UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

LEONARDO ALVES REIS

Arcabouço Hidrogeológico do Sinclinal Gandarela - Quadrilátero Ferrífero - Brasil

Belo Horizonte

2026

LEONARDO ALVES REIS

Arcabouço Hidrogeológico do Sinclinal Gandarela - Quadrilátero Ferrífero - Brasil

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

Co-Orientador: Prof. Dr. Pedro Augusto Da Silva Rosa

Belo Horizonte

2026

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Rodrigo, que sempre paciente, me auxiliou nas melhores direções a se tomar para conseguir alcançar esse objetivo e me conectando mais à academia. Agradeço também ao coorientador, Dr. Pedro, pelo apoio das contribuições desse estudo.

Agradeço à UFMG, à Pró-reitoria de Pós-graduação, ao Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais e Laboratório de Estudos Hidrogeológicos (LEHID) por permitirem concluir mais uma nova etapa profissional/acadêmica na minha vida.

A todos os órgãos que apoiaram esse trabalho: IGAM e Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais com a parceria no desenvolvimento do projeto intitulado "Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológica a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero tendo como área piloto a região do sinclinal Moeda, MG", da qual essa pesquisa faz parte.

Às minhas grandes amigas Janaína e Laís que sempre acreditaram no meu potencial, até mesmo quando eu desacreditava.

Ao meu amigo de graduação e xará, Leo, pelas conversas, apoios e cuidados trocados ao longo desse período.

Aos meus novos amigos da pós-graduação, Igo, Pandolf e Thomaz, pelas trocas de conhecimentos.

À empresa na qual faço parte, Tetra Tech e em especial ao Artur, possibilitando minhas ausências e gerenciou as necessidades de trabalhos de campo da empresa com as minhas necessidades e compromissos acadêmicos.

À minha mãe e ao meu irmão, que moveram montanhas para que eu pudesse compreendê-las.

SUMÁRIO

RESUMO 6
ABSTRACT 7
1 - INTRODUÇÃO 8
1.2 – Objetivo 10
1.3 – Relevância 10
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12
3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 17
3.1 – Localização 17
3.2 - Clima 19
3.3 – Vegetação 20
3.4 - Hidrografia 21
3.5 - Solo 22
3.5 - Geomorfologia 23
3.6 – Contexto Geológico 23
3.7 - Hidrogeologia 28
4 - MATERIAIS E MÉTODOS 32
4.1 - Aquisição e Gerenciamento da Base de Dados 33
4.2 – Arcabouço do Sinclinal Gandarela 34
Superfície Potenciométrica 36
4.3 – Balanço Hídrico com Análise Multicritério da Recarga Aquífera em Ambiente SIG 37
5 – RESULTADOS 41
5.1 – Arcabouço do Sinclinal Gandarela 41
Superfície Potenciométrica 48
5.2 – Balanço Hídrico com Análise Multicritério da Recarga Aquífera em Ambiente SIG 53
6 – CONCLUSÃO 59
7 – REFERÊNCIAS 62
8 – APÊNDICES 70
APÊNDICE A – BASE DE DADOS SEMAD/SIAM 70
APÊNDICE B – MAPA DE BASE DE DADOS 70
APÊNDICE C – BASE DE DADOS DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS 70
APÊNDICE D – TABELAS DE CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ESCOAMENTO 71
APÊNDICE E – SEÇÕES GEOLÓGICAS 78
APÊNDICE F – TABELAS DE BALANÇO HÍDRICO (ROLIM, SENTELHAS & BARBIERI, 1998) 79

RESUMO

O Sinclinal Gandarela está localizado a cerca de 65 km da capital Belo Horizonte na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, a maior província mineral e é definido como uma megaestrutura de dobra reclinada orientado segundo direção nordeste-sudoeste e composto por rochas metassedimentares pertencentes ao Supergrupo Minas. O Sinclinal Gandarela possui relevância por estar parcialmente inserido na Área de Preservação Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul RMBH) e conter o Parque Nacional da Serra do Gandarela. A ausência de estudos regionais relacionados aos recursos hídricos subterrâneos disponíveis, assim como a ausência da compreensão do fluxo hídrico regional impulsionam este estudo. O objetivo é proporcionar o desenvolvimento do conhecimento no Sinclinal Gandarela, dentro do contexto hidrogeológico no Quadrilátero Ferrífero como uma definição do Sistema Aquífero Gandarela com suas unidades hidroestratigráficas, a compartimentação hidrogeológica guiada pela geomorfologia e geologia estrutural do sinclinal, e a abordagem para utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na análise dos cálculos de taxa de recarga dentro da área delimitada para o estudo. A metodologia envolveu a aquisição e tratamento de bases de dados hidrogeológicos e pluviométricos, modelagem geológica, definição das unidades hidroestratigráficas, elaboração de mapas potenciométricos e de fluxo, além da aplicação do balanço hídrico climatológico e de análise multicritério em ambiente SIG para estimar recarga. Os resultados indicam que o Sinclinal Gandarela é compartimentado em três setores hidroestratigráficos, com o aquífero Cauê se destacando pelo maior potencial de armazenamento e recarga. A potenciometria regional revelou três condições distintas de fluxo, com águas convergindo para o eixo central do sinclinal, enquanto os flancos elevados atuam como divisores topográficos. A análise multicritério mostrou predominância de recargas moderadas a baixas, variando entre 50 e 250 mm/ano, coerentes com valores obtidos em estruturas adjacentes como os sinclinais Moeda e Dom Bosco. O Sinclinal Gandarela opera sob controle morfoestrutural, onde a geometria da dobra e a presença de unidades confinantes, como o filito Batatal, exercem influência determinante sobre o sistema hidrodinâmico e as zonas de recarga subterrânea.

Palavras-chave: Análise Multicritério de Recarga, Recursos Hídricos Subterrâneos, Controle Morfoestrutural.

ABSTRACT

The Gandarela Syncline is located about 65 km from Belo Horizonte, in the north-central portion of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil's largest mineral province. It is defined as a reclined fold megastructure trending northeast-southwest and composed of metasedimentary rocks belonging to the Minas Supergroup. The Gandarela Syncline is of particular relevance as it is partially included within the South Metropolitan Environmental Preservation Area of Belo Horizonte and encompasses the Serra do Gandarela National Park. The absence of regional studies on available groundwater resources, as well as the lack of understanding of regional hydraulic flow, motivated this research. The objective is to advance knowledge of the Gandarela Syncline within the hydrogeological context of the Quadrilátero Ferrífero, focusing on defining the Gandarela Aquifer System with its hydrostratigraphic units, hydrogeological compartmentalization guided by geomorphology and structural geology, and the use of Geographic Information Systems (GIS) to analyze recharge rate calculations within the study area. The methodology involved the acquisition and processing of hydrogeological and rainfall databases, geological modeling, definition of hydrostratigraphic units, preparation of potentiometric and flow maps, as well as the application of climatological water balance and multicriteria analysis in a GIS environment to estimate recharge. Results indicate that the Gandarela Aquifer System is compartmentalized into three hydrostratigraphic sectors, with the Cauê Aquifer standing out for its higher storage and recharge potential. Regional potentiometry revealed three distinct flow conditions, with waters converging toward the synclinal axis, while the elevated flanks act as topographic divides. Multicriteria analysis showed predominantly moderate to low recharge rates, ranging between 50 and 250 mm/year, consistent with values observed in adjacent structures such as the Moeda and Dom Bosco synclines. The Gandarela Syncline operates under morphostructural control, where the geometry of the fold and the presence of confining units, such as the Batatal phyllite, exert a decisive influence on the hydrodynamic system and groundwater recharge zones.

Keywords: Multicriteria Recharge Analysis, Groundwater Resources, Morphostructural Control.

1- INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF), é uma das mais importantes províncias minerais do mundo (LOBATO *et al*., 2014) localizada em Minas Gerais cobrindo uma área de 7190 km². A região também é bem conhecida por seus aspectos físicos e riquezas naturais, onde abriga muitas espécies endêmicas, algumas ameaçadas de extinção. Por sofrer intensamente com ações antrópicas, áreas no seu interior são pontos de estudos para que haja meios de criação de novas unidades de conservação visando garantir o seu acervo natural (LAMOUNIER, CARVALHO & SALGADO, 2011).

Estruturalmente é constituído por uma unidade geotectônica de idade Brasiliana cercada por cinturões orogenéticos brasilianos (ROSSI, 2014), onde apresenta arcabouço geológico e evolução tectônica complexos com o resultado de modelos de ciclos tectono-deformacionais distintos (ENDO, 1997). A litoestratigrafia do QF compreende três unidades rochosas como os complexos metamórficos de idade arqueana, sequência de rochas metavulcanossedimentares do tipo *greenstone-belt* do Supergrupo Rio das Velhas e rochas metassedimentares do Supergrupo Minas (DORR, 1969).

O Sinclinal Gandarela está inserido no contexto geológico do QF, localizado na porção centro-norte, entre a Serra da Piedade e a Serra do Caraça, com uma área aproximada de 256 km². De acordo com Oliveira, Endo & Oliveira (2005) constitui-se de uma megaestrutura sinformal dobrada e reclinada com cavidade alongada da direção NW-NE com seus flancos ressaltados espigões de mesma direção, uma megadobra com fechamento para SE (DORR, 1969). É composta por rochas metassedimentares do Supergrupo Minas em contato com rochas do Grupo Nova Lima e rochas graníticas do Complexo Metamórfico Caeté.

Além de ser considerada uma região com grandes perspectivas de prospecção mineral (OLIVEIRA, ENDO & OLIVEIRA, 2005 *apud* ENDO & ROCHA FILHO, 2003), destaca-se dentro da área de estudo a presença do Parque Nacional Serra do Gandarela, de potencial importância socioambiental. É como uma área de preservação ambiental dentro do QF implementado em 2014, por comportar diversidade de flora, fauna e diversos córregos e rios importantes para a região.

A Serra do Gandarela, no qual o parque foi implementado, está situada na porção sudoeste do Sinclinal Gandarela e destaca-se pela complexidade e diversidade de seu substrato geológico, onde abriga uma importante bacia sedimentar com traços fósseis

relevantes na Bacia Terciária do Gandarela, além de registros bioestratigráficos e paleoecológicos que reforçam seu valor científico. Ainda possui numerosas cavernas desenvolvidas nas rochas ferríferas do Grupo Itabira, que constituem patrimônio geoespeleológico de grande relevância, elevando a importância ambiental na região. Também possui um expressivo potencial hídrico, evidenciado pela abundância de nascentes e cursos d'água superficiais cuja qualidade é reconhecida como fundamental para a manutenção da integridade das águas dos rios das Velhas e Piracicaba (LAMOUNIER, CARVALHO & SALGADO, 2011).

O Sinclinal Gandarela tem quase que a metade de sua área inserida na Área de Preservação Ambiental na região Sul de Belo Horizonte (APA Sul RMBH) estabelecida pelo Decreto Estadual 35.624, de 8 de junho de 1994, com o objetivo de proteção e conservação dos atributos dos meios físico e bióticos, estéticos, culturais e econômicos da região. Devido movimentos exploratórios, inicialmente ocasionados pela busca de ouro, seguidos pela exploração de minério de ferro que forçaram (e ainda forçam) a expansão urbana, comprometem o equilíbrio natural da região. Surgiu-se a necessidade, por meio de negociação de diversos setores, da criação da área de preservação ambiental que compreende os municípios de Belo Horizonte, Ibirité, Brumadinho, Nova Lima, Caeté, Itabirito, Raposos, Rio Acima e Santa Barbara, Catas Altas, Barão de Cocais, Mário Campos e Sarzedo foram acrescidos (MEDINA, DANTAS & SAADI, 2005).

A APA Sul RMBH possui uma área de 1651 km², totalmente inserida no Quadrilátero Ferrífero e, com grande importância do ponto de vista econômico devido às riquezas minerais como ferro, ouro e manganês. Ainda possui uma disponibilidade de recursos hídricos que abrangem a região para o uso em abastecimento público, dessedentação de animais, agricultura, mineração, doméstico, hospitalar, postos de abastecimento, recreação e lazer, piscicultura, geração de energia elétrica, transporte e diluição de esgotos, efluentes e detritos.

É uma das mais relevantes unidades de conservação da Região Metropolitana de Belo Horizonte abrigando o Parque Nacional da Serra do Gandarela, e com o objetivo de melhor direcionar o uso e ocupação das áreas em relação aos seus diversos atributos. Sua importância está diretamente ligada à proteção de recursos hídricos estratégicos, à preservação da biodiversidade e ao equilíbrio socioambiental em uma região historicamente pressionada pela mineração e pela expansão urbana na região (SILVA, 2005).

Ainda na APA Sul RMBH, estudos focados exclusivamente na porção sul, revelaram informações hidrogeológicas relevantes. Os dados indicam um expressivo potencial hídrico subterrâneo, com importância ambiental e histórica para o abastecimento da região (BEATO *et al*., 2006). Segundo Endo *et al.* (2020), essa área apresenta características geológicas peculiares e complexas, com aquíferos de produtividade bastante variável e distribuição descontínua.

Além das unidades de conservação, o Plano Diretor de Recursos Hídricos estabeleceu em 2015 a Unidade Territorial Estratégica (UTE) Águas do Gandarela, com a finalidade de proteger e gerir de forma sustentável os recursos hídricos da região, garantindo a conservação ambiental e o abastecimento de água para a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Também visa criar do controle dos processos erosivos e o tratamento dos efluentes gerados, para preservar a quantidade e qualidade das águas da região. (BOECHAT, 2024).

As lacunas de conhecimento científico dificultam a compreensão adequada a complexidade estrutural, litológica e hidrogeoquímica da região, comprometendo a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos e a avaliação de impactos cumulativos decorrentes de atividades antrópicas.

1.2 – Objetivo

O trabalho tem como objetivo geral estabelecer parâmetros conceituais e metodológicos que permitam caracterizar sua dinâmica hidrogeológica e avançar no conhecimento científico sobre a megaestrutura Sinclinal Gandarela, para assim se propor a definição do Sistema aquífero Gandarela. Dessa forma, o trabalho tem como objetivo específico:

- Definir e caracterizar as unidades hidroestratigráficas presentes no Sinclinal Gandarela, com ênfase na hidrodinâmica subterrânea;

- Avaliar as condições de recarga hídrica do sistema aquífero, utilizando balanço hídrico climatológico e análise multicritério em ambiente SIG.

1.3 – Relevância

A região da área de pesquisa possui estudos hidrogeológicos pontuais e elaborados por empresas minerárias atuantes na região, de forma concentrada em determinadas localidades para atender às necessidades dos empreendimentos. Portanto, de acordo com Feitosa *et al*. (2008), explotações sem dados embasados podem gerar falsas expectativas, com cenários favoráveis e encorajadores para empreendimentos, que no

futuro poderão se mostrar improdutivos. Por outro lado, sem informações suficientes, a restrição da capacidade de produção de água subterrânea pode comprometer indevidamente investimentos públicos e privados de determinada região.

Dessa forma, a motivação deste trabalho decorre da carência de estudos voltados à caracterização dos recursos hídricos subterrâneos associados às unidades aquíferas do Sinclinal Gandarela, bem como à compreensão integrada da dinâmica hídrica que rege esse sistema.

Essa necessidade torna-se ainda mais relevante diante dos conflitos relacionados à disponibilidade de recursos hídricos na região. A APA Sul da RMBH, responsável por parte significativa do abastecimento da capital e municípios vizinhos, enfrenta pressões crescentes da expansão urbana e das atividades minerárias, enquanto o Parque Nacional da Serra do Gandarela sofre com a sobreposição de interesses de conservação e exploração mineral, comprometendo a segurança hídrica e a integridade ambiental.

Nesse contexto, o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas abrangentes que integrem dados geológicos, hidrogeológicos e ambientais é essencial para promover uma visão holística do sistema aquífero e subsidiar estratégias de gestão capazes de conciliar abastecimento público, preservação ambiental e uso econômico sustentável dos recursos naturais. aquíferas do Sinclinal Gandarela,

A área de estudo está parcialmente situada na APA Sul RMBH, que desempenha papel estratégico no abastecimento hídrico, e abrange parte do Parque Nacional da Serra do Gandarela, criado para proteger ecossistemas e nascentes de elevada importância hídrica. A Serra do Gandarela, além de sua função ecológica, atua como divisor natural entre duas bacias hidrográficas estaduais, reforçando sua condição de território-chave para a segurança hídrica regional.

Dessa forma, a pesquisa apresenta relevância significativa para o aprofundamento do conhecimento sobre os fatores, também ambientais, relacionados ao Sinclinal Gandarela e especialmente devido à sua inserção no contexto hidrogeológico do QF. Compreender a dinâmica hidrogeológica região torna-se essencial não apenas para o avanço científico, mas também para subsidiar políticas de gestão que conciliem conservação ambiental e demandas socioeconômicas.

Portanto, a partir do exposto, surge a pergunta científica: Como a dinâmica hídrica é influenciada pela estruturação do Sinclinal Gandarela e qual a relação das diferentes unidades aquíferas quanto à taxa de recarga?

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A hidrogeologia vem se desenvolvendo ao longo dos anos, se tornando fundamental para o entendimento dos recursos hídricos subterrâneos. Há muitos outros estudos, e em diversas áreas da hidrogeologia, sendo que na década de 60 o conhecimento hidrodinâmico dos sistemas de fluxo teve um avanço significativo (FILHO, 2008).

No Brasil, as ações desenvolvidas em termos de águas subterrâneas se concentraram no Nordeste, até 1950, e ficaram praticamente restritas à perfuração de poços. Nos anos 60, a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) desenvolveu o Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste, na escala 1:500.000, pioneiro no país e na América Latina, que caracterizava sistematicamente os aquíferos da região para diversos usos. A partir da década de 70, outros órgãos desenvolveram projetos semelhantes em seus respectivos estados (FILHO, 2008).

Em Minas Gerais, ainda na década de 60, houve problema de falta de água na cidade de Belo Horizonte, por problemas nas captações d'água nos rios deixando grande parte da população sem água. Problemas estes, se mostravam pertinentes na evolução do uso e ocupação do QF, principalmente para fins de aproveitamento na mineração e no abastecimento público. Isto sempre influenciou o desenvolvimento da hidrogeologia e o uso da água subterrânea como fonte alternativa de abastecimento (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020).

Estudos hidrogeológicos no QF se tornaram mais evidentes, como o estudo sobre o rebaixamento do nível d'água na mina de Conceição, em Itabira, realizado em 1983 com a perfuração de um poço piloto e piezômetros (TÁRCIA, NETO & SANTANA, 1986) para rebaixamento do nível d'água. Já Silva, Neto & Bertachini (1994), quantificaram reservas explotáveis de aquíferos do QF de forma sistêmica indicando que os principais aquíferos se encontram nas formações Cauê e Cercadinho e/ou Grupo Piracicaba e quartzitos da Formação Moeda.

Ainda em contribuição à hidrogeologia do QF, a APA Sul RMBH desenvolveu o "Projeto APA Sul RMBH – Estudos do Meio Físico". O trabalho apresentou um expressivo potencial hídrico subterrâneo de importância ambiental e histórica para o abastecimento

da região metropolitana de Belo Horizonte (BEATO, MONSORES & BERTACHINI, 2005).

Apresentando grande importância para a exploração, assim como para os recursos hídricos subterrâneos do QF, Lazarim & Loureiro (1998) caracterizaram o Aquífero Jardim Canadá em Nova Lima e Lazarim (1999) com a proposta de modelo e caracterização hidrogeológica no extremo norte do Sinclinal da Moeda.

Estudos foram desenvolvidos em relação à formação ferrífera (Formação Cauê), a compreensão e caracterização da dinâmica do sistema de fluxo subterrâneo na Formação Cauê (MOURÃO, 2007), estudo de deságue na mina a céu aberto Capão Xavier (RUBIO *et al*. 2009), avaliação de condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto (FERREIRA & BACELLAR, 2010) e estudo em estrutura de cava como recarga artificial no Aquífero Cauê (BERTACHINI *et al.,* 2012).

O Quadrilátero Ferrífero

Estudos mais recentes desenvolvidos no QF como a caracterização dos parâmetros hidrodinâmicos para itabiritos brandos na porção sudoeste do QF (MESQUITA *et al.,* 2017), a ordenação das unidades hidrogeológicas regionais para uma proposição de sistematização dos sistemas aquíferos na porção nordeste do QF (GONÇALVES, PEREIRA & VIEIRA, 2018), a análise de dados hidroquímicos e isotópicos para caracterizar e compreender a dinâmicas das águas do Aquífero Cauê, na região de Congonhas, MG (DE PAULA *et al.* 2018), método para estimativa do balanço hidrológico e recarga aquífera distribuída em áreas de mineração (AZEVEDO *et al.,* 2023).

Há ainda contribuições com os estudos voltados à modelagem hidrogeológica de fluxo na estrutura Sinclinal Moeda (MAGALHÃES *et al.*, 2022 e ANDRADE *et al*., 2025) e do Homoclinal Serra do Curral (VIDAL, 2025), avaliação do potencial hídrico subterrâneo do Sinclinal Santa Rita (LADEIRA, 2025), hidrogeologia dos sistemas aquíferos do Sinclinal Dom Bosco (TAVARES, 2025).

Estas últimas pesquisas fazem parte do projeto “Proposta de uma rede de monitoramento hidrometeorológica a partir de estruturas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero tendo como área piloto a região do Sinclinal Moeda, MG”, desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais em parceria com a Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) e Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

O Quadrilátero Ferrífero ainda passa pelo processo de conhecimento relacionado sua evolução tectônica devido à alta complexidade e intensidade das deformações

rochosas. Sobre o tema é possível mencionar estudos anteriores como Simmons & Maxwell (1961), Dorr (1969), Chemale, Rosière & Endo (1994), Alkmim & Marshak (1998), Almeida (2004), Almeida *et al.* (2005) e Endo *et al.* (2005) com diferenças nos modelos evolutivos. Ao se tratar do Sinclinal Gandarela, e relacionado à geologia estrutural, definiu-se por meio de dados magnetométricos associados a interpretação de dados geológico-estruturais que possibilitam a caracterização da geometria em profundidade do Sinclinal Gandarela (OLIVEIRA, ENDO & OLIVEIRA, 2005).

O Sinclinal Gandarela

Na área de estudo contém, em sua porção SW, parte do Parque Nacional da Serra do Gandarela e com isso surge vários conflitos ambientais devido ao processo de instalação de novos empreendimentos minerários na região. Por esta razão, entre outras, há estudos sobre a possibilidade de ampliação das unidades de conservação no QF. Levantamento das principais características físicas, biológicas e paisagística da Serra do Gandarela e seu entorno, apontam a necessidade de criação de novas unidades de conservação na área (LAMOUNIER, CARVALHO & SALGADO, 2011).

Sobre a hidrogeologia do Sinclinal Gandarela, resgatam-se trabalhos desenvolvidos na região, e alguns de forma localizada. A avaliação do comportamento hidrogeológico das formações geológicas em uma vertente da Serra do Gandarela que trabalha relação entre os solos, coberturas de superfície e o comportamento hidrológico (FRANCO, PORTILHO & DE SOUZA, 2017).

A Modelagem Hidrogeológica Conceitual

Quanto as metodologias aplicáveis nos estudos hidrogeológicos e de acordo com White (2003), o modelo hidrogeológico conceitual, compreende a conexão de áreas de recarga, permeabilidade e substratos geológicos que, juntos, indicam a rota pela qual a água é inserida, retida, transportada e liberada pelo sistema.

O resumo das informações disponíveis da região de análise constitui modelo conceitual (KRESIC & MIKSZEWSKI, 2013). O modelo conceitual integra informações hidrogeológicas relevantes usando simplificações e interpretações qualitativas dos processos de fluxo e transporte específicos do local (ZHENG & BENNETT, 2002).

O nível de detalhamento necessário é determinado pelo objetivo do modelamento e pelos dados de campo disponíveis, onde um modelo conceitual precisa, no mínimo, de informações sobre condição de contorno; hidroestratigrafia, propriedades hidrogeológicas, direções de fluxo e recarga e descarga (ANDERSON, WOESSNER & HUNT, 2015).

A condição de contorno pode ser classificada como física ou hidráulica desde que não se movam ou mudem conforme as condições hidrológicas mudam. São características hidráulicas como divisões de águas subterrâneas e características físicas como corpos de água superficial e rochas relativamente impermeáveis e zonas de falhas relativamente impermeáveis (ANDERSON, WOESSNER & HUNT, 2015).

De acordo com Maxey (1964), a unidade hidroestratigráfica abrange um aquífero identificável e camadas confinantes associadas, tal qual como é conceituado as unidades estratigráficas. Já Seaber (1988) define uma unidade hidroestratigráfica como um material geológico contíguo com propriedades hidráulicas similares.

Os agrupamentos em unidades hidroestratigráficas, com base na natureza e conectividade dos espaços vazios (caracterizados pela porosidade e permeabilidade) da rocha, indicam as propriedades de transmissão e armazenamento, apresentando uma conotação regional. A partir dessa caracterização, torna-se possível determinar as direções gerais do fluxo hídrico subterrâneo, utilizando mapas de contorno do nível freático e da superfície potenciométrica, bem como informações sobre níveis de água, limites e localizações de áreas de recarga e descarga. Quando há mais de um aquífero presente, essas direções são representadas individualmente para cada sistema aquífero. (ANDERSON, WOESSNER & HUNT, 2015).

O Balanço Hídrico

Nesse contexto, compreender o regime hídrico de uma região torna-se essencial para avaliar o potencial de recarga dos aquíferos. Para isso o balanço hídrico climatológico, desenvolvido por Charles Warren Thornthwaite (1948) e posteriormente modificado por John Russ Mather (1955), determina o regime hídrico de um local, sem necessidade de medidas diretas das condições do solo. Thornthwaite-Mather (1955) sistematizaram a aplicação do método de balanço hídrico em bacias hidrográficas objetivando identificar uma relação entre precipitação e evaporação real e potencial.

A partir dessa metodologia Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998) desenvolveram uma planilha, em ambiente EXCEL™, que realiza o cálculo de balanço hídrico auxiliando na análise da base de dados com a geração de gráficos. Essa é uma ferramenta fundamental para compreender o comportamento da água no ambiente, especialmente no que diz respeito à recarga de aquíferos, mas não somente.

Ainda sobre o tema de recarga e diante da grave escassez de água na Bacia do Ganges, marcada por alta densidade populacional e forte dependência da agricultura irrigada, Chaturvedi & Srivastava (1979) desenvolveram um modelo matemático de simulação e

otimização para analisar a interação entre os fluxos superficiais e subterrâneos. O objetivo foi avaliar estratégias de recarga induzida de aquíferos, por meio de análises de sensibilidade e estudos de custo-benefício, visando identificar soluções mais eficientes e economicamente viáveis para o manejo dos recursos hídricos na região.

Já Saliba *et al.* (2010 e 2016) empregaram o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather (1955) para dimensionar os drenos de fundo de pilhas de estéril de mineração, onde consideram o escoamento superficial conforme a tipologia do uso de solo, como porcentagem da precipitação mensal.

O Estudo integrado à análise multicritério em SIG

Atualmente o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) tem revolucionado a análise hidrogeológica, para cálculos de recargas, ao permitir a integração de múltiplas camadas de dados em uma única plataforma analítica. Andreo *et al.* (2004) desenvolveram o método APLIS (acrônimo das variáveis aplicadas no método) para avaliar a recarga média e sua distribuição espacial onde fundamenta-se nas características intrínsecas de aquíferos carbonatados como Altitude, Declividade, Litologia, Infiltração e Solos. Teixeira (2023), utilizando o método APLIS, permitiu integrar variáveis físico-geográficas e climáticas para gerar uma estimativa mais realista da recarga hídrica subterrânea nos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa em Minas Gerais.

Outras metodologias, em outros domínios litológicos, aplicando base de dados SIG foram sendo empregadas. Machiwal & Jha (2015) desenvolveram o estudo de integração entre a capacidade específica regional e a recarga distribuída de aquíferos em regiões semiáridas de rochas cristalinas por meio do SIG.

A missão *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), lançada no ano de 2002, foi um projeto de satélites gêmeos para monitoramento da água no planeta. Seu objetivo principal é medir as variações no campo gravitacional diretamente relacionadas às mudanças na armazenagem de água terrestre. Com isso, a aplicação da metodologia GRACE associada à base de dados SIG possibilitou estudos para analisar a dinâmica da água armazenada na bacia Magdalena-Cauca, na América do Sul, que identificou uma tendência de esgotamento gradual da água subterrânea desde 2010 (BOLAÑOS *et al.*, 2021).

Renna Camacho *et al.* (2023) Desenvolveram um monitoramento de aquíferos usando a metodologia que combina dados do satélite GRACE com medições hidrogeológicas

em campos provenientes da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas do Brasil.

Galvão, Hirata & Conicelli (2018) aplicaram uma estimativa da recarga de aquíferos utilizando modelo distribuído de balanço hídrico (escoamento superficial, evapotranspiração e percolação) baseado em SIG, na cidade de Sete Lagoas (MG), utilizando a metodologia de análise multicritério.

Outros trabalhos foram desenvolvidos seguindo a mesma metodologia com base de dados SIG, como a estimativa de recarga de água subterrânea e identificação fontes de precipitação na Bacia do Rio Zamora no Equador (GUALLI *et al.,* 2023), e abordagem integrada para estimar os efeitos das mudanças climáticas em recarga de água subterrânea na costa do Equador (INTRIAGO, GALVÃO & CONICELLI, 2023).

