelo substrato litoestrutural, com domínio de serras quartzíticas e vales metassedimentares profundos. Essa compartimentação topográfica condiciona a direção do fluxo subterrâneo e o armazenamento de água nas unidades aquíferas fraturadas.

Conforme proposto por Ruchkys et al. (2009), o QF apresenta notável relevância não apenas pela riqueza mineral, mas também pelo patrimônio geológico e cultural que fundamenta a proposta de criação do Geoparque Quadrilátero Ferrífero, sob os auspícios da UNESCO. Tal reconhecimento visa promover a integração entre geoconservação, educação ambiental e desenvolvimento sustentável. Os autores ressaltam que a configuração geológica do QF — marcada pela presença de terrenos arqueanos do Supergrupo Rio das Velhas e sucessões

paleoproterozoicas do Supergrupo Minas – sustenta uma das mais ricas províncias minerais do mundo.

O conceito de manejo integrado da água subterrânea, discutido por Lohman *et al.* (1972), é diretamente aplicável ao Quadrilátero Ferrífero, onde a coexistência entre mineração, urbanização e conservação ambiental requer abordagens multidisciplinares. A integração entre geologia estrutural, hidrodinâmica e vulnerabilidade, como propõem Rossi (2014) e Guimarães (2024), constitui um caminho eficaz para o desenvolvimento de modelos conceituais robustos. Esses modelos podem subsidiar decisões de gestão hídrica, estimar cenários de exploração e orientar a recuperação de sistemas afetados por atividades minerárias.

A gestão integrada dos recursos hídricos no Quadrilátero Ferrífero requer a combinação de estudos hidrogeológicos, hidrológicos e climáticos, especialmente em áreas com sobreposição entre mineração, urbanização e áreas de recarga. Nesse sentido, os trabalhos recentes de Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025) reforçam a necessidade de se estabelecer políticas de controle da exploração subterrânea associadas ao monitoramento contínuo do nível freático e à implementação de metodologias de recarga artificial em zonas críticas. A adoção de estratégias sustentáveis, considerando os balanços hídricos integrados e a variabilidade climática regional, é fundamental para garantir a segurança hídrica da Região Metropolitana de Belo Horizonte e a preservação dos aquíferos do Quadrilátero Ferrífero.

Os conflitos decorrentes da interação entre a atividade minerária e o uso dos recursos hídricos constituem uma problemática de alcance global, amplamente documentada na literatura científica. Na China, Sun *et al.* (2012) analisam os efeitos da mineração de carvão em regiões caracterizadas pela escassez hídrica, evidenciando o rebaixamento dos lençóis freáticos e a contaminação das águas subterrâneas, fatores que comprometem tanto o abastecimento humano quanto a produção agrícola. Na Austrália, Hancock (1982) destaca que a mineração em áreas áridas demanda volumes expressivos de água e altera significativamente a dinâmica hidrológica local, ocasionando processos de salinização e gerando conflitos entre o setor minerário e os demais usuários desse recurso. Na América Latina, Helwege (2015) observa que a expansão da mineração em países como Peru e Chile intensifica disputas socioambientais pelo uso da água, sobretudo em contextos marcados por desigualdade social e fragilidade regulatória. Por sua vez, na África do Sul, Adler *et al.* (2007) demonstram que a exploração de ouro e carvão tem resultado em drenagem ácida e deterioração da qualidade dos corpos hídricos, com impactos diretos sobre o abastecimento das comunidades e sobre os ecossistemas aquáticos. Em conjunto, esses estudos reforçam que a atividade minerária, embora de elevada importância

econômica, constitui um vetor de pressão sobre os recursos hídricos, demandando estratégias integradas de gestão ambiental e governança hídrica para mitigação de seus efeitos.

Zupo *et al.* (2025) concluíram que os aquíferos Cauê e Gandarela apresentam alta vulnerabilidade à contaminação, devido à elevada permeabilidade e à reduzida espessura das coberturas detríticas. As adaptações dos métodos SINTACS, EPIK, GOD e DRASTIC mostraram-se mais adequadas ao contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, permitindo melhor representar as condições de recarga e fluxo desses aquíferos.

A relevância do estudo da compartimentação hidroestrutural do QF se manifesta diretamente no contexto de segurança hídrica para o abastecimento público na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e municípios adjacentes. A Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA MG) tem um histórico de utilização de água subterrânea como fonte complementar ou principal para o abastecimento urbano no estado. Os dados levantados por Sadala e Gonçalves (1980), em um relato da experiência inicial da COPASA, destacam que a taxa de sucesso na perfuração de poços tubulares profundos no estado era de 73%, demonstrando o potencial e a viabilidade técnica da exploração desse recurso para suprir as sedes municipais. Apesar das questões de qualidade observadas em outras regiões do estado, o QF, com seus aquíferos em rochas metassedimentares, continua a ser uma fonte estratégica.

Em tempos mais recentes, a importância do recurso se intensificou, especialmente diante das exigências de universalização do saneamento. O relatório da COPASA MG (2021) ratifica que, em face dos desafios impostos pelo Novo Marco Regulatório do Saneamento Básico (Lei Federal n. 14.026/2020), os projetos de expansão e o gerenciamento estratégico de fontes hídricas, incluindo as subterrâneas, são cruciais para o cumprimento das metas de acesso aos serviços de água. Portanto, a otimização da exploração dos aquíferos estruturalmente controlados do Quadrilátero Ferrífero está diretamente ligada à segurança hídrica e ao planejamento de longo prazo.

#### 4. ASPECTOS FÍSICOS

Neste tópico estão dispostos os aspectos físicos da área de estudo, o que inclui clima, geomorfologia, hidrologia, geologia regional e hidrogeologia regional do Homoclinal Serra do Curral.

#### 4.1. Clima

Levando em consideração a classificação climática estabelecida por Köppen e Geiger (1928), posteriormente atualizada por Álvares (2014), o clima predominante no Quadrilátero Ferrífero pode ser categorizado como Cwb, apresentando, duas estações bem definidas, inverno e verão, respectivamente apresentando um clima seco e frio e quente e úmido, podendo ser chamada de subtropical úmido.

Este padrão climático pode ser observado na estação Belo Horizonte (83587) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), apresentando duas estações bem definidas, como citado anteriormente, sendo um período de chuvas se estendendo de outubro a março com seu pico em dezembro/janeiro e um período de estiagem se iniciando em abril e terminando em setembro, com seu pico em julho/julho (Álvares, 2014; INMET, 2024).

Nimer (1989) calcula a temperatura média anual de 18°C a 20°C. Estas médias, coincidem com as observadas por Álvares (2014) na sua classificação e acompanha a precipitação nas normas climatológicas (INMET, 2024) com temperatura média mais baixas entre abril e setembro (18,16°C) e precipitações de 97 mm, e temperaturas médias mais altas entre outubro e março (21,64°C).

A precipitação anual do ano 2024 totalizou 1501,6 mm, conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025) e do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), sendo 93,54% deste valor concentrado na estação chuvosa e 6,46% na estação seca. Estes valores são coincidentes com a média pluviométrica de 1491,4 mm ao ano, calculada por Nery (2016) para o Quadrilátero Ferrífero. Cabe destacar que a amplitude das chuvas pode variar de um ponto a outro e o clima da região sofre interferência das porções de alta topografia, funcionando como barreiras para passagem de umidade (Jardim & Galvani, 2022). Localmente, estas variações de altitude podem criar condições favoráveis para o surgimento de microclimas, diferindo regiões próximas em relação à temperatura e umidade (Dutra *et al.*, 2002).

#### 4.2. Geomorfologia

Dorr (1969), um dos primeiros autores a descrever sobre a geomorfologia da região, caracteriza o Quadrilátero Ferrífero pela ocorrência de cristas altas e irregulares, cadeias de *hogback's*, platôs, cânions profundos e vales amplos abertos. As cristas descritas por Dorr, são as serras que delimitam o Quadrilátero Ferrífero, formadas por camadas de quartizito e itabiritos, em posições topográficas dominantes em relação às depressões abertas nas rochas

graníticas, gnáissicas e xistosas (Medina *et al.*, 2005). Estes contrastes de elevação estão relacionados aos eventos de deformação sofridos na região, apresentando altimetria média em torno de 1100 metros, podendo chegar a 2070 metros em regiões como da Serra da Caraça e 680 metros no Fecho de Sabará (Bezerra, 2014).

Varajão (1991) defende a geologia estrutural da região como fator primordial na geometria do relevo, o autor, propõem uma separação simplificada para o relevo da região, dividindo em três grupos principais: Altos topográficos, controlado pelas rochas quartzíticas e ferruginosas; Meio das serras, com seus xistos e filitos; e a base do relevo, composta por rochas vulcânicas, granito-gnaiss. Neste contexto, pode-se perceber que a litologia é um fator primordial no controle erosivo e de inclinação da região (Bezerra, 2014), onde os locais que possuem maiores altimetrias e declividades, apresentam rochas mais resistentes a ações intempéricas, em contraposição a regiões associadas aos complexos metamórficos, menos resistentes e consequentemente mais aplainados (Harder & Chamberlin, 1915).

A Serra do Curral, localizada no extremo norte do Quadrilátero Ferrífero, é um complexo montanhoso com cristas principais, as quais atingem até 1400 m de altitude (Medina, Dantas & Saadi, 2005). Trabalhos de Medina, Dantas & Saadi (2005) indicam que a Serra do Curral é um extenso *hogback*, formado pelo remanescente de um flanco de dobra sinclinal invertida das rochas do Supergrupo Minas sobre rochas graníticas na região da Depressão Periférica de Belo Horizonte.

### 4.3. Hidrologia

A área de estudo está localizada na bacia do rio São Francisco, especificamente na parte alta das sub-bacias do rio das Velhas e do rio Paraopeba, que são os principais afluentes da referida bacia. Esses cursos d'água desempenham um papel central no fornecimento hídrico regional e são fundamentais para o equilíbrio hidrográfico local.

A Bacia Hidrográfica do rio das Velhas integra uma área de 27.850 km<sup>2</sup> abrangendo 51 municípios. Suas nascentes localizam-se nos limites da Área de Proteção Ambiental da Cachoeira das Andorinhas, no Município de Ouro Preto, sendo o maior afluente em extensão da Bacia do rio São Francisco, totalizando aproximadamente 761 km (CBHSF, 2024).

Já a Bacia do rio Paraopeba abrange uma área de 13.643 km<sup>2</sup>, totalizando 48 municípios. Sua nascente localiza-se no município de Cristiano Ottoni, tendo como seus principais afluentes os rios Águas Claras, Macaúbas, Betim, Camapuã e Manso, abrangendo uma área aproximada de 510 km, desaguando no lago da represa de Três Marias, em Felixlândia – MG (Matos & Dias, 2011).

Os principais afluentes desses dois rios compreendem o rio Manso, rio Águas Claras, ribeirão Arrudas, córrego Barreiro, córrego Taquaral e córrego Gordura. Estes contribuem significativamente para o regime hídrico das sub-bacias do rio das Velhas e do rio Paraopeba, desempenhando um papel essencial na dinâmica hidrológica e na sustentabilidade dos recursos hídricos na região em estudo.

Segundo o CBH rio das Velhas (2019) e ARSAE-MG (2013), os rios das Velhas e Paraopeba eram responsáveis pelo abastecimento integral da população da RMBH, composta por aproximadamente 6 milhões de habitantes. Destes, 60% do suprimento provinha do Rio das Velhas e 40% do Rio Paraopeba. Em resposta à crescente demanda, em 2018 foi solicitada a declaração de áreas de conflito pelo uso da água na região do Alto rio das Velhas. Esta situação se agravou em 2019 com o rompimento da Barragem córrego de Feijão, localizada no município de Brumadinho, o qual comprometeu significativamente o abastecimento proveniente da sub-bacia do rio Paraopeba. Isso resultou em uma sobrecarga adicional no sistema de abastecimento proveniente da sub-bacia do rio das Velhas (Magalhães *et al.*, 2022).

#### 4.4. Geologia

O Quadrilátero Ferrífero é uma renomada província metalogenética situada no extremo sudeste do Cráton do São Francisco. Composta por unidades tectônicas formadas por litologias arqueanas e paleoproterozóicas, esta região possui uma complexa história tectônica, marcada por dois eventos de deformação significativos na estruturação local. A orogênese Transamazônica (2,1 - 2,0 Ga) foi responsável pelo levantamento dos domos granito-gnáissicos, enquanto a orogênese Brasiliana/Pan-Africana (0,8 - 0,6 Ga) intensificou a deformação e o cavalgamento dos cinturões e quilhas ao redor das estruturas dômicas (Chemale Jr., Rosiere & Endo, 1994), características típicas dos *Greenstone Belts*.

Assim, a configuração principal do Quadrilátero é delineada por megadobras sinformes e antiformes truncadas por falhas de empurrão, predominantemente orientadas no sentido N-S com vergência oeste (Chemale Jr., Rosiere & Endo, 1994). Endo *et al.* (2019) define dez estruturas geotectônicas na região do Quadrilátero Ferrífero: Sinclinal Gandarela, Homoclinal Serra do Curral, Sinclinal Mariana, Sinclinal Vargem do Lima, Sinclinal Moeda, Anticlinal Santo Antônio, Anticlinal Furquim, Sinclinal Ouro Fino, Sinclinal Santa Rita e Sinclinal Dom Bosco.

Diversos autores realizaram as primeiras definições da estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero, como Harder & Chamberlin (1915) e Dorr *et al.* (1969). Dorr *et al.* (1969), em seu trabalho seminal, elaborou um complexo mapa geológico da região que serviu como base para

versões mais modernas com uma estratigrafia muito semelhante ao que se conhece atualmente. Os limites propostos por Dorr *et al.* (1969), assim como a litoestratigrafia e a estrutural do Quadrilátero Ferrífero, foram revisados por Endo *et al.* (2019), reconhecendo novas feições e características para a região (Figura 2).

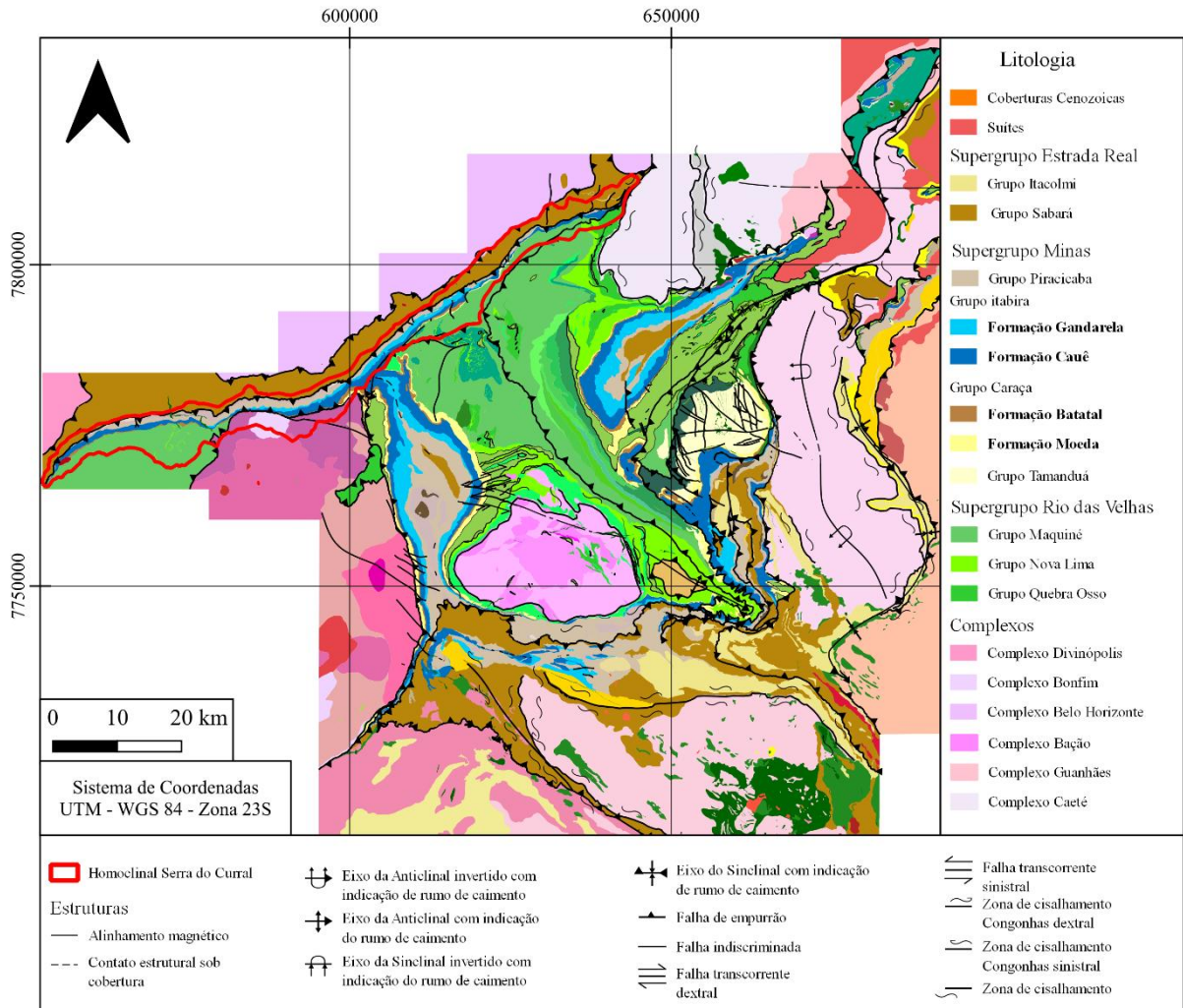


Figura 2 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: adaptado de Endo *et al.* (2019).

Endo *et al.* (2020) descreve, da base para o topo: Complexos metamórficos; Supergrupo Rio das Velhas; Supergrupo Minas; Supergrupo Estrada Real; Supergrupo Espinhaço; Unidade sedimentares.

Na base da estratigrafia estão presentes os Complexos metamórficos (3,2 Ga – 2,6 Ga), compostos por ortognaisses bandados, com corpos localmente anfibolíticos, ortognaisses finamente laminados, migmatitos, corpos intrusivos granitoides, veios aplíticos e diques máficos (Endo *et al.*, 2019). O mesmo autor ainda identifica diferentes complexos, sendo os

mais discutidos em diversas bibliografias o Belo Horizonte, Bação, Divinópolis, Bonfim, Guanhões, Caeté e Santa Bárbara.

Após um deslocamento basal e em uma discordância erosiva, o Supergrupo Rio das Velhas se apresenta sobre o embasamento, com idade entre 2,8 e 2,68 Ga (Lobato *et al.*, 1998), subdividido por Endo *et al.* (2020) em três grupos: Na base o Grupo Quebra Osso; no meio Grupo Nova Lima; e no topo Grupo Maquiné. O primeiro, é composto por rochas vulcânicas ultramáficas localizadas na borda leste do Quadrilátero. O Grupo Nova Lima é composto por rochas metavulcanosedimentares químicas, clásticas, e clásticas marinhas, com xistos, xistos cloríticos e filitos, subordinadamente ocorrem lentes de filito carbonosos, formações ferríferas, dolomitos e quartzo-ankerita xisto (Lapa seca), metagrauvas e quartzitos, todos de forma descontínua. O Grupo Maquiné, formado por metasedimentares não marinhas, é subdividido em duas formações: Palmital e Casa Forte. O primeiro é composto por sericita filito, quartzo-clorita xista e xistos, enquanto o segundo por quartzitos, metaconglomerados e metadiamicitos.

Acima da estratigrafia, em discordância erosiva com o Supergrupo Rio das Velhas, tem-se o Supergrupo Minas, de idade Paleoproterozóica (2584 Ma (Hartmann *et al.* 2006) e 2420 Ma (Babinski *et al.* (1995))). Este supergrupo é muito bem descrito por Dorr *et al.* (1969), o subdividindo em quatro grupos: Grupo Tamanduá, Grupo Caraça, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba.

O Grupo Tamanduá é composto por Quartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas, xistos quartzosos e argilosos, xistos filíticos e quartzosos, xistos ferruginosos e formação ferrífera dolomítica (Endo *et al.* 2019). O Grupo Caraça possui Quartzitos, quartzitos sericíticos, filitos e metaconglomerados da Formação Moeda e filitos com BIF's, metacherts, filitos grafitosos e mármore dolomíticos subordinados. O Grupo Itabira possui rochas itabiríticas, itabiríticas dolomíticas, itabiríticas anfíbolíticas e, subordinadamente, rochas filíticas, quartzíticas e mármore da Formação Cauê, seguidas por mármore dolomíticos, filitos dolomíticos, dolomitos ferruginosos, filitos e itabiritos da Formação Gandarela. Já o Grupo Piracicaba é composto por quartzitos ferruginosos, filitos prateados e, subordinadamente, dolomitos, xistos sericíticos e metaconglomerados da Formação Cercadinho. Em contato gradacional com a Formação Fecho do Funil com filitos, filitos dolomíticos, metassiltitos, dolomitos quartzosos e argilosos. No topo com ortoquartzitos da Formação Taboões e filitos grafitosos, filitos e xistos da Formação Barreiro (Dorr *et al.*, 1969).

Subindo na estratigrafia, temos o Supergrupo Estrada Real (2,0 Ga – 1,7 Ga), proposto inicialmente por Teixeira da Costa (1961), redefinido por Almeida *et al.* (2005) e incluído por Endo *et al.* (2020), sendo composto pelos Grupos Barbacena, Sabará e Itacolomi.

O Grupo Barbacena é composto por xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xisto magnésíferos, micaxistos, quartzitos feldspáticos, filitos intercalados com anfíbolitos e metaultramáficas, sendo ele correlativo ao Grupo Sabará, ambos localmente, marcando a base do Supergrupo Estrada Real (Endo *et al.*, 2019).

O Grupo Sabará possui rochas do tipo clorita xisto, mica xisto intercaladas com metagrauvascas, quartzitos, formações ferríferas bandadas, xisto quartzoso, metapelitos, metassiltitos, filito grafitoso e lentes de dolomito, meterritimito, quartzitos ferruginosos, dolomitos, metediamictito e metachert, além de metavulcânicas felsicas e ultramáficas (Endo *et al.* 2019) subordinadas. Pomerene (1964) e Endo *et al.* (2019) descrevem contatos gradacionais, erosivos ou por falha entre as Formações deste grupo em diferentes localidades. A Formação Córrego do Germano (Endo *et al.*, 2019) é composto por formações ferríferas bandadas granulares e quartzitos ferruginosos e marcam a base do super Grupo.

Já o Grupo Itacolomi, apresenta duas formações: Formação Florália e Pico do Itacolomi. As rochas que compõe este grupo são ortoquartzitos e quartzitos estratificados com trilhas de óxido de ferro, metaconglomerados com seixos, calhaus e raramente matacões de veio de quartzo, quartzitos, itabiritos e filitos (Endo *et al.*, 2019).

Durante o mesoproterozóica (1,8 Ga – 1,0 Ga), um processo de *rifting* se desenvolveu resultando na instalação de uma ampla bacia onde foram depositados os sedimentos que compõe o Supergrupo Espinhaço (Dussin & Dussin, 1995). As rochas existentes neste supergrupo correspondem a espessas camadas de quartzito com conglomerados e intercalações de sericita-xistos (Garcia & Uhlein, 1987). Estes metassedimentos foram divididos em oito formações (Pflug, 1968), reunidas nos Grupos Diamantina e Conselheiro Mata (Dossin *et al.*, 1990).

Cinco formações representam as Unidades Cenozoicas, elas são: Fonseca, Chapa da Canga, Cata Preta, Fazenda Gandarela e Gongo Soco. A Formação Fonseca é composta por argilitos, siltitos, arenitos, linhitos e conglomerados (Maxwell, 1972). A Chapada de Canga com ortoconglomerados oligomíticos com seixos de itabirito em matriz ferruginosa associado a depósitos de leques aluviais (Dorr, 1969). A Formação Cata Preta é composta por arenitos maciços avermelhados e diamictitos polimíticos relacionados a leques aluviais (Castro & Ferreira, 1997). Já a Formação Gongo Soco possui 5 fácies: Diamictitos com clastos ferruginosos e quartzo; Brechas de itabirito e hematita; Diamictitos com calhaus itabiríticos em matriz argilosa; Arenitos amarelados; Diamictitos com fragmentos itabiríticos e hematíticos em matriz hematítica (Endo *et al.* 2019).

Na região duas Suítes são descritas. A Suíte ultramáfica Santa Rita de Ouro Preto, descrita por Endo *et al.* (2019), com idade relacionada pós Supergrupo Minas devido a sua relação de corte com as formações deste super Grupo, esta suíte apresenta um batólito na região de Santo Antônio do Pirapetinga, unido a *sotcks* e diques espalhados na área. Litologicamente, são compostos por estaetitos e serpetinitos (Jordt-Evangelista & Silva, 2005). A segunda Suíte, posterior aos eventos da primeira, apresenta diques máficos nos xistos cloríticos do Grupo Sabará e complexo metamórfico de Santo Antônio do Pirapetinga (Raposo, 1991), além de um batólito. A direção desses diques são majoritariamente NW-SE, mas outros *trends* podem ser observados (Endo *et al.* 2019).

As unidades predominantes na área de estudo que contribuem para a estruturação do homoclinal da Serra do Curral são principalmente as rochas do Supergrupo Rio das Velhas e do Supergrupo Minas. Nas áreas mais baixas a sudeste e sudoeste da serra, afloram as rochas do Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas). Já na base e nos flancos da Serra do Curral, encontram-se as rochas das formações Moeda e Batatal, pertencentes ao Grupo Caraça (Supergrupo Minas). Por outro lado, as rochas do Grupo Itabira (Supergrupo Minas), especialmente os itabiritos da Formação Cauê e as coberturas lateríticas associadas, ocupam as porções mais elevadas e delimitam a crista da serra.

#### 4.5. Hidrogeologia

A história da hidrogeologia no Quadrilátero Ferrífero remonta ao século XIX, antes mesmo de a hidrogeologia se consolidar como uma ciência. O barão de Eschwege foi um dos pioneiros nesse campo, visitando Minas Gerais e registrando os primeiros relatos sobre a presença de água nas escavações da região, como documentado na obra histórica "Pluto Brasiliensis" (Eschwege, 1833 *apud* Ramos, Cordeiro e Fernandes, 2020).

No VIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, realizado em 1994, Silva apresentou o estudo intitulado "Potencial das Águas Subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero" (Silva *et al.*, 1994). O trabalho apontou que o principal aquífero da região está localizado na Formação Cauê, composto por hematitas e itabiritos, os autores apontam para uma reserva hídrica de  $41.280 \times 10^6 \text{ m}^3$  e uma reserva explorável de  $4.129 \times 10^6 \text{ m}^3$ , em uma área de  $1.032 \text{ km}^2$ , com espessuras saturadas podendo atingir 400 m. Silva *et al.* (1994) ainda cita o potencial aquífero nos quartzitos ferruginosos da formação Cercadinho e/ou no Grupo Piracicaba indiviso, e nos quartzitos da Formação Moeda.

Mais especificamente na porção norte do Quadrilátero Ferrífero, na região onde se encontra o Homoclinal Serra do Curral (Mina de Águas Claras), Bertachini (1994), assim como

Silva *et al.* (1994), destacou as mesmas unidades como os principais potenciais aquíferos, apontando que as demais unidades se comportam como aquícludes ou apresentam zonas aquíferas localizadas.

Diversos autores demandaram esforços na caracterização das unidades aquíferas existentes no Quadrilátero Ferrífero, dentre eles, podemos citar Beato, Monsores & Bertachini (2006), Mourão (2007), Bertachini (2020), Magalhães *et al.* (2022), Andrade *et al.* (2025). Com base em parâmetros hidrodinâmicos fornecidos por mineradoras existentes na região, Braz *et al.* (1998) identificou apenas como aquíferos as unidades pertencentes as Formações Cauê, Cercadinho, Gandarela e Moeda. Posteriormente, Beato, Monsores & Bertachini (2006) e Mourão (2007) consolidam melhor os aquíferos e aquícludes presentes na região. A Figura 3 apresenta os sistemas hidrogeológicos, e sua distribuição no Quadrilátero Ferrífero segundo Ramos, Cordeiro e Fernandes (2020).

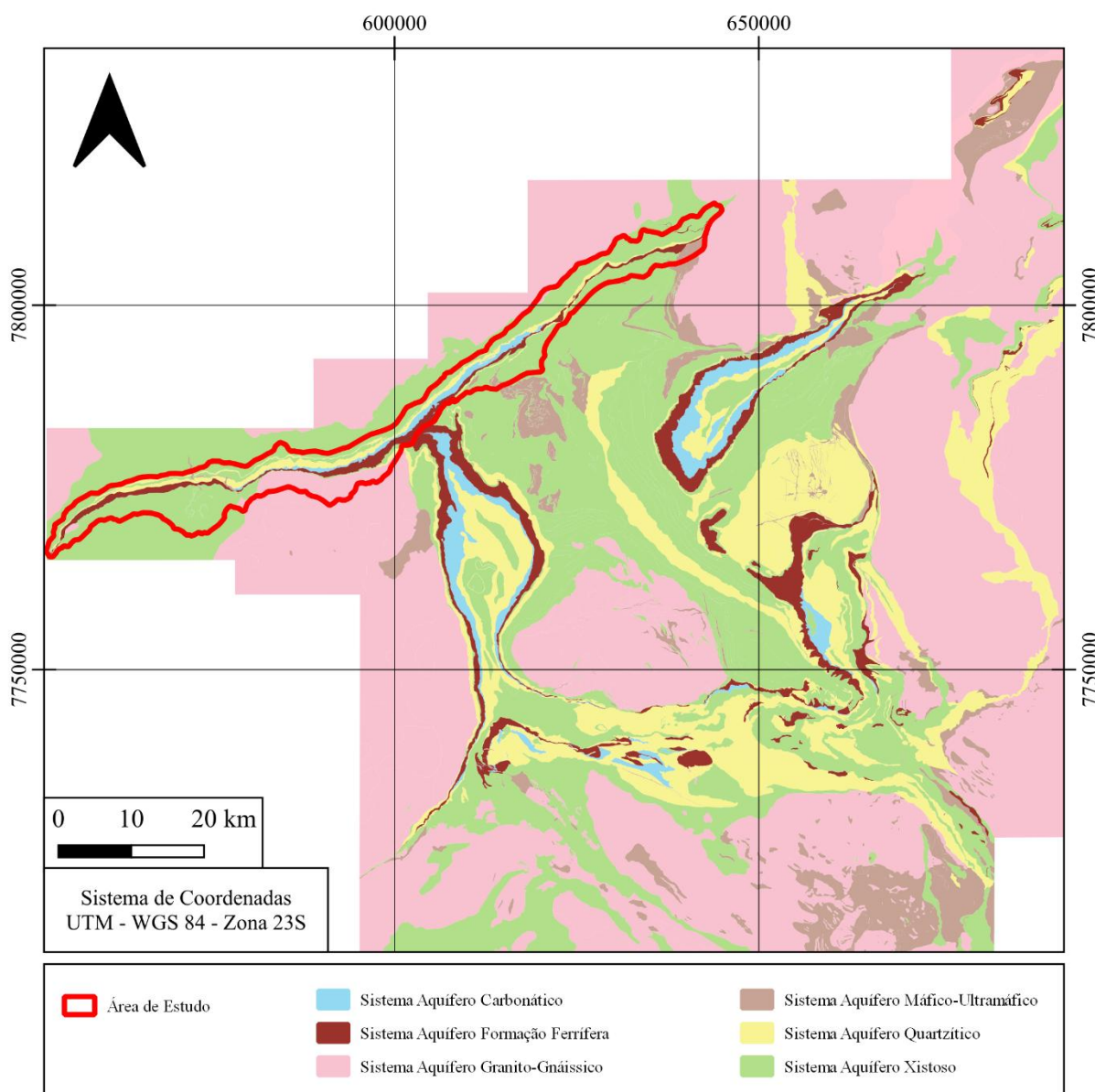


Figura 3 – Mapa hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: adaptado de Ramos, Cordeiro e Fernandes, 2020.

Beato, Monsorens & Bertachini (2006), identifica como sistemas aquíferos: os granitos-gnaisses dos complexos metamórficos; xistos, definidos pelo autor como aquífero/aquícluse, do Grupo Nova Lima; Formações Ferríferas interestratificadas do Grupo Nova Lima; Quartzitos das Formações Casa Forte, Palmital, Moeda e Taboões; Itabiritos da Formação Cauê, sendo destacado como o principal sistema aquífero; Carbonatos na Formação Gandarela, além de lentes deste tipo de rocha nas Formações Cercadinha e Cauê; Quartzito da Formação Cercadinho; Sistema aquíferos granulares com depósitos sedimentares de alúvio e colúvio terciários; Além de aquíferos nas Formações Batatal e Barreiro.

Já Mourão (2007) apresenta como aquíferos: os sedimentos inconsolidados, coberturas detrito lateríticas e eluvio-colúvias; quartzitos das Formações Maquiné, Moeda, Taboões e Itacolomi como

aquíferos semelhantes e Cercadinho apresentando maior vazão local; carbonatos da Formação Gandarela; formações ferríferas da Formação Cauê, como o principal aquífero na região, e formação ferrífera tipo Algoma em intercalações no aquífero Nova Lima; xistos do Grupo Nova Lima e Sabará; rochas granito-gnáissicas com os complexos metamórficos; e unidades confinantes com das formações Moeda, Batatal, Fecho do Funil e Barreiro.

Recentemente Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025) descreveram a hidrogeologia existente na região, separando as unidades em aquíferas e não aquíferas. As unidades aquíferas são os aquíferos Moeda, Cauê, Gandarela, Piracicaba (aquicluda), Estrada Real (podendo aparecer como aquífero Itacolomi e aquífero Sabará) e depósitos sedimentares. Já as unidades não aquíferas são os aquíferos complexos TTG, Rio das Velhas, Batatal e suítes intrusivas.

Os aquíferos relacionados aos complexos TTG, formam a unidade basal da região, e são compostos pelos complexos Bonfim, Bação (Andrade *et al.*, 2025), Caeté e Belo Horizonte. Estas unidades são fissurais, heterogêneas, descontínuas e anisotrópicas, um espesso manto de intemperismo serve como recarga principal para as fraturas destes aquíferos (Beato, Monsorens & Bertachini, 2006; Mourão, 2007; Andrade *et al.*, 2025). A recarga calculada para esse aquífero foi de 18% com uma condutividade hidráulica de  $2,64 \times 10^{-6}$  m/s (Freitas & Bacellar, 2013). Beato, Monsorens & Bertachini (2006) classificou as águas desses aquíferos como sendo bicarbonatadas cálcico-sódico-magnesianas, frias, levemente ácidas e pouco mineralizadas.

Aquífero em xisto (Mourão, 2007) ou aquífero Nova Lima (Magalhães *et al.* 2022) são descritos como aquíferos de baixa produtividade, com vazão média de 1,1 m<sup>3</sup>/h nas nascentes, mas com registros de vazões locais podendo chegar a 150 m<sup>3</sup>/h (Beato, Monsorens & Bertachini, 2006, Mourão 2007). Para Magalhães *et al.* (2022) esse aquífero não exibe vazões significativas de forma geral, sendo a profundidade do nível de água em média de 56 m. Mourão (2007) descreve presença de rochas sulfetadas que podem gerar drenagem ácida na região. Esse aquífero é fissural (Mourão, 2007).

Os quartzitos e conglomerados da Formação Moeda, compõem o aquífero Moeda, heterogêneo e anisotrópico, localmente pode se apresentar confinado, mas predominantemente apresenta caráter livre, com espessuras variando de 200 m a 1000 m (Andrade *et al.*, 2025). Magalhães *et al.* (2022) calculou os parâmetros hidráulicos para o aquífero na porção norte do Sinclinal Moeda, onde foram identificados condutividade hidráulica média de  $2,59 \times 10^{-7}$  m/s, transmissividade média de  $4,60 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s e coeficiente de armazenamento médio de  $1,40 \times 10^{-1}$ . A taxa de recarga neste aquífero, segundo os mesmos autores, foi de aproximadamente 27%. As águas desse aquífero são classificadas como sendo bicarbonatadas cálcico-magnesianas, de condutividade variada, de pouco a muito mineralizadas, pH levemente ácido (6,3) (Mourão, 2007).

Filitos homogêneos representam o aquífero Batatal na região, com espessura de aproximadamente 100 m, segundo Andrade *et al.* (2025), esta unidade pode funcionar como uma camada confinante do aquífero anterior, pois é incapaz de transmitir água, mesmo apresentando boa capacidade de armazenamento. Mourão (2007) calcula uma condutividade hidráulica de  $6,9 \times 10^{-6}$  m/s a  $8,7 \times 10^{-8}$  m/s e indica que tais valores estão relacionados a geometria dos planos de foliação, destacando também a alta porosidade e permeabilidade. Magalhães *et al.* (2022), calcula uma baixa recarga para esta unidade, representando apenas 6%. Em relação a química, as águas desta unidade são classificadas como sendo bicarbonata cálcico-magnesianas, com presença de metais pesados, alta mineralização e caráter redutor (Mourão, 2007).

O aquífero Cauê, apresenta alta produtividade em seus poços, desta forma, é identificado como o aquífero mais importante e produtivo do Quadrilátero Ferrífero (Mourão, 2007; Magalhães *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2025). Esta unidade apresenta porosidade granular e fissural, heterogêneo e anisotrópico, em quase sua totalidade livre, porém localmente confinado, onde demonstrou apresentar suas maiores produtividades. Seus parâmetros hidrodinâmicos são variados, sua condutividade hidráulica é em média  $9,45 \times 10^{-7}$  m/s, sua transmissividade média de  $9,75 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s e seu coeficiente de armazenamento médio de  $2,86 \times 10^{-1}$  (Magalhães *et al.* 2022), diversos outros autores avaliaram os parâmetros para esta unidade, a Tabela 1 sintetiza estes resultados.

Tabela 1 - Parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Cauê. Fonte: Modificado de Magalhães *et al.*, 2022.

Trabalho	K (m/s)		T (m <sup>2</sup> /s)		S	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Mourão (2007)	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$5,86 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-1}$
Mesquita <i>et al.</i> (2017)	$5,2 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-8}$	$5,79 \times 10^{-6}$	$1,85 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-10}$	$5,0 \times 10^{-1}$
Schlumberger (2017)	$1,5 \times 10^{-4}$	$8,8 \times 10^{-4}$	$1,90 \times 10^{-2}$	$3,70 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-1}$
Bertachini (2020)	$4,6 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$8,8 \times 10^{-4}$	$9,29 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-1}$
Andrade <i>et al.</i> (2025)	$3,0 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-9}$	$3,0 \times 10^{-1}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$9,0 \times 10^{-1}$

O aquífero Cauê apresenta alta taxa de recarga, sendo calculada por Magalhães *et al.* (2022) como por Mourão (2007) é de 39% com um IFB alto devido à alta permeabilidade e condutividade hidráulica. Mourão (2007) destaca variabilidade composicional das águas dessa unidade, indicando influência de águas de outros aquíferos e presença antrópica. A mesma autora coloca que são águas pouco mineralizadas e de baixa condutividade elétrica, com pH semelhante ao de águas meteóricas. De Paula *et al.* (2018) ao analisar 3 grupos de água sobre o aquífero Cauê classificou as águas sendo predominantemente bicarbonatadas mistas a magnesianas, já Mourão (2007) identificou águas com maior presença de sais, podendo ocorrer assim bicarbonatadas sódicas na região.

Formado por rochas dolomíticas, o aquífero Gandarela é de caráter cárstico-fissural, heterogêneo e anisotrópico com capacidade específica de 2,8 m<sup>3</sup>/h/m (Mourão, 2007), podendo estar livre ou confinado, apresenta uma grande amplitude em sua espessura, entre 20 m e 1650 m (Magalhães *et al.*, 2022). Segundo Mourão (2007), este aquífero apresenta uma taxa de recarga média de 22%. A condutividade hidráulica média calculada por Magalhães *et al.* (2022) foi de 7,38 x 10<sup>-8</sup> m/s, a transmissividade média de 5,71 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s e o armazenamento de 5,60 x 10<sup>-2</sup>. Mourão (2007) destaca, por meio de dados hidroquímicos, a diferença que pode haver da vazão dentro desse aquífero, destacando a baixa vazão do Homoclinal Curral e a alta do Sinclinal Moeda. A autora classifica as águas desta unidade como bicarbonatada cálcica-magnésiana, magnésiano-cálcica ou apenas cálcica, dados semelhantes foram observados por de Paula *et al.* (2018).

Zupo *et al.* (2025) engloba o Grupo Piracicaba e as Formações Taboões, Barreiro, Fecho do Funil e Cercadinho, no denominado aquífero. Andrade *et al.* (2025) classifica este aquífero como fissural, heterogêneo, anisotrópico e de baixa produtividade, além disso possui grande espessura, de aproximadamente 2000 m. Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025) identificam esse aquífero como confinantes dos aquíferos Cauê e Gandarela. A condutividade hidráulica desta unidade pode variar de 5,05 x 10<sup>-6</sup> m/s a 5,05 x 10<sup>-9</sup> m/s (CBH Rio das Velhas, 2013). Magalhães *et al.* (2022) calculou a recarga desse aquífero em 12%. Mourão (2007) distingue a química das águas desta unidade em duas formações, Taboões e Cercadinho, a primeira apresenta assinatura semelhante ao aquífero Moeda, anteriormente descrito, enquanto a segunda já apresenta menores valores de cálcio-magnésio, mas ambas possuem classificação de bicarbonatadas cálcio-magnésianas.

