



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto De Geociências

Millena Menezes Marques

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS NA VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO PARAPEBA NA PORÇÃO OESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO –
MINAS GERAIS, BRASIL**

Belo Horizonte

2025

Millena Menezes Marques

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS NA VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO PARAPEBA NA PORÇÃO OESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO –
MINAS GERAIS, BRASIL**

Trabalho Geológico de Graduação apresentado ao Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula

Coorientador: Msc. Wallace Maciel Pacheco Neto

Belo Horizonte

2025

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela proteção e força até aqui.

A minha família, pelo suporte e incentivo durante toda a minha caminhada na graduação.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Rodrigo Sérgio de Paula pelo incentivo e atenção durante todo o processo deste trabalho.

Ao meu coorientador Wallace Maciel Pacheco Neto, que sempre mostrou disposição e boa vontade para me ajudar.

Ao IGC UFMG (Instituto de Geociências) por seu papel na minha formação como geóloga.

Aos meus colegas integrantes do LeHid (Laboratório de Estudos Hidrogeológicos), Alice Zupo, Letícia Pereira, Matheus Castro, Thomaz Vidal e Yasmin Andrade, pelas trocas de informações e conhecimentos relevantes ao meu trabalho.

Por fim, aos amigos que fiz na graduação, que foram meu ponto de apoio de perseverança nessa jornada, em especial ao meu amigo Luan Miguel, que me ajudou tecnicamente com seus conhecimentos de hidrogeologia e informações completas, sempre que precisei, para conseguir finalizar este trabalho.

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba atualmente é responsável pelo abastecimento de quase 50% da região metropolitana de Belo Horizonte, desempenhando um papel significativo para a subsistência da população e da economia local. Ela pode ser dividida, de sua nascente até sua foz, em três trechos, denominados Alto, Médio e Baixo Paraopeba. A área de estudos possui cerca 5.700 km² e se situa na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, englobando desde a nascente do rio Paraopeba até a Serra do Curral, abrangendo todo o Alto Paraopeba e parte do Médio. As unidades hidrogeológicas estão associadas ao contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, incluindo os aquíferos Embasamento, Rio das Velhas, Batatal e Suítes Intrusivas, além dos aquíferos Moeda, Cauê, Gandarela, Piracicaba, Estrada Real e Coberturas Sedimentares. Trata-se de uma área de relevância geológica, hidrogeológica, social e ambiental dentro da bacia hidrográfica, que não possui estudos voltados para a evolução dos recursos hídricos disponíveis e possíveis impactos sobre sua vazão através do tempo, tanto naturais, quanto antrópicos. Por isso, para o período de 1970-2020, utilizando-se de dados públicos, foi feita uma avaliação pluviométrica da área, utilizando os métodos de Thiessen e de Isoietas, seguido de um tratamento gráfico dos dados anuais. Em seguida, foi estudado o comportamento da temperatura na região, realizando-se o Balanço Hídrico Climatológico através do método de Thornthwaite e Mather, no qual foi possível visualizar a evolução do balanço hídrico, cada década menor, e identificar índices de aridez, que indicam um processo que tende à desertificação progressiva da área. Foi realizada ainda uma análise gráfica, voltada para a avaliação fluviométrica da vazão anual do rio. O estudo também incluiu a avaliação de captações de água subterrânea e superficial no intervalo de 1984-2020, no qual, o tratamento gráfico dos dados revelou um aumento contínuo de poços outorgáveis de uso significativo e cadastro de uso insignificante ao longo do período. Todos os resultados e produtos gerados (mapas, tabelas e gráficos) foram correlacionados de maneira integrada para proporcionar uma visão abrangente e robusta dos impactos naturais e antrópicos sobre a vazão do rio Paraopeba e os aquíferos associados. Desta maneira, foi constatado que, ao longo do tempo, tanto fatores naturais quanto atividades humanas têm contribuído para a redução dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraopeba na área estudada.

Palavras-chave: recurso hídrico; balanço hídrico climatológico; análise de outorgas.

ABSTRACT

The Paraopeba River watershed is currently responsible for supplying nearly 50% of the metropolitan region of Belo Horizonte, playing a significant role in the subsistence of the local population and economy. From its source to its mouth, it can be divided into three sections, called Upper, Middle, and Lower Paraopeba. The study area covers approximately 5,700 km² and is located in the western portion of the Iron Quadrangle, encompassing the source of the Paraopeba River up to the Serra do Curral, covering the entire Upper Paraopeba and part of the Middle Paraopeba. The hydrogeological units are associated with the geological context of the Iron Quadrangle, including the Embasamento, Rio das Velhas, Batatal, and Intrusive Suites aquitards, as well as the Moeda, Cauê, Gandarela, Piracicaba, Estrada Real, and Sedimentary Cover aquifers. This is an area of geological, hydrogeological, social, and environmental significance within the watershed, which lacks studies focused on the evolution of available water resources and potential impacts on its flow over time, both natural and anthropogenic. Therefore, for the period 1970-2020, using public data, a pluviometric evaluation of the area was conducted using the Thiessen and Isohyet methods, followed by a graphical analysis of annual data. Subsequently, temperature behavior in the region was studied through the Climatic Water Balance method by Thornthwaite and Mather, which allowed the visualization of the evolution of the water balance extract, decreasing each decade, and the identification of aridity indices, indicating a process tending toward the progressive desertification of the area. A graphical analysis was also conducted to evaluate the annual flow of the river. The study further included an assessment of groundwater and surface water withdrawals between 1984 and 2020, where the graphical data analysis revealed a continuous increase in significant-use permitted wells and registrations of insignificant-use wells over the period. All results and generated products (maps, tables, and graphs) were integrated to provide a comprehensive and robust understanding of the natural and anthropogenic impacts on the Paraopeba River flow and associated aquifers. Thus, it was found that, over time, both natural factors and human activities have contributed to the reduction of water resources in the Paraopeba River watershed within the studied area.

Keywords: water resource; climatological water balance; permit analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo com mapas auxiliares indicando o posicionamento do estado de Minas Gerais no mapa da América do Sul, a localização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba em Minas Gerais, a posição da área de estudos ao longo da bacia e as estruturas do Quadrilátero Ferrífero que a delimitam.	16
Figura 2 - Classificação climática do estado de Minas Gerais, destacando-se em laranja a região onde está inserida a área de estudo. a) classificação segundo Sistema de Köppen. b) classificação segundo Sistema de Thornthwaite. (Adaptado de Martins <i>et al.</i> , 2021).....	17
Figura 3 - Mapa hidrográfico da área de estudo com mapa suporte de setorização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.....	20
Figura 4 - Mapa geológico simplificado do cráton São Francisco meridional com sua relação com as faixas marginais de idade Brasiliana, bem como o posicionamento do Quadrilátero Ferrífero. Estruturas: (d)- Dique máfico com componente de cisalhamento sinistral sup superimposto, FAc- Falha Acaiaca, LC- Zona de Cisalhamento Congonhas & LJ- Lineamento Jeceaba-Bom Sucesso. (Fonte: Endo <i>et al.</i> , 2020).	22
Figura 5 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> , 2019b).....	23
Figura 6 - Mapa geológico regional simplificado, contendo as litologias da área de estudos (Adaptado de Silva <i>et al.</i> , 2020).....	27
Figura 7 - Seções transversais ilustrando um modelo para a evolução do Quadrilátero Ferrífero durante o Paleoproterozoico (Retirado de Alkmin & Noce, 2006. Reproduzido de Alkmim e Marshak, 1998).....	32
Figura 8 - Mapa simplificado da região do Quadrilátero Ferrífero, destacando a configuração estrutural de “domos e quilhas” (Retirado de Alkmin & Noce, 2006. Baseado em Dorr, 1969 e Romano, 1989).	33
Figura 9 - Mapa hidrogeológico simplificado dentro da área de estudos.....	35
Figura 10 - Mapa de distribuição das estações utilizadas nos métodos de análise na área de estudo.....	51
Figura 11 - Gráfico de pluviometria média anual da área, com a discriminação a cada ano do período chuvoso (azul) e seco (beje).	52
Figura 12 - Mapa de polígonos de Thiessen, representando as áreas de influência de precipitação de cada estação pluviométrica utilizada.	53

Figura 13 - Mapa de isoietas, mostrando a configuração de pluviosidade dentro da área, de acordo com as estações pluviométricas, com o mapa hipsométrico, para ser feita associação da precipitação com a topografia característica.	55
Figura 14 - Gráficos de ciclos pluviométricos, dividido em ciclo chuvoso (barra azul claro) e seco (barra bege), com o histórico de dias de chuva associado (linha azul), para cada estação pluviométrica utilizada, em ordem alfabética. a) Carandaí; b) Conselheiro Lafaiete; c) Entre Rios de Minas; d) Fazenda Campo Grande; e) Itabirito Linígrafo; f) Melo Franco; g) Ponte Nova do Paraopeba; h) Resende Costa.....	59
Figura 15 - Gráfico de ciclos pluviométricos da área de estudo, no intervalo de 1970-2020, dividido em ciclo chuvoso (barra azul claro) e seco (barra bege), com o histórico de dias de chuva associado (linha azul).....	59
Figura 16 - Gráfico de intensidade pluviométrica média anual da área de estudo, no intervalo de 1970-2020, com a pluviometria média anual em eixo secundário.	60
Figura 17 - Gráfico de Dupla Massa para precipitação da estação meteorológica Belo Horizonte, em comparação com as estações pluviométricas utilizadas no estudo.....	64
Figura 18 - Gráfico de histórico de temperatura anual compensada, no intervalo de 1970-2020, dividido em temperatura mínima (linha amarela), temperatura média (linha laranja) e temperatura máxima (linha vermelha), com as linhas de tendência (linhas pontilhadas) e regressão linear associada.....	64
Figura 19 - Gráficos do extrato mensal do balanço hídrico de todas as estações pluviométricas, agrupados por década. a) extrato mensal na década 1970-1980. b) extrato mensal na década 1980-1990. c) extrato mensal na década 1990-2000. d) extrato mensal na década 2000-2010. e) extrato mensal na década 2010-2020.....	69
Figura 20 - Mapas de concentração da evapotranspiração real dentro da área de estudos a cada década estudada, de 1970 até 2020.....	71
Figura 21 - Mapas de concentração do déficit hídrico dentro da área de estudos a cada década estudada, de 1970 até 2020.....	72
Figura 22 - Gráfico de vazão média anual, em m ³ /s, das estações pluviométricas Alberto Flores (linha laranja), Belo Vale (linha amarela) e Entre Rios de Minas (linha azul), no período de 1970 a 2020, com as respectivas médias gerais (linhas retas), e equações de regressão linear.	73

Figura 23 - Gráfico de vazão média anual, em m ³ /s, das estações fluviométricas Alberto Flores (linha laranja), Belo Vale (linha amarela) e Entre Rios de Minas (linha azul), sobreposto ao gráfico de ciclos pluviométricos da área de estudos no período de 1970 a 2020.....	74
Figura 24 - Mapa com a localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo em relação aos cursos d'água na área.	76
Figura 25 - Gráficos de vazão média anual e quantidade de outorgas, referente às captações na área de estudo, de água superficial (a) e água subterrânea (b), para uso insignificante (rosa) e uso significativo (roxo).....	78
Figura 26 - Localização das captações da Copasa de Uso Superficial outorgadas no ano de 1994 (cor marrom) e no ano de 2016 (cor vermelha).....	78
Figura 27 - Mapas contendo todas as outorgas concedidas entre 1984 e 2020 de captação superficial, para uso insignificante (a) e significativo (b), de acordo com a distribuição geográfica (municípios) e hidrogeológica (unidades hidrogeológicas).....	80
Figura 28 - Mapa contendo todas as outorgas concedidas entre 1984 e 2020 de captação subterrânea, para uso insignificante (a) e significativo (b), de acordo com a distribuição geográfica (municípios) e hidrogeológica (unidades hidrogeológicas).....	83
Figura 29 - Mapas de Cobertura e Uso do Solo na área de estudos nos anos 1985, 1990, 2000, 2010 e 2020 (Adaptado de MapBiomias, 2024).....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações de município, latitude e capacidade de água disponível, referentes às estações pluviométricas utilizadas no método de balanço hídrico climatológico.	46
Tabela 2 - Subtipos climáticos em função dos valores do índice de aridez	47
Tabela 3 - Informações de cálculo geradas a partir do Método de Thiessen.....	54
Tabela 4 - Informações de cálculo geradas a partir do Método de Isoietas.....	56
Tabela 5 - Tabela com as informações de cálculo geradas a partir da regressão linear dos históricos de pluviometria, dias de chuva e intensidade pluviométrica, utilizados no estudo.	60
Tabela 6 - Tabela com as informações dos históricos de pluviometria, dias de chuva e intensidade pluviométrica, a cada ciclo pluviométrico da área de estudo.	62
Tabela 7 - Tabela com as informações de cálculo geradas a partir da regressão linear dos dados de monitoramento da temperatura utilizados no estudo.	65
Tabela 8 - Temperaturas mínima, média e máxima em cada ciclo pluviométrico definido na área entre 1970 e 2020.....	66
Tabela 9 - Valores do extrato do balanço hídrico (excedente hídrico – déficit hídrico) de cada estação pluviométrica, a cada década estudada.	67
Tabela 10 - Informações de evapotranspiração real (ETR), déficit hídrico (DEF), com resultado do índice de aridez (Ia) e a classificação de subtipo climático correspondente, por década, de 1970 até 2020, referente a cada estação pluviométrica utilizada no balanço hídrico climatológico.	70
Tabela 11 - Tabela com as informações de cálculo geradas a partir da regressão linear dos dados de monitoramento de vazão média anual utilizados no estudo.	74
Tabela 12 - Vazão média das estações fluviométricas Alberto Flores, Belo Vale e Entre Rios de Minas, para cada ciclo pluviométrico definido na área de estudos entre 1970 e 2020.	75
Tabela 13 - Tabela contendo os valores somados da vazão média, para uso insignificante, do total de captações de água superficial concedidas em cada município entre 1984 e 2020, referentes aos 10 municípios da área de estudos com maior soma, dessa forma, maior vazão média de captação outorgada, em m ³ /s.....	81
Tabela 14 - Tabela contendo os valores somados da vazão média, para uso significativo, do total de captações de água superficial concedidas em cada município entre 1984 e 2020, referentes aos 10 municípios da área de estudos com maior soma, dessa forma, maior vazão média de captação outorgada, em m ³ /s.	81