Já Mohan & Pramada (2023) propõe uma abordagem integrada para estimar a recarga natural de aquíferos, combinando diferentes métodos analíticos em SIG com experimentação de campo e fórmula empírica de Chaturvedi (1973), desenvolvida para estimar recarga anual líquida de água subterrânea com base nas flutuações do nível freático e na precipitação anual.

3- CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 – Localização

A área de estudo está localizada à 65 km da capital Belo Horizonte com principal acesso pela rodovia MG 030. Se mantém presente, majoritariamente, nos municípios de Santa Bárbara, Barão de Cocais, São Gonçalo do Rio Abaixo incluindo pequenas partes dos municípios de Caeté, Rio Acima e Itabirito. As maiores densidades urbanas relacionadas aos municípios que fazem parte do Sinclinal Gandarela estão localizadas fora da área

de estudo, com exceção do município Barão de Cocais (

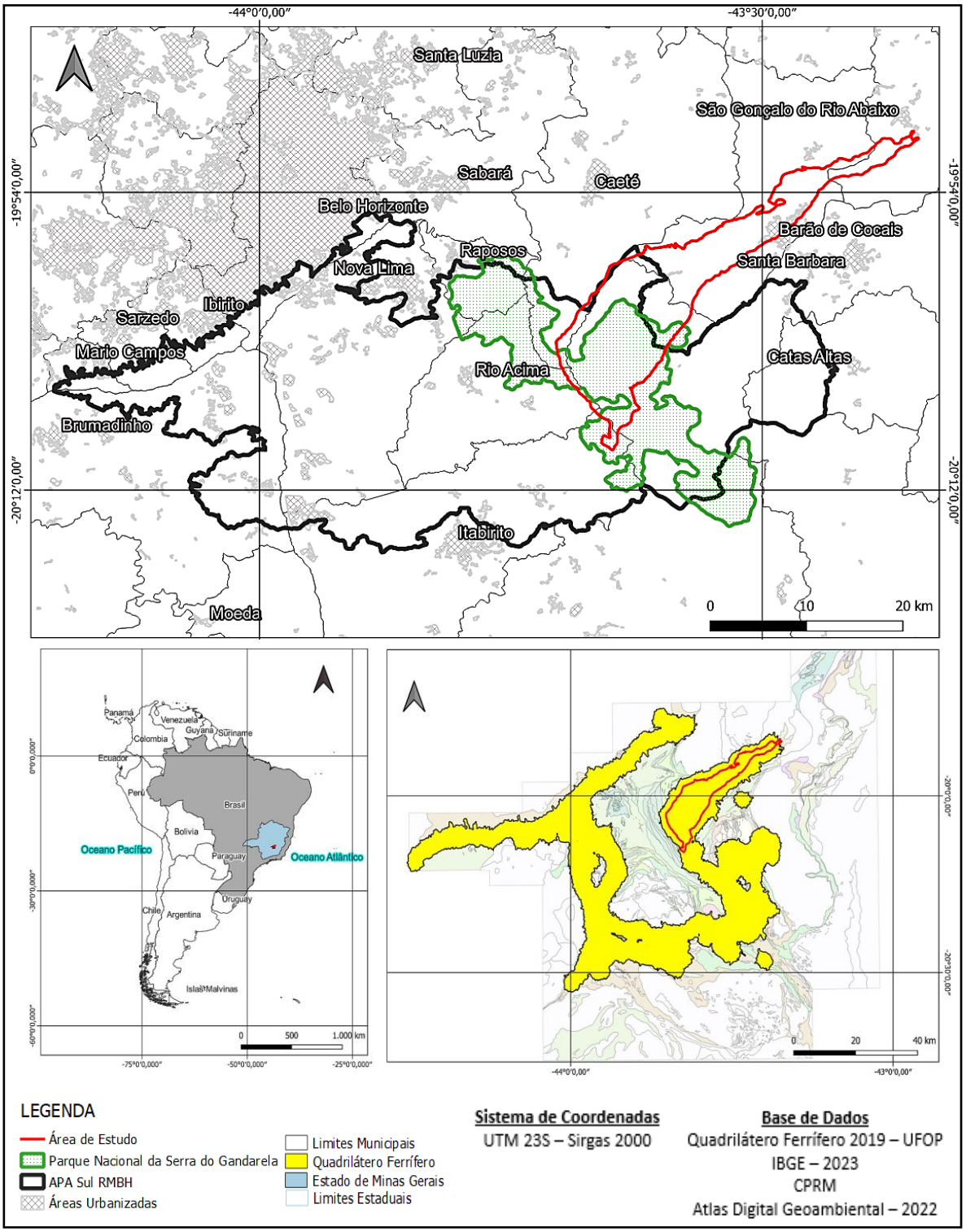


Figura 1).

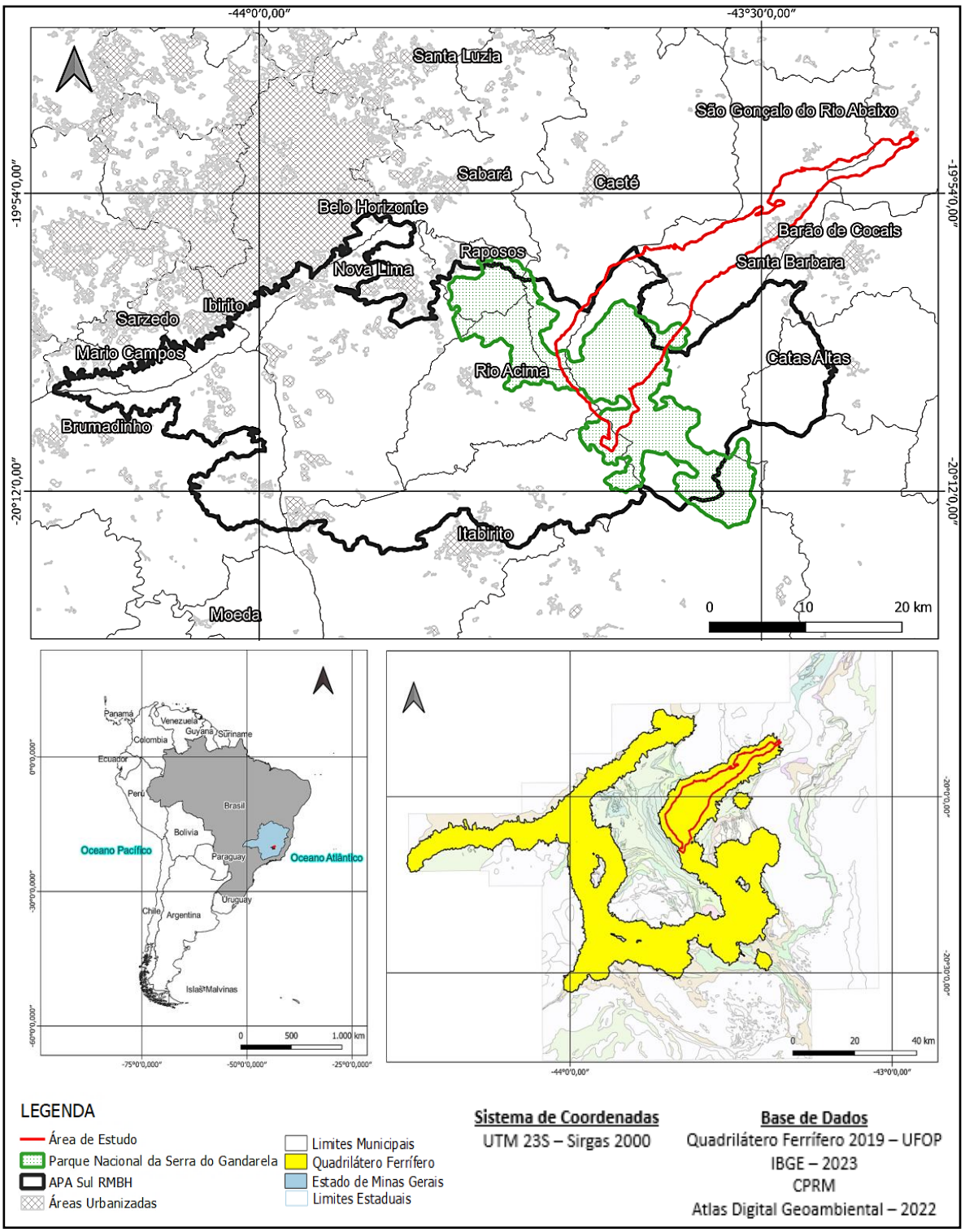


Figura 1: Área de estudo do Sinclinal Gandarela (vermelho) onde a porção SW apresenta a interseção entre os limites do Parque Nacional da Serra do Gandarela (verde) e os limites da APA Sul RMBH (preto).

A área de estudo compreende uma área de aproximadamente 256 km² delimitado a sul pela estrutura Sinclinal Ouro Fino, na porção SE pelo Anticlinal Conceição, a SW pelo Sinclinal Vargem do Lima e a norte e NW pelo Complexo Metamórfico Caeté (**Figura 2**). No Sinclinal Gandarela, encontra-se também a unidade geológica conhecida como

Formação Cauê, composta por itabiritos da formação ferrífera bandada. Essa unidade tem sido objeto de intensas pesquisas e atividades de extração de minério de ferro por empreendimentos minerários que se estabeleceram na região. A presença dessas operações contribuiu para o aumento do adensamento urbano nos municípios vizinhos, o que, por sua vez, elevou significativamente a demanda por abastecimento hídrico.

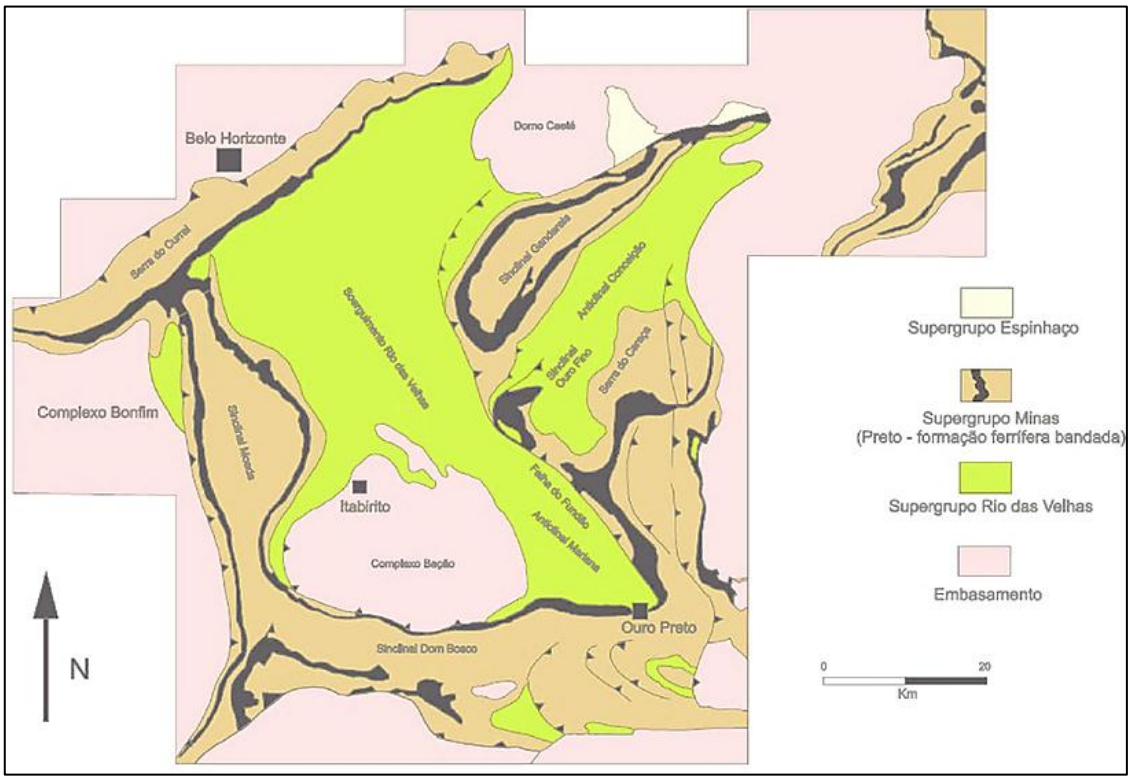


Figura 2: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero com destaque para a ocorrência da camada (em preto) da formação ferrífera bandada.
Fonte: Alkmin & Marshak, 1998

3.2 - Clima

De acordo com Beato, Monsores & Bertachinni (2005) o clima local da APA Sul RMBH, e consequentemente do Sinclinal Gandarela, está diretamente relacionado ao relevo que pode atingir 2000 m de altitude causando diferenças nas precipitações e temperaturas. Além do relevo, são considerados que outros aspectos como o tipo de solo, cobertura vegetal, existência de corpos d'água e influência de ações antrópicas também geram as variações das precipitações (DAVIS, PINTO & PINTO, 2005).

O clima da região é do tipo CWa, tropical semiúmido, com verão chuvoso e um inverno seco (KÖPPEN, 1948), temperado-quente em duas estações, uma de verão chuvoso e outra de inverno seco (SILVA, 2007) e (CRUZ *et al*. 2022). Davis, Pinto & Pinto (2005) relatam o trimestre mais chuvoso, com precipitação média anual de 55%, corresponde ao período de novembro a janeiro, e o trimestre mais seco, com média de 2%, refere-

se ao intervalo de junho a agosto, conforme apresentado na **Figura 3**. A temperatura média mensal, medida na estação Belo Horizonte varia de 16,5° a 23,2°C.

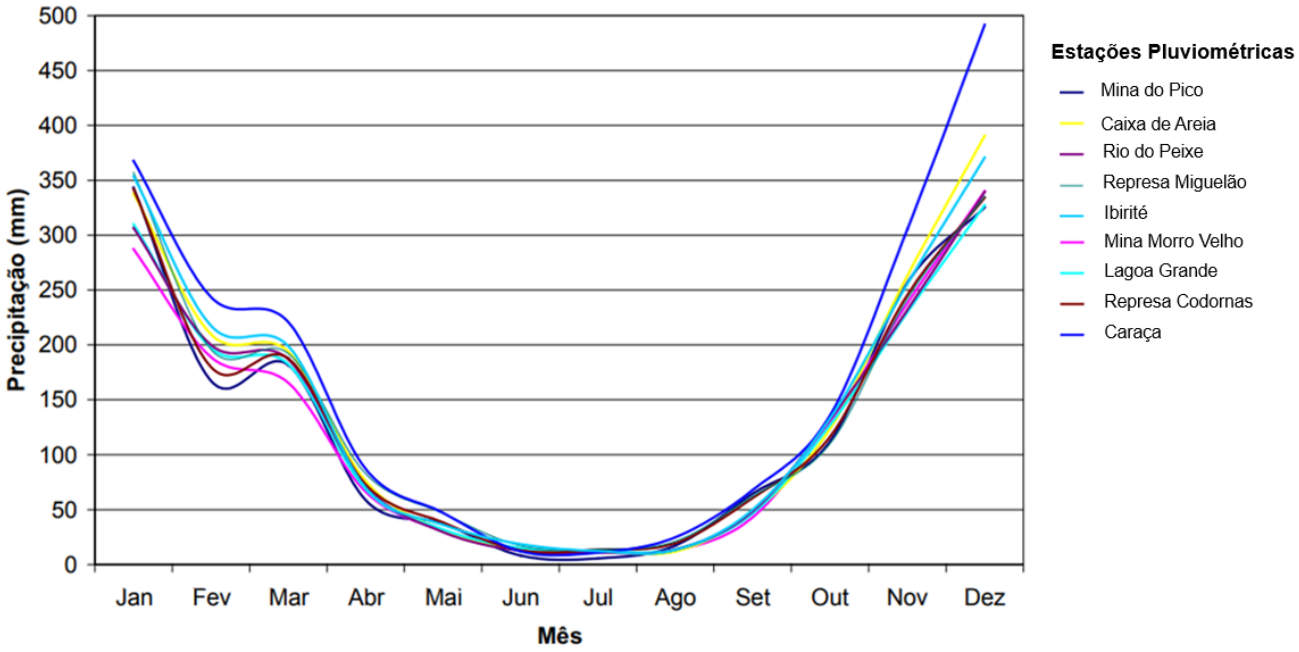


Figura 3: Dados históricos (1970 a 2000) da precipitação (mm) ao longo dos meses das estações meteorológicas presentes na APA Sul RMBH.
Fonte: Davis, Pinto & Pinto (2005)

3.3 – Vegetação

A cobertura vegetal depende do clima e do solo, onde grandes domínios são definidos pelo clima e domínios locais definidos pela composição do solo (TROPPMAIR, 2004). Segundo Vidaletti *et al.,* (2021) é fundamental para garantir a infiltração satisfatória da água no solo, mesmo sob chuvas intensas, desde que as condições estruturais sejam preservadas, evitando o selamento superficial e reduzindo perdas por escoamento.

A vegetação da Serra do Gandarela apresenta características de transição entre os Biomas Cerrado e Mata Atlântica, evidenciando uma diversidade de formações. Observam-se áreas de Mata Atlântica, representadas pelas Florestas Estacionais Semideciduais, além de campos limpos e rupestres, e em menor proporção áreas de Cerrado, com aspectos semelhantes ao campo sujo (SANO & ALMEIDA, 1998).

Segundo Lamunier *et al.* (2010), a análise integrada do mapa de vegetação, uso e ocupação do solo e os trabalhos de campo revelou uma diversidade de fitofisionomias, com predominância da Floresta Estacional Semidecidual e formações campestres, além de áreas destinadas à agropecuária, silvicultura com *Eucalyptus* e mineração de ferro.

3.4 - Hidrografia

A relevância dos recursos hídricos na área abrangida pela APA Sul RMBH é reconhecida desde antes da fundação de Belo Horizonte. Esta importância permanece, pois continua sendo uma das fontes para o abastecimento público da região metropolitana de Belo Horizonte, onde o incremento e a diversificação das atividades econômicas crescentes demandam recursos hídricos (DAVIS, PINTO & PINTO, 2005). Beato, Monsores & Bertachinni (2005) apresentam informações hidrogeológicas que apontam expressivo potencial hídrico subterrâneo para abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte.

De acordo com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) 2010, a Serra do Gandarela é um divisor das bacias hidrográficas estaduais do rio Piracicaba e do rio das Velhas com muitas nascentes e córregos (**Figura 4**). Dessa forma, torna-se um importante patrimônio hídrico, além de rios e cachoeiras presentes dentro do Parque Nacional da Serra do Gandarela (SANTOS, RUCHKYS & TRAVASSOS, 2021).

A Serra do Gandarela apresenta-se como mais uma das grandes reservas hídricas do QF e seus aquíferos são de extrema importância para as áreas de drenagens das bacias hidrográficas ali presentes (FRANCO, PORTILHO & DE SOUZA, 2007). As unidades aquíferas presentes na região fornecem quantidade elevadas de águas superficiais para as drenagens das bacias locais evidenciando imenso potencial subterrâneo (DAVIS, PINTO & PINTO, 2005) e (LAMOUNIER, CARVALHO & SALGADO, 2011).

A Formação Cauê, configura elevações de relevo nas porções SW e NW do Sinclinal Gandarela. O mergulho dos flancos para o interior da estrutura, direcionam a maior parte do fluxo das águas subterrâneas para o interior da bacia do rio Piracicaba. A rede de drenagem é fortemente controlada pela estruturação do sinclinal, onde as águas superficiais são direcionadas para a zona de charneira ao longo do rio Barão de Cocais ou São João (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020).

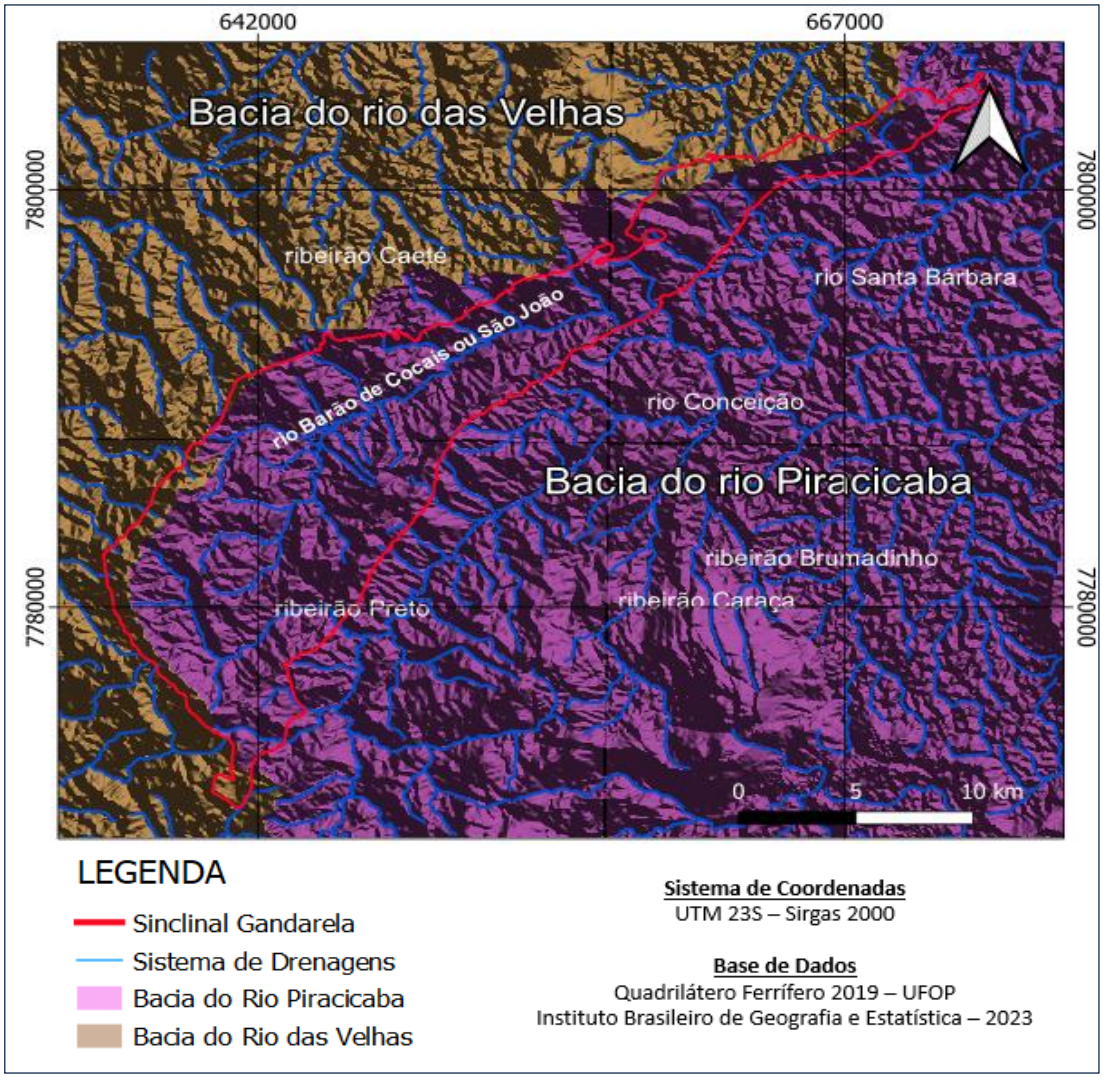


Figura 4: Mapa hipisiomêtrico com os limites da Bacia do Rio das Velhas e da Bacia do Rio Piracicaba com destaque para a área de estudo do Sinclinal Gandarela.

3.5 - Solo

No Quadrilátero Ferrífero, consequentemente no Sinclinal Gandarela, ocorrem intemperismo e erosão diferencial como processos de formação de solos (LAMOUNIER, CARVALHO & SALGADO, 2011). Lamounier *et al.* (2010) afirma que tanto as fitofisionomias, o uso e ocupação do solo e o relevo estão diretamente vinculadas ao contexto litoestrutural da região.

Na região da Serra do Gandarela, a cobertura pedológica é fortemente determinada pelo material de origem com formação de Cambissolos e Neossolos apresentando uma cobertura pouco espessa ou inexistente, além dos Argilossos, Gleissolos e Latossolos compondo o restante da área (SANTOS, RUCHKYS & TRAVASSOS, 2021).

A diversidade pedológica do Sinclinal Gandarela é condicionada diretamente pela sua litologia, conforme destacado por Carvalho Filho, Curi & Shinzato (2010): enquanto a

Formação Cauê origina solos oxídicos e profundos (Latossolos) ou rasos (Neossolos) com alto teor de ferro, a Formação Gandarela se destaca pela presença de carbonatos que podem gerar nichos de maior fertilidade natural em solos cársticos. Complementarmente, o Grupo Piracicaba resulta em solos de texturas variadas, como Argissolos e Cambissolos, cuja formação depende da composição de xistos e quartzitos aliada à inclinação do relevo.

Os campos rupestres ocorrem nas porções mais elevadas do relevo, geralmente associados às cangas e aos afloramentos rochosos, como itabiritos e quartzitos, caracterizados por solos pouco desenvolvidos. As rochas carbonáticas da Formação Gandarela e nos filitos do Grupo Piracicaba, observa-se menor resistência aos processos intempéricos, sujeitas a produção de uma maior quantidade de material friável, favorecendo o desenvolvimento de um perfil de solo mais espesso. Já os campos limpos se estabelecem sobre rochas mais frágeis do Grupo Caraça, como os filitos e quartzitos-filíticos, reforçando a estreita relação entre substrato geológico, morfologia do terreno e distribuição das formações vegetais (LAMOUNIER *et al.,* 2010).

3.5 - Geomorfologia

O Sinclinal Gandarela é uma megaestrutura sinformal de concavidade alongada na direção SW-NE, com seus flancos (NW e SE) evidenciados por elevados espigões na mesma direção (OLIVEIRA, ENDO & OLIVEIRA, 2005). Os sinclinais presentes no QF têm suas abas protegidas por litotipos mais resistentes, e dessa forma, permanecem suspensas (MARENT & SALGADO, 2010).

No entanto, a morfologia apresenta-se como resultado de escavação pós-Pliocênica com morros de topos aguçados com declividades variando de 30 a 45° e desnivelamentos entre 200 e 300 m. O relevo compreende alta densidade de drenagem, com padrões dentríticos, onde a porção ocidental do sinclinal se mostra com intensamente dissecado. A morfodinâmica apresenta as rochas silicosas como filitos, metagrauvacas e quartzitos menos favoráveis à alteração (BEATO, MONSORES & BERTACHINNI, 2005).

3.6 – Contexto Geológico

O Quadrilátero Ferrífero está situado na porção meridional do Cráton do São Francisco associado a evolução tectônica como resultado de três ciclos tectono-deformacionais principais: Jequié; Transamazônico e Brasiliano (ENDO, 1997). Já para Alkmin e Marshak (1998), o modelo evolucional do QF, resultou em orógenos discretos no Brasil, onde apresenta características de ambiente tectônico em geometria de domos e quilhas.

A complexidade tectônica é resultado de muitos ciclos compressionais e extensionais (BALTAZAR, 2007) onde a quebra da geometria original resultou em alto grau de variação nas continuidades das camadas (SILVA & COTA, 2021).

O Supergrupo Minas é constituído por rochas metassedimentares clásticas e químicas de idade paleoproterozóica, organizadas em uma sequência estratigráfica que, da base para o topo, compreende os seguintes grupos: Tamanduá (formações Cambotas e Morro Grande), Caraça (formações Moeda e Batatal), Itabira (formações Cauê e Gandarela), Piracicaba (Formação Cercadinho) e Sabará (Formação Saramenha). Essa sucessão apresenta características de um ambiente de transição continental-marinho, com dois grupos inferiores compostos por formações predominantemente clásticas, separados por uma possível descontinuidade erosional. Acima, ocorre um grupo sobreposto de maneira gradacional, formado por unidades de origem química ou bioquímica dominante (DORR, 1969).

Segundo Simmons (1968), o contato superior do Grupo Tamanduá com as rochas do Grupo Itabira é truncado, evidenciando uma leve discordância angular, além de contatos tectônicos e erosivos com terrenos compostos por rochas arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas e por complexos granito-gnáissicos. A posição estratigráfica do Grupo Tamanduá no contexto do Quadrilátero Ferrífero é objeto de debate. Dorr (1969) e Alkmim & Marshak (1998) o posicionam na base do Supergrupo Minas, entre os grupos Maquiné e Caraça, por meio de contato tectônico. Em contrapartida, Simmons & Maxwell (1961), Simmons (1968), Maxwell (1972) e Crocco-Rodrigues (1991) o consideram como pertencente ao topo do Supergrupo Rio das Velhas.

Segundo Dorr (1969), os quartzitos das Serras das Cambotas e do Caraça apresentam diferenças litológicas em relação àqueles da Formação Moeda, sendo considerados subordinados a esta última. A Formação Cambotas, que constitui a base do Grupo Tamanduá, é composta por filitos, filitos quartzosos e ortoquartzitos, com predominância de quartzo e presença subordinada de minerais como sericita, clorita, muscovita, cianita e clinozoisita (tanto nas ocorrências da Serra do Caraça quanto da Serra das Cambotas).