O aquífero Estrada Real compreende os Grupos Itacolomi e Sabará. Andrade *et al.* (2025) classifica esse aquífero, através do Grupo Itacolomi, como sendo heterogêneo e anisotrópico. Sua condutividade hidráulica é de 5,05 x 10<sup>-6</sup> m/s (CBH Rio das Velhas, 2013). Andrade *et al.* (2025) descreve a porção do aquífero representado pelo Grupo Sabará como espesso, com aproximadamente 3000 m de espessura e baixa produtividade, semelhante ao grupo aquífero Piracicaba, de no máximo 0,58m<sup>3</sup>/h/m. Mourão (2007), classifica a química das águas dessas unidades, por meio do Grupo Sabará, como bicarbonatada cálcico-magnésiana, com maior mineralização associadas a formações carbonáticas.

O aquífero de suítes intrusivas apresenta distribuição heterogênea pela área e podem funcionar como barreiras hidráulicas, Zupo *et al.* (2025) os caracteriza como de porosidade e permeabilidade secundária, já Mourão (2007) fala que essa porosidade pode ser afetada por estruturas tectônicas que aumentam o escoamento.

Os aquíferos de depósitos sedimentares ou aquíferos de cobertura, recobrem todas as unidades descritas anteriormente, são livres, descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos, relacionados às aluviões e coberturas detrítico-lateríticas (Andrade *et al.*, 2025). Mourão (2007) o coloca como principal zona de recarga dos aquíferos subjacentes, devido à alta condutividade hidráulica. Possui elevada porosidade e condutividade de  $2,52 \times 10^{-4}$  m/s (CBH Rio das Velhas, 2013). Quimicamente essas unidades são classificadas por Mourão (2007) como bicarbonatadas cálcico-magnesianas.

Considerando a grande importância do aquífero Cauê, Mourão (2007) realizou um estudo detalhado sobre ele. Este aquífero possui um significativo potencial hidrogeológico, sendo aproveitado para o abastecimento de parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte e fundamental para a manutenção das condições ambientais da região. Mourão verificou que, na área de estudo, o fluxo e o armazenamento subterrâneos estão delimitados em três grandes blocos regionais: Homoclinal Serra do Curral, Sinclinal da Moeda e Faixa Tamanduá-Mutuca. A compartimentação intensa resulta de falhas geológicas, intrusões de diques básicos e da presença de rochas com menor permeabilidade.

O fluxo de água subterrânea ocorre ao longo das camadas devido à dissolução e lixiviação seletiva dos minerais, bem como através dos planos de descontinuidade das rochas, que incluem fraturas, clivagens e falhas. Existem indícios de que a reativação tectônica recente tenha criado vias preferenciais para o escoamento da água. No contexto do Homoclinal da Serra do Curral, destaca-se o sistema da Formação Ferrífera. Os principais pontos de descarga estão localizados preferencialmente na vertente sul da Serra do Curral, com algumas nascentes também encontradas no flanco noroeste, próximo à Serra dos Três Irmãos

Ainda de acordo com Mourão (2007), as maiores condutividades hidráulicas (máximo de  $2,3 \times 10^{-5}$  m/s) e as maiores taxas de recarga (acima de 38%) estão associadas às litologias do aquífero Cauê. Os tempos de residência deste aquífero, estimados a partir do isótopo de trítio, variam consideravelmente entre 50 e 300 anos. O sobreposto aquífero Gandarela, composto por rochas carbonáticas, revelou a presença de feições cársticas significativas, especialmente ao longo do eixo do Sinclinal Moeda e no segmento oriental do Homoclinal Serra do Curral. A conexão hidráulica entre os aquíferos Cauê e Gandarela não foi conclusivamente determinada.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada no estudo consistiu, inicialmente, na construção de bancos de dados e levantamento bibliográfico servindo de base para o desenvolvimento dos objetivos do

projeto. De posse dos dados base, foi então possível desenvolver o modelo hidrogeológico conceitual com a caracterização hidrodinâmica, determinação do balanço hídrico de massa e do fluxo d'água subterrânea. Para a caracterização hidrodinâmica foi realizada identificação das unidades aquíferas, por meio da análise de dados geológicos e hidrogeológicos da região, incluindo seções litológicas e informações de poços. Em seguida, foram definidas as condições de contorno hidrogeológicas, considerando limites físicos, como rios, formações impermeáveis e áreas de recarga e descarga. Já a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos foi realizada a partir de testes de bombeamento e dados piezométricos, permitindo a obtenção de condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento.

O balanço hídrico de massa envolveu a estimativa de recarga por precipitação, infiltração e fluxo subterrâneo, bem como descargas naturais e exploração para consumo. Por fim, o fluxo d'água subterrânea foi definido a partir da análise dos níveis piezométricos e da aplicação de métodos conceituais de fluxo subterrâneo, permitindo a caracterização do comportamento hidrogeológico da área de estudo.

O modelo hidrogeológico conceitual forneceu dados para a elaboração do modelo hidrogeológico numérico no *software* Feflow™, onde a representação tridimensional dos sistemas hidrogeológicos é realizada por meio do método de elementos finitos. Com confecção de representações tridimensionais em permanente, transiente e simulações.

### 5.1. Banco de Dados

A construção do banco de dados contou com dados públicos disponibilizados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento de Minas Gerais (SEMAD), Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), Google Earth Pro e Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS).

A delimitação dos limites da área de estudo, Homoclinal Serra do Curral, foi traçada manualmente, seguindo padrões geomorfológicos e contatos litológicos. A norte a área se estende até o contato do Grupo Sabará com o Complexo Belo Horizonte, enquanto a sul a geomorfologia foi o principal balizador limítrofe, limitando-se aos baixos topográficos após suavização da topografia, independente da litologia. Na porção centro-sul, especificamente na confluência com a Serra da Moeda, o limite foi adaptado tomando como referência os trabalhos de Magalhães *et al.* (2023) e Andrade *et al.* (2025).

Foram analisados, no banco de dados do Igam e SEMAD, relatórios públicos relacionados ao cumprimento de condicionantes, pedidos de outorga de grandes empreendimentos na região e concessões de outorga para poços isolados. No total, foram levantados dados de 275 poços outorgados, 38 captações superficiais outorgadas, 385 cabeceiras de drenagens, 146 piezômetros, 58 estações fluviométricas e 07 estações pluviométricas. As séries históricas obtidas abrangeram, pelo menos parcialmente, o período de interesse, que vai de 2000 a 2020.

Um total de 51 testes de bombeamento foram levantados do banco de dados do Igam e destes 12 foram selecionados para análise, sendo estes, realizados em diferentes profundidades e unidades aquíferas e não aquíferas ao longo de toda a área de estudo.

Para o balanço de massa, os dados foram obtidos através das séries históricas de sete estações pluviométricas (códigos: 1943000, 1943006, 1943022, 2044008, 2044026, 2044053, 2044098) da plataforma pública *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA), abrangendo o período de 1990 a 2024 e localizadas dentro ou próximas a área de estudo.

Para auxiliar na caracterização das unidades aquíferas, foi calculada a capacidade específica de 105 poços tubulares na região. Esses cálculos (Tood, 1967) foram baseados nos dados de vazão, nível estático e nível dinâmico obtidos durante o levantamento dos poços. A capacidade específica é um parâmetro importante que ajuda a determinar a eficiência de um poço em captar água de um aquífero específico, contribuindo significativamente para a definição e compreensão das características hidrogeológicas da região estudada.

Para auxiliar no desenvolvimento do estudo, principalmente na delimitação do fluxo d'água subterrâneo, construção dos modelos tridimensionais geológico, hidrogeológico e seções hidrogeológicas, foi confeccionada a topografia da área de estudo com espaçamento de cotas topográficas de 20 em 20 metros. Esta foi extraída do modelo digital de elevação (MDE) obtido da base pública do satélite ALOS PALSAR, acessada por meio do portal ASF da NASA, que disponibiliza dados com resolução de até 12,5 metros (ASF DAAC, 2015).

Para as vazões de saída de água do sistema foram utilizadas duas estações fluviométricas que mesmo situadas fora da área estudo, pela proximidade apresentam valores representativas para a modelagem regional. São estas, estação Alberto Flores (CPRM nº 40740000) no rio Paraopeba e estação Honório Bicalho Montante (CPRM nº 41199998) no rio das Velhas.

## 5.2. Caracterização Hidrodinâmica

Os sistemas aquíferos são definidos como um conjunto de unidades aquíferas contínuas e ligadas hidráulicamente, os quais podem ser análogos aos grupos de rochas (ANA, 2013).

Diniz *et al.* (2014) indica que o conceito de Unidade Hidroestratigráfica se refere a formações geológicas, com relação temporal, que possuem características semelhantes na capacidade de armazenar e transmitir águas subterrâneas, apresentando produtividades em uma mesma ordem de magnitude. Essas características incluem litologia, arranjo estrutural, espessura, parâmetros hidrodinâmicos e produtividade hidráulica. É fundamental construir um modelo conceitual que reflita fielmente a realidade e levar em consideração a consistência e a escala do estudo analisado (Diniz *et al.*, 2014).

Para o presente estudo, se utilizou o mapa de base geológica modificado do Quadrilátero Ferrífero, escala 1:150.000 (Endo *et al.*, 2019), para delimitar as unidades geológicas de interesse. As características dessas unidades, incluindo parâmetros hidrodinâmicos, descrições litológicas, e a localização de outorgas de captações subterrâneas e nascentes (produtividade), foram comparadas com informações de bases bibliográficas e bancos de dados públicos informados anteriormente.

Para definir e agrupar as unidades geológicas em unidades hidrogeológicas, foi utilizado como base, o conceito de aquífero de Lohman *et al.* (1972), adaptado de Gustafson e Krásný (1994), que permite agrupar unidades com características similares. Essas unidades foram categorizadas com base nos dados de produtividade de poços e/ou nascentes para determinar se são unidades aquíferas ou não, além de comparar seus parâmetros hidrodinâmicos e realizar uma classificação com base na bibliografia disponível. As unidades com baixa produtividade ou de menor importância foram agrupadas como unidades não aquíferas, devido à sua relevância reduzida para o modelo hidrogeológico em estudo.

A distribuição espacial e a divisão das unidades aquíferas foram realizadas utilizando os métodos mencionados anteriormente e com objetivo de determinar as profundidades de cada unidade dentro da área de estudo, foi elaborado um modelo geológico no *software Leapfrog™*, concedido pela empresa *Bentley Systems*, abrangendo toda a região investigada. Esse modelo permitiu a criação de seções geológicas e hidrogeológicas que proporcionam uma estimativa mais precisa das profundidades média, máxima e mínima de cada unidade aquífera e não aquífera definida.

As condições de contorno hidrogeológicas são parâmetros fundamentais para a modelagem do fluxo de água subterrânea em aquíferos. Elas definem os limites hidráulicos e físicos de um modelo hidrogeológico, incluindo suas entradas e saídas de água. São estabelecidas com base nas unidades hidrogeológicas, arranjos litoestruturais, diferenças de cargas hidráulicas e fluxo. Segundo Anderson & Woessner (2015), as condições de contorno são classificadas em três tipos principais:

Condição Tipo 1 (Dirichlet): Define carga hidráulica específica, onde os valores não variam espacialmente dentro da mesma condição, com fluxo não controlado.

$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{d^2 h}{dy^2} + \frac{d^2 h}{dz^2} = 0 \quad \text{Equação (1)}$$

Condição Tipo 2 (Neumann): Define fluxo específico, calculado pela lei de Darcy, com carga hidráulica não controlada. Há uma variante especial onde o fluxo é nulo.

$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{d^2 h}{dy^2} + \frac{d^2 h}{dz^2} = 0 \quad \text{Equação (2)}$$

Condição Tipo 3 (Cauchy e Robin): Depende tanto da carga hidráulica quanto do fluxo, relacionando os limites da carga hidráulica com os limites do fluxo, calculado pela lei de Darcy com gradientes entre condições internas e externas.

$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{d^2 h}{dy^2} + \frac{d^2 h}{dz^2} = \nabla^2 h \quad \text{Equação (3)}$$

Existem barreiras físicas onde pode não ocorrer fluxo d'água, atuando como nível de base dos aquíferos, como corpos d'água superficiais ou rochas impermeáveis, a exemplo, o Rio das Velhas e a Aquitardo Complexo Bonfim, respectivamente. Por outro lado, existem barreiras hidráulicas, as quais controlam o fluxo de águas subterrâneas, sendo divisores d'água ou condutores de fluxo preferencial (Brito *et al.*, 2015).

Para a definição dos limites físicos do modelo hidrogeológico, discontinuidades com baixa condutividade hidráulica foram representadas como fronteiras de fluxo nulo, uma prática comum na modelagem de sistemas hidrogeológicos (Anderson & Woessner, 2015). Os rios de maior porte na área de estudo foram considerados como condições de carga hidráulica prescrita e fluxo livre, devido ao forte controle que exercem sobre o nível potenciométrico local, funcionando como zonas de recarga ou descarga dos aquíferos (Fetter, 2001).

Adotou-se compartimentação verticalmente em dois domínios hidroestratigráficos para as unidades aquíferas, com base na redução da condutividade hidráulica em função da profundidade – fenômeno relacionado ao fechamento progressivo de poros e fraturas causado pelo aumento da pressão litostática. Conforme observado por Mesquita *et al.* (2017) e Ribeiro (2019), as formações ferríferas da região apresentam perda significativa de permeabilidade a partir de 600 a 800 metros de profundidade, principalmente em virtude da compactação da matriz rochosa e da inativação estrutural das fraturas. Tal abordagem segue os princípios adotados por Giardin & Faccini (2004) e Dantas *et al.* (2022), os quais reforçam a necessidade de representação vertical diferenciada em aquíferos fraturados.

Os parâmetros hidrodinâmicos de interesse deste estudo são a condutividade hidráulica (K), o coeficiente de armazenamento (S) e a transmissividade (T), os quais foram calculados a partir dos resultados obtidos em testes de bombeamento. Os testes de bombeamento são de três tipos: injeção Bower & Rice (1976), teste de Moench (1984) e teste de produção (Kruseman & De Ridder, 1990).

O teste de injeção de Bower & Rice (1976) é um método utilizado para determinar as propriedades hidráulicas de aquíferos e aquícludes, especialmente em formações de baixa permeabilidade, como argilas compactas e rochas pouco permeáveis. O principal objetivo desse teste é medir a condutividade hidráulica de materiais com baixa capacidade de transmitir água, como em camadas impermeáveis de solo.

O teste de Moench (1984) é um método analítico usado para interpretar dados de ensaios de bombeamento em aquíferos heterogêneos, especialmente em sistemas que apresentam dupla porosidade ou baixa permeabilidade. Este modelo é utilizado para analisar aquíferos com dupla porosidade, sistemas com armazenamento em poços e em ambientes com baixa permeabilidade. O teste de Moench possibilita estimar valores de transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S), condutividade das fraturas (Kf) e o coeficiente de transferência ( $\alpha$ ).

Por sua vez, o teste de produção (Kruseman & De Ridder, 1990) é utilizado para avaliar a capacidade de um aquífero em fornecer água de forma contínua e sustentável. É aplicado em poços tubulares e artesianos para entender as características hidráulicas do aquífero e a eficiência do poço.

Para a interpretação dos resultados dos testes de bombeamento mencionados, utilizou-se o *software AquiferTest 2016.1<sup>TM</sup>* da *Waterloo Hydrogeologic*. Foram adotados os métodos de Bouwer-Rice (Bouwer e Rice, 1976) e de dupla porosidade (Moench, 1984), devido à heterogeneidade dos resultados analisados e à ausência de perfis litológicos e construtivos detalhados dos poços testados. É conhecido que as unidades aquíferas apresentam tanto porosidade primária quanto secundária.

O método da dupla porosidade consiste em um sistema no qual há interação entre a porosidade granular, responsável por elevada capacidade de armazenamento e baixa permeabilidade, e a porosidade fissural, que apresentam alta permeabilidade e baixo armazenamento. Dessa forma, a porosidade total é considerada como um sistema composto pela combinação das porosidades granular e fissural e suas relações geométricas (Moench, 1984).

A adoção da metodologia proposta por Moench (1984) justifica-se pela predominância de unidades aquíferas com características de dupla porosidade no domínio hidrogeológico do

Homoclinal Serra do Curral, nas quais coexistem porosidade intergranular (primária) e sistemas fraturados (secundários). Estudos anteriores descrevem esse comportamento nas principais unidades hidrogeológicas da região, como no aquífero Cauê (Gonçalves *et al.*, 2019), Gandarela, Batatal e Moeda (Borelli, 2022). Modelos convencionais de porosidade simples não são adequados para representar de forma realista os mecanismos de fluxo subterrâneo e armazenamento nessas formações. Segundo Oliveira (2009), a escolha de um modelo conceitual inadequado pode resultar em modelos matemáticos incorretos, parâmetros hidráulicos sub ou superestimados e erros na determinação do potencial quantitativo do aquífero. O modelo de Moench permite interpretar de maneira mais fiel os testes de bombeamento em meios heterogêneos e anisotrópicos, ao considerar a transferência de fluxo entre os compartimentos da matriz e das fraturas. Assim, sua aplicação se mostra apropriada para a caracterização hidrodinâmica das unidades aquíferas presentes no Homoclinal Serra do Curral.

Foram analisados 12 testes de bombeamento no *software AquiferTest 2016.1<sup>TM</sup>*, destes, quatro foram realizados em poços no aquífero Gandarela, três no aquífero Cauê, dois no aquífero Batatal e três no aquífero Moeda. Para verificar a aderência dos dados, os valores obtidos foram comparados com estudos de outros autores em aquíferos similares, ou seja, unidades aquíferas com características semelhantes dentro do Quadrilátero Ferrífero, esta comparação garante uma maior representatividade das unidades caracterizadas neste estudo.

### 5.3. Balanço Hídrico de Massa

O balanço de massa hídrica constitui uma etapa fundamental na construção de modelos hidrogeológicos em escala regional, por permitir a quantificação das entradas e saídas de água no sistema subterrâneo. A partir do tratamento desses dados, é possível estimar a disponibilidade hídrica, compreender os fluxos internos e avaliar o comportamento do aquífero frente às variabilidades climáticas e antrópicas.

Para a caracterização pluviométrica da área de estudo, foram utilizadas sete estações pluviométricas com séries históricas de dados compreendendo o período de 1991 a 2020. A representatividade espacial das estações foi determinada por meio do método dos polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911), sendo aplicada uma média ponderada sobre as taxas plurianuais com base na contribuição percentual de cada estação sobre a área total da bacia.

Em seguida, foi realizado o cálculo do balanço hídrico climatológico utilizando os métodos propostos por Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955), com o suporte das planilhas desenvolvidas por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998). Este procedimento

permitiu estimar os seguintes parâmetros: evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), excedente hídrico (EXC), déficit hídrico (DEF) e armazenamento (ARM) ao longo do período analisado. A capacidade de água disponível (CAD) no solo foi estabelecida com base nos valores recomendados para os municípios abrangidos pela área de estudo, conforme apresentado no Atlas da Irrigação (ANA, 2021), adotando-se uma média representativa entre os municípios de Brumadinho e Mateus Leme.

Para estimar a recarga de água em cada unidade aquífera, foi empregado o método de Flutuação do Nível de Água (*Water Table Fluctuation - WTF*), introduzido por Healy & Cook (2002). Este método analisa a variação do nível da água, assumindo que a elevação do nível de água é exclusivamente induzida pela recarga, mantendo a porosidade eficaz constante. É especialmente adequado para aquíferos livres, exigindo conhecimento prévio do rendimento específico e monitoramento contínuo das variações nos níveis de água ao longo do tempo.

O método calcula a recarga para cada curva de recessão dentro de um gráfico de evolução do nível de água de um piezômetro específico. A taxa de recarga é determinada dividindo a recarga encontrada em cada curva pela pluviometria da região. A recarga média de cada gráfico pode ser considerada a média das taxas de recarga de todas as curvas de recessão, excluindo quaisquer valores considerados atípicos (*outliers*). Quando taxas de recarga são calculadas para diferentes piezômetros, o valor final de recarga para uma única unidade hidrogeológica é a média dos valores de todos eles.

A equação fundamental do método é expressa como:

$$R = S_y \times \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde,

R = Recarga do instrumento observado;

S<sub>y</sub> = Rendimento específico;

Δh = Variação da altura do nível freático;

Δt = Variação

Uma representação visual desse método é fornecida na Figura 4, a qual ilustra um hidrograma de um piezômetro.

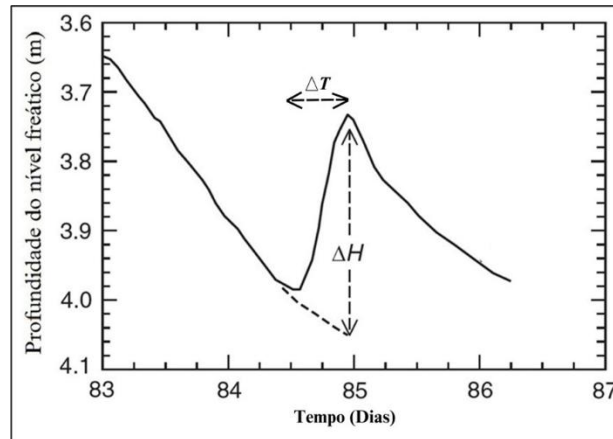


Figura 4: Ilustração de hidrograma de monitoramento de nível d'água pelo método do WTF, onde o  $\Delta H$  representa a variação do nível freático e o  $\Delta t$  representa a variação no tempo. Fonte: adaptado de Healy (2010).

A linha extrapolada da curva de recessão anterior indica a trajetória que o nível piezométrico seguiria na ausência de aumento devido à precipitação. O valor de  $\Delta H$  é determinado pela subtração da elevação máxima do nível freático do ponto de interseção da linha extrapolada com a última curva de recessão.

Scanlon, Healy & Cook (2002) descrevem este método como simples e de aplicação direta, pois não é afetado pela presença de fluxo preferencial, considerando o movimento da água na zona não saturada. Sua aplicação é especialmente vantajosa em áreas onde o monitoramento de vazões superficiais é impraticável. Este método é especialmente eficaz em poços onde variações rápidas e acentuadas nos níveis de água ocorrem em resposta a eventos de chuva isolados, resultando em picos de variação e curvas de recessão mais distintas. Devido à escassez de fluviômetros com séries históricas sustentáveis, aliados a uma distribuição que não contemplasse as unidades aquíferas de interesse, foram analisados seis piezômetros representativos pelo método WTF supracitado. Destes, um foi realizado em piezômetro(s) no aquífero Gandarela, dois no aquífero Cauê, dois no aquífero Batatal e um no aquífero Moeda. Para verificar a aderência dos dados, os valores obtidos foram comparados com estudos de outros autores em aquíferos similares, ou seja, unidades aquíferas com características semelhantes dentro do Quadrilátero Ferrífero, a fim de garantir uma maior representatividade das unidades caracterizadas neste estudo.

As incertezas associadas a este método relacionam-se principalmente à complexidade de estimar o rendimento específico, que pode variar com a profundidade do nível freático e ao longo do tempo em resposta às oscilações históricas desse nível, conforme mencionado por Delin *et al.* (2007). Para o cálculo, os valores de  $S_y$  das unidades aquíferas foram obtidos através

de testes de bombeamento citados anteriormente e aplicou-se o método de dupla porosidade (Moench, 1984; Bäumlé, 2003) por meio do *software AquiferTest<sup>TM</sup>*.

Conforme Teixeira (2023), apesar de subestimar a recarga, a aplicação do método automatizado em séries mensais para um longo período aproxima-se mais dos valores reais. Teixeira (2023) enfatiza que os métodos devem ser apenas usados quando não há dados diários disponíveis e para séries relativamente longas, tendo a consciência que dados de recarga ficarão subestimados e dados de escoamento superficial superestimados.

A reserva renovável (R) de um aquífero, fundamental para estimar a disponibilidade hídrica sustentável, corresponde ao volume de água que se infiltra e recarrega o sistema subterrâneo ao longo de um ano, sendo calculada neste estudo por meio da equação adaptada de Custódio e Llamas (1983), a qual considera o excedente hídrico resultante da precipitação anual subtraída das perdas naturais do ciclo hidrológico, de forma a estimar com maior precisão o volume de água que ingressa no sistema aquífero. Segundo a equação:

$$R = A \times (P - ETR) \times TR \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

R = Recarga renovável (m<sup>3</sup>/ano)

A = Área da unidade aquífera (m<sup>2</sup>)

P = Precipitação média anual (m)

ETR = Evapotranspiração real (m)

TR = Taxa de recarga (adimensional)

A equação considera que a parcela efetivamente disponível para infiltração no solo e recarga do aquífero corresponde ao excedente hídrico anual – obtido pela diferença entre a precipitação média e a evapotranspiração real. Sobre esse excedente, aplica-se um coeficiente de recarga (TR) que representa a fração da água excedente que realmente infiltra nas diferentes unidades hidrogeológicas dentro das condições de contorno, considerando perdas por escoamento superficial, retenção no solo, evaporação adicional e outras limitações ambientais.

Além disso, foram analisados os impactos antrópicos associados aos empreendimentos localizados sobre essas unidades. Para essa avaliação, consideraram-se os dados de vazão outorgada dos poços de bombeamento em operação entre outubro de 2000 e setembro de 2020. Com base nas taxas médias de recarga, na área de ocorrência e na espessura estimada dos aquíferos, foi possível calcular a vazão correspondente à reserva renovável do Aquífero Cauê e

demais unidades aquíferas. A diferença entre essa vazão potencial e a vazão total captada permite identificar a existência de excedente ou déficit hídrico (Castro, 2018).

#### 5.4. Fluxo D'água Subterrânea

Para a análise do fluxo de água da área de estudo, foi confeccionado um mapa potenciométrico da região utilizando dados de nível de água de 2020. Os dados foram obtidos através do portal SIAM (banco de dados online público do Igam) e diretamente com responsáveis do Igam, abrangendo outorgas de captações superficiais e subterrâneas, além de instrumentos de monitoramento do nível de água disponíveis em relatórios de pesquisa hidrogeológica de grandes empreendimentos, normalmente mineradoras. Além disso, levantou-se, por meio de geoprocessamento utilizando o *software QGis 3.28<sup>TM</sup>*, a cota das cabeceiras de drenagens, nascentes e grandes drenagens, que representam o nível de água subterrâneo em superfície na área estudada.

Para a confecção do mapa potenciométrico, a seleção dos instrumentos de monitoramento do nível de água visou abranger uma malha representativa para a escala regional dos níveis das águas subterrâneas. Em regiões com carência de dados diretos, foram consideradas as cabeceiras de drenagens e nascentes perenes levantadas por geoprocessamento. As curvas de equipotenciais do mapa potenciométrico foram traçadas manualmente considerando o levantamento do nível d'água instrumentado e das nascentes e, em seguida, inseridas no *software QGis 3.28<sup>TM</sup>*. Para melhor visualização do sentido de fluxo, foi gerada uma imagem *raster* a partir das curvas de nível de água subterrâneo, e utilizadas seções hidrogeológicas, onde foram traçadas setas do sentido de fluxo manualmente sobre o mapa confeccionado. A definição do fluxo subterrâneo seguiu o princípio de que a água se desloca perpendicularmente às curvas equipotenciais, no sentido dos maiores para os menores potenciais hidráulicos (Fetter, 2001; Brassington, 2017), sendo as direções de fluxo traçadas manualmente com base nesse critério.

#### 5.5. Modelo Geológico

O modelo geológico tridimensional foi construído no *software Leapfrog Works<sup>TM</sup>*, da Bentley®, que adota o método de modelagem implícita. A eficiência dessa abordagem está diretamente relacionada ao desempenho dos algoritmos utilizados para definir como os pontos de dados conhecidos são empregados na estimativa de pontos desconhecidos, resultando na geração de superfícies e posteriormente volumes.

O modelo geológico elaborado foi interpolado por meio do algoritmo *FastRBF<sup>TM</sup>*. Para os limites horizontais do modelo tridimensional foi aplicado um *buffer* de 10 km a fim de não perder informações de mergulho e possíveis estruturas relevantes no âmbito regional do estudo. A partir da consolidação do modelo com área superior ao adotado no modelo conceitual, foi então realizado o corte limitando o mesmo aos limites estabelecidos e supracitados no tópico 5.1. Quanto ao limite vertical o modelo se estende até os 500 metros de profundidade, cota adotada para atender a modelagem hidrogeológica numérica de fluxo, tendo em vista que a menor cota topográfica dentro da área de estudo é de aproximadamente 680 metros.

As unidades geológicas, respectivos mergulhos, estruturas tectônicas, como falhas e dobras, e contatos litológicos do modelo foram baseadas nos mapas e relatórios atualizados do Quadrilátero Ferrífero por Endo *et al.* (2019). O refinamento do modelo foi realizado manualmente, utilizando as ferramentas do *software Leapfrog Works<sup>TM</sup>*, e manteve-se o arranjo geológico-estrutural em escala regional. Concluído o modelo, foram então retiradas 19 seções geológicas com espaçamento de 5 quilômetros orientadas segundo NNW-SSE, paralelas a direção preferencial de mergulho das unidades geológicas. Posteriormente foram confeccionadas 8 seções hidroestratigráficas, as quais foram utilizadas tanto no modelo conceitual, quanto numérico.

#### 5.6. Modelo Hidrogeológico Numérico

O modelo hidrogeológico de fluxo foi elaborado no *software Feflow 8.0<sup>TM</sup>*, com parceria da *DHI*. No *Feflow*, a representação tridimensional dos sistemas hidrogeológicos é realizada por meio do método de elementos finitos, que discretiza o domínio através de tetraedros ajustáveis às estruturas e às necessidades de detalhamento, formando uma malha estruturada. Os limites da malha (*grid*) tridimensional foram definidos a partir da condição de contorno de fluxo nulo, estabelecidos de acordo com o modelo conceitual. Bi-dimensionalmente, o refino da malha deu-se aos locais de monitoramento, que foram representados como pontos, e as drenagens, que foram representadas como linhas. A discretização vertical foi estabelecida a partir de *layers* com espessura média de 25 m, enquanto a malha numérica foi composta por elementos prismáticos com dimensão média de 120 m, permitindo refinamento nas zonas de maior interesse.

A geometria das unidades hidrogeológicas foi incorporada a partir da carimbação do modelo geológico gerado no *software Leapfrog<sup>TM</sup>* através da extensão do programa, denominada *Leapfrog Hydro*. Para os modelos tridimensionais as unidades, aquífero Moeda e

aquitardo Batatal, foram agrupadas como uma única unidade aquífera, Caraça indiviso. Devido à baixa espessura, descontinuidade ao longo da área de estudo e escala regional, essa união possibilitou melhorar a execução e resultados apresentados pelos modelos. Além disso, a primeira camada do modelo, com 25 m de espessura, considerou a alteração das unidades geológicas, caracterizando uma unidade mais permeável associada a litologia que a soto-põem.

Para a construção e calibração do modelo numérico hidrogeológico desenvolvido no *software Feflow<sup>TM</sup>*, o domínio foi compartimentado em três regiões principais – Oeste, Central e Leste – definidas a partir de critérios estruturais e hidrogeológicos da área de estudo. Cada uma dessas regiões foi ainda subdividida em camadas Superior e Inferior, de forma a representar as variações verticais do sistema aquífero e permitir uma análise mais detalhada dos fluxos subterrâneos. Essa compartimentação teve como objetivo otimizar o processo de calibração e facilitar o ajuste dos parâmetros hidrogeológicos, como condutividade hidráulica e armazenamento, assegurando maior representatividade e precisão ao modelo. Além de ter sido orientada pela compartimentação vertical utilizada na caracterização hidrodinâmica.

Para a elaboração do modelo numérico hidrogeológico, foram incorporados os resultados obtidos na etapa de caracterização hidrodinâmica, que serviram como base para a representação conceitual e parametrização do sistema aquífero. Essa caracterização incluiu a definição das unidades hidroestratigráficas, com a individualização das principais unidades aquíferas e não aquíferas, bem como a determinação de seus parâmetros hidrodinâmicos — como condutividade hidráulica, transmissividade, recarga e coeficiente de armazenamento. Além disso, foram estabelecidas as condições de contorno representativas do domínio modelado, de modo a reproduzir os fluxos subterrâneos naturais e induzidos, garantindo coerência entre o modelo conceitual e numérico.

Os valores de recarga e condutividade hidráulica – cuja geometria das unidades hidrogeológicas provém do modelo geológico elaborado no *software Leapfrog<sup>TM</sup>* – foram estabelecidos considerando o intervalo definido no modelo conceitual e ajustados por meio de retroanálises durante o processo de calibração (Anderson & Woessner, 2015; Andrade, 2023).

A calibração do regime estacionário foi conduzida no dia 30 de setembro de 2000, enquanto a calibração do regime transitório contemplou o período entre outubro de 2000 e setembro de 2020. O modelo numérico parte da premissa de um estado de equilíbrio, ou seja, ausência de alterações significativas no armazenamento do sistema. Contudo, em escala

regional, diante da elevada quantidade de intervenções, esse equilíbrio é apenas conceitual e não plenamente alcançável. Por esse motivo, definiu-se como condição de referência o período mais antigo com informações suficientes de monitoramento e menor variação de armazenamento registrada, correspondente a 30 de setembro de 2000. A partir de outubro do mesmo ano, as mudanças observadas no armazenamento caracterizam o início do regime transitório. Utilizando os resultados do modelo transitório, foram confeccionados dois modelos preditivos entre o período de outubro de 2020 e setembro de 2039. As simulações se deram em dois cenários, A e B, o primeiro mantendo o bombeamento nos poços com a mesma taxa do último dia do regime transitório, enquanto no segundo simulou-se a recuperação do sistema com o desligamento de todos os poços de bombeamento.

#### 5.6.1. Regime Estacionário

No total, foram utilizados 421 pontos para a calibração do nível d'água no regime estacionário, considerando tanto os compartimentos quanto a escala regional. Desses, 385 foram dados de nascentes/cabeceiras de drenagem, identificadas a partir do levantamento topográfico e da hidrografia. Esses pontos estão distribuídos nos três compartimentos e situam-se fora da influência direta do cone de rebaixamento das estruturas. Além destes, foram utilizados 36 instrumentos com medição de nível d'água, piezômetros e nível estático (NE) de poços outorgados, com registros disponíveis de 2000. Em virtude da ausência de dados anteriores do monitoramento por instrumentos piezométricos, os valores de 2005 a 2007 foram aplicados como referência para simular condições do ano 2000, sob a premissa de menor número de intervenções antrópicas relevantes, as quais possibilitou os dados de referência para confecção do modelo. Esses pontos concentram-se principalmente nos compartimentos oeste e central da área de estudo.

Para calibração do modelo hidrogeológico em regime permanente utilizou-se do erro absoluto médio (MAE) que corresponde à média dos valores absolutos dos resíduos, representando o desvio médio entre os valores simulados e observados, desconsiderando o sinal das diferenças, e o erro quadrático médio (RMS) que corresponde a medida de dispersão dos resíduos, calculada pela raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios. Valores menores de RMS indicam melhor ajuste entre o modelo e os dados observados. Os valores calculados e medidos das cargas hidráulicas dos instrumentos foram comparados à linha de 45° (representando ajuste ideal), com o objetivo de atingir uma calibração com nRMS — erro quadrático médio normalizado em percentual — inferior a 10%.

Para a calibração das saídas de água do sistema foram utilizadas duas estações fluviométricas representativas para as principais drenagens da região, rio Paraopeba e rio das Velhas, estação Alberto Flores (CPRM nº 40740000) e estação Honório Bicalho Montante (CPRM nº 41199998), respectivamente. Para o cálculo da vazão de água que representa as duas principais drenagens da área de estudo, foi realizado o levantamento da área de contribuição da bacia a montante de cada estação e então comparada com a vazão monitorada, gerando um coeficiente vazão/área de contribuição.

$$C = \frac{Q}{Abm} \quad \text{Equação (6)}$$

C = Coeficiente/razão (m/h);

Q = Vazão observada no fluviômetro (m<sup>3</sup>/h);

Abm = Área de contribuição da bacia a montante do fluviômetro (m<sup>2</sup>).

A partir desse coeficiente/razão entre área de abrangência e vazão, foi então calculado a vazão referente a área de contribuição de cada uma das sub-bacias do rio Paraopeba e rio das Velhas dentro da área de estudo.

#### 5.6.2. Regime Transitório

A calibração do modelo numérico em regime transitório foi conduzida com base na comparação entre os níveis d'água observados e simulados em 188 instrumentos de monitoramento, complementada pela análise do balanço de massa previamente estabelecido no modelo conceitual. Para a adequada representação das condições de monitoramento, adotou-se uma profundidade média dos filtros de 80 m, valor correspondente a aproximadamente metade da profundidade média dos instrumentos utilizados, assegurando coerência entre as medições de campo e o domínio numérico.

O procedimento de calibração consistiu na avaliação anual das discrepâncias entre os níveis d'água calculados e observados, bem como na comparação entre as vazões de bombeamento outorgadas e aquelas simuladas pelo modelo. Durante esse processo, foram ajustados os parâmetros de condutividade hidráulica, recarga e coeficiente de armazenamento das unidades hidrogeológicas, considerando-se suas características hidroestratigráficas e as especificidades matemáticas do modelo computacional.

Os parâmetros hidráulicos foram regionalizados por compartimentos – Oeste, Central e Leste, subdivididos em camadas Superior e Inferior –, de forma a representar as variações espaciais e verticais das propriedades do meio aquífero. Tal abordagem permitiu aprimorar a calibração e refletir de maneira mais realista as relações de fluxo entre unidades aquíferas e não aquíferas, com destaque para a unidade aquífera Cauê.

Na calibração em regime transiente, o processo teve início com a aplicação do método de retroanálise manual, no qual foram ajustados os parâmetros de Coeficiente de Armazenamento ( $S_s$ ) e Produção Específica ( $S_y$ ). As simulações de vazão e carga hidráulica obtidas foram comparadas com os valores observados em campo. Em seguida, para aprimorar o ajuste, empregou-se a ferramenta *PEST (Parameter Estimation Software Tool)*, integrada ao *Feflow*, que possibilitou a calibração automática do modelo por meio de retroanálise, refinando a estimativa dos parâmetros dentro dos limites previamente definidos (Magalhães, 2022; Andrade, 2023).

No regime transitório, a extração de água subterrânea foi simulada por meio da condição de contorno *Well BC*, associando 186 poços de empreendimentos de pequeno porte a séries temporais de variação de vazão. Para os empreendimentos minerários, os pontos de bombeamento, 77 poços, foram posicionados nos pits das minas, limitando-se às vazões outorgadas e também vinculados a séries temporais representativas do histórico operacional. A profundidade das bombas foi definida conforme os dados cadastrais disponíveis; na ausência destes, adotou-se 5 m acima da profundidade final do poço, ou, quando não havia qualquer informação, a profundidade média de 120 m.

Por fim, a validação do modelo foi realizada a partir da análise das superfícies equipotenciais e das linhas de fluxo correspondentes ao último período calibrado em regime transitório. Esses resultados foram confrontados com o mapa potenciométrico, com os valores de referência dos parâmetros hidrodinâmicos e com o balanço de massa estabelecido no modelo conceitual, assegurando a consistência interna e a robustez científica do modelo numérico de fluxo subterrâneo desenvolvido.

### 5.6.3. Simulações

As simulações numéricas tiveram por objetivo avaliar o comportamento dinâmico do sistema aquífero em cenários prospectivos, em consonância com as diretrizes do Plano Estadual de Saneamento Básico de Minas Gerais (PESB-MG) e no contexto do projeto de pesquisa

coordenado pelo professor Rodrigo de Paula, intitulado “Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológica a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero”.

Foram elaboradas duas simulações preditivas para o período compreendido entre outubro de 2020 e setembro de 2039, totalizando 19 anos de projeção, ambas fundamentadas na configuração final do modelo calibrado em regime transitório. Para ambas as simulações, a variação pluviométrica seguiu os padrões observados no último período calibrado do regime transitório, de modo a garantir consistência entre os cenários projetivos e o comportamento histórico do sistema. Em conformidade com um cenário conservador, os demais parâmetros hidrogeológicos — condutividade hidráulica, recarga e coeficiente de armazenamento — foram mantidos constantes ao longo do período de simulação.

- Cenário A – Manutenção das condições de bombeamento: consiste em uma simulação prospectiva em que a taxa de bombeamento foi mantida equivalente à observada no último dia do modelo transitório.
- Cenário B – Desligamento dos poços de bombeamento: representa uma condição de recuperação natural do sistema aquífero, sem extração de água subterrânea, com o intuito de avaliar o tempo e a capacidade de recuperação dos níveis piezométricos às condições pretéritas às intervenções antrópicas.