Tabela 15 - Tabela contendo os valores somados da vazão média, para uso insignificante, do total de captações de água subterrânea concedidas em cada município entre 1984 e 2020, referentes aos 10 municípios da área de estudos com maior soma, dessa forma, maior vazão média de captação outorgada, em m ³ /s.....	84
Tabela 16 - Tabela contendo os valores somados de vazão média, para uso significativo, do total de captações de água subterrânea concedidas em cada município entre 1984 e 2020, referentes aos 10 municípios da área de estudos com maior soma, dessa forma, vazão média de captação outorgada, em m ³ /s.	84
Tabela 17 - Tabela com valores de excedente hídrico para cada estação pluviométrica, separado por décadas.	87
Tabela 18 - Tabela com valores de excedente hídrico para cada estação pluviométrica, separado por décadas, de acordo com as respectivas áreas de influência dos polígonos de Thiessen gerados.....	88
Tabela 19 - Tabela com valores correlacionados do volume de excedente hídrico e volume captado na área de estudo, por década.....	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	14
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	15
3.1	LOCALIZAÇÃO	15
3.2	CLIMA	16
3.3	GEOMORFOLOGIA	18
3.4	HIDROGRAFIA.....	19
4	GEOLOGIA	21
4.1	ESTRATIGRAFIA	22
4.1.1	Embasamento Cristalino.....	24
4.1.2	Supergrupo Rio das Velhas	24
4.1.3	Supergrupo Minas	24
4.1.4	Supergrupo Estrada Real	25
4.1.5	Suítes Intrusivas.....	25
4.1.6	Coberturas Cenozoicas	26
4.2	EVOLUÇÃO TECTÔNICA E ESTRUTURAL	28
4.2.1	Modelo Dorr (1969).....	28
4.2.2	Modelo Chemale Jr, Rosiére e Endo (1994).....	29
4.2.3	Modelo Endo (1997).....	29
4.2.4	Modelo Alckmin & Marshak (1998).....	30
4.2.4	Arquitetura Estrutural	33
5	SISTEMA AQUÍFERO	34
5.1	AQUITARDO EMBASAMENTO	35
5.2	AQUITARDO RIO DAS VELHAS	36
5.3	AQUÍFERO MOEDA	36
5.4	AQUITARDO BATATAL	37
5.5	AQUÍFERO CAUÊ	37

5.6	AQUÍFERO GANDARELA	38
5.7	AQUÍFERO PIRACICABA	38
5.8	AQUÍFERO ESTRADA REAL	38
5.9	AQUITARDO SUÍTES INTRUSIVAS	39
5.10	AQUÍFERO COBERTURAS SEDIMENTARES	39
6	MATERIAIS E MÉTODOS	40
6.1	BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	41
6.1.1	Pluviometria	41
6.1.2	Temperatura	43
6.1.3	Método de Thornthwaite e Mather	43
6.2	ANÁLISE FLUVIOMÉTRICA	47
6.3	AVALIAÇÃO DE CAPTAÇÕES	47
6.4	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS	49
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
7.1	BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	52
7.1.1	Pluviometria	52
7.1.2	Temperatura.....	63
7.1.3	Método de Thorthwaite e Mather	67
7.2	ANÁLISE FLUVIOMÉTRICA	73
7.3	AVALIAÇÃO DE CAPTAÇÕES	76
7.4	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS	86
8	CONCLUSÕES	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba situa-se na região central do estado de Minas Gerais, e, de acordo com a Companhia de Saneamento de Minas Gerais, contribui, hoje, com 28% do abastecimento de Belo Horizonte, e 48% da região metropolitana (CBHSF, 2024a), movimentando atividades expressivas para economia do estado, como a mineração e siderurgia.

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF, 2024b), a bacia hidrográfica do rio Paraopeba ocupa 5,14% da bacia do rio São Francisco, com uma área aproximada de 12.000 km². Sua nascente está localizada no município de Cristiano Otoni e sua foz está na represa de Três Marias, no município de Felixlândia, sendo subdividida em três trechos (IGAM, 2020): Alto, Médio e Baixo Paraopeba.

Geologicamente, a bacia está inserida na porção meridional do Cráton do São Francisco (CARVALHO, 2014), e segundo a CODEMIG (2019) associa-se a três compartimentos: Embasamento Cristalino e Quadrilátero Ferrífero (Alto-Médio Paraopeba) e Bacia Intracratônica do São Francisco – Grupo Bambuí (Baixo Paraopeba).

A área de estudo compreende o Alto e parte do Médio Paraopeba, com uma área de aproximadamente 5.700 km², abarcando desde o município de Cristiano Otoni, limite sul da área, até o município de Mateus Leme, limite norte, atravessando a porção oeste da região metropolitana de Belo Horizonte, bem como a borda oeste do Quadrilátero Ferrífero, chegando até a Serra do Curral. A região possui importantes associações de rochas e aquíferos de alto potencial.

Das atividades econômicas instaladas na bacia são destaque a exploração mineral, siderurgias, indústria petroquímica e automobilística, produção de bebidas, serviços, geração hidrelétrica, pecuária e agricultura. Especialmente na porção do Alto Paraopeba há um grande volume de investimentos nos setores minerário e siderúrgico, que nos últimos anos contribuíram fortemente para a economia da região. O uso e a ocupação desordenada da bacia vêm historicamente provocando um processo contínuo de degradação, que tem comprometido a qualidade e a quantidade das águas (Polignano e Lemos, 2020).

Devido sua relevância geológica, ambiental e social, é imprescindível conhecer a dinâmica de seus fatores físicos ao longo do tempo para compreender a influência e a magnitude dos impactos naturais e antrópicos nos recursos hídricos da área e da bacia como um todo. Neste trabalho foi realizado o levantamento das características físicas naturais e do uso de água

superficial e subterrânea, através da aplicação de diferentes métodos quantitativos e qualitativos.

Finalmente, foi feita a compilação e análise integrada dos parâmetros em conjunto a fim de se obter uma visão completa do comportamento e evolução da bacia do rio Paraopeba na área de estudo. Todos os dados apresentados foram obtidos em plataformas de acesso à informação públicas, possibilitando, dessa forma, a replicabilidade do desenvolvimento da pesquisa para o restante da bacia do rio Paraopeba.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Compreender a situação dos recursos hídricos na área de estudo a partir de uma análise integrada dos impactos/variações na vazão da bacia hidrográfica do rio Paraopeba na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero.

2.2 Objetivo Específico

- Avaliar o balanço hídrico da região, obtendo, conseqüentemente, os valores calculados de: excedente hídrico, déficit hídrico, precipitação, evapotranspiração, quantidade de água superficial e quantidade de água subterrânea na área de estudo ao longo do tempo;
- Realizar os impactos naturais na área por meio da compilação e tratamento de dados de monitoramento pluviométricos (precipitação), fluviométricos (vazão) e temperatura, para construção de gráficos e mapas de análise da configuração ambiental;
- Realizar os impactos antrópicos na área por meio da compilação e tratamento de dados de captações (vazão) para uso de água superficial e subterrânea, para construção de gráficos e mapas correlacionados às diferentes unidades geológicas, hidrogeológicas e geográficas (municípios).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

3.1 Localização

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba compreende uma área de 12.054,25 km², abrangendo 48 municípios e abastecendo 1,3 milhão de pessoas (CBHSF, 2024b). Ela é subdividida em três trechos: Alto Paraopeba, desde a nascente do rio Paraopeba, Médio Paraopeba, até a confluência com o rio Paraúna e Baixo Paraopeba, terminando na foz no rio São Francisco. O Alto Paraopeba possui uma área aproximada de 3.600 km², o Médio Paraopeba representa cerca de 5.154 km² e a área do Baixo Paraopeba corresponde à aproximadamente 3.300 km². Essa subdivisão considera atributos técnicos, principalmente no que diz respeito às particularidades locais, às áreas de drenagem ou contribuição e as atividades desenvolvidas (COBRAPE, 2018, apud Soares, 2021).

A área de estudo possui 5.732,33 km² e abrange o trecho da bacia hidrográfica correspondente a todo o Alto Paraopeba e parte do Médio Paraopeba. Ela começa no município Cristiano Ottoni, no sul de Minas Gerais, onde está a nascente da bacia do rio Paraopeba, e termina ao chegar nos municípios que fazem parte da bacia hidrográfica e abrigam a Serra do Curral, que delimita a porção norte do Quadrilátero Ferrífero e funciona com um divisor de águas entre o Quadrilátero e Complexo Belo Horizonte, sendo eles Ibirité, Sarzedo, Mário Campos, São Joaquim de Bicas, Igarapé, Mateus Leme e Itaúna.

A área passa por 30 municípios – Casa Grande, Lagoa Dourada, Resende Costa, Queluzito, Conselheiro Lafaiete, Itaverava, Ouro Branco, Ouro Preto, Congonhas, São Brás do Suaçuí, Entre Rios de Minas, Desterro de Entre Rios, Jeceaba, Moeda, Belo Vale, Piedade dos Gerais, Piracema, Itaguara, Crucilândia, Bonfim, Brumadinho, Rio Manso, Itatiaiuçu, Ibirité, Sarzedo, Mário Campos, São Joaquim de Bicas, Igarapé, Mateus Leme e Itaúna (Figura 1).

Todos os municípios fazem parte da Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, definição vigente desde 1989 e realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Ela está situada no centro-sul do estado de Minas Gerais e abrange uma área central ao redor de Belo Horizonte, capital do estado. Se concentram atividades industriais, comerciais e de serviços, além de algumas cidades possuírem uma economia fortemente ligada à mineração. É a Mesorregião do estado de maior densidade populacional e embora seja uma região bastante urbanizada, há destaque para a produção agrícola em áreas mais afastadas do núcleo urbano.

De acordo com o IBGE (1990) para a definição das mesorregiões foram estabelecidos como critérios: as características sociais, a geografia e a articulação espacial, para fins estatísticos e com base em similaridades econômicas e sociais. Sendo assim, o Estado de Minas Gerais foi dividido em 12 mesorregiões – Noroeste de Minas; Norte de Minas; Jequitinhonha; Vale do Mucuri; Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba; Central Mineira; Metropolitana de Belo Horizonte; Vale do Rio Doce; Oeste de Minas; Sul e Sudeste de Minas; Campo das Vertentes e Zona da Mata.

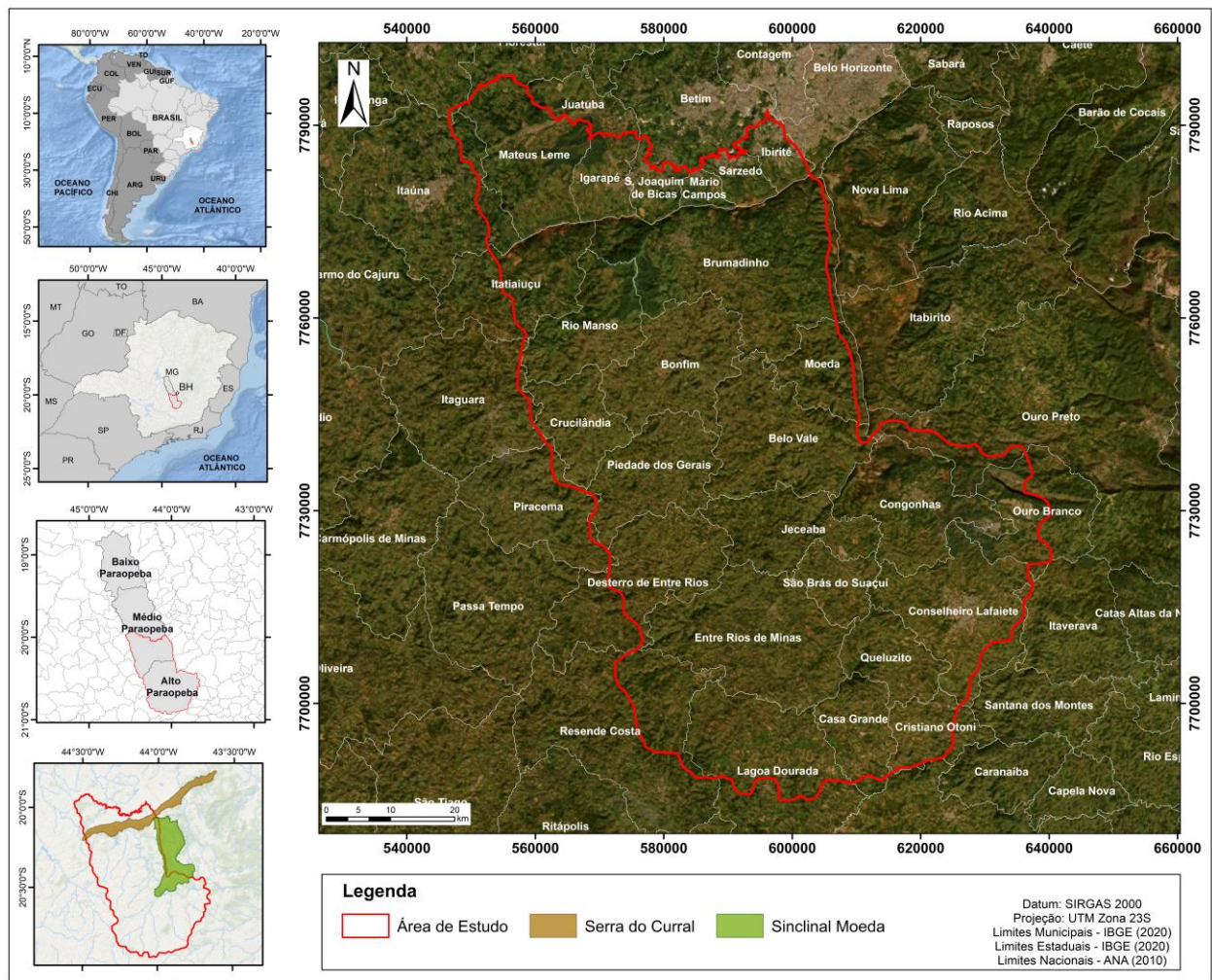


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo com mapas auxiliares indicando o posicionamento do estado de Minas Gerais no mapa da América do Sul, a localização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba em Minas Gerais, a posição da área de estudos ao longo da bacia e as estruturas do Quadrilátero Ferrífero que a delimitam.

3.2 Clima

Os Sistemas de Classificação Climática são utilizados a fim de sintetizar as características climáticas de um determinado local, sendo os mais usuais o Sistema de Köppen (1936) e o Sistema de Thornthwaite (1948). O Sistema de Classificação de Köppen utiliza dados

médios mensais de temperatura do ar e precipitação para definir os limites climáticos, e no Brasil sua utilização é comum pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e por outros órgãos estaduais. Já o Sistema de Thornthwaite é baseado em médias climatológicas mensais do extrato do balanço hídrico climatológico, temperatura do ar e precipitação, sendo um método de maior sensibilidade na definição dos limites climáticos, pois detecta pequenas variações espaciais com maior eficiência.