Os quartzitos exibem granulometria variando de areia muito fina a muito grossa, com predominância do tamanho areia fina. Algumas dessas rochas, devido à presença de clastos maiores e matriz significativa, seriam mais adequadamente classificadas como metaconglomerados (CROCCO-RODRIGUES, 1991) e (DAHER, COSTA & NOVO, 2020).

Endo (2003) denominou como Formação Morro Grande o conjunto litológico composto principalmente por xistos de sericita-clorita, com intercalações de filito ferruginoso, clorita xisto, xisto de quartzo-sericita, filito cinza, além de itabiritos dolomíticos e filíticos

Já o Grupo Caraça é constituído pelas formações Moeda e Batatal, onde a Formação Moeda é composta por metassedimentos arenoso podendo ter sua espessura variando de 30 a 1300 m (MAGALHÃES *et al.* 2022) no flanco E do Sinclinal Moeda. A Formação Batatal é composta por filitos sericíticos, filitos grafitosos e material carbonático onde no topo, é observado intercalações de metachert e lentes delgadas de hematitas (itabiritos) com lentes de quartzitos em contato gradacional a Formação Cauê. A espessura da Formação Batatal pode atingir 250 m (DORR, 1969) ou 300 m segundo Magalhães *et al.* (2022) no Sinclinal Moeda. O contato desta formação com a Formação Cauê é gradacional, evidenciado pela alternância de lentes de quartzito, enquanto o contato com a subjacente Formação Moeda é abrupto (SILVA, 2005).

O Grupo Itabira representa uma sequência de metassedimentos químicos que abrange a Formação Cauê sotoposta a Formação Gandarela. A primeira é constituída por itabiritos com bandas alternadas de hematita e quartzo, itabiritos anfibolíticos e carbonáticos com filitos e margas subordinados. a Formação Cauê possui espessura bastante variável, entre 200 e 400 m em áreas pouco deformadas e espessura de 1000 m em porções mais deformadas (DORR, 1969). No Sinclinal Moeda Magalhães *et al.* (2022) apresentam uma variação na espessura da formação entre 200 e 1400 m no flanco E enquanto Andrade *et al.* (2025) observam a variação entre 100 e 1000 m no flanco W e Tavares (2025) com espessura máxima de 1200 m no Sinclinal Dom Bosco.

Já a Formação Gandarela compreende uma sequência de dolomitos com intercalações pouco expressivas de itabiritos, filitos e filitos dolomíticos, sendo ambas interpretadas como ambiente marinho (RAPOSO, 1996), com uma espessura de 20 a 1650 m (MAGALHÃES *et al.* 2022) no Sinclinal Moeda com as porções mais espessas da formação entre 500 e 1800 m (TAVARES, 2025) ao longo do Sinclinal Dom Bosco. O contato da Formação Cauê com a Formação Gandarela é de natureza gradacional. No topo, o contato é erosivo discordante com a Formação Cercadinho (BABINSKI *et al.*, 1993).

O Grupo Piracicaba, composto pela Formação Cercadinho, é constituído por espessas camadas de quartzitos intercaladas por níveis de filitos prateados, por vezes ferruginosos, com dolomitos subordinados, xistos sericíticos e metaconglomerados (ENDO *et al.*, 2020). Pertencente ao Supergrupo Estrada Real, o Grupo Sabará é

representado pela Formação Saramenha, composta por clorita xistos, mica xistos com intercalações de metagrauvacas, quartzitos e formação ferrífera bandada (ENDO *et al.*, 2020).

Adentrando na área de estudo, as rochas metassedimentares do Supergrupo Minas, que constituem o Sinclinal Gandarela, estão sobrepostas ao Supergrupo Rio das Velhas e ao embasamento granítico do Complexo Metamórfico de Caeté (OLIVEIRA, ENDO & OLIVEIRA, 2005). O Supergrupo Minas inclui metassedimentos clásticos e químicos datados do Paleoproterozóico. (BABINSKI *et al*. 1991, RENGER *et al*., 1994, HARTMANN *et al*., 2006, CABRAL *et al*., 2012, KOGLIN *et al*., 2014 e RONCATO *et al*., 2024), é composto, da base para o topo, pelos grupos Tamanduá (formações Cambotas e Morro Grande), Caraça (formações Moeda e Batatal), Itabira (formações Cauê e Gandarela), Piracicaba (Formação Cercadinho) e Sabará (Formação Saramenha) (DORR, 1969). Porém, de acordo com a classificação de Endo *et al.* (2020) o Grupo Sabará faz parte do Supergrupo Estrada Real.

O Grupo Tamanduá aflora somente entre a porção NNW do Sinclinal Gandarela, representado na área pelas formações Cambotas e Morro Grande, em contato com as rochas do complexo granítico. Já o Grupo Caraça, com a presença das formações Moeda e Batatal, estão dispostas em todas as outras porções, bordejando o sinclinal.

Apesar da variação composicional entre os quartzitos das formações Moeda e Cambotas; e formações Batatal (filito) e Morro Grande (xistos), Simmons e Maxwell (1961), Dorr (1957 e 1969) definiram que os grupos Tamanduá e Caraça são constituídos predominantemente por psamitos e, subordinadamente, por pelitos e conglomerados aluviais a marinhos. Esses grupos registram a fase rifte e a transição do desenvolvimento de margem passiva (RENGER *et al.* 1994; ALKMIM & MARSHAK 1998).

As formações Cauê e Gandarela (Grupo Itabira) compõem a maior parte da área de estudo dentro do Sinclinal Gandarela. A Formação Cauê configura elevações de relevo nas porções SW e NW do Sinclinal Gandarela (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020). O contato com a Formação Gandarela é gradacional, porém no topo, o contato é erosivo discordante com a Formação Cercadinho, conforme apontado por Babinski, Chemale & Van Schmus (1993).

O Grupo Piracicaba sobreposto ao Grupo Itabira, é constituído por espessas camadas de quartzitos da Formação Cercadinho, intercaladas por níveis de filitos prateados (ENDO *et al.*, 2020). E finalmente, o Grupo Sabará que é representado pela Formação

Saramenha e, assim como a Formação Cercadinho, ocorre na porção central do Sinclinal Gandarela.

O arranjo estrutural do Sinclinal Gandarela se dá por meio de um megadobramento que se apresenta aberto e soerguido em sua porção oeste e com dobramento isoclinal apertado com vergência NW na porção leste da estrutura (DOOR, 1969) (**Figura 5**). A junção da porção nordeste da estrutura é uma resposta à deformação e à instalação de suítes intrusivas Borrachudos e Cocais durante eventos magmáticos proterozóicos, pós Minas (ENDO *et al*., 2019). Oliveira, Endo & Oliveira (2005) caracterizam como uma megaestrutura sinformal dobrada e reclinada com cavidade alongada da direção SW-NE de flancos ressaltados de mesma direção.

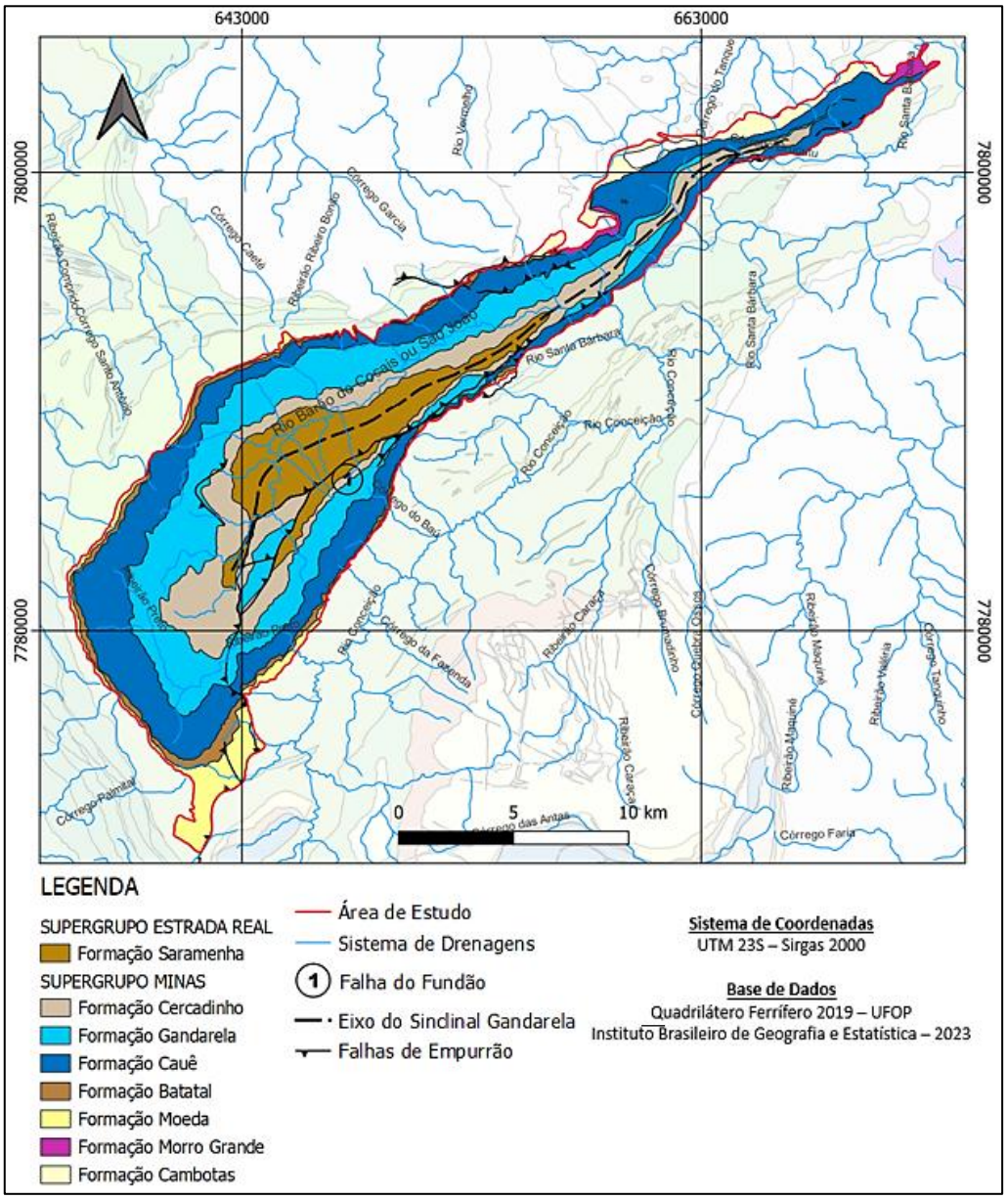


Figura 5: Mapa geológico com destaque em vermelho para a área de estudos do Sinclinal Gandarela.

A região do Sinclinal Gandarela é demarcada pela presença de falhas cisalhantes onde a descontinuidade regional presente no QF é definida como Sistema Falha do Fundão (DORR, 1969). Marshak & Alkmim (1989) elevam o patamar da Falha do Fundão como uma falha mestra basal que compõe um cinturão de dobramentos e cavalgamentos. Chemale Jr., Rosière & Endo (1991) observaram a continuidade do sistema de cavalgamentos presentes no Sinclinal Gandarela, onde forma uma conexão com a Falha das Cambotas, e, dessa forma, denominando-a como Sistema Fundão-Cambotas.

O rio Barão de Cocais ou São João, apresenta-se condicionado por controles estruturais possivelmente relacionados à geometria do sinclinal e a esses conjuntos de falhas desenvolvidos na região. Como principal drenagem da área de estudo, sua evolução ocorreu em estreita associação com a estruturação geológica local. Observa-se que o rio se encontra encaixado ao longo do traço da falha de *footwall*, a qual atua como nível de base regional.

3.7 - Hidrogeologia

Apesar da relevância hidrogeológica do Sinclinal Gandarela, ainda são escassos os estudos científicos voltados à caracterização sistemática das unidades aquíferas e à compreensão integrada da dinâmica hídrica regional. A maioria das investigações existentes foram conduzidas por empreendimentos minerários, com foco em áreas específicas e delimitadas pelas suas respectivas licenças operacionais, o que resulta em abordagens pontuais e fragmentadas.

O Sinclinal Gandarela é considerado como uma Unidade Morfotectônica do QF, assim como os outros sinclinais: Moeda, Alegria, Ouro Fino, Dom Bosco, Itabira e Homoclinal Serra do Curral. Essas unidades morfotectônicas podem ser entendidas como setores de potencial hidrogeológico que reúnem características hidrodinâmicas com maior capacidade de armazenamento, circulação e transmissão. Podem estar associados à distribuição interna das unidades aquíferas como a presença de descontinuidades (falhas, fraturas e zonas de dissolução) e/ou barreiras hidráulicas (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020).

Toda estrutura do sinclinal pode ser defina como um sistema aquífero devido a troca de água entre as unidades o compõe, porém Albuquerque & Rêgo (2012) consideram que o termo ‘sistema’ tem sido utilizado de forma descuidada. Sendo assim, definem sistema aquífero como uma estrutura bem delimitada em um conjunto de formações geológicas, onde seus aquíferos são conectados hidraulicamente, associados a presença de aquitardos e/ou aquicludes.

O Sinclinal Gandarela é limitado pelo contato das rochas do Complexo Metamórfico e Grupo Nova Lima. Esse complexo granito-gnáissico corresponde a aquíferos descontínuos fissurados. São aquíferos livres a semiconfinados pelas formações superficiais, heterogêneos e anisotrópicos, possuem porosidade e permeabilidade, onde mesmo com porosidade fissural possuem baixo potencial hidrogeológico (BEATO, MONSORES & BERTACHINNI, 2005) e (ANDRADE *et al.* 2025). Já o Grupo Nova Lima é considerado um aquitardo, dada a predominância de rochas de baixa a média permeabilidade (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020).

Os quartzitos da Formação Moeda constituem um aquífero de baixa permeabilidade e limitada capacidade de armazenamento hídrico. A rede de fissuras presentes confere-lhe uma característica heterogênea, anisotrópica e de natureza porosa/fissural (ANDRADE *et al.* 2025). Este aquífero é composto por metassedimentos quartzíticos com interestratificações de filito ou dolomito, apresentando um caráter descontínuo, do tipo fissural, e porosidade secundária resultante de esforços tectônicos (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020). Enquanto isso, a Formação Cambotas é relatada como quartzitos friáveis e também fraturados (DAHER, COSTA & NOVO, 2020), o que destacaria a importância das dessas fraturas para a condutividade hidráulica.

A unidade não aquífera referente ao filito Batatal se mostra como aquitardo, pois tem capacidade de armazenamento de água, porém incapaz de transmiti-la (ANDRADE *et al.* 2025), (LADEIRA, 2025) e (TAVARES, 2025). Amorim *et al.* (1997) classificam as rochas da Formação Batatal como aquífugo, sendo uma barreira hidráulica entre os aquíferos adjacentes. Mourão (2007) e Magalhães *et al.* (2022) consideram a Formação Batatal como uma unidade confinante de baixa permeabilidade, mesmo apresentando zonas de fraturas, em determinados locais, promovendo a conexão hidráulica entre seus aquíferos adjacentes.

O Aquífero Cauê é considerado o principal aquífero do QF (MAGALHÃES *et al*., 2022; FREITAS, DE PAULA & ANTUNES, 2025) devido à sua elevada capacidade de armazenamento e condutividade hidráulica. Com uma espessura média saturada de 400 m, pode apresentar dupla porosidade, tanto fissural quanto granular secundária (GONÇALVES, PEREIRA & VIEIRA, 2018; RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020). A variação do litotipo, a complexidade estrutural e as diferentes taxas de intemperismo contribuem para as diversas taxas de recarga e condutividades hidráulicas (MAGALHÃES *et al.,* 2022).

No setor centro-norte do Sinclinal Moeda e o segmento central do homoclinal da serra do Curral, a taxa de recarga no aquífero Cauê, sob condições naturais, apresenta valor

médio de 30,3% da precipitação anual, mas não ultrapassa os 47% (MOURÃO, 2007). Bertachini *et al.* (2012). Nas áreas de Apolo Sul e Mina de Capanema, avaliando recarga artificial por meio de cavas fechadas, no mesmo aquífero, aponta taxa de recarga elevada (87%) e esses valores podem chegar em torno de 452,87 a 485,22 mm/ano (MAGALHÃES *et al.,* 2022 e ZUPO *et al.,* 2025). A taxa de percentual de recarga varia de 9 a 49%, atingindo valores de precipitação de 1150,4 mm/ano a partir do ano de 2013/2014 (ANDRADE *et al.* 2025), mas não ultrapassando a média histórica de 1556,8 mm/ano (CRUZ *et al*., 2022).

O aquífero Cauê, dentre suas variações composicionais, as hematitas brandas são as mais favoráveis para presença de água, além dos trechos transicionais entre os litotipos e porções fraturadas, também indicando grande potencial para água (DANTAS *et al*., 2017). No aquífero, os valores de Q (m³/h), T (m²/dia) e K (m/s) variam de 41,2 a 79,7 m³/h, 9 a 168 m²/dia e $4,63x10^{-7}$ a $1,04x10^{-5}$ m/s (BERTACHINI, 2020), respectivamente, onde a condutividade hidráulica se apresentou coerente aos valores de 0,5 a 159,8 m²/dia (MESQUITA *et al.*, 2017).

De acordo com Silva, Neto & Bertachinni (1994), a Formação Gandarela é composta por dolomitos formando um aquífero cárstico muito heterogêneo e anisotrópico. A presença de foliação e bandamento favorece a percolação preferencial de água, porém o baixo grau de carstificação e colmatação por argilas, nas fraturas e condutos sugerem um pequeno potencial hídrico subterrâneo explotável.

O aquífero Gandarela é descontínuo do tipo fissural, varia de livre a confinado, fortemente anisotrópico, heterogêneo, com porosidade e permeabilidade secundárias condicionadas ao tectonismo e dissolução de carbonatos. A recarga principal se dá por infiltração de águas pluviais e localmente através da unidade aquífera Cauê, em área de topografia mais elevadas quando conectados por fraturas, e quartzítico Cercadinho. O fluxo subterrâneo é presente nas direções das fraturas, carstificações e segundo planos estratificados (BEATO, MONSORES & BERTACHINNI, 2005). Magalhães *et al*. (2022) e Zupo *et al.* (2025) indicam valores de taxa de recarga entre 258,79 a 323,48 mm/ano.

Embora o aquífero Gandarela seja classificado como um aquífero cárstico fraturado, em algumas áreas ele é menos permeável atuando como uma barreira hidráulica entre as rochas de quartzito Cercadinho e as rochas da formação ferrífera Cauê. Bertachinni (2002) indica que o rebaixamento efetuado no Aquífero Cauê não afetou as nascentes do Parque das Mangabeiras, pois estas nascentes são formadas por águas subterrâneas do Aquífero Cercadinho.

O sistema aquífero que compõem o Grupo Itabira possui a maior disponibilidade hídrica subterrânea (FERREIRA & BACELLAR, 2010). Dentre as unidades aquíferas Cauê, Gandarela e Moeda, o Aquífero Cauê apresenta maior condutividade hidráulica, assim como a maior taxa de recarga de 38,7% da pluviometria com reserva renovável do Aquífero Cauê, variando entre 27 milhões de m³/ano (MAGALHÃES *et al.,* 2022) a 29,3 milhões de m³/ano (ANDRADE *et al.* 2025).

Os quartzitos da Formação Cercadinho formam um aquífero do tipo granular e fissural com elevada porosidade e permeabilidade, confinado e intercalado com litotipos de filitos e metapelitos das unidades sobrejacentes, podendo estimar elevado potencial de explotação (SILVA, NETO & BERTACHINNI, 1994).

Já no Sinclinal Gandarela, as condições de interseção por estruturas tectônicas dão características de aquitardo ao filito, possibilitando a passagem d'água para a Unidade Moeda. Quando em condições de deformação intensa ou em função da presença de falhas e fraturas de maior expressão, apresentam maior capacidade de transmissão de água (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020).

A Geomil Serviços de Mineração (2019) relata evidências de comportamento como aquitardos, sem diferença potenciométrica entre o quartzito Moeda e os itabiritos do Cauê. Este comportamento pode ser decorrente de intenso fraturamento desta unidade proporcionando conexão hidráulica entre as demais unidades adjacentes. Assim como, na Faixa Tectônica Tamanduá-Mutuca, a grande densidade de estruturas rúpteis, favorecem a percolação de água subterrânea nos filitos (MOURÃO, 2008), e isso indica que a circulação de água nesses filitos, podendo incluir da Formação Morro Grande, é dependente da permeabilidade secundária.

A formação ferrífera, representada pela unidade aquífera Cauê, é tida como o principal sistema hidrogeológico apresentando dupla porosidade, fissural ou granular secundária, de transmissão e armazenamento de águas subterrâneas favoráveis (GONÇALVES, PEREIRA & VIEIRA, 2018) e (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020).

Em relação a unidade aquífera Gandarela, a Geomil Serviços de Mineração (2019), corrobora com a heterogeneidade dos dolomitos e afirma sobre o predomínio de calcário dolomítico de baixa solubilidade não favorecendo o transporte de estruturas cársticas que permitam o armazenamento e circulação de águas subterrâneas, sendo de baixa permeabilidade.

Na porção central do Sinclinal Gandarela a unidade aquífera Cercadinho apresenta potencial aquífero inferior ao percebido nas rochas das formações ferríferas (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020). Segundo Beato, Monsores & Bertachinni (2005), o aquífero está relacionado às camadas quartzíticas e é limitado na base por contato erosivo e pode estar localmente conectando os aquíferos Gandarela e Cauê por meio de estruturas tectônicas.

4- MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos empregados neste estudo seguiram uma abordagem sistemática que se iniciou com o levantamento bibliográfico e a subsequente aquisição e gestão das bases de dados disponíveis junto a entidades públicas. Na fase de estruturação do modelo, procedeu-se à definição dos limites da área de estudo, seguida pela delimitação das unidades aquíferas. Posteriormente, foi realizada a avaliação e definição das propriedades hidrogeológicas dessas unidades.

A etapa final do trabalho concentrou-se no balanço hídrico e do cálculo de reserva hídrica, culminando na elaboração dos mapas de superfície potenciométrica e análises multicritérios, onde a base de dados utilizada para a elaboração dos estudos estão apresentadas na **Tabela *1***.

Tabela 1: Base de dados e metadados utilizados para o desenvolvimento deste estudo

Nome	Instituição	Tipos de dado	Local de acesso
Base de Dados	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD)	Relatórios, outorgas e estudos de impactos ambientais	http://www.siam.mg.gov.br/siam
Séries Históricas de Monitoramento Pluviométrico	Agência Nacional de Águas (ANA)	Precipitação	https://www.snirh.gov.br/hidroweb
Base de Dados Quadrilátero Ferrífero (*shapefile*)	Universidade Federal de Minas Gerais - UFOP	Geologia	https://qfe2050.ufop.br
Base de Dados Cartográficos (*shapefile*)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE	Hidrografia e bacias hidrográficas, mapa de solos, cobertura vegetal, topografia, áreas urbanizadas e limites políticos	https://www.ibge.gov.br/geociencias

Nome	Instituição	Tipos de dado	Local de acesso
Quadrilátero Ferrífero Área Central 1:75.000	Serviço Geológico do Brasil - SGB	Mapa geológico e de recursos minerais	https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20490
Folha Santa Bárbara 1:25.000	Serviço Geológico do Brasil - SGB	Carta geológica	https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20496
Modelo Digital de Elevação	*Open Topography*	Camada *Raster*	https://opentopography.org/

4.1 - Aquisição e Gerenciamento da Base de Dados

Os dados utilizados neste trabalho consistem em séries históricas como piezômetros e instrumentos de monitoramento do nível d'água, captações de água (poços de bombeamento e captações superficiais), testes de bombeamento, vertedouros. Há dados com séries de monitoramento, documentos referentes aos Estudos de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), relatórios de pesquisa hidrogeológica e informações a respeito das outorgas de uso. Os dados são de ordem pública e adquiridos por meio dos sites da SEMAD (plataforma SIAM) e ANA (Plataforma Hidroweb).

O processo de validação estatística utilizado objetiva apresentar a consistência dos dados aplicando controle de qualidade relativo a informações básicas como coordenadas, dados de vazão e boa distribuição espacial dentro da área de estudo. De modo geral, os dados que não apresentaram informações básicas necessárias, foram invalidados e descartados. Na tratativa dos dados apresentados em relatórios foi utilizado o *software Engauger Digitizer*® (12.1) para auxiliar na extração dos registros disponibilizados em forma de gráficos.

A base de dados está quantificada em informações com 267 pontos distribuídos ao longo da área de estudo. Os dados estão divididos em 116 pontos superficiais, 151 pontos de informações subterrâneas e 6 pontos de estações pluviométricas localizados nas adjacências do Sinclinal Gandarela **(Apêndice A)**. Portanto, o tratamento dos dados ocorre por meio da avaliação, análise qualitativa e quantitativa das informações compiladas e apresentadas na forma de mapas utilizando o *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) *QGIS* (3.22.9).

A temporalidade dos dados foi avaliada, onde o comportamento do sistema hidrogeológico varia ao longo do tempo, porém a análise permitiu validar a consistência dos dados ao longo do tempo e a presença de possíveis erros ou anomalias, garantindo a qualidade das informações para o ano hidrológico adotado de 2017/2018.

A confecção das seções geológicas se deu a partir dos mapas geológicos regionais do QF, elaborados pelo Serviço Geológico do Brasil, no qual possibilitou a extração de informações de espessuras, contatos entre as formações geológicas e medidas estruturais. Utilizou-se a Carta Geológica e de Recursos Minerais - Quadrilátero Ferrífero Área Central na escala 1:75000 (SILVA *et al.* 2020) e a Folha Santa Bárbara na escala de 1:25000 (FERREIRA *et al*., 2020). As seções foram traçadas perpendicularmente às estruturas do Sinclinal Gandarela a fim de se obter a espessura real de cada formação/unidade aquífera dando subsídio para elaboração das seções hidrogeológicas, utilizando o *software AutoCAD*® (2024).

4.2 – Arcabouço do Sinclinal Gandarela

Como já mencionado, Albuquerque e Rego (2012) consideram sistema aquífero como uma estrutura delimitada dentro de uma bacia sedimentar, composta por diferentes formações geológicas, cujos aquíferos estão hidraulicamente conectados e associados à presença de aquitardos e/ou aquicludes. No caso do Sinclinal Gandarela, a caracterização do sistema aquífero foi fundamentada em parâmetros hidrogeológicos disponíveis na literatura sobre o Quadrilátero Ferrífero (QF), considerando formações geológicas distintas e suas variações estruturais dentro das propriedades hidrodinâmicas.

A caracterização das unidades hidroestratigráficas em áreas de elevada complexidade geológica e abrangência regional demandam uma abordagem criteriosa, uma vez que não é possível generalizar cada unidade litológica de forma simplificada. Para isso, faz-se necessário entender que unidade aquífera é um grupo de formações geológicas ou uma parcela da formação suficientemente permeável, capaz de fornecer água em quantidade significativa por poços ou nascentes (LOHMAN, 1972; MILLER, 1999; ANDRADE *et al.,* 2025). Magalhães *et al*. (2022) acrescentam que unidades aquíferas correspondem a unidades litoestratigráficas homogêneas em termos de litologia, estruturas presentes nas rochas, parâmetros hidrodinâmicos e produtividade.

No Sinclinal Gandarela, as unidades hidrogeológicas foram classificadas como aquíferos de acordo com suas semelhanças hidráulicas, litológicas e outras características pertinentes, conforme apresentado na **Tabela 2**. Cada formação do Supergrupo Minas apresenta variações geológicas e composicionais que resultam em parâmetros hidrodinâmicos distintos. Entretanto, divergências podem ocorrer na caracterização de uma mesma unidade hidrogeológica, dependendo da escala de estudo, já que características observadas em uma localidade podem diferir em outra

(BEATO, MONSORES & BERTACHINNI, 2005). Nesse aspecto pode-se mencionar o Aquífero Cauê com presença de porosidade granular e zonas de porosidade fissural.

A compartimentação de uma unidade aquífera, ou a junção de mais unidades, é definida a partir de parâmetros hidrodinâmicos semelhantes. No contexto dos grupos Tamanduá e Caraça, é definido que se registram tanto a fase de rifte quanto a transição para o desenvolvimento da margem passiva (RENGER *et al.,* 1994; ALKMIM & MARSHAK, 1998). Considerando a semelhança genética entre esses grupos (ENDO *et al*., 2019), para este estudo, as formações Cambotas e Morro Grande serão tratadas como variações faciológicas das formações Moeda e Batatal, respectivamente, sendo interpretados como pertencentes às mesmas unidades hidrogeológicas.

Tabela 2: Propriedades hidrodinâmicas das unidades aquíferas presentes na literatura científica.