O modelo projetivo permitiu comparar a evolução da superfície potenciométrica e das vazões subterrâneas entre o início e o término do período de simulação, utilizando a mesma abordagem metodológica do regime transitório. Foi então feita análise dos resultados para identificar e quantificar os principais setores de rebaixamento e os pontos críticos de variação do nível d’água, e fornecer subsídios para a avaliação da sustentabilidade hidrogeológica frente aos diferentes cenários de uso e exploração dos recursos subterrâneos.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados e suas interpretações com base nos objetivos delineados deste trabalho, os resultados incluem a caracterização hidrodinâmica, o balanço hídrico de massa, o fluxo subterrâneo e os modelos hidrogeológicos de fluxo do Homoclinal Serra do Curral. Com base nos dados levantados e para melhor visualização espacial dos poços de bombeamento outorgados, instrumentos de nível d’água,

nascentes/cabeceiras de drenagens e estações fluviométricas que suportaram o presente estudo, segue abaixo a Figura 5.

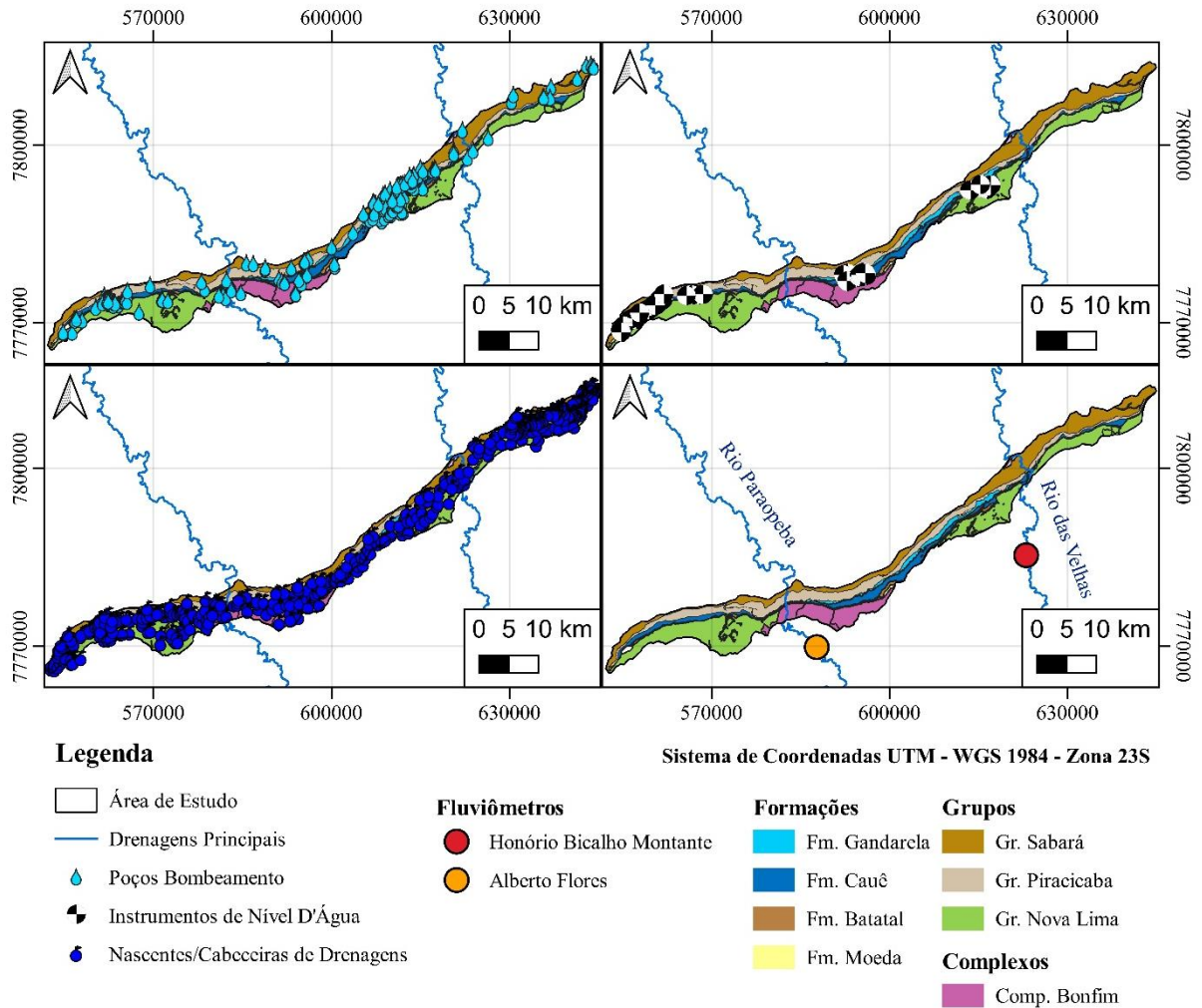


Figura 5 - Mapas evidenciando distribuição espacial dos poços de bombeamento, instrumentos de nível d'água, nascentes/cabeceiras de drenagens e fluviômetros levantados, analisados e utilizados no estudo.

### 6.1. Caracterização Hidrodinâmica

As unidades aquíferas, determinadas pelas unidades geológicas, são aquelas com as maiores permeabilidades e porosidades dentro do Homoclinal Serra do Curral, de acordo com Bertachini (1994), Beato, Monsorens & Bertachini (2006), Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025). Unidades com menores potenciais aquíferos e baixa produtividade foram definidas como aquíferos ou unidades não produtivas, essas litologias são predominantemente compostas por materiais com baixa produtividade e menor potencial hidrogeológico.

A partir dos dados levantados neste trabalho juntamente com a definição adaptada de aquífero de Lohman *et al.* (1972), e a associação dos levantamentos bibliográficos, parâmetros obtidos nos poços e interpretações geológicas-estruturais, foi possível identificar quatro unidades aquíferas e cinco unidades não aquíferas na área de estudo. Das unidades aquíferas, têm-se os Aquíferos de Coberturas, Aquífero Gandarela, Aquífero Cauê e Aquífero Moeda. Já as unidades não aquíferas, cita-se os aquíferos Sabará, Piracicaba, Batatal, Nova Lima e Complexo Bonfim. A determinação dessas unidades considerou não apenas as características litológicas das formações homônimas, mas principalmente as características hidráulicas, como a quantidade de poços, média de vazão, capacidade específica e profundidade das camadas.

O aquífero Complexo Bonfim possui caráter fissural formado por rochas cristalinas graníticas-gnáissicas do Complexo Bonfim, correspondendo o embasamento da região de estudo. Esta unidade não aquífera, apresenta baixo potencial hidrogeológico devido a sua heterogeneidade e anisotropia (Magalhães *et al.*, 2022). No flanco sul da Homoclinal Serra do Curral, a oeste da interseção com a Serra da Moeda, esta unidade tem cerca de 49 km<sup>2</sup> aflorante e a partir de 15 poços analisados nesta unidade foi possível identificar uma capacidade específica média de 0,95 m<sup>3</sup>/h/m, além deste parâmetro foi observado uma profundidade média do nível d'água de 9 metros, baixa e pertinente com formações cristalinas de baixa porosidade. Ferreira e Bacellar (2010) apontaram valores de transmissividade entre  $9,0 \times 10^{-6}$  e  $1,4 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s para esta unidade.

O aquífero Nova Lima apresenta uma ampla área aflorante na Serra do Curral, totalizando cerca de 162 km<sup>2</sup>, principalmente no flanco sul, e assim como o aquífero Complexo Bonfim, é uma unidade não aquífera heterogênea e anisotrópica (Magalhães *et al.*, 2022), condicionada a porosidade secundária dos xistos e filitos que compõe esta unidade. A partir de 61 poços analisados nesta unidade pode-se observar uma capacidade específica média de 0,30 m<sup>3</sup>/h/m. A profundidade média de nível d'água desta unidade observada a partir dos poços foi de 30 metros, sendo a máxima de 85 metros em um dos poços.

O aquífero Moeda, com sua ocorrência localizada próximo a interseção da Homoclinal Serra do Curral com a Serra da Moeda, possui uma área aflorante de 5,7 km<sup>2</sup>. A análise de 9 poços nesta unidade possibilitou estimar uma profundidade máxima de 345 metros e mínima de aproximadamente 70 metros, para esta unidade na área de estudo, corroborando para a hipótese de Braga (2006), que discute que esta unidade apresenta profundidade praticamente constantes. Segundo Andrade *et al.* (2025), este aquífero apresenta maiores dimensões na porção onde se situa o Sinclinal Serra da Moeda. Este aquífero é caracterizado predominantemente por quartzitos, sendo um aquífero heterogêneo e anisotrópico (Andrade,

2025). Segundo Magalhães *et al.* (2022), esta unidade é predominantemente fissural, porém pode apresentar caráter poroso em certas regiões, além disso, a autora identificou profundidades médias do nível d'água a 76 metros, próximo aos 56 metros observados neste estudo. A capacidade específica média medida nos poços analisados desta unidade foi de 0,47 m<sup>3</sup>/h/m e vazões de 10 m<sup>3</sup>/h, Mourão (2007) evidenciou valores de vazão de nascentes desta unidade na ordem de 18 m<sup>3</sup>/h.

O aquitardo Batatal é uma unidade não aquífera na região de estudo, compostas por filitos homogêneos, tem superfície aflorante de 11,9 km<sup>2</sup> na Serra do Curral na porção de interseção com a Serra da Moeda, onde foram analisados 7 poços nesta unidade, onde nestes, foi possível observar uma capacidade específica média de 0,43 m<sup>3</sup>/h/m. Este aquitardo apresenta profundidades bem menores (variando entre 90 e 360 metros, com média de 218 metros) que os demais aquitardos, devido a esta característica é comum uma maior transmissão de água nesta unidade (Mourão, 2007; Ventura e Bacellar, 2011). Vale destacar que, apesar de a unidade Batatal ser composta majoritariamente por filitos que normalmente possuem baixo potencial aquífero, devido à sua baixa profundidade dentro da área de estudo e ao alto grau de fraturamento e a geometria das foliações (Mourão, 2007), além de estar localizada entre dois aquíferos de grande produtividade, foi atribuída como um sistema aquífero de permeabilidade intermediária a localmente alta, em conformidade com os estudos de Ventura e Bacellar (2011), onde localmente dependendo do seu grau de fraturamento, pode trocar água entre os aquíferos Gandarela, Cauê e Moeda. Andrade *et al.* (2025) aponta ainda que este aquitardo pode atuar como unidade confinante do Aquífero Moeda em certas localidades da região.

O aquífero Cauê é caracterizado por formações ferríferas bandadas (hematitas e itabiritos) e possui porosidade granular e fissural. Devido às variações litológicas e a complexidade estrutural, ele se revela como um aquífero heterogêneo e anisotrópico (Mourão, 2007). Esta unidade aquífera está distribuída por toda extensão da Homoclinal Serra do Curral, apresentando uma área aflorante de 58 km<sup>2</sup>. O aquífero é amplamente estudado na região devido a sua riqueza hidrogeológica, apresentando o maior número de poços (68 poços), com vazões e capacidades específicas médias elevadas, respectivamente, 68 m<sup>3</sup>/h e 5,18 m<sup>3</sup>/h/m, desta forma sendo uma unidade singular comparado com as outras unidades levantadas neste trabalho. Os valores médios de condutividade hidráulica encontrados corroboram com o intervalo de condutividade hidráulica (0,41 m<sup>3</sup>/h/m – 11,48 m<sup>3</sup>/h/m) observado por Andrade *et al.* (2025) para a mesma unidade. Estas características colocam o aquífero Cauê como a unidade aquífera mais produtiva da região estudada. Além do caráter produtivo, esta unidade é marcada por uma grande extensão, apresentando profundidade máxima maiores que 1100 metros,

mínima de 206 metros e média de 682 metros, correlata a profundidade das camadas observadas por Magalhães *et al.* (2022).

Se pode observar um padrão claro na profundidade do nível d'água: a maior profundidade é registrada no Aquífero Cauê (146 metros), com uma redução progressiva nas unidades adjacentes, atingindo o nível mais raso no Aquitardo Complexo Bonfim (máximo 33 metros). Esse fenômeno ocorre devido às maiores cotas de afloramento da Formação Cauê e ao intenso bombeamento nessa unidade aquífera. Observa-se que as unidades Moeda e Batatal possuem profundidade praticamente constantes, embora estas não se apresentem de forma contínua.

Caracterizado por rochas carbonáticas (dolomitos e calcários) o aquífero Gandarela é do tipo cárstico-fissural, heterogêneo e anisotrópico (Andrade *et al.*, 2025; Magalhães *et al.*, 2022). Está localizado na porção central da Homoclinal Serra do Curral, com uma área aflorante de 23,6 km<sup>2</sup>. Foram analisados 41 poços locados nesta unidade e a média da condutividade hidráulica observada nestes poços foi de 0,48 m<sup>3</sup>/h/m, valores mais baixos ao comparar com os levantados por Mourão (2007) de 2,8 m<sup>3</sup>/h/m. A profundidade média e a profundidade do nível d'água observado para esta unidade foram respectivamente, 576 metros e 45 metros, valores bem próximos aos encontrados por Magalhães *et al.* (2022) ao analisar esta unidade na Serra da Moeda. Ainda relacionando com o Sinclinal Serra da Moeda, Andrade *et al.* (2025), aponta que esta unidade se caracteriza como livre, porém, por vezes, pode estar confinado pelos aquitardos Piracicaba e Sabará, que serão descritos a seguir.

Os aquitardos Piracicaba e Sabará tem ampla distribuição no Homoclinal Serra do Curral, com respectivamente, 78,3 km<sup>2</sup> e 133,6 km<sup>2</sup> de área aflorante na região, sendo distribuídos por toda extensão da Serra. Ambas as unidades, são não aquíferas com poços pouco produtivos (vazão média de 5 m<sup>3</sup>/h para o aquitardo Piracicaba e 10 m<sup>3</sup>/h para o aquitardo Sabará), estes aquitardos são compostos por quartzitos, metassiltitos e filitos, possuindo porosidade fissural, são heterogêneos e de caráter anisotrópico (Andrade *et al.*, 2025). Os valores médios de capacidade específica encontrados foram baixos, sendo 0,14 m<sup>3</sup>/h/m no aquitardo Piracicaba e 0,12 m<sup>3</sup>/h/m no aquitardo Sabará, valores que podem ser relacionados com os baixos valores de capacidade específica levantados por Beato & Bertachini (2005). Um ponto que deve ser destacado é a profundidade destas unidades, sendo que os valores médios de profundidade na Serra do Curral do aquitardo Piracicaba é de 540 metros, e do aquitardo Sabará de 500 metros.

Embora as coberturas lateríticas e aluvionares sejam classificadas como aquíferos, sua profundidade reduzida em relação às outras unidades as torna pouco significativas neste estudo

regional. Por isso, são consideradas apenas como unidades de armazenamento superficial e facilitadoras da recarga para as camadas subjacentes.

A Figura 6 apresenta a distribuição tanto das unidades e seções hidrogeológicas definidas, quanto as condições de contorno. As características e definições de cada unidade aquífera identificada no Homoclinal Serra do Curral estão apresentadas na Tabela 2.

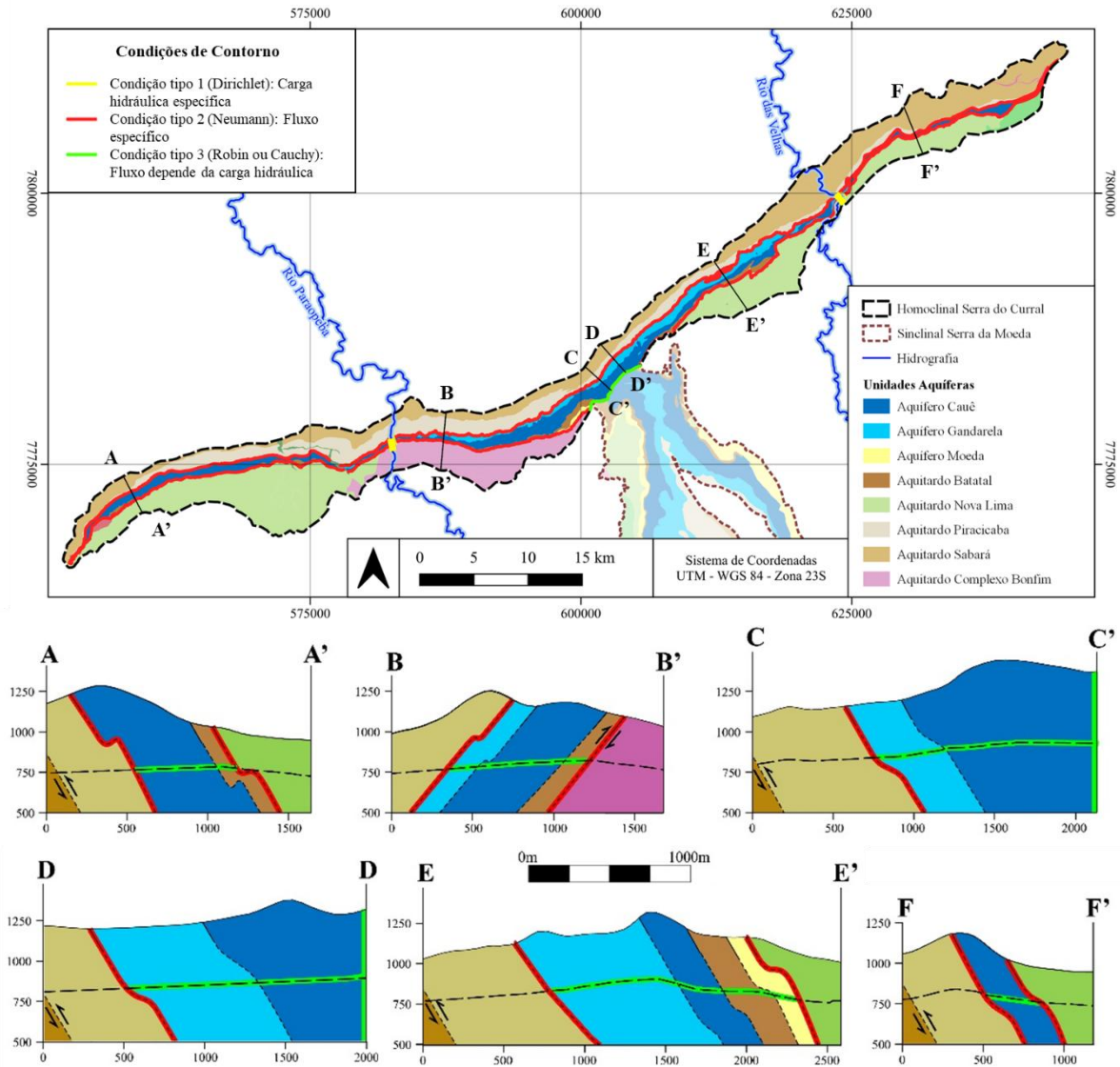


Figura 6 – Mapa e seções das unidades aquíferas e condições de contorno definidas dentro da área de estudo. Disposição em planta e seções da distribuição hidroestratigráfica das três unidades aquíferas e cinco unidades não aquíferas delimitadas; Apresenta duas condições de contorno tipo 1, restrita as drenagens Rio Paraopeba e Rio das Velhas e inseridas dentro das unidades aquíferas do sistema (linhas amarelas); Apresenta seis contatos com condições de contorno tipo 2, marcando os contatos entre unidades aquíferas e aquitardos (linhas vermelhas); Apresenta condição de contorno tipo 3, tanto localizada na porção central e borda sul, evidencia continuidade das unidades permeáveis no contato entre o Homoclinal Serra do Curral e Sinclinal Serra da Moeda (linha verde), quanto na compartimentação vertical (linha tracejada preta) dentro das unidades aquíferas (linha verde sobre tracejada preta).

Tabela 2 - Definição e características das unidades aquíferas identificadas no Homoclinal Serra do Curral. (Seção está restrita a área do Homoclinal Serra do Curral, a profundidade pode ser maior devido a extensão de unidades aquíferas na porção centro-sul sentido Sinclinal Moeda).

Unidades Aquíferas	Litologia	Porosidade	Área (km <sup>2</sup> )	Número de Poços	Vazões Médias (m <sup>3</sup> /h)	Capacidade Específica	Profundidade (m)	Nível D'água (m)
<b>Aquíferos de Coberturas</b>	Depósitos lateríticos e aluvionares	Porosidade primária, livre, heterogêneo e anisotrópico <sup>1,2</sup>	18.6	0	-	-	-	-
<b>Aquitardo Sabará</b>	Metassedimentares (xistos, quartzitos, filitos, etc)	Porosidade secundária e pontualmente primária, heterogêneo e anisotrópico <sup>1,2</sup>	133.6	53	5	Média: 0.1257 Mediana: 0.0997	Média: 500 Máx: 860 Min: 183	Média: 22 Máx: 78
<b>Aquitardo Piracicaba</b>	Quartzitos e filitos	Porosidade secundária, heterogêneo e anisotrópico <sup>1,2</sup>	78.3	20	10	Média: 0.1434 Mediana: 0.0672	Média: 540 Máx: 870 Min: 206	Média: 43 Máx: 86
<b>Aquífero Gandarela</b>	Calcários e dolomitos	Porosidade secundária e terciária, heterogêneo e anisotrópico <sup>1,2</sup>	23.6	41	16	Média: 0.4806 Mediana: 0.3000	Média: 576 Máx: 924 Min: 245	Média: 45 Máx: 76
<b>Aquífero Cauê</b>	Hematita e itabiritos	Porosidade primária e secundária, livre/confinado, heterogêneo e anisotrópico <sup>2</sup>	58.0	68	68	Média: 5.1800 Mediana: 2.8165	Média: 682 *Máx: 1100 Min: 206	Média: 46 Máx: 146
<b>Aquitardo Batatal</b>	Filitos	Porosidade secundária, heterogêneo e anisotrópico <sup>1,2</sup>	11.9	7	7	Média: 0.4321 Mediana: 0.3944	Média: 218 Máx: 360 Min: 90	Média: 20 Máx: 36
<b>Aquífero Moeda</b>	Quartzitos	Porosidade secundária <sup>2,3</sup>	5.7	9	10	Média: 0.4766 Mediana: 0.1984	Média: 188 Máx: 345 Min: 70	Média: 56 Máx: 88
<b>Aquitardo Nova Lima</b>	Xistos e filitos	Porosidade secundária, heterogêneo e anisotrópico <sup>1</sup>	162.8	61	6	Média: 0.3007 Mediana: 0.1111	Média: 367 Máx: 520 Min: 214	Média: 30 Máx: 85
<b>Aquitardo Complexo Bonfim</b>	Granito-gnaisses	Porosidade secundária, heterogêneo e anisotrópico <sup>1</sup>	49.3	15	6	Média: 0.9533 Mediana: 0.2546	Média: 521 Máx: 783 Min: 220	Média: 9 Máx: 33

\*Referências Porosidade: 1- Magalhães *et al.*, 2022; 2- Andrade *et al.*, 2025; 3- Zupo *et al.*, 2025.

Pelas análises e modelos confeccionados adotou-se a metade da profundidade como limite para a compartimentação vertical das unidades aquíferas, independentemente de sua composição litológica, representando adequadamente a influência do gradiente geomecânico sobre a estruturação do meio poroso (seções hidrogeológicas da Figura 6). Sendo a zona superior, corresponde ao domínio fraturado, enquanto a zona inferior, abaixo desse limite, é caracterizada por rocha compactada com menor capacidade de fluxo, devido ao fechamento progressivo de fraturas e poros (Ladeira, 2025).

A condição de contorno do tipo 1 ou Dirichlet (carga hidráulica específica) foi aplicada às duas principais drenagens que atravessam a área: rio Paraopeba e rio das Velhas, a oeste e a leste, respectivamente (Figura 6). O rio Paraopeba e o rio das Velhas, os quais apresentam

condição de contorno do tipo 1, representam fronteiras com carga hidráulica fixa. Assim, assume-se que o nível da água nos rios permanece constante ao longo do tempo, influenciando diretamente o fluxo subterrâneo adjacente.

Os rios Paraopeba e das Velhas desempenham um papel fundamental no sistema hidrogeológico da área estudada, ao atuarem como fronteiras hidráulicas controladas por nível d'água constante, modeladas por meio de condições de contorno do tipo Dirichlet. Essa representação é amplamente adotada em modelos de fluxo subterrâneo para corpos hídricos superficiais com grande capacidade de recarga ou drenagem, cujos níveis permanecem praticamente constantes ao longo do tempo (Anderson & Woessner, 2015; McDonald & Harbaugh, 1988).

Essa condição implica que os rios exercem forte controle sobre o fluxo subterrâneo regional, especialmente nas porções mais rasas dos aquíferos fraturados das unidades aquíferas dos Grupos Itabira e Caraça. Nas áreas próximas aos leitos fluviais, os rios podem funcionar: (i) como drenos naturais, recebendo descarga de água subterrânea quando o nível freático é superior ao nível do rio; ou (ii) como zonas de recarga, permitindo a infiltração da água superficial para o aquífero, quando o nível freático está abaixo do nível do rio (Fetter, 2001).

Portanto, os rios representam zonas de troca ativa entre os domínios superficial e subterrâneo, influenciando diretamente os gradientes hidráulicos locais e regionais. Essa interação condiciona a formação de zonas de fluxo preferencial nos compartimentos superiores dos aquíferos e contribui significativamente para o fechamento do balanço hídrico do sistema como um todo (Hester e Gooseff, 2020).

Adicionalmente, a adoção da condição do tipo Dirichlet assegura estabilidade numérica ao modelo e confere realismo físico à representação de corpos hídricos de grande escala, como é o caso do rio Paraopeba e do rio das Velhas. Estes, por pertencerem a bacias hidrográficas regionais, mantêm suas cotas piezométricas mesmo diante de variações sazonais ou perturbações locais, funcionando assim como níveis de referência estáveis para o fluxo subterrâneo (Reichard, 1995; Konikow & Mercer, 1988).

As condições de contorno do tipo 2 ou Neumann (fluxo nulo) foram adotadas para unidades hidrogeológicas com baixa permeabilidade e porosidade, compondo quase toda a extensão das unidades aquíferas dentro do Homoclinal Serra do Curral. Dentro deste limite, ocorre o contato entre as unidades aquíferas do Grupo Itabira e os aquitardos dos Grupos Piracicaba e Sabará na borda norte da área. Na borda sul, tanto as unidades aquíferas do Grupo Itabira quanto as do Grupo Caraça fazem limite com os aquitardos do Complexo Bonfim e do Grupo Nova.

A condição de contorno do tipo 3 ou Cauchy & Robin (fluxo dependente da carga hidráulica) foi adotada no limite entre o Homoclinal Serra do Curral e o Sinclinal Serra da Moeda, devido à continuidade das unidades aquíferas permeáveis, que pertencem aos Grupos Itabira e Caraça. Devido a compartimentação vertical supracitada, a condição de contorno do tipo 3 também foi adotada para o limite entre a zona fraturada e compactada dentro das unidades aquíferas, como pode ser observado nas seções hidrogeológicas da Figura 6.

Como citado no capítulo de materiais e métodos, foram analisados testes de bombeamento entre as quatro unidades hidrogeológicas compreendidas nas condições de contorno, utilizando o *software AquiferTest*<sup>TM</sup>. Os valores médio, máximo e mínimo de condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) para cada uma das unidades estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros hidrodinâmicos médios, máximos e mínimos, obtidos para as unidades contidas dentro das condições de contorno do Homoclinal Serra do Curral a partir dos testes de bombeamento analisados.

Unidade Aquífera	k (m/s)			T (m <sup>2</sup> /s)			S		
	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min
<b>Aquífero Gandarela</b>	1.99x10 <sup>-6</sup>	5.15x10 <sup>-6</sup>	9.30x10 <sup>-9</sup>	1.50x10 <sup>-4</sup>	4.79x10 <sup>-4</sup>	7.07x10 <sup>-7</sup>	1.12x10 <sup>-2</sup>	3.76x10 <sup>-2</sup>	7.74 x10 <sup>-5</sup>
<b>Aquífero Cauê</b>	6.71x10 <sup>-6</sup>	1.58x10 <sup>-5</sup>	1.14x10 <sup>-7</sup>	3.09x10 <sup>-4</sup>	7.75x10 <sup>-4</sup>	1.19x10 <sup>-5</sup>	3.15x10 <sup>-2</sup>	4.99x10 <sup>-2</sup>	3.26x10 <sup>-3</sup>
<b>Aquitardo Batatal</b>	1.81x10 <sup>-7</sup>	3.02x10 <sup>-7</sup>	5.95x10 <sup>-8</sup>	1.52x10 <sup>-5</sup>	2.45x10 <sup>-5</sup>	5.89x10 <sup>-6</sup>	4.53x10 <sup>-3</sup>	8.93x10 <sup>-3</sup>	1.33x10 <sup>-4</sup>
<b>Aquífero Moeda</b>	3.68x10 <sup>-7</sup>	9.09x10 <sup>-7</sup>	9.52x10 <sup>-8</sup>	2.54x10 <sup>-5</sup>	5.91x10 <sup>-5</sup>	7.14x10 <sup>-6</sup>	1.88x10 <sup>-2</sup>	5.51x10 <sup>-2</sup>	6.9x10 <sup>-5</sup>

Observa-se que as quatro unidades analisadas apresentam valores semelhantes para a média dos parâmetros hidrodinâmicos: entre 10<sup>-6</sup> e 10<sup>-7</sup> m/s para a condutividade hidráulica, entre 10<sup>-4</sup> e 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s para a transmissividade, e entre 10<sup>-2</sup> e 10<sup>-3</sup> para o armazenamento. O aquífero Cauê apresenta os maiores valores para todos os parâmetros hidráulicos analisados, corroborando com a bibliografia e suas características aquíferas.

A média dos parâmetros hidrogeológicos obtidos neste estudo foi comparada com os valores reportados por Andrade *et al.* (2025), Magalhães *et al.* (2022) e Mourão (2007) para os aquíferos Gandarela, Cauê, Moeda e o aquífero Batatal (Tabela 1).

No caso do Aquífero Gandarela, a condutividade hidráulica média (1,99×10<sup>-6</sup> m/s) foi significativamente superior aos valores de Andrade (8×10<sup>-8</sup> m/s) e Magalhães (7,38×10<sup>-8</sup> m/s), indicando maior permeabilidade local. A transmissividade (1,50×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s) também se mostrou mais elevada, sugerindo maior potencial de transmissão de água. O coeficiente de

armazenamento ( $1,12 \times 10^{-2}$ ) ficou entre os valores dos dois autores, indicando compatibilidade geral dos dados.

Para o Aquífero Cauê, os valores de condutividade hidráulica ( $6,71 \times 10^{-6}$  m/s) e transmissividade ( $3,09 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s) foram superiores aos de Andrade ( $1 \times 10^{-8}$  e  $7 \times 10^{-7}$ , respectivamente), e próximos aos de Magalhães ( $9,45 \times 10^{-7}$  e  $9,75 \times 10^{-5}$ ), demonstrando boa produtividade hidráulica. O coeficiente de armazenamento ( $3,15 \times 10^{-2}$ ) também ficou entre os valores da literatura, evidenciando variabilidade local nos parâmetros de armazenamento.

O Aquitardo Batatal apresentou condutividade hidráulica média de  $1,81 \times 10^{-7}$  m/s, valor intermediário entre o relatado por Magalhães ( $2,59 \times 10^{-7}$  m/s) e Mourão (não especificado numericamente, mas descrito como unidade de baixa permeabilidade). A transmissividade média obtida ( $1,52 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s) também foi coerente com os dados de Magalhães ( $4,60 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s), demonstrando consistência entre os estudos. O coeficiente de armazenamento, com média de  $4,53 \times 10^{-3}$ , reforça sua classificação como aquitardo, ainda que com zonas de fraturamento localizadas que possibilitam alguma mobilidade hídrica — fato também observado por Mourão (2007).

No caso do Aquífero Moeda, os valores obtidos neste trabalho para condutividade hidráulica ( $3,68 \times 10^{-7}$  m/s), transmissividade ( $2,54 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s) e coeficiente de armazenamento ( $1,88 \times 10^{-2}$ ) foram compatíveis com os de Magalhães *et al.* (2022), evidenciando a validade dos resultados estimados e o bom grau de fraturamento do quartzito nesta porção do sistema.

Os valores de condutividade hidráulica obtidos neste estudo para o Aquitardo Batatal variaram de  $5,95 \times 10^{-8}$  a  $3,02 \times 10^{-7}$  m/s, com média de  $1,81 \times 10^{-7}$  m/s. Esses resultados são significativamente superiores aos reportados por Mourão (2007), que variaram de  $1,16 \times 10^{-13}$  a  $1,16 \times 10^{-10}$  m/s. Essa discrepância pode ser justificada pela pequena espessura da unidade e pelo maior grau de fraturamento observado na área de estudo, que confere maior permeabilidade local, ainda que o Batatal seja classificado regionalmente como um aquitardo.

## 6.2. Balanço Hídrico de Massa

O mapa dos domínios das estações pluviométricas, elaborado com base no método de Thiessen (1911), destaca distribuição das sete estações utilizadas para a análise pluviométrica (Figura 7). Observa-se que, no período chuvoso, a precipitação é mais intensa nas estações situadas na porção central e inseridas na RMBH, ultrapassando média de 350 mm em dezembro nas estações Belo Horizonte e Nova Lima. A Figura 7 detalha a área representada por cada estação pluviométrica, as respectivas pluviometrias anuais médias e os resultados obtidos pelo

método de Thiessen, além de gráficos das pluviometrias mensais médias por estação. A precipitação média anual para toda a área de estudo, considerando o período de 1991 a 2020, foi de 1426,25 mm, que apresenta a média ponderada de cada estação. Esse valor é fortemente influenciado pela representatividade das estações Sabará, Igarapé e Ibirité, que juntas contribuem com cerca de dois terços do volume total precipitado na região.

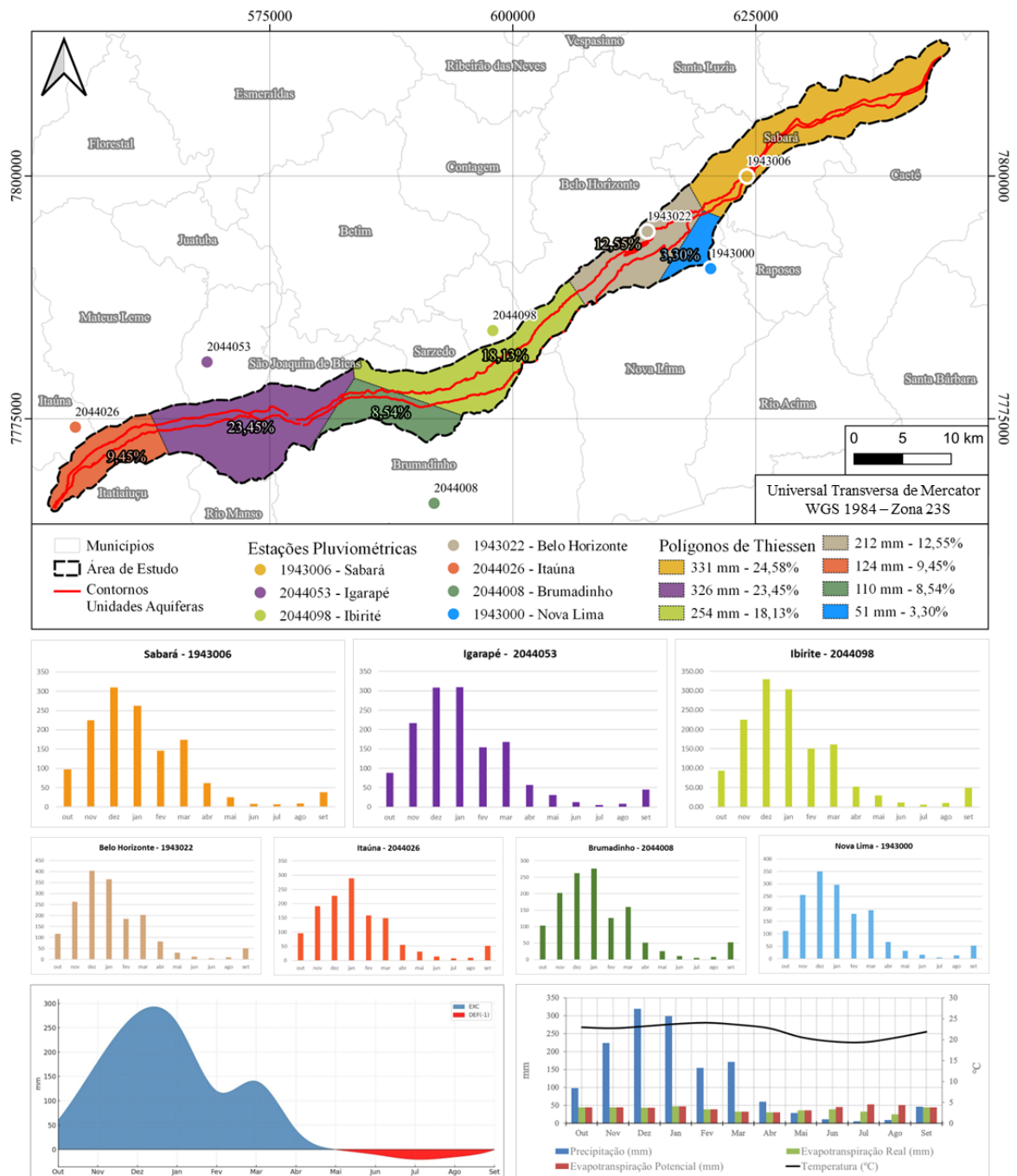


Figura 7 - Mapa com delimitação dos polígonos da representatividade em percentual e milímetros de contribuição de cada estação pluviométrica a partir do método dos polígonos de Thiessen (1911), localização das estações, código e município sediado; Apresentação dos pluviogramas de média mensal por estação compreendidos no período de 1991 a 2020; As cores dos gráficos fazem referência a suas respectivas estações demonstradas no mapa, os eixos y referem-se a pluviometria em milímetros, enquanto os eixos x apresentam a média mensal dentro do período levantado; Gráfico do extrato do balanço hídrico, com excedente hídrico (azul) e déficit hídrico (vermelho); Gráfico do balanço hídrico sequencial mensal, apresentando evapotranspiração real e potencial, temperatura e pluviometria média neste período.

Para a realização do balanço hídrico climatológico segundo o método de Thornthwaite-Mather (1955), foi considerado o total pluviométrico de 1426,25 mm, que apresenta a média ponderada de cada estação, valor este obtido pelo método de Thiessen. A capacidade de campo foi estabelecida em 115 mm. Como média para o período estudado, os resultados obtidos para toda a área foram: ETR de 454,3 mm (32%), ETP de 512,0 mm (36%), EXC de 1042,8 mm (73%), DEF de 57,7 mm (4%) e ARM de 956,5 mm (67%). Observa-se um déficit hídrico entre os meses de maio e setembro, e um excedente entre outubro e abril (Figura 7). Esses valores são consistentes com o clima subtropical úmido, onde a precipitação supera a evapotranspiração.

Para o cálculo da recarga, conforme o método descrito, foram utilizados instrumentos de monitoramento do nível d'água representativos, com série histórica e localizados nas principais unidades aquíferas. Os resultados obtidos foram comparados com estudos de outros autores para as mesmas unidades aquíferas e podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação entre as taxas de recarga obtidas pelo método WTF e bibliografia.

Unidades Hidrogeológicas	Recarga (%)			
	Calculada (Autor)	Andrade <i>et al.</i> (2025)	Magalhães <i>et al.</i> (2022)	Mourão (2007)
<b>Aquífero Gandarela</b>	18.41	28	16.52	21.90
<b>Aquífero Cauê</b>	39.57	26	38.67	39.52
<b>Aquitardo Batatal</b>	6.89	5	5.85	-
<b>Aquífero Moeda</b>	28.91	18	27.60*	-

\*Magalhães *et al.* (2022) adotou para o Aquífero Moeda o valor médio de recarga entre os Aquíferos Cauê e Gandarela.

As taxas de recarga estimadas para as unidades hidrogeológicas da área de estudo mostram correspondência com os valores reportados por Mourão (2007), Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025), com variações atribuídas às características estruturais e litológicas locais.

O Aquífero Cauê, principal unidade hidrogeológica da área, apresentou recarga de 39,57%, valor praticamente idêntico ao de Mourão (39,52%) e muito próximo ao de Magalhães (38,67%). Essa convergência reforça sua importância na dinâmica do fluxo subterrâneo e na disponibilidade hídrica regional.

O Aquífero Gandarela apresentou recarga de 18,41%, inferior à média de Andrade (28%), mas entre os valores de Mourão (21,90%) e Magalhães (16,52%), sendo a variação atribuída à baixa porosidade primária e à menor densidade de fraturas (Mourão, 2007). Para o Aquitardo Batatal, a taxa de 6,89% aproxima-se das estimativas de Andrade (5%) e Magalhães (5,85%), com variação explicada por sua baixa espessura e fraturamento heterogêneo. Já o

Aquífero Moeda apresentou recarga de 28,91%, superior à de Andrade (18%) e próxima à de Magalhães (27,60%), compatível com sua composição quartzítica e grau de fraturamento na área central do estudo.

Os resultados evidenciam a coerência entre este estudo e a literatura, com destaque para o Aquífero Cauê, cuja estabilidade nos valores de recarga confirma sua relevância regional como reservatório subterrâneo.

Neste estudo, os valores das taxas de recarga foram aplicados para estimar a reserva renovável, conforme apresentado nos materiais e métodos. O cálculo da reserva renovável foi baseado na média das taxas de recarga dos aquíferos Gandarela, Cauê e Moeda e do aquífero Batatal, unidades inseridas dentro das condições de contorno.