Segundo estudos de Martins *et. al* (2021) na região da área de estudo há predominância de dois climas de acordo com a classificação de Köppen (Figura 2a): Aw, definido como clima tropical com inverno seco, com nítida estação seca de maio a outubro (julho é o mês mais seco) e estação chuvosa no verão, de novembro a abril, com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C; Cwa, caracterizado como clima subtropical de inverno seco, com temperaturas inferiores a 18°C, e verão quente, com temperaturas superiores a 22°C.

De maneira correspondente, pela classificação de Thornthwaite, os climas presentes são denominados B (B1 a B4), que se referem à tipos climáticos úmidos (Figura 2b). Neste sistema a primeira letra da classificação é relacionada ao tipo climático e a segunda letra ao subtipo climático, referente ao índice de aridez, parâmetro estudado no presente trabalho, detalhado no balanço hídrico climatológico (tópicos 6.1 e 7.1).

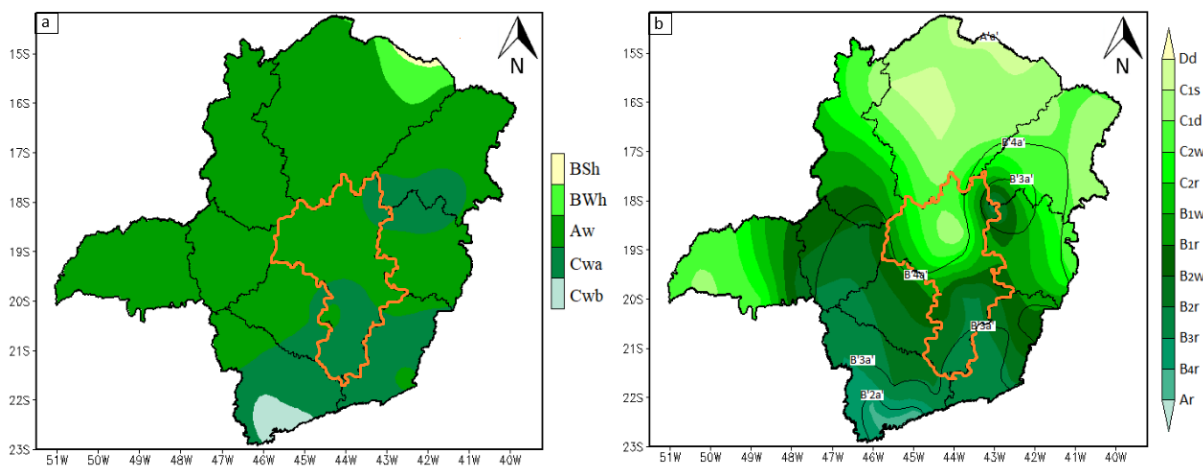


Figura 2 - Classificação climática do estado de Minas Gerais, destacando-se em laranja a região onde está inserida a área de estudo. a) classificação segundo Sistema de Köppen. b) classificação segundo Sistema de Thornthwaite. (Adaptado de Martins *et al.*, 2021).

Os dados da última Normal Climatológica (1991-2020) para a estação meteorológica de Belo Horizonte (código: 83587), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024a), mostram que a umidade relativa do ar possui uma média anual de 63,7%. De novembro até o fim de junho, os valores se mantêm acima de 60%, com maior média no mês

de dezembro, atingindo 71%. Já entre julho e outubro essas médias ficam abaixo de 60%, sendo registrada a menor média de umidade relativa do ar no mês de agosto, com 54%.

Em relação à precipitação, a média histórica acumulada anual é de 1578,3 mm, sendo os meses de janeiro e dezembro de maior precipitação média acumulada com, respectivamente, 330,9 mm e 339,1 mm. Já os meses com menor precipitação acumulada correspondem a julho e agosto, com respectivos 5,4 mm e 10,6 mm. O trimestre com maior quantidade de chuva é o de novembro a janeiro, que correspondem a 57,4% de toda a precipitação média anual acumulada, enquanto o trimestre mais seco é o de julho a agosto, cuja precipitação corresponde a apenas 1,74% da média anual acumulada. Quanto ao balanço hídrico, a evapotranspiração potencial média anual registrada é 1496,2 mm (INMET, 2024b).

3.3 Geomorfologia

Na bacia hidrográfica do rio Paraopeba encontram-se as seguintes regiões geomorfológicas (SISEMA, 2021): Depressão do São Francisco; Planalto Centro-Sul Mineiro; Planaltos do Leste de Minas; e Quadrilátero Ferrífero. A região Depressão do São Francisco é predominante no Baixo Paraopeba.

Englobando especificamente a área de estudo, na área do Planalto Atlântico, é possível distinguir formas de relevo bem definidas e numerosas subdivisões, entre elas o Planalto Centro-Sul Mineiro, que é mais representativo no Médio Paraopeba, mas também está presente no Alto Paraopeba junto aos Planaltos do Leste de Minas. Localmente nos planaltos, podem ocorrer processos de erosão laminar ou linear acelerada (ravinas e voçorocas) (Baptista *et al.*, 2010). Por fim, o Quadrilátero Ferrífero ocorre na porção leste do Alto Paraopeba e segue para o Médio Paraopeba.

O QF é composto por uma combinação de regiões geomorfológicas intimamente ligadas e sua paisagem atual foi moldada pela geologia estrutural, pela erosão diferencial (Varajão, 1991) e a denudação diferencial (Salgado, 2006) atuante na região, responsáveis pela formação de relevos proeminentes. No tocante à erosão diferencial, os quartzitos (Formação Moeda) e itabiritos (Formação Cauê), por se tratarem de litologias mais resistentes, preservaram-se como elevações, enquanto os granito-gnaisses dos complexos metamórficos, devido à sua menor resistência aos efeitos do clima e da erosão, transformaram-se em terrenos mais baixos (Harder e Chamberlin, 1915). Enquanto isso, filitos e xistos possuem resistência relativa intermediária,

ocupando, principalmente, depressões formadas por anticlinais invertidos ou sinclinais (Varajão, 1991).

A área de estudo é circundada por duas estruturas importantes do QF: Sinclinal Moeda e o Homoclinal Curral. O Sinclinal Moeda constitui uma vasta elevação suspensa, orientada no sentido norte-sul, apresentando uma configuração morfológica que pode ser dividida em duas partes distintas: as margens externas e o planalto interior do sinclinal (Medina, Dantas e Saadi, 2005).

As margens externas do sinclinal possuem altitudes variando entre 1.500 e 1.600 metros, sendo sustentadas por quartzitos da Formação Moeda (Grupo Caraça) e itabiritos da Formação Cauê (Grupo Itabira), com presença de cristas ou planaltos, frequentemente revestidos por canga. O planalto interior do sinclinal consiste em uma superfície plana, com altitudes na faixa de 1.300 metros, estendendo-se por aproximadamente 20 km na direção N-S, cruzada por vales encaixados. Já o Homoclinal Curral está na extremidade norte do Quadrilátero Ferrífero, caracterizada por cristas dominantes com altitudes que atingem 1.400 m que são sustentadas pela formação ferrífera, seguindo uma direção aproximada WSW-ENE (Medina, Dantas e Saadi, 2005).

3.4 Hidrografia

A bacia hidrográfica do rio São Francisco abrange uma área de 638.324 km² que corresponde a 8% do território nacional, apresentando importância por transportar um grande volume de água em uma região semiárida, pelo potencial hídrico passível de aproveitamento e por sua contribuição histórica e econômica para o país. Devido à sua extensão de 2.914 km e aos diferentes ambientes percorridos, a bacia hidrográfica é dividida em quatro regiões: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (Lee *et al.*, 2014; Castro e Pereira, 2017).

Na região do Alto São Francisco encontra-se a bacia hidrográfica do rio Paraopeba. Seus principais rios são Paraopeba, Águas Claras, Macaúbas, Betim, Camapuã e Manso (CBHSF, 2024b). O rio Paraopeba percorre 550 km desde a sua nascente, no município de Cristiano Ottoni, até sua foz na Represa de Três Marias, entre os municípios de Pompéu e Felixlândia, em Minas Gerais (IGAM, 2013 apud Soares, 2021).

Em um contexto mais local, observando apenas os cursos d'água que cortam o limite da área de estudos (Figura 3), além do rio Paraopeba, que está atravessando o centro de toda a área, também há a presença dos afluentes Rio Manso, Rio Macaúbas, Rio Maranhão, Rio Camapuã,

Rio Brumado e Rio Grande. Além disso, estão inseridas as represas Serra Azul (Ribeirão Serra Azul), Ibirité e Rio Manso.

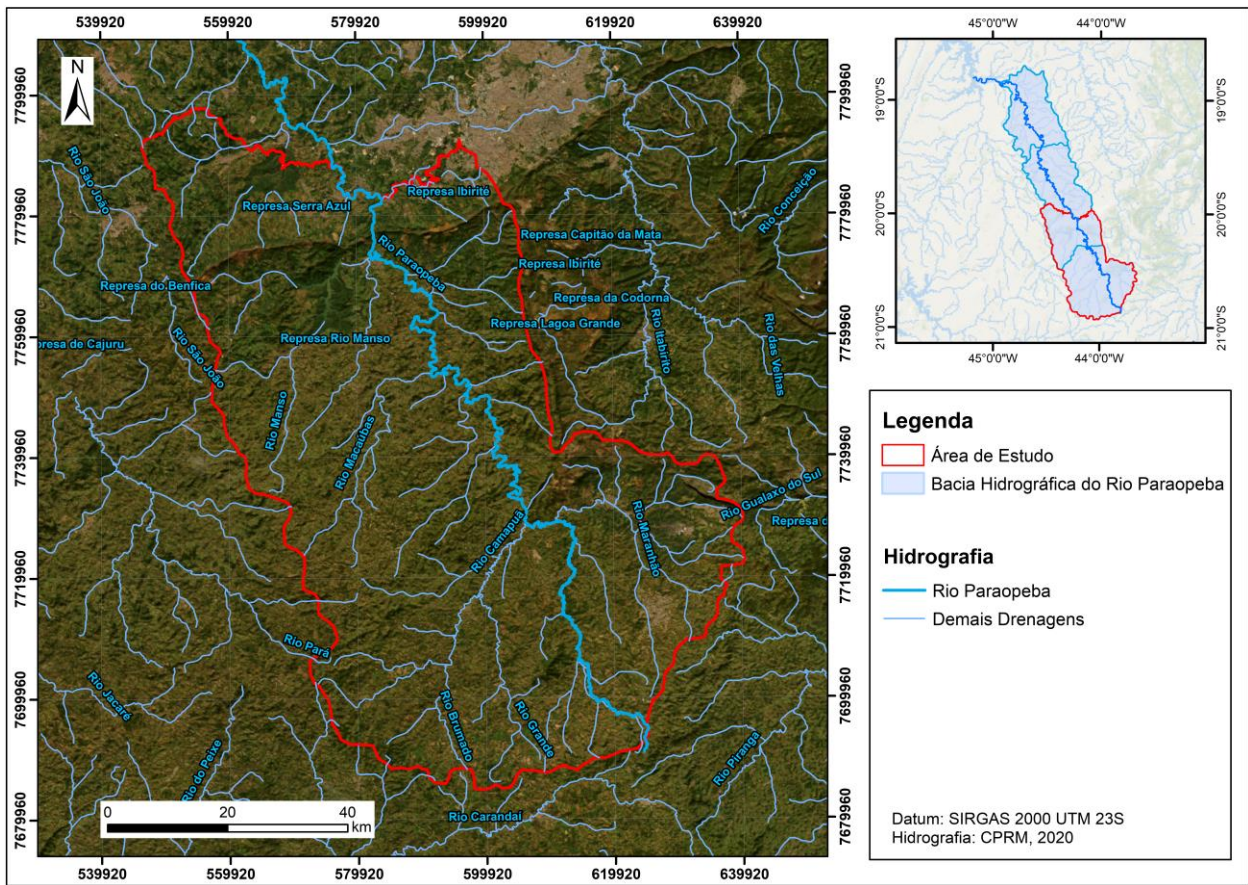


Figura 3 - Mapa hidrográfico da área de estudo com mapa suporte de setorização da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

4 GEOLOGIA

De acordo com a CODEMIG (2019), a bacia hidrográfica do rio Paraopeba associa-se com três compartimentos geológicos: Embasamento Cristalino e Quadrilátero Ferrífero (Alto e Médio Paraopeba) e Bacia Intracratônica do São Francisco – Grupo Bambuí (Baixo Paraopeba). A área de estudo, que engloba todo o Alto Paraopeba e parte do Médio Paraopeba, está, então, no contexto do Quadrilátero Ferrífero, inserido no Cráton São Francisco.

O Cráton São Francisco é uma grande unidade tectônica, compreendendo a maior parte do Estado da Bahia e se estende às regiões vizinhas de Minas Gerais, Sergipe, Pernambuco e Goiás. Ao sul, está alocado o Quadrilátero Ferrífero, uma província mineral localizada no centro-sudeste do Estado de Minas Gerais, ocupando uma área aproximada de 7.000 km², cuja designação “Quadrilátero” é devida ao arranjo geométrico de sua morfoestrutura, sendo utilizada em 1933 pelo geólogo Luiz Flores de Moraes Rego para definir a área (Machado, 2009).

Segundo Almeida (1977) o Cráton São Francisco é circundado por faixas de dobramento desenvolvidas durante o Ciclo Brasileiro, que apresentam estruturas geralmente paralelas às suas bordas, mas cortam em variados ângulos as estruturas pré-brasileiras de seu embasamento, o qual se consolidou ao término do Ciclo Transamazônico, sofrendo deformações de natureza paratectônica. Sua cobertura compreende dois complexos – o mais antigo correlativo de uma faixa de dobramentos desenvolvida durante a primeira metade do Pré-Cambriano Superior e o mais novo, brasileiro, recobre quase metade de sua área.

A porção meridional do cráton é composta por terrenos e sucessões do tipo *greenstone belt* arqueanos, rochas metassedimentares paleoproterozóicas e coberturas sedimentares plataformais neoproterozóicas (Zacchi *et al.*, 2007). A caracterização do QF e sua posição em relação ao cráton estão na Figura 4 abaixo.