Unidades Aquíferas	Transmissividade (m^2/dia)	Vazão média (m^3/h)	Condutividade Hidráulica (m/s)	Capacidade Específica (m^3/h/m)	Nível d'água (m)	
					máximo	médio
Aquífero Cauê Granular e Fissural	9[11] a 1500[1][6]	0,62[9] a 493[8]	$9{,}45\times10^{-7}$[7] a 10^{-3}[6]	$2{,}8\times10^{-2}$ a 151,61	159,00	50,77
Aquífero Cárstico Gandarela	$1{,}16\times10^{-6}$ a $1{,}15\times10^{-5}$[7]	2,4[8] a 440[8]	10^{-8}[1] a 8×10^{-8}[10]	$0{,}2\times10^{-1}$ a 38,26	151,00	35,82
Aquífero Quartzítico	50[2] a 600[5]	0,1[8] a 18[5]	$3{,}5\times10^{-9}$[6] a 10^{-5}[4]	-	126,00	36,73
Aquitardo Filítico	-	7[6]	$9{,}95\times10^{-13}$[6] a $5{,}2\times10^{-8}$[12]	-	112,00	58,66
Aquífero Cercadinho	90[5]	10 a 50[1]	$5{,}0\times10^{-7}$[3]	-	173,00	45,23

Fonte: Compilado de [1]Beato, Monsores & Bertachinni (2005)/ [2]Silva, Neto & Bertachinni (1994)/ [3]Hidrovia (2007)/ [4]Ramos, Cordeiro & Fernandes (2020)/ [5]Bertachinni (1994)/ [6]Mourão (2007)/ [7]Magalhães(2023)/ [8]Beato, Monsores & Bertachinni (2005)/ [9]Dantas *et al.* (2017)/ [10]Andrade *et al.* (2025)/ [11]Mesquita *et al.* (2017)/ [12] Zupo *et al*. (2025)

Fatores como morfologia, geologia estrutural e geometria do sinclinal desempenham papel fundamental na delimitação dos compartimentos hidrogeológicos. No Gandarela, aspectos como as falhas relacionadas ao Sistema Cambotas-Fundão e a densidade do sistema de drenagem influenciam diretamente essa compartimentação.

Nesse contexto, os limites de influência da área de estudo foram determinados por litotipos presentes na estrutura que compõe o Sinclinal Gandarela. Na modelagem hidrogeológica, as condições de contorno definem fronteiras hidráulicas ou físicas (Iritani, 1999).

Superfície Potenciométrica

Com a consolidação da base de dados, os pontos foram validados para a elaboração da potenciometria da área de estudo, nos quais os que não apresentavam informações básicas necessárias como nível d'água e a cota dos poços foram descartados. Em algumas localidades observou-se uma concentração de poços tubulares com informações de nível d´água, devido ao trabalho apresentar uma escala regional. Foram utilizadas as cargas hidráulicas das nascentes, e para a ampliação das informações da potenciometria da área, usou-se a base de dados de drenagens e topografia do (IBGE, 2021).

Com a utilização do *software QGis versão 3.22.9* foram plotados 479 pontos de interseção dos níveis topográficos e drenagens **(Apêndice B)**, considerando que os pontos de drenagem apresentam um potencial hidráulico equivalente à própria topografia viabilizando o traçado das equipotenciais. Foram traçados potenciais em intervalos de 100 m para definição e delimitação das equipotenciais. Consequentemente aplicou-se, na camada vetorial gerada, o método de interpolação utilizando a ferramenta TIN e a partir disso, gerar um mapa potenciométrico 3D.

Com o objetivo de compreender as condições de fluxo regional das águas superficiais e subterrâneas no Sinclinal Gandarela e a partir do mapa de superfície potenciométrica, consolidou-se a integração de diferentes fontes de informação: base de dados topográfica, medidas de nível d'água em piezômetros, registros de Indicadores de Nível d'Água (INAs), além das cotas altimétricas de cursos d'água e nascentes identificadas.

Os níveis d'água da base de dados abrangeram diversos pontos distribuídos nos aquíferos e aquitardos que compõem o Sinclinal Gandarela. A partir desses dados, foi possível interpolar superfícies equipotenciais, permitindo a representação espacial do gradiente hidráulico e, consequentemente, a inferência das direções preferenciais de fluxo subterrâneo.

Essa metodologia possibilita não apenas a caracterização das condições hidrogeológicas regionais, mas também fornece subsídios para a avaliação da

conectividade entre sistemas aquíferos, da recarga e descarga natural, e da interação entre águas superficiais e subterrâneas.

4.3 – Balanço Hídrico com Análise Multicritério da Recarga Aquífera em Ambiente SIG

A somatória das quantidades de água que entram e saem de uma determinada região, em um certo intervalo de tempo é definido como balanço hídrico. O que entra no sistema é a água de precipitação e o que sai é o resultado da evapotranspiração (TOMASELLA & ROSSATO, 2005).

Para o cálculo de balanço hídrico foram feitas análises pluviométricas a partir de dados extraídos do portal Hidroweb. Dentre os dados, foram avaliadas estações que apresentaram dados com séries históricas completas entre 1991 a 2023. Selecionou-se seis estações pluviométricas que se encontravam nos municípios no entorno da área de estudo e com suas localizações possibilitou separar as áreas em polígonos conforme o método Thiessen (1911).

Posteriormente, calculou-se o excedente e déficit hídrico, as evapotranspirações real e potencial pelo método do balanço hídrico climatológico de Thornthwite & Mather (1955) utilizando as planilhas de cálculo desenvolvidas por Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998). Foi avaliada a média pluviométrica dentre as séries históricas observadas das estações, e assim, foi escolhido o ano hidrológico (2017/2018) que mais se aproximou dessa média pluviométrica **(Apêndice C)**.

Para a determinação do balanço hídrico climatológico, é importante definir da capacidade de água disponível no solo (CAD). Esse parâmetro corresponde ao teor de umidade que permanece retido no solo após a drenagem gravitacional, sem reposição hídrica na superfície (FEITOSA *et al.*, 2008). Representa, portanto, o limite máximo de armazenamento hídrico no solo que pode ser efetivamente utilizado pelas plantas, constituindo variável na estimativa de déficit e excedente hídrico.

Jerszurki, Souza & Adamuchio (2018) indicam estudos voltados à caracterização da disponibilidade hídrica, com de valores de CAD variando de 20 a 320 mm. Nesse contexto foi estabelecido, como referência metodológica, o valor de 150 mm para o CAD no Sinclinal Gandarela, como um todo.

O balanço hídrico climatológico obtido fornece subsídios para compreender a dinâmica da disponibilidade de água ao longo do ano. O resultado auxilia na análise de recarga por meio da avaliação multicritério em SIG, conforme a metodologia aplicada nos

estudos de Galvão, Hirata & Conicelli (2018); Gualli *et al. (*2023) e Intriago, Galvão & Conicelli (2023). São utilizados mapas temáticos (ou mapas critério) como variáveis de análise multicritério, permitindo a geração de um mapa com zonas de recarga conforme equação determinada.

Conforme o mapa pedológico (IBGE, 2021), os solos presentes na área possuem variações de suas características refletindo em suas permeabilidades e separados em classes distintas. A partir do mapa base foram reclassificados em arenosos ou argiloso-siltosos e atribuídos valores de coeficiente de escoamento subterrâneo (Cs) para cada um. O mesmo foi feito para o mapa de cobertura vegetal (IBGE, 2021), onde as características de vegetação possibilitaram reclassificá-los como florestas e savanas ou área antropizadas e agropecuária, e atribuído valores de Cs. Para os dois mapas o coeficiente de escoamento foi definido conforme análise dos valores apresentados por Wilken (1978); Villela & Mattos (1975) e Garcia (2005).

Como uma terceira variável à analise multicritério, foi inserido o mapa de declividade, a partir do tratamento de imagem do Modelo Digital de Elevação. Os valores de Cs estão relacionados ao grau de declividade adotado pela *American Society of Civil Engineers* (1969), onde 2% é de baixa declividade, 2 a 7% declividade moderada e acima de 7% alta declividade.

A **Tabela 3** apresenta os valores de Cs atribuídos conforme às categorias discretizadas para esse trabalho. Com a reclassificação dos tipos de área para os mapas foi possível determinar 12 classes com seus respectivos valores para o escoamento superficial conforme a **Tabela 4**.

Tabela 3: Valores atribuídos ao coeficiente de escoamento subterrâneo (Cs) às categorias para a análise multicritério.

Tipo de Área	Coeficiente de Escoamento Subterrâneo (Cs)*
Permeabilidade do Solo (C1)	
Arenoso	0,4
Argilo-siltoso	0,1
Cobertura Vegetal (C2)	
Florestas e Savanas	0,2
Áreas Antropizadas e Agropecuária	0,1
Declividade (%) (C3)	
< 2	0,3
2 a 7	0,2
>7	0,1

*Valores atribuídos conforme Wilken (1978); Villela & Mattos (1975) e Garcia (2005) e *American Society of Civil Engineers* (1969).

Tabela 4: Valores do coeficiente de escoamento de cada classe conforme as categorias adotadas.

Classes de Escoamento	Permeabilidade do Solo	Cobertura Vegetal Capacidade de Infiltração	Declividade do Terreno (%)	Coeficiente de Escoamento	
	C1	C2	C3	C = 1 - (C1 + C2 + C3)	C
Classe 1	Terrenos arenosos	Florestas e savanas	< 2	C = 1 - (0,4 + 0,2 + 0,3)	0,10
Classe 2			2 a 7	C = 1 - (0,4 + 0,2 + 0,2)	0,20
Classe 3			>7	C = 1 - (0,4 + 0,2 + 0,1)	0,30
Classe 4		Áreas antropizadas e agropecuária	< 2	C = 1 - (0,4 + 0,1 + 0,3)	0,20
Classe 5			2 a 7	C = 1 - (0,4 + 0,1 + 0,2)	0,30
Classe 6			>7	C = 1 - (0,4 + 0,1 + 0,1)	0,40
Classe 7	Terrenos argilo-siltosos	Florestas e savanas	< 2	C = 1 - (0,1 + 0,2 + 0,3)	0,40
Classe 8			2 a 7	C = 1 - (0,1 + 0,2 + 0,2)	0,50
Classe 9			>7	C = 1 - (0,1 + 0,2 + 0,1)	0,60
Classe 10		Áreas antropizadas e agropecuária	< 2	C = 1 - (0,1 + 0,1 + 0,3)	0,50
Classe 11			2 a 7	C = 1 - (0,1 + 0,1 + 0,2)	0,60
Classe 12			>7	C = 1 - (0,1 + 0,1 + 0,1)	0,70

Com base no balanço hídrico climatológico do ano hidrológico de 2017/2018 e nos valores de Cs atribuídos conforme os mapas critério produzidos, cada linha apresenta os parâmetros necessários para o cálculo da recarga. As tabelas do **Apêndice D** detalham os parâmetros adotados em cada linha, incluindo os dados de entrada e as respectivas referências utilizadas nos cálculos:

Linha A – Precipitação Média Mensal (mm) com valores obtidos no balanço hídrico;

Linha B – Temperatura Média Mensal (°C) obtidos, também, no portal Hidroweb;

Linha C - Evapotranspiração Potencial (mm) calculados por meio da tabela de Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998);

Linha D – Coeficiente de escoamento (C) atribuído conforme o cálculo da **Tabela 4**;

Linha E – Escoamento superficial que corresponde à fração do escoamento deslocado sobre a superfície do solo até o canal de drenagem mais próxima. O cálculo é multiplicação Linha A x Linha D;

Linha F – Infiltração que representa o volume de precipitação que penetra na superfície do solo. É a diferença entre a precipitação total e o escoamento superficial (Linha A − Linha E);

Linha G – Períodos de excesso ou déficit hídrico no solo, calcula-se a diferença entre a infiltração e a evapotranspiração potencial (Linha F - Linha C). Valores positivos indicam armazenamento de água no solo e valores negativos do solo seco;

Linha H – Perda de água acumulada como a soma dos valores negativos adquiridos na Linha G. Valores maiores ou igual a zero, registra-se zero e prossegue-se para o mês seguinte. Se for um valor negativo, registra-se o valor negativo obtido;

Linha I – Capacidade de campo no qual refere-se ao conteúdo de umidade retido no solo alguns dias após a saturação e fim na drenagem livre sem o processo de percolação descendente. Para a área de estudo, adotou-se o valor de 150 mm com objetivo de padronizar uma área de escala regional e com variações dos tipos de solo. A adoção desse valor permite calcular, de forma mais realista, os períodos de déficit hídrico, quando a demanda atmosférica excede a capacidade de retenção do solo, e de excedente hídrico, quando há acúmulo de água além da capacidade de armazenamento.

Linha J – Variação da capacidade de campo onde representa a alteração mensal da umidade do solo, obtida pela diferença entre a capacidade de campo de um mês e a do mês anterior (Linha I);

Linha K – Déficit hídrico quando a evapotranspiração excede a precipitação e toda a umidade previamente disponível já foi utilizada. É calculado pela diferença entre Linha G (quando apresenta valores negativos) e variação da capacidade de campo (Linha J);

Linha L – Evapotranspiração real onde se quantifica a água efetivamente removida da superfície por processos de evaporação e transpiração. É a diferença entre a evapotranspiração potencial e o déficit hídrico (Linha C - Linha K);

Linha M – Percolação que após a capacidade de campo atingir seu valor máximo, o excesso se infiltração, através do solo até regiões mais profundas. Ocorrem nos meses em que a infiltração excede a evapotranspiração potencial e a umidade do solo ultrapassa sua capacidade máxima. O cálculo e feito Linha G - Linha J, quando os valores da Linha G forem positivos. Essa linha, finalmente apresenta os valores de recarga em cada classe, nas quais serão representadas no mapa de análise multicritério.

5 – RESULTADOS

5.1 – Arcabouço do Sinclinal Gandarela

A presença do Sistema Fundão-Cambotas do Sinclinal Gandarela corresponde ao sistema de falhas cisalhantes e cavalgamentos definido por Dorr (1969), Marshak & Alkmim (1989) e Chemale Jr., Rosière & Endo (1991). Estas descontinuidades se mostram importantes para auxiliar nos estudos de compartimentação da área.

O Sistema Fundão-Cambotas poderia atuar de duas formas. Ele pode ser uma zona de alta permeabilidade (fraturamento facilitando a recarga e circulação de água) ou uma barreira hidráulica (quando a presença de argilominerais ou milonitos oblitera a porosidade, isolando compartimentos aquíferos). Para a confirmação destas características seriam necessário mais estudos in situ para a compreensão dessa dinâmica hidrogeológica-estrutural.

Sendo assim, para melhor detalhamento das unidades aquíferas, foram propostas seções geológicas ao longo de toda estrutura da área de estudo para auxiliar no modelo geológico **(Figura 6)**. As seções foram projetadas perpendicularmente às estruturas ao longo do Sinclinal Gandarela têm o objetivo de se obter as espessuras reais de cada unidade aquífera.

É possível observar a variação da geometria do sinclinal, onde possui dobra mais aberta na porção SW da seção B-B’ e dobra muito fechada a NE da área, na seção M-M’, conforme apresentado nas seções geológicas do **Apêndice E.** Da porção SW para NE, o Sinclinal Gandarela se apresenta como uma dobra sinforme reclinada e aberta (entre seções A-A’ a H-H’). Na sequência do caminhamento o dobramento se torna mais apertado e, por vezes, mais reclinado entre as seções (de K-K’ a R-R’).

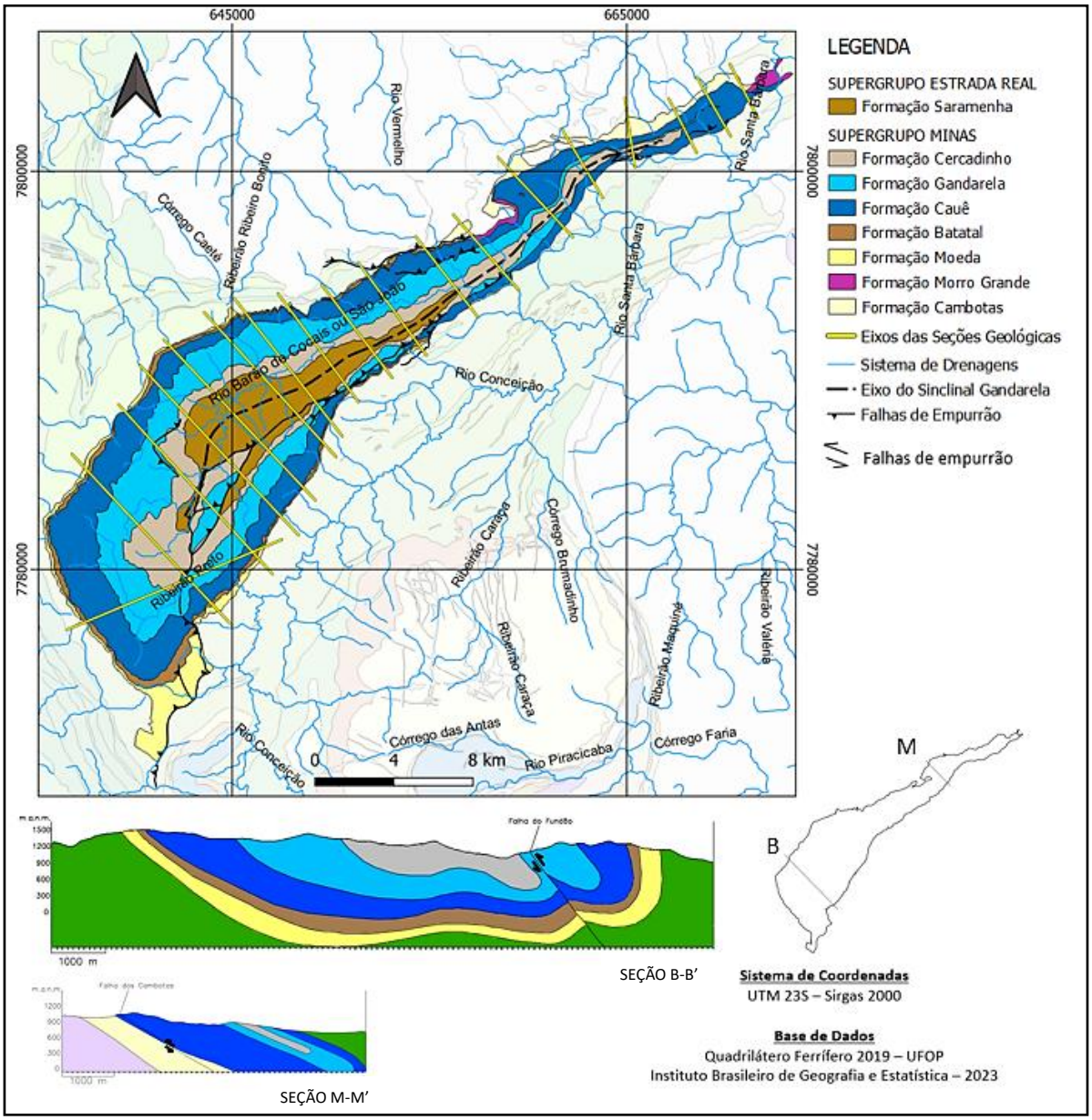


Figura 6: Mapa geológico (adaptado de ENDO *et al.*, 2019) com os eixos das seções geológicas propostas para elaboração do modelo geológico do Sinclinal Gandarela.

Para o Sinclinal Gandarela são apresentados três compartimentos divididos entre os setores A, B e C, definidos pela morfologia, geologia estrutural da área e conforme a geometria do Sinclinal Gandarela e suas falhas pertencentes ao Sistema Cambotas-Fundão. Ainda associado às falhas avalia-se a densidade do sistema de drenagem, onde na porção NE do sinclinal há uma menor concentração.

A relação entre os setores A e B é apresentada pela conexão da Falha de Fundão, que divide a porção mais ao sul do Sinclinal Gandarela com pacotes de cavalgamento. A presença do Sistema Fundão-Cambotas, que corresponde ao sistema de falhas cisalhantes e cavalgamentos definido por Dorr (1969), Marshak & Alkmim (1989) e

Chemale Jr., Rosière & Endo (1991). Estas descontinuidades se mostram importantes para auxiliar na definição da compartimentação da área.

A partir dos perfis geológicos é possível observar a variação da geometria do Sinclinal Gandarela. A porção SW do sinclinal possui dobras abertas compreendendo os setores A e B, divididos pela Falha do Fundão. O setor A, com maior extensão de área, contém um maior aporte d'água dos limites SW e NW para o interior do sinclinal na principal drenagem, o rio Barão de Cocais ou São João. Já o setor B, com menor extensão em área, apresenta-se topograficamente mais elevado que o setor A em alguns pontos, menor densidade no sistema de drenagens e engloba uma maior recorrência de falhas do Sistema Cambotas-Fundão **(Figura 7)**.

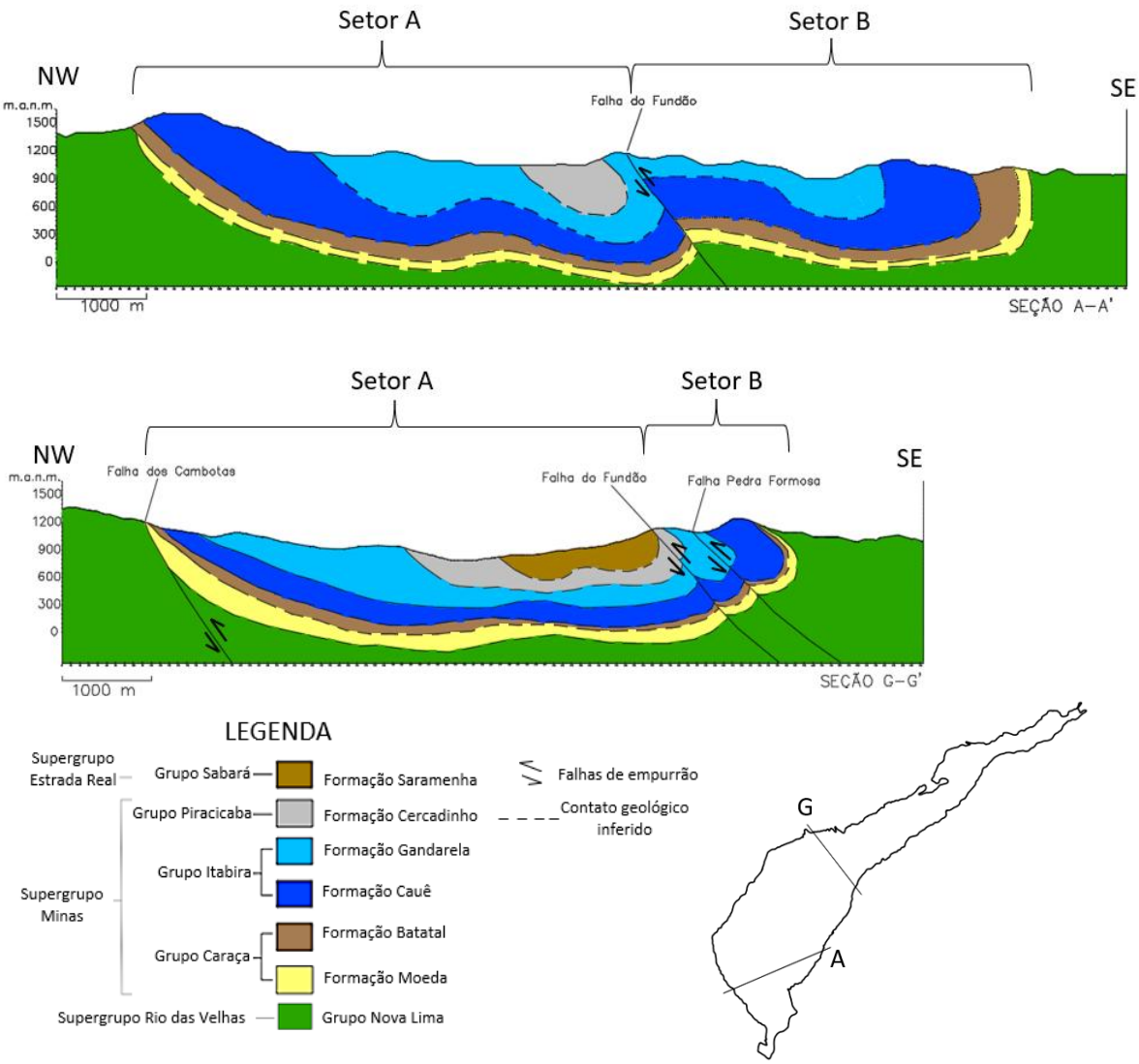


Figura 7: A seção geológica B-B' na porção mais a SW da área e a seção G-G' na porção SW e central. Ambas apresentando as divisões dos setores A e B da compartimentação da área.

O setor C foi proposto, separado dos demais setores, devido a estruturação da região N-NE e do sistema de drenagens. É uma área caracterizada como o fechamento do

Sinclinal Gandarela, em uma dobra apertada, com algumas faixas mais reclinadas (seção M-M'), diferentemente do que ocorre na porção ao sul da área, além de apresentar menor densidade de drenagens em relação aos setores A e B **(Figura 8)**.

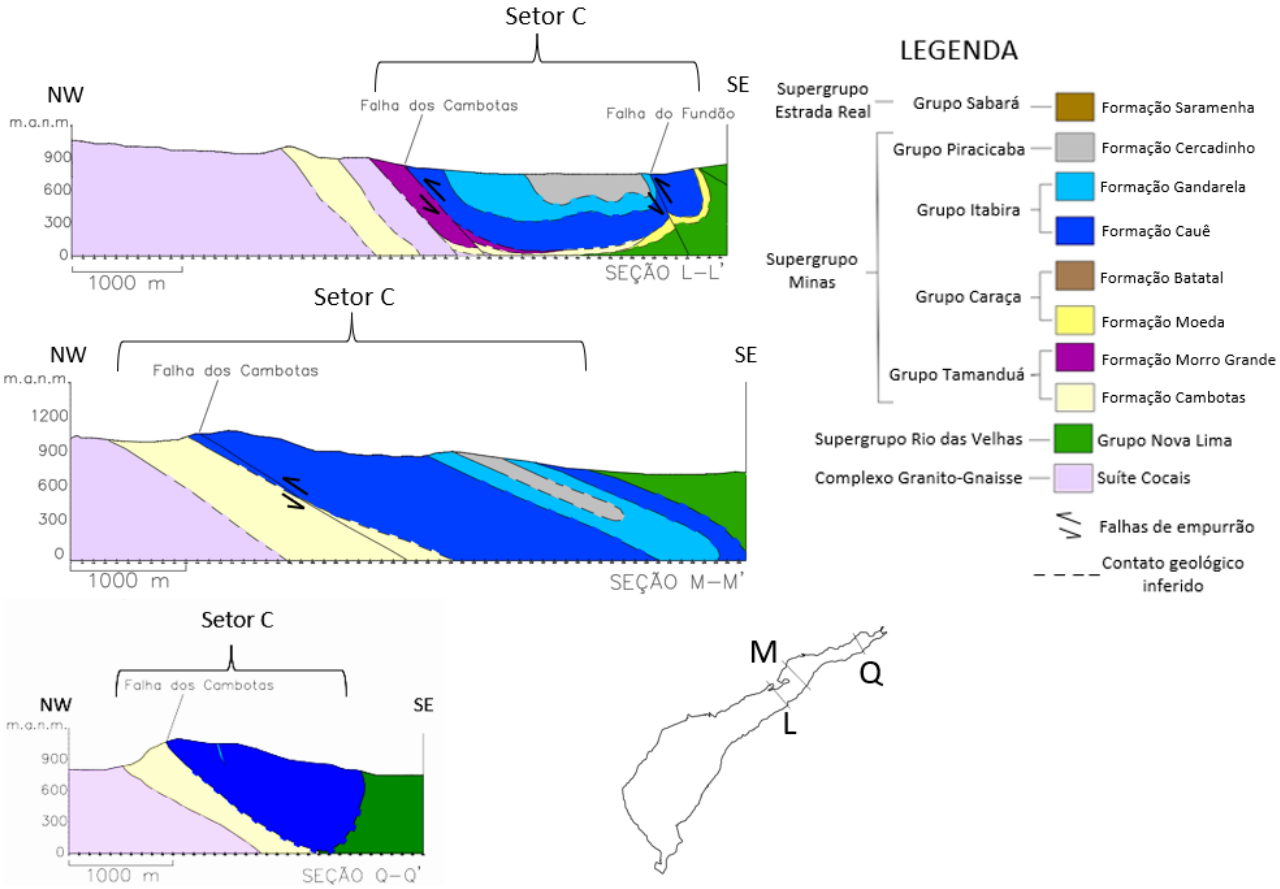


Figura 8: As seções geológicas na porção NW da área de fechamento estrutural do Sinclinal Gandarela e localizadas no Setor C da compartimentação da área.

As rochas que margeiam o sinclinal configuram o limite litológico do sistema, marcado pela variação física associada às rochas metassedimentares. Esse limite litológico é fundamental para compreender a compartimentação regional da estrutura, pois estabelece barreiras naturais à circulação subterrânea, onde a heterogeneidade das unidades adjacentes reforça a complexidade do sistema. A geometria e, principalmente, a densidade de drenagens do sinclinal corroboram com a compartimentação proposta em três setores **(Figura 9),** conforme apresentado das seções geológicas.