A fim de comparar as reservas renováveis, total e do Aquífero Cauê, com a taxa de bombeamento da área de estudo, apresenta-se o gráfico da Figura 8, evidenciando excedentes ou déficits anuais e o impacto da exploração hídrica regional. Os volumes de bombeamento anuais autorizados na região foram somados, com o resultado indicado pela linha vermelha no gráfico e foi calculado o excedente hídrico por ano hidrológico para melhor visualização do impacto da exploração d'água dentro da área de estudo.

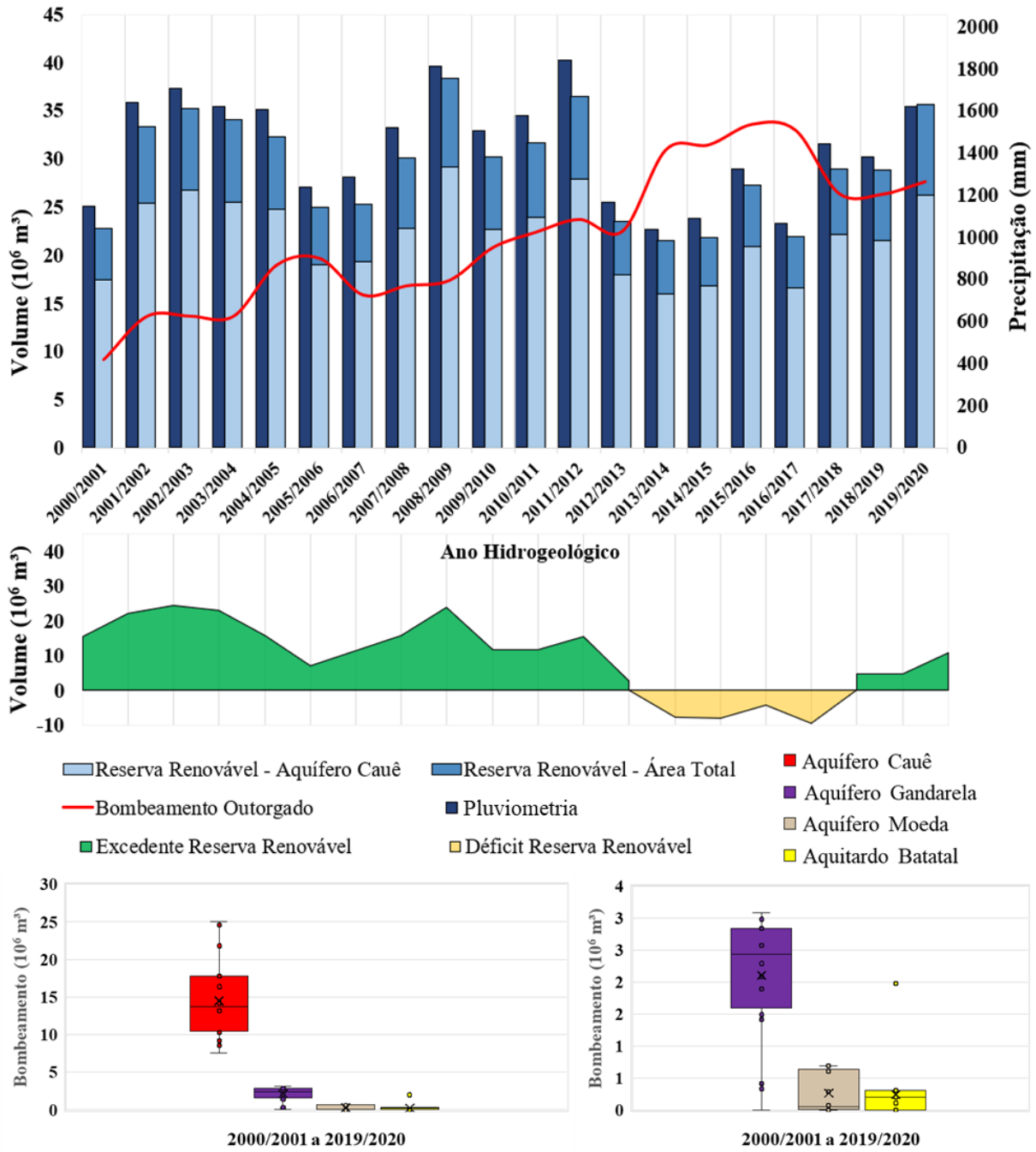


Figura 8 – Gráfico do volume da reserva renovável total (coluna azul), da reserva renovável do Aquífero Cauê (coluna azul clara) e da pluviosidade total (coluna azul escura); Excedente e déficit hídrico (colunas verde e amarela, respectivamente) considerando a diferença entre a reserva renovável total e o volume de captações outorgadas (linha vermelha), todos separados pelo volume e precipitação por ano hidrológico dentro das condições de contorno definidas entre os anos de 2000 e 2020; Gráficos *boxplot* apresentando os volumes de bombeamento de cada unidade aquífera compreendida dentro das condições de contorno evidenciando a superioridade de bombeamento outorgado no aquífero Cauê (vermelho).

O gráfico demonstra que a pluviosidade está diretamente relacionada ao volume de reserva renovável, ou seja, altas taxas pluviométricas aumentam o volume da reserva e vice-versa. Essa atinge seu máximo no ano hidrológico de 2008/2009 e o pico mínimo em 2013/2014, com

volumes de  $38,4 \times 10^6 \text{ m}^3$  e  $21,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , respectivamente. A média por ano hidrológico do volume total da reserva renovável dentro do período estudado, 20 ciclos, foi de  $29,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Observa-se também que existe uma tendência gradual de aumento das taxas de bombeamento outorgadas ao longo dos anos analisados e durante os anos de maior estiagem, entre 2013/2014 e 2016/2017, o volume total de água captado ultrapassa a reserva renovável total da área. A termo de visualização do grau de impacto que principalmente o Aquífero Cauê sofre dentro da área de estudo, a Figura 8 apresenta gráfico com os volumes bombeados em cada unidade aquífera entre os anos hidrológicos de 2000/2001 e 2019/2020.

A análise comparativa entre os volumes anuais bombeados e a reserva renovável do Aquífero Cauê indica que, nos anos hidrológicos de 2005/2006 e de 2012/2013 a 2019/2020, o volume extraído superou a recarga estimada para essa unidade aquífera. Esse excedente de bombeamento revela um cenário de exploração acima da capacidade de renovação do sistema, evidenciado pelo déficit hídrico (coluna amarela) o qual atinge  $9,3 \times 10^6 \text{ m}^3$  negativos no ano hidrológico de 2016/2017. Isso se deve não apenas a alta taxa de bombeamento, que atingiu o volume  $33,0 \times 10^6 \text{ m}^3$  neste ano, mas também a baixa pluviometria de apenas 1065 mm.

As principais incertezas dessas estimativas incluem os volumes de bombeamento e a taxa de recarga. A quantidade de água concedida representa o mínimo de bombeamento registrado na região (Figura 8), não contemplando poços não registrados, o que sugere que o impacto real é provavelmente maior do que o apresentado. Além disso, a taxa de recarga pode variar localmente devido a fatores como cobertura do solo, uso da terra e variações litológicas, e é provável que seja menor na prática, dado que esses fatores dificultam a recarga do aquífero.

### 6.3. Fluxo D'água Subterrânea

Para entender o fluxo de água subterrânea na área de estudo, foi elaborado um mapa potenciométrico com dados de nível de água de 2020, ano mais atual com dados consolidados pelo banco de dados levantado e analisado no presente estudo. Os dados incluem outorgas de captações, instrumentos de monitoramento do nível d'água, cabeceiras de drenagens e nascentes. A Figura 9 apresenta a superfície potenciométrica e seções hidrogeológicas retiradas do modelo confeccionado onde foram traçadas as linhas com direção de fluxo d'água subterrânea e evidenciados os contatos das condições de contorno interpretadas.

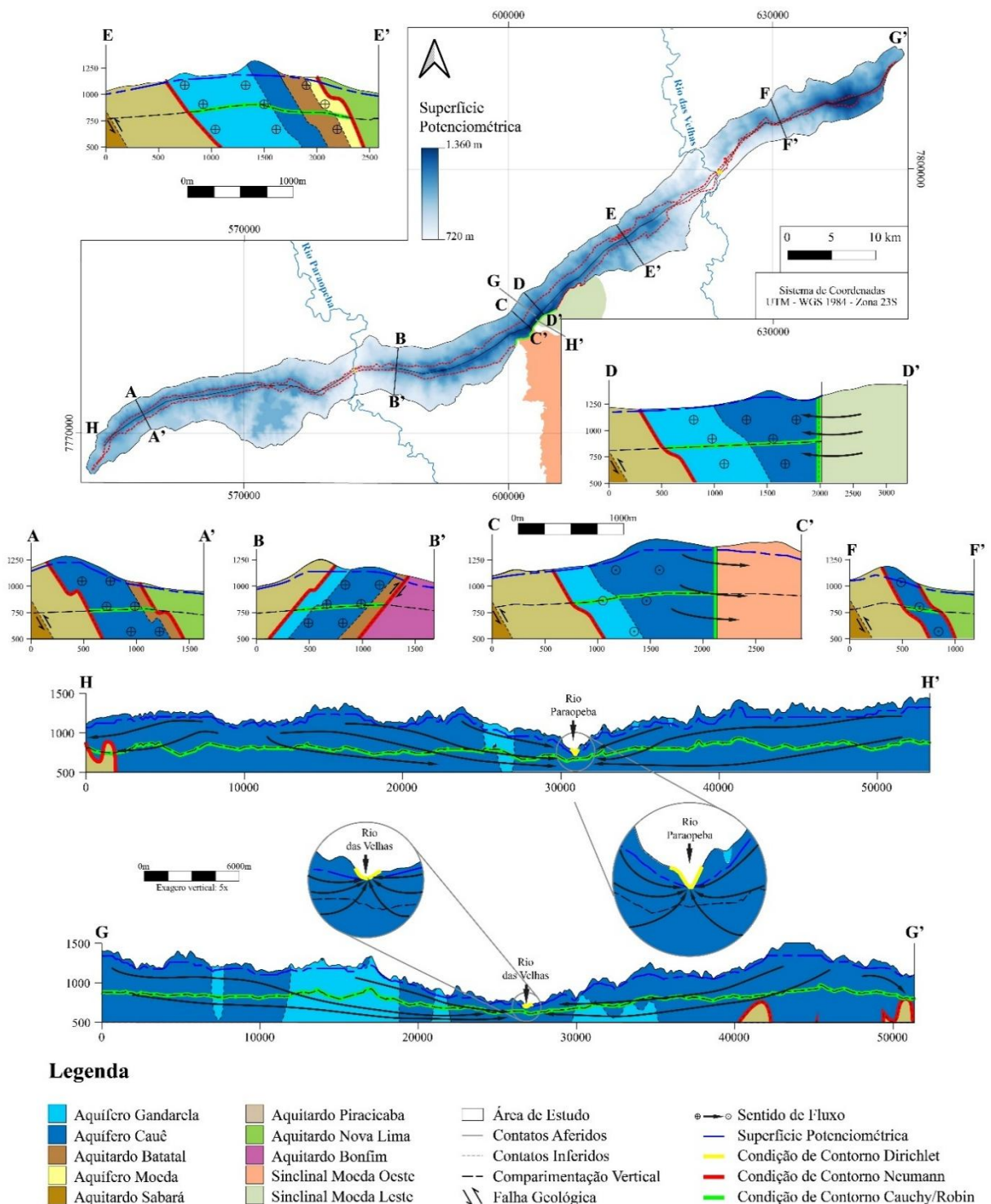


Figura 9 - Mapa da superfície potenciométrica do Homoclinal Serra do Curral, delimitação dos contatos com o Sinclinal Moeda Oeste (laranja) e Sinclinal Moeda Leste (verde), delimitação das condições de contorno interpretadas e principais drenagens da região, rios Paraopeba e das Velhas; Seções hidrogeológicas contendo estruturas geológicas, superfície potenciométrica, compartimentação vertical, sentido de fluxo d'água subterrânea e condições de contornos; A fim de melhorar visualização nas seções H-H' e G-G' foi aplicado exaço vertical de 5 vezes, as demais seções não possuem qualquer tipo de exaço.

A análise do mapa potenciométrico elaborado para o Homoclinal Serra do Curral permitiu identificar o padrão regional de fluxo subterrâneo de água ao longo da estrutura geológica. O gradiente hidráulico, representado pela variação de cores em tons de azul, evidencia superfície potenciométrica que varia entre 720 m e 1360 m. As curvas equipotenciais foram interpoladas com base nos dados de nível d'água provenientes de piezômetros, cabeceiras de drenagens e nascentes, conforme metodologia consagrada em estudos hidrogeológicos regionais (Fetter, 2001; Brassington, 2017).

As direções de fluxo subterrâneo, traçadas a partir das curvas equipotenciais, seguem majoritariamente trajetórias perpendiculares às mesmas, em conformidade com o princípio de Darcy, que rege o movimento da água em meios saturados (Davis & De Wiest, 1980). Tais fluxos convergem para os principais exutórios da região: o rio Paraopeba, na porção oeste, e o Rio das Velhas, na porção leste do domínio hidrogeológico. Essa convergência reflete o papel hidrogeológico desses cursos d'água como zonas de descarga natural dos aquíferos da Serra do Curral, reforçando observações similares em estudos regionais do Quadrilátero Ferrífero (Mourão, 2007; Gonçalves *et al.*, 2019). Além de corroborar com a condição de contorno de carga hidráulica específica (tipo Dirichlet) definida anteriormente.

Importante ressaltar que a área de estudo recebe contribuição d'água do Sinclinal Moeda Leste (em verde) e fornece água para o Sinclinal Moeda Oeste (em laranja), conforme sugerido por Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025). Na porção central, no entroncamento das serras, observa-se a divisão do fluxo subterrâneo, com direcionamento tanto para nordeste quanto para sudoeste, em direção aos principais rios da região.

Além disso, a compartimentação vertical em dois setores evidencia coerência hidrodinâmica com o arcabouço estrutural regional, uma vez que o padrão de fluxo acompanha tanto o relevo quanto a disposição geológica das unidades aquíferas. Essa interação entre estrutura geológica, topografia e distribuição das formações com dupla porosidade é fundamental para a compreensão da dinâmica de recarga e escoamento subterrâneo na área (Oliveira, 2009).

#### 6.4. Modelo Geológico

O modelo geológico foi confeccionado utilizando o *software Leapfrog Works<sup>TM</sup>* da Bentley Systems. As unidades geológicas, respectivos mergulhos, estruturas tectônicas, como falhas e dobras, e contatos litológicos do modelo foram baseadas nos mapas e relatórios atualizados do Quadrilátero Ferrífero por Endo *et al.* (2019). O refinamento do modelo foi realizado manualmente, utilizando as ferramentas do *software*, e manteve o arranjo geológico-

estrutural em escala regional. Concluído o modelo, foram então retiradas 19 seções geológicas, paralelas e com espaçamento de 5 km orientadas segundo NNW-SSE para conferência (Figura 10). Posteriormente foram confeccionadas 8 seções hidroestratigráficas (Figura 9), as quais foram utilizadas tanto no modelo conceitual, quanto numérico.

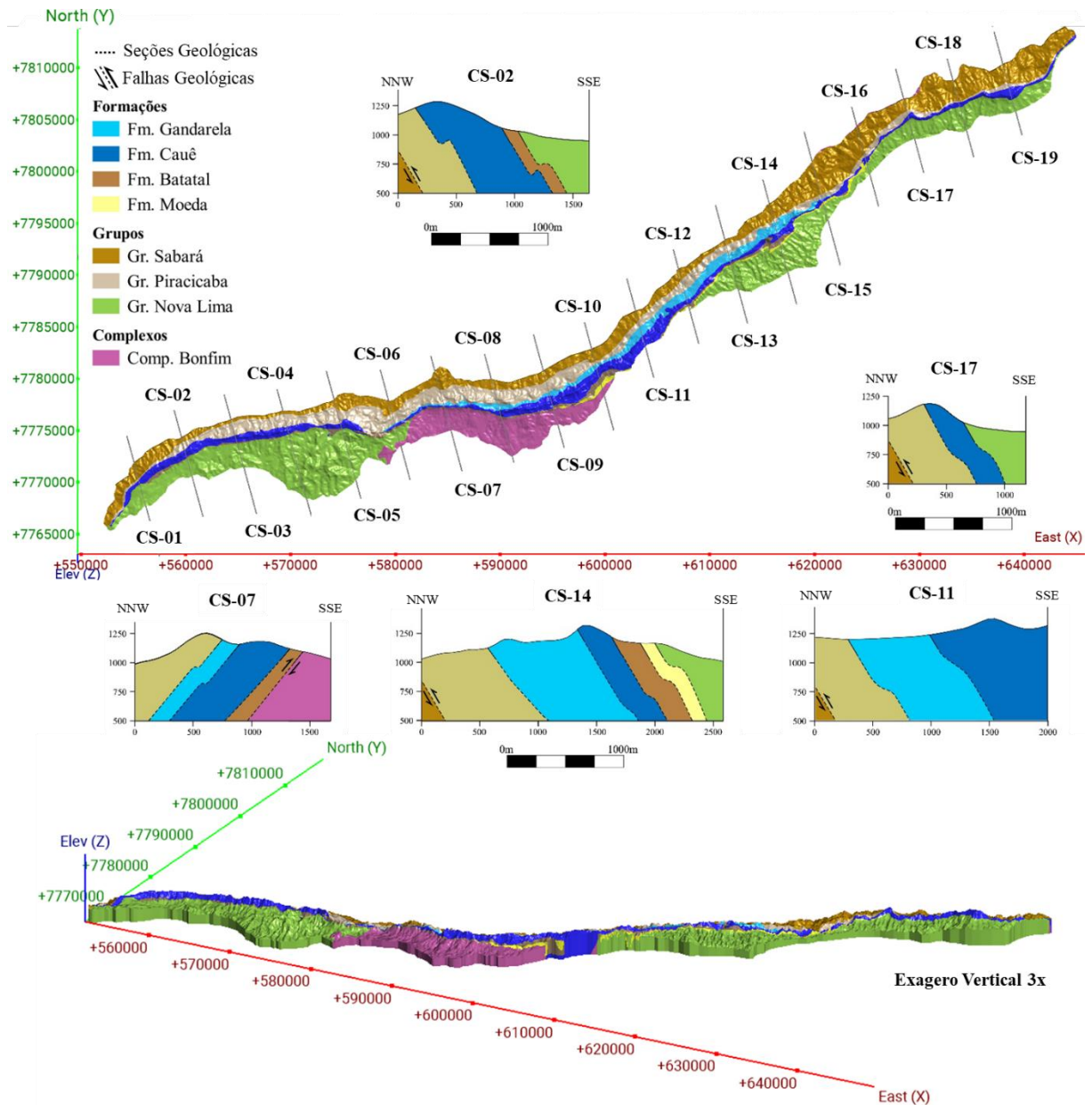


Figura 10 - Modelo geológico 3D com visadas em planta e NNW (exagero vertical 3x), confeccionado no *software Leapfrog<sup>TM</sup>*; Apresenta as 19 seções geológicas paralelas com espaçamento regular de 5 quilômetros e orientadas segundo NNW-SSE, aproximadamente paralelas ao mergulho das unidades geológicas, demonstram a disposição estratigráfica, falhas de empurrão, dobras estruturais e inferência do contato em profundidade (contatos tracejados).

O modelo representa as unidades geológicas Complexo Bonfim, Gr. Nova Lima, Fm. Moeda, Fm. Batatal, Fm. Cauê, Fm. Gandarela, Gr. Piracicaba e Gr. Sabará, baseado em Endo *et al.*, 2019. Se distingue camadas com orientação predominante NE-SW e com mergulho médio de 60° para SE. De maneira geral, são representadas as falhas geológicas sem deslocamento de massa e dobras inferidas (Sanglard *et al.*, 2013), sendo apenas a falha na região da Serra do Taquaril representada com deslocamento de massa.

Para melhorar a visualização e favorecer a calibração do modelo hidrogeológico de fluxo, o Homoclinal Serra do Curral foi compartimentado em três setores, Oeste, Central e Leste, com limites nas duas principais drenagens, rios Paraopeba e das Velhas. Além disso, o modelo geológico seguiu a mesma metodologia adotada para a compartimentação vertical supracitada, onde as zonas superior e inferior, correspondem ao domínio fraturado e de rocha compactada, respectivamente (Figura 11).

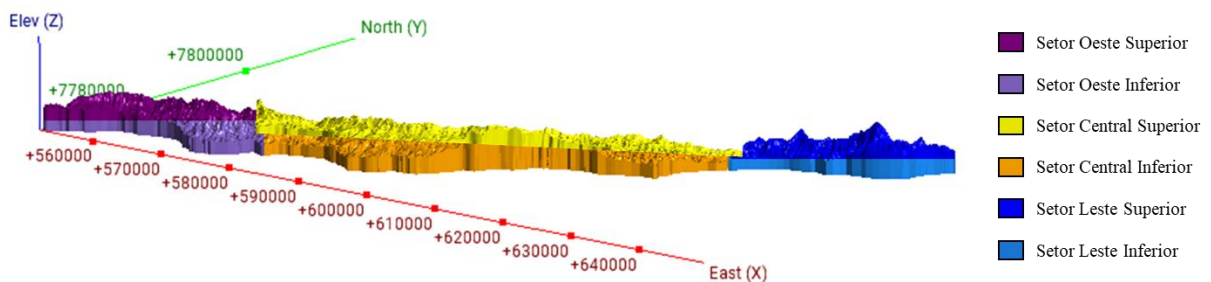


Figura 11 - Modelo geológico 3D, confeccionado no *software Leapfrog<sup>TM</sup>*; Apresenta a divisão dos setores Oeste, Central e Leste, e respectivas compartimentações verticais, Superior e Inferior, as quais foram utilizadas na calibração do modelo hidrogeológico numérico.

## 6.5. Modelo Hidrogeológico Numérico

Neste capítulo são apresentados os resultados da calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero, realizada para os regimes estacionário e transitório. A partir do modelo transitório calibrado foram elaborados dois cenários de simulação prospectiva, ambos com vigência até setembro de 2039: o Cenário A, mantendo a taxa de bombeamento observada no final do regime transitório, e o Cenário B, simulando a interrupção do bombeamento, com o objetivo de avaliar o tempo e a capacidade de recuperação dos níveis d'água subterrâneos.

O modelo numérico, abrangendo uma área de aproximadamente 528 km<sup>2</sup>, considerou a topografia primitiva como superfície superior e adotou a cota de 500 m como base inferior. A discretização vertical foi dividida em 20 camadas com espessura média de 25 m, variando da cota máxima de 1.746 m até a mínima de 500 m, resultando em 1.584.200 elementos e 859.257 nós (Figura 12).

O domínio modelado foi compartimentado em três regiões principais – Oeste, Central e Leste – delimitadas hidrograficamente pelos rios Paraopeba (limite Oeste-Central) e das Velhas (limite Central-Leste). Essas drenagens foram representadas como condições de contorno do tipo 1 (Dirichlet), com carga hidráulica constante associada à cota topográfica, atuando como zonas de saída de água e limites naturais de compartimentação hidroestrutural. As nascentes e córregos secundários foram igualmente representados por condições de contorno tipo 1.

A porção sul do modelo, correspondente à continuidade da unidade hidrogeológica Cauê na interface entre os Sinclinais Moeda Leste e Oeste e o Homoclinal Serra do Curral, foi representada por condições de contorno do tipo 3 (Cauchy/Robin), permitindo o intercâmbio de fluxo entre o domínio modelado e as áreas adjacentes com base na condutância hidráulica do meio. Essa mesma condição foi aplicada às bordas das drenagens regionais (rios Paraopeba e das Velhas), de modo a considerar a contribuição de recarga e descarga proveniente de áreas externas ao modelo. As demais fronteiras laterais foram definidas como condições de contorno tipo 2 (Neumann), representando fluxo nulo ou tangencial, conforme o gradiente hidráulico local.

A malha numérica foi composta por elementos prismáticos com dimensão média de 120 m, permitindo refinamento nas zonas de maior interesse, especialmente na borda sul da porção central, onde ocorre a continuidade do Aquífero Cauê em direção ao Sinclinal Moeda. A subdivisão vertical considerou a porção superior do aquífero, caracterizada por fraturas abertas e zonas de alteração, e a porção inferior, de fraturas fechadas e menor permeabilidade, garantindo a representação adequada das heterogeneidades verticais do sistema.

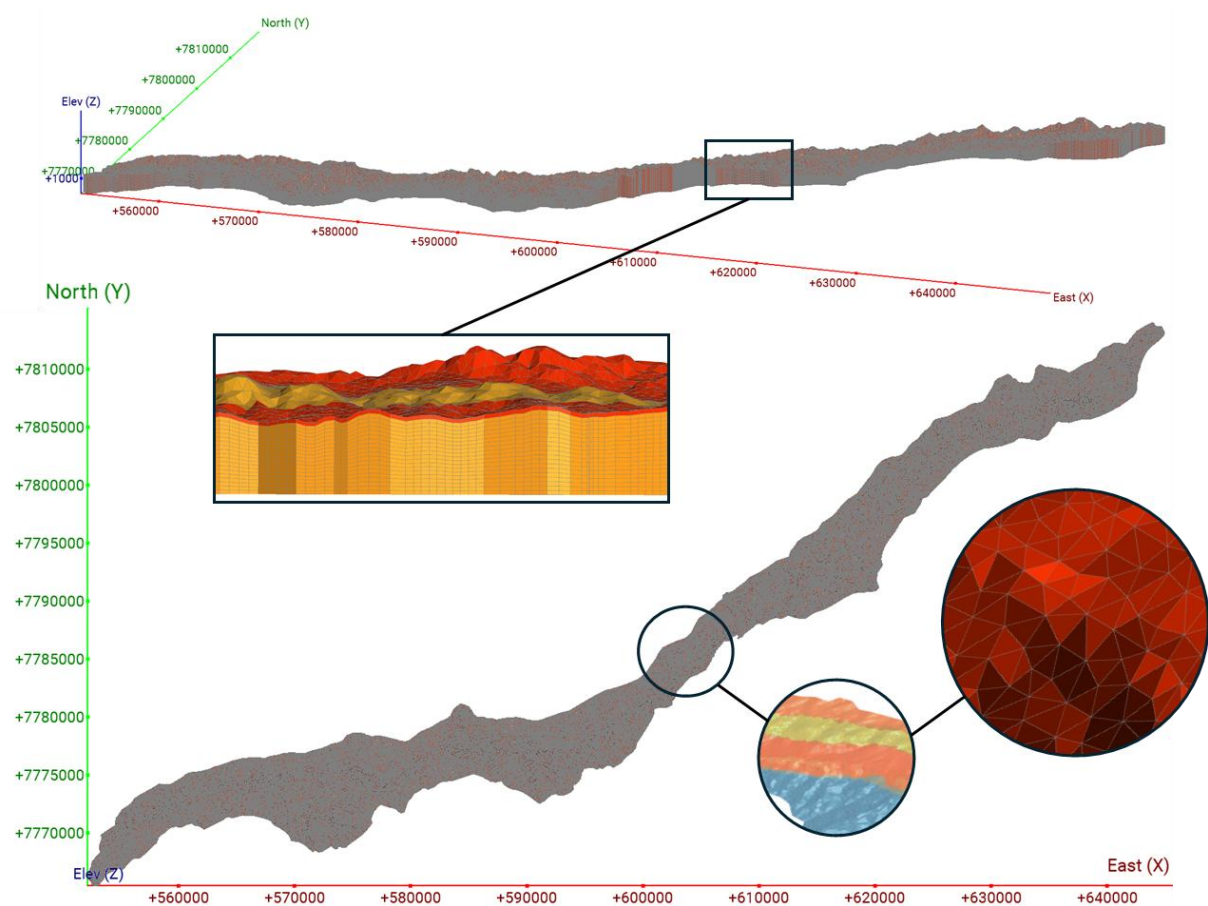


Figura 12 - Modelo hidrogeológico 3D carimbado no *software Leapfrog Hydro*, apresentando a discretização da malha adotada e extensão vertical das 20 camadas com espessura média de 25m.

### 6.5.1. Regime estacionário

A calibração em regime permanente foi conduzida a partir de pontos de monitoramento e observação de nível d'água subterrâneo (Figura 13). Os resultados da calibração indicaram um nRMS de 5,58%, erro residual médio de -20,5 m e erro médio quadrático (RMSE) de 23,3 m, sendo que 70% dos pontos apresentaram diferença entre valores observados e calculados inferior a 30 m. Ressalta-se, contudo, que os dados de monitoramento utilizados (2005–2007) foram aplicados como referência para simular condições do ano 2000, sob a premissa de menor número de intervenções antrópicas relevantes, as quais possibilitou os dados de referência para confecção do modelo. Como tal premissa não corresponde à realidade, os resultados devem ser interpretados com cautela: a calibração não reflete as condições históricas originais do sistema, mas fornece uma aproximação para análise comparativa e para avaliação do comportamento regional do fluxo subterrâneo. O balanço hídrico no modelo em regime estacionário apresentou um erro inferior a 0,1%.

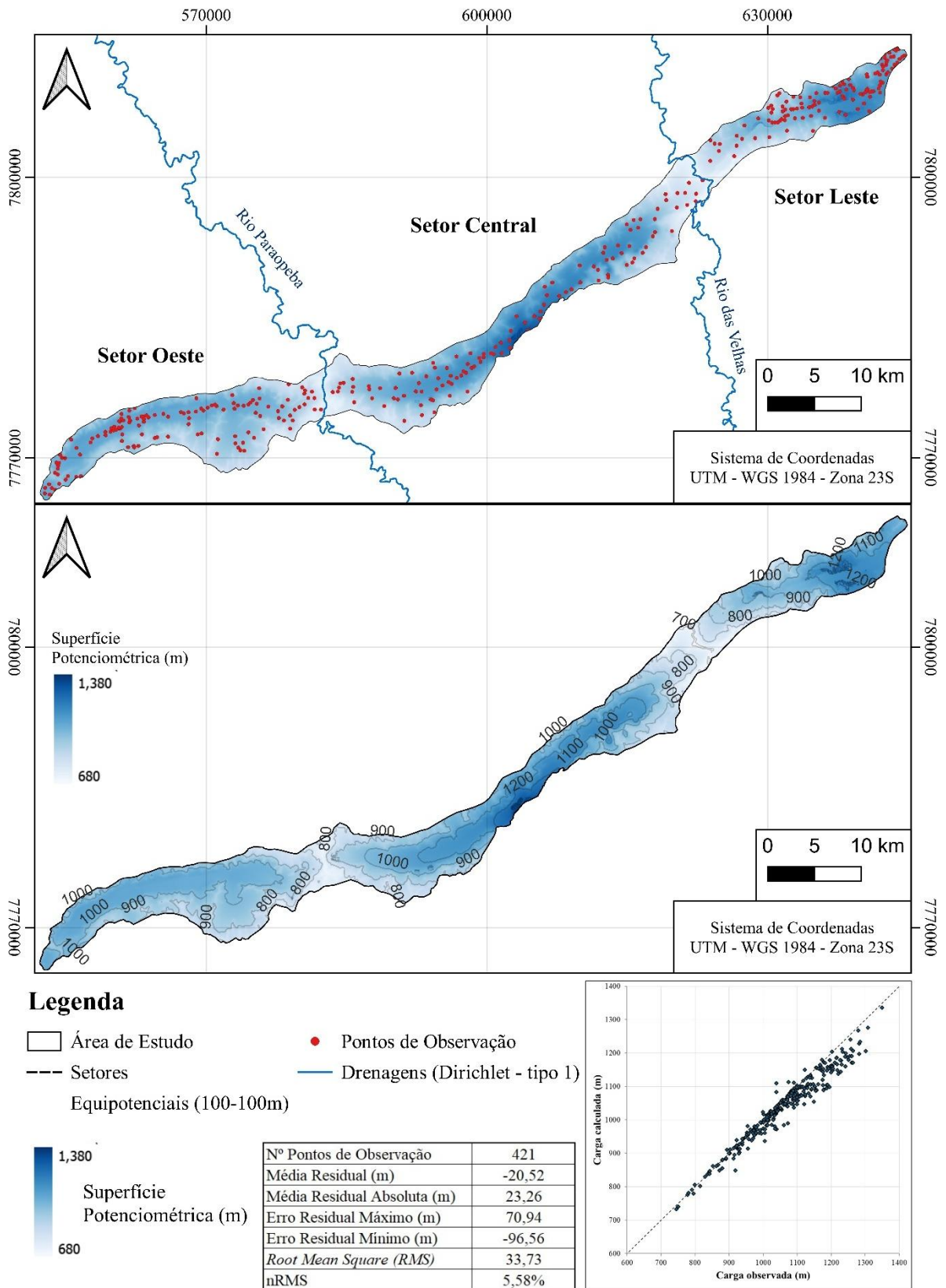


Figura 13 - Mapas apresentando superfície potenciométrica com distribuição espacial dos pontos observados em regime estacionário, equipotenciais, drenagens principais e setores compartimentados (Oeste, Central e Leste); Resultados estatísticos da calibração e gráfico de dispersão comparando a carga hidráulica observada e calculada.

As vazões de escoamento de base foram utilizadas como critério adicional de calibração, considerando os rios Paraopeba e das Velhas, os coeficientes/razões – vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) / área ( $\text{m}^2$ ) – calculados foram de  $5,39 \times 10^{-5} \text{ m/h}$  e  $6,15 \times 10^{-5} \text{ m/h}$ , respectivamente. Sabendo-se que a área de abrangência direta das sub-bacias as quais os rios Paraopeba e das Velhas contemplam dentro da área de estudo é de  $4,11 \times 10^{+6} \text{ m}^2$  e  $3,06 \times 10^{+6} \text{ m}^2$ , respectivamente, foi possível obter a vazão de escoamento referente a cada sub-bacia.

- Rio Paraopeba: a vazão calculada foi de  $188,1 \text{ m}^3/\text{h}$ , enquanto a observada correspondeu a  $224,0 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- Rio das Velhas: a vazão calculada foi de  $221,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , enquanto a observada correspondeu a  $153,1 \text{ m}^3/\text{h}$ .

De modo geral, o modelo numérico reproduziu, na mesma ordem de grandeza, as vazões observadas nas principais drenagens, confirmando sua consistência no balanço hídrico regional. As diferenças são atribuídas à ausência de representação geométrica integral da bacia de contribuição no modelo.

Os valores calibrados de condutividade hidráulica (K) e taxa de recarga estão dispostos na Tabela 5. A calibração indicou tendência a anisotropia hidráulica, condizente com o controle estrutural das unidades aquíferas. Ademais, cabe ressaltar que a primeira camada do modelo, com 25 m de espessura, considerou a alteração das unidades geológicas, caracterizando uma unidade mais permeável associada a litologia que a soto-põem, denominadas como aquífero de Coberturas.

A partir dos resultados obtidos tem-se que o aquífero de Coberturas apresentou os maiores valores de condutividade hidráulica, refletindo sua maior permeabilidade. O aquífero Cauê apresentou condutividades intermediárias, com destaque para o compartimento leste, onde foram observados os maiores valores calibrados. Já os aquíferos Caraça indiviso e Gandarela apresentaram os menores valores de K, sobretudo nas porções inferiores.

Nos compartimentos Oeste e Central, as taxas de recarga calibradas foram de 38,9% para o Cauê, 28,5% para Caraça indiviso e 18% para Gandarela. Já no compartimento Leste as taxas de recarga do Cauê e Coberturas adotada foi de 36,8% para melhor adequar a calibração regional. Observa-se que os resultados se situam dentro dos intervalos conceituais previamente estabelecidos e reforçam a coerência entre a caracterização hidrogeológica e os parâmetros calibrados.

Tabela 5 - Condutividade hidráulica e recarga calibrados por unidade aquífera compartimentada em setores.

Compartimento	Aquífero	Kx - Condutividade hidráulica (m/s)	Ky - Condutividade hidráulica (m/s)	Kz - Condutividade hidráulica (m/s)	Recarga (%)
<b>Oeste</b>	Coberturas	$2,0 \times 10^{-6}$ a $7,5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$ a $7,5 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-7}$ – $7,5 \times 10^{-7}$	38,90%
	Caraça (indiviso) Superior	$1,2 \times 10^{-6}$	$0,8 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-7}$	28,5%
	Caraça (indiviso) Inferior	$2,7 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-8}$	-
	Cauê Superior	$4,2 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-7}$	38,90%
	Cauê Inferior	$3,0 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-7}$	-
	Gandarela Superior	$1,2 \times 10^{-6}$	$0,8 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-7}$	18%
<b>Central</b>	Coberturas	$1,8 \times 10^{-6}$ – $2,2 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$ – $2,2 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-7}$ – $2,2 \times 10^{-7}$	38,90%
	Caraça (indiviso) Superior	$9,1 \times 10^{-7}$	$8,5 \times 10^{-7}$	$8,8 \times 10^{-8}$	28,50%
	Caraça (indiviso) Inferior	$4,3 \times 10^{-7}$	$3,7 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-8}$	-
	Cauê Superior	$1,3 \times 10^{-6}$	$0,9 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-7}$	38,90%
	Cauê Inferior	$5,2 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-8}$	-
	Gandarela Superior	$1,2 \times 10^{-6}$	$0,8 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-7}$	18%
<b>Leste</b>	Gandarela Inferior	$5,2 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-8}$	-
	Coberturas	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	36,80%
	Cauê Superior	$5,4 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$5,2 \times 10^{-7}$	36,80%
	Cauê Inferior	$2,9 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-7}$	-

### 6.5.2. Regime transitório

A calibração em regime transiente deu-se a partir de 188 instrumentos que monitoravam o nível d'água subterrâneo a partir de 2005, entretanto, não se obteve longas séries históricas de dados de cada instrumento, sendo alguns com valores pontuais de nível d'água em diferentes períodos, e esses foram pontualmente comparados com o valor calculado. Esses instrumentos estão dispersos majoritariamente nos compartimentos oeste e central da área de estudo. A Figura 14 apresenta a distribuição espacial dos instrumentos utilizados para calibração referente aos anos monitorados, além dos gráficos de suas séries históricas dos setores Oeste e Central. O setor Leste possui apenas três instrumentos e todos com dados pontuais de nível d'água.

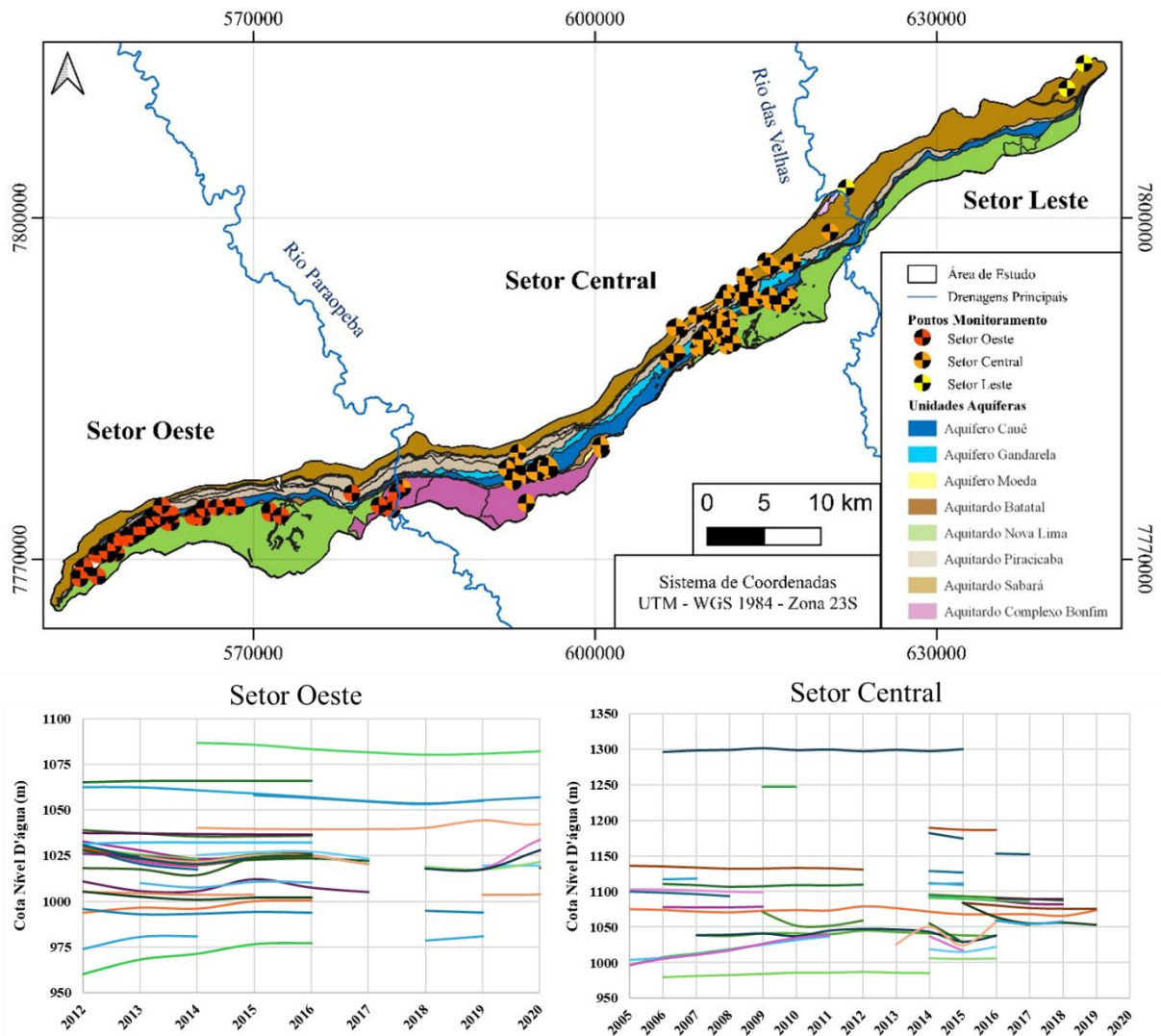


Figura 14 - Mapa evidenciando a distribuição dos pontos de monitoramento utilizados para calibração em regime transitório e divididos nos setores, Oeste (vermelho), Central (laranja) e Leste (amarelo) ao longo do Homoclinal Serra do Curral e unidades aquíferas as quais estão instalados. Gráficos do nível d'água dos instrumentos que possuem série histórica de monitoramento ao longo do período analisado. Gráfico a esquerda referente aos instrumentos do Setor Oeste, compreendendo período monitorado entre 2012 e 2020. A direita gráfico referente aos instrumentos do Setor Central, compreendendo período monitorado entre 2005 e 2020.