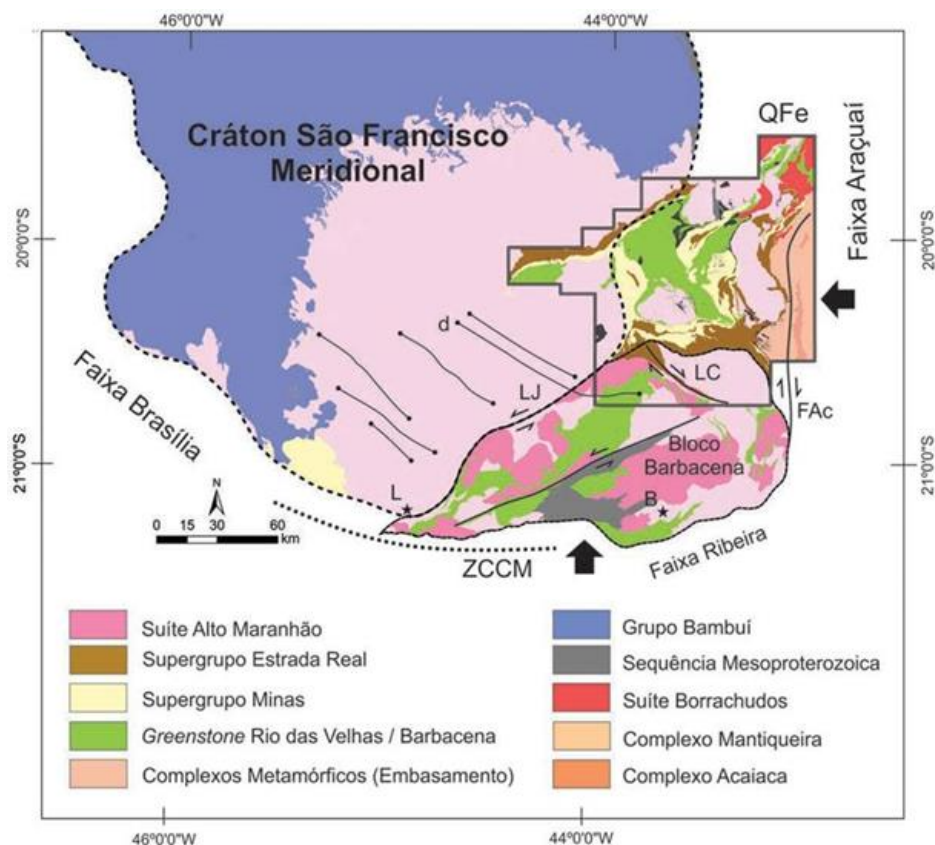


Figura 4 - Mapa geológico simplificado do cráton São Francisco meridional com sua relação com as faixas marginais de idade Brasiliana, bem como o posicionamento do Quadrilátero Ferrífero. Estruturas: (d)- Dique máfico com componente de cisalhamento sinistral sup superimposto, FAc- Falha Acaiaca, LC- Zona de Cisalhamento Congonhas & LJ- Lineamento Jeceaba-Bom Sucesso. (Fonte: Endo *et al.*, 2020).

4.1 Estratigrafia

As rochas metassedimentares pré-cambrianas do QF foram nomeadas pela primeira vez por Derby (1906), que define a “Série Minas” como sendo a sequência xistosa metassedimentar e metavulcânica sobreposta de maneira discordante ao embasamento arqueano (Riccomini, 1982). Desde esta data houveram variados estudos e diferentes contribuições acerca das definições e divisões estratigráficas.

No presente trabalho será considerada a descrição da estratigrafia conforme o mapeamento do Quadrilátero Ferrífero realizado por Endo *et al.* (2019a), porém como a área de estudo abrange também o compartimento do Embasamento Cristalino (CODEMIG, 2019), o qual está fora da área de escopo mapeada por Endo *et al.* (2019), foi necessário utilizar, para a confecção do mapa geológico, a base do mapeamento do estado de Minas Gerais, elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil em 2020 (Silva *et al.*, 2020).

O Quadrilátero Ferrífero é composto de seis unidades litoestratigráficas, da base para o topo, representadas na coluna estratigráfica abaixo (Figura 5): i) Embasamento Cristalino, formado pelos terrenos arqueanos granítico-gnáissicos (TTGs); ii) Supergrupo Rio das Velhas; iii) Supergrupo Minas; iv) Supergrupo Estrada Real (Grupo Itacolomi e Grupo Sabará); v) Suítes Intrusivas e vi) Coberturas Cenozoicas, representadas pelos depósitos sedimentares terciários e quaternários (Endo *et al.*, 2019b).

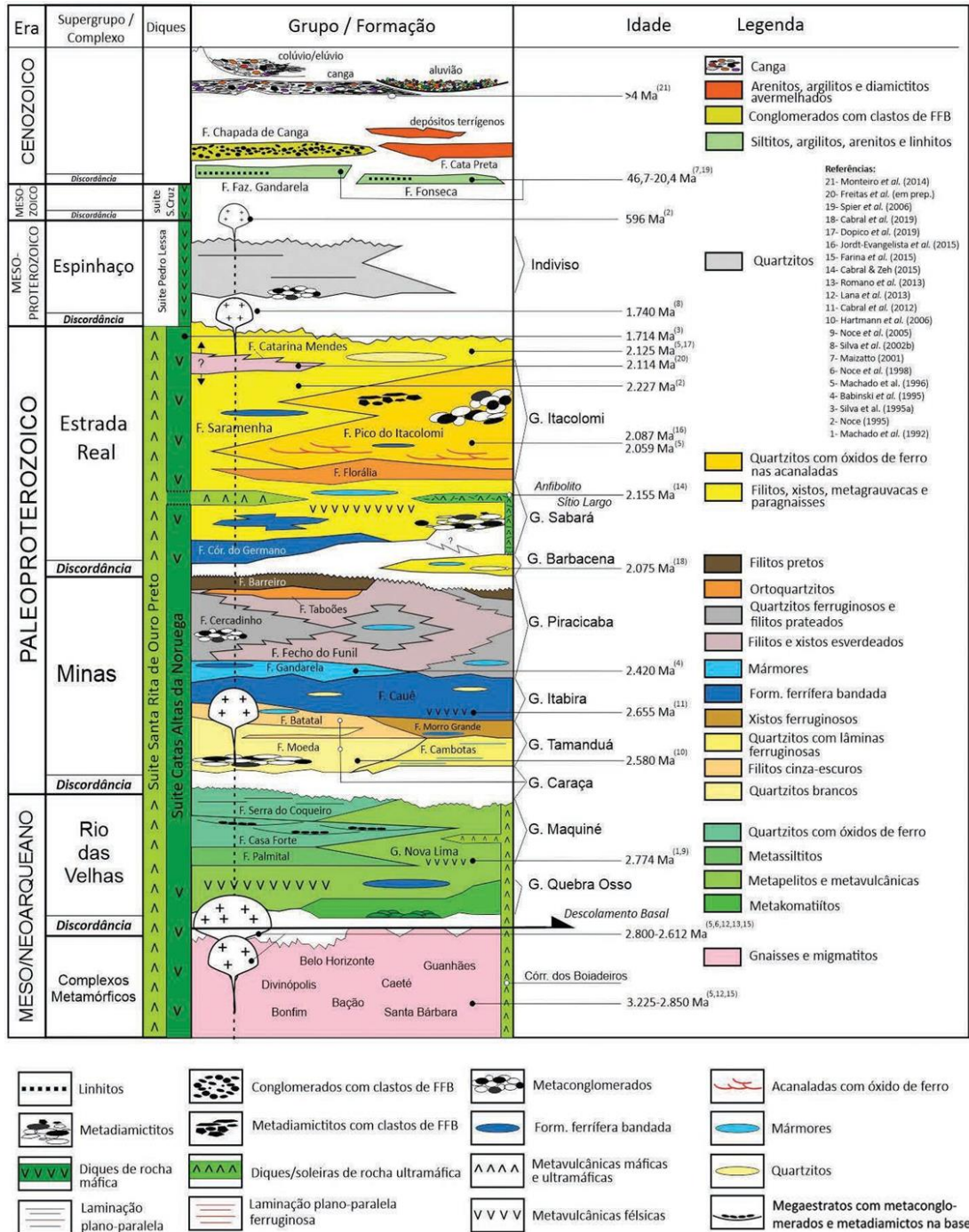


Figura 5 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.*, 2019b).

4.1.1 Embasamento Cristalino

O embasamento é composto por diversos complexos granito-gnáissicos de idade arqueana, 3,225 – 2,850 Ga (Endo *et al.*, 2019a), de composição TTG (tonalito-trondhjemitogranodiorito) (Herz, 1970; Cordani *et al.*, 1980). Esses litotipos podem apresentar-se isotrópicos, como também com presença de bandamentos e foliações, sendo estas estruturas derivadas dos diversos processos tectono-metamórficos pelos quais estas rochas passaram. Esses complexos se apresentam predominantemente na configuração de domos extensos, abrangendo os complexos Bonfim, Bação, Belo Horizonte, Caeté, Divinópolis, Guanhões e Santa Bárbara, exibindo limites tectônicos com as unidades que se sobrepõem (Dorr, 1969; Schorscher, 1979), os quais podem ser interpretados como falhas de empurrão (Marshak e Alkmim, 1989), especialmente na margem oriental do QF.

4.1.2 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas compreende rochas metavulcânicas e metassedimentares que caracterizam o *greenstone belt* de idade arqueana (Schorscher *et al.*, 1982; Machado *et al.*, 1989 e 1992). Esta sequência vulcanossedimentar se dispõe tectonicamente sobre as rochas dos complexos metamórficos. Estas rochas são divididas por Endo *et al.* (2019a, b), da base para o topo, pelos grupos Quebra Osso, constituído por metakomatiítos, metabasaltos toleíticos e metariolitos (Schorscher, 1978); Nova Lima, composto por quartzitos, filitos, xistos, formações ferríferas bandadas e metacherts (Dorr, 1969); e Maquiné, que ocorre em discordância erosiva e possui níveis metaconglomeráticos na base, quartzitos maciços e sericíticos, sericita-quartzo xistos, metaconglomerados oligomíticos e polimíticos e filitos (Dorr, 1969; Ladeira, 1980).

4.1.3 Supergrupo Minas

Endo *et al.* (2019a,b) apresenta a divisão do Supergrupo em ordem cronoestratigráfica, da seguinte maneira: Grupo Tamanduá (Simmons e Maxwell, 1961) – formações Cambotas, de quartzitos e xistos, e Morro Grande, composta por xistos e formação ferrífera dolomítica; Grupo Caraça - formações Moeda (quartzitos e conglomerados) e Batatal (filitos sericíticos e grafitosos); Grupo Itabira - formações Cauê (Itabiritos dolomíticos e anfibolíticos) e Gandarela (dolomitos e filitos); e por fim Grupo Piracicaba - formações Cercadinho (quartzitos, filitos

ferruginosos, xistos, xistos sericíticos), Fecho do Funil (filitos dolomíticos), Taboões (quartzitos de granulometria fina) e Barreiro (filitos e filitos grafitosos).

4.1.4 Supergrupo Estrada Real

O Supergrupo Estrada Real foi definido por Endo *et al.* (2019a, b), que engloba o Grupo Barbacena, Grupo Sabará e Grupo Itacolomi, no topo.

O Grupo Barbacena de acordo com o autor é indiviso e representado por grafita xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xistos manganésíferos, micaxistos, quartzitos feldspáticos, filitos com intercalações de anfibolito e metaultramáficas. O mapeamento do Serviço Geológico do Brasil (Silva *et al.*, 2020) divide o grupo, da base para o topo, em Formação Congonhas-Itaverava, constituída de xistos e metagrauvas, seguido pela Formação Mutuca, composta por metabasaltos, Formação Lafaiete, caracterizada por biotita xisto, gondito, quartzito e carbonatos, e por fim, Formação Santo Amaro, que possui quartzito, filito e formação ferrífera restrita.

O Grupo Sabará inclui as formações Córrego do Germano, inferior, composta por formação ferrífera bandada e quartzitos; Saramenha, composta por xistos com intercalações de metagrauvas, quartzitos e formação ferrífera bandadas, e Catarina Mendes, superior, formada por xistos, quartzitos e filitos. O Grupo Itacolomi é constituído pelas formações Florália (quartzitos), e Pico do Itacolomi (quartzitos, metaconglomerados, arenitos e pelitos subordinados (Dorr, 1969; Alkmim, 1987).

4.1.5 Suítes Intrusivas

Rochas intrusivas ocorrem cortando as rochas do Supergrupo Minas e o Embasamento Cristalino (Herz, 1970). Na porção meridional, especificamente nos domínios do Complexo Metamórfico Santo Antônio do Pirapetinga (Raposo, 1991), é onde se concentra o maior número desses corpos intrusivos (Suito *et al.*, 2007 e 2013; Endo *et al.*, 2019a), sendo composto por (Alkmin e Marshak, 1998): veios finos de pegmatitos, com idade não definida, cortando as rochas do Supergrupo Minas; pegmatitos, que cortam o embasamento, de idade (U-Pb) de 2,06 Ga; granitóides, que cortam complexos metamórficos de domos no QF de idade pós-Minas. Por fim, diques máficos com orientação NNE cortam todo o Supergrupo Minas, e estão amplamente distribuídos pós-Itacolomi, datados de 1,71 Ga (Alkmin e Noce, 2006).

4.1.6 Coberturas Cenozoicas

No topo da sequência estratigráfica regional é possível observar coberturas sedimentares representadas pelos depósitos terciários e quaternários, cangas, colúvios-elúvios e terraços fluviais. coberturas detrito lateríticas.

Os principais depósitos sedimentares de idade Cenozoica estão relacionados às bacias do Fonseca, que apresenta argilitos, siltitos e sedimentos de origem flúvio-lacustre (Gorceix, 1884), Chapada da Canga, que possui ortoconglomerados oligomíticos associados à leques aluviais (Sant'anna, 1994), Cata Preta (Castro e Ferreira, 1997; Castro, Ferreira e Castro, 1998), composta por arenitos maciços e diamictitos de coloração avermelhada, Gandarela, constituída essencialmente por argilitos, arenitos e linhitos (Gorceix, 1884), e Gongo Soco, que possui sedimentos desde diamictitos até fragmentos de itabiritos, formados por fluxos de detritos associados a leques aluviais (Endo *et al.*, 2020).

As principais litologias presentes na área estão representadas na Figura 6 a seguir.