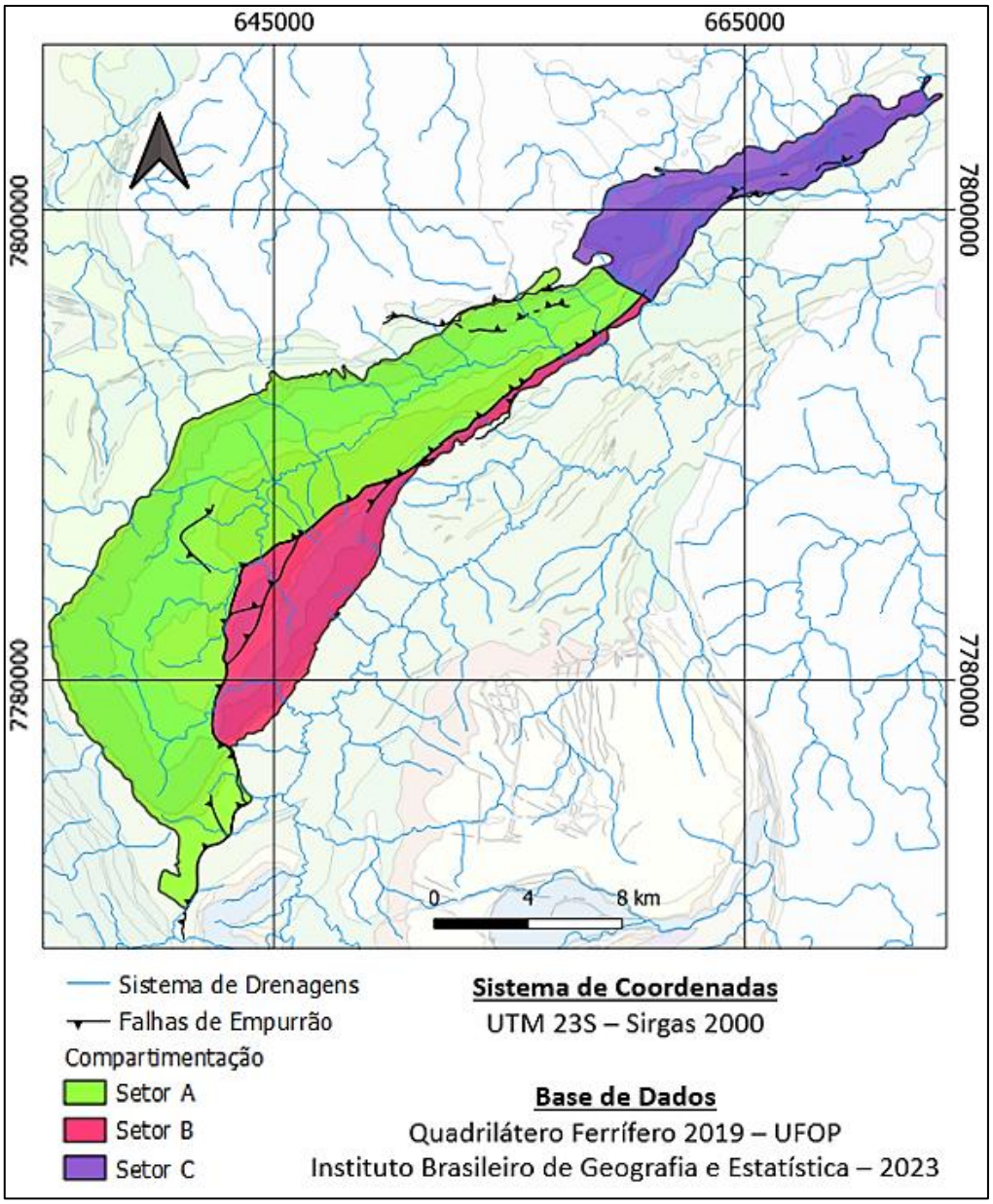


Figura 9: Mapa de compartimentação do Sinclinal Gandarela em três setores de acordo com a geometria, sistema de falhas e densidade de drenagens.

Já no contexto da hidrogeologia dentro do Sinclinal Gandarela, cada unidade geológica apresenta características distintas. Dessa forma, cada unidade hidrogeológica é derivada da respectiva unidade geológica para assim, serem compartimentadas ou associadas. As unidades aquíferas possuem particularidades hidrogeológicas e hidrogeoquímicas próprias estando conectados hidraulicamente por fraturas, condutos de dissolução ou por gravidade (Beato, Monsores & Bertachinni, 2005).

Para a área de estudo foram consideradas as unidades aquíferas quartzítica, Gandarela, Cauê, quartzítica Cercadinho; e unidades não aquíferas como o aquitardo Batatal e Morro Grande baseados nos valores dos parâmetros hidrodinâmicos e

resultados de vazão **(Figura 10)**. As rochas do complexo granito-gnáissico, mesmo com porosidade fissural, possuem potencial hidrológico baixo (BEATO, MONSORES & BERTACHINNI, 2005); (ANDRADE *et al.* 2025) e as rochas do Grupo Nova Lima com baixa a média permeabilidade (RAMOS, CORDEIRO & FERNANDES, 2020) influenciam na delimitação física externa ao sinclinal.

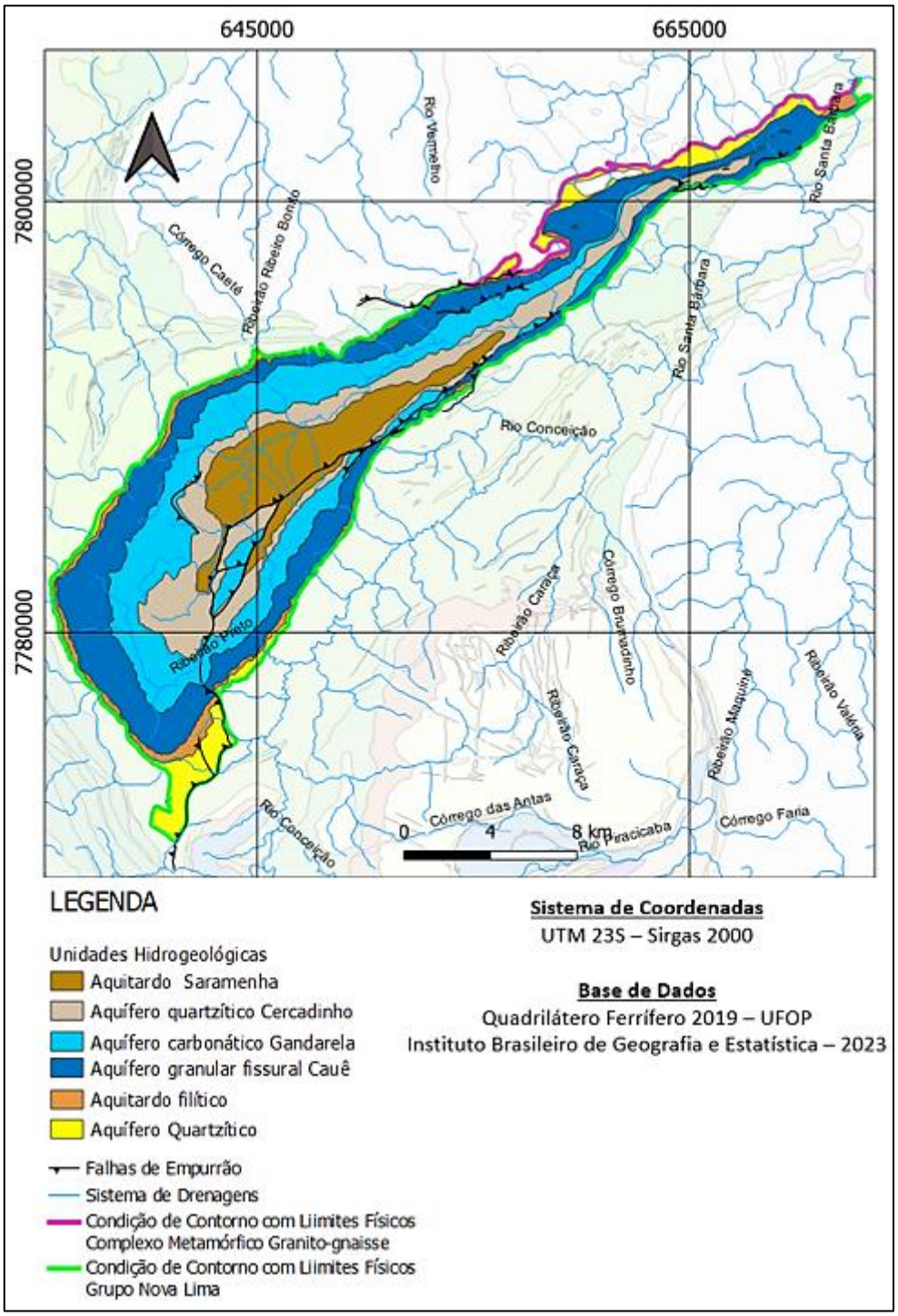


Figura 10: Mapa hidrogeológico do Sinclinal Gandarela com as condições de contorno das delimitações físico-litológicas do Complexo Metamórfico granito-gnaisse (em rosa) e Grupo Nova Lima (em verde).

Sotoposto ao Supergrupo Minas, a unidade não aquífera xistosa (Nova Lima) geralmente é considerada como aquitardo, e assim permanecerá para esse estudo, baseando-se nos valores de condutividade hidráulica e vazão média muito abaixo dos valores encontrados nas unidades aquíferas. Tais valores também se mostram baixos para o complexo metamórfico granito-gnaisse.

Já no Sinclinal Gandarela, as unidades aquíferas estão diretamente relacionadas com as respectivas unidades geológicas, com exceção da unidade aquífera quartzítica representada pelas formações Moeda e Cambotas associadas, na porção N da área. As formações são compostas por quartzitos e caracterizados em uma mesma gênese formacional. Na porção SW do sinclinal, o aquífero quartzítico se mostra, por vezes totalmente confinado e livre em alguns pontos, podendo atingir uma profundidade próxima de 1500 m, conforme seção geológica B-B. Já na porção NE da área de estudo, apresenta uma característica de aquífero livre ou semi-livre e com sua profundidade em torno de 1000 m (**Figura 7** e **Figura 8**).

As unidades Batatal e Morro Grande também foram unificadas em função, também, de suas características genéticas e definidas como uma unidade não aquífera devido sua condição pouco permeável podendo chegar a valores 9,95 x 10^{-13} m/s (MOURÂO, 2007). É constituída predominantemente de filito, e em uma concepção geral, forma uma barreira hidráulica separando a unidade aquífera Cauê da unidade aquífera quartzítica, que ao confinar a base do primeiro, em uma estrutura na forma de sinclinal gera uma bacia de acumulação de grande potencial produtivo. No entanto possui zonas fraturadas que possibilita a conexão hidráulica entre os aquíferos. A **Figura 7** e **Figura 8** também indicam que essa unidade não aquífera pode atingir profundidades aproximadas de 1200 m na porção SW e 1000 m na porção NE.

O Grupo Tamanduá aflora somente entre a porção NNW do Sinclinal Gandarela, representado na área pelas formações Cambotas e Morro Grande, e está em contato com as rochas do complexo granito-gnaisse. Já o Grupo Caraça, com a presença das formações Moeda e Batatal, estão dispostas em todas as outras porções do sinclinal.

O aquífero Cauê é o principal aquífero da APA Sul RMBH e consecutivamente QF, pelo seu elevado potencial produtivo. Possui dentro do Sinclinal Gandarela a maior área e apresenta-se de forma linear e contínua, o que favorece taxas mais elevadas de recargas por meio de infiltração de águas pluviais. Em toda extensão do sinclinal se apresenta como aquífero livre a confinado de profundidade variando entre 800 a 1000 m na porção SW e de 900 até 1200 m, a NE da área (**Figura 7** e **Figura 8**).

A unidade aquífera Gandarela, de importância localizada, encontra-se estratigraficamente sobreposta a unidade Cauê. Apresenta-se também, com grande área de forma linear e contínua, como um aquífero livre a confinado com a profundidade variando de 800 a 1000 m em todo sinclinal (**Figura 7** e **Figura 8**).

A unidade aquífera Cercadinho não apresenta correlação com a unidade aquífera quartzítica mencionada anteriormente. Encontra-se acima dos aquíferos Gandarela e Cauê concentrado na porção central do Sinclinal Gandarela e ao longo do eixo da estrutura, se apresentando delgado no sentido NE da área. Possuem recarga preferencial por águas pluviais e cursos d'água, como o rio Barão de Cocais ou São João, de maior relevância na região. O aquífero possui profundidade aproximada de 600 m na porção SW e de 400 m a NE do sinclinal.

Superfície Potenciométrica

Observa-se que a geomorfologia do sinclinal garante que o fluxo hídrico superficial seja direcionado para as porções centrais, sentido ao eixo da megadobra da estrutura. Os flancos elevados nas bordas do sinclinal agem como divisores topográficos d'água promovendo divergência no sentido das linhas fluxos.

Com a análise da topografia associada às drenagens superficiais foi possível delimitar, regiões divisoras de água, localizadas nas porções S, SW e SE do Sinclinal Gandarela. A região divisora d'água na porção SW e S está diretamente relacionada à Serra do Gandarela onde, predominantemente, compreende as rochas do aquífero Cauê, enquanto a SE da área o divisor d'água se mostra presente nos aquíferos Cauê e Gandarela.

As equipotenciais de 1500 são as linhas de maior valor representadas no mapa, predominantemente, nas porções W e SW, região definida pela compartimentação hidrogeológica do setor A, onde se localiza a Serra do Gandarela. Na porção SE as equipotenciais variam entre 1100 e 900, localizadas nas proximidades dos limites da área de estudo e correspondem ao setor B. À NE há equipotenciais de níveis variando de 1200 e abaixo 700, compreendem o setor C.

Finalmente, ao centro do sinclinal, observa-se a predominância da equipotencial 800, delimitada paralelamente ao eixo da dobra da estrutura, e onde contém a drenagem com o fluxo de maior vazão da região, o Rio Barão de Cocais ou São João. A potenciometria reflete diretamente a topografia do sinclinal, conforme apresenta a **Figura 11**.

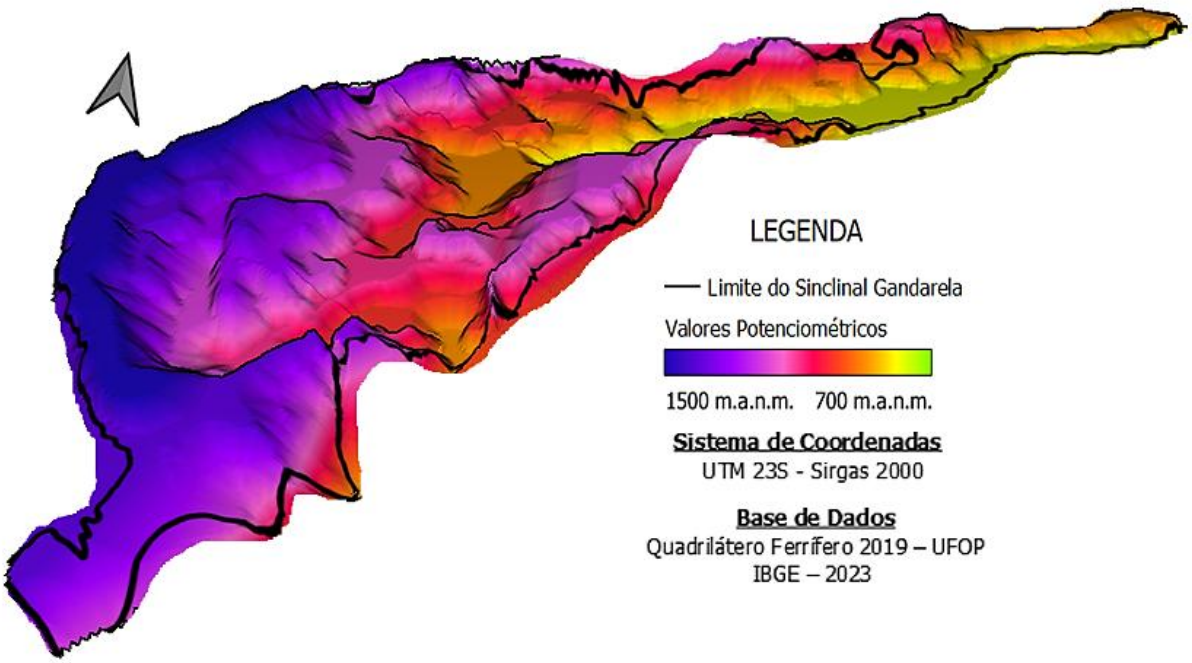


Figura 11: Potenciometria do Sinclinal Gandarela refletindo a elevação topográfica da área de estudo com exagero vertical de 4 vezes para se destacar as porções mais elevadas.

A potenciometria indica que a geomorfologia tem grande influência no sistema de fluxo hídrico da estrutura. Assim, o mapa de fluxo constitui uma ferramenta essencial para o entendimento da dinâmica hídrica do Sinclinal Gandarela e para o planejamento de estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos. Dessa forma, o fluxo das águas superficiais e subterrâneas se apresentam em 3 composições principais dentro do Sinclinal Gandarela.

A primeira composição das linhas de fluxo está diretamente relacionada à presença dos divisores topográficos d'água nas porções SE, S e SW. Os divisores topográficos estão nas proximidades dos limites da megaestrutura, dessa forma, promovem fluxos d'água para as áreas externas do sinclinal **(Figura 12)**.

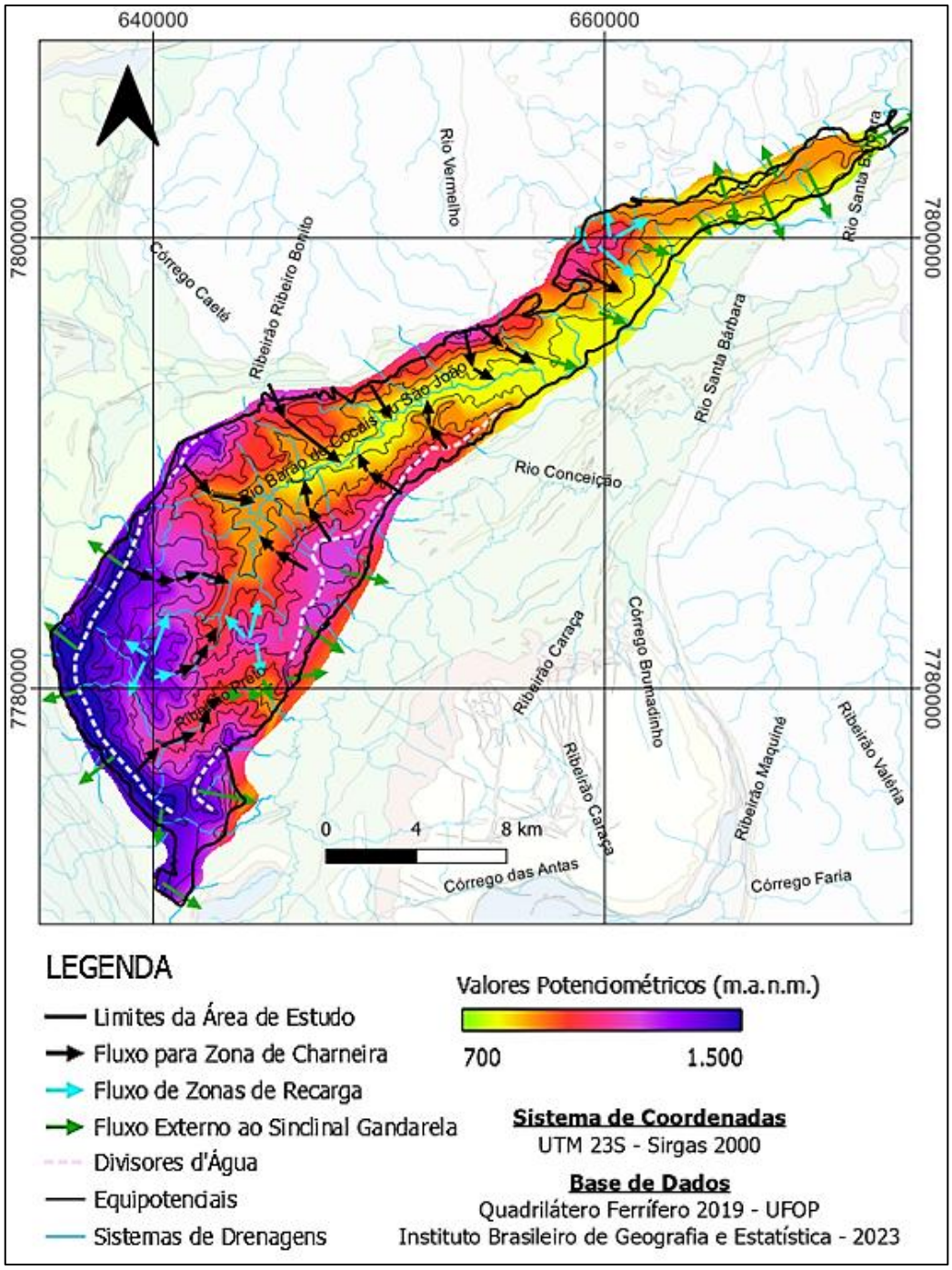


Figura 12: Mapa de superfície potenciométrica do Sinclinal Gandarela evidenciando as três condições principais das linhas de fluxo superficiais e subterrâneos.

A segunda composição está relacionada com os fluxos d'água com direção e sentido para a porção central do Sinclinal Gandarela. Conforme discutido acerca da localização das equipotenciais de menores valores, presentes predominantemente na porção central da área, observa-se que o fluxo subterrâneo segue para a zona de charneira da megadobra do sinclinal, e em direção ao rio Barão de Cocais ou São João mantendo o fluxo superficial das águas.

Já a terceira composição de linhas de fluxo está relacionada às zonas de recargas identificadas na estrutura. A zona de recarga de maior relevância está localizada na porção SW da área e é delimitada pelas equipotenciais de níveis elevados de 1400 e 1300. Observa-se que em alguns pontos dessa composição se “transformam” em uma das outras composições, ou seja, a zona de recarga pode fornecer fluxos d’água que se direcionam para a porção central ou para as áreas externas do sinclinal.

A análise conjunta permite compreender a relação entre a topografia e a dinâmica hídrica do Sinclinal Gandarela onde a potenciometria reflete diretamente a elevação topográfica. De forma geral, os setores apresentam simultaneamente os três tipos de composições de fluxo hídrico e a articulação entre zonas de recarga, áreas de descarga e divisores topográficos demonstra que todo o Sinclinal Gandarela deve ser compreendido como um sistema aquífero contínuo e interdependente, no qual os diferentes compartimentos contribuem conjuntamente para a dinâmica hídrica regional.

A configuração geológica e o relevo do Sinclinal Gandarela exercem um controle determinante sobre o fluxo hídrico onde a disposição estrutural das camadas, marcada por dobras acentuadas e falhamentos, somada à geomorfologia da área, tende a funcionar como uma grande estrutura de armazenamento hídrico e direcionador natural das águas, onde a declividade das vertentes definem preferencialmente as zonas de recarga e descarga.

A compartimentação hidrogeológica da área mostra que os setores A e B contemplam a primeira e segunda composição de linhas de fluxo devido seus principais divisores d’água e uma zona de recarga em cada setor. Já o setor C apresenta também uma zona de recarga, porém com predominância de linhas de fluxo para as áreas externas ao sinclinal **(Figura 13)**.

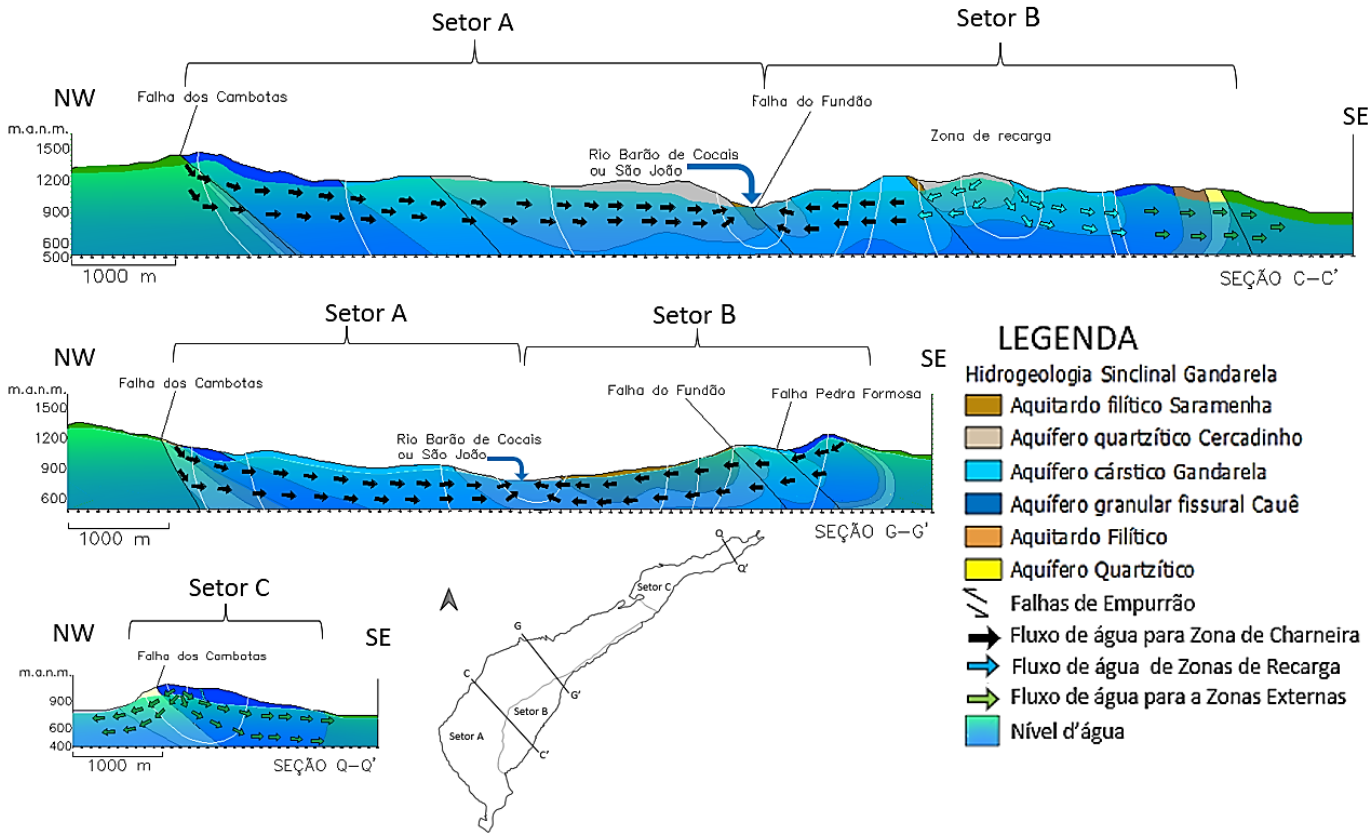


Figura 13: Seções hidrogeológicas indicando os pricipais fluxos de água subsuperficiais relacionados aos compartimentos propostos para o Sinclinal Gandarela. Destaque para unidades hidrogeológicas, no topo da seções (zonas não saturadas), representadas pelas cores na legenda.

Os níveis d'água presentes nas seções hidrogeológicas foram obtidos a partir da base de dados ao longo de diversos pontos dos aquíferos e aquitardos do Sinclinal Gandarela. A unidade aquífera Quartzítica possui o N.A. mais raso enquanto o Aquitardo Filítico e o aquífero Cauê estão mais profundos, assim destaca-se que, mesmo o filito Batatal com zonas fraturadas, ainda atua como camada de baixa permeabilidade de acordo com Mourão (2007) e Magalhães *et al.* (2022), entre seus aquíferos adjacentes, em grande parte do sinclinal.

A maior concentração dos dados está localizada no aquífero Cauê, devido a sua característica exploratória e de maior concentração dos empreendimentos minerários. É possível que a presença de tais empreendimentos, que possuem alta taxa de explotação d'água usada em seus processos produtivos, justifique o N.A. mais profundo entre todos os aquíferos presentes no Sinclinal Gandarela.

5.2 – Balanço Hídrico com Análise Multicritério da Recarga Aquífera em Ambiente SIG

De acordo com dados da Hidroweb, as estações pluviométricas relatam o trimestre mais chuvoso correspondente ao período de novembro a janeiro, e o trimestre mais seco referente ao intervalo de junho a agosto, conforme apresentado na **Figura 14**.

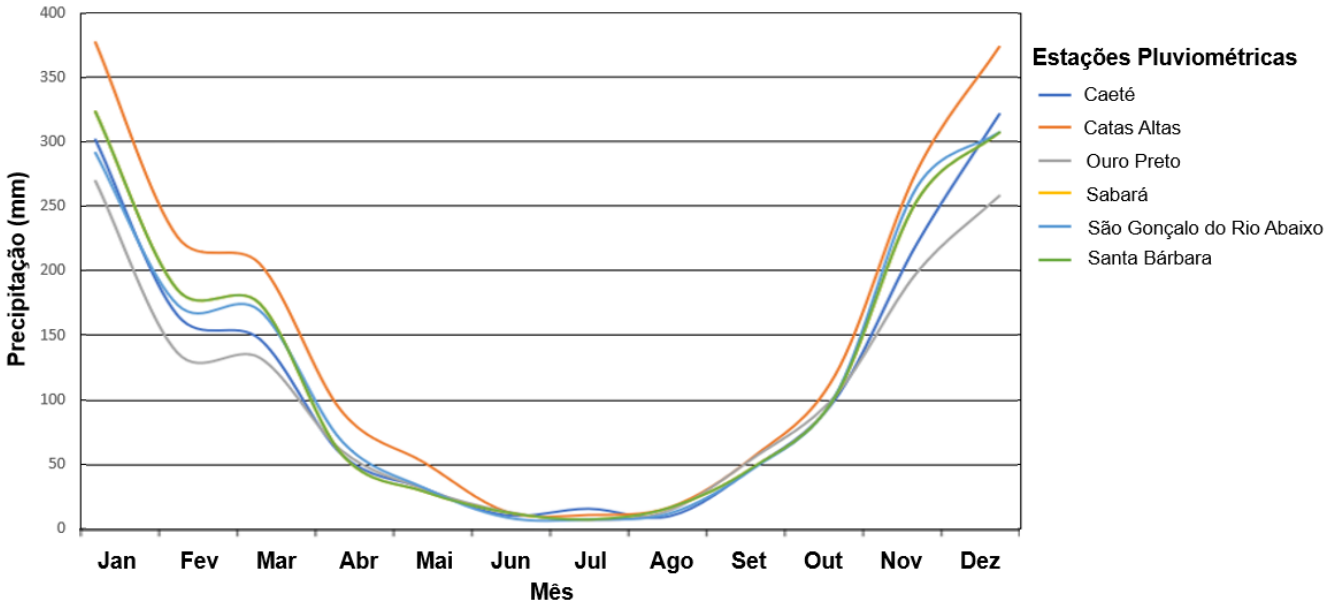


Figura 14: Precipitação (mm) média mensal para o período 1990 a 2023.