A avaliação da calibração foi realizada por meio da análise dos erros residuais médios, definidos como a diferença entre os níveis d'água observados e calculados para cada compartimento do modelo. Os resultados indicaram uma tendência de subestimação dos níveis piezométricos simulados em relação aos observados, com erros residuais médios de -89,6 m na região Oeste, -24,3 m na região Central e -16,4 m na região Leste. Essa variação espacial reflete a heterogeneidade hidroestrutural do sistema aquífero e a diferença de resposta hidráulica entre os compartimentos, sendo mais acentuada na porção Oeste, devido à grande influência de rebaixamentos por empreendimentos minerários. Ainda assim, os valores obtidos mantêm-se

dentro de limites aceitáveis para modelos regionais de fluxo, demonstrando consistência e representatividade na calibração do modelo transitório.

Ao analisar os gráficos das séries históricas monitoradas observa-se queda do nível d'água acentuada na porção Oeste entre os anos de 2012 e 2014, coerente com os resultados do balanço hídrico de massa apresentado no capítulo 6.2, quando o bombeamento outorgado superou a reserva renovável. Vale ressaltar, que não apenas a reserva renovável está diretamente associada as taxas pluviométricas, como também as oscilações apresentadas pelos instrumentos de monitoramento. De maneira global os instrumentos analisados apresentam tendência a redução do nível d'água, congruentes com os resultados do rebaixamento que estão levemente subestimados como citado anteriormente.

Ao longo do regime transiente, observou-se uma tendência geral de rebaixamento dos níveis potenciométricos em todo o sistema aquífero entre os anos de 2000 e 2020. No setor oeste, o rebaixamento médio foi de aproximadamente 1,19 m, indicando uma resposta moderada às variações de recarga e bombeamento ao longo do período. A região central apresentou um comportamento mais expressivo, com redução média de 1,83 m, refletindo maior influência das captações concentradas nessa área. Já no setor leste, verificou-se o maior rebaixamento médio, de 2,05 m, possivelmente relacionado a pequena quantidade de instrumentos de monitoramento e menor qualidade de dados para calibração local. Esses resultados evidenciam a heterogeneidade espacial da resposta do aquífero às condições transientes de fluxo e extração.

A Figura 15 apresenta mapa com disposição regional do rebaixamento do nível d'água no Homoclinal Serra do Curral ao longo de 20 anos, monitorado a partir do ano 2000. Pode-se observar que regionalmente a zona mais impactada está distribuída sobre aquífero Cauê, especialmente onde ocorrem empreendimentos minerários, como esperado devido a intensa exploração d'água. Mesmo a porção Oeste apresentando uma área com os maiores rebaixamentos, a mesma possui a menor média dentre os demais setores, o que indica o caráter pontual dos impactos na região.

Ao comparar a potencimetria final do regime transitório (Figura 15), equivalente ao ano de 2020, com o mapa potenciométrico apresentado no modelo conceitual (Figura 9), observa-se uma correspondência entre as potencimetrias. Essa concordância valida a representatividade do modelo numérico em relação às condições reais do sistema aquífero,

indicando que os parâmetros calibrados reproduzem adequadamente o comportamento hidráulico observado.

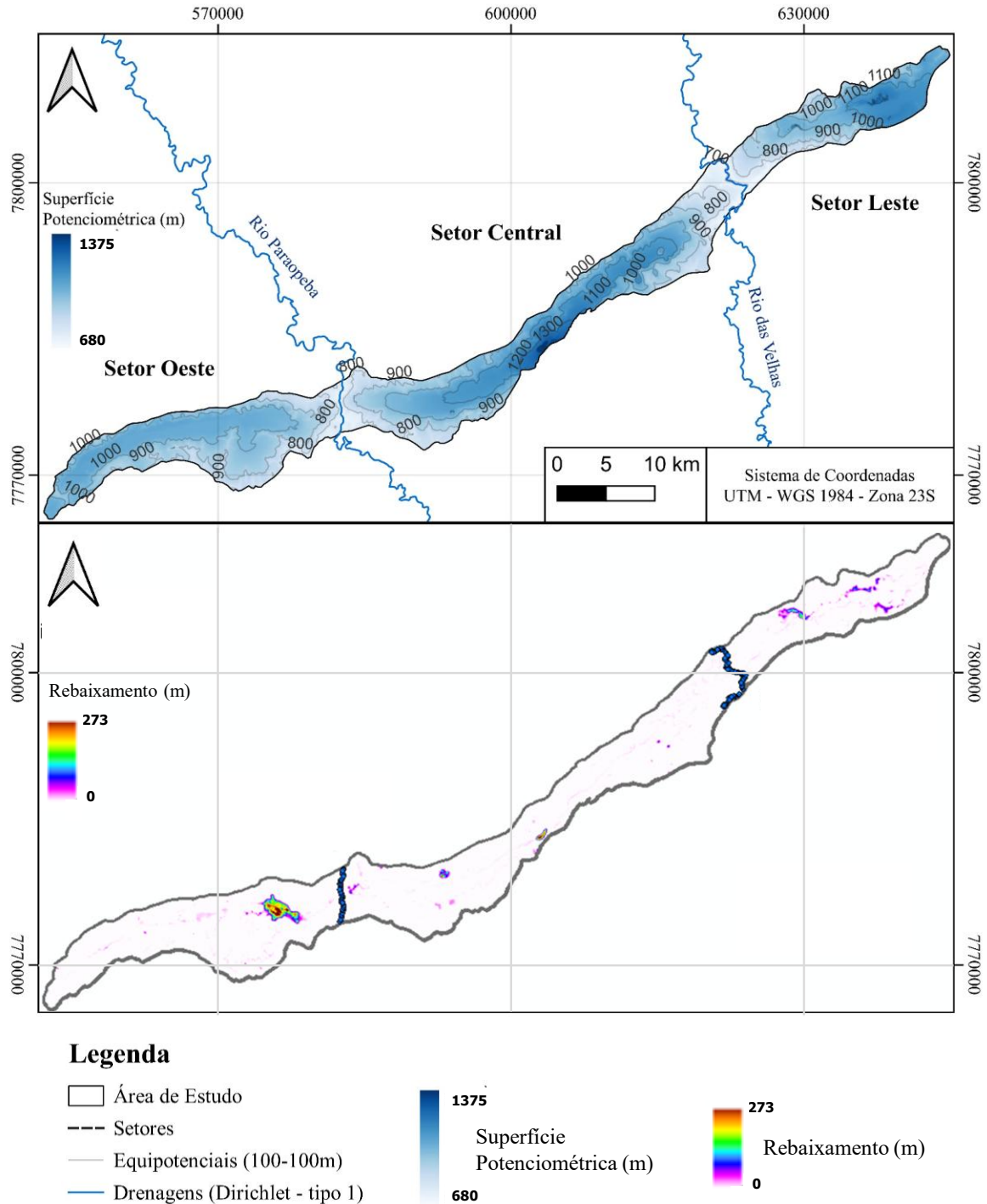


Figura 15 – A) Mapa apresentando superfície potenciométrica de setembro de 2020, último dia do modelo em regime transitório, equipotenciais, drenagens principais e setores compartimentados (Oeste, Central e Leste). B) Mapa do rebaixamento calculado em regime transiente para o bombeamento entre outubro de 2000 e setembro de 2020, cujo resultado positivo (tons avermelhados) é a projeção horizontal do cone do rebaixamento do nível d’água subterrâneo nesses vinte anos monitorados.

Devido a boa representatividade dos valores de nível d'água no transiente, calibraram-se os valores de armazenamento e porosidade específica das unidades hidrogeológicas por compartimento. Essas, são apresentadas na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Valores calibrados de coeficiente de armazenamento e porosidade específica.

<b>Compartimento</b>	<b>Aquífero</b>	<b>Porosidade específica (Sy) %</b>	<b>Coefficiente de armazenamento (Ss)</b>
<b>Oeste</b>	Coberturas	40%	$3 \times 10^{-2}$
	Caraça (indiviso)	20%	$2 \times 10^{-2}$
	Cauê	40%	$3 \times 10^{-2}$
	Gandarela	20%	$1 \times 10^{-2}$
<b>Central</b>	Coberturas	48%	$3 \times 10^{-2}$
	Caraça (indiviso)	24%	$2 \times 10^{-2}$
	Cauê	48%	$3 \times 10^{-2}$
	Gandarela	24%	$1 \times 10^{-2}$
<b>Leste</b>	Coberturas	40%	$3 \times 10^{-2}$
	Cauê	40%	$3 \times 10^{-2}$

A partir dos resultados obtidos observa-se que os aquíferos de Coberturas e Cauê apresentam os maiores valores de Sy e Ss, indicando maior capacidade de armazenamento e liberação de água, como também indicam que o sistema aquífero possui maior comportamento livre do que confinado. O aquífero Gandarela apresenta os menores valores, representando menor capacidade de armazenamento e maior confinamento, enquanto que o aquífero Caraça indiviso tem valores intermediários, posicionando-se entre os extremos. Além disso, ressalta-se que o compartimento Central concentra os maiores valores Sy, atingindo até 48% para o aquífero Cauê, reforçando não apenas o maior potencial hídrico relativo como também sua continuidade para os Sinclinais Moeda Leste e Oeste apenas nesta região.

### 6.5.3. Simulações

Conforme mencionado anteriormente, foram simulados dois cenários e seus resultados estão dispostos nos próximos tópicos. Os modelos projetivos permitiram comparar a evolução da superfície potenciométrica entre o início e o final do período, outubro de 2000 a setembro de 2039, bem como as vazões subterrâneas, seguindo a abordagem do modelo transitório. Foram identificados e analisados os pontos mais críticos de rebaixamento subterrâneo.

Cenário A: simulação prospectiva para o período mencionada cujo bombeamento mantém a taxa do último dia do modelo transitório, enquanto a variação pluviométrica seguiu

o padrão do último período calibrado. Aderindo a um cenário mais conservador, os demais parâmetros foram mantidos constantes.

Cenário B: simulação prospectiva para o período mencionado com o desligamento dos poços, para avaliação do tempo e capacidade de recuperação do nível d'água subterrâneo às condições pretéritas às intervenções.

#### 6.5.3.1. Cenário A – Simulação Rebaixamento

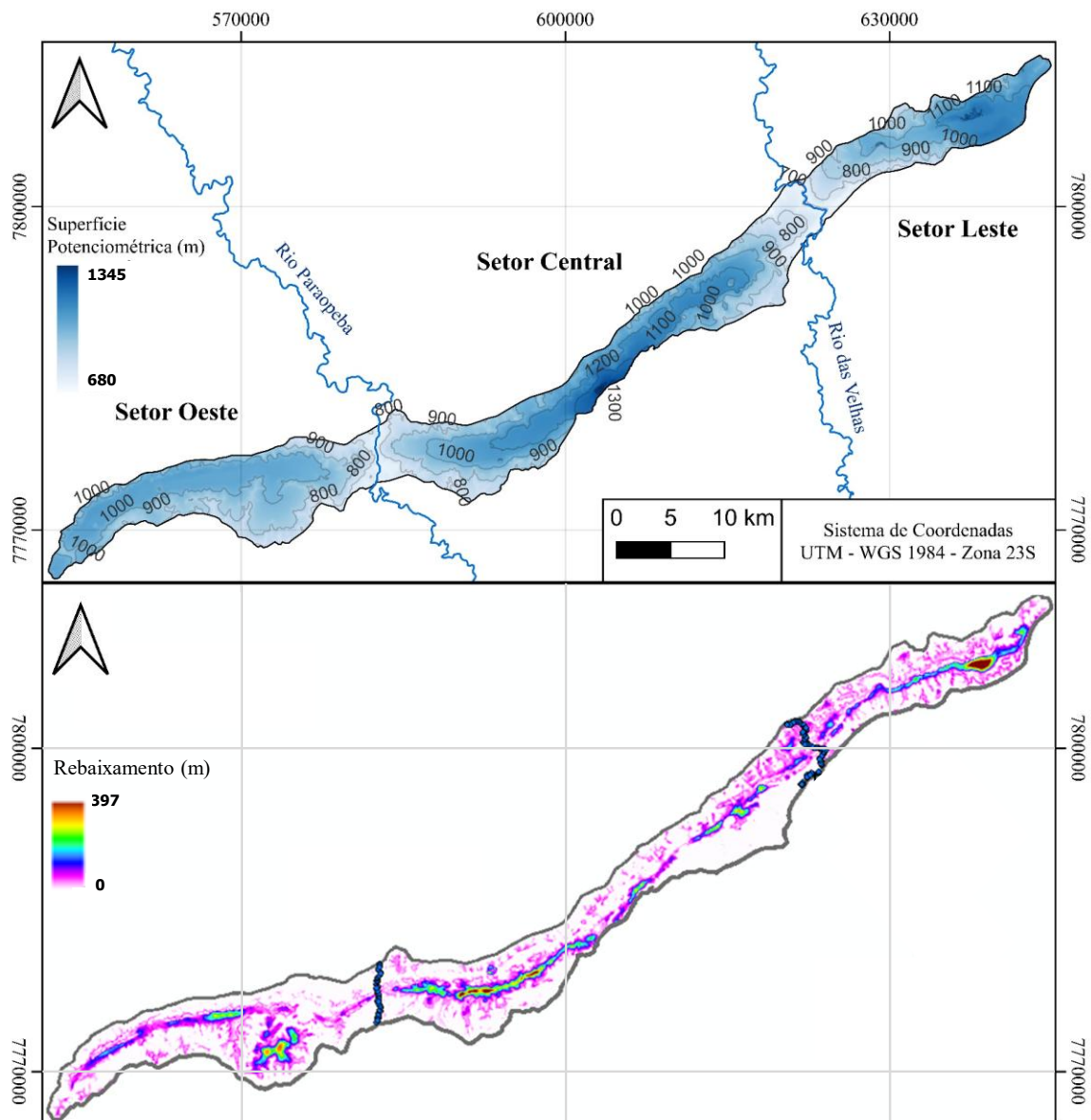
A partir do modelo calibrado em regime transiente, foi realizada uma simulação preditiva considerando a manutenção das condições observadas em setembro de 2020. Nesse cenário, as taxas de bombeamento e a pluviometria média anual foram mantidas constantes ao longo do período de análise, compreendido entre outubro de 2020 e setembro de 2039. O objetivo dessa simulação foi avaliar a tendência evolutiva dos níveis potenciométricos e a resposta do sistema aquífero frente à continuidade das atuais condições de exploração e recarga, permitindo estimar possíveis variações no armazenamento e na dinâmica do fluxo subterrâneo ao longo das próximas duas décadas.

O setor Central apresentou o maior rebaixamento médio, de 0,54 m, indicando persistência dos efeitos da exploração concentrada nessa área. No setor Oeste, o rebaixamento médio foi de 0,49 m, refletindo uma resposta moderada do aquífero às condições impostas. Já o setor Leste apresentou o menor rebaixamento médio, de 0,32 m, sugerindo relativa estabilidade hidráulica e possível maior eficiência na reposição por recarga. De modo geral, os resultados apontam para uma tendência de equilíbrio dinâmico, sem indícios de depleção acentuada do sistema ao longo dos dezenove anos simulados.

Considerando o período completo, regimes transiente e simulado, entre 2000 e 2039, observa-se uma tendência geral de rebaixamento gradual dos níveis potenciométricos em todo o sistema aquífero. O setor Central apresentou o maior rebaixamento médio, de 2,37 m, com desvio padrão de 5,83 m, indicando maior variabilidade espacial das respostas hidráulicas, possivelmente associada à concentração das zonas de bombeamento. O setor Leste apresentou comportamento semelhante, com rebaixamento médio de 2,36 m e desvio padrão mais elevado (7,13 m), sugerindo heterogeneidade litológica e influência local de condições de recarga e condutividade hidráulica. Já o setor Oeste apresentou o menor rebaixamento médio (1,68 m) e menor dispersão (4,43 m), refletindo uma condição mais estável e menos impactada pela exploração. De modo geral, o cenário simulado indica que, embora o sistema tenha sofrido

rebaixamentos ao longo das quatro décadas, as variações permanecem moderadas e espacialmente diferenciadas, sugerindo que o aquífero mantém capacidade de resposta equilibrada frente às condições de uso e recarga impostas.

A Figura 16 apresenta mapa com disposição regional do rebaixamento do nível d'água no Homoclinal Serra do Curral ao longo de 39 anos, simulado a partir do ano 2020. O mapa contendo a diferença de rebaixamento, tomou como comparativo o regime estacionário, a fim de realçar os reais impactos gerados ao longo de todo o período estudado, ano 2000 a 2039. Pode-se observar que diferentemente dos resultados encontrados no regime transitório, a distribuição espacial do rebaixamento abrange uma área muito maior no longo prazo simulado, mesmo que de baixa intensidade. No entanto, o aquífero Cauê permanece sendo o mais impactado pelo rebaixamento, corroborando com os resultados obtidos no balanço de massa do modelo conceitual (Figura 8) que demonstra o massivo bombeamento nesta unidade aquífera em comparação com as demais.



### Legenda

- Área de Estudo
- Setores
- Equipotenciais (100-100m)
- Drenagens (Dirichlet - tipo 1)
- 1345 Superfície Potenciométrica (m)
- 680
- 397 Rebaixamento (m)
- 0

Figura 16 – A) Mapa apresentando superfície potenciométrica de setembro de 2039 em regime simulado de rebaixamento contínuo (Cenário A), equipotenciais, drenagens principais e setores compartimentados (Oeste, Central e Leste). B); Resultante entre o regime estacionário calculado (2000) subtraído do regime simulado (2039), cujo resultado positivo (tons avermelhados) é a projeção horizontal do cone do rebaixamento do nível d’água subterrâneo nesses últimos dezenove anos simulados.

### 6.5.3.2. Cenário B – Simulação Recuperação

A partir do modelo calibrado em regime transiente, foi realizada uma simulação preditiva com o intuito de avaliar a recuperação do sistema aquífero frente à interrupção total das captações a partir de setembro de 2020. Nesse cenário, manteve-se a pluviometria média anual constante e considerou-se a ausência de bombeamento durante todo o período de análise, compreendido entre outubro de 2020 e setembro de 2039.

Os resultados indicam uma tendência geral de elevação dos níveis potenciométricos em todas as regiões modeladas, evidenciando a capacidade de resposta e regeneração do sistema. O setor oeste apresentou a maior recuperação média, de 4,32 m, refletindo condições favoráveis de recarga e menor confinamento. No setor central, a recuperação média foi de 1,43 m, sugerindo uma resposta mais lenta em áreas anteriormente mais impactadas pela exploração. Já o setor leste mostrou recuperação média de 1,17 m, possivelmente associada a características litológicas menos permeáveis ou menores taxas de infiltração. De modo geral, o cenário simulado demonstra que a interrupção do bombeamento promove a recomposição gradual dos níveis d'água, indicando que o sistema mantém potencial de recuperação natural quando cessadas as intervenções antrópicas.

Ao se analisar o percentual médio de recuperação entre 2020 e 2039, observa-se que o setor oeste apresentou a resposta mais expressiva, com 181% de recuperação em relação ao rebaixamento acumulado até 2020, evidenciando elevada capacidade de reposição natural e maior influência direta das zonas de recarga. O setor leste apresentou recuperação intermediária, de aproximadamente 23%, indicando uma resposta positiva, porém limitada. Já o setor central apresentou o menor percentual de recuperação, de apenas 6%, sugerindo que essa área permanece mais suscetível aos efeitos do bombeamento histórico e à lenta dissipação dos gradientes de pressão. Esses resultados reforçam a natureza assimétrica e espacialmente condicionada da recuperação do sistema, refletindo as diferenças locais nas condições geológicas, hidráulicas e de recarga entre os setores.

A Figura 17 apresenta mapa com disposição regional da recuperação do nível d'água no Homoclinal Serra do Curral ao longo de 19 anos, simulado a partir do ano 2020. Observa-se que em conformidade com as características hidrodinâmicas o aquífero com maior potencial hidráulico, aquífero Cauê, apresenta as maiores taxas de recuperação dentre os demais. No entanto, especialmente no setor central, mesmo apresentando recuperação, esta é de baixa

intensidade, refletindo diretamente no baixo percentual de recuperação encontrado nesta porção.

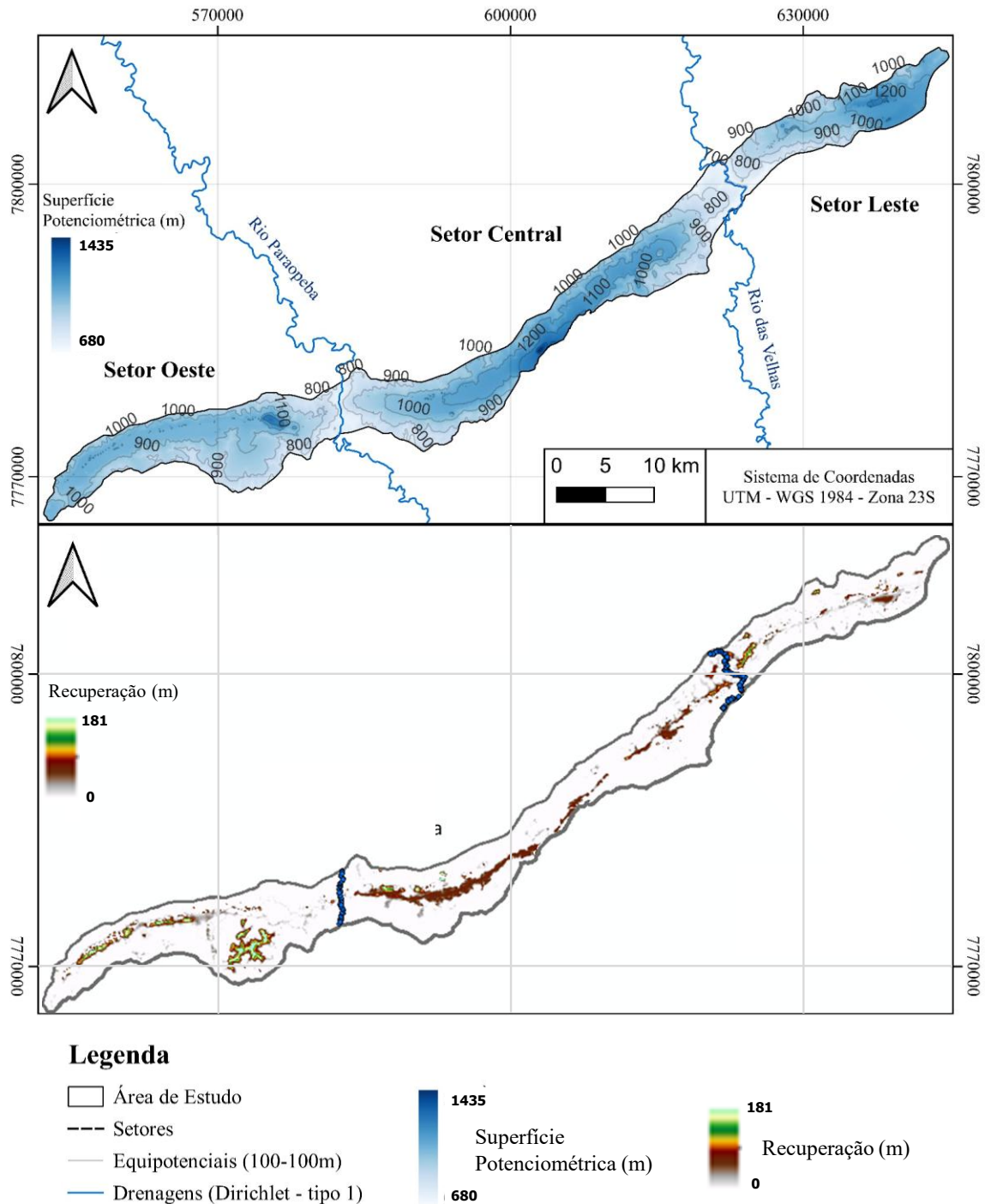


Figura 17 – A) Mapa apresentando superfície potenciométrica de setembro de 2039 em regime simulado de recuperação (Cenário B), equipotenciais, drenagens principais e setores compartimentados (Oeste, Central e Leste). B) Resultante entre o regime transitório calculado (2020) subtraído do regime simulado (2039), cujo resultado positivo é a projeção horizontal da recuperação do nível d’água subterrâneo nesses últimos dezenove anos simulados.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo forneceu dados que integram os modelos, conceitual e numérico, hidrogeológicos de fluxo da região do Homoclinal Serra do Curral, com foco nos Aquíferos Cauê, Gandarela e Moeda e Aquitardo Batatal. De forma a gerar dados conclusivos e assertivos sobre o objetivo principal do trabalho, avaliar os impactos da exploração hídrica sobre o sistema aquífero local, e secundariamente a caracterização hidrodinâmica e dinâmica do fluxo d'água subterrânea das megaestruturas do Quadrilátero Ferrífero.

Pela análise da direção de fluxo da água subterrânea foi possível constatar que o Homoclinal Serra do Curral recebe contribuição d'água do Sinclinal Moeda Leste e fornece água para o Sinclinal Moeda Oeste, confirmando os estudos de Magalhães *et al.* (2022) e Andrade *et al.* (2025). Essa configuração indica que o Homoclinal Serra do Curral atua como divisor de fluxo subterrâneo regional, funcionando como zona de passagem entre domínios hidrogeológicos com diferentes papéis hidrodinâmicos. O Sinclinal Moeda Leste, posicionado a montante hidráulico, apresenta maior potencial de recarga e alimenta o fluxo direcionado para a Serra do Curral, enquanto o Sinclinal Moeda Oeste se comporta como zona de descarga, recebendo parte do escoamento subterrâneo proveniente do Homoclinal. Essa interpretação reforça a conectividade hidrogeológica entre os compartimentos estruturais adjacentes, destacando a importância da Serra do Curral como elo funcional entre sistemas aquíferos distintos. Recomenda-se um estudo mais detalhado dessa região onde ocorre encontro tríplice de megaestruturas do Quadrilátero Ferrífero.

O estudo revela que, durante os anos de maior estiagem, entre 2013/2014 e 2016/2017, o volume total de água captado ultrapassa a reserva renovável total da área, e também a correlação direta das oscilações pluviométricas sobre o sistema. Isso indica um impacto regional significativo devido à exploração, mesmo considerando a contribuição de todo o sistema aquífero avaliado para o volume explorado, o que pode afetar a disponibilidade hídrica da região. Vale salientar que o volume bombeado pelos poços outorgados apresenta curva de progressão ao longo do período analisado, o que sugere que futuramente o déficit hídrico não seja apenas condicionado aos períodos de estiagem, mas sim agravado nestes períodos. Esse excedente de bombeamento revela um cenário de exploração acima da capacidade de renovação do sistema, o que pode comprometer a sustentabilidade do aquífero a longo prazo. Tal comportamento indica uma possível redução do armazenamento subterrâneo, aumento do risco de rebaixamento do nível piezométrico e maior vulnerabilidade à intrusão de águas de menor qualidade.

As simulações realizadas evidenciaram a resposta diferenciada do sistema aquífero às condições de bombeamento e recarga ao longo do período analisado. No regime transiente, observou-se tendência de rebaixamento gradual, mais acentuada na porção central, indicando maior sensibilidade à exploração e menor capacidade de reposição natural. O Cenário A, com manutenção das condições de 2020, revelou estabilidade hidráulica, sugerindo que o sistema se encontra próximo ao equilíbrio dinâmico sob as taxas atuais de uso. Já o Cenário B, que simulou a interrupção do bombeamento, demonstrou recuperação significativa nas porções oeste e leste, mas baixa resposta no setor central, sugerindo que essa área permanece mais suscetível aos efeitos do bombeamento histórico e à lenta dissipação dos gradientes de pressão. Esses resultados reforçam a heterogeneidade espacial do aquífero e indicam que a recuperação plena do sistema depende de condições estruturais e de recarga específicas, não apenas da suspensão da exploração.

Cabe destacar ainda as limitações do estudo, inerentes à própria modelagem numérica, entre elas: ausência de séries históricas completas de monitoramento de níveis e vazões, escassez de informações construtivas e operacionais dos poços de bombeamento, número reduzido de ensaios hidráulicos por unidade aquífera e falta de dados espaciais que cubram todo o domínio hidrogeológico do Homoclinal. De forma abrangente, os resultados oferecem subsídios importantes para o entendimento da dinâmica hidrogeológica do Homoclinal Serra do Curral, permitindo identificar pontos críticos relacionados ao balanço hídrico, ao rebaixamento dos níveis d'água e ao risco de comprometimento das reservas permanentes. Esses achados evidenciam a necessidade de aprimorar a gestão dos recursos subterrâneos por meio de estratégias como abrangência de uma rede de monitoramento integrada, avaliação do tempo de recuperação dos aquíferos, além de práticas de recirculação e reuso de água, sempre orientadas pela sustentabilidade. Tais medidas se destacam como recomendações para futuras etapas de investigação e gestão, e reforçam a necessidade de maior controle na liberação de outorgas e de poços não outorgados.

## 8.AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), ao Instituto de Geociências (IGC) e ao Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID) por proporcionar o desenvolvimento do trabalho; ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) e Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais (SEMAD) pela parceria e fornecimento da base de dados; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por fornecer bolsa de estudos; às empresas *DHI Group* e *Bentley Systems* por fornecer a licença dos *softwares Feflow* e *Leapfrog Geo* e *Hydro*.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adler, R.A., Claassen, M., Godfrey, L., Turton, A.R., 2007. Water, mining, and waste: An historical and economic perspective on conflict management in South Africa. *Economics of Peace and Security Journal*, 2(2), 33-41.
- Alkmim, F. F., & Marshak, S., 1998. Transpressional deformation of the southern São Francisco Craton during the Brasiliano Orogeny. *Journal of Structural Geology*, 20(7), 901-916.
- Almeida L.G., Oliveira D.J., Endo I., 2001. O arcabouço estratigráfico estrutural da região de Dom Bosco/Bela Vista, Quadrilátero Ferrífero, como manifestação da orogênese Minas com polaridade tectônica para sudoeste. In: SBG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte/ Núcleo Minas Gerais (In Portuguese)
- Almeida, F. F. M. (1977). O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7:349-364, 285-295.
- Almeida, L. G. Estratigrafia e Geologia Estrutural da Porção Central do Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. (2004). 117:Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 23(5), 591-601.
- Alves, B. P. (1961) Sumário sobre estratigrafia e estrutura das quadriculas de Caeté e Serra da Piedade. Ouro Preto: Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos — SICEG. p. 257–260. [sbgf.org.br](http://sbgf.org.br)
- Anderson, M.P.; Woessner, W.W., 2015. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego: Academic Press, 2. ed., p. 381.
- 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. (Master dissertation) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Andrade, I.B.; De Paula, R.S.; Teixeira, G.M.; Novo, T.A.; Melo, M.C.; Costa, F.C., 2025. Investigação do fluxo no sistema aquífero do flanco oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 18, n. 5, p. 3350-3376 (In Portuguese).
- ANM – Agência Nacional de Mineração, 2024. Informe Mineral 04TRI2024 - dados 2024. Brasília: ANM (In Portuguese).

- ARSAE-MG, 2013. Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais. Relatório Anual de Gestão 2013. Belo Horizonte: ARSAE-MG (In Portuguese).
- Asf Daac / Nasa. (2015). Alos Palsar Radiometric Terrain Corrected (RTC) high-resolution DEM / product guide. Fairbanks: Asf Daac / Nasa. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>
- Azevedo, Ú.R.D; Machado, M.M.M.; Castro, P.D.T.A.; Renger, F.E.; Trevisol, A.; Beato, D.A., 2012. Geoparque Quadrilátero Ferrífero, MG. In: Schobbenhaus, C.; Silva, C. (org.). Geoparques do Brasil: propostas. Rio de Janeiro: CPRM. 5 f (In Portuguese).
- Babinski, M., Chemale Junior, F. And Van Schmus, W.R., 1995. Cronoestratigrafia do Supergrupo Minas e provável correlação de suas formações ferríferas com similares da África do Sul e Austrália. *Geochimica Brasiliensis*, 9(1), pp.33-46.
- Barão de Eschwege, W. L. (1833). *Pluto Brasiliensis*. Berlim: G. Reimer.
- Barbosa, J. S. F.; Sabaté, P.; Marinho, M. M. (2003). O cráton do São Francisco na Bahia: uma síntese. *Revista Brasileira de Geociências*, 33,(1:3-6).
- Bäumle, R., 2003. Geohydraulic Characterisation of Fractured Rock Flow Regimes Regional Studies in Granite (Lindau, Black Forest, Germany) and Dolomite (Tsumeb Aquifers, Northern Namibia). — 129 p., 61 fig., 17 tab., 4 app.; Karlsruhe (unpubl. Diss. Uni Karlsruhe).
- Beato, D. A. C.; Bertachini, A. C. (2005). Hidrogeoquímica. In: Projeto Apa Sul RMBH. Estudos do Meio Físico, apêndices A, B, E, C. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG. Parte C.
- Beato, D.A.C.; Monsores, A.L.M.; Bertachini, A.C., 2006. Potencial aquífero nos metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero - região da APA Sul RMBH - MG. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 14, Curitiba. Anais... Curitiba: ABAS, 2006.:1-20 (In Portuguese).
- Bertachini M.N.A., 2020. Determinação da condutividade hidráulica do Aquífero Cauê na região oeste do Sinclinal Moeda, Nova Lima/MG. (MBA dissertation) Universidade de São Paulo, São Paulo (In Portuguese).
- Bertachini, A. C.; Almeida, D. C. (2003) O rebaixamento do nível d'água em mineração e obras civis. *Revista Águas Subterrâneas*, [S.l.].
- Bertachini, A.C., 1994. Condições hidrogeológicas da Mina de Águas Claras, Quadrilátero Ferrífero, MG. (Doctoral dissertation) Universidade de São Paulo, São Paulo (In Portuguese).

- Bertachini, A.C.; Scudino, P.C., 1985. Evolução hidroquímica das águas subterrâneas da região de Mateus Leme-MG. *Revista Águas Subterrâneas*.
- Bezerra, D.P., 2014. Caracterização morfoestrutural e morfoescultural da Serra da Moeda – Quadrilátero Ferrífero – MG. 2014. 207 f. (Master dissertation) Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (In Portuguese).
- Borelli, F. F., 2022. Modelagem de fluxo em aquíferos fraturados do Quadrilátero Ferrífero utilizando o conceito de dupla porosidade. (Master dissertation) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (In Portuguese).
- Bouwer, H.; Rice, R. C., 1976. A Slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12, (3:423-428).
- Brassington, R., 2017. *Field Hydrogeology. The Geological Field Guide Series*, 4th ed. Wiley Blackwell.
- Casagrande, P.; Parizzi, M.; Moura, A. C. (2018). O geodesign aplicado à geologia como base do planejamento urbano - Quadrilátero Ferrífero-MG.
- Castro, E.C.C., Ferreira, J.E., 1997. Aspectos estratigráficos, sedimentares e estruturais dos sedimentos cenozóicos da borda leste do Quadrilátero Ferrífero entre Santa Rita Durão e Fonseca, Minas Gerais. (Dissertation) Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (In Portuguese).
- CBH Rio das Velhas, 2013. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Belo Horizonte: Comitê da Bacia Hidrográfica Rio das Velhas; Agência Peixe Vivo (In Portuguese).
- CBH Rio das Velhas, 2019. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Belo Horizonte. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. *Revista Rio das Velhas* (In Portuguese).
- CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2024. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (In Portuguese).
- Chemale Jr., F., Rosière, C.A., Endo, I., 1992. Tectônica de bacias invertidas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(1), 3-22 (In Portuguese).
- Chemale JR., F.; Rosière, C. A.; Endo, I., 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 65:25-54.
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. (2019). Produto 2 — Relatório de locação das intervenções (Arrudas). Relatório técnico (Projeto hidroambiental). [S.l.].

- Cooper Junior, H. H.; Bredehoeft, J. D.; Papadopulos, S. S. (1967). Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3,(1:263-269).
- COPASA, 2024. Companhia de Saneamento de Minas Gerais. Números e indicadores operacionais 2024 (In Portuguese).
- CPRM. (2005). Projeto APA Sul RMBH: Geologia e Recursos Minerais. Belo Horizonte: CPRM.
- Custodio, E, Llamas, M.R., 1983. *Hidrología subterránea*. 2. ed. Barcelona: Omega.
- Da Silva, A.B.; Neto, A.F.S.; Bertachini, A.C., 1994. Potencial de águas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8., Anais, Recife: ABAS, p. 264–273 (In Portuguese).
- Dantas, J. C. L. et al. (2022). Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure and karstic aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area. *SSRN Electronic Journal*.
- Dantas, J.C.M., Mesquita, D.C., De Paula, R.S., Guerra, K.J., 2017. Correlação entre dados de perfílaxem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Águas Subterrâneas*, 31(4), 373–383 (In Portuguese).
- Dantas, J.C.M.; Mesquita, D.C.; Paula, R.S.; Guerra, K.J., 2023. Horizontal and vertical compartmentalization in the fissure-karstic aquifer: hydrogeological, hydrodynamic and hydrochemical aspects. *Journal of Hydrology*, v. 619.
- Davis, S. N.; De Wiest, R. J., 1980. *Hydrogeology*. New York: Wiley.
- De Paula, R. S. (2012). Modelagem numérica de fluxo do aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí, bacia do riacho Boi Morto no Município de São Francisco, norte de Minas Gerais. 2012. Tese (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- De Paula, R.S. (2019). Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da Apa Carste de Lagoa Santa, MG. 2019. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- De Paula, R.S. (2025). 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. *Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 140-153, 2018. DOI: 10.14295/ras.v32i1.28970.