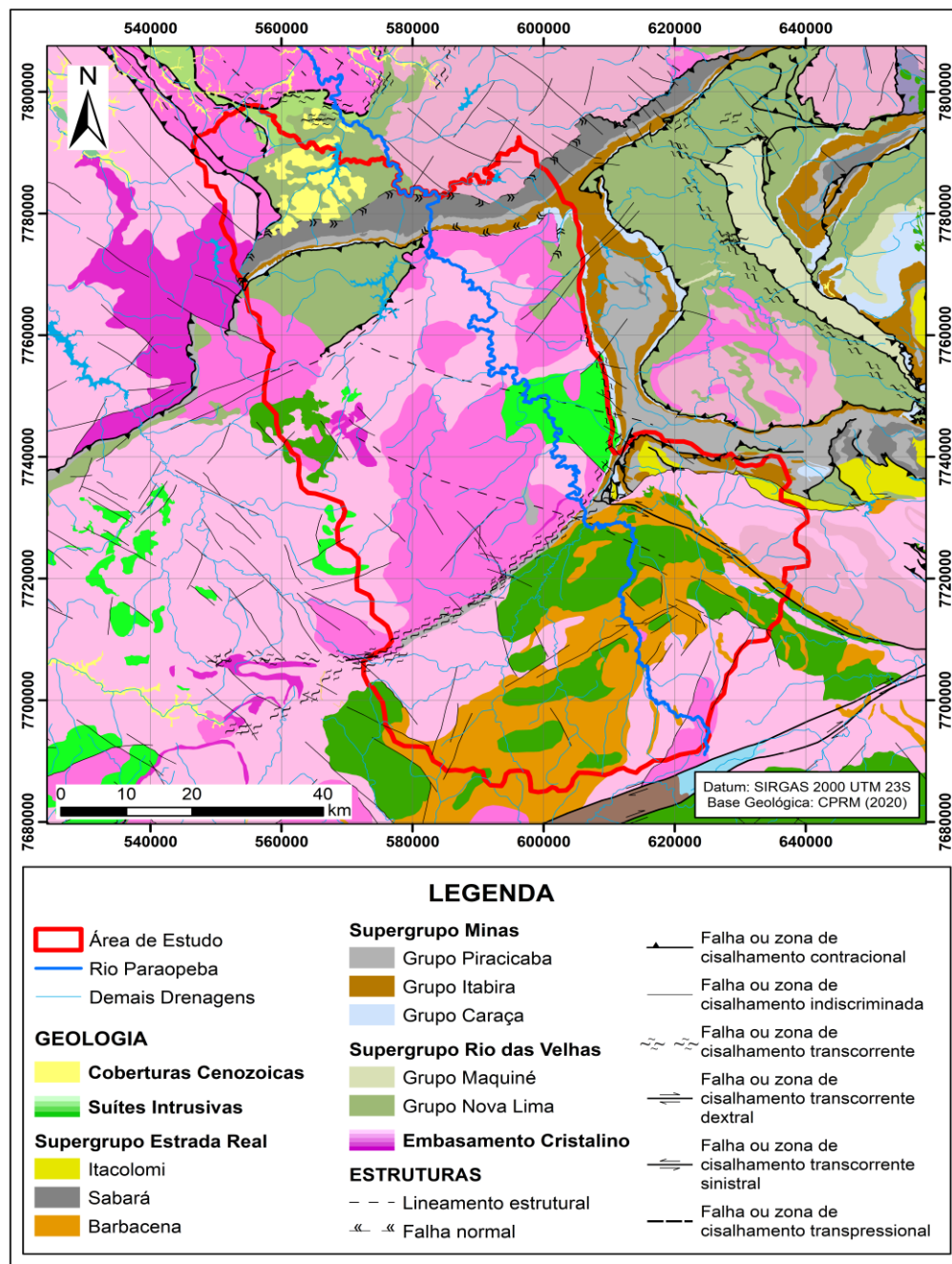


Figura 6 - Mapa geológico regional simplificado, contendo as litologias da área de estudos (Adaptado de Silva *et al.*, 2020).

O Quadrilátero Ferrífero sofreu intensa atividade tectônica em diferentes momentos geológicos, os quais foram responsáveis pela deposição e metamorfismo das rochas da região, exibindo, assim, diversas feições de deformação, tais como falhas, dobras, fraturas e zonas de cisalhamento (Figura 6). Esses eventos são responsáveis por esculpir o relevo da região, gerando as serras, depressões e bacias deposicionais, e também corroboram com a formação de depósitos minerais, os quais atribuem grande importância geológica.

4.2 Evolução Tectônica e Estrutural

O arcabouço estrutural atual é resultado de múltiplas fases deformacionais (Carneiro, Noce e Teixeira, 1995), que definem megafeições morforestruturais, predominando principalmente as formas de anticlinais e sinclinais, acompanhadas por sistemas de falhas de empurrão e zonas de cisalhamento transcorrentes, além de dobras de várias gerações, relacionadas a diferentes fases e eventos tectônicos (Dorr, 1969; Almeida, Endo e Fonseca, 2002; Almeida, 2004).

Devido sua complexidade geológica, o QF possui diversos estudos e interpretações sobre sua evolução geotectônica, sendo destacadas as de Dorr (1969), Chemale Jr., Rosière e Endo (1994), Endo (1997) e Alkmim e Marshak (1998).

4.2.1 Modelo Dorr (1969)

Para Dorr (1969) a estruturação do QF passou por três eventos.

O primeiro evento, denominado de pré-Minas, corresponde ao evento deformacional que afetou apenas o Supergrupo Rio das Velhas, com a intensidade dessa deformação aumentando de leste para oeste. Seu foco orogênico estaria localizado a W ou SW do Quadrilátero Ferrífero, conforme pode ser evidenciado inclusive pela direção de proveniência dos sedimentos Minas.

O segundo evento ocorreu entre o tempo de deposição do Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi, considerado como um período de agitação crustal, com algum arqueamento, mas não como um ciclo orogênico. Assim, apenas uma orogênese denominada pós-Itacolomi a SE do Quadrilátero Ferrífero teria sido responsável pela estruturação regional. Para este autor, um relevante movimento tectônico ocorreu na direção W-SW durante o período de deposição das camadas Minas e Itacolomi, o que é indicado pela presença de conglomerados itabiríticos neste último grupo.

O terceiro evento foi o de maior expressão, e ocorreu após a sedimentação do Grupo Itacolomi, afetando todas as sequências pré-cambrianas. Ele foi responsável pela formação de dobras sinformais e antiformais de eixos N-S, E-W, NE-SW e NW-SE e pelo soergimento do Complexo Metamórfico Bação. Posteriormente, houve o aparecimento de estruturas de falhas e sobreposições com movimento em direção W e NW, como resultado da inversão dos flancos

leste e sudeste das principais dobras. A estimativa do encurtamento crustal na orientação E-W é de várias dezenas de quilômetros, com a força tectônica direcionada para o NW e W.

4.2.2 Modelo Chemale Jr, Rosiére e Endo (1994)

Para Chemale Jr., Rosiére e Endo (1994) o Quadrilátero Ferrífero sofreu dois grandes eventos de deformação.

O primeiro evento é de natureza extensional, de orientação WNW-ESE e teria ocorrido durante o Paleoproterozóico, entre 2,1 Ga e 1,7 Ga, no evento Transamazônico. Ele foi responsável pelo desenvolvimento de megassinclinais contínuos Serra do Curral (NW- SE), Moeda (N-S), Dom Bosco (E-W) e Santa Rita (N-S). Os sinclinais Gandarela, João Monlevade e Itabira – todos de direção NE-SW. Esse evento também teria causado o soergimento de vários complexos metamórficos do QF, o que gerou a arquitetura geológica de domo e quilha do QF.

O segundo evento é de natureza compressional, com direção para W e idade correlacionada ao evento Brasileiro (650 Ma a 500 Ma). Isso resultou em dobras e falhas de empurrão desenvolvidas ao longo de três fases: Na fase inicial ocorreu uma deformação dúctil sob condições de metamorfismo nas fácies de xisto verde e anfibolito, exibindo as características mais proeminentes na região. Na segunda fase observa-se a formação de dobras mesoscópicas com crenulação orientada na direção E-W, clivagem espaçada e o surgimento de falhas transcorrentes, relacionadas ao metamorfismo de fácies xisto-verde baixo. Por fim, durante a última fase, ocorreu sob mesmas condições metamórficas da fase anterior, havendo desenvolvimento de dobramentos mesoscópicos de direção N-S, crenulação e falhas reversas de alto ângulo de direção N-S.

4.2.3 Modelo Endo (1997)

Segundo Endo (1997) e Endo e Machado (1998), a evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes é interpretada como o resultado da superposição de três ciclos tectono-deformacionais: Jequié, Transamazônico e Brasileiro:

O ciclo Jequié consiste (2,78 Ga a 2,56 Ga) consiste de três eventos tectônicos de natureza transpressional.

O ciclo Transamazônico é composto por dois eventos tectônicos compressivos e dois extensionais, alternando-se durante um intervalo de tempo mínimo entre 2,25 e 1,90 bilhões de anos, associados aos períodos Riaciano e Orosiriano. Esses eventos podem ser interpretados como dois megaeventos tectônicos progressivos, desenvolvidos sob um regime de transpressão, com um plano de fluxo direcionado de N-S.

O último ciclo orogênico no QF, Brasiliano (650-500 Ma), apresenta dois eventos tectônicos em regimes transpressionais com plano de fluxo NE-SW, originando os sistemas de dobramentos e cavalgamentos com vergência para NW e W.

De acordo com o autor, essas diversas fases de deformação e eventos tectônicos resultaram em uma arquitetura no QF caracterizada por um sistema de dobras de escala regional:

- *Nappe* Curral com vergência para N-NE;
- Sistema de *Nappes* Ouro Preto com vergência para S-SW;
- Dobras da terceira geração resultantes de amplificação e ou redobramento.

4.2.4 Modelo Alckmin & Marshak (1998)

Alckmin e Marshak (1998) interpretam a evolução tectônica pós-Minas composto pelos seguintes eventos:

- Cavalgamento com vergência para NNW e dobramento associado, responsável pelo desenvolvimento do cinturão de dobras e cavalgamentos de uma orogenia colisional por volta de 2,1 Ga.
- Formação de domos e depressões associadas com rochas supracrustais durante o colapso extensional da orogenia imediatamente após 2,1 Ga.
- Cavalgamento com vergência para oeste, dobramento e reativação transcorrente de estruturas preexistentes durante o evento Brasiliano no Neoproterozoico (580-560 Ma).

O modelo sugerido para a história paleoproterozoica do QF (Alckmin e Marshak, 1998 apud Alckmin e Noce, 2006), apresentado na Figura 7, considera que, por volta de 2,55 Ga om base nos dados geocronológicos disponíveis, se iniciou a deposição a deposição do Supergrupo Minas, com a distribuição de fácies e os ambientes deposicionais dos grupos Caraça, Itabira e Piracicaba indicando que a bacia Minas se iniciou como um rifte continental que evoluiu para uma margem passiva, e a porção da plataforma continental dessa bacia foi preservada.

Posteriormente, a Orogenia Transamazônica se manifesta no QF em duas fases:

A primeira fase, de caráter contracional, resultou na formação de um cinturão de dobras e cavalgamentos com vergência para NNW. Essa fase parece ter iniciado com a discordância na base do Grupo Sabará, o qual representa uma inversão de proveniência: enquanto as unidades mais antigas do Supergrupo Minas foram derivadas do norte, os sedimentos do Sabará foram transportados a partir do sul ou sudeste. A origem e a natureza dessa unidade sugerem que ela foi derivada de um arco vulcânico em colisão com a margem sul do cráton São Francisco. A colisão desse arco inverteu a bacia Minas, formando um cinturão de dobras e cavalgamentos que envolveu todas as rochas supracrustais do QF. Idades de zircões detríticos no Grupo Sabará indicam que a fase contracional começou por volta de 2,12 Ga (Alkmin e Noce, 2006).

Em seguida houve um colapso extensional, expresso no QF pela formação de “quilhas” contendo as camadas dos supergrupos Rio das Velhas e Minas, entre domos compostos por TTG e granitóides arqueanos. O cisalhamento de sentido normal nas margens dessas quilhas justapôs as camadas dos supergrupos contra o embasamento quente, gerando auréolas metamórficas. A idade desse metamorfismo (2095 ± 60 Ma) indica que o colapso orogênico ocorreu logo após o evento contracional (Alkmin e Noce, 2006).

Então, por volta de 1,75 Ga, ocorreu o chamado rifteamento do Espinhaço, quando as massas continentais montadas durante as orogenias Transamazônicas experimentaram um episódio de rifteamento associado ao magmatismo bimodal (Brito Neves et al., 1996). Na área do QF, esse evento é representado apenas por diques máficos (Figura 7), datados por Silva *et al.* (1995) e Carneiro e Oliveira (2005) em aproximadamente 1,75 Ga.

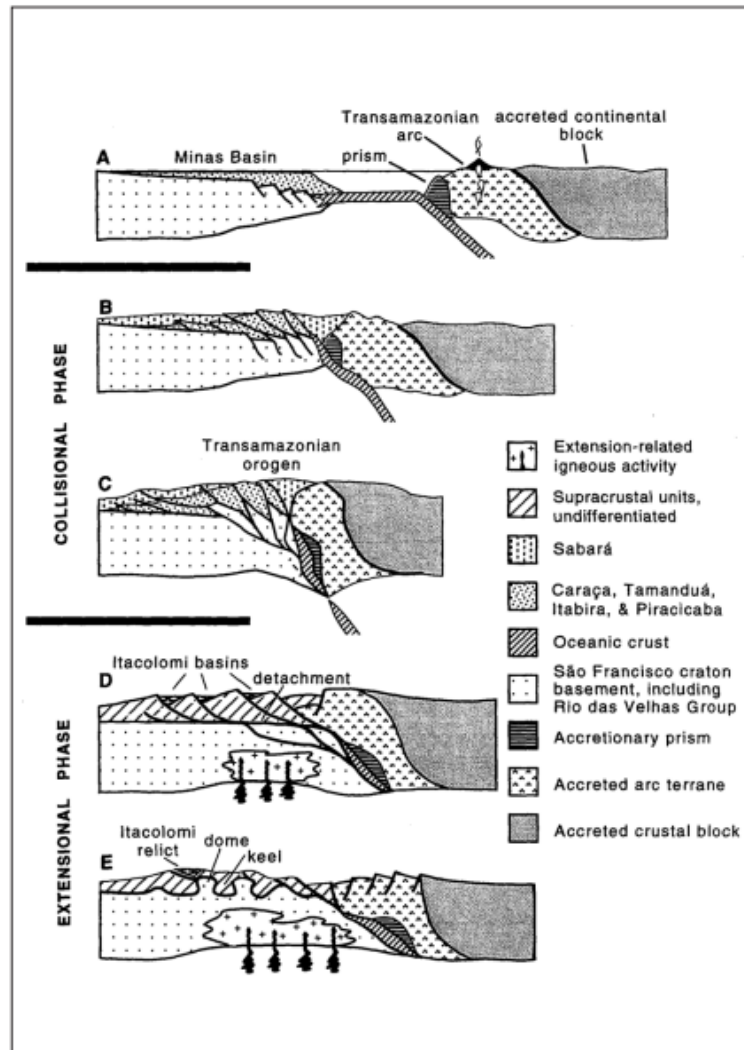


Figura 7 - Seções transversais ilustrando um modelo para a evolução do Quadrilátero Ferrífero durante o Paleoproterozoico (Retirado de Alkmin & Noce, 2006. Reproduzido de Alkmin e Marshak, 1998).