As estações pluviométricas, presentes no entorno da área de estudo, corroboram com a análise pluviométrica em relação aos meses secos e chuvosos, conforme dados históricos (1970 a 2000) da precipitação (mm) da APA Sul RMBH apresentados por Davis, Pinto & Pinto (2005) na **Figura 3**.

Para o Sinclinal Gandarela, as estações analisadas correspondem aos municípios de Caeté, Catas Altas, Ouro Preto, Sabará, São Gonçalo do Rio Abaixo e Santa Bárbara correspondendo, respectivamente, as estações pluviométricas 1943027, 2043059, 2043056, 1943006, 1943027 e 194007 (**Apêndice F**).

Os polígonos de Thiessen **(Figura 15)** apresentam as áreas de influência das estações pluviométricas. Elas foram responsáveis por definir os domínios 1, 2, 3, 4, 5 e 6 cujas áreas atribuídas aos domínios foram 14 km², 46 km², 101 km², 28 km², 42 km² e 24 km², respectivamente. Obtiveram uma média pluviométrica anual de 1282 mm/ano, 1506 mm/ano, 1682 mm/ano, 1516 mm/ano, 2009 mm/ano e 1486 mm/ano com média ponderada pluviométrica de 1644 mm/ano. Os domínios 3, 2 e 5 abrangem as maiores áreas de estudo sendo que o domínio 3 (Estação Caeté) de cobertura majoritária na porção centro-sul.

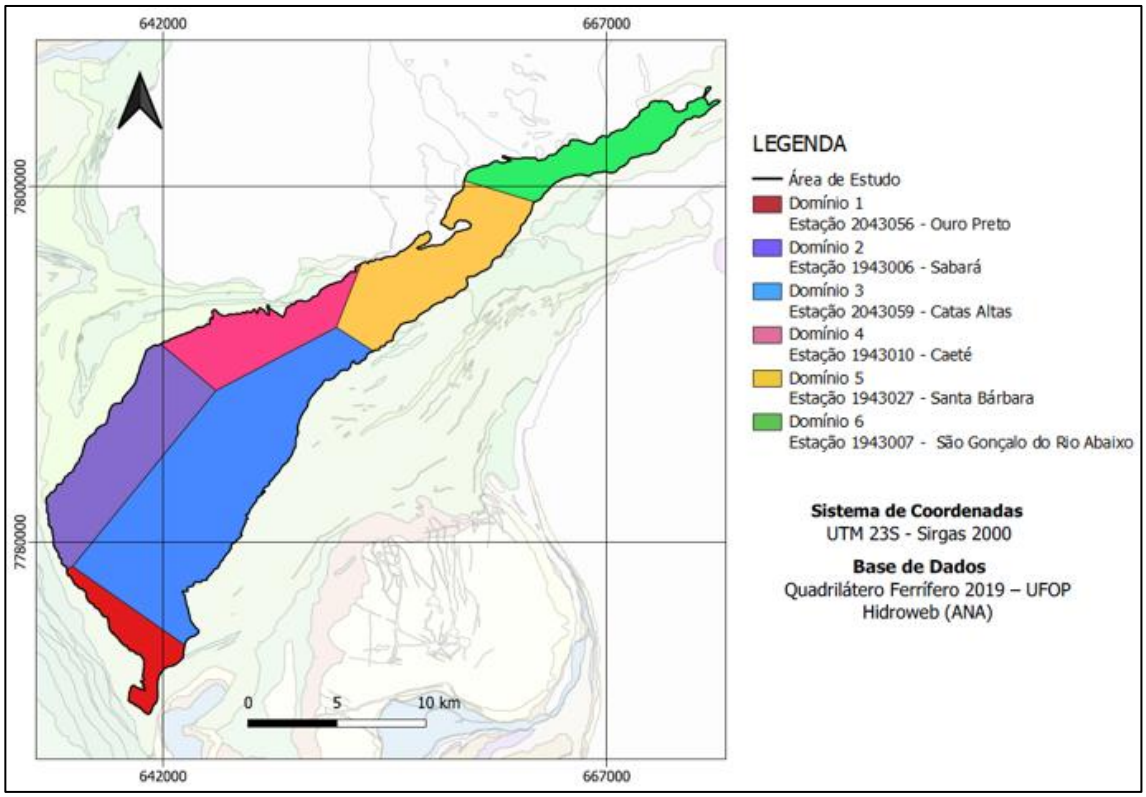


Figura 15: Polígono de Thiessen elabora a partir das estações pluviométricas de influência dentro do Sinclinal Gandarela.

Nesse contexto, a estimativa da recarga aquífera regional no Sinclinal Gandarela foi estruturada por meio de uma abordagem quantitativa integrada em ambiente SIG, onde os resultados quantificam o aporte hídrico e revelam como a interação entre a morfologia do terreno e as coberturas superficiais de vegetação e solos condicionam a distribuição espacial da recarga hídrica subterrâneas na área de estudo.

Mapa das Classes de Solos

Solos arenosos, que possuem maior permeabilidade devido à presença de partículas maiores e poros mais conectados, apresentam um coeficiente de escoamento mais elevado (Cs = 0,4). Isso ocorre porque, apesar de permitirem maior infiltração, sua baixa capacidade de retenção de água favorece o escoamento superficial em eventos de chuva intensa. Por outro lado, solos argilo-siltosos, com partículas finas e menor permeabilidade, retêm mais água e apresentam menor coeficiente de escoamento (Cs = 0,1), indicando menor propensão ao escoamento superficial.

A partir do mapa pedológico, apresentado na **Figura 16a,** foi possível reclassificar os solos entre solo arenoso e solo argilo-siltoso, de acordo com a permeabilidade. Na reclassificação observa-se que o solo arenoso, composto exclusivamente de latossolos,

se mantem nas proximidades da porção central do Sinclinal Gandarela, região também comum ao rio Barão de Cocais ou São João **(Figura 16b)**.

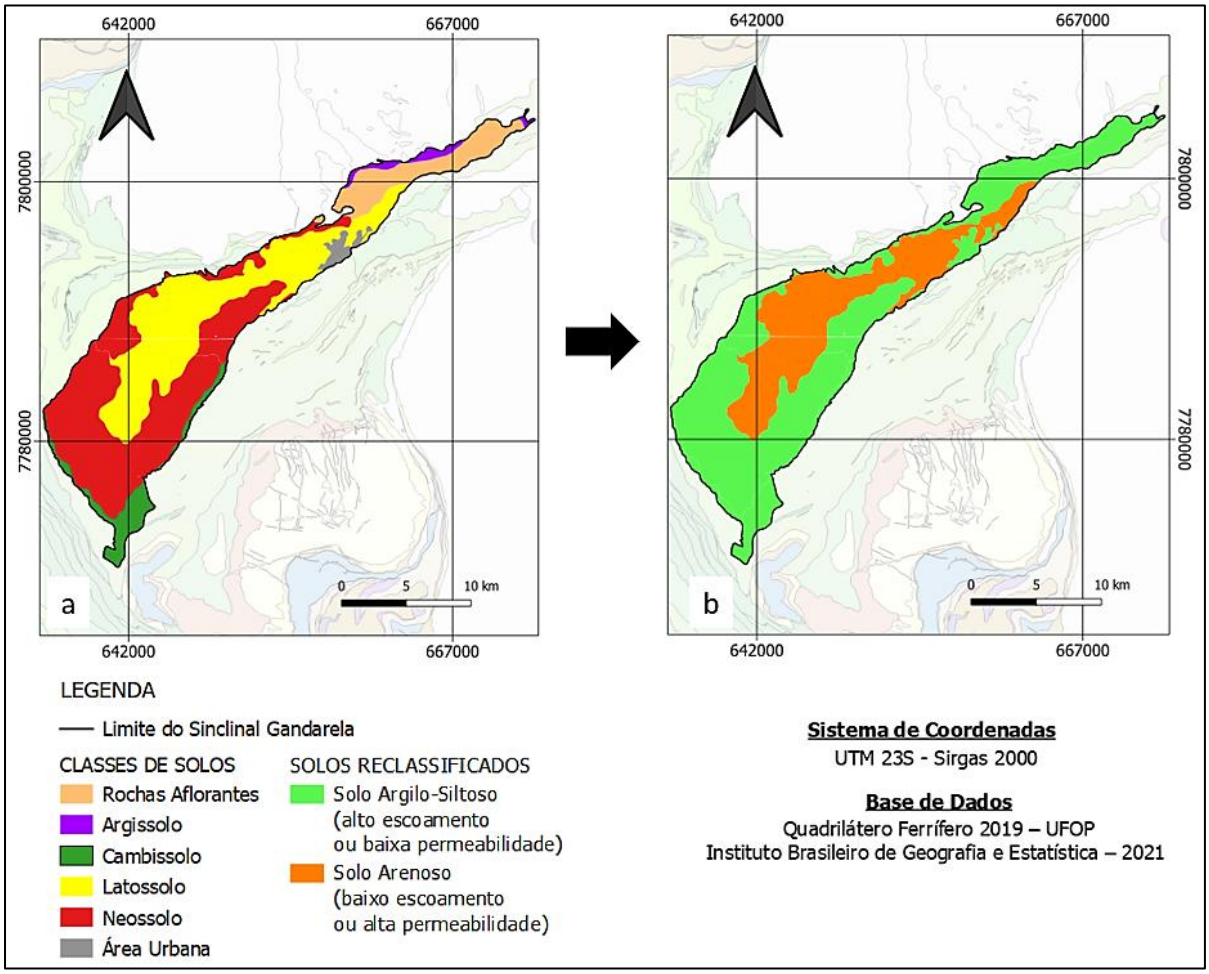


Figura 16: a) Mapa pedológico com as classificações dos tipos de solo que ocorrem na área de estudo e b) onde é apresentada a reclassificação dos solos em relação a permeabilidade dos solos.

Mapa das Classes de Coberturas Vegetais

A vegetação atua como regulador hidráulico por meio da intercepção da chuva pelas folhas e caules, do aumento da rugosidade do terreno que retarda o fluxo hídrico e da preservação da porosidade superficial. Dessa forma, protege o solo contra a compactação e favorece a entrada da água, onde o valor de C é significativamente menor (TUCCI, 2005).

O mapa de classe de cobertura vegetal **(Figura 17a)** apresenta variações de fitofisionomias já mencionadas por Lamunier *et al.* (2010) em toda extensão do Sinclinal Gandarela. Já na **Figura 17b**, o mapa apresenta a reclassificação das coberturas vegetais conforme sua permeabilidade, onde quase a totalidade da área foi considerada como florestas e savanas com coeficiente de escoamento Cs=0,2. As demais áreas

estão relacionadas às áreas antropizadas e agropecuárias onde foram atribuídos valores de Cs=0,1.

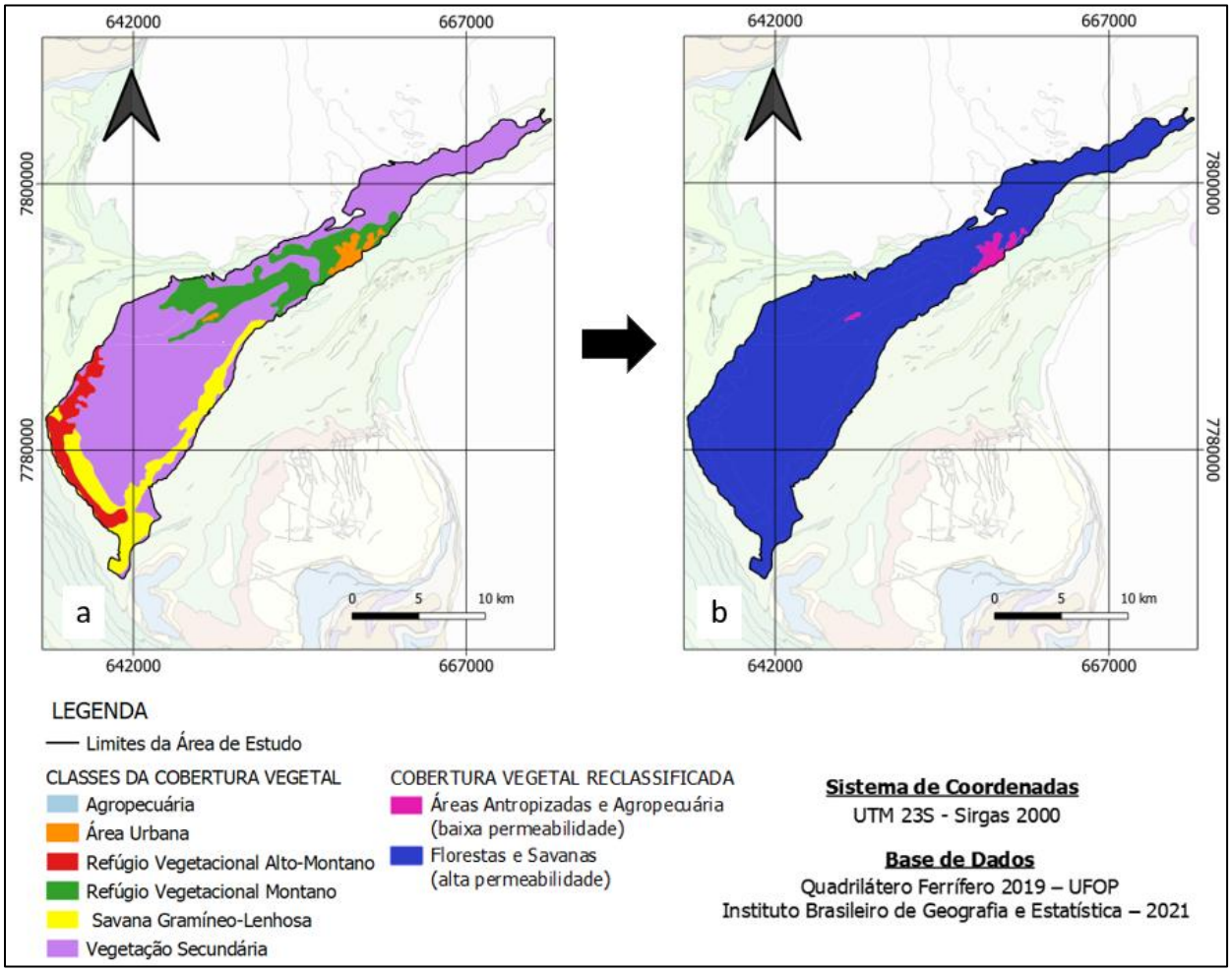


Figura 17: a) Mapa com as classificações de cobertura vegetal que ocorrem na área de estudo e b) mapa de reclassificação da vegetação em relação a permeabilidade.

Mapa de Declividade - Modelo Digital de Elevação

A partir do tratamento da imagem do Modelo Digital de Elevação foi possível elaborar o mapa de declividade. Vidaletti (2022) e Filho *et al.* (2014) apresentam que a taxa de infiltração é maior em declividades menores sendo um fator responsável pela maior ou menor infiltração das águas das chuvas.

O mapa da **Figura 18** apresenta declividades suavizadas ou planificadas, inferiores a 2%, representando a menor proporção da área e localizado majoritariamente nas regiões próximas à drenagem do Rio Barão de Cocais ou São João. As declividades moderadas, limitadas entre 2 e 7%, representa a maior proporção da área compreendendo todas as porções do Sinclinal Gandarela. Por fim, áreas de alta declividade, superiores a 7%, associadas às partes mais íngremes, e ao menos na porção SW, está associado a altitudes topográficas mais elevadas.

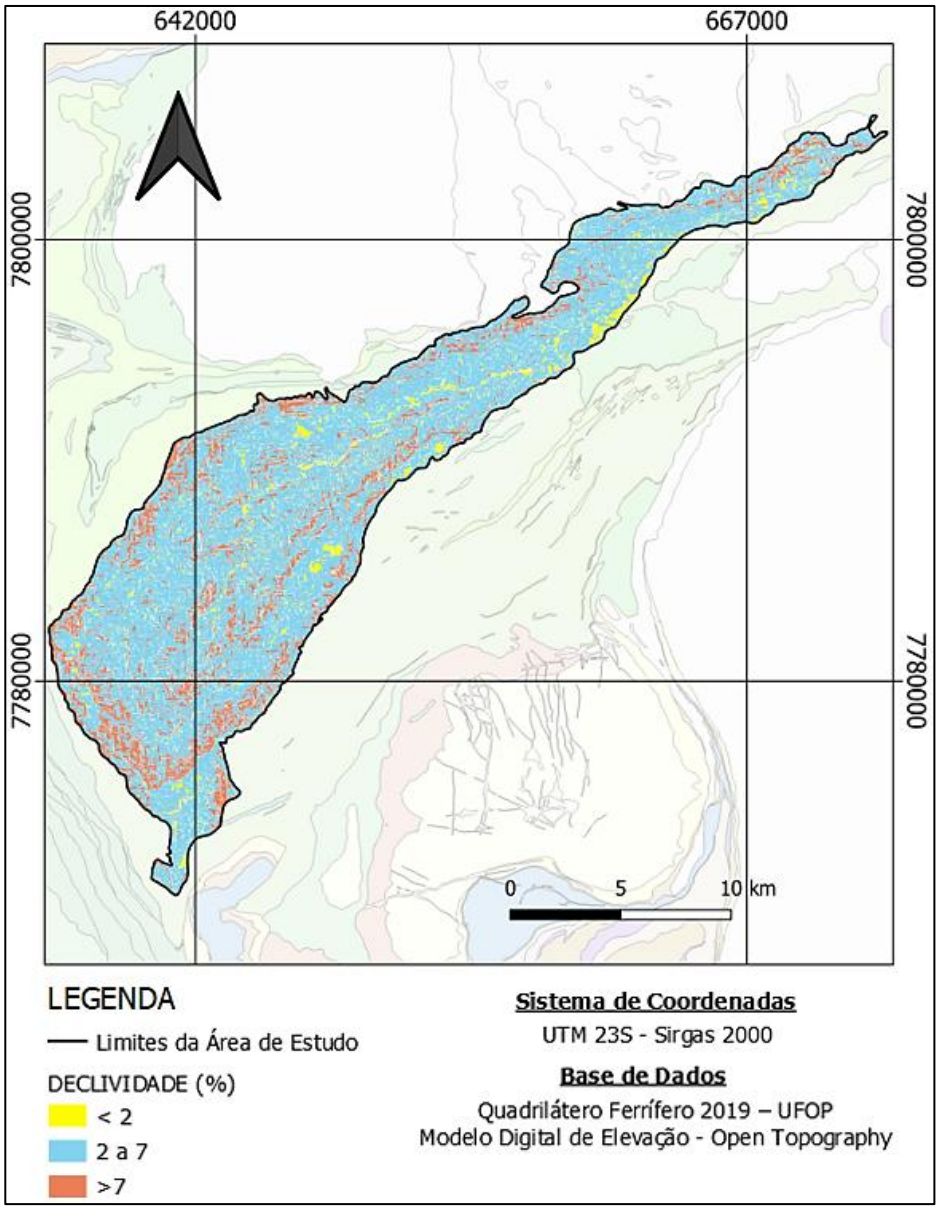


Figura 18: Mapa de declividade gerado a partir do Modelo Digital de Elevação, no qual as declividades moderadas (2 a 7%) são representadas, majoritariamente.

A partir dos mapas de solo e cobertura vegetal reclassificados e o mapa de declividade do Sinclinal Gandarela, tratados como fatores aplicados à análise, foram concatenados para gerar um novo mapa relacionado as classes de escoamento apresentadas nas tabelas do **Apêndice C**.

Os resultados obtidos para a recarga aquífera fundamentam-se na aplicação de um balanço hídrico climatológico, onde a estimativa da recarga foi derivada da relação direta entre a precipitação efetiva e a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD). Foi considerada as perdas por evapotranspiração real e o escoamento superficial prévio, permitindo quantificar a recarga, vinculando os excedentes hídricos sazonais às características físicas das coberturas pedológicas e à permeabilidade das formações geológicas aflorantes no Sinclinal Gandarela.

O mapa **(Figura 19)** representa o zoneamento de valores de recarga, trazendo de forma regional, essa característica do Sinclinal Gandarela conforme os cálculos apresentados nas tabelas de suas referidas classes. A área apresenta, predominantemente, zoneamentos relativos às recargas moderada (150 a 250 mm/ano) e baixa (50 a 150 mm/ ano), seguidos da recarga alta acima de 250 mm/ano e finalmente, de forma muito pontual e quase não observável pela escala do mapa, a recarga incipiente de até 50 mm/ano.

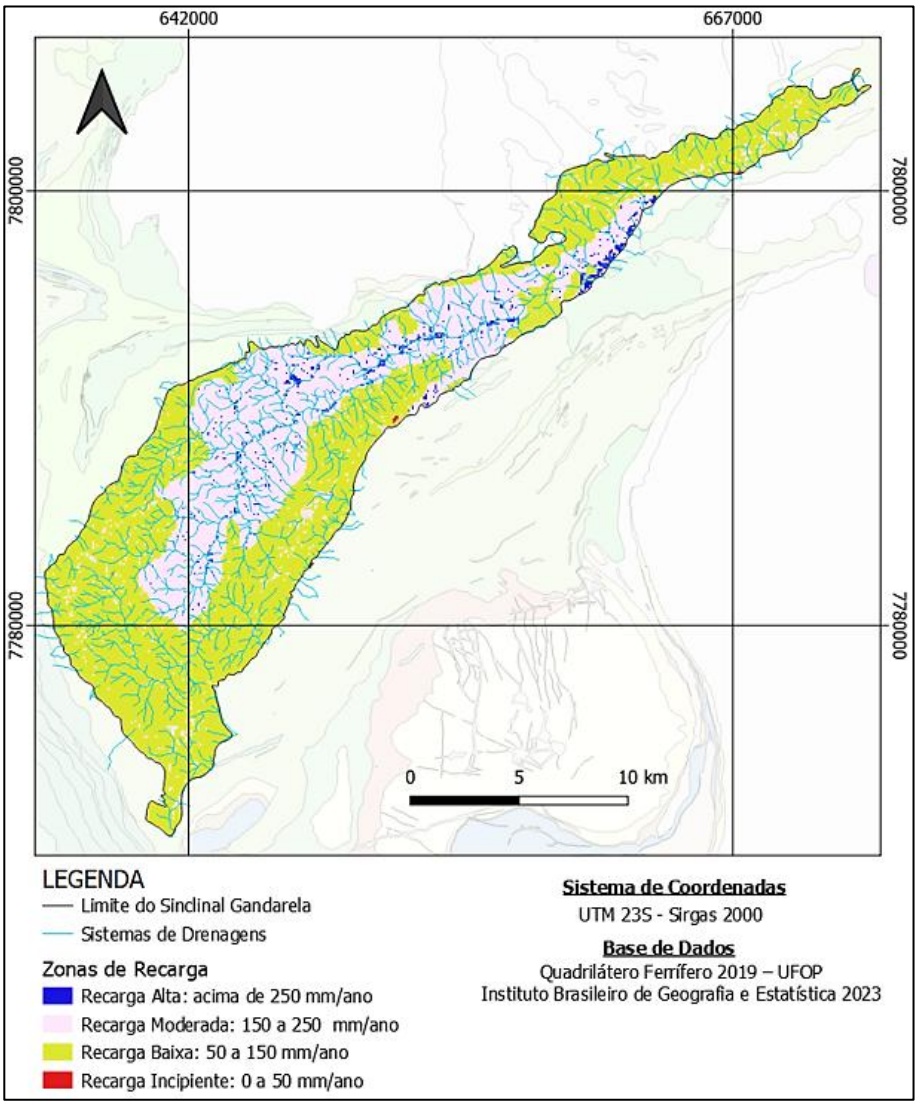


Figura 19: Mapa de zoneamento das áreas de recarga por meio da análise multicritério dos mapas de solo, cobertura vegetal e declividade.

A análise integrada dos dados revela que a dinâmica hídrica do sistema é rigorosamente controlada pela geometria sinformal, que atua como um coletor natural de fluxo. Observou-se que as zonas de baixa recarga coincidem com os flancos da estrutura, onde o mergulho das camadas das formações Cauê e Gandarela dificulta a percolação preferencial. No eixo central do sinclinal, estabelecendo um gradiente hidráulico menor que sustenta uma maior taxa de recarga com base dos cursos d'água locais.

A **Figura 19** indica uma relação topográfica juntamente à recarga, onde principalmente na porção SW, as regiões de maior elevação topográfica apresentam um índice baixo de recarga hídrica. Nas porções mais internas do sinclinal, onde a topografia possui cotas menores podendo atingir altitudes entorno de 800 m, observa-se preeminência de recarga moderada. Ainda dentro dos domínios da recarga moderada, ocorrem como alta recarga, porém em uma menor escala espacial, onde se percebe um lineamento no qual o rio Barão de Cocais ou São João e seus afluentes auxiliam nesse domínio de recarga.

Ainda que uma unidade aquífera possua alta condutividade hidráulica, o volume e a velocidade do escoamento são condicionados pela geometria do sinclinal, que impõe o gradiente hidráulico necessário para a movimentação da água através do sistema. Mesmo assim, as variações nas taxas de recarga, observadas nas unidades hidrogeológicas presentes ao longo do Sinclinal Gandarela, se mostram dentro das dos valores obtidos em estudos mais recentes como Magalhães *et al.* (2022), Andrade *et al.* (2025) e Tavares (2025), conforme a **Tabela 5**.

Tabela 5: Taxa de recarga do Sinclinal Gandarela em comparação as taxas calculadas nas unidades aquíferas de outras megaestruturas presentes no Quadrilátero Ferrífero.

Unidades Aquíferas	Taxa de Recarga (%)			
	Sinclinal Gandarela	Sinclinal Moeda Flanco Oeste (1)	Sinclinal Moeda Flanco Leste (2)	Sinclinal Dom Bosco (3)
	Média	Média	Média	Média
Aquífero Cauê Granular e Fissural	29,91	26	36,67	33,5
Aquífero Cárstico Gandarela	19,31	28	16,52	25,7
Aquífero Quartzítico	11,34	18	-	23
Aquitardo Filítico	11,34	12	5,85	-
Aquífero Cercadinho	19,31	13	12,42	-

Fonte: (1) Andrade *et al.* (2025) / (2) Magalhães *et al.* (2022) / (3) Tavares (2025)

6 – CONCLUSÃO

O Sinclinal Gandarela abriga um conjunto perfeitamente delimitado de formações geológicas que, apesar de suas heterogeneidades litológicas e parâmetros hidrodinâmicos distintos, operam de maneira integrada através de conexões hidráulicas por fraturas e carstificações. A presença de unidades confinantes e de baixa

permeabilidade, como os filitos da Formação Batatal (que atua como barreira basal) e o aquitardo xistoso de Nova Lima, confere o arcabouço hidráulico necessário para individualizar esse sistema. Assim, superar a abordagem fragmentada de "unidades aquíferas isoladas" e adentrar o conceito de *Sistema Aquífero* valida o comportamento integrado e interdependente de seus compartimentos, consolidando um modelo conceitual onde se propõe a megaestrutura como Sistema Aquífero Gandarela.

A caracterização hidrogeológica permitiu consolidar esse modelo, evidenciando que o comportamento do sistema é condicionado por um rigoroso controle morfoestrutural. A geometria sinformal, que transita de uma dobra aberta e reclinada a SW para um dobramento isoclinal apertado a NE, atua como principal determinante das trajetórias de fluxo e da capacidade de armazenamento. Esse arcabouço segmenta o sistema em compartimentos, nos quais a Formação Cauê se destaca como o reservatório de maior potencial hidrogeológico. Ela é isolada na base pela Formação Batatal, que atua como barreira impermeável sobre o embasamento e promove aos itabiritos grande capacidade de reserva hídrica. O Sistema Aquífero Gandarela opera como uma megaestrutura morfotectônica de grande capacidade de armazenamento, conforme preconizavam Ramos, Cordeiro & Fernandes (2020).

Quanto à dinâmica de fluxo, a potenciometria regional reflete a influência direta do relevo e da estrutura geológica, manifestando-se em condições de efluxo nas bordas elevadas e convergência de fluxo para o eixo central da estrutura. Esse movimento hídrico é drenado prioritariamente pelo rio Barão de Cocais ou São João, que se estabelece como o nível de base e principal eixo de descarga regional.