- De Paula, R.S., 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. *Águas Subterrâneas*, 32(1), pp.140-153 (In Portuguese).
- Delin, G. N. et al. (2007) Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *Journal of Hydrology*, 333(4), (2:231-249).
- Dorr, J. V. N., & Barbosa, A. L. M. (1963). *Geology and Ore Deposits of the Itabira District, Minas Gerais, Brazil*. U.S. Geological Survey Professional Paper 341-C.
- Dorr, J.V.N., 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper, 641A.
- Dussin, I. A. (1990). *Compartimentação estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Dussin, I. A., Dussin, T. M., 1995. O Supergrupo Espinhaço: um modelo de evolução geodinâmica. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(3), 183-194 (In Portuguese).
- Dussin, I. A.; Dussin, T. M.; Chaves, M. L. S. C. (1990). *Compartimentação estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais - os grupos Diamantina e Conselheiro Mata*. *Revista Brasileira de Geociências*, 20, (1-4:178-186).
- Dutra, L.M.M.; et al. (2002). *Análise climática e balanço hídrico do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: UFMG.
- Endo *et al.* (2019) *Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (versão 2019)*. Ouro Preto: Departamento de Geologia — Escola de Minas / UFOP; projeto QFE2050, 2019. Disponível em: <https://qfe2050.ufop.br/mapa-geologico-do-quadrilatero-ferrifero-2019>
- Endo I., Galbiattih, F., Delgadoc, E. R., Oliveira, M.M.F., Zapparolia, C., Moura, L.G.B., Peresg, G., Oliveira, A.H., Zavaglia, G., Gomes, C.J.S., Carneiro, M.A., Nalini, J.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*. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP -Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero (In Portuguese).
- Endo, I. (1988). *Análise estrutural qualitativa do minério de ferro e encaixantes da Mina de Timpobeba, borda leste do Quadrilátero Ferrífero, Mariana*. 1988. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

- Endo, I. (1997) Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais. 243 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Endo, I. (1997). Regimes tectônicos atuantes durante o Arqueano e o Proterozoico na porção interna da placa São-Franciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, 27(4), 391-402.
- Endo, I. (2005). A Nappe Curral no Quadrilátero Ferrífero: caracterização e implicações. *Geologia USP. Série Científica*, 5(2), 1-16.
- Endo, I. et al. (2005). Nappe Curral: uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. In: *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 10. Aracaju. *Boletim de Resumos Expandidos.*, 1:279-282.
- Endo, I., Machado, R., Galbiatti, H.F., Rossi, D.Q., Zapparoli, A.C., Delgado, C.E.R., Castro, P.R.A., Oliveira, M.M.F, 2020. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero (In Portuguese).
- Enemark, T. et al. (2019). Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*, 569:310-329, 2019.
- Eschwege, W. L. von., 1833. *Pluto Brasiliensis*. Berlin: G. Reimer, 2 v.
- Farina, F.; Albert, C.; Martínez Dopico, C.; Aguilar Gil, C.; Moreira, H.; Hippertt, J. P.; Cutts, K.; Alkmim, F. F.; Lana, C. (2016), The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 68, p. 4–21. DOI: 10.1016/j.jsames.2015.10.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981115300808>
- Fernandes, A.S.; Carvalho, L.R.; Lopes, F.A.; Castro, P.T.A.; Lana, C.E., 2023. Pluviometry in the Serra da Caraça region and its influence on the Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, Brazil. *Geo*, v. 19, e20230006.
- Fernandes, R. do C.; Rolland, Y.; Peres, G. G.; Tassinari, C. C. G.; Pinto, C. P.; Ludka, I. P.; Rosière, C. A. (2023). Structural model and features of the world-class Cuiabá deposit (Iron Quadrangle, Brazil). *Journal of Structural Geology*, v. 180, p. 104484.
- Ferreira Q.C.G., Bacellar L.A.P., 2010. Avaliação preliminar das condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto, MG. *Geonomos*, 18(1):13-21 (In Portuguese). <https://doi.org/10.18285/geonomos.v18i1.63>
- Fetter, C. W., 2001. *Applied Hydrogeology*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

- Freitas, A. S. (2019). Litoestratigrafia e evolução geotectônica do Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Freitas, S. M. A. C.; Bacellar, L. A. P. (2013). Avaliação da recarga de aquíferos em microbacias do Alto Rio das Velhas, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 31-39, abr./jun. DOI: 10.21168/rbrh.v18n2.p31-39.
- Garcia, A. J. V.; Uhlein, A. (1987). Sistemas deposicionais do Supergrupo Espinhaço na região de Diamantina (MG). In: SIMPÓSIO SISTEMAS DEPOSICIONAIS DO PRÉ-CAMBRIANO, 6., Ouro Preto. Anais.... Ouro Preto: SBG-MG, 1987., 6:113-136.
- Giardin, A., Faccini, U., 2004. Complexidade hidroestratigráfica e estrutural do Sistema Aquífero Guarani. *Águas Subterrâneas*, 18, (1:15-25) (In Portuguese). <https://doi.org/10.14295/ras.v18i1.1343>
- Giardin, A., Faccini, U., 2004. O Sistema Aquífero Guarani na porção centro-leste do Estado do Paraná: compartimentação hidrogeológica e implicações. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1), 1-10 (In Portuguese).
- Gonçalves, M. M.; Silva, R. M.; Almeida, G. V., 2019. Caracterização hidrogeológica da Formação Cauê com base em testes de bombeamento e análises estruturais. *Águas Subterrâneas*, 33, (1, e30014) (In Portuguese).
- Gonçalves, P. S., et al. (2019). Aplicação de modelos de dupla porosidade em aquíferos fraturados do Quadrilátero Ferrífero. *Anais do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 20.
- 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. *Águas Subterrâneas*, [S.l.].
- Grandchamp, C. A. P.; Velásquez, L. N. M. (2002). Monitoramento da recuperação piezométrica na Mina de Águas Claras. *Anais do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 12.
- Grandchamp, R. (2003). Recuperação piezométrica e enchimento da cava da Mina de Águas Claras. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Guimarães, A. Z. (2024). Aplicação e adaptações de métodos de vulnerabilidade intrínseca em climas tropicais - Quadrilátero Ferrífero, Brasil. 2024. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Gustafson G. & Krásný J. 1994. Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. *Hydrogeology Journal*, Berlin, 2(2):64-75.

- Hancock, M. S., 1982. Mine water problems in Australia: conflicts of interest. In: International Mine Water Association Congress, Melbourne. Proceedings St. Kilda: Australian Groundwater Consultants Pty Ltd, p. 47-55.
- Harder, E.C., Chamberlin, R.T., 1915. The geology of central Minas Gerais, Brazil. *The Journal of Geology*, 23(5), pp.385-424.
- Hartmann, L.A., Endo, I., Suita, M.T.F., Santos, J.O.S., Frantz, J.C., Carneiro, M.A., Mcnaughton, N.J. and Barley, M.E., 2006. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. *Journal of South American Earth Sciences*, 20(4), pp.273-285.
- Healy, R. W. (2010). *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge: Cambridge University Press. 256 p.
- Healy, R. W.; Cook, P. G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, (1:91-109).
- Helwege, A., 2015. Challenges with resolving mining conflicts in Latin America. *Extractive Industries and Society*, v. 2, n. 1, p. 73–84.
- Hester, E. T. and Gooseff, M. N. (2020) Preferential Flow in Riparian Groundwater: Gateways for Watersheds. *Water Resources Research*, v. 56, n. 8, e2020WR028186. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2020WR028186>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. *Cidades e Estados: Brasil*. Rio de Janeiro (In Portuguese).
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, 2021. *Infográfico mineração em números 3T21. Publicações - Mineração em Números,, 1:1-2* (In Portuguese).
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2025. *Dados históricos da estação meteorológica de Belo Horizonte (MG), ano de 2025*, Brasília (In Portuguese).
- Jardim, C.H., Galvani, E., 2022. Unidades topo climáticas no Parque Nacional da Serra do Cipó. *Revista Brasileira de Climatologia* (In Portuguese).
- Jordt-Evangelista, H., Silva, M.E.D., 2005. Rochas metaultramáficas de Lamim, sul do Quadrilátero Ferrífero, MG: contribuição ao conhecimento do protólito da pedra-sabão. *Rem: Revista Escola de Minas*, 58, pp.11-20 (In Portuguese).
- Kochanek, K.; Tynan, S., 2010. The environmental risk assessment for decision support system for water management in the vicinity of open cast mines (DS WMVOC). *Technological and Economic Development of Economy*, v. 16, n. 3, p. 414-431. DOI: 10.3846/tede.2010.26.

- Konikow, L.F.; Mercer, J.W., 1988. Groundwater flow modeling for contaminant transport. *Groundwater*, 26, (2:170-178).
- Köppen, W., 1928. Geiger, Rudolf. Das Klima der bodennahen Luftschicht (Book Review). *Geographische Zeitschrift*, 34(2), p.115 (In German).
- Köppen, W.; Geiger, R., 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. (Wall-map 150 cm x 200 cm) (In German).
- Kruseman, G. P.; de Ridder, N. A. (1990). *Analysis and evaluation of pumping test data*. 2. ed. Wageningen: ILRI (International Institute for Land Reclamation and Improvement). 377:(Publication, 47).
- Kruseman, G. P.; de Ridder, N. A., 1990. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. 2. ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement. 377 p.
- Ladeira, B.P., 2025. *Potencial hídrico subterrâneo do Sinclinal Santa Rita – Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. (Master dissertation) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (In Portuguese).
- Ladeira, E. A. (1980) *Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine, and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Tese (Doutorado em Geociências) – University of Western Ontario, London (Ontario). 272 f. Disponível em: <https://ir.lib.uwo.ca/digitizedtheses/1050>
- Lei nº 9.433/1997. (1997). *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos*.
- Lobato, L.M., Vieira, F.W.R., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Pereira, L.M.M., Menezes, M.G., Junqueira, P.A. e Pereira, S.L.M., 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero: Part II, the Archean mesothermal gold-bearing hydrothermal system. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(3), pp.355-366.
- Lohman, S. W. *et al.* (1972). *Definitions of selected ground-water terms - revisions and conceptual refinements*. U.S. Geological Survey - Water-Supply Paper 1988, Washington, D.C.
- Lohman, S. W. *Ground-Water Hydraulics*. U.S. (1972). Geological Survey Professional Paper 708, 70 p., 1972. DOI: 10.3133/pp708.
- Magalhães, C. C. C., 2022. *Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero - MG): caracterização, impactos e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê* (Master dissertation) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (In Portuguese).

- Magalhães, C. C. C.; melo, M. C.; Guiguer, N.; Paula, R. S., 2022. The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 52, n. 4, e20220005.
- Marshak, S., & Alkmim, F. F. (1989). Proterozoic extension and inversion in the southern São Francisco Craton, Brazil. *Geology*, 17(7), 605-608.
- Marshak, S.; Alkmim, F. F.; Jordt-Evangelista, H. (1992). Proterozoic crustal extension and the generation of dome-and-keel structure in an Archean granite-greenstone terrane. *Nature*, v. 357, p. 491-493. DOI: 10.1038/357491a0.
- Matos, F., Dias, R., 2011. Consórcios intermunicipais e a bacia hidrográfica do rio Paraopeba. *Revista Espacios*, 32(4), p.24 (In Portuguese).
- Maxwell, C. H., 1972. Geology and ore deposits of the Alegria district, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper 341-J, 72 p.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Washington: US Geological Survey. (Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1).
- Medina, A. I. M.; Dantas, M. E.; Saadi, A., 2005. Geomorfologia. In: Projeto Apa Sul RMBH - Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte: CPRM / SEMAD / CEMIG, pp. 6-54 (In Portuguese).
- Mesquita, A. C., et al. (2017). Parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos fraturados no Quadrilátero Ferrífero. *Anais do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 20.
- 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 sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Geonomos* 25 (2), 12-19, CPMTc (In Portuguese).
- Miller, James A. (1999). Ground Water Atlas of the United States: Introduction and National Summary. U.S. Geological Survey Hydrologic Atlas 730-A.
- Moench, A. F. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, 20, (7:831-846, 1984. DOI: 10.1029/WR020i007p00831.
- Moench, A. F., 1984. Double-porosity models for a fractured aquifer with a leaky aquitard. *Water Resources Research*, 20(7), 831-846.
- Mourão, M. A. A., 2007. Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. (Doctoral dissertation) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 297 p (In Portuguese).

- Mourão, M. M., 2007. Estruturação geológica e compartimentação hidrogeológica do Quadrilátero Ferrífero - MG. Belo Horizonte: CPRM (In Portuguese).
- Nasa Earthdata. Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center - ALOS PALSAR Version 1.
- Nery, F.H., 2016. Variabilidade pluviométrica na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: análise da média anual de precipitação do período de 1991-2002. Cadernos do LESTE, 16(16) (In Portuguese).
- Nery, J. T. (2016) Introdução à climatologia. Curitiba: IESDE.
- Nimer, E., 1989. Climatologia do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE (In Portuguese).
- Oliveira, M. M., 2009. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e fraturada: aplicação do conceito de dupla porosidade. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 14, (1:109-118) (In Portuguese).
- Pflug, R., 1968. Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais. Departamento Nacional da Produção Mineral.
- Pimenta, F.; Lopes-Silva, L.; Pirotte, N.; Rosière, C. A. (2009). Stratigraphic analysis of a carbonate sequence related to the BIFs of the Iron Quadrangle, southeastern Brazil. In: SGA - Society of Geology Applied to Mineral Deposits, 10., 2009, Townsville. Proceedings... Townsville: SGA.
- Pires, F. R. M. (1979). Structural geology and stratigraphy at the junction of the Serra do Curral anticline and the Moeda syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. 220 f. PhD Thesis - University of Michigan, Michigan.
- Pomerene, J.B. (1964). Geology and ore deposits of the Belo Horizonte, Ibitaré, and Macacos quadrangles, Minas Gerais, Brazil (No. 341-D).
- Ramos, M.L.S., Cordeiro, V.F., Fernandes, R.A., 2020. Histórico e arcabouço hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. In: Universidade Federal De Ouro Preto. Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos, 1:380-414 (In Portuguese).
- Raposo, F.O. (1991). Brazil Geological Basic Survey Program-Espera River-Sheet SF. 23-XB-IV-Minas Gerais State; Programa Levantamentos Geologicos Basicos do Brasil-Rio Espera-Folha SF. 23-XB-IV-Estado de Minas Gerais.
- Reichard, E. G., 1995. Groundwater-surface water management with stochastic surface water supplies: A simulation-optimization approach. Water Resources Research, 31, (11:2845-2865).

- Ribeiro, C. G., 2019. Compartimentação físico-hidrogeológica vertical de aquíferos fraturados: proposta metodológica aplicada ao Quadrilátero Ferrífero (MG). 123 f. (Master dissertation) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (In Portuguese).
- Rolim, G. S.; Sentelhas, P. C.; Barbieri, V., 1998. Planilhas no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 6:133-137 (In Portuguese).
- Romano, A. W. (1989). Evolution tectonique de la région Nord-Ouest du Quadrilatère Ferrifère - Minas Gerais, Brésil. Thèse (Doctorat) - Université de Nancy I, Nancy, France, 259 p.
- Rosière, C. A.; Chemale Junior, F. (2013). Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero - uma visão geral e discussão. *Geonomos*, 8:27-43.
- Rossi, D. Q. (2014). Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. 129 p
- Ruchkys, U., (2009). Geoparque Quadrilátero Ferrífero: Proposta de geoconservação e desenvolvimento sustentável. *Geonomos*, 17(1), 1-10.
- Sadala, J.; Gonçalves, R. D. (1980). Experiência da COPASA MG na utilização de água subterrânea para abastecimento urbano. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1.
- Sanglard, J.C.D.; Rosière, C.A.; Santos, J.O.S.; Mcnaughton, N.J.; Fletcher, I.R., 2014. A estrutura do segmento oeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, e o controle tectônico das acumulações compactas de alto teor em Fe. *Geologia USP – Série Científica*, v. 14, n. 1, p. 1–95 (In Portuguese). DOI: 10.5327/Z1519-874X201400010006.
- Scanlon, B.R.; Healy, R.W.; Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, (1:18-39).
- Schlumberger, 2017. Relatório de Caracterização Hidrogeológica do Quadrilátero Ferrífero. (Intern document) (In Portuguese).
- Schorscher, H. D. (1976). Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na região de Itabira, Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 29. Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Geologia:194-195.
- Silva, A. R., Neto, J. M., & Bertachini, A. C. (1994). Estimativa de reservas explotáveis das unidades aquíferas no Quadrilátero Ferrífero. *Anais do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 8.

- Silva, S. L.; Monteiro, E. A.; Baltazar, O. F. (2005) Geologia. In: CPRM; SEMAD; CEMIG. Projeto APA SUL RMBH - Estudos do Meio Físico: Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD. 73 p.
- SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2025. Relatórios e dados sobre recursos hídricos do Brasil. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (In Portuguese).
- Sun, W.; Wu, Q.; Dong, D.; Jiao, J., 2012. Avoiding Coal-Water Conflicts During the Development of China's Large Coal-Producing Regions. *Mine Water and the Environment*, 31:74-78, 2012. DOI:10.1007/s10230-012-0173-9.
- Teixeira da Costa M., 1961. Sedimentação e orogênese da Série de Minas: Ouro Preto, SICEG. *Soc. Interc. Cult.e Est. Geol.*, nº. 1, p. 55-61 (In Portuguese).
- Teixeira, G.M., 2023. Avaliação de recarga e modelagem hidrogeológica do sistema aquífero do flanco oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero – MG. 158 f. (Master dissertation) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (In Portuguese).
- Thiessen, A. H., 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, U.S. Department of Agriculture, Weather Bureau. v. 39, p. 1082–1089.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38:55-94.
- Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R., 1955. The water balance. New Jersey: Drexel Institute of Technology. 104:(Publications in Climatology).
- Todd, D. K. (1967). Hidrologia de águas subterrâneas. São Paulo: Edgard Blücher, 1967. 319p.
- Varajão, C.A., 1991. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Brazilian Journal of Geology*, 21(2), p.138-145 (In Portuguese).
- Ventura, L., & Bacellar, L., 2011. Influência de filitos no padrão de fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto. *Media & Jornalismo*, (121), 71-88 (In Portuguese). [https://doi.org/10.14195/2184-8394\\_121\\_5](https://doi.org/10.14195/2184-8394_121_5)
- Water Services and Technologies. (2018). Estudo hidrogeológico Serra da Moeda. In: Fórum Nacional da Sociedade Civil nos Comitês de Bacias Hidrográficas, 2018. [S.l.]: Water Services and Technologies.
- Zupo, A. R., 2024. Modelagem hidrogeológica com enfoque na recarga e exploração subterrânea em aquíferos fraturados no Quadrilátero Ferrífero - MG. 2024. 163 f. (Master dissertation) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte (In Portuguese).

- Zupo, A.; De 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*, v. 270, 104516. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2025.104516
- Andrade, I.B.; De Paula, R.S.; Teixeira, G.M.; Novo, T.A.; Melo, M.C.; Costa, F.C., 2025. Investigação do fluxo no sistema aquífero do flanco oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 18, n. 5, p. 3350-3376.
- Bouwer, H.; Rice, R. C., 1976. A Slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12, (3:423-428).
- Dorr, J.V.N., 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper, 641A.
- Endo et al. (2019) Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (versão 2019). Ouro Preto: Departamento de Geologia — Escola de Minas / UFOP; projeto QFE2050, 2019.
- Endo et al. (2020) Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP -Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.
- Eschwege, W. L. von., 1833. *Pluto Brasiliensis*. Berlin: G. Reimer, 2 v.
- Healy, R. W.; Cook, P. G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, (1:91-109).
- Köppen, W.; Geiger, R., 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. (Wall-map 150 cm x 200 cm) (In German).
- Lohman, S. W. et al. (1972). Definitions of selected ground-water terms - revisions and conceptual refinements. U.S. Geological Survey - Water-Supply Paper 1988, Washington, D.C.
- Magalhães, C. C. C.; melo, M. C.; Guiguer, N.; Paula, R. S., 2022. The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 52, n. 4, e20220005.

- Moench, A. F. (1984). Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research*, 20, (7:831-846).
- Mourão, M. A. A., 2007. Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. (Doctoral dissertation) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 297 p.
- Thiessen, A. H., 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, U.S. Department of Agriculture, Weather Bureau. v. 39, p. 1082–1089.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38:55-94.
- Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R., 1955. *The water balance*. New Jersey: Drexel Institute of Technology. 104:(Publications in Climatology).

## 10. APENDICE

Tabela 7 - Dados das estações pluviométricas levantadas.

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Município</b>	<b>Ano Início</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>
1943022	Caixa de Areia	Belo Horizonte	1940	613847	7794281
2044008	Melo Franco	Brumadinho	1941	591901	7766281
2044098	Novo Horizonte	Ibirité	1976	597945	7784073
2044026	Fazenda Coqueiros	Itaúna	1974	554980	7774124
2044053	Escola de Veterinária	Igarapé	1986	568532	7780838
1943006	Sabara	Sabara	1941	624092	7799956
1943000	Morro Velho	Nova Lima	1855	620362	7790452

Tabela 8 - Dados das nascentes/cabeceiras de drenagens levantadas.

<b>ID</b>	<b>Cota NA</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>ID</b>	<b>Cota NA</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>
NA-01	1200	642688	7811019	NA-194	1070	573059	7772308
NA-02	1140	642864	7811234	NA-195	1070	571830	7775149
NA-03	1135	643221	7811028	NA-196	1150	571073	7775521
NA-04	1155	643109	7810828	NA-197	1150	570918	7775697
NA-05	1095	643335	7811647	NA-198	1200	570582	7775606
NA-06	1100	642682	7812037	NA-199	1120	572998	7775262
NA-07	1080	642707	7812286	NA-200	1150	572910	7775845
NA-08	1110	642808	7812522	NA-201	1010	572756	7776706
NA-09	1110	642545	7812797	NA-202	1160	573350	7775597
NA-10	1085	642552	7813145	NA-203	1260	573963	7775568
NA-11	1060	643014	7813336	NA-204	1240	574480	7775696
NA-12	1060	642518	7813476	NA-205	1220	574698	7775908
NA-13	1080	643201	7812889	NA-206	1240	574975	7776175
NA-14	1055	643502	7812923	NA-207	1130	575675	7776343
NA-15	1040	643548	7813691	NA-208	1280	575369	7775774
NA-16	1045	643739	7813571	NA-209	1040	575265	7774819
NA-17	1010	643769	7813992	NA-210	1060	574477	7772721
NA-18	1020	643989	7813718	NA-211	970	575088	7772140
NA-19	1020	644116	7813767	NA-212	1110	573906	7771617
NA-20	1040	644638	7813047	NA-213	1050	574051	7770757
NA-21	1070	644399	7812900	NA-214	1130	575753	7774475
NA-22	1070	644121	7812675	NA-215	950	575622	7777439
NA-23	1100	643870	7812259	NA-216	970	568914	7776375
NA-24	1100	643573	7812040	NA-217	930	576108	7773045
NA-25	1095	643985	7811840	NA-218	1190	576613	7775473
NA-26	1095	642113	7812735	NA-219	1070	577656	7774981
NA-27	1110	642243	7812067	NA-220	1020	577745	7774246
NA-28	1110	642363	7811850	NA-221	1020	578290	7773986

ID	Cota NA	UTM-E	UTM-N
NA-29	1090	642339	7811477
NA-30	1070	641770	7811242
NA-31	1120	641997	7810985
NA-32	1060	641514	7811119
NA-33	1055		
NA-34	1040	640670	7810768
NA-35	1040	640615	7811024
NA-36	1220	642293	7810139
NA-37	1200	642094	7810264
NA-38	1200	642016	7809852
NA-39	1180	641885	7809516
NA-40	1205	641323	7809213
NA-41	1200	641120	7809186
NA-42	1215	640910	7809136
NA-43	1170	640678	7809462
NA-44	1180	640569	7809341
NA-45	1210	640455	7809106
NA-46	1225	640157	7808873
NA-47	1245	639933	7808929
NA-48	1360	639121	7808321
NA-49	1170	639142	7809582
NA-50	1180	639242	7809334
NA-51	1170	638840	7809890
NA-52	1040	638679	7810514
NA-53	1290		
NA-54	1220	638424	7809391
NA-55	1140	638169	7809962
NA-56	1090	638004	7810185
NA-57	1130	637734	7809828
NA-58	1140	637296	7809530
NA-59	1090	636971	7809795
NA-60	1310	638040	7808716
NA-61	1360	638202	7808437
NA-62	1220	637739	7809197
NA-63	1200	637472	7809058
NA-64	1100	636156	7809037
NA-65	1090	636415	7809044
NA-66	1060	635223	7809024
NA-67	1250	635498	7807998
NA-68	1190	635002	7808177
NA-69	1100	634539	7808567
NA-70	1230	635032	7807786
NA-71	1200	634777	7807590
NA-72	1180	634448	7807501
NA-73	1020	633507	7808571

ID	Cota NA	UTM-E	UTM-N
NA-222	890	578954	7773121
NA-223	1000	578114	7775502
NA-224	940	578699	7776207
NA-225	1100	578944	7774526
NA-226	1020	579443	7775132
NA-227	950	579219	7773989
NA-228	1000	580488	7775714
NA-229	930	580885	7776402
NA-230	910	580471	7776875
NA-231	790	581569	7775164
NA-232	950	581538	7776392
NA-233	840	578785	7777865
NA-234	840	580240	7777537
NA-235	890	580541	7777199
NA-236	990	579940	7775413
NA-237	770	582253	7775157
NA-238	850	581278	7777072
NA-239	870	583502	7777025
NA-240	930	584053	7777088
NA-241	1080	584174	7777506
NA-242	990	585593	7777061
NA-243	1040	585683	7777586
NA-244	1010	587719	7776357
NA-245	1170	587403	7777324
NA-246	1160	587357	7777668
NA-247	1140	588570	7777450
NA-248	930	589016	7775533
NA-249	1080	590462	7776237
NA-250	1060	590029	7776367
NA-251	1090	590231	7777473
NA-252	1080	591124	7776638
NA-253	1300	592389	7777100
NA-254	1030	592939	7775624
NA-255	1090	594225	7776141
NA-256	1140	593999	7776247
NA-257	880	594383	7774871
NA-258	1130	592717	7777982
NA-259	1130	594789	7778507
NA-260	1270	595251	7777747
NA-261	1160	596212	7777902
NA-262	1240	596116	7778754
NA-263	1090	593501	7778717
NA-264	1230	592999	7777080
NA-265	1210	594598	7777310
NA-266	1230	595909	7778094

ID	Cota NA	UTM-E	UTM-N
NA-74	920	632765	7808626
NA-75	1020	633634	7807898
NA-76	1080	633691	7807465
NA-77	1020	633156	7807376
NA-78	1030	632751	7807299
NA-79	1030	632520	7807287
NA-80	920	632019	7808102
NA-81	1100	632187	7806648
NA-82	990	631892	7807259
NA-83	980	631631	7807062
NA-84	940	631610	7807574
NA-85	1100	631872	7806545
NA-86	1100	631842	7806123
NA-87	1040	631502	7806244
NA-88	1050	631315	7806053
NA-89	1090	631087	7805871
NA-90	1060	630493	7805874
NA-91	1060	630796	7805869
NA-92	1060	630143	7806091
NA-93	970	630411	7806930
NA-94	920	630556	7807326
NA-95	900	630391	7807692
NA-96	870	631047	7808769
NA-97	880	631261	7809013
NA-98	1040	552720	7766180
NA-99	1040	553465	7766760
NA-100	1040	553249	7766057
NA-101	1020	552744	7766780
NA-102	1060	553171	7767162
NA-103	1010	553816	7766580
NA-104	1010	554254	7767219
NA-105	1040	554104	7768211
NA-106	1040	554938	7767653
NA-107	1010	553808	7768395
NA-108	1110	554130	7769169
NA-109	1110	554100	7768844
NA-110	1030	555188	7768042
NA-111	1120	554235	7769447
NA-112	1110	554872	7769940
NA-113	1220	557609	7771642
NA-114	1090	556481	7770347
NA-115	1210	559205	7772411
NA-116	1250	558387	7772329
NA-117	1250	557785	7772068
NA-118	1200	556090	7771055

ID	Cota NA	UTM-E	UTM-N
NA-267	1260	596754	7778549
NA-268	980	596017	7776631
NA-269	1150	595714	7779612
NA-270	1040	594417	7779632
NA-271	970	594240	7780157
NA-272	980	591993	7779092
NA-273	970	590628	7779017
NA-274	1000	585629	7778430
NA-275	920	584663	7778008
NA-276	960	584317	7777964
NA-277	840	585791	7775946
NA-278	860	591153	7773945
NA-279	900	593044	7774562
NA-280	1320	597499	7779245
NA-281	1330	597249	7778811
NA-282	1260	597773	7779086
NA-283	1140	597944	7780044
NA-284	1210	599302	7780276
NA-285	1270	598628	7779773
NA-286	950	597913	7777080
NA-287	1050	596729	7780834
NA-288	1220	599164	7780674
NA-289	1220	598339	7779601
NA-290	1230	599630	7780763
NA-291	1260	599663	7781120
NA-292	1270	600415	7781182
NA-293	1240	600718	7781093
NA-294	1260	600910	7781858
NA-295	1290	601561	7781195
NA-296	1320	602455	7781753
NA-297	1340	602800	7781670
NA-298	1270	602383	7782590
NA-299	1080	598221	7781187
NA-300	1200	601489	7782308
NA-301	1170	602553	7783591
NA-302	1160	603153	7785137
NA-303	1250	604055	7784471
NA-304	1410	604296	7782857
NA-305	1350	604412	7783635
NA-306	1250	605059	7785163
NA-307	1330	605284	7783765
NA-308	1270	605609	7784888
NA-309	1230	605733	7785672
NA-310	1300	606096	7786373
NA-311	1230	606527	7785774

ID	Cota NA	UTM-E	UTM-N
NA-119	1240	559753	7772798
NA-120	1200	560094	7772938
NA-121	1230	559808	7773156
NA-122	1200	560372	7773022
NA-123	1240	559190	7772769
NA-124	1240	560153	7773330
NA-125	1170	560744	7773131
NA-126	1160	560915	7774188
NA-127	1120	561827	7773980
NA-128	1090	561683	7774339
NA-129	1190	563047	7774433
NA-130	1040	561001	7772507
NA-131	1080	563303	7773855
NA-132	1180	563296	7774143
NA-133	1240	563286	7774441
NA-134	1250	563812	7774325
NA-135	960	563099	7772507
NA-136	1020	556555	7768021
NA-137	1080	556099	7767154
NA-138	1070	553949	7769469
NA-139	1090	554553	7769997
NA-140	1020	554354	7770313
NA-141	1020	555528	7771962
NA-142	1020	556078	7767929
NA-143	1060	556350	7767225
NA-144	1030	557694	7767944
NA-145	960	560948	7771803
NA-146	1150	560718	7773891
NA-147	1120	561739	7773777
NA-148	1220	564464	7774572
NA-149	1210	563265	7774186
NA-150	1190	563047	7774416
NA-151	1210	563581	7774533
NA-152	1250	563774	7774336
NA-153	1000	562325	7775315
NA-154	1000	560900	7774688
NA-155	1180	561101	7773983
NA-156	1200	560660	7773159
NA-157	1190	562605	7774195
NA-158	980	564473	7772115
NA-159	920	565885	7772260
NA-160	970	564724	7772208
NA-161	1120	565894	7774385
NA-162	1160	565392	7774706
NA-163	1280	567579	7774745

ID	Cota NA	UTM-E	UTM-N
NA-312	1160	606410	7787404
NA-313	1170	607723	7787314
NA-314	1160	608436	7787730
NA-315	1080	606982	7788740
NA-316	1080	606179	7788297
NA-317	1010	611931	7788967
NA-318	1120	609975	7788764
NA-319	1120	609041	7788026
NA-320	1100	609919	7790580
NA-321	1040	611873	7790096
NA-322	1080	611410	7790457
NA-323	1080	612938	7789577
NA-324	1080	612953	7789287
NA-325	1120	612426	7791934
NA-326	1130	612593	7792531
NA-327	1070	612808	7791176
NA-328	1120	613443	7791335
NA-329	1230	614004	7792722
NA-330	1070	614388	7791888
NA-331	1090	615232	7792649
NA-332	920	615550	7790898
NA-333	1000	614950	7790640
NA-334	950	615747	7791331
NA-335	950	616652	7791931
NA-336	980	617005	7792541
NA-337	1140	615335	7794388
NA-338	1180	616176	7794612
NA-339	1020	615682	7795431
NA-340	1050	614947	7794975
NA-341	980	617733	7793704
NA-342	1010	617975	7794141
NA-343	1040	618253	7796636
NA-344	1000	617943	7795544
NA-345	1050	616401	7795519
NA-346	780	621407	7797047
NA-347	840	619100	7798199
NA-348	930	619166	7797573
NA-349	880	620361	7798321
NA-350	920	621184	7798346
NA-351	740	622322	7797446
NA-352	810	622368	7798245
NA-353	790	621596	7799419
NA-354	830	620290	7796771
NA-355	850	619778	7794258
NA-356	750	623062	7799686

ID	Cota NA	UTM-E	UTM-N	ID	Cota NA	UTM-E	UTM-N
NA-164	1260	567275	7774887	NA-357	910	623870	7801770
NA-165	960	560948	7771803	NA-358	960	624345	7803612
NA-166	1010	561614	7771126	NA-359	900	623891	7803972
NA-167	1230	560630	7773231	NA-360	1000	624795	7802827
NA-168	1190	560950	7773288	NA-361	800	626436	7802279
NA-169	1140	560654	7773906	NA-362	930	624903	7803577
NA-170	1150	560899	7774202	NA-363	1010	626681	7803394
NA-171	1040	561001	7772507	NA-364	1030	627271	7804114
NA-172	1130	561811	7774039	NA-365	920	628660	7804193
NA-173	1020	562215	7771251	NA-366	1010	627518	7805557
NA-174	1020	562284	7771109	NA-367	990	626697	7804456
NA-175	990	562717	7771260	NA-368	890	630203	7804301
NA-176	1000	561757	7775055	NA-369	900	632080	7805001
NA-177	950	563099	7772507	NA-370	1090	632923	7806318
NA-178	1050	562776	7773451	NA-371	820	634477	7803974
NA-179	1190	563047	7774433	NA-372	1130	629005	7806315
NA-180	1020	568081	7773599	NA-373	920	630080	7807441
NA-181	1110	568144	7774242	NA-374	930	634858	7804980
NA-182	1300	568086	7774886	NA-375	1060	633768	7806375
NA-183	1300	568857	7774941	NA-376	1080	634660	7806577
NA-184	1230	570132	7775357	NA-377	1050	636146	7806373
NA-185	1290	569671	7775063	NA-378	1170	635490	7807148
NA-186	1270	569434	7775262	NA-379	1300	637671	7807006
NA-187	980	569059	7772508	NA-380	1260	638338	7806691
NA-188	980	569473	7772614	NA-381	1240	640297	7807896
NA-189	970	571222	7771984	NA-382	1300	639652	7807311
NA-190	1040	571116	7770417	NA-383	1270	640954	7808622
NA-191	1100	573414	7771088	NA-384	1170	640872	7807080
NA-192	1120	573631	7770802	NA-385	1190	642030	7809074
NA-193	1120	573089	7771550				

Tabela 9 - Dados gerais dos instrumentos de medição de vazão superficial levantados.

Empresa	Mina	ID	UTM-E	UTM-N	Data Inicial
IGAM	Alberto Flores - Honório Bicalho	40740000	587715	7769849	01/11/1963
IGAM	Montante	41199998	623014	7785353	01/04/1971
USIMINAS	MC	VC-04-Mota	562557	7772672	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-10-Mota	563588	7771769	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-02-CPGA	562635	7775180	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-03-CPGA	562876	7775371	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-05-CPGA	562676	7775127	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-06-CPGA	563235	7775344	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-07-CPGA	562741	7775880	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-08-Afluente_Garimpo	559223	7774138	01/10/2013

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Data Inicial</b>
USIMINAS	MC	VC-09-Afluente Garimpo	560102	7775207	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-11-Afluente Alto Boa Vista	561863	7776192	01/10/2013
USIMINAS	MC	VC-12-Laurinha	560728	7776432	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-01-Santo Antonio	565559	7775905	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-05-Santo Antonio	565690	7776201	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-15-Afluente Vieiras	566123	7773244	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-02-Afluente Santo Antonio	565418	7775518	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-03-Afluente Santo Antonio	565508	7775667	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-04-Afluente Santo Antonio	565465	7775631	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-06-Varginha	565911	7775951	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-07-Santo Antonio	565497	7775742	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-08-Corrego Batatal	567885	7775826	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-09-Afluente Batatal	568064	7775840	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-10-Corrego Mourao	568535	7773673	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-11-Corrego Mourao	568474	7773670	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-12-Quaresma	566856	7774440	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-13-Afluente Vieiras	567570	7773902	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-14-Afluente Vieiras	568004	7773819	01/10/2013
USIMINAS	ME	VE-16-Ferrous	566477	7773753	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-08-Pintos	554694	7768258	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-13-Pacheco	555724	7773124	01/05/2010
USIMINAS	MW	VW-14-Cabeceira Cumprida	556181	7774103	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-15-Afluente Pacheco	557813	7773589	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-03-Couves	557948	7771226	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-04-Couves	558286	7770940	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-05-Biquinha	558654	7771122	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-06-Mata Onca	559417	7770830	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-07-Jatoba	560015	7770846	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-10-Orica	558074	7769733	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-11-Freitas	554579	7771767	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-12-Afluente Freitas	554766	7771941	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-16-Afluente samambaia	559323	7770706	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-18-Afluente Pintos	553310	7768838	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-19-Corrego Pacheco	557629	7773488	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-20-Afluente Mourao Queimado	553271	7769654	01/10/2013
USIMINAS	MW	VW-21-Corrego Mourao Queimado	553923	7770239	01/10/2013
VALE	Minas Paralisadas Sul	CFJB2CP001	590061	7774058	01/03/2010
VALE	Minas Paralisadas Sul	CFJB6CP001	591630	7775016	19/09/2022
VALE	Minas Paralisadas Sul	CFJB6MI001	591627	7775024	02/05/2016
VALE	Minas Paralisadas Sul	CFJBM1MV001	590033	7775030	01/03/2010
VALE	Minas Paralisadas Sul	CFJPEM3VTD001	590166	7775410	01/09/2000
VALE	Córrego do Feijão	P02	589329	7774208	
VALE	Córrego do Feijão	P03	589316	7774201	
VALE	Córrego do Feijão	P03	589316	7774201	

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Data Inicial</b>
VALE	Córrego do Feijão	P04	588330	7775565	
VALE	Córrego do Feijão	P08	593416	7775131	
VALE	Córrego do Feijão	P16	593497	7775757	
VALE	Córrego do Feijão	P25	591955	7776624	01/10/1998
VALE	Córrego do Feijão	P28	590107	7774131	
VALE	Córrego do Feijão	P30 - VTD61	592166	7776669	01/09/2002
VALE	Córrego do Feijão	VT01	589529	7777631	
VALE	Córrego do Feijão	VT02	589665	7777922	
VALE	Córrego do Feijão	VT03	590721	7777469	
VALE	Córrego do Feijão	VT04	589673	7777939	
VALE	Córrego do Feijão	VT05	590624	7779081	
VALE	Córrego do Feijão	VT06	589952	7779028	
VALE	Córrego do Feijão	VT07	589322	7779260	
VALE	Córrego do Feijão	VT08	591143	7778637	
VALE	Córrego do Feijão	VT09	592513	7778120	
VALE	Córrego do Feijão	VT10	592656	7778949	
VALE	Córrego do Feijão	VT11	592624	7779375	
VALE	Córrego do Feijão	VT12	592536	7779033	
VALE	Córrego do Feijão	VT13	589440	7778360	
VALE	Córrego do Feijão	VT14	586673	7777940	
VALE	Córrego do Feijão	VT16	588929	7779432	
VALE	Córrego do Feijão	VT17	586541	7778448	
VALE	Córrego do Feijão	VT18	588445	7776172	
VALE	Córrego do Feijão	VT19	589574	7776733	
VALE	Córrego do Feijão	VT77-08	592046	7773708	
VALE	Jangada	VTD 08-01	593405	7775101	
VALE	Samambaia	VTD 08-01	593378	7775123	
VALE	Engenho Seco	VTD 09-01	592489	7778117	
VALE	Engenho Seco	VTD 12-01	592501	7779027	
VALE	Samambaia	VTD 16-01	593462	7775755	
VALE	Jangada	VTD 33-01	596519	7777880	
VALE	Ã•ndia	VTD 36-01	595289	7776536	
VALE	Ã•ndia	VTD 38-01	595219	7776764	
VALE		VTD 42-01	594161	7779012	
VALE	Córrego Boa EsperanÃ§a	VTD 46-01	593995	7779399	
VALE	Boa Esperança	VTD 46-01	593959	7779360	
VALE	Córrego do Feijão	VTD 47-01	593596	7779154	
VALE	Jangada	VTD 54-02	596708	7777624	
VALE	Jangada	VTD 55-02	596567	7777695	
VALE	Samambaia	VTD 56-02	593269	7776081	
VALE	Engenho Seco	VTD 57-02	592579	7778640	
VALE	Córrego do Feijão	VTD 57-02	592697	7778897	
VALE	Manga	VTD 60-02	598500	7778763	
VALE	-	40741200	591482	7774938	-
ANA	-	40745000	581846	7775356	-

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Data Inicial</b>
ANA	-	40785000	602819	7786319	-
IGAM-MG	-	40818800	598424	7776926	-
IGAM-MG	-	41231500	604911	7788111	-

Tabela 10 - Poços com teste de bombeamento utilizados para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos.

<b>Unidade Hidrogeológica</b>	<b>Número Outorga</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>
Batatal	15007/2010	6110047	7900465
Batatal	15958/2015	611113	7790542
Cauê	2452/2009	609993	7789365
Cauê	08442/2015	610591	7790203
Cauê	10088/2008	562422	7773860
Gandarela	05321/2012	610763	7791119
Gandarela	08643/2012	610555	7790806
Gandarela	20393/2012	610349	7790500
Gandarela	21824/2012	606904	7787970
Moeda	03838/2015	609494	7788538
Moeda	17033/2012	611727	7790977
Moeda	22126/2016	600459	7779913

Tabela 11 - Dados gerais de captações superficiais outorgadas.