Posteriormente ao paleoproterozoico, houve o evento deformacional Brasileiro (0,7 - 4,5 Ga), responsável por um cinturão de cavalgamentos de vergência oeste que reativou e truncou as estruturas mais antigas do QF e teria representado uma das várias orogenias que levaram à montagem final da Gondwana. Além disso, o evento Brasileiro também teria representado a reativação de zonas de cisalhamento pré-existentes e dos principais contatos litológicos em falhamentos direcionais, com vergência oeste (Alkmin e Marshak, 1998 apud Bezerra, 2014).

4.2.4 Arquitetura Estrutural

No presente trabalho será considerado o cenário estrutural de Marshak & Alkmim (1989), Alkmim & Marshak (1998) e Alkmim & Noce (2006), no qual o QF é uma província geológica estruturada em “domos e quilhas”. Os domos são da segunda geração de estruturas, constituídos pelas rochas granito-gnáissicas e migmatitos do embasamento Arqueano (e.g. Complexo Bação, Complexo Bonfim, Complexo Caeté) circundados pelas quilhas, conjunto mais antigo de estruturas, que são compostas tanto pelas rochas do Supergrupo Rio das Velhas quanto pelas rochas do Supergrupo Minas, e incluem as megadobras sinclinais do QF (e.g. Sinclinal Moeda, Sinclinal Dom Bosco, Sinclinal Santa Rita) e o homoclinal Serra do Curral (Figura 8).

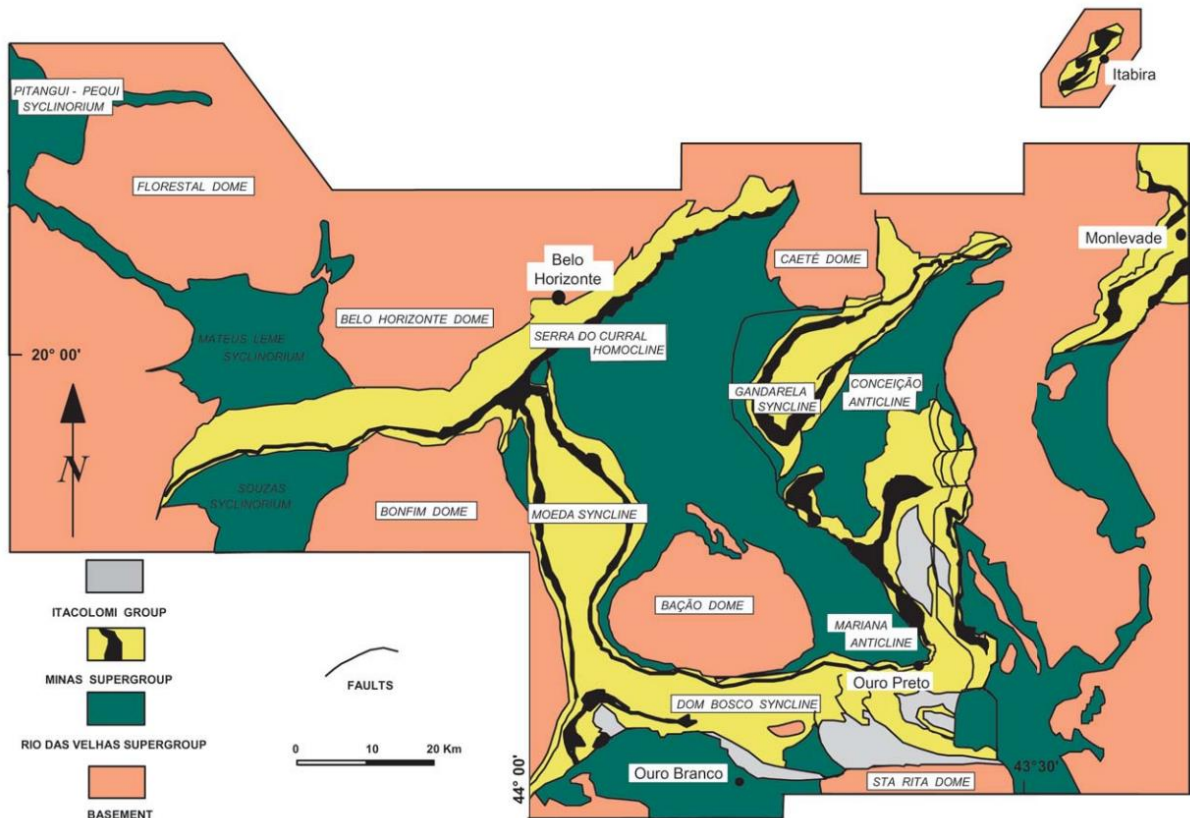


Figura 8 - Mapa simplificado da região do Quadrilátero Ferrífero, destacando a configuração estrutural de “domos e quilhas” (Retirado de Alkmim & Noce, 2006. Baseado em Dorr, 1969 e Romano, 1989).

5 SISTEMA AQUÍFERO

Para melhor compreensão do escopo hidrogeológico deste estudo serão apresentadas algumas definições importantes para os critérios das divisões e nomenclaturas das unidades hidrogeológicas.

O termo sistema aquífero representa um conjunto formado por uma ou mais unidades litoestratigráficas que apresentam condutividade hidráulica, características hidrodinâmicas, condições de recarga, circulação, descarga e qualidade das águas relativamente semelhantes. Já o termo unidade hidrogeológica é usado para caracterizar a ocorrência tanto para os aquíferos, como para os aquíferos e/ou aquíferos, que estejam associados a uma unidade geológica específica (Rebouças, 1994; Souza, 1995).

As unidades aquíferas na região do Quadrilátero Ferrífero já foram classificadas por diversos autores, como Andrade (2023) e Magalhães (2023). Neste trabalho as unidades foram classificadas com base em uma mescla das contribuições desses autores, e baseando-se também na divisão utilizada por Zupo (2024), que se embasou nos conceitos adotados por Miller (1999), que diferencia Unidades Aquíferas e Unidades Não Aquíferas, no qual são consideradas como aquíferos as unidades geológicas que produzem quantidades significativas de água através de poços ou nascentes.

Dessa maneira, o sistema aquífero da área de estudo foi subdividido em seis unidades aquíferas e quatro unidades não aquíferas. Das unidades não aquíferas citam-se Aquífero Embasamento, Aquífero Rio das Velhas, Aquífero Batatal, e Aquífero Suítes Intrusivas. As unidades aquíferas compreendem o Aquífero Moeda, o Aquífero Cauê, o Aquífero Gandarela, o Aquífero Piracicaba, o Aquífero Estrada Real e os Aquíferos de Coberturas Sedimentares.

O mapa com a localização dessas unidades pode ser visualizado a seguir. O aquífero Moeda e aquífero Batatal (Grupo Caraça) e os aquíferos Cauê e Gandarela (Grupo Itabira) estão presentes em apenas em 2,08% da área de estudo, por isso, apenas para melhor visualização, as quatro unidades foram representadas em conjunto no mapa, como 'Itabira/Caraça' (Figura 9).

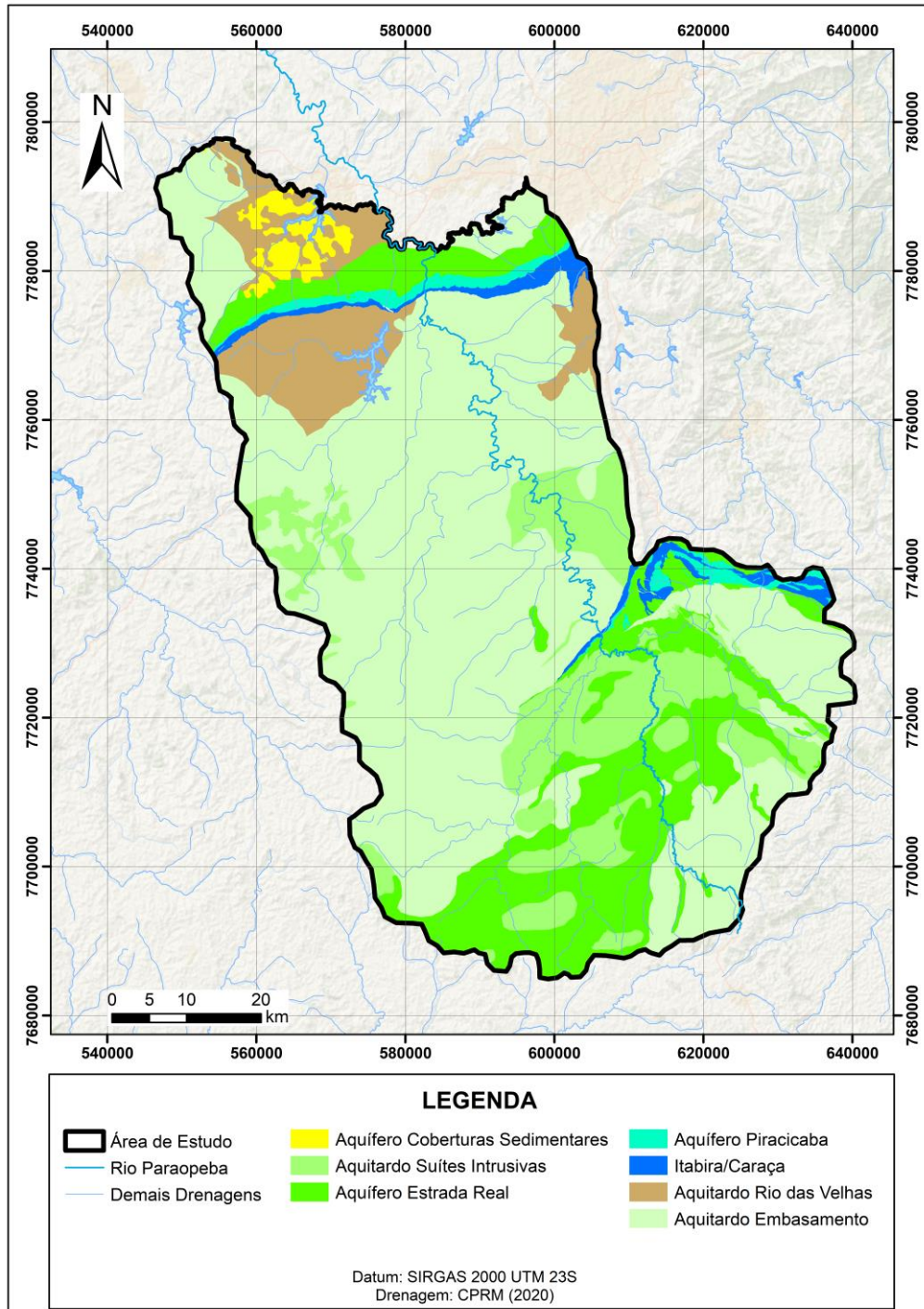


Figura 9 - Mapa hidrogeológico simplificado dentro da área de estudos.

5.1 Aquífero Embasamento

O Aquífero Embasamento é composto pelos complexos de composição TTG que constituem o embasamento cristalino. Essas unidades são descontínuas, fraturadas, anisotrópicas e heterogêneas (Beato, Monsore e Bertachinni, 2006) e podem ser livres a semiconfinadas pelas formações superficiais.

Trata-se de um aquífero fissurado, que tem como peculiaridade o espesso manto de intemperismo, que contribui para a recarga das fraturas na rocha sã e também é responsável por uma parte significativa das restituições para os cursos d'água de baixo potencial hidrogeológico e que consolida o embasamento da região (Andrade, 2023). As condições de recarga estão ligadas ao manto de alteração que cobre a parte fraturada da rocha. Possui porosidade e permeabilidade secundárias, resultantes dos esforços tectônicos e dos processos de meteorização (Endo *et al.*, 2020).

5.2 Aquífero Rio das Velhas

O Aquífero Rio das Velhas é constituído pelo Grupo Quebra Osso e Grupo Nova Lima, que são fissurais, descontínuos e fortemente anisotrópicos heterogêneos (Beato, Monsores e Bertachinni, 2006 apud Zupo, 2024). É formado essencialmente em rochas metassedimentares e metavulcanossedimentares do tipo *greenstone belt*.

A alta heterogeneidade é resultado da presença dos xistos de composição variada, intercalados com diversas litologias como metarenitos, metagrauvas e formações ferríferas (Beato, Monsores e Bertachinni, 2005). Além disso, há predominância de litofácies de baixa permeabilidade, por isso, sua permeabilidade, bem como a porosidade, são secundárias e resultantes dos esforços tectônicos.

A capacidade de armazenamento é baixa, suficientes apenas para atender pequenas demandas, porém, lentes de formações ferríferas bandadas intercaladas aos xistos agem como zonas aquíferas localizadas, com boas condições de circulação e armazenamento de água. A recarga principal é pluvial, através da infiltração nas formações superficiais conectadas às fraturas (Beato, Monsores e Bertachinni, 2005).

5.3 Aquífero Moeda

O Aquífero Moeda é formada essencialmente por quartzitos e conglomerados da Formação Moeda, tornando-o uma unidade aquífera heterogênea e anisotrópica, de caráter poroso/fissural, e que está ora semiconfinada pelo aquífero Batatal, ora livre (Andrade, 2023). Sua porosidade é secundária, condicionada pelas fraturas nas rochas, resultantes dos esforços tectônicos, assim como sua permeabilidade.

A recarga desse aquífero é principalmente devida a contribuição direta da água da chuva sobre as regiões onde ele é exposto. O potencial hidrogeológico é considerado relativamente alto pelo fato da circulação e armazenamento de água ocorrerem nas descontinuidades estruturais, como os planos de fissuras e fraturas interconectadas, além da presença de falhas em nível local e regional. As direções de fluxo também podem ser influenciadas pelo declive do terreno, ou ainda, em menor escala, pela existência de contatos geológicos com unidades de menor permeabilidade (Endo *et al.*, 2020).