Complementarmente, a análise da recarga revelou valores predominantes entre 50 e 250 mm/ano, índices que, embora moderados a baixos, são compatíveis com o contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero e demonstram a eficiência da estrutura sinclinal em capturar e direcionar a infiltração meteórica para o interior da bacia. Em uma análise integrada do Sinclinal Gandarela revela que a recarga não é apenas um produto da permeabilidade superficial, mas é condicionada pela geometria sinformal e pelo arcabouço estrutural regional. O fluxo hídrico é capturado pelas bordas elevadas da estrutura, onde as formações Cauê e Gandarela afloram, e é direcionado gravitacionalmente para o eixo central (zona de charneira). Esse comportamento hidrodinâmico valida os resultados da análise multicritério, onde as zonas de recarga moderada (150 a 250 mm/ano) predominam nas áreas de maior conectividade estrutural e relevo suavizado do interior do sinclinal.

Esse sistema aquífero proposto opera como um mecanismo tectono-hidráulico integrado, onde a manutenção da integridade geológica da Serra do Gandarela é vital para a segurança hídrica regional. A compreensão dessas interações entre estrutura, recarga e fluxo reafirma o caráter estratégico deste aquífero para o abastecimento e equilíbrio ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

O aquífero Cauê representa o principal reservatório de armazenamento e possui a maior taxa média de recarga (29,91%) eleva a importância estratégica das áreas elevadas e contínuas da serra. Estas zonas, predominantemente inseridas nos limites protetivos do Parque Nacional da Serra do Gandarela e da APA Sul RMBH, funcionam como as principais "portas de entrada" e reguladoras do balanço hídrico que sustenta o abastecimento público e o equilíbrio socioambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Frente ao cenário onde os níveis d'água mais profundos localizam-se justamente nas zonas de maior concentração e explotação de empreendimentos minerários, evidencia-se que o sistema aquífero já responde a pressões antrópicas localizadas. Explotações desreguladas ou intervenções físicas agressivas nas zonas de recarga e nos flancos da dobra possuem o potencial latente de desestruturar o mecanismo tectono-hidráulico integrado do sinclinal. Tal desequilíbrio comprometeria de forma irreversível a perenidade das nascentes e o volume de descarga drenado pelo rio Barão de Cocais, que atua como o nível de base e termômetro da saúde hídrica regional. Portanto, a manutenção e a consolidação das unidades de conservação na área do Sinclinal Gandarela deixam de ser uma diretriz puramente ecológica e passam a ser uma necessidade de hídrica regional.

Para estudos futuros, recomenda-se estabelecer uma rede de monitoramento hidrogeológico com a ampliação dos pontos de observação dentro da área de estudo. A criação dessa rede é essencial devido a importância ambiental do Sinclinal Gandarela, com as áreas do Parque Nacional da Serra do Gandarela e a APA SUL RMBH.

Como continuidade deste estudo, recomenda-se o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico numérico para realizar simulações relacionadas à superexplotação d’água dos empreendimentos situados nas proximidades das áreas de preservação ambiental e pequenas comunidades. Adicionalmente, a integração de estudos hidrogeoquímicos com aplicação de isótopos e o monitoramento da interação rio-aquífero ao longo do eixo central do sinclinal, para entender o tempo de residência da água no sistema.

7 – REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). (2022). Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas (Ano-Base 2021). Brasília: ANM, 35 p. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/relatorio-gestao/relatoriodegestao2022. Acessado em: 26/12/2023.

ALBUQUERQUE, J. D. P. T., & RÊGO, J. C. (2012). Sistemas Aquíferos Brasileiros: O Verdadeiro Significado Hidrogeológico.

ALKMIM, F.F.; MARSHAK, S. (1998). Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. Precambrian Research, v. 90, p.29-58.

ALMEIDA, L.G. (2004). Evolução tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. Minas. Ouro Preto: Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 2004. 110p. (Dissertação de Mestrado).

ALMEIDA, L.G., CASTRO, P.D., ENDO, I., FONSECA, M.A. (2005). Grupo Sabará no sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrifero: uma revisão estratigráfica. Revista Brasileira de Geociências 35(2):177-186.

AMORIM, L.Q.; ALKMIM, F.F. (1997). Tipologia dos aquíferos e um modelo hidrogeológico para a região sul de Belo Horizonte, setor setentrional do Platô da Moeda. In: IX SIMP. DE GEOL. DE MINAS GERAIS, Anais... Belo Horizonte, SBG-MG, 1997. Bol. 14, p. 145–147.

ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W.; HUNT, R.J. (2015). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. 2. ed. Amsterdam: Academic Press.

ANDRADE, I. B., DE PAULA, R. S., TEIXEIRA, G. M., NOVO, T. A., DE MELO, M. C., & COSTA, F. A. (2025). Investigação do fluxo no sistema aquífero do flanco oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física, 18(5), 3350–3376.

ANDREO, B., VÍAS, J., LÓPEZ-GETA, J.A., CARRASCO, F., DURÁN, J.J., & JIMÉNEZ, P. (2004). Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín geológico y minero*, *115*(2), 177-186.

ASCE - American Society of Civil Engineers (1969) Task force on effect of urban development on flood discharges, committee on flood control, “effect of urban development on flood discharges - current knowledge and future needs”, J Hydraul Division, 95 (HY1).

AZEVEDO, J., ALMEIDA, D., PINTO, M., & CALDAS, F. (2023). Método para Estimativa do Balanço Hidrológico e Recarga Aquífera Distribuída em Áreas de Mineração. 11º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Mina Subterrânea.

BABINSKI, M.; CHEMALE, F.Jr., VAN SCHMUS, W.R. (1993). A idade das formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas e sua correlação com aquelas da África do Sul e Austrália. In: SIMPOSIO DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador. 1993. Anais... Salvador: Soc.Bras.Geol. Núcleo Bahia/Sergipe, 1993. p.152-153.

BABINSKI, M.; CHEMALE F.Jr.; SCHUMUS, W.R. (1991). Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 3., São Paulo, 1991. Anais... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geoquímica, v. 2, 1991, p. 628-630.

BALTAZAR, O.F.; ZUCCHETTI, M. (2007). Lithofacies Associations and Structural Evolution of the Archean Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilatero Ferrifero, Brazil: A Review of the Setting of Gold Deposits. Ore Geol. Rev., 32, 471‑499.

BEATO, D. A., MONSORES, A. L., & BERTACHINI, A.C. (2005). Hidrogeologia. Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, v. 8.

BEATO, D.A.C; MONSORES, A.L.M; BERTACHINI, A.C. (2006). Potencial Aqüífero Nos Metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero–Região da APA SUL RMBH-MG. Águas Subterrâneas.

BERTACHINI, A.C. (2002). Mineração e seus vizinhos. A Mina de Águas Claras e o Parque das Mangabeiras. ABAS Informa Edição 122. Disponível em: https://www.abas.org/abasinforma/122/paginas/16.htm. Acessado em: 17/05/2025.

BERTACHINI, M.N., BERTACHINI, A.C., PEREIRA, B.A., GRANDCHAMP, C.A.P., NUNES, F.S., & PEREIRA FILHO, M.I.LT.O.N. (2012). Estudos sobre os efeitos da Recarga Artificial (RA) sobre o Aquífero Cauê, no Quadrilátero Ferrífero-MG. *Águas Subterrâneas*.

BOECHAT, B.M. (2024). Impactos da Mineração da Serra do Gandarela para o abastecimento Hídrico de Belo Horizonte. Nota Técnica N°27/2024. Câmara Municipal de Belo Horizonte.

BOLAÑOS, S., SALAZAR, J.F., BETANCUR, T., & WERNER, M. (2021). GRACE reveals depletion of water storage in northwestern South America between ENSO extremes. *Journal of Hydrology*, *596*, 125687.

CABRAL, A.R.; ZEH, A.; KOGLIN, N.; GOMES JR., A.A.S.; VIANA, D.J.; LEHMANN, B. (2012). Dating the Itabira iron formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, at 2.65 Ga: Depositional U-Pb age of zircon from a metavolcanic layer. Precambrian Research, v. 204, p. 40-45.

CARVALHO FILHO, A.; CURI, N.; SHINZATO, E. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, n. 8, p. 903-916, 2010.

CHATURVEDI, R.S. (1973). A Note on the Investigation of GW Resources in Western Districts of Uttar Pradesh. Annual Report. U.P. Irrigation Research Institute, Bahadrabad, India, pp. 86–122.

CHATURVEDI, M.C., & SRIVASTAVA, V.K. (1979). Induced groundwater recharge in the Ganges basin. Water Resources Research, *15*(5), 1156-1166.

CHEMALE JR, F.A.R.I.D., ROSIÉRE, C.A., & ENDO, I. (1991). Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Um modelo. *Pesquisas em Geociências*, *18*(2), 104-127.

CHEMALE JR. F.; ROSIÈRE, C.A.; ENDO, I. (1994). The tectonic evolution of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil.

CROCCO-RODRIGUES, F.A. (1991). *Sistemas de cavalgamento e geologia estrutural da Serra das Cambotas, Quadrilátero Ferrífero (MG)* (Doctoral dissertation, Dissertation, Universidade de Brasília, Brasília).

CRUZ, C.E., CAETANO, I.S.H., MOTA, A.C.V., FERREIRA, J.J., DE SOUZA, J.V.F., VELÁSQUEZ, L.N.M., & DE PAULA, R.S. (2022). Caracterização pluviométrica do Quadrilátero Ferrífero na região do Sinclinal Moeda–Minas Gerais. *Além dos Muros da Universidade*, *7*(1), 17-35.

DAHER, A.P., COSTA, M.A., & NOVO, T.A. (2020). A Serra das Cambotas: terminação meridional do supergrupo espinhaço no quadrilátero ferrífero, MG. *Geonomos*.

DANTAS, J.C.M., DE MESQUITA, D.C., DE PAULA, R.S., & GUERRA, K.J. (2017). Correlação entre dados de perfilagem geofísica e potencial de bombeamento de poços em litotipos da

Formação Cauê no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *Águas Subterrâneas*, *31*(4), 373-383.

DAVIS, E.G.; PINTO, E.J.A.; PINTO, M.C.F. (2005). Hidrologia. Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de proteção ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, v. 9.

DE PAULA, R.S., DE 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), 140-153.

DORR, J.V.N. (1969). Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil. US Government Printing Office.

ENDO, I. (1997). Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes.

ENDO I., OLIVEIRA A.H., PERES G.G., GUIMARÃES M.L., LAGEIRO L.E., MACHADO R.,..., MELO R.J. (2005). Nappe Curral: uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 10;

ENDO I., GALBIATTI H.F., DELGADO, C.E.R., OLIVEIRA, M.M.F. DE ZAPPAROLI, A. de C., MOURA, L.G.B. de, PERES G.G., OLIVEIRA A.H. de, ZAVAGLIA G., DANDERFER F.A., GOMES C.J.S., CARNEIRO M.A., NALINI Jr. H.A., CASTRO P. de T.A., SUITA M.T. de F., TAZAVA E., LANA C. de C., MARTINS-NETO M.A., MARTINS M. de 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: www.QF2050.ufop.br.

ENDO I., MACHADO R., GALBIATTI H. F., ROSSI, D. Q., ZAPPAROLI, A. C., DELGADO, C. E. R., OLIVEIRA, M.M.F. (2020). Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos / organizado por Paulo de Tarso Amorim Castro, Issamu Endo, Antonio Luciano Gandini. — Belo Horizonte: 3i Editora, 2020.

FEITOSA, F.A.C. MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMÉTRIO, J.G.A. (2008). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. Ed. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 812 p.

FERREIRA, R.C.R.; RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P., SIGNORELLI, N. (2020). Projeto Evolução Crustal e Metalogenética do Quadrilátero Ferrifero, Folha Santa Bárbara. Belo Horizonte - MG: CPRM, Carta Geológica. Escala 1:25.000. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20496. Acessado em: 27/02023.

FERREIRA, Q.D.C.G., BACELLAR, L.D.A.P. (2010). Avaliação preliminar das condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto, MG. *Geonomos*.

FILHO, B.C., BERING, S.B., CALDERANO, S.B., & GUERRA, A. (2014). Susceptibilidade dos solos à erosão na microbacia do Córrego Fonseca, região serrana do estado do Rio de Janeiro. Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto - GEONORDESTE 2014. Anais, Aracaju, Brasil, p. 18-21.

FILHO, J.M. (2008). Hidrogeologia: conceitos e aplicações – *Evolução Histórica do Conhecimento*. 3. Ed. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 812 p.

FRANCO, F.B.; PORTILHO, S. DE SOUZA, J.B. (2017). Avaliação do comportamento hidrogeológico das formações geológicas em uma vertente da Serra do Gandarela: Rio Acima, MG. e-xacta, v. 10, n. 1, p. 1-15.

FREITAS, A.R.D., DE PAULA, R.S., & ANTUNES, I.M.H.R. (2025). Water Resources Availability on a River Watershed in a Relevant Mineral Province (Minas Gerais, Brazil): An Integrated Approach to Water Resources Management. *Water*, *17*(4), 532.

GALVÃO, P., HIRATA, R., CONICELLI, B. (2018). Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environmental Earth Sciences*, *77*(10), 398.

GARCIA, W.D.C. (2005). Manual de Hidrologia Básica para Estrutura de Drenagem.

GEOMIL SERVIÇOS DE MINERAÇÃO. Relatório Técnico para Outorga de Água Subterrânea – Poço tubular profundo, para captação de água subterrânea para uso em atividade minerária. Mineração Ferro Puro LTDA. Santa Bárbara. 2019. Disponível em: www.siam.mg.gov.br/siam/empreendedor/emprto_emprdor_list.jsp?cod_tipo_licenca=OUTORGA&cod_empreendimento=623096&num_apefoutorga=&ano_apefoutorga=. Acesso em: 20/07/2023.

GONÇALVES, J.A.C., PEREIRA, P.H.R., & VIEIRA, E.M. (2018). Sistemas Aquíferos: Hidrogeologia na Porção Nordeste do Quadrilátero Ferrífero na Região de Itabira (MG). *Águas Subterrâneas*.

GUALLI, A., GALVÃO, P., BUENAÑO, M., CONICELLI, B. (2023). Estimating groundwater recharge and precipitation sources of the Zamora River Basin, southeastern Ecuador, using GIS and stable isotopes. *Environmental Earth Sciences*, *82*(17), 400.

HARTMANN, L.A.; ENDO, I.; SUITA, M.T.F.; SANTOS, J.O.S.; FRANTZ, J.C.; CARNEIRO, M.A.; MCNAUGHTON, N.J.; BARLEY, M.E. (2006). Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. Journal of South American Earth Sciences, v. 20, n. 4, p. 273-285.

HIDROVIA HIDROGEOLOGIA E MEIO AMBIENTE LTDA. Relatório Final. simulação de águas subterrâneas para determinação de possíveis impactos nas disponibilidades hídricas da Minas Gongo Soco. Companhia Vale do Rio Doce. Barão de Cocais. 2007. Disponível em: www.siam.mg.gov.br/siam/empreendedor/emprto_emprdor_list.jsp?cod_tipo_licenca=OUTORGA&cod_empreendimento=623096&num_apefoutorga=&ano_apefoutorga=. Acesso em: 14/05/2023.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). (2010). Proposta De Criação Do Parque Nacional Da Serra Do Gandarela. Estudos Técnicos para a Criação de Unidade de Conservação Federal.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) – Ano-Base 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html?=&t=downloads. Acessado em: 15/11/2023.

INTRIAGO, A., GALVÃO, P., & CONICELLI, B. (2023). Use of GIS and R to estimate climate change impacts on groundwater recharge in Portoviejo River watershed, Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, *124*, 104288.

IRITANI, M.A. (1998). Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo).

JERSZURKI, D., SOUZA, J.L.M., & ADAMUCHIO, J.G. (2018). Funções de estimativa do armazenamento de água no solo sob diferentes níveis de capacidade de água disponível. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, *13*(3), 1-9.

KOGLIN, N., ZEH, A., CABRA, LA.R., GOMES, A.A.S., CORRÊA NETO, A.V., BRUNETTO, W.J., GALBIATTI, H. (2014). Depositional age and sediment source of the auriferous Moeda Formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil: New constraints from U-Pb-Hf isotopes in zircon and xenotime. Precambrian Research, v. 255(Part 1), p. 96-108.

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

KRESIC, N.; MIKSZEWSKI, (2013). A. Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization. CRC press.

LADEIRA, B.P. (2025). Potencial Hídrico Subterrâneo do Sinclinal Santa Rita - Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.

LAMOUNIER, W.L.; CARVALHO, V.L.M.; SALGADO, A.A.R. (2011). Serra do Gandarela: possibilidade de ampliação das unidades de conservação no Quadrilátero Ferrífero-MG. Revista do Departamento de Geografia, v. 22, p. 171-192.

LAMOUNIER, W.L., CARVALHO, V.L.M., SALGADO, A.A.R., & MARENT, B.R. (2010). A influência da litologia na distribuição da cobertura vegetal e no uso do solo na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero-MG. *Revista Geografias*, *6*(1), 152-165.

LAZARIM, H. A. (1999) - Caracterização hidrogeológica no extremo norte do Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Nova Lima, MG. – Proposta de Modelo". Dissertação de Mestrado; Curso de Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada; Instituto de Geociências da UFMG; Belo Horizonte, MG.

LAZARIM, H.A.; LOUREIRO, C.O. (1998). Caracterização preliminar do Aquífero Jardim Canadá. Águas Subterrâneas.

LOBATO, L.M., RENGER, F.E., FIGUEIREDO, E SILVA R.C., ROSIÈRE, C.A., BAARS, F.J., ROLIM, V.K. (2014). Metalogênese do setor meridional do Cráton São Francisco. *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Belo Horizonte*, 119-140.

LOHMAN, S.W. (1972). *Definitions of selected ground-water terms--revisions and conceptual refinements* (No. 1988). US Government Printing Office.

MACHIWAL, D., & JHA, M.K. (2015). GIS-based water balance modeling for estimating regional specific yield and distributed recharge in data-scarce hard-rock regions. *Journal of Hydro-Environment Research*, *9*(4), 554-568.

MAGALHÃES, C.C.C.; MELO, M.C.; GUIGER, N.; PAULA, R.S. (2022). The Cauê Aquifer on the Eastern Limb of Moeda Syncline: Characterization, Impacts, and Flow in an Area West of Iron Quadrangle (Quadrilatero Ferrifero)−MG, Brazil. Braz. J. Geol. **2022**, 52, e20220005.

MARSHAK, S., & ALKMIM, F.F. (1989). Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, *8*(3), 555-571.

MARENT, B.R.; SALGADO, A.A.R. (2010). Mapeamento das unidades do relevo da porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero-MG. Revista Geografias, p. 118-139.

MAXEY, G.B. (1964). Hydrostratigraphic units. Journal of hydrology, v. 2, n. 2, p. 124-129.

MAXWELL, C.H. (1972) -Geology and Ore Deposits of the Alegria District, Brazil. Geol. surv. Prof. Pap. (341-J): 15-43.

MEDINA, A.I.; DANTAS, M.E.; SAADI, A. (2005). Geomorfologia. Projeto APA Sul RMBH-Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, v. 6.

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*.

MILLER, J.A. (1999). Introduction and National Summary. In: USGS – U.S GEOLOGICAL SURVEY. *Ground Water Atlas of the United States.* USGS. Disponível em: <http://capp.water. usgs.gov/ gwa/ch_a/index.html>. Acesso em: 12 fev. 2024.

MOHAN, S., & PRAMADA, S.K. (2023). Natural groundwater recharge estimation using multiple methods combined with an experimental study. *Water Supply*, *23*(5), 1972-1986.

MOURÃO, M.A.A. (2007). Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese de Doutorado.

MOURÃO, M.A.A.; LOUREIRO, C. de O.; DE ALKMIM, F.F. (2006). O Aquífero Cauê na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, MG: Procedimentos de Investigação e Análise. Águas Subterrâneas, 2006.

MOURÃO, M.A.A.; LOUREIRO, C. de O.; DE ALKMIM, F.F. (2008). O AQÜÍFERO CAUÊ E UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS ASSOCIADAS: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS, PORÇÃO OCIDENTAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG. *Águas Subterrâneas*.

OLIVEIRA, N.V. de; ENDO, I; OLIVEIRA, L.G.S. de. (2005). Geometria do Sinclinal Gandarela baseada na deconvolução Euler 2D e 3D: quadrilátero ferrífero (MG). Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, p. 221-232.

POTAMOS ENGENHARA E HIDROLOGIA LTDA. Estudo de Caracterização Hidrogeológica do Rebaixamento de Nível da Água Subterrânea em Área de Implantação do Túnel Ferroviário Cabral III - Estrada de Ferro Vitória A Minas – Relatório Técnico para Instrução de Processo de Outorga de uso d'água. VALE S/A. Barão de Cocais. 2012. Disponível em: www.siam.mg.gov.br/siam/empreendedor/emprto_emprdor_list.jsp?cod_tipo_licenca=OUTORGA&cod_empreendimento=623096&num_apefoutorga=&ano_apefoutorga=. Acessado em: 23/04/2023.

RAMOS, M.L.S., CORDEIRO, V.F., FERNANDES, R.A., (2020). Histórico e Arcabouço Hidrogeológico do Quadrilátero Ferrífero. Quadrilátero Ferrífero: Avanços dos conhecimentos nos últimos 50 anos. p.380-413. 3i editora. Belo Horizonte – MG.

RAPOSO, F.O. (1996). Formações ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do Quadrilátero Ferrífero e suas relações com níveis rudáceos.

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

RENNA CAMACHO, C., GETIRANA, A., ROTUNNO FILHO, O. C., & MOURÃO, M. A. A. (2023). Large-scale groundwater monitoring in Brazil assisted with satellite-based artificial intelligence techniques. *Water Resources Research*, *59*(9), e2022WR033588.

ROLIM, G.D.S., SENTELHAS, P.C., & BARBIERI, V. (1998). Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia, *6*(1), 133-137.

RONCATO, J., DOS SANTOS BARBOSA, L., RIBEIRO, G.H., MENDES, K.F., CARVALHO, M. V.M., DE PAULA, R. S., & KNAUER, L.G. (2024). Geoquímica e mineralogia da Formação Ferrífera Bandada da porção ocidental do sinclinal da Moeda, região do Quadrilátero Ferrífero. *Geociencias*, *43*(3), 333-350.

ROSSI, D.Q. (2014). Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

RUBIO, R.F., GRANDCHAMP, E.C., MAURO, E., DE REZENDE, L.O.B.O., FERNÁNDEZ, E.D. L., & BERTACHINI, G.A.C. (2009). Dewatering at the Capão Xavier Iron Open Pit Mine (Minas Gerais, Brazil).

SALIBA, A.P.M., GIMENES, E.A., MAFRA, J.Q.M., & RESENDE, M.F. (2010). Metodologia para dimensionamento de drenos de fundo de pilhas de estéril. COBRAMSEG 2010.

SALIBA, A.P.M., SALIBA, F.P.M., GIMENES, E.A., MAFRA, J.M.Q., RESENDE, M.F., & GONÇALVEZ E.P. (2016). Revisão de Metodologia para Dimensionamento de Drenos de Fundo de Pilhas de Estéril.

SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. ed. Cerrado: ambiente e flora. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998. x1 + 556p.

SANTOS, D.J. dos; RUCHKYS, U. de A.; TRAVASSOS, L.E.P. (2021). Perfil Geoecológico do Parque Nacional da Serra do Gandarela, Minas Gerais, Brasil. Sociedade & Natureza, v. 33.

SEABER, P.R. (1998) Hydrostratigraphic units.

SILVA, A.F.P.; COTA, S.D. (2021). Groundwater age dating using single and time-series data of environmental tritium in the Moeda Syncline, Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil. J. S. Am. Earth Sci. 2021, 107, 103009.

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

SILVA, S.L. (Org.). (2005). *Projeto APA Sul RMBH: Estudos do meio físico.* Ministério de Minas e Energia; Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral; CPRM – Serviço Geológico do Brasil; Governo do Estado de Minas Gerais; Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável; CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

SILVA, M.A.; CAVALCANTI, J.A.D.; ARAÚJO, J.C.S.; FERREIRA, R.C.R.; FREITAS, F.M.; (2020). Projeto ARIM - Áreas de Relevante Interesse Mineral - Parte Norte do Quadrilátero Ferrífero Central – Mapa Geológico e de Recursos Minerais Integrado da Porção Norte do Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte: CPRM, 2020, 1 mapa colorido. Escala 1:75.000. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20490. Acessado em: 25/07/2023.

SILVA, A. B., NETO, A. F. S., & BERTACHINI, A. C. (1994). Potencial de águas subterrâneas do quadrilátero ferrífero. *Águas Subterrâneas*.

SIMMONS, G.G. (1968) -Geology and Mineral Resources of the Barão de Cocais Area, Minas Gerais, Brazi 1. u.s. Geol. Surv. Prof. Pap. (3'11-H): 1-46.

SIMMONS, G.C.; MAXWELL, C.H. (1961). Grupo Tamanduá da Serie Rio das Velhas: Brazil. Dept. Nac. Produç ao Mineral Div. Geol. Mineral. Bol, v. 211, p. 30.

TAVARES, I.S. (2025) Hidrogeologia dos Sistemas Aquíferos do Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero – Brasil.

TÁRCIA R.F., NETO A.F., SANTANA F.C. (1986). Rebaixamento do Lençol Freático da Mina de Conceição – Corpo “C”. IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

TEIXEIRA, G. M. (2023). Avaliação e estimativa de recarga dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG.

THIESSEN, A.H. (1911). Precipitations averages for large areas: Monthly Weather Rev.

TOMASELLA, J.; ROSSATO, L. (2005). Balanço hídrico. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São Paulo.

TROPPMAIR, H. (2004). *Biogeografia e Meio Ambiente*. Rio Claro: Divisa, 205p.

TUCCI, C.E. (2005). *Gestão de águas pluviais urbanas* (Vol. 1). Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades.

VALE S/A. (2022). Estudo de Impacto Ambiental Sondagem Geotécnica e Pesquisa Mineral Projeto Apolo Umidade Natural. Disponível em: https://vale.com/pt/projetoapolo?doAsUserId=%29. Acesso em: 01/04/2024.

VIDAL, T.A.V. (2025). Modelos Hidrogeológicos de Fluxo do Homoclinal Serra do Curral (Quadrilátero Ferrífero – MG).

VIDALETTI, V.F., DE MARINS, A.C., SECCO, D., RIZZI, R.L., & CHANG, P. (2021). Impacto da cobertura do solo, declividade e precipitação na infiltração de água no solo. *Research, Society and Development*, *10*(17), e193101724562-e193101724562.

VIDALETTI, V.F. (2022). Impacto da cobertura do solo, declividade e precipitação na infiltração e escoamento de água e sedimentos. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

VILLELA, S.M., MATTOS, A. (1975). A Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WHITE, W.B. (2003). Conceptual models for karstic aquifers. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1, 1, 6p.

WILKEN, P.S. (1978). Engenharia de drenagem superficial. In *Engenharia de drenagem superficial* (pp. 477-477).

ZHENG, C.; BENNETT, G.D. (2002). Applied contaminant transport modeling. New York: Wiley-Interscience,

ZUPO, A., DE PAULA, R.S., SAMPAIO, J.L., JÚNIOR, J.G., & 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*, 104516.

8 – APÊNDICES

APÊNDICE A – BASE DE DADOS SEMAD/SIAM

Apêndice A - Base de Dados SEMAD-SI

APÊNDICE B – MAPA DE BASE DE DADOS

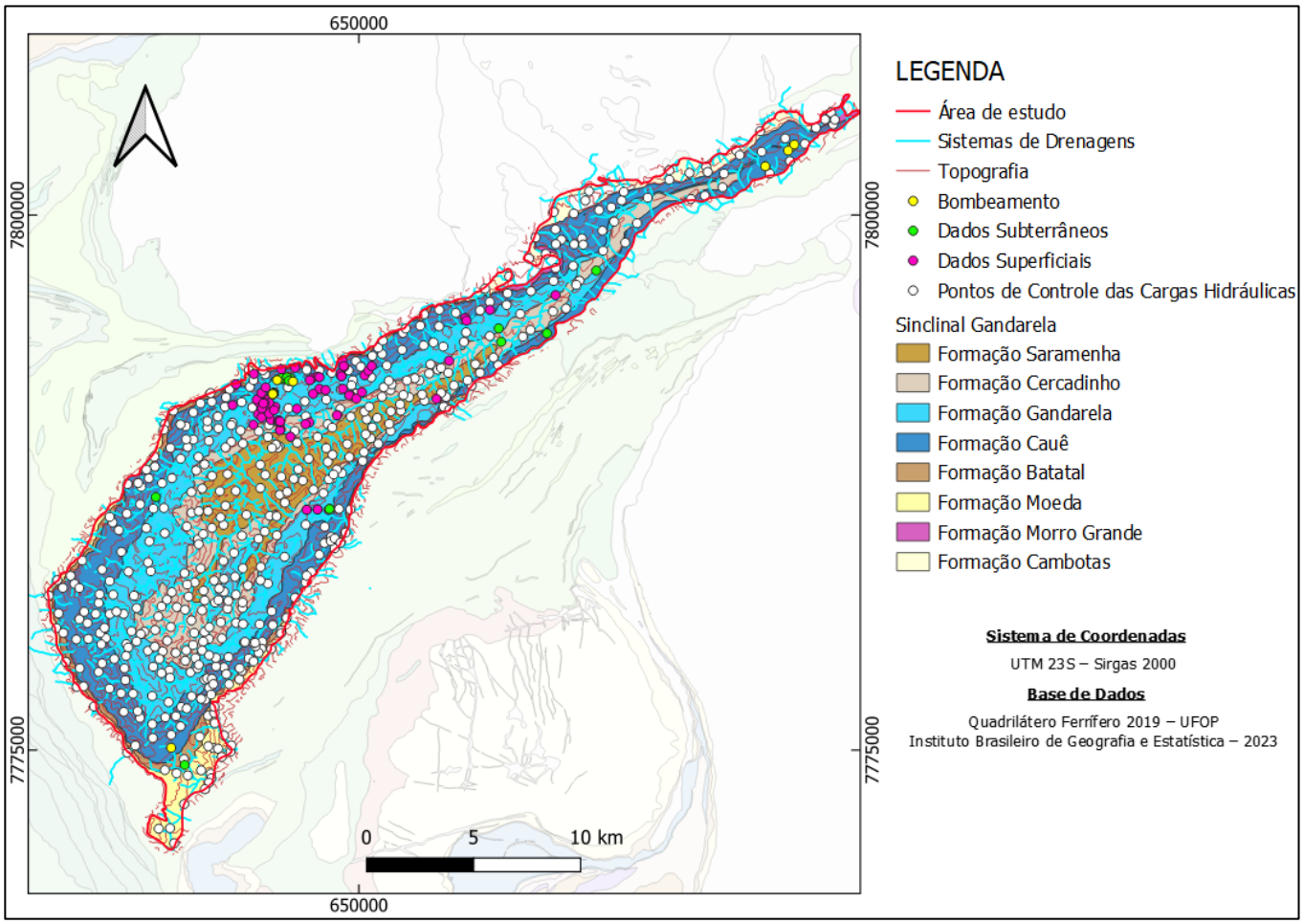


Figura 20: Mapa de base de dados baseado em informações obtidas através do SIAM/SEMAD e pontos de controle projetados entre camadas de drenagens e topografia.