<b>Fonte</b>	<b>Município</b>	<b>Mineração / Empreendedor</b>	<b>Mina</b>	<b>Número Outorga</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Vazão (m³/h)</b>
SISEMA	Caeté	SAAE - Serviço Autônomo de Esgoto de Caeté		02065/2002	642055	7807644	0,02
SISEMA	Ibirité	COPASA		03416/2003	604958	7788197	0,01
SISEMA	Itatiaiuçu	Ferrous Resources		07708/2012	566471	7772849	18
SISEMA	Brumadinho	Pessoa Física		08209/2018	582591	7776252	16,66
SISEMA	Brumadinho	Mineração Comisa		10527/2008	571512	7774347	20,52
SISEMA	Caeté	Mitra Arquidiocesana de Belo Horizonte		10827/2021	640170	7808477	3,24
SISEMA	Ibirité	Pessoa Física		13530/2021	597796	7781585	8,21
SISEMA	Mário Campos	Associação Serra dos Bandeirantes		13561/2020	588935	7778657	2,06
SISEMA	Ibirité	COPASA		13696/2014	600439	7782444	100
SISEMA	Ibirité	COPASA		13697/2014	601481	7783246	40
SISEMA	Ibirité	COPASA		13698/2014	599356	7781543	110
SISEMA	Ibirité	COPASA		13702/2014	602403	7783927	10
SISEMA	Itatiaiuçu	Minerita Minérios		14219/2014	563720	7771641	219,96
SISEMA	Caeté	Hotel Fazenda MMX Sudeste		14235/2009	644107	7813101	0,6
SISEMA	Brumadinho	Mineração		1694/2005	572619	7775234	32,4
SISEMA	Jáparaíba	Pessoa Física		18219/2020	557218	7771818	15

<b>Fonte</b>	<b>Município</b>	<b>Mineração / Empreendedor</b>	<b>Mina</b>	<b>Número Outorga</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Vazão (m³/h)</b>
SISEMA	Brumadinho	Associação Comunitária do Recanto da Aldeia		18743/2017	598396	7778766	7,71
SISEMA	Brumadinho	Associação Comunitária do Recanto da Aldeia		18744/2017	598396	7778797	0,52
SISEMA	Brumadinho	Associação Comunitária do Recanto da Aldeia		18745/2017	598372	7778756	2
SISEMA	Mateus Leme	USIMINAS S/A		20260/2011	565448	7775724	101,88
SISEMA	Caeté	Empresa Construtora Brasil		22113/2014	640273	7811563	123,6
SISEMA	Nova Lima	Vale S.A.		23246/2012	615218	7792775	89,3
SISEMA	Nova Lima	Condomínio Estância Serrana		23467/2013	608501	7787714	2
SISEMA	Nova Lima	Condomínio Estância Serrana		23468/2013	608443	7787684	9
SISEMA	Mateus Leme	USIMINAS S/A		23478/2012	568753	7774328	40,68
SISEMA	Brumadinho	Condomínio Quintas de Casa Branca		24306/2017	600491	7779492	5
SISEMA	Brumadinho	Condomínio Quintas de Casa Branca		24307/2017	600583	7780352	5
SISEMA	Igarapé	Pessoa Física		30909/2015	570653	7776125	4,37
SISEMA	Brumadinho	Mineração Esperança		3189/2009	582786	7776019	2,8
SISEMA	Nova Lima	Taquaril Mineração S.A		33309/2014	621056	7796038	??
SISEMA	Brumadinho	Minerações Brasileiras R.		359/2010	596842	7776284	25,2
SISEMA	Sabará	Anglogold Shanti Córrego do Sítio Mineração S/A		4012/2009	631698	7803943	105
SISEMA	Itatiaiuçu	Minerita Minérios		4198/2006	563696	7772902	2,2
SISEMA	Nova Lima	Condomínio Residencial Vila Castela		57336/2020	610231	7789231	6,6
SISEMA	Sabará	Itapoços poços artesanais de Itabira nascimento Ltda		60826/2021	627067	7801766	2,78
SISEMA	Brumadinho	Vale S.A.		71581/2019	592633	7773459	4,45
SISEMA	Itatiaiuçu	Ferrous Resources		7708/2012	566483	7772861	18
SISEMA	Itatiaiuçu	USIMINAS S/A		8709/2009	562240	7771801	99,72

Tabela 12 – Dados gerais de todos os poços outorgados e levantados.

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SIAM	-	-	POÇO-02	556545	7770467	#N/A	SAD69	136,5	-	80	52,04	70,37	4,36	
SIAM	-	-	POÇO-03	556719	7770405	#N/A	SAD69	134,25	-	113	54,66	70,53	7,12	
SIAM	-	-	POÇO-01	556981	7770650	#N/A	SAD69	176	-	113,2	43,1	54,14	10,25	
SIAM	-	-	-	561345	7773340	#N/A	SAD69	150,7	25/11/10	113	41,32	60,8	5,80	
SIAM	-	-	-	561491	7773463	#N/A	SAD69	145,5	20/11/10	113	55,35	62,64	15,50	
SIAM	-	-	-	561677	7774575	#N/A	SAD69	120	19/11/08	10	-	-		
SIAM	-	-	POMC-01	561727	7773787	#N/A	SAD69	150	12/01/09	60	-	-		
SIAM	-	-	POMC-03	561743	7773562	#N/A	SAD69	150	04/01/10	100	-	-		
SIAM	-	-	POMC-02	561749	7773755	#N/A	SAD69	150	12/01/09	60	-	-		
SIAM	-	-	-	561752	7773554	#N/A	SAD69	167	18/11/10	99	49	94	2,20	
SIAM	-	-	-	561763	7776567	-	SAD69	98	21/01/16	1	15	60	0,02	
SIAM	-	-	PT-BA-13	561858	7773601	#N/A	SAD69	142	18/10/14	198	36,8	107,1	2,82	
SIAM	-	-	PT-BA-15	562082	7773652	#N/A	SAD69	200	-	200	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-14	562269	7773837	#N/A	SAD69	113	22/10/14	180	53	59,64	27,11	
SIAM	-	-	PT-BA-16	562341	7773632	#N/A	SAD69	200	-	200	-	-		
SIAM	-	-	P-11	562426	7773737	#N/A	SAD69	146	11/02/08	173	11,51	41,71	5,73	
SIAM	-	-	PT-BA-11	562472	7773742	#N/A	SAD69	128	15/10/14	172	11,51	41,7	5,70	
SIAM	-	-	PT-BA-17	562630	7773781	#N/A	SAD69	200	10/05/19	200	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-18	562927	7773817	#N/A	SAD69	200	10/05/19	200	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-06	562929	7773080	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-07	563023	7773018	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-05	563025	7773205	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-04	563179	7773315	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-03	563206	7773462	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-10	563225	7772924	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-01	563360	7773442	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SIAM	-	-	PT-BA-02	563406	7773378	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-08	563426	7773288	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	PT-BA-09	563507	7773312	#N/A	SAD69	60	25/07/19	5	-	-		
SIAM	-	-	POME-01	565588	7774431	-	SAD69	100	29/06/05	80		10,09	28,8	4,28
SIAM	-	-	#N/A	586788	7779949	#N/A	SAD69	#N/A	#N/A	47		#N/A	#N/A	
SIAM	-	-	-	604653	7788251	-	SAD69	-	14/05/19	2,52		-	-	
SIAM	-	-	-	622200	7787000	-	SAD69	-	01/08/74	216		-	-	
SIAM	-	-	-	635612	7808041	-	SAD69	5	01/01/99	0,42		-	-	
SIAM	-	-	Poço 01 - Pilha 2	636322	7815143	-	SAD69	-	01/05/18	37,95		90,5	95,3	7,91
SISEMA	00262/2017			608454	7789590		SAD69			1				
SISEMA	00303/2016			612060	7788676		SAD69			2,2				
SISEMA	00677/2019			609814	7788536		SAD69			4				
SISEMA	00683/2002			609768	7790504		SAD69			90				
SISEMA	00684/2002			609943	7790657		SAD69			180				
SISEMA	00685/2002			609827	7790657		SAD69			54				
SISEMA	00918/2011			608687	7789558		SAD69			5				
SISEMA	00968/2016			620578	7798553		SAD69			2				
SISEMA	00991/2005			609866	7792256		SAD69			180				
SISEMA	01280/2021			610240	7790670		SAD69			2,2				
SISEMA	01482/2016			609443	7789190		SAD69	170		5,5		48	92	0,13
SISEMA	01877/2017			611468	7790609		SAD69			1,8				
SISEMA	02091/2016			620567	7799069		SAD69			2				
SISEMA	02098/2017			609009	7791760		SAD69			2				
SISEMA	02153/2017			613571	7794231		SAD69			2,8				
SISEMA	03051/2018			611693	7793205		SAD69	110		1,3				
SISEMA	03085/2018			585637	7780032		SAD69	115		6				
SISEMA	03290/2018			630613	7808459		SAD69			4,2				
SISEMA	03431/2017			613744	7794076		SAD69	140		1				

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SISEMA	03707/2016			610980	7791250		SAD69			6				
SISEMA	03830/2016			611367	7790617		SAD69	163		3				
SISEMA	03838/2015			609494	7788538		SAD69	114		2		49	56	0,29
SISEMA	03862/2005			642916	7813418		SAD69	80		3,6		4,65	47,61	0,08
SISEMA	04105/2016			610527	7791053		SAD69	118		8				
SISEMA	04107/2016			610470	7791145		SAD69	111		9,9				
SISEMA	04975/2018			613823	7794943		SAD69	103		2,77				
SISEMA	04976/2018			613778	7794858		SAD69	103		3,13				
SISEMA	05040/2018			578052	7776927		SAD69			1,38				
SIAM	05097/2007	00366/1990	-	562750	7773132	#N/A	SAD69	155	19/11/05	15,5		0,1	100	0,16
SIAM	05098/2007	00366/1990	-	562413	7773167	#N/A	SAD69	102	27/06/05	14,7		6,5	74	0,22
SISEMA	05219/2012			609757	7788782		SAD69	192		3		29	50	0,14
SISEMA	05321/2012			610763	7791119		SAD69	136		5		31	34	1,67
SISEMA	05675/2018			609093	7789401		SAD69	100		5				
SISEMA	06167/2017			611080	7791080		SAD69	130		4,5				
SISEMA	06228/2018			595451	7780403		SAD69	60		14				
SISEMA	06229/2018			595308	7780336		SAD69	60		12				
SISEMA	06253/2018			613442	7793180		SAD69	150		9				
SISEMA	06530/2011			583075	7775894		SAD69	70		2,5				
SISEMA	06620/2011			611558	7788617		SAD69	115		2,5		35	76	0,06
SISEMA	06663/2020			613138	7794753		SAD69	120		3,3		31,8	64,91	0,10
SISEMA	06681/2020			592081	7776755		SAD69	214		166				
SISEMA	06708/2017			611080	7791080		SAD69	65		5,6				
SISEMA	06800/2018			613261	7793241		SAD69			1				
SISEMA	06829/2018			611239	7793150		SAD69			2				
SISEMA	06939/2017			588754	7779064		SAD69	93		1,2				
SISEMA	07210/2018			611841	7788840		SAD69			6,75				
SISEMA	07280/2017			610465	7790377		SAD69			10,5				

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SISEMA	07486/2017			611195	7790895		SAD69	122		8				
SISEMA	07843/2007			614949	7796097		SAD69	102		4,5		27,45	72,31	0,10
SISEMA	08006/2018			636762	7807932		SAD69			45,54				
SISEMA	08007/2018			635686	7808033		SAD69			2,9				
SISEMA	08438/2016			554722	7768344		SAD69			200				
SISEMA	08439/2014			609928	7788166		SAD69	150		6				
SISEMA	08439/2014*			609579	7788199		SAD69			2				
SISEMA	08442/2015			610591	7790203		SAD69	110		1,8		5,2	121	0,02
SISEMA	08447/2015			610106	7790909		SAD69	120		2		48,66	80,28	0,06
SISEMA	08643/2012			610555	7790806		SAD69	95		5		47	50	1,67
SISEMA	09457/2020			610982	7792970		SAD69			0,3				
SISEMA	09645/2015			611012	7789574		SAD69	106		3		43,48	88,75	0,07
SISEMA	09817/2015			611244	7792774		SAD69	80		1,2		24	66	0,03
SISEMA	09876/2017			592054	7776956		SAD69			30				
SISEMA	10088/2008			562422	7773860		SAD69	84		161		34,9	48,57	11,78
SISEMA	10468/2018			611145	7793188		SAD69			2,3				
SIAM	10472/2018	00151/1987	Poço da Pilha - 1 ano	636813	7807949	-	SAD69	-	01/01/21	2,973		-	-	
SIAM	10472/2018*	00151/1987 *	Poço da Oficina - 1 ano	635737	7808049	-	SAD69	-	01/01/21	2,434		-	-	
SISEMA	10483/2008			609838	7792348		SAD69	60		10				
SISEMA	10617/2011			591127	7777422		SAD69			1000				
SISEMA	10851/2012			554739	7768352		SAD69	153,7		200		16	36,7	9,66
SISEMA	10914/2015			615383	7795679		SAD69	93		4,5		36	72	0,13
SISEMA	11113/2015			613909	7792741		SAD69	73		4,5		18,66	-	
SISEMA	11114/2015			613840	7792768		SAD69	120		7		32,38	-	
SISEMA	11195/2016			611651	7789570		SAD69	200		1				
SISEMA	11525/2017			611146	7791826		SAD69	150		2				
SISEMA	11756/2013			608670	7791587		SAD69	102		6				
SISEMA	12003/2017			603604	7785223		SAD69			10				

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SISEMA	12072/2009			612664	7793345		SAD69	200		1,4		86	148	0,02
SISEMA	12176/2010			613744	7794076		SAD69	140		1				
SISEMA	1246/2010			611110	7791326		SAD69	144		3				
SISEMA	1247/2010			611197	7791171		SAD69	123		5				
SISEMA	12473/2009			611651	7789570		SAD69	200		1		70	129,45	0,02
SISEMA	12572/2008			593931	7774886		SAD69	80		4		3	41	0,11
SISEMA	12663/2010			611195	7790895		SAD69	122		8		68	68,65	12,31
SISEMA	13593/2020			611218	7789954		SAD69			2,1				
SISEMA	13753/2017			623821	7799032		SAD69			5				
SISEMA	13935/2014			565592	7775354		SAD69			80				
SISEMA	14320/2017			610731	7791174		SAD69			5				
SISEMA	14877/2014			593845	7775071		SAD69	120		7				
SISEMA	14878/2014			593931	7774886		SAD69	80		4				
SISEMA	14879/2014			593930	7774794		SAD69	120		16				
SISEMA	15007/2010			611047	7790465		SAD69	92		7		11	29	0,39
SISEMA	15095/2021			599999	7782770		SAD69			5,76				
SISEMA	15401/2013			608093	7787563		SAD69	153		4,5				
SISEMA	15429/2010			562712	7773889		SAD69	163		33		42,4	66,41	1,37
SISEMA	15727/2012			608432	7787136		SAD69	80		3,14				
SISEMA	15733/2009			606435	7787358		SAD69	100		3,27		30	45	0,22
SISEMA	15826/2009			607411	7790027		SAD69	65		1		24,8	51,1	0,04
SISEMA	15958/2015			611113	7790542		SAD69	120		4		21	69	0,08
SISEMA	15984/2012			611727	7790977		SAD69	160		2,3		85	106	0,11
SISEMA	16001/2017			610318	7790162		SAD69	164		10,4				
SISEMA	16205/2014			612078	7788836		SAD69	180		3		36,1	132,8	0,03
SISEMA	16476/2012			584698	7775057		SAD69	120		1,5				
SISEMA	16540/2010			594928	7776633		SAD69			400				
SISEMA	16874/2017			588831	7779282		SAD69			30				

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SISEMA	16899/2015			620619	7798645		SAD69	100		2		35	84,3	0,04
SISEMA	16957/2011			611559	7793321		SAD69	150		1		78,2	109,1	0,03
SISEMA	17032/2012			615393	7792743		SAD69	?		37		?	?	
SISEMA	17033/2012			615305	7792713		SAD69	306		20		?	?	
SISEMA	17040/2014			606953	7787663		SAD69			1				
SISEMA	17551/2017			611110	7791326		SAD69	144		3				
SISEMA	18036/2011			611110	7791203		SAD69	128		4		59	64,1	0,78
SISEMA	18429/2017			617344	7795955		SAD69	48		10,39				
SISEMA	18430/2017			617342	7796014		SAD69	67		1,81		35,06	52,15	0,11
SISEMA	19095/2015			610844	7790589		SAD69	130		5				
SISEMA	1952/2007			610674	7791328		SAD69	130		4				
SISEMA	19849/2011			557939	7770432		SAD69	103		8		7	53	0,17
SISEMA	1989/2011			611280	7790556		SAD69	120		1,2		42	81	0,03
SISEMA	19891/2013			611543	7790800		SAD69	150		6				
SISEMA	20393/2012			610349	7790500		SAD69	100		4		7,61	73	0,06
SISEMA	20633/2017			608687	7789558		SAD69	150		5				
SISEMA	20731/2014			610674	7791328		SAD69	130		4				
SISEMA	21035/2013			581646	7774549		SAD69	70		5		0,3	47	0,11
SISEMA	21036/2013			581734	7774671		SAD69	150		2		5	118,5	0,02
SISEMA	21037/2013			582138	7774208		SAD69	150		7,4		5	72	0,11
SISEMA	21039/2013			581008	7774644		SAD69	150		2,9		9,1	76	0,04
SISEMA	21161/2015			611487	7791169		SAD69	180		4				
SISEMA	21298/2019			610294	7790931		SAD69			5,5				
SISEMA	2175/2006			609264	7788878		SAD69	150		12		76,3	112,6	0,33
SISEMA	21823/2015			600549	7779522		SAD69	140		4,5		18	32,2	0,32
SISEMA	21824/2012			606904	7787970		SAD69	150		5		46,38	58,43	0,41
SISEMA	21838/2014			612214	7791165		SAD69	184		3				
SISEMA	2184/2009			608872	7791340		SAD69	80		2,9		1,52	54,06	0,06

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SISEMA	22126/2016			600459	7779913		SAD69	100		5		2	47	0,11
SISEMA	22623/2021			583103	7775556		SAD69			1,5				
SISEMA	22779/2015			610671	7790775		SAD69	133		3,5		57	65	0,44
SISEMA	22924/2012			556278	7768409		SAD69	90		8		14	59	0,18
SISEMA	22963/2013			609524	7788692		SAD69	118		3,8				
SISEMA	22967/2020			612354	7793513		SAD69			9				
SISEMA	2312/2009			611592	7789293		SAD69	150		2		50	75	0,08
SISEMA	2313/2009			609179	7789216		SAD69	150		4,5		47	80	0,14
SISEMA	23265/2014			569400	7776323		SAD69	150		1				
SISEMA	23466/2013			608879	7787674		SAD69	123		4,9		0	56	0,09
SISEMA	23572/2017			606988	7790269		SAD69			3,3				
SISEMA	23636/2016			561346	7773341		SAD69			113				
SISEMA	23638/2016			556691	7770590		SAD69			80				
SISEMA	2387/2010			607136	7787907		SAD69	150		1,65				
SISEMA	23963/2014			622864	7797787		SAD69	102		6,8				
SISEMA	24196/2012			643933	7813102		SAD69	40,6		1,85				
SISEMA	24197/2012			643700	7813507		SAD69	37		0,8				
SISEMA	2452/2009			609993	7789365		SAD69	80		11		47	56,3	1,18
SISEMA	2453/2009			610110	7789364		SAD69	80		12,5		11,4	26	0,86
SISEMA	24610/2016			611801	7790245		SAD69	160		1,6		85	109	0,07
SISEMA	24990/2017			611513	7790616		SAD69			7,2				
SISEMA	24998/2019			607169	7788429		SAD69	100,45		40				
SISEMA	25122/2019			557939	7770432		SAD69	104		7,52		6,3	39	0,23
SISEMA	25659/2016			641395	7811229		SAD69	120		4,3		6,9	44,5	0,11
SISEMA	25764/2017			630300	7807329		SAD69	80		4				
SISEMA	26175/2016			610198	7789471		SAD69	200		7				
SISEMA	26220/2017			607070	7790305		SAD69	100		1		46	58	0,08
SISEMA	26234/2016			610661	7790152		SAD69	120		8		36	56	0,40

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SISEMA	26874/2015			611407	7790104		SAD69	100		1,5		20,1	64,13	0,03
SISEMA	27434/2017			608888	7789126		SAD69			6,8				
SISEMA	27946/2016			554740	7768444		SAD69			150				
SISEMA	28001/2017			607070	7790305		SAD69	120		10		16,9	29,3	0,81
SISEMA	28247/2019			626378	7801184		SAD69			7				
SISEMA	28456/2016			610816	7790685		SAD69			1,9				
SISEMA	28911/2019			605366	7788348		SAD69			2				
SISEMA	29558/2016			607390	7790030		SAD69	105		1				
SISEMA	29602/2014			562276	7773829		SAD69	113		180				
SISEMA	29603/2014			562479	7773736		SAD69	146		150				
SISEMA	29742/2020			611631	7790855		SAD69			2,5				
SISEMA	29806/2015			606930	7790232		SAD69	125		4,5		15	60	0,10
SISEMA	30665/2020			613423	7793801		SAD69			0,8				
SISEMA	31115/2014			609900	7789778		SAD69	190		3,6		146	146	
SISEMA	318/2006			593199	7779256		SAD69	126		34		26,4	108	0,42
SISEMA	3303/2005			611012	7789574		SAD69	150		5		35	87	0,10
SISEMA	3440/2006			583077	7776140		SAD69	70		2,5		4	17	0,19
SISEMA	34783/2021			582292	7777215		SAD69			14				
SISEMA	34786/2015			572392	7773736		SAD69	80		5		1,17	7,2	0,83
SISEMA	35728/2020			610848	7789850		SAD69			25,12				
SISEMA	37284/2016			644166	7813131		SAD69	120		8,9				
SISEMA	38087/2016			612000	7793427		SAD69	151		1				
SISEMA	38332/2021			607876	7790030		SAD69			1				
SISEMA	3906/2005			613397	7794324		SAD69	111		6		8,6	44,9	0,17
SISEMA	3907/2005			613222	7794171		SAD69	152		5		10,05	59,96	0,10
SISEMA	3908/2005			613194	7794356		SAD69	112		6		6,4	54,85	0,12
SISEMA	39565/2016			610902	7790528		SAD69			5				
SISEMA	40013/2020			567530	7771777		SAD69			3				

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SISEMA	4017/2006			564628	7773667		SAD69	100		8,8		6,3	78	0,12
SISEMA	4130/2006			564015	7772993		SAD69	6,6		5				
SISEMA	4131/2006			564015	7773024		SAD69	4		6,5		-	-	
SISEMA	41629/2016			636965	7809751		SAD69	100		1,35				
SISEMA	42284/2016			596056	7780732		SAD69	62		9				
SISEMA	43790/2019			622030	7802506		SAD69	60		1,5		8	39,9	0,05
SISEMA	4433/2009			593930	7774794		SAD69	120		16		5	41	0,44
SISEMA	45129/2020			613643	7794063		SAD69			1				
SISEMA	465/2008			582581	7775805		SAD69	120		17,22		5,65	8,55	5,94
SISEMA	47192/2019			609604	7788232		SAD69			2,5				
SISEMA	4812/2009			610435	7790254		SAD69	120		16		77	82,6	2,86
SISEMA	4813/2009			610348	7790316		SAD69	150		4		87	104	0,24
SISEMA	50333/2020			611088	7789731		SAD69			4				
SISEMA	5089/2008			616982	7795745		SAD69	100		3,5		60	70,3	0,34
SISEMA	5164/2013			560240	7772576		SAD69			400				
SISEMA	5234/2008			613249	7793894		SAD69	170		2,5				
SISEMA	5318/2007			611574	7791138		SAD69	130		3		110	110	
SISEMA	53732/2020			617480	7795837		SAD69			7				
SISEMA	53734/2020			610478	7790770		SAD69			2,5				
SISEMA	5524/2006			609670	7788844		SAD69	150		5,6		88	92	1,40
SISEMA	57332/2020			610066	7789377		SAD69			9				
SISEMA	57333/2020			610049	7789377		SAD69			14,4				
SISEMA	57334/2020			610179	7789222		SAD69			11				
SISEMA	57335/2020			610352	7789012		SAD69			3				
SISEMA	5805/2010			611080	7791080		SAD69	130		4,5				
SISEMA	6372/2010			578602	7775700		SAD69	102		18,91		35	36	18,91
SISEMA	642/2007			610234	7790685		SAD69	150		3,5		58	95	0,09
SISEMA	64535/2019			610831	7789889		SAD69	102		12				

Fonte	Numero Outorga	Processo Técnico	Código Instrumento	UTM-E	UTM-N	Cota	Datum	Profundidade poço (m)	Data	Vazão (m³/h)	NA (m)	NE (m)	ND (m)	Capacidade específica
SISEMA	6501/2008			611658	7790676		SAD69	180		3		84	85	3,00
SISEMA	712/2007			611013	7789789		SAD69	92		1,2		53	70	0,07
SISEMA	7151/2006			611588	7788740		SAD69	197		2		58	104	0,04
SISEMA	73791/2019			611052	7791264		SAD69	160		7				
SISEMA	7418/2008			610321	7790593		SAD69	155		6		63	83	0,30
SISEMA	798/2007			609757	7788721		SAD69	150		2		80,6	91,15	0,19
SISEMA	8093/2009			565209	7773911		SAD69	115		15		17,7	30,04	1,22
SISEMA	8095/2009			564860	7773574		SAD69	83		20		27,03	42,6	1,28
SISEMA	8096/2009			564948	7773820		SAD69	115		15,8		17,7	30,04	1,28
SISEMA	8097/2009			564918	7773697		SAD69	115		22,6		17,7	30,04	1,83
SISEMA	8098/2009			565063	7773696		SAD69	115		22,6		17,7	30,04	1,83
SISEMA	8099/2009			565498	7773572		SAD69	115		21		17,7	30,04	1,70
SISEMA	8637/2008			609029	7788449		SAD69	150		39		56,2	79,4	1,68
SISEMA	9072/2008			571452	7773917		SAD69	82		13		6	72	0,20
SISEMA	9073/2008			571366	7774163		SAD69	71		8,5		3	63	0,14
SISEMA	9074/2008			571336	7773918		SAD69	76		8		0	72	0,11
SISEMA	9314/2009			607166	7787999		SAD69	313		3,5		75,6	130	0,06
VALE			PTP 01/02	594903	7777680		SAD69		24/06/05	19,07				
VALE			PTP 02/04	594961	7777635		SAD69		26/06/05	13,00				
VALE			PTP 05/10	595606	7777889		SAD69		02/07/05	34,95				
VALE			PTP 06/10	595146	7777706		SAD69		02/07/05	12,07				
VALE			PTP 08/13	595444	7777822		SAD69		05/07/05	36,66				
VALE			PTP 09/14	595792	7778023		SAD69		06/07/05	80,38				
VALE			PTP 11/19	595853	7778071		SAD69		11/07/05	94,42				

Tabela 13 - Dados gerais de todos os instrumentos de nível d'água levantados.

<b>Mineração</b>	<b>Código</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Tipo</b>	<b>Data Início</b>	<b>Prof. NA (m)</b>
ArcelorMittal	PZ BA-01	563336	7773419	1009	60	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-02	563387	7773364	995	50,1	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-03	563293	7773456	1014	70,2	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-04	563211	7773463	1021	80,1	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-05	563183	7773419	1013	70,1	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-06	562966	7772931	1012	70,27	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-07	563024	7773201	1014	70,2	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-08	562978	7773159	1015	100,34	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-09	562908	7773159	1009	70,35	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-10	562935	7773062	1007	80,15	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-11	562821	7773091	996	60,23	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-12	562659	7772182	983	42	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-13	563018	7772983	1006	60,13	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-14	563079	7772970	997	50,1	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-19	563551	7773088	955	50,25	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-21	563635	7772884	963	50,2	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-23	563619	7772985	955	50	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-24	563635	7772884	949	50,45	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-25A	562933	7773307	1023	111,9	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-25B	562933	7773307	1023	59,04	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-26	563410	7773277	985	60,15	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-27	563503	7773852	1056	62,5	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-28	563472	7773258	974	60,2	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-30	563538	7773290	974	60,3	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-31	563601	7773331	984	60	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-32	562400	7773148	992	67,45	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-34	563028	7773442	1061	41,8	Piezômetro		
ArcelorMittal	PZ BA-35	563151	7773509	1054	62	Piezômetro		

<b>Mineração</b>	<b>Código</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Tipo</b>	<b>Data Início</b>	<b>Prof. NA (m)</b>
ArcelorMittal	FDAM003	562674	7773908	-	-	MNA		
ArcelorMittal	FDAM001	561926	7773648	-	-	MNA		
ArcelorMittal	PT1	562697	7773224	999	67,3	PT		
ArcelorMittal	PT2	562586	7773166	983	51	PT		
ArcelorMittal	PT10	562399	7773860	1079	84	PT		
ArcelorMittal	PT11	562477	7773745	1055	145,2	PT		
ArcelorMittal	PT12	562677	7773827	1065	163,27	PT		
ArcelorMittal	PT13	561829	7773558	1068	141,2	PT		
ArcelorMittal	PT14	562261	7773867	1079	111	PT		
ArcelorMittal	FDAM001/12	562699	7773920	102	77,11	Piezômetro	2012	
ArcelorMittal	FDAM001/13	562699	7773920	102	77,05	Piezômetro	2012	
ArcelorMittal	FDAM001/14	562699	7773920	102	76,93	Piezômetro	2012	
ArcelorMittal	FDAM003/12	561999	7773920	174	66,51	Piezômetro	2012	
ArcelorMittal	P-11	562426	7773737		146			
	707/2009	595348	7789911			Piezômetro	2013	
Mineração do Brasil/ Bocaina	#N/A	586597	7777667	#N/A	189	#N/A	2019	
Mineração do Brasil/ Bocaina	#N/A	586788	7779949	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
Três Irmaos Empreendimentos	#N/A	588842	7779316	#N/A	100	#N/A	2005	
Vale S.A.	#N/A	584122	7782260	#N/A	200	#N/A	2019	
Artut Campos Filho	#N/A	585567	7780747	#N/A	100	#N/A	#N/A	
VALE	INA 01/01	595473	7777798	1249		INA		
VALE	INA 02/01	595049	7777628	1130		INA		
VALE	INA 03/01	593903	7777272	1168		INA	2005	1099,761
VALE	INA 04/02	595939	7777863	1154		INA	2005	1136,477776
VALE	INA 05/02	594381	7777344	1155		INA	2005	1103,087605
VALE	INA 06/02	592908	7778125	1120		INA	2005	1074,976045
VALE	INA 08/06	592179	7777879	1142		INA	2006	1078,020444
VALE	INA 09/06	595341	7777646	1170		INA	2006	1117,382708
VALE	INA 10/06	592816	7776705	1150		INA	2006	1110,390885

<b>Mineração</b>	<b>Código</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Tipo</b>	<b>Data Início</b>	<b>Prof. NA (m)</b>
VALE	INA 11/07	595547	7777684	1199		INA		
VALE	INA 12/13	595114	7777464	1131		INA	2014	1111,782646
VALE	INA 13/13	595694	7777617	1186		INA	2014	1095,492879
VALE	INA 14/14	594658	7777590	1234		INA	2014	1091,77042
VALE	INA 15/14	595755	7777780	1179		INA	2014	1110,689245
VALE	INA 16/14	595297	7778183	1273		INA	2014	1189,860882
VALE	INA 17/14	595124	7778075	1284		INA	2014	1181,810243
VALE	INA 18/14	595631	7778313	1273		INA	2014	1129,159522
VALE	INA 19/14	592704	7776818	1221		INA	2014	1091,940573
VALE	INA 20/14	594783	7777574	1187		INA	2014	1093,086341
VALE	INA 21/14	593830	7777269	1215		INA		
VALE	INA 22/15	596062	7777744	1129		INA	2015	1083,492459
VALE	INA 23/15	595955	7777984	1169		INA	2015	1083,828718
VALE	INA 24/16	594893	7777556	1099		INA	2016	1090,528983
VALE	INA 25/16	595793	7778039	1163		INA	2016	1059,100241
VALE	INA 26/16	595023	7777866	1187		INA	2016	1153,614324
VALE	INA 27/16	595880	7778103	1195		INA	2016	1059,869259
VALE	INA 28/16	595454	7777813	1098		INA		
VALE	INA 29/17	595580	7777840	1102		INA		
VALE	INA 35/99	605632	7785700	1173		Piezometro		
VALE	INA 40/10	603585	7783722	1370		Piezometro		
VALE	MACCVMPZ351	615261	7793061			Piezometro	2005	996,98
VALE	MACCVMPZ352	615261	7793061			Piezometro	2005	996,3
VALE	MACCVMPZ353	615261	7793061			Piezometro	2005	1003,91
VALE	MACCVMPZ354	615261	7793061			Piezometro	2005	996,8041667
VALE	MACG1PZ001	615422,64	7792532,13			Piezometro	2015	1107,343
VALE	MACG1PZ004	615631,69	7792669,114			Piezometro	2015	1132,896667
VALE	MACG1PZ005	615643,62	7792447,12			Piezometro	2014	1054,736
VALE	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1			Piezometro	2006	979,2514286

Mineração	Código	UTM-E	UTM-N	Cota	Profundidade (m)	Tipo	Data Início	Prof. NA (m)
VALE	MACG2PZ009	616314,69	7792392,11			Piezometro	2009	1071,123333
VALE	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08			Piezometro	2007	1038,656667
VALE	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08			Piezometro	2007	1038,66
VALE	MACG2PZ019	616296,62	7792381,05			Piezometro	2014	1050,327
VALE	MACG2PZ022	616431,7	7792488,07			Piezometro	2014	1036,655
VALE	MACG3PZ001	616734,64	7792863,147			Piezometro	2014	1036,747
VALE	MACG3PZ002	616744,62	7792932,146			Piezometro	2015	1052,338
VALE	MACG3PZ003	616832,64	7792743,07			Piezometro	2014	1005,975
VALE	MACG3PZ005	616975,69	7793055,124			Piezometro	2013	1031,473
VALE	MACG3PZ006	617031,68	7792946,06			Piezometro	2014	1117,07
VALE	MACG4PZ001	617093,67	7793564,13			Piezometro		
VALE	MACLONA057	613579,62	7792140,06			Piezometro	2009	1247,19423
VALE	MACLONA059	613421,67	7792119,05			Piezometro	2006	1296,11
VALE	MACLONA060	613439,64	7792146,057			Piezometro	2006	1281,755
VALE	MACLOPZ063	613587,69	7792158,05			Piezometro	2006	1125,954
VALE	NA CAVA MAC	615261	7793061			Piezometro	2014	1051,96
VALE	Poço 07	615309,68	7792686,06			Piezometro		
VALE	Poço 17	615436,82	7792795,575			Piezometro		
VALE	Poço 18	615349,35	7792765,38			Piezometro		
VALE	PTP 03/06	595434	7777760	1162		Piezometro		
VALE	PZ 07/04	596654	7778002	1096		Piezometro		
USIMINAS	PZMC-01-12_01Camara	559022,75	7771772,13	1026,14		Piezometro	2013	995,96
USIMINAS	PZMC-01-14_01Camara	561528,75	7773491,73	1085,83		Piezometro	2014	1024,75
USIMINAS	PZMC-02-14_01Camara	561178,85	7773263,03	1120,19		Piezometro	2014	1024,26
USIMINAS	PZMC-03-12_01Camara	560376,85	7772648,83	1058,35		Piezometro	2013	1011,01
USIMINAS	PZMC-03-14_01Camara	561831,05	7773698,43	1086,39		Piezometro	2014	1005,63
USIMINAS	PZMC-04-12_01Camara	559898,95	7772277,13	1047,99		Piezometro	2013	1005,62
USIMINAS	PZMC-05-09_01Camara	560422,75	7772819,03	1139,252		Piezometro	2013	1029,36
USIMINAS	PZMC-108-09_01Camara	560559,76	7772976,23	1169,757		Piezometro	2013	1028,98

<b>Mineração</b>	<b>Código</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Tipo</b>	<b>Data Início</b>	<b>Prof. NA (m)</b>
USIMINAS	PZMC-131-09_01Camara	559084,45	7771880,43	1015,778		Piezometro	2014	1010,2
USIMINAS	PZMC-143-09_01Camara	560625,45	7772857,43	1106,563		Piezometro	2013	1029,26
USIMINAS	PZMC-165-09_01Camara	559024,75	7772012,934	1056,01		Piezometro	2021	1018,38
USIMINAS	PZMC-169-09_01Camara	559106,05	7772074,73	1054,581		Piezometro	2013	1030,73
USIMINAS	PZMC-173-09_01Camara	560110,45	7772550,83	1085,336		Piezometro	2013	1030,42
USIMINAS	PZMC-177-09_01Camara	559427,56	7771970,23	1048,986		Piezometro	2013	1030,04
USIMINAS	PZMC-178-09_01Camara	559474,26	7772041,23	1049,048		Piezometro	2013	1030,83
USIMINAS	PZMC-180-09_01Camara	559902,46	7772541,93	1123,226		Piezometro	2013	1030,59
USIMINAS	PZMC-45-09_01Camara	561198,45	7773790,83	1221,583		Piezometro	2013	1065,2
USIMINAS	PZMC-76-09_01Camara	560773,45	7772818,133	1154,008		Piezometro	2013	1029,36
USIMINAS	PZMC-77-09_01Camara	560486,55	7772730,33	1077,37		Piezometro	2013	1030,52
USIMINAS	PZMC-84-09_01Camara	560779,85	7772989,13	1176,761		Piezometro	2013	1029,89
USIMINAS	PZMC-87-09_01Camara	560543,55	7772799,33	1090,208		Piezometro	2013	1037,3
USIMINAS	PZMC-PO04A_01Camara	561948,25	7774660,63	1046,181		Piezometro	2013	1018,21
USIMINAS	PZME-50-09_01Camara	567842,64	7774543,53	1167,982		Piezometro	2013	1062,69
USIMINAS	PZME-54-09_01Camara	566742,94	7774499,53	1165,036		Piezometro	2013	1033,29
USIMINAS	PZME-63-09_01Camara	568453,04	7774597,93	1087,047		Piezometro	2015	1086,83
USIMINAS	PZME-65-09_01Camara	568596,04	7774613,03	1058,682		Piezometro	2015	1023,37
USIMINAS	PZME-66-09_01Camara	565739,84	7774396,13	1084,267		Piezometro	2013	1032,8
USIMINAS	PZMW-01-19_01Camara	556652,27	7770302,7	1073,407		Piezometro	2019	1018,8
USIMINAS	PZMW-02-12_01Camara	557257,26	7770365,53	1042,15		Piezometro	2013	1005,33
USIMINAS	PZMW-02-19_01Camara	557200,6	7770647,687	1063,067		Piezometro	2019	1017,82
USIMINAS	PZMW-03-19_01Camara	557731,67	7771126	1085,277		Piezometro	2019	1018,98
USIMINAS	PZMW-09-09_01Camara	556248,36	7770389,43	1148,118		Piezometro	2013	1039,07
USIMINAS	PZMW-140-08_01Camara	556622,46	7770569,13	1112,728		Piezometro	2013	1027,94
USIMINAS	PZMW-17-09_01Camara	557871,66	7771512,83	1063,915		Piezometro	2013	1029,5
USIMINAS	PZMW-30-09_01Camara	555165,36	7769326,63	1140,431		Piezometro	2013	1031,64
USIMINAS	PZMW-35-11_01Camara	554761,76	7768415,14	988,823		Piezometro	2013	973,81
USIMINAS	PZMW-47-09_01Camara	555157,36	7769164,73	1104,202		Piezometro	2013	993,8

<b>Mineração</b>	<b>Código</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Tipo</b>	<b>Data Início</b>	<b>Prof. NA (m)</b>
USIMINAS	PZMW-49-09_01Camara	555099,56	7769250,33	1117,888		Piezometro	2013	1038,99
USIMINAS	PZMW-52-09_01Camara	554786,76	7768256,64	985,79		Piezometro	2013	959,97

Tabela 14 - Poços outorgados utilizados para calibração em regime transitório.