5.4 Aquitardo Batatal

O Aquitardo Batatal compreende as rochas da Formação Batatal, com predominância de filitos, rochas de boa capacidade de armazenamento de água, porém incapazes de transmiti-la (Andrade, 2023), desempenhando um papel importante ao confinar outras unidades produtoras de água. Além da relação com o Aquífero Moeda, Ventura e Bacellar (2011) observaram uma conexão identificada entre o Aquitardo Batatal e o Aquífero Cauê. Os contatos com a Formação Cauê, na parte superior, e com os quartzitos da Formação Moeda, na parte inferior, são gradativos. É considerado como aquitardo fissural (Beato, Monsore e Bertachinni, 2006).

5.5 Aquífero Cauê

O Aquífero Cauê possui diversidade litológica, com a presença de diferentes itabiritos (goethíticos, anfibolíticos e carbonáticos) e corpos de hematitas. Possui porosidade granular a fissural, e devido a complexidade estrutural e diferentes intensidades de intemperismo revela-se como um aquífero heterogêneo e anisotrópico (Mourão 2007; Andrade, 2023).

Trata-se de um aquífero poroso em superfície e fraturado em profundidade, com alta condutividade hidráulica no geral, sendo a unidade de maior potencial produtivo da área, e predominantemente livre. Ele pode ser confinado por metapelitos, principalmente do Aquitardo Batatal, ou por coberturas sedimentares argilosas (Magalhães, 2023).

A recarga ocorre pela infiltração direta das águas pluviais sobre os horizontes intemperizados espessos, especialmente quando essas camadas são cobertas por coberturas lateríticas, de alta porosidade. As descargas estão principalmente associadas aos pontos de maior erosão do relevo, próximo ao contato com as rochas pouco permeáveis do Batatal e, em

algumas ocasiões, no contato com o aquífero Gandarela (Beato, Monsores e Bertachinni, 2005). A circulação ocorre ao longo das fraturas, dos planos de estratificação e ao longo das barreiras impermeáveis, como diques (Mourão, 2007).

5.6 Aquífero Gandarela

O Aquífero Gandarela é representado pelas rochas carbonáticas, calcáreas e dolomíticas, da formação homônima, do tipo fissural-cárstico, heterogêneo e anisotrópico (Andrade, 2023). Varia de livre a confinado, e possui porosidade e permeabilidade secundária, condicionadas pelas fraturas nas rochas e condutos de dissolução dos carbonatos e influenciadas pela atividade tectônica (Endo *et al.*, 2020; Zupo, 2024).

A fonte principal de recarga é a infiltração de águas pluviais ou a indução lateral proveniente do contato com unidades mais produtivas, como o Aquífero Cauê, por exemplo. A descarga ocorre como nascentes ou como recarga de outros aquíferos. A circulação preferencial está nas direções de fraturamento e/ou carstificação, e, também, segundo os planos de estratificação (Beato, Monsores e Bertachinni, 2005).

5.7 Aquífero Piracicaba

A Unidade Aquífera Piracicaba é formada pelas rochas do Grupo Piracicaba, que se compõe pelas formações Barreiro, Taboões, Fecho do Funil e Cercadinho e é representado por xistos, filitos e rochas dolomíticas. Essa unidade é caracterizada por conter aquíferos fissurais, que variam de livres a confinados (Zupo, 2024). A recarga ocorre principalmente pela infiltração de águas pluviais através das formações superficiais conectadas com as fraturas. A circulação da água ocorre de acordo com as direções das fraturas e das camadas rochosas.

5.8 Aquífero Estrada Real

A Unidade Aquífera Estrada Real pelas rochas dos Grupos Itacolomi, Sabará e Barbacena. Tratam-se de aquíferos fissurais, condicionados pelas fraturas nas rochas, podem variar de livres a confinados (Zupo, 2024). Possui litologias diversas, incluindo quartzitos, xistos, metgrauvacas, metaconglomerados, filitos e formação ferrífera. Pode haver uma

conexão local com os Aquíferos Gandarela e Cauê através de estruturas tectônicas (Mourão, 2007).

5.9 Aquitardo Suítes Intrusivas

O Aquitardo Suítes Intrusivas engloba as rochas das suítes presentes, como por exemplo, Suíte Alto Maranhão, Suíte Samambaia, Suíte Resende Costa, entre outros. Formam aquíferos fissurais, caracterizados por uma porosidade e permeabilidade secundária, condicionada pelas fraturas nas rochas. A recarga principal é pluvial, através da infiltração nas formações superficiais conectadas às fraturas (Zupo, 2024). A circulação ocorre predominantemente através das principais direções de fraturas.

5.10 Aquífero Coberturas Sedimentares

A Unidade Aquífera Coberturas Sedimentares está relacionada às formações superficiais cenozoicas, composta por depósitos aluvionares, coluvionares, eluvionares, cangas e depósitos terrígenos. Essa unidade corresponde a aquíferos localizados, descontínuos, livres, anisotrópicos e muito heterogêneos, com porosidade e permeabilidade primárias. Possuem boa capacidade de armazenamento possibilitando a manutenção de escoamento de base durante o período de estiagem (Mourão, 2007).

Apresentam boa porosidade e permeabilidade nas coberturas lateríticas, onde praticamente toda a água da chuva se infiltra, mas em sedimentos ou solos residuais que contêm uma quantidade significativa de fração argilosa, a permeabilidade é reduzida, dificultando tanto a infiltração quanto o fluxo subterrâneo da água. Isso causa uma capacidade de armazenamento variada (Beato, Monsore e Bertachinni, 2005). A recarga ocorre pela precipitação pluvial e, localmente, pelo aporte de água de cursos d'água perenes e efluentes. Segundo Andrade (2023) a unidade das Coberturas auxilia como meio de recarga para as unidades inferiores.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho utilizou ferramentas de geoprocessamento, hidrologia superficial, subterrânea e meteorologia, para investigar os impactos na vazão do rio Paraopeba a partir de diferentes variáveis como balanço hídrico climatológico, incluindo análise pluviométrica e de temperatura, análise fluviométrica, avaliação de captações e estudo de influência geológica, geográfica e hidrogeológica, gerando resultados individuais, para então ser possível realizar associações mútuas e chegar numa avaliação integrada de impactos naturais e antrópicos na vazão do rio Paraopeba na área de estudo. Para isso, foi necessário, primeiramente, fazer a validação de bancos de dados compilados a partir de fontes públicas.

Para o balanço hídrico climatológico, desenvolvido pela metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), foi preciso utilizar-se do banco de dados das séries históricas de oito estações pluviométricas, no período de 1970 até 2020, disponibilizadas pelo Hidroweb, administrada pela Agência Nacional de Águas (ANA), intituladas, da montante à jusante do rio na área de estudo: *Carandaí (02043018)*; *Resende Costa (02044038)*; *Conselheiro Lafaiete (02043005)*; *Entre Rios de Minas (02044007)*; *Fazenda Campo Grande (02044009)*; *Itabirito Linígrafo (02043060)*; *Melo Franco (02044008)* e *Ponte Nova do Paraopeba (01944004)*.

Também foi utilizado o banco de dados das temperaturas mínima, média e máxima, mensais e anuais, compensadas, para o mesmo intervalo de tempo, coletado da estação meteorológica *Belo Horizonte (83587)*, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024b). Nenhuma das estações pluviométricas possuem dados de monitoramento de temperatura. Por isso, foi convencionado utilizar os dados de uma única estação que possui um monitoramento de temperatura amplo e se relaciona com a área de estudo.

O próximo estágio foi o de análise fluviométrica, cujos dados analisados, fornecidos também pelo Hidroweb, vieram das séries históricas de três estações fluviométricas inseridas na área que continham o intervalo de tempo desejado (1970-2020), intituladas *Entre Rios de Minas (40680000)*, *Belo Vale (40710000)* e *Alberto Flores (40740000)*.

Para realizar a avaliação de captações foi utilizado um banco de dados compilado, disponibilizado pelo Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM, 2024), a partir do ano de 1984 até 2020, no qual foi feito tratamento e validação dos dados manualmente, descartando todas as informações incompletas, incorretas ou duplicadas.

Alguns aspectos gerais a se ressaltar são: todo estudo referente à vazão foi elaborado na unidade de metro cúbico por segundo (m^3/s), de modo que todos os dados fora desse sistema de unidade sofreram a conversão necessária; os mapas foram elaborados utilizando-se dos *softwares* QGis 3.32.0 e ArcGis 10.8, sempre georreferenciadas no sistema de coordenadas SIRGAS 2000, projeção UTM zona 23S; os gráficos e tabelas foram confeccionados através do *software* Excel 2019.

6.1 Balanço Hídrico Climatológico

6.1.1 Pluviometria

Para compreender a distribuição pluviométrica na área é necessário dispor de diferentes métodos. O passo inicial é realizar uma análise geral da pluviometria na região, utilizando os dados de pluviometria anual de todas as estações pluviométricas juntas. Após dividir cada ano em período seco (abril a setembro) e período chuvoso (outubro a março), um gráfico foi elaborado com o valor médio de precipitação de todas as estações, por ano, ao longo dos 50 anos analisados.

Posteriormente foi aplicado o método de *Polígonos de Thiessen*, desenvolvido por Thiessen (1911), para definir as áreas de influência e calcular a precipitação média, determinando as estações mais representativas. Esse método foi empregado por meio do *software* Qgis, versão 3.32.0, e consiste em unir as estações adjacentes por linhas retas, traçar linhas perpendiculares a esses trechos retilíneos sobre a mediatriz da linha que liga as estações, e então alongar as linhas perpendiculares até encontrar outra mediatriz. Os polígonos se formam pela interseção das linhas das mediatrizes, correspondendo à área de influência de cada estação.

Em seguida, calculou-se a área de cada polígono formado, obtendo a precipitação média por ano, através do somatório do produto área de influência de cada estação pela precipitação na estação analisada, em milímetros (mm), dividido pela área total de estudo, conforme a equação (1) abaixo:

$$P = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad (1)$$

Onde:

P = Precipitação média na área;

P_i = Precipitação média no polígono i ;

A_i = Área do polígono i dentro da área;

A = Área total da área.

A fim de entender a configuração pluviométrica na área e definir as regiões que possuem precipitações semelhantes, foi aplicado o *Método de Isoietas*, que, segundo Feitosa *et al.* (2008), consiste no traçado de curvas de igual altura de precipitação, chamadas de isoietas. O mapa de Isoietas foi elaborado através do *software* Qgis, versão 3.32.0, que possui uma ferramenta de gerar a interpolação, via ponderação pelo inverso da distância (IDW), dos pontos das estações pluviométricas, em função do valor de precipitação média atribuído a cada uma. Os valores máximo e mínimo de precipitação, divididos em intervalos de 25 mm, foram, respectivamente, 1500 mm e 1325 mm.

Para calcular a precipitação média através das isoietas faz-se o somatório da média ponderada de cada intervalo em relação à área de influência desse intervalo, nesse caso, de 25mm, dividindo-se então esse resultado pela área total, conforme a equação (2) abaixo:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} (P_i + P_{i+1}) \cdot A_{i,i+1} \right] \quad (2)$$

Onde:

\bar{P} = Precipitação média na área;

P_i = Valor de precipitação de determinada isoietas (ex. 1300mm);

P_{i+1} = Valor de precipitação de isoietas no intervalo imediatamente superior (ex. 1325mm);

A_i = Área entre duas isoietas subsequentes dentro da área;

A = Área total da área.

Prosseguindo com a pluviometria, os dados de precipitação média anual foram agrupados em um gráfico para cada estação, classificando-se em todo o período ciclos pluviométricos, divididos em ‘ciclo seco’ e ‘ciclo chuvoso’, baseados no valor médio de pluviometria da estação nos 50 anos, com um range de +/- 10%. Em eixo secundário, o histórico dos dias de chuva de cada ano está relacionado para fins de comparação.

Essa mesma análise gráfica por ciclos e com dias de chuva foi elaborada com os dados de todas as estações pluviométricas em conjunto, representando, assim, a área de estudo como um todo. Dessa forma, dispondo também de um gráfico de intensidade pluviométrica, que consiste na divisão do índice pluviométrico anual pelos dias de chuva do mesmo ano, pôde-se verificar a evolução desses parâmetros na região através de regressões lineares.

Ressalta-se que os anos das extremidades, por exemplo, 1970 e 2020, foram excluídos da análise de ciclos, pois não há conhecimento sobre o comportamento pluviométrico antes do primeiro ano ou depois do último ano analisado. Além disso, foi estabelecida uma mesma escala do eixo vertical, de 0 até 2500, no histórico pluviométrico, e de 20 até 200 para os dias de chuva, para uma comparação adequada.

6.1.2 Temperatura

Para a análise de temperatura os dados meteorológicos das temperaturas mínima, média e máxima, em °C, foram compilados em um gráfico a fim de identificar e quantificar a progressão da temperatura na área, calculando-se a taxa de variação ao longo do tempo por regressão linear, para cada variável de temperatura, conforme a equação (3) abaixo.

$$Y = ax + b \quad (3)$$

Onde:

Y = Resultado da temperatura em determinado período de tempo;

a = Inclinação da reta característica ao aumento/diminuição de y ;

x = Período de tempo em relação a y ;

b = Temperatura inicial em função de y .

6.1.3 Método de Thornthwaite e Mather

Para aprimorar o estudo e estimar a quantidade de água envolvida na área foi aplicada a metodologia de balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955), que toma por base as variáveis do balanço hídrico (Feitosa *et al.*, 2008) e consiste no cálculo do fluxo hídrico de uma região de maneira rápida e simples, sem precisar realizar medições diretas das condições do solo.

A equação geral do balanço hídrico (4) pode ser dada da seguinte maneira (Feitosa *et al.*, 2008):

$$\Delta S = P - EVT - I - ESC \quad (4)$$

Onde:

ΔS = Variação do armazenamento;

P = Precipitação total;

EVT = Evapotranspiração total;

ESC = Escoamento superficial;

I = Infiltração ou água subterrânea.

Neste trabalho o balanço hídrico é fechado, e isso faz com que a variação de armazenamento seja igual a 0, como demonstrado pela equação (5) abaixo:

$$\Delta S = 0 \quad (5)$$

Diante disso, a equação (4) pode ser reescrita pela seguinte equação (6):

$$P = EVT + I + ESC \quad (6)$$

A evapotranspiração se refere à perda de água por evaporação da superfície terrestre no solo ou em massas d'água, associada à perda de água devido à transpiração de plantas (Feitosa *et al.*, 2008), pois no meio ambiente, a quantidade de água evaporada, a partir do teor de umidade do solo, e transpirada, no processo de desenvolvimento das plantas, são muito difíceis de medir separadamente. Em virtude disso, Thornthwaite (1948) criou o termo evapotranspiração potencial (ETP), que é uma estimativa teórica da quantidade máxima de água que poderia ser perdida para a atmosfera através da evaporação do solo e da transpiração das plantas, sob condições ideais de disponibilidade de água no solo e de energia (Feitosa *et al.*, 2008).