APÊNDICE C – BASE DE DADOS DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Apêndice C - Dados das Estações Pluvior

APÊNDICE D – TABELAS DE CÁLCULO DE COEFICIENTE DE ESCOAMENTO

Classe 1 (Coeficiente de Escoamento, C=0,10)																
Linha	**Parâmetro**	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Média**	**Total**	**Referência**
A	Precipitação Média Mensal - Pm (mm)	83,9	215,1	260,3	205,3	308,9	331,9	41,05	11,4	1	3	61,2	57	131,67	1580,05	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
B	Temperatura Média Mensal - T (°C)	21,14	19,86	21,32	21,94	20,68	21,58	19,68	18,28	18,32	18,1	18,19	19,95	19,92	239,04	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
C*	Evapotranspiração Potencial - Ep (mm)	94,9	78,6	91,2	92,4	70,2	82,2	64,9	58,7	59,7	63	66,6	80,8	75,27	903,2	Método Thorntwaite-Mather (1955)
D	Coeficiente de Escoamento - C	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	Tabela de Coeficiente de escoamento (C)
E	Escoamento Superficial - Esc (mm)	8,39	21,51	26,03	20,53	30,89	33,19	4,105	1,14	0,1	0,3	6,12	5,7	13,17	158,005	Esc = linha **A** x linha **D**
F	Infiltração - In (mm)	75,51	193,59	234,27	184,77	278,01	298,71	36,945	10,26	0,9	2,7	55,08	51,3	118,50	1422,045	In = linha **A** - linha **E**
G	In - Ep (mm)	-19,39	114,99	143,07	92,37	207,81	216,51	-27,955	-48,44	-58,8	-60,3	-11,52	-29,5	-	-	In - Ep = linha **F** - linha **C**
H*	Perda Acumulada de Água - WL (mm)	-265,92	0	0	0	0	0	-27,86	-76,3	-135,1	-195,4	-206,92	-236,42	-	-	WL = ΣNeg(1-Ep)
I	Capacidade de Campo do Solo - CAD (mm)	42,4	41	35	32,5	150	150	150	150	150	128,4	93,6	63,3	-	-	150 mm (adotado para área)
J	Variação da Capacidade de Campo - ΔCAD (mm)	-20,9	-1,4	-6	-2,5	117,5	0	0	0	0	-21,6	-34,8	-30,3	-	-	CAD - CAD do mês anterior
K	Déficit Hídrico - Dh (mm)	1,51	0	0	0	0	0	-27,955	-48,44	-58,8	-38,7	23,28	0,8	-12,36	-148,305	Dh = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **negativo**)
L	Evapotranspiração Real - Er (mm)	93,39	78,6	91,2	92,4	70,2	82,2	92,855	107,14	118,5	101,7	43,32	80	87,63	1051,505	Er = linha **C** - linha **K**
M	Percolação - ΔS (mm)	0	116,39	149,07	94,87	90,31	216,51	0	0	0	0	0	0	55,60	**667,15**	ΔS = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **positivo**)

*Valores calculados pela Tabela de Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998)

Classe 2 e 4 (Coeficiente de Escoamento, C=0,20)																
Linha	**Parâmetro**	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Média**	**Total**	**Referência**
A	Precipitação Média Mensal - Pm (mm)	83,9	215,1	260,3	205,3	308,9	331,9	41,05	11,4	1	3	61,2	57	131,67	1580,05	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
B	Temperatura Média Mensal - T (°C)	21,14	19,86	21,32	21,94	20,68	21,58	19,68	18,28	18,32	18,1	18,19	19,95	19,92	239,04	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
C*	Evapotranspiração Potencial - Ep (mm)	94,9	78,6	91,2	92,4	70,2	82,2	64,9	58,7	59,7	63	66,6	80,8	75,27	903,2	Método Thorntwaite-Mather (1955)
D	Coeficiente de Escoamento - C	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-	-	Tabela de Coeficiente de escoamento (C)
E	Escoamento Superficial - Esc (mm)	16,78	43,02	52,06	41,06	61,78	66,38	8,21	2,28	0,2	0,6	12,24	11,4	26,33	316,01	Esc = linha **A** x linha **D**
F	Infiltração - In (mm)	67,12	172,08	208,24	164,24	247,12	265,52	32,84	9,12	0,8	2,4	48,96	45,6	105,34	1264,04	In = linha **A** - linha **E**
G	In - Ep (mm)	-27,78	93,48	117,04	71,84	176,92	183,32	-32,06	-49,58	-58,9	-60,6	-17,64	-35,2	-	-	In - Ep = linha **F** - linha **C**
H*	Perda Acumulada de Água - WL (mm)	-289,08	0	0	0	0	0	-31,96	-81,54	-140,44	-201,04	-218,68	-253,88	-	-	WL = ΣNeg(1-Ep)
I	Capacidade de Campo do Solo - CAD (mm)	42,4	41	35	32,5	150	150	150	150	150	128,4	93,6	63,3	-	-	150 mm (adotado para área)
J	Variação da Capacidade de Campo - ΔCAD (mm)	-20,9	-1,4	-6	-2,5	117,5	0	0	0	0	-21,6	-34,8	-30,3	-	-	CAD - CAD do mês anterior
K	Déficit Hídrico - Dh (mm)	-6,88	0	0	74,34	59,42	183,32	-32,06	-49,58	-58,9	-39	0	0	10,89	130,66	Dh = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **negativo**)
L	Evapotranspiração Real - Er (mm)	101,78	78,6	91,2	18,06	10,78	-101,12	96,96	108,28	118,6	102	66,6	80,8	64,38	772,54	Er = linha **C** - linha **K**
M	Percolação - ΔS (mm)	0	94,88	123,04	0	0	0	0	0	0	0	17,16	-4,9	19,18	230,18	ΔS = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **positivo**)

*Valores calculados pela Tabela de Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998)

Classe 3 e 5 (Coeficiente de Escoamento, C=0,30)																
Linha	**Parâmetro**	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Média**	**Total**	**Referência**
A	Precipitação Média Mensal - Pm (mm)	83,9	215,1	260,3	205,3	308,9	331,9	41,05	11,4	1	3	61,2	57	131,67	1580,05	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
B	Temperatura Média Mensal - T (°C)	21,14	19,86	21,32	21,94	20,68	21,58	19,68	18,28	18,32	18,1	18,19	19,95	19,92	239,04	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
C*	Evapotranspiração Potencial - Ep (mm)	94,9	78,6	91,2	92,4	70,2	82,2	64,9	58,7	59,7	63	66,6	80,8	75,27	903,2	Método Thorntwaite-Mather (1955)
D	Coeficiente de Escoamento - C	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-	Tabela de Coeficiente de escoamento (C)
E	Escoamento Superficial - Esc (mm)	25,17	64,53	78,09	61,59	92,67	99,57	12,315	3,42	0,3	0,9	18,36	17,1	39,50	474,015	Esc = linha **A** x linha **D**
F	Infiltração - In (mm)	58,73	150,57	182,21	143,71	216,23	232,33	28,735	7,98	0,7	2,1	42,84	39,9	92,17	1106,035	In = linha **A** - linha **E**
G	In - Ep (mm)	-36,17	71,97	91,01	51,31	146,03	150,13	-36,165	-50,72	-59	-60,9	-23,76	-40,9	-	-	In - Ep = linha **F** - linha **C**
H*	Perda Acumulada de Água - WL (mm)	-312,25	0	0	0	0	0	-36,07	-86,79	-145,79	-206,69	-230,45	-271,35	-	-	WL = ΣNeg(1-Ep)
I	Capacidade de Campo do Solo - CAD (mm)	42,4	41	35	32,5	150	150	150	150	150	128,4	93,6	63,3	-	-	150 mm (adotado para área)
J	Variação da Capacidade de Campo - ΔCAD (mm)	-20,9	-1,4	-6	-2,5	117,5	0	0	0	0	-21,6	-34,8	-30,3	-	-	CAD - CAD do mês anterior
K	Déficit Hídrico - Dh (mm)	-15,27	0	0	53,81	28,53	150,13	-36,165	-50,72	-59	-39,3	0	0	2,67	32,015	Dh = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **negativo**)
L	Evapotranspiração Real - Er (mm)	110,17	78,6	91,2	38,59	41,67	-67,93	101,065	109,42	118,7	102,3	66,6	80,8	72,60	871,185	Er = linha **C** - linha **K**
M	Percolação - ΔS (mm)	0	73,37	97,01	0	0	0	0	0	0	0	11,04	-10,6	14,24	**170,82**	ΔS = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **positivo**)

*Valores calculados pela Tabela de Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998)

Classe 6 e 7 (Coeficiente de Escoamento, C=0,40)																
Linha	**Parâmetro**	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Média**	**Total**	**Referência**
A	Precipitação Média Mensal - Pm (mm)	83,9	215,1	260,3	205,3	308,9	331,9	41,05	11,4	1	3	61,2	57	131,67	1580,05	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
B	Temperatura Média Mensal - T (°C)	21,14	19,86	21,32	21,94	20,68	21,58	19,68	18,28	18,32	18,1	18,19	19,95	19,92	239,04	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
C*	Evapotranspiração Potencial - Ep (mm)	94,9	78,6	91,2	92,4	70,2	82,2	64,9	58,7	59,7	63	66,6	80,8	75,27	903,2	Método Thorntwaite-Mather (1955)
D	Coeficiente de Escoamento - C	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-	Tabela de Coeficiente de escoamento (C)
E	Escoamento Superficial - Esc (mm)	33,56	86,04	104,12	82,12	123,56	132,76	16,42	4,56	0,4	1,2	24,48	22,8	52,67	632,02	Esc = linha **A** x linha **D**
F	Infiltração - In (mm)	50,34	129,06	156,18	123,18	185,34	199,14	24,63	6,84	0,6	1,8	36,72	34,2	79,00	948,03	In = linha **A** - linha **E**
G	In - Ep (mm)	-44,56	50,46	64,98	30,78	115,14	116,94	-40,27	-51,86	-59,1	-61,2	-29,88	-46,6	-	-	In - Ep = linha **F** - linha **C**
H*	Perda Acumulada de Água - WL (mm)	-335,41	0	0	0	0	0	-40,17	-92,03	-151,13	-212,33	-242,21	-288,81	-	-	WL = ΣNeg(1-Ep)
I	Capacidade de Campo do Solo - CAD (mm)	42,4	41	35	32,5	150	150	150	150	150	128,4	93,6	63,3	-	-	150 mm (adotado para área)
J	Variação da Capacidade de Campo - ΔCAD (mm)	-20,9	-1,4	-6	-2,5	117,5	0	0	0	0	-21,6	-34,8	-30,3	-	-	CAD - CAD do mês anterior
K	Déficit Hídrico - Dh (mm)	-23,66	0	0	33,28	-2,36	116,94	-40,27	-51,86	-59,1	-39,6	4,92	0	-5,14	-61,71	Dh = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **negativo**)
L	Evapotranspiração Real -	118,56	78,6	91,2	59,12	72,56	-34,74	105,17	110,56	118,8	102,6	61,68	80,8	80,41	964,91	Er = linha **C** - linha **K**
M	Percolação - ΔS (mm)	0	51,86	70,98	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,3	8,88	**106,54**	ΔS = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **positivo**)

*Valores calculados pela Tabela de Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998)

Classe 8 e 10 (Coeficiente de Escoamento, C=0,50)																
Linha	**Parâmetro**	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Média**	**Total**	**Referência**
A	Precipitação Média Mensal - Pm (mm)	83,9	215,1	260,3	205,3	308,9	331,9	41,05	11,4	1	3	61,2	57	131,67	1580,05	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
B	Temperatura Média Mensal - T (°C)	21,14	19,86	21,32	21,94	20,68	21,58	19,68	18,28	18,32	18,1	18,19	19,95	19,92	239,04	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
C*	Evapotranspiração Potencial - Ep (mm)	94,9	78,6	91,2	92,4	70,2	82,2	64,9	58,7	59,7	63	66,6	80,8	75,27	903,2	Método Thorntwaite-Mather (1955)
D	Coeficiente de Escoamento - C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	-	Tabela de Coeficiente de escoamento (C)
E	Escoamento Superficial - Esc (mm)	41,95	107,55	130,15	102,65	154,45	165,95	20,525	5,7	0,5	1,5	30,6	28,5	65,84	790,025	Esc = linha **A** x linha **D**
F	Infiltração - In (mm)	41,95	107,55	130,15	102,65	154,45	165,95	20,525	5,7	0,5	1,5	30,6	28,5	65,84	790,025	In = linha **A** - linha **E**
G	In - Ep (mm)	-52,95	28,95	38,95	10,25	84,25	83,75	-44,375	-53	-59,2	-61,5	-36	-52,3	-	-	In - Ep = linha **F** - linha **C**
H*	Perda Acumulada de Água - WL (mm)	-359,175	0	0	0	0	0	-44,875	-97,875	-157,075	-218,575	-254,575	-306,875	-	-	WL = ΣNeg(1-Ep)
I	Capacidade de Campo do Solo - CAD (mm)	42,4	41	35	32,5	150	150	150	150	150	128,4	93,6	63,3	-	-	150 mm (adotado para área)
J	Variação da Capacidade de Campo - ΔCAD (mm)	-20,9	-1,4	-6	-2,5	117,5	0	0	0	0	-21,6	-34,8	-30,3	-	-	CAD - CAD do mês anterior
K	Déficit Hídrico - Dh (mm)	-32,05	0	0	12,75	-33,25	83,75	-44,375	-53	-59,2	-39,9	-1,2	-22	-15,71	-188,475	Dh = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **negativo**)
L	Evapotranspiração Real -	126,95	78,6	91,2	79,65	103,45	-1,55	109,275	111,7	118,9	102,9	67,8	102,8	90,97	1091,675	Er = linha **C** - linha **K**
M	Percolação - ΔS (mm)	0	30,35	44,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,28	**75,3**	ΔS = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **positivo**)

*Valores calculados pela Tabela de Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998)

Classe 9 e 11 (Coeficiente de Escoamento, C=0,60)																
Linha	**Parâmetro**	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Média**	**Total**	**Referência**
A	Precipitação Média Mensal - Pm (mm)	83,9	215,1	260,3	205,3	308,9	331,9	41,05	11,4	1	3	61,2	57	131,67	1580,05	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
B	Temperatura Média Mensal - T (°C)	21,14	19,86	21,32	21,94	20,68	21,58	19,68	18,28	18,32	18,1	18,19	19,95	19,92	239,04	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
C*	Evapotranspiração Potencial - Ep (mm)	94,9	78,6	91,2	92,4	70,2	82,2	64,9	58,7	59,7	63	66,6	80,8	75,27	903,2	Método Thorntwaite-Mather (1955)
D	Coeficiente de Escoamento - C	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	-	-	Tabela de Coeficiente de escoamento (C)
E	Escoamento Superficial - Esc (mm)	50,34	129,06	156,18	123,18	185,34	199,14	24,63	6,84	0,6	1,8	36,72	34,2	79,00	948,03	Esc = linha **A** x linha **D**
F	Infiltração - In (mm)	33,56	86,04	104,12	82,12	123,56	132,76	16,42	4,56	0,4	1,2	24,48	22,8	52,67	632,02	In = linha **A** - linha **E**
G	In - Ep (mm)	-61,34	7,44	12,92	-10,28	53,36	50,56	-48,48	-54,14	-59,3	-61,8	-42,12	-58	-	-	In - Ep = linha **F** - linha **C**
H*	Perda Acumulada de Água - WL (mm)	-382,44	0	0	0	0	0	-49,08	-103,22	-162,52	-224,32	-266,44	-324,44	-	-	WL = ΣNeg(1-Ep)
I	Capacidade de Campo do Solo - CAD (mm)	42,4	41	35	32,5	150	150	150	150	150	128,4	93,6	63,3	-	-	150 mm (adotado para área)
J	Variação da Capacidade de Campo - ΔCAD (mm)	-20,9	-1,4	-6	-2,5	117,5	0	0	0	0	-21,6	-34,8	-30,3	-	-	CAD - CAD do mês anterior
K	Déficit Hídrico - Dh (mm)	-40,44	0	18,92	-7,78	-64,14	50,56	-48,48	-54,14	-59,3	-40,2	-7,32	-27,7	-23,34	-280,02	Dh = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **negativo**)
L	Evapotranspiração Real -	135,34	78,6	72,28	100,18	134,34	31,64	113,38	112,84	119	103,2	73,92	108,5	98,60	1183,22	Er = linha **C** - linha **K**
M	Percolação - ΔS (mm)	0	8,84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,74	**8,84**	ΔS = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **positivo**)

*Valores calculados pela Tabela de Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998)

Classe 12 (Coeficiente de Escoamento, C=0,70)																
Linha	**Parâmetro**	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Jan**	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Média**	**Total**	**Referência**
A	Precipitação Média Mensal - Pm (mm)	83,9	215,1	260,3	205,3	308,9	331,9	41,05	11,4	1	3	61,2	57	131,67	1580,05	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
B	Temperatura Média Mensal - T (°C)	21,14	19,86	21,32	21,94	20,68	21,58	19,68	18,28	18,32	18,1	18,19	19,95	19,92	239,04	Dado de entrada (ano hidrológico 2017/2018)
C*	Evapotranspiração Potencial - Ep (mm)	94,9	78,6	91,2	92,4	70,2	82,2	64,9	58,7	59,7	63	66,6	80,8	75,27	903,2	Método Thorntwaite-Mather (1955)
D	Coeficiente de Escoamento - C	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	-	-	Tabela de Coeficiente de escoamento (C)
E	Escoamento Superficial - Esc (mm)	58,73	150,57	182,21	143,71	216,23	232,33	28,735	7,98	0,7	2,1	42,84	39,9	92,17	1106,035	Esc = linha **A** x linha **D**
F	Infiltração - In (mm)	25,17	64,53	78,09	61,59	92,67	99,57	12,315	3,42	0,3	0,9	18,36	17,1	39,50	474,015	In = linha **A** - linha **E**
G	In - Ep (mm)	-69,73	-14,07	-13,11	-30,81	22,47	17,37	-52,585	-55,28	-59,4	-62,1	-48,24	-63,7	-	-	In - Ep = linha **F** - linha **C**
H*	Perda Acumulada de Água - WL (mm)	-405,705	0	0	0	0	0	-53,285	-108,565	-167,965	-230,065	-278,305	-342,005	-	-	WL = ΣNeg(1-Ep)
I	Capacidade de Campo do Solo - CAD (mm)	42,4	41	35	32,5	150	150	150	150	150	128,4	93,6	63,3	-	-	150 mm (adotado para área)
J	Variação da Capacidade de Campo - ΔCAD (mm)	-20,9	-1,4	-6	-2,5	117,5	0	0	0	0	-21,6	-34,8	-30,3	-	-	CAD - CAD do mês anterior
K	Déficit Hídrico - Dh (mm)	-48,83	-12,67	-7,11	-28,31	-95,03	17,37	-52,585	-55,28	-59,4	-40,5	-13,44	-33,4	-35,77	-429,185	Dh = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **negativo**)
L	Evapotranspiração Real -	143,73	91,27	98,31	120,71	165,23	64,83	117,485	113,98	119,1	103,5	80,04	114,2	111,03	1332,385	Er = linha **C** - linha **K**
M		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	**0**	ΔS = linha **G** - linha **J** (quando **G** for **positivo**)

*Valores calculados pela Tabela de Rolim, Sentelhas & Barbieri (1998)

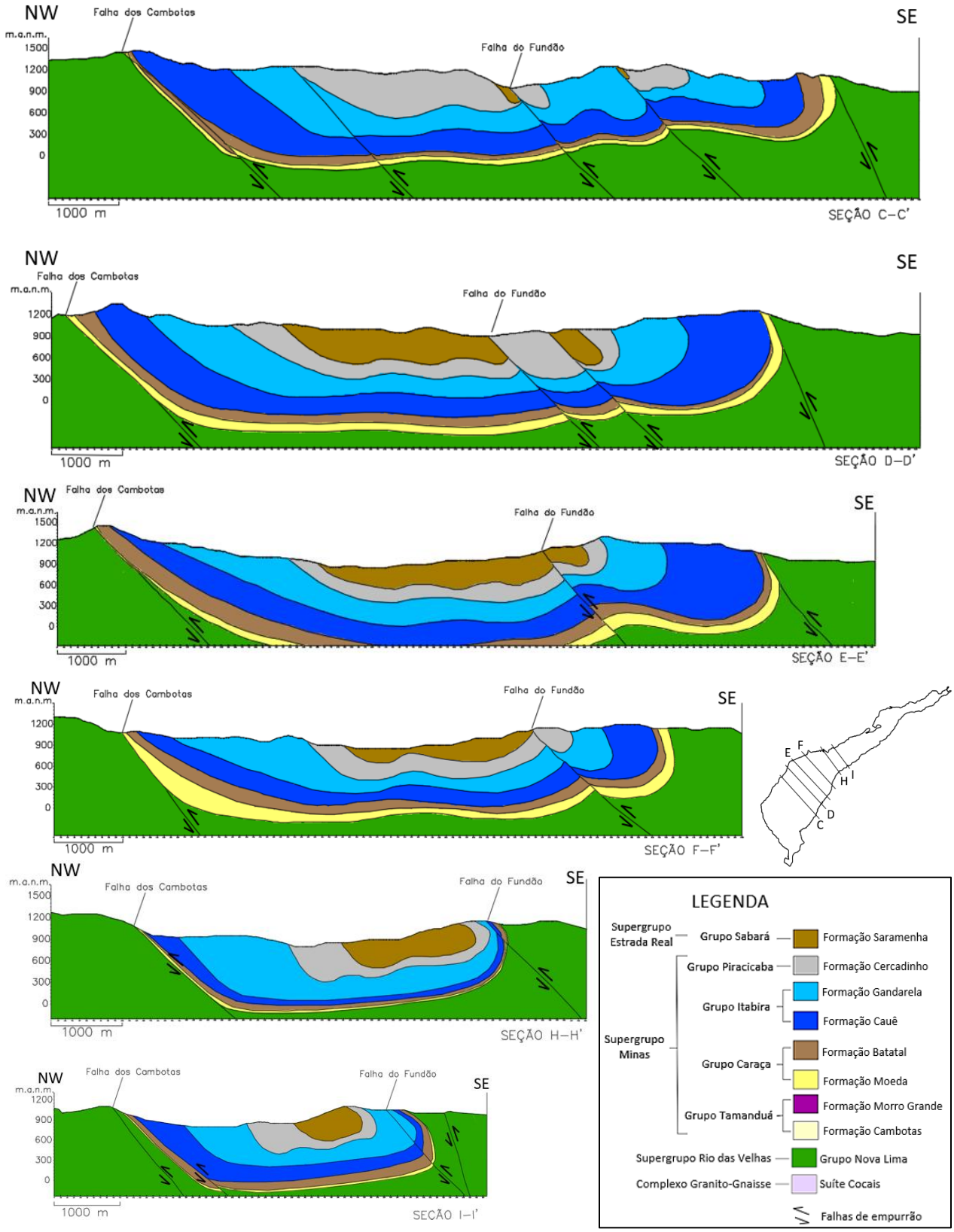


Figura 21: Seções geológicas complementares ao estudo, projetadas entre a porção SW e central do Sinclinal Gandarela ilustrando dobramentos abertos.

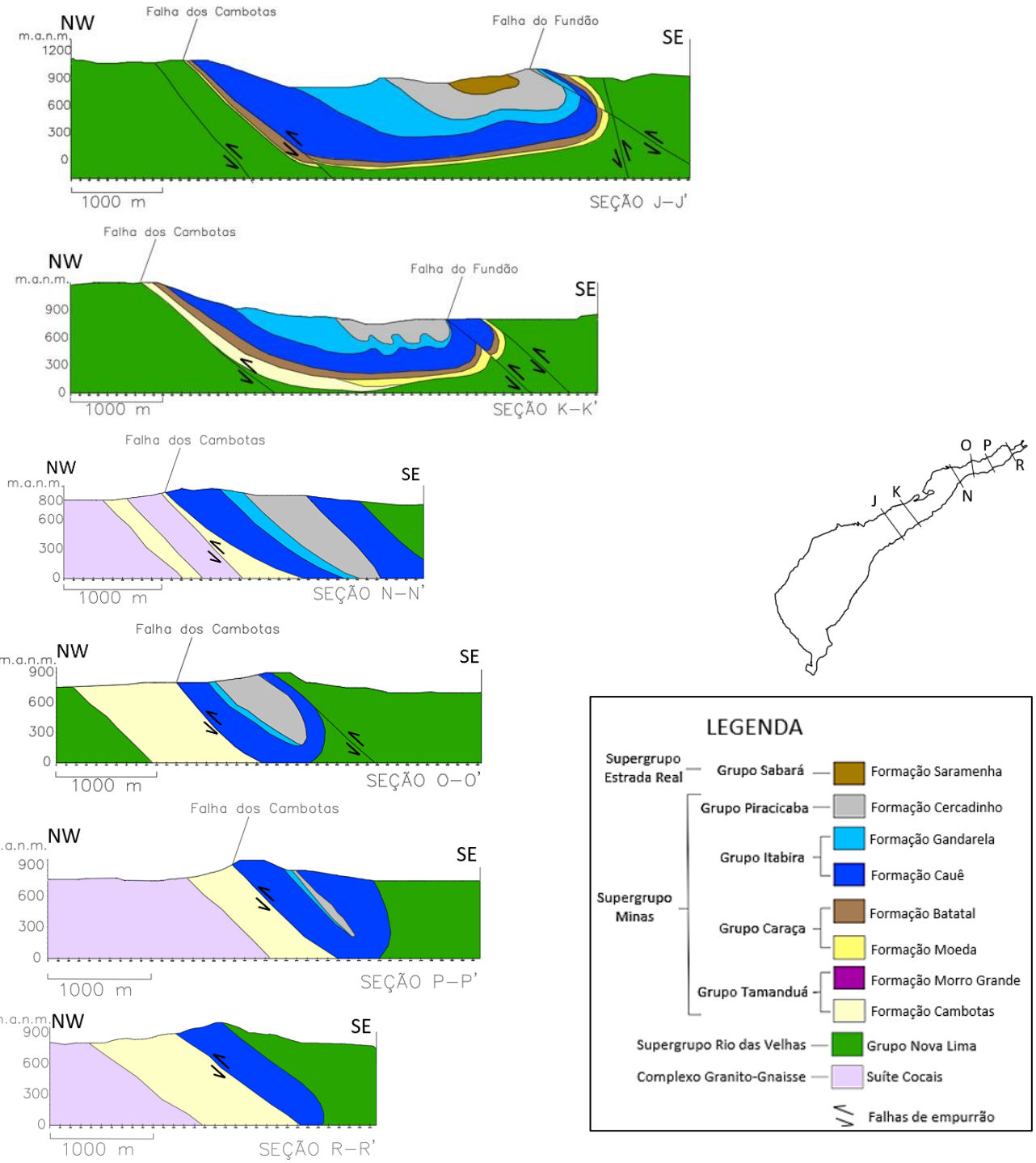


Figura 22: Seções geológicas complementares ao estudo, projetadas entre a porção central e NE do Sinclinal Gandarela. As seções mais à NE apresentam uma estruturação de fechamento do sinclinal.

APÊNDICE F – TABELAS DE BALANÇO HÍDRICO (ROLIM, SENTELHAS & BARBIERI, 1998)

Apêndice F - Tabela Balanço Hídrico (RO