Empresa	Mina	Numero Outorga	UTM-E	UTM-N	Cota	Profundidade	Ano	Vazão (m³/h)	NA (m)
USIMINAS S/A	Mina Leste	-	565588	7774431	1168	100	2005	80	1158
ARCELORMITTAL	Mina Serra Azul	05098/2007	562413	7773167	989	102	2005	15	983
ARCELORMITTAL	Mina Serra Azul	05097/2007	562750	7773132	998	155	2005	16	998
Condominio Village Terrasesse	Residencial	3303/2005	611012	7789574	1117	150	2005	5	1082
Minas Tênis clube	Industria	3908/2005	613194	7794356	973	112	2005	6	967
Minas Tênis clube	Industria	3907/2005	613222	7794171	989	152	2005	5	979
Minas Tênis clube	Industria	3906/2005	613397	7794324	985	111	2005	6	976
Prefeitura	Residencial	03862/2005	642916	7813418	1035	80	2005	4	1030
Condominio do Edificio Villa Venice	Residencial	2175/2006	609264	7788878	1226	150	2006	12	1150
Empresa PROSIDER	Industria	3440/2006	583077	7776140	738	70	2006	3	734
Itaminas Comercio de Minérios	MinaCorFeijao	318/2006	593199	7779256	991	126	2006	34	965
Pessoa Física Minerita Minérios	Residencial	5524/2006	609670	7788844	1177	150	2006	6	1089
Pessoa Física	Mineração	4017/2006	564628	7773667	1008	100	2006	9	1002
Pessoa Física	Residencial	7151/2006	611588	7788740	1029	197	2006	2	971
Pessoa Física	Residencial	5318/2007	611574	7791138	1196	130	2007	3	1086
Patrimar Engenharia S/A	Residencial	642/2007	610234	7790685	1125	150	2007	4	1067
Pessoa Física	Residencial	798/2007	609757	7788721	1148	150	2007	2	1067
APMG	Residencial	712/2007	611013	7789789	1069	92	2007	1	1016
Prefeitura	Residencial	07843/2007	614949	7796097	908	102	2007	5	881
Arcelormittal	MinaCentral	10088/2008	562422	7773860	1091	84	2008	161	1056
ARCELORMITTAL	Mina Serra Azul	-	562426	7773737	1069	146	2008	173	1057
Condominio do Edificio Villa Venice	Residencial	8637/2008	609029	7788449	1217	150	2008	39	1161
Mineração Esperança	Mina Esperança	465/2008	582581	7775805	743	120	2008	17	737
MIB Mineração Ibitirama	MinaCorFeijao	12572/2008	593931	7774886	883	80	2008	4	850
Construtora Castor LTDA SCP	Residencial	7418/2008	610321	7790593	1138	155	2008	6	1075
Pessoa Física	Residencial	5089/2008	616982	7795745	1057	100	2008	4	997
MMX Sudeste Mineração	Mineração	9073/2008	571366	7774163	941	71	2008	9	938
MMX Sudeste Mineração	Mineração	9072/2008	571452	7773917	938	82	2008	13	932
Condominio alto da serra	Residencial	6501/2008	611658	7790676	1146	180	2008	3	1062

Empresa	Mina	Numero Outorga	UTM-E	UTM-N	Cota	Profundidade	Ano	Vazão (m³/h)	NA (m)
Condominio Residencial Vila Castela	Residencial	2453/2009	610110	7789364	1121	80	2009	13	1110
Condominio Residencial Vila Castela	Residencial	2452/2009	609993	7789365	1141	80	2009	11	1094
Biocor Hospital de doenças cardiovasculares Ltda	Industria	4813/2009	610348	7790316	1171	150	2009	4	1084
Biocor Hospital de doenças cardiovasculares Ltda	Industria	4812/2009	610435	7790254	1162	120	2009	16	1085
MIB Mineração Ibiritió	MinaCorFeijao	4433/2009	593930	7774794	879	120	2009	16	874
Pessoa Física Central Beton LTDA	Residencial	12072/2009	612664	7793345	1028	200	2009	1	942
Supermix Concreto S.A. MGPX Empreendimento se Participações Ltda	Industria	15733/2009	606435	7787358	1167	100	2009	3	1137
Residencial	Residencial	2313/2009	609179	7789216	1205	150	2009	5	1158
Minerita Minérios	Mineração	8095/2009	564860	7773574	980	83	2009	20	953
Minerita Minérios	Mineração	8097/2009	564918	7773697	989	115	2009	23	971
Minerita Minérios	Mineração	8096/2009	564948	7773820	1016	115	2009	16	998
Minerita Minérios	Mineração	8098/2009	565063	7773696	1013	115	2009	23	995
Minerita Minérios	Mineração	8093/2009	565209	7773911	1060	115	2009	15	1042
Minerita Minérios	Mineração	8099/2009	565498	7773572	999	115	2009	21	981
EPO Planejamento e obras Ltda	Residencial	2312/2009	611592	7789293	1097	150	2009	2	1047
Pessoa Física	Residencial	12473/2009	611651	7789570	1082	200	2009	1	1012
Mediphacos Indústria e Comércio S.A.	Industria	15826/2009	607411	7790027	1020	65	2009	1	995
Chalé da mata Restaurante Ltda	Residencial	2184/2009	608872	7791340	976	80	2009	3	974
MASB 1 SPE Empreendimento imobiliário LTDA	Residencial	15007/2010	611047	7790465	1081	92	2010	7	1070
USIMINAS S/A	MinaCentral	-	561345	7773340	1090	150,7	2010	113	1049
USIMINAS S/A	MinaCentral	-	561491	7773463	1105	145,5	2010	113	1050
USIMINAS S/A	MinaCentral	-	561752	7773554	1075	167	2010	99	1026
Arcelormittal	MinaCentral	15429/2010	562712	7773889	1122	163	2010	33	1080
Le grand atlas Condominio resort	Residencial	12663/2010	611195	7790895	1153	122	2010	8	1085

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>Numero Outorga</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Profundidade</b>	<b>Ano</b>	<b>Vazão (m³/h)</b>	<b>NA (m)</b>
ERG Mineração	Mineração	6372/2010	578602	7775700	954	102	2010	19	919
Condominio	Residencial	18036/2011	611110	7791203	1126	128	2011	4	1067
Orica Brasil	Industria	19849/2011	557939	7770432	983	103	2011	8	976
Condominio	Residencial	1989/2011	611280	7790556	1113	120	2011	1	1071
Pessoa Física	Residencial	06620/2011	611558	7788617	1010	115	2011	3	975
Condominio do Edificio palo alto Penta empreendimentos e participações Ltda	Residencial	16957/2011	611559	7793321	987	150	2011	1	909
Condominio Edificio Lolita Guimariães	Residencial	21824/2012	606904	7787970	1179	150	2012	5	1133
Condominio do edificio saint-emilion	Residencial	20393/2012	610349	7790500	1156	100	2012	4	1148
Condominio Edificio place de letoile	Residencial	08643/2012	610555	7790806	1135	95	2012	5	1088
Condominio do Edificio villavicencio	Residencial	05321/2012	610763	7791119	1122	136	2012	5	1091
USIMINAS S/A	MinaOeste	15984/2012	611727	7790977	1158	160	2012	2	1073
Prefeitura	Residencial	10851/2012	554739	7768352	986	153,7	2012	200	970
Pessoa Física	Residencial	22924/2012	556278	7768409	994	90	2012	8	980
Instituto Inhotim	Residencial	05219/2012	609757	7788782	1146	192	2012	3	1117
Instituto Inhotim	Industria	21035/2013	581646	7774549	748	70	2013	5	748
Instituto Inhotim	Industria	21036/2013	581734	7774671	753	150	2013	2	748
Instituto Inhotim	Industria	21037/2013	582138	7774208	734	150	2013	7	729
Instituto Inhotim	Industria	21039/2013	581008	7774644	804	150	2013	3	795
ARCELORMITT AL	Mina Serra Azul	-	561858	7773601	1081	142	2014	198	1044
ARCELORMITT AL	Mina Serra Azul	-	562269	7773837	1079	113	2014	180	1026
ARCELORMITT AL	Mina Serra Azul	-	562472	7773742	1069	128	2014	172	1057
Centro educacional de formação superior CEFOS	Residencial	31115/2014	609900	7789778	1226	190	2014	4	1080
Condominio Vila Grimm	Residencial	16205/2014	612078	7788836	974	180	2014	3	938
Four seasons Condominio resort	Residencial	15958/2015	611113	7790542	1091	120	2015	4	1070
Condominio Edificio Mon Ile	Residencial	08442/2015	610591	7790203	1126	110	2015	2	1121
Pessoa Física	Residencial	21823/2015	600549	7779522	1022	140	2015	5	1004
Condominio do Edificio Itivan Farkasvolgy	Residencial	09817/2015	611244	7792774	1003	80	2015	1	979
Condominio Edificio century tower	Residencial	08447/2015	610106	7790909	1105	120	2015	2	1056

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>Numero Outorga</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Profundidade</b>	<b>Ano</b>	<b>Vazão (m³/h)</b>	<b>NA (m)</b>
Condominio Edificio terrazo esmeraldas	Residencial	22779/2015	610671	7790775	1151	133	2015	4	1094
oncomed ltda	Industria	11114/2015	613840	7792768	1167	120	2015	7	1135
oncomed ltda	Industria	11113/2015	613909	7792741	1181	73	2015	5	1162
Pessoa Física	Residencial	03838/2015	609494	7788538	1141	114	2015	2	1092
Pessoa Física	Residencial	34786/2015	572392	7773736	1027	80	2015	5	1026
Condominio Village Terrasesse	Residencial	09645/2015	611012	7789574	1117	106	2015	3	1074
Associação pedagogica Itacolomi	Residencial	26874/2015	611407	7790104	1038	100	2015	2	1018
Condominio residencial parque Dell Arte Benjamin Guimaraes	Residencial	29806/2015	606930	7790232	956	125	2015	5	941
Pessoa Física	Residencial	10914/2015	615383	7795679	958	93	2015	5	922
Pessoa Física	Residencial	16899/2015	620619	7798645	879	100	2015	2	844
Condominio residencial bacchereto	Residencial	26234/2016	610661	7790152	1096	120	2016	8	1060
Pessoa Física	Residencial	01482/2016	609443	7789190	1235	170	2016	6	1187
Condominio Quintas de Casa Branca	Residencial	22126/2016	600459	7779913	1015	100	2016	5	1013
SPE LTDA	Residencial	24610/2016	611801	7790245	1109	160	2016	2	1024
ARCELORMITTAL	Industria	-	561763	7776567	857	98	2016	1	842
Pessoa Física	Residencial	25659/2016	641395	7811229	1045	120	2016	4	1038
Minas Tênis clube	Industria	18430/2017	617342	7796014	1007	67	2017	2	972
Pessoa Física	Residencial	26220/2017	607070	7790305	943	100	2017	1	897
Condominio Vesper Grand	Residencial	28001/2017	607070	7790305	943	120	2017	10	926
Orica Brasil	Industria	25122/2019	557939	7770432	983	104	2019	8	977
Fábrica	Industria	43790/2019	622030	7802506	747	60	2019	2	739
Condominio Edificio Arthur Bosman	Residencial	06663/2020	613138	7794753	960	120	2020	3	928

Tabela 15 - Instrumentos de nível d'água utilizados para calibração em regime transitório.

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
VALE	Jangada	INA 03/01	593903	7777272	1168	2005	1100
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2005	1136
VALE	Jangada	INA 05/02	594381	7777344	1155	2005	1103
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2005	1075
VALE	MAC	MACCVMPZ351	615261	7793061		2005	997
VALE	MAC	MACCVMPZ352	615261	7793061		2005	996
VALE	MAC	MACCVMPZ353	615261	7793061		2005	1004
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2005	997
VALE	Jangada	INA 03/01	593903	7777272	1168	2006	1098
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2006	1135
VALE	Jangada	INA 05/02	594381	7777344	1155	2006	1103
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2006	1074
VALE	Jangada	INA 08/06	592179	7777879	1142	2006	1078
VALE	Jangada	INA 09/06	595341	7777646	1170	2006	1117
VALE	Jangada	INA 10/06	592816	7776705	1150	2006	1110
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2006	979
VALE	MAC	MACCVMPZ351	615261	7793061		2006	1008
VALE	MAC	MACCVMPZ352	615261	7793061		2006	1007
VALE	MAC	MACCVMPZ353	615261	7793061		2006	1007
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2006	1006
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2006	1126
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2006	1296
VALE	MAC	MACLONA060	613439,643	7792146,06		2006	1282
VALE	Jangada	INA 03/01	593903	7777272	1168	2007	1096
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2007	1134
VALE	Jangada	INA 05/02	594381	7777344	1155	2007	1101
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2007	1072
VALE	Jangada	INA 08/06	592179	7777879	1142	2007	1077
VALE	Jangada	INA 09/06	595341	7777646	1170	2007	1118
VALE	Jangada	INA 10/06	592816	7776705	1150	2007	1109
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2007	981
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2007	1039
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2007	1039
VALE	MAC	MACCVMPZ351	615261	7793061		2007	1013
VALE	MAC	MACCVMPZ352	615261	7793061		2007	1013
VALE	MAC	MACCVMPZ353	615261	7793061		2007	1011
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2007	1011
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2007	1123
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2007	1298
VALE	MAC	MACLONA060	613439,643	7792146,06		2007	1282
VALE	Jangada	INA 03/01	593903	7777272	1168	2008	1093
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2008	1132
VALE	Jangada	INA 05/02	594381	7777344	1155	2008	1099

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2008	1071
VALE	Jangada	INA 08/06	592179	7777879	1142	2008	1077
VALE	Jangada	INA 10/06	592816	7776705	1150	2008	1107
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2008	982
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2008	1037
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2008	1039
VALE	MAC	MACCVMPZ351	615261	7793061		2008	1019
VALE	MAC	MACCVMPZ352	615261	7793061		2008	1019
VALE	MAC	MACCVMPZ353	615261	7793061		2008	1018
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2008	1017
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2008	1116
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2008	1299
VALE	MAC	MACLONA060	613439,643	7792146,06		2008	1282
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2009	1132
VALE	Jangada	INA 05/02	594381	7777344	1155	2009	1099
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2009	1073
VALE	Jangada	INA 08/06	592179	7777879	1142	2009	1079
VALE	Jangada	INA 10/06	592816	7776705	1150	2009	1107
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2009	984
VALE	MAC	MACG2PZ009	616314,69	7792392,11		2009	1071
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2009	1041
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2009	1041
VALE	MAC	MACCVMPZ351	615261	7793061		2009	1026
VALE	MAC	MACCVMPZ352	615261	7793061		2009	1026
VALE	MAC	MACCVMPZ353	615261	7793061		2009	1025
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2009	1027
VALE	MAC	MACLONA057	613579,62	7792140,06		2009	1247
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2009	1301
VALE	MAC	MACLONA060	613439,643	7792146,06		2009	1281
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2010	1133
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2010	1074
VALE	Jangada	INA 10/06	592816	7776705	1150	2010	1109
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2010	986
VALE	MAC	MACG2PZ009	616314,69	7792392,11		2010	1052
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2010	1041
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2010	1037
VALE	MAC	MACCVMPZ351	615261	7793061		2010	1033
VALE	MAC	MACCVMPZ352	615261	7793061		2010	1032
VALE	MAC	MACCVMPZ353	615261	7793061		2010	1032
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2010	1035
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2010	1120
VALE	MAC	MACLONA057	613579,62	7792140,06		2010	1247
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2010	1299
VALE	MAC	MACLONA060	613439,643	7792146,06		2010	1281

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2011	1133
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2011	1073
VALE	Jangada	INA 10/06	592816	7776705	1150	2011	1108
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2011	986
VALE	MAC	MACG2PZ009	616314,69	7792392,11		2011	1051
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2011	1040
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2011	1045
VALE	MAC	MACCVMPZ351	615261	7793061		2011	1038
VALE	MAC	MACCVMPZ352	615261	7793061		2011	1037
VALE	MAC	MACCVMPZ353	615261	7793061		2011	1037
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2011	1039
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2011	1117
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2011	1299
VALE	MAC	MACLONA060	613439,643	7792146,06		2011	1281
VALE	Jangada	INA 03/01	593903	7777272	1168	2006	1098
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2006	1135
VALE	Jangada	INA 05/02	594381	7777344	1155	2006	1103
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2006	1074
VALE	Jangada	INA 08/06	592179	7777879	1142	2006	1078
VALE	Jangada	INA 09/06	595341	7777646	1170	2006	1117
VALE	Jangada	INA 10/06	592816	7776705	1150	2006	1110
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2006	979
VALE	MAC	MACCVMPZ351	615261	7793061		2006	1008
VALE	MAC	MACCVMPZ352	615261	7793061		2006	1007
VALE	MAC	MACCVMPZ353	615261	7793061		2006	1007
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2006	1006
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2006	1126
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2006	1296
VALE	MAC	MACLONA060	613439,643	7792146,06		2006	1282
VALE	Jangada	INA 04/02	595939	7777863	1154	2012	1131
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2012	1079
VALE	Jangada	INA 10/06	592816	7776705	1150	2012	1110
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2012	987
VALE	MAC	MACG2PZ009	616314,69	7792392,11		2012	1059
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2012	1045
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2012	1048
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2012	1122
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2012	1297
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2013	1076
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2013	986
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2013	1043
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2013	1047
VALE	MAC	MACG2PZ019	616296,62	7792381,05		2013	1026
VALE	MAC	MACG3PZ005	616975,685	7793055,12		2013	1031

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2013	1299
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2013	1116
USIMINAS	MC	PZMC-01-12_01Camara	558978,1	7771727,6	1026	2013	996
USIMINAS	MC	PZMC-03-12_01Camara	560332,1	7772603,7	1058	2013	1011
USIMINAS	MC	PZMC-04-12_01Camara	559854,2	7772232	1048	2013	1006
USIMINAS	MC	PZMC-05-09_01Camara	560378	7772773,9	1139	2013	1029
USIMINAS	MC	PZMC-108-09_01Camara	560515	7772931,1	1170	2013	1029
USIMINAS	MC	PZMC-143-09_01Camara	560580,7	7772812,3	1107	2013	1029
USIMINAS	MC	PZMC-169-09_01Camara	559061,3	7772029,6	1055	2013	1031
USIMINAS	MC	PZMC-173-09_01Camara	560065,7	7772505,7	1085	2013	1030
USIMINAS	MC	PZMC-177-09_01Camara	559382,8	7771925,1	1049	2013	1030
USIMINAS	MC	PZMC-178-09_01Camara	559429,5	7771996,1	1049	2013	1031
USIMINAS	MC	PZMC-180-09_01Camara	559857,7	7772496,8	1123	2013	1031
USIMINAS	MC	PZMC-45-09_01Camara	561153,7	7773745,7	1222	2013	1065
USIMINAS	MC	PZMC-76-09_01Camara	560728,7	7772773	1154	2013	1029
USIMINAS	MC	PZMC-77-09_01Camara	560441,8	7772685,2	1077	2013	1031
USIMINAS	MC	PZMC-84-09_01Camara	560735,1	7772944	1177	2013	1030
USIMINAS	MC	PZMC-87-09_01Camara	560498,8	7772754,2	1090	2013	1037
USIMINAS	MC	PZMC-PO04A_01Camara	561903,5	7774615,5	1046	2013	1018
USIMINAS	ME	PZME-50-09_01Camara	567797,9	7774498,4	1168	2013	1063
USIMINAS	ME	PZME-54-09_01Camara	566698,2	7774454,4	1165	2013	1033
USIMINAS	ME	PZME-66-09_01Camara	565695,1	7774351	1084	2013	1033
USIMINAS	MW	PZMW-02-12_01Camara	557212,5	7770320,4	1042	2013	1005
USIMINAS	MW	PZMW-09-09_01Camara	556203,6	7770344,3	1148	2013	1039
USIMINAS	MW	PZMW-140-08_01Camara	556577,7	7770524	1113	2013	1028
USIMINAS	MW	PZMW-17-09_01Camara	557826,9	7771467,7	1064	2013	1030
USIMINAS	MW	PZMW-30-09_01Camara	555120,6	7769281,5	1140	2013	1032
USIMINAS	MW	PZMW-35-11_01Camara	554717	7768370	989	2013	974
USIMINAS	MW	PZMW-47-09_01Camara	555112,6	7769119,6	1104	2013	994
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2013	1039
USIMINAS	MW	PZMW-52-09_01Camara	554742	7768211,5	986	2013	960
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2014	1071
VALE	Jangada	INA 12/13	595114	7777464	1131	2014	1112
VALE	Jangada	INA 13/13	595694	7777617	1186	2014	1095
VALE	Jangada	INA 14/14	594658	7777590	1234	2014	1092
VALE	Jangada	INA 15/14	595755	7777780	1179	2014	1111
VALE	Jangada	INA 16/14	595297	7778183	1273	2014	1190
VALE	Jangada	INA 17/14	595124	7778075	1284	2014	1182
VALE	Jangada	INA 18/14	595631	7778313	1273	2014	1129
VALE	Jangada	INA 19/14	592704	7776818	1221	2014	1092
VALE	Jangada	INA 20/14	594783	7777574	1187	2014	1093
VALE	MAC	MACG1PZ005	615643,62	7792447,12		2014	1055
VALE	MAC	MACG2PZ005	616350,7	7792267,1		2014	985
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2014	1041

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2014	1043
VALE	MAC	MACG2PZ019	616296,62	7792381,05		2014	1050
VALE	MAC	MACG2PZ022	616431,7	7792488,07		2014	1037
VALE	MAC	MACG3PZ001	616734,64	7792863,15		2014	1037
VALE	MAC	MACG3PZ003	616832,64	7792743,07		2014	1006
VALE	MAC	MACG3PZ005	616975,685	7793055,12		2014	1036
VALE	MAC	MACG3PZ006	617031,68	7792946,06		2014	1019
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2014	1297
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2014	1117
VALE	CAVA	NA CAVA MAC	615261	7793061		2014	1052
USIMINAS	MC	PZMC-01-12_01Camara	558978,1	7771727,6	1026	2014	993
USIMINAS	MC	PZMC-01-14_01Camara	561484	7773446,6	1086	2014	1025
USIMINAS	MC	PZMC-02-14_01Camara	561134,1	7773217,9	1120	2014	1024
USIMINAS	MC	PZMC-03-12_01Camara	560332,1	7772603,7	1058	2014	1006
USIMINAS	MC	PZMC-03-14_01Camara	561786,3	7773653,3	1086	2014	1024
USIMINAS	MC	PZMC-04-12_01Camara	559854,2	7772232	1048	2014	1003
USIMINAS	MC	PZMC-05-09_01Camara	560378	7772773,9	1139	2014	1024
USIMINAS	MC	PZMC-108-09_01Camara	560515	7772931,1	1170	2014	1023
USIMINAS	MC	PZMC-131-09_01Camara	559039,7	7771835,3	1016	2014	1010
USIMINAS	MC	PZMC-143-09_01Camara	560580,7	7772812,3	1107	2014	1021
USIMINAS	MC	PZMC-169-09_01Camara	559061,3	7772029,6	1055	2014	1024
USIMINAS	MC	PZMC-173-09_01Camara	560065,7	7772505,7	1085	2014	1024
USIMINAS	MC	PZMC-177-09_01Camara	559382,8	7771925,1	1049	2014	1023
USIMINAS	MC	PZMC-178-09_01Camara	559429,5	7771996,1	1049	2014	1024
USIMINAS	MC	PZMC-180-09_01Camara	559857,7	7772496,8	1123	2014	1024
USIMINAS	MC	PZMC-45-09_01Camara	561153,7	7773745,7	1222	2014	1066
USIMINAS	MC	PZMC-76-09_01Camara	560728,7	7772773	1154	2014	1026
USIMINAS	MC	PZMC-77-09_01Camara	560441,8	7772685,2	1077	2014	1022
USIMINAS	MC	PZMC-84-09_01Camara	560735,1	7772944	1177	2014	1025
USIMINAS	MC	PZMC-87-09_01Camara	560498,8	7772754,2	1090	2014	1037
USIMINAS	MC	PZMC-PO04A_01Camara	561903,5	7774615,5	1046	2014	1018
USIMINAS	ME	PZME-50-09_01Camara	567797,9	7774498,4	1168	2014	1063
USIMINAS	ME	PZME-54-09_01Camara	566698,2	7774454,4	1165	2013	1030
USIMINAS	ME	PZME-66-09_01Camara	565695,1	7774351	1084	2014	1028
USIMINAS	MW	PZMW-02-12_01Camara	557212,5	7770320,4	1042	2014	1004
USIMINAS	MW	PZMW-09-09_01Camara	556203,6	7770344,3	1148	2014	1037
USIMINAS	MW	PZMW-140-08_01Camara	556577,7	7770524	1113	2014	1023
USIMINAS	MW	PZMW-17-09_01Camara	557826,9	7771467,7	1064	2014	1024
USIMINAS	MW	PZMW-30-09_01Camara	555120,6	7769281,5	1140	2014	1032
USIMINAS	MW	PZMW-35-11_01Camara	554717	7768370	989	2014	980
USIMINAS	MW	PZMW-47-09_01Camara	555112,6	7769119,6	1104	2014	997
USIMINAS	MW	PZMW-52-09_01Camara	554742	7768211,5	986	2014	968
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2015	1068
VALE	Jangada	INA 12/13	595114	7777464	1131	2015	1110

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
VALE	Jangada	INA 13/13	595694	7777617	1186	2015	1093
VALE	Jangada	INA 14/14	594658	7777590	1234	2015	1090
VALE	Jangada	INA 15/14	595755	7777780	1179	2015	1111
VALE	Jangada	INA 16/14	595755	7777780	1179	2015	1187
VALE	Jangada	INA 17/14	595124	7778075	1284	2015	1174
VALE	Jangada	INA 18/14	595631	7778313	1273	2015	1126
VALE	Jangada	INA 19/14	592704	7776818	1221	2015	1090
VALE	Jangada	INA 20/14	594783	7777574	1187	2015	1092
VALE	Jangada	INA 22/15	596062	7777744	1129	2015	1083
VALE	Jangada	INA 23/15	595955	7777984	1169	2015	1084
VALE	MAC	MACCVMPZ354	615261	7793061		2015	1020
VALE	MAC	MACG1PZ001	615422,64	7792532,13		2015	1107
VALE	MAC	MACG1PZ004	615631,69	7792669,11		2015	1133
VALE	MAC	MACG1PZ005	615643,62	7792447,12		2015	1029
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2015	1038
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2015	1029
VALE	MAC	MACG2PZ019	616296,62	7792381,05		2015	1025
VALE	MAC	MACG2PZ022	616431,7	7792488,07		2015	1017
VALE	MAC	MACG3PZ001	616734,64	7792863,15		2015	1033
VALE	MAC	MACG3PZ002	616744,62	7792932,15		2015	1052
VALE	MAC	MACG3PZ003	616832,64	7792743,07		2015	1006
VALE	MAC	MACG3PZ005	616975,685	7793055,12		2015	1024
VALE	MAC	MACG3PZ006	617031,68	7792946,06		2015	1016
VALE	MAC	MACLONA059	613421,67	7792119,05		2015	1300
VALE	MAC	MACLOPZ063	613587,692	7792158,05		2015	1113
USIMINAS	MC	PZMC-01-12_01Camara	558978,1	7771727,6	1026	2015	993
USIMINAS	MC	PZMC-01-14_01Camara	561484	7773446,6	1086	2015	1022
USIMINAS	MC	PZMC-02-14_01Camara	561134,1	7773217,9	1120	2015	1022
USIMINAS	MC	PZMC-03-12_01Camara	560332,1	7772603,7	1058	2015	1006
USIMINAS	MC	PZMC-03-14_01Camara	561786,3	7773653,3	1086	2015	1022
USIMINAS	MC	PZMC-04-12_01Camara	559854,2	7772232	1048	2015	1001
USIMINAS	MC	PZMC-05-09_01Camara	560378	7772773,9	1139	2015	1020
USIMINAS	MC	PZMC-108-09_01Camara	560515	7772931,1	1170	2015	1020
USIMINAS	MC	PZMC-131-09_01Camara	559039,7	7771835,3	1016	2015	1008
USIMINAS	MC	PZMC-143-09_01Camara	560580,7	7772812,3	1107	2015	1018
USIMINAS	MC	PZMC-169-09_01Camara	559061,3	7772029,6	1055	2015	1021
USIMINAS	MC	PZMC-173-09_01Camara	560065,7	7772505,7	1085	2015	1021
USIMINAS	MC	PZMC-177-09_01Camara	559382,8	7771925,1	1049	2015	1020
USIMINAS	MC	PZMC-178-09_01Camara	559429,5	7771996,1	1049	2015	1020
USIMINAS	MC	PZMC-180-09_01Camara	559857,7	7772496,8	1123	2015	1021
USIMINAS	MC	PZMC-45-09_01Camara	561153,7	7773745,7	1222	2015	1066
USIMINAS	MC	PZMC-76-09_01Camara	560728,7	7772773	1154	2015	1023
USIMINAS	MC	PZMC-77-09_01Camara	560441,8	7772685,2	1077	2015	1019
USIMINAS	MC	PZMC-84-09_01Camara	560735,1	7772944	1177	2015	1022

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
USIMINAS	MC	PZMC-87-09_01Camara	560498,8	7772754,2	1090	2015	1037
USIMINAS	MC	PZMC-PO04A_01Camara	561903,5	7774615,5	1046	2015	1014
USIMINAS	ME	PZME-50-09_01Camara	567797,9	7774498,4	1168	2015	1061
USIMINAS	ME	PZME-54-09_01Camara	566698,2	7774454,4	1165	2015	1025
USIMINAS	ME	PZME-63-09_01Camara	568408,3	7774552,8	1087	2015	1087
USIMINAS	ME	PZME-66-09_01Camara	565695,1	7774351	1084	2015	1023
USIMINAS	MW	PZMW-02-12_01Camara	557212,5	7770320,4	1042	2015	1004
USIMINAS	MW	PZMW-09-09_01Camara	556203,6	7770344,3	1148	2015	1036
USIMINAS	MW	PZMW-140-08_01Camara	556577,7	7770524	1113	2015	1021
USIMINAS	MW	PZMW-17-09_01Camara	557826,9	7771467,7	1064	2015	1021
USIMINAS	MW	PZMW-30-09_01Camara	555120,6	7769281,5	1140	2015	1032
USIMINAS	MW	PZMW-35-11_01Camara	554717	7768370	989	2015	981
USIMINAS	MW	PZMW-47-09_01Camara	555112,6	7769119,6	1104	2015	996
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2015	1040
USIMINAS	MW	PZMW-52-09_01Camara	554742	7768211,5	986	2015	971
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2016	1068
VALE	Jangada	INA 13/13	595694	7777617	1186	2016	1092
VALE	Jangada	INA 14/14	594658	7777590	1234	2016	1089
VALE	Jangada	INA 16/14	595297	7778183	1273	2016	1186
VALE	Jangada	INA 19/14	592704	7776818	1221	2016	1088
VALE	Jangada	INA 22/15	596062	7777744	1129	2016	1080
VALE	Jangada	INA 23/15	595955	7777984	1169	2016	1064
VALE	Jangada	INA 24/16	594893	7777556	1099	2016	1091
VALE	Jangada	INA 25/16	595793	7778039	1163	2016	1059
VALE	Jangada	INA 26/16	595023	7777866	1187	2016	1154
VALE	Jangada	INA 27/16	595880	7778103	1195	2016	1060
VALE	MAC	MACG2PZ011	615921,61	7792469,08		2016	1037
VALE	MAC	MACG2PZ016	616216,67	7792508,08		2016	1038
VALE	MAC	MACG2PZ019	616296,62	7792381,05		2016	1057
VALE	MAC	MACG3PZ001	616734,64	7792863,15		2016	1034
VALE	MAC	MACG3PZ003	616832,64	7792743,07		2016	1006
VALE	MAC	MACG3PZ005	616975,685	7793055,12		2016	1031
VALE	MAC	MACG3PZ006	617031,68	7792946,06		2016	1023
USIMINAS	MC	PZMC-01-12_01Camara	558978,1	7771727,6	1026	2016	994
USIMINAS	MC	PZMC-01-14_01Camara	561484	7773446,6	1086	2013	1026
USIMINAS	MC	PZMC-02-14_01Camara	561134,1	7773217,9	1120	2016	1026
USIMINAS	MC	PZMC-03-12_01Camara	560332,1	7772603,7	1058	2016	1012
USIMINAS	MC	PZMC-03-14_01Camara	561786,3	7773653,3	1086	2016	1025
USIMINAS	MC	PZMC-04-12_01Camara	559854,2	7772232	1048	2016	1002
USIMINAS	MC	PZMC-05-09_01Camara	560378	7772773,9	1139	2016	1024
USIMINAS	MC	PZMC-108-09_01Camara	560515	7772931,1	1170	2016	1023
USIMINAS	MC	PZMC-131-09_01Camara	559039,7	7771835,3	1016	2016	1011
USIMINAS	MC	PZMC-169-09_01Camara	559061,3	7772029,6	1055	2016	1025
USIMINAS	MC	PZMC-173-09_01Camara	560065,7	7772505,7	1085	2016	1024

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
USIMINAS	MC	PZMC-177-09_01Camara	559382,8	7771925,1	1049	2016	1024
USIMINAS	MC	PZMC-178-09_01Camara	559429,5	7771996,1	1049	2016	1024
USIMINAS	MC	PZMC-180-09_01Camara	559857,7	7772496,8	1123	2016	1024
USIMINAS	MC	PZMC-45-09_01Camara	561153,7	7773745,7	1222	2016	1066
USIMINAS	MC	PZMC-84-09_01Camara	560735,1	7772944	1177	2016	1026
USIMINAS	MC	PZMC-87-09_01Camara	560498,8	7772754,2	1090	2016	1037
USIMINAS	MC	PZMC-PO04A_01Camara	561903,5	7774615,5	1046	2016	1024
USIMINAS	ME	PZME-50-09_01Camara	567797,9	7774498,4	1168	2016	1059
USIMINAS	ME	PZME-54-09_01Camara	566698,2	7774454,4	1165	2016	1027
USIMINAS	ME	PZME-63-09_01Camara	568408,3	7774552,8	1087	2016	1086
USIMINAS	ME	PZME-65-09_01Camara	568551,3	7774567,9	1059	2016	1058
USIMINAS	ME	PZME-66-09_01Camara	565695,1	7774351	1084	2016	1025
USIMINAS	MW	PZMW-02-12_01Camara	557212,5	7770320,4	1042	2016	1004
USIMINAS	MW	PZMW-09-09_01Camara	556203,6	7770344,3	1148	2016	1036
USIMINAS	MW	PZMW-140-08_01Camara	556577,7	7770524	1113	2016	1023
USIMINAS	MW	PZMW-17-09_01Camara	557826,9	7771467,7	1064	2016	1025
USIMINAS	MW	PZMW-30-09_01Camara	555120,6	7769281,5	1140	2016	1032
USIMINAS	MW	PZMW-47-09_01Camara	555112,6	7769119,6	1104	2016	1000
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2016	1040
USIMINAS	MW	PZMW-52-09_01Camara	554742	7768211,5	986	2016	977
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2017	1068
VALE	Jangada	INA 13/13	595694	7777617	1186	2017	1090
VALE	Jangada	INA 14/14	594658	7777590	1234	2017	1087
VALE	Jangada	INA 19/14	592704	7776818	1221	2017	1083
VALE	Jangada	INA 22/15	596062	7777744	1129	2017	1076
VALE	Jangada	INA 23/15	595955	7777984	1169	2017	1056
VALE	Jangada	INA 24/16	594893	7777556	1099	2017	1089
VALE	Jangada	INA 25/16	595793	7778039	1163	2017	1053
VALE	Jangada	INA 26/16	595023	7777866	1187	2017	1152
VALE	Jangada	INA 27/16	595880	7778103	1195	2017	1054
USIMINAS	MC	PZMC-01-12_01Camara	558978,1	7771727,6	1026	2017	994
USIMINAS	MC	PZMC-01-14_01Camara	561484	7773446,6	1086	2017	1025
USIMINAS	MC	PZMC-02-14_01Camara	561134,1	7773217,9	1120	2017	1025
USIMINAS	MC	PZMC-03-12_01Camara	560332,1	7772603,7	1058	2017	1008
USIMINAS	MC	PZMC-03-14_01Camara	561786,3	7773653,3	1086	2017	1025
USIMINAS	MC	PZMC-04-12_01Camara	559854,2	7772232	1048	2017	1002
USIMINAS	MC	PZMC-05-09_01Camara	560378	7772773,9	1139	2017	1026
USIMINAS	MC	PZMC-108-09_01Camara	560515	7772931,1	1170	2017	1024
USIMINAS	MC	PZMC-131-09_01Camara	559039,7	7771835,3	1016	2017	1010
USIMINAS	MC	PZMC-169-09_01Camara	559061,3	7772029,6	1055	2017	1026
USIMINAS	MC	PZMC-173-09_01Camara	560065,7	7772505,7	1085	2017	1025
USIMINAS	MC	PZMC-177-09_01Camara	559382,8	7771925,1	1049	2017	1025
USIMINAS	MC	PZMC-178-09_01Camara	559429,5	7771996,1	1049	2017	1025
USIMINAS	MC	PZMC-180-09_01Camara	559857,7	7772496,8	1123	2017	1025

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
USIMINAS	MC	PZMC-45-09_01Camara	561153,7	7773745,7	1222	2017	1066
USIMINAS	MC	PZMC-84-09_01Camara	560735,1	7772944	1177	2017	1027
USIMINAS	MC	PZMC-87-09_01Camara	560498,8	7772754,2	1090	2017	1037
USIMINAS	MC	PZMC-PO04A_01Camara	561903,5	7774615,5	1046	2017	1025
USIMINAS	ME	PZME-50-09_01Camara	567797,9	7774498,4	1168	2017	1057
USIMINAS	ME	PZME-54-09_01Camara	566698,2	7774454,4	1165	2017	1027
USIMINAS	ME	PZME-63-09_01Camara	568408,3	7774552,8	1087	2017	1083
USIMINAS	ME	PZME-65-09_01Camara	568551,3	7774567,9	1059	2017	1057
USIMINAS	MW	PZMW-09-09_01Camara	556203,6	7770344,3	1148	2017	1036
USIMINAS	MW	PZMW-140-08_01Camara	556577,7	7770524	1113	2017	1024
USIMINAS	MW	PZMW-17-09_01Camara	557826,9	7771467,7	1064	2017	1026
USIMINAS	MW	PZMW-30-09_01Camara	555120,6	7769281,5	1140	2017	1032
USIMINAS	MW	PZMW-35-11_01Camara	554717	7768370	989	2017	984
USIMINAS	MW	PZMW-47-09_01Camara	555112,6	7769119,6	1104	2017	1001
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2017	1039
USIMINAS	MW	PZMW-52-09_01Camara	554742	7768211,5	986	2017	977
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2018	1066
VALE	Jangada	INA 13/13	595694	7777617	1186	2018	1088
VALE	Jangada	INA 19/14	592704	7776818	1221	2018	1082
VALE	Jangada	INA 22/15	596062	7777744	1129	2018	1076
VALE	Jangada	INA 23/15	595955	7777984	1169	2018	1057
VALE	Jangada	INA 24/16	594893	7777556	1099	2018	1089
VALE	Jangada	INA 27/16	595880	7778103	1195	2018	1058
USIMINAS	MC	PZMC-01-14_01Camara	561484	7773446,6	1086	2018	1020
USIMINAS	MC	PZMC-02-14_01Camara	561134,1	7773217,9	1120	2018	1020
USIMINAS	MC	PZMC-03-12_01Camara	560332,1	7772603,7	1058	2018	1005
USIMINAS	MC	PZMC-03-14_01Camara	561786,3	7773653,3	1086	2018	1020
USIMINAS	ME	PZME-50-09_01Camara	567797,9	7774498,4	1168	2018	1055
USIMINAS	ME	PZME-54-09_01Camara	566698,2	7774454,4	1165	2018	1023
USIMINAS	ME	PZME-63-09_01Camara	568408,3	7774552,8	1087	2018	1082
USIMINAS	ME	PZME-65-09_01Camara	568551,3	7774567,9	1059	2018	1055
USIMINAS	MW	PZMW-140-08_01Camara	556577,7	7770524	1113	2018	1022
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2018	1040
VALE	Jangada	INA 06/02	592908	7778125	1120	2019	1073
VALE	Jangada	INA 22/15	596062	7777744	1129	2019	1075
VALE	Jangada	INA 23/15	595955	7777984	1169	2019	1053
USIMINAS	MC	PZMC-01-12_01Camara	558978,1	7771727,6	1026	2019	995
USIMINAS	ME	PZME-50-09_01Camara	567797,9	7774498,4	1168	2019	1054
USIMINAS	ME	PZME-63-09_01Camara	568408,3	7774552,8	1087	2019	1080
USIMINAS	ME	PZME-65-09_01Camara	568551,3	7774567,9	1059	2019	1053
USIMINAS	MW	PZMW-01-19_01Camara	556607,51	7770257,57	1073	2019	1019
USIMINAS	MW	PZMW-02-19_01Camara	557155,84	7770602,55	1063	2019	1018
USIMINAS	MW	PZMW-03-19_01Camara	557686,91	777108087	1085	2019	1019
USIMINAS	MW	PZMW-35-11_01Camara	554717	7768370	989	2019	979

<b>Empresa</b>	<b>Mina</b>	<b>ID</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Cota</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota NA Média</b>
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2019	1040
USIMINAS	MC	PZMC-01-12_01Camara	558978,1	7771727,6	1026	2020	994
USIMINAS	ME	PZME-50-09_01Camara	567797,9	7774498,4	1168	2020	1055
USIMINAS	ME	PZME-54-09_01Camara	566698,2	7774454,4	1165	2020	1020
USIMINAS	ME	PZME-63-09_01Camara	568408,3	7774552,8	1087	2020	1081
USIMINAS	ME	PZME-65-09_01Camara	568551,3	7774567,9	1059	2020	1055
USIMINAS	MW	PZMW-01-19_01Camara	556607,51	7770257,57	1073	2020	1018
USIMINAS	MW	PZMW-02-12_01Camara	557212,5	7770320,4	1042	2020	1004
USIMINAS	MW	PZMW-02-19_01Camara	557155,84	7770602,55	1063	2020	1017
USIMINAS	MW	PZMW-03-19_01Camara	557686,91	7771080,87	1085	2020	1017
USIMINAS	MW	PZMW-35-11_01Camara	554717	7768370	989	2020	981
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2020	1044
USIMINAS	MC	PZMC-165-09_01Camara	558980	7771967,8	1056	2021	1018
USIMINAS	ME	PZME-54-09_01Camara	566698,2	7774454,4	1165	2021	1019
USIMINAS	ME	PZME-63-09_01Camara	568408,3	7774552,8	1087	2021	1082
USIMINAS	ME	PZME-65-09_01Camara	568551,3	7774567,9	1059	2021	1057
USIMINAS	MW	PZMW-01-19_01Camara	556607,51	7770257,57	1073	2021	1034
USIMINAS	MW	PZMW-02-12_01Camara	557212,5	7770320,4	1042	2021	1004
USIMINAS	MW	PZMW-02-19_01Camara	557155,84	7770602,55	1063	2021	1028
USIMINAS	MW	PZMW-03-19_01Camara	557686,91	7771080,87	1085	2021	1022
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2021	1042
USIMINAS	MC	PZMC-165-09_01Camara	558980	7771967,8	1056	2022	1018
USIMINAS	MW	PZMW-01-19_01Camara	556607,51	7770257,57	1073	2022	1042
USIMINAS	MW	PZMW-02-12_01Camara	557212,5	7770320,4	1042	2022	1007
USIMINAS	MW	PZMW-02-19_01Camara	557155,84	7770602,55	1063	2022	1038
USIMINAS	MW	PZMW-03-19_01Camara	557686,91	7771080,87	1085	2022	1029
USIMINAS	MW	PZMW-49-09_01Camara	555054,8	7769205,2	1118	2022	1052