Thornthwaite (1948) elaborou uma fórmula inicial para calcular a evapotranspiração potencial (ETP), considerando o comprimento do dia, a temperatura média diária e a umidade relativa do ar. Posteriormente, o termo relacionado à umidade relativa foi removido, permanecendo apenas os parâmetros da temperatura média do ar e do comprimento do dia. A equação pode ser visualizada a seguir na equação (7), seguida pelas equações (8) e (9), que calculam, respectivamente, o índice “i” e a constante “a”:

$$ETP = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_{med}}{i}\right)^a \quad (7)$$

$$i = \sum_{n=1}^{12} (0,2T_n)^{1,514} \quad (8)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7}i^3 - 7,75 \cdot 10^{-5}i^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2}i + 0,49139 \quad (9)$$

Onde:

ETP = Evapotranspiração Potencial;

T_{med} = Temperatura média do ar para um dia específico;

i = Índice térmico em função da temperatura normal climatológica local (T_n);

a = Constante local calculada em função de i .

Já o parâmetro evapotranspiração real (ETR) representa a quantidade de água que realmente retorna para a atmosfera através da evaporação do solo e da transpiração das plantas, levando em conta as condições reais de umidade do solo e disponibilidade de água (Feitosa *et al.*, 2008). Ela pode ser estimada a partir da diferença entre a precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (ETP), segundo as equações (10) e (11):

$$\text{Se } P - ETP < 0, ETR = P \quad (10)$$

$$\text{Se } P - ETP > 0, ETR = ETP \quad (11)$$

O déficit hídrico (DEF) é obtido pela diferença entre a evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), representado pela equação (12):

$$DEF = ETP - ETR \quad (12)$$

O excedente hídrico (EXC), obtido quando a precipitação é maior do que a evapotranspiração potencial, representa os períodos de abundância hídrica, conforme mostrado na equação (13) abaixo. Ressalta-se que o excedente hídrico também pode ser chamado de escoamento total, representando a soma do escoamento superficial (ESC) e subterrâneo (I), apresentados na equação (6).

$$EXC = (P - ETP > 0) - ALT \quad (13)$$

A variável ALT é a alteração da quantidade de água existente no solo para cada mês. Além dos citados anteriormente, o balanço hídrico envolve o parâmetro de armazenamento (ARM), o qual consiste na quantidade de água retida no solo e, por fim, o negativo acumulado (NEG ACM), que é a soma de todas as parcelas mensais de água para a evapotranspiração que foram solicitadas ao solo.

A metodologia de Thornthwaite e Mather (1995) foi aplicada utilizando-se como ferramenta uma planilha eletrônica, desenvolvida por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998), as quais são aplicáveis a diversas condições climáticas e demandam apenas um conjunto simples de dados meteorológicos disponíveis. Através dela, ao fornecer os valores de precipitação média mensal e temperatura média mensal inseridas nas coordenadas de latitude da área, obtêm-se os valores de evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), déficit hídrico (DEF) e excedente hídrico (EXC), que foram utilizados para o estudo, além dos demais fatores, armazenamento (ARM), alteração (ALT) e negativo acumulado (NEG ACM).

Nessa planilha também é necessário definir o valor da Capacidade de Água Disponível no Solo (CAD), que representa a quantidade de umidade que permanece no solo após um longo período de drenagem gravitacional sem fornecimento de água na superfície do terreno (Feitosa *et al.*, 2008).

Neste trabalho, foi elaborado um balanço hídrico climatológico referente a cada estação pluviométrica utilizada, já citadas anteriormente, no período de 1970 até 2020, considerando-se ano hidrológico, por exemplo, outubro de 1970 até setembro de 1971, agrupados em décadas: 1970-1980, 1980-1990, 1990-2000, 2000-2010 e 2010-2020, exceto para a estação *Itabirito Linígrafo*, cujos dados começam apenas de 1984, e por isso não há balanço hídrico na década 1970-1980. Por conta disso, os valores de latitude e CAD (ANA, 2021) utilizados foram os correspondentes aos municípios onde as estações estão alocadas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações de município, latitude e capacidade de água disponível, referentes às estações pluviométricas utilizadas no método de balanço hídrico climatológico.

ESTAÇÃO	Município	Latitude	CAD (m ³ /m ³)
CARANDAÍ	Carandaí	-20,96	115
CONSELHEIRO LAFAIETE	Conselheiro Lafaiete	-20,63	115
ENTRE RIOS DE MINAS	Entre Rios de Minas	-20,66	115
FAZENDA CAMPO GRANDE	Passa Tempo	-20,63	115
ITABIRITO LINÍGRAFO	Itabirito	-20,29	112
MELO FRANCO	Brumadinho	-20,20	114
PONTE NOVA DO PARAOPEBA	Mateus Leme	-19,95	116
RESENDE COSTA	Resende Costa	-20,92	115

Fonte de dados: ANA, 2021.

Outro parâmetro estudado foi o Índice de Aridez (Ia), que é uma ferramenta métrica da relação entre a precipitação e a evapotranspiração potencial de uma região, sendo muito importante para compreender o balanço hídrico, pois é uma forma de mapear zonas áridas e delimitar áreas que podem ser afetadas pela desertificação. Segundo (Thornthwaite, 1948) o índice de aridez pode ser calculado conforme a equação (14), e classificado em subtipos climáticos de acordo com a Tabela 2 a seguir. Vale salientar que no cálculo foi utilizado o valor de evapotranspiração real (ETR), para haver mais assertividade. Além disso, pelas características climáticas da região estudada, a classificação utilizada é referente à climas úmidos e a área se enquadra na deficiência no inverno.

$$Ia = \frac{(CAD \times DEF)}{ETP} \quad (14)$$

Onde:

CAD = Capacidade de Água Disponível;

ETP = Evapotranspiração Potencial;

DEF = Déficit Hídrico.

Tabela 2 - Subtipos climáticos em função dos valores do índice de aridez .

CLIMAS ÚMIDOS		
	Classificação	Índice de Aridez (<i>Ia</i>)
r	<i>pouca ou nenhuma deficiência de água</i>	$0 < I_a \leq 16,7$
s	<i>deficiência moderada no verão</i>	$16,7 < I_a \leq 33,3$
w	<i>deficiência moderada no inverno</i>	$16,7 < I_a \leq 33,3$
s₂	<i>grande deficiência no verão</i>	$\geq 33,3$
w₂	<i>grande deficiência no inverno</i>	$\geq 33,3$

Fonte de dados: Thornthwaite, 1948.

6.2 Análise Fluviométrica

Para compreender o comportamento fluviométrico foi elaborado um gráfico com os valores de vazão média anual, ao longo de todo o período, das três estações fluviométricas utilizadas, *Alberto Flores*, *Belo Vale* e *Entre Rios de Minas*, a fim de analisá-las comparativamente. O intervalo de medição é o mesmo escolhido para a análise pluviométrica (1970-2020).

6.3 Avaliação de Captações

Primordialmente, com o objetivo de quantificar e dimensionar a vazão captada da bacia do rio Paraopeba na área de estudo foram elaborados dois gráficos, referentes, respectivamente, às outorgas de água superficial, e às outorgas de água subterrânea. Neles está discriminada a vazão média anual destinada ao uso insignificante e ao uso significativo da água. O período analisado começa a partir dos dados disponíveis, no ano de 1984, e se estende até 2020 (SIAM, 2024).

Conforme a portaria IGAM nº 48 de 04 de outubro de 2019, do Instituto Mineiro de Gestão das Águas, a validade de uma outorga de recursos hídricos superficiais é de até 35 anos para uso destinado ao saneamento básico, incluindo-se o abastecimento público e o lançamento de efluentes e usos não consuntivos de recursos hídricos, como o aproveitamento de potencial

hidrelétrico. Para demais usos a validade é de até 10 anos. Por isso, o tratamento dos dados disponíveis para este trabalho incluiu a estimativa do período de funcionamento das outorgas a partir da data de vencimento da licença, que foi fornecida. Ou seja, subtraiu-se 35 anos da data de vencimento das outorgas de abastecimento público, e 10 anos para as restantes.

Para as captações de água subterrânea, neste trabalho adotou-se uma validade de 25 anos, levando em consideração a vida útil média de um poço. A outorga para captação de água subterrânea pode ter duração de até 10 anos, conforme a portaria IGAM nº48/2019, devendo ser renovada após esse período. Então, entende-se que essa renovação seja feita enquanto o poço estiver funcionando.

Para a avaliação de captações é crucial que a captação do rio Paraopeba para o abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte esteja no estudo. A captação de água do Rio Paraopeba pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa) começou em dezembro de 2015, quando foi inaugurado um complexo de captação na cidade de Brumadinho, com capacidade de 5 m³/s (Parreiras, 2023). Até até então o Sistema Integrado Paraopeba contava com três captações superficiais nos mananciais *Vargem das Flores*, construído em 1972, *Serra Azul*, inaugurado em 1981 e *Rio Manso*, construído em 1991 (COPASA, 2020 apud Soares, 2021). O complexo foi construído para minimizar os impactos da crise hídrica na grande Belo Horizonte, ocorrida entre 2014 e 2015, pois permitiu à companhia usar a água captada diretamente no rio nos períodos chuvosos, poupando assim, os 5,5 m³/s que eram retirados das três represas (Paranaíba, 2015).

Contudo, com o rompimento da barragem da empresa Vale S.A. na Mina Córrego do Feijão, em janeiro de 2019, localizada no município de Brumadinho, a água do rio teve sua qualidade comprometida e por isso, a captação foi suspensa. Por conta disso, no mesmo ano, Vale e Copasa assinaram o Termo de Ajustamento de Conduta, para construção da nova rede de captação, de mesma capacidade (5 m³/s), 12 km a montante da captação existente, onde o rio não recebeu lama (Fiúza, 2022). De acordo com a Copasa, essa nova obra, que teve como prazo inicial de entrega setembro de 2020, até dezembro de 2023 ainda não havia sido totalmente finalizada, contando com problemas de vazamento no bombeamento e sem alcançar a capacidade máxima, chegando somente até a captação de 2 m³/s (Fiúza, 2022).

Com todas essas informações e detendo a vazão captada no rio é possível avaliar como um todo a situação da área de estudo em relação à influência antrópica na retirada de água e, conseqüentemente, na vazão da bacia. Para isso, foram confeccionados dois mapas, para captações de água subterrânea e água superficial, separando-se por município e unidades

hidrogeológicas, divididas em uso significativo e insignificante para melhor visualização, visto que a concentração de captações é elevada. Através desses mapas é possível saber em quais locais houve maior retirada de água e quais as suas características hidrogeológicas.

6.4 Avaliação de Impactos

A fim de compreender a situação dos recursos hídricos na área de estudo foi feita uma correlação dos parâmetros estudados para visualizar os impactos naturais e antrópicos na vazão do rio Paraopeba. Através da correlação entre o comportamento fluviométrico e pluviométrico da região é possível observar a influência do volume de chuvas no volume da vazão do rio no período estudado e os fatores naturais envolvidos.

Além disso, foi feita a correlação dos cálculos do balanço hídrico e das captações para comparar o volume de água disponível e o volume de saída. O excedente hídrico, que também pode ser chamado de escoamento total, engloba a quantidade total de água retida no solo, responsável tanto pelo escoamento superficial – água que circula pela superfície do solo e segue para os cursos d'água – quanto pelo escoamento subterrâneo – água que se infiltra no solo e alimenta os lençóis freáticos e aquíferos (Souza Pinto *et al.*, 1976; Feitosa *et al.*, 2008).

Dessa maneira pode-se tomar como premissa que o valor do excedente hídrico representa o máximo recurso hídrico disponível na área, podendo, então, ser correlacionado com o volume de água total retirada, superficial e subterrânea, da mesma área. Comparando-se os dois parâmetros é possível verificar se o volume de saída de água está superior ao volume do excedente hídrico, de modo que a área não consegue se recuperar, podendo sofrer perdas em sua reserva permanente, atestando o impacto antrópico e sendo classificado, aqui, como superexploração.

Diante disso, com os resultados de excedente hídrico obtidos do balanço hídrico climatológico, calculados pelo método de Thornthwaite e Mather (1955) na planilha de Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998), foram feitas correlações com os polígonos de Thiessen e a avaliação de captações, sendo possível identificar o impacto causado pelas captações superficiais e subterrâneas.

Ao realizar a conversão de unidades, de milímetros por ano (mm/ano) para metros cúbicos por segundo (m^3/s), foi feita a análise comparativa do excedente hídrico total da área (EXC), a partir dos resultados das estações pluviométricas utilizadas, levando em conta a área de influência de cada uma, determinadas pelo Método de Thiessen, e o volume total da vazão

média captada de água superficial e subterrânea, para cada década do intervalo de tempo estudado.

Vale ressaltar que, conforme citado no item 6, os dados de outorgas se iniciam no ano de 1984, então, nessa análise as décadas comparadas foram 1980-1990, 1990-2000, 2000-2010 e 2010-2020, sendo a primeira iniciada em 1984. Isso foi feito para que a escala temporal de comparação seja a mesma para todas as variáveis.

A fórmula de conversão é está representada na equação (15):

$$Y = \frac{X \cdot A}{t} \quad (15)$$

Onde:

Y = Excedente em metros cúbicos por segundo (m^3/s).

X = Excedente em metros por ano (m/ano), convertida de milímetros para metros.

A = Área em metros quadrados (m^2) sobre a qual o excedente ocorre, nesse caso a área de estudo.

t = Tempo, em segundos, em um ano (31.536.000 s).

Ao final, como resultado tem-se que:

Se, $EXC < (V_{sup} + V_{sub})$, a área está sendo superexplorada;

Se, $EXC > (V_{sup} + V_{sub})$, a área não está sofrendo impacto negativo das captações na vazão.

Onde:

V_{sup} = Volume total da vazão média captada de água superficial para cada década do intervalo de tempo estudado, conforme as áreas de influência do Método de Thiessen;

V_{sub} = Volume total da vazão média captada de água subterrânea para cada década do intervalo de tempo estudado, conforme as áreas de influência do Método de Thiessen;

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas para as análises a seguir se encontram bem distribuídas por toda a área de interesse e possuem um intervalo consistente e representativo de 50 anos, desde de 1970 até 2020, com exceção das estações pluviométricas *Resende Costa* e *Itabirito Linígrafo*, cujos dados disponíveis se iniciam, respectivamente, em 1976 e 1984. Além disso, a estação meteorológica *Belo Horizonte* utilizada para a análise temperatura é a única na região que apresenta dados concisos no intervalo estudado (Figura 10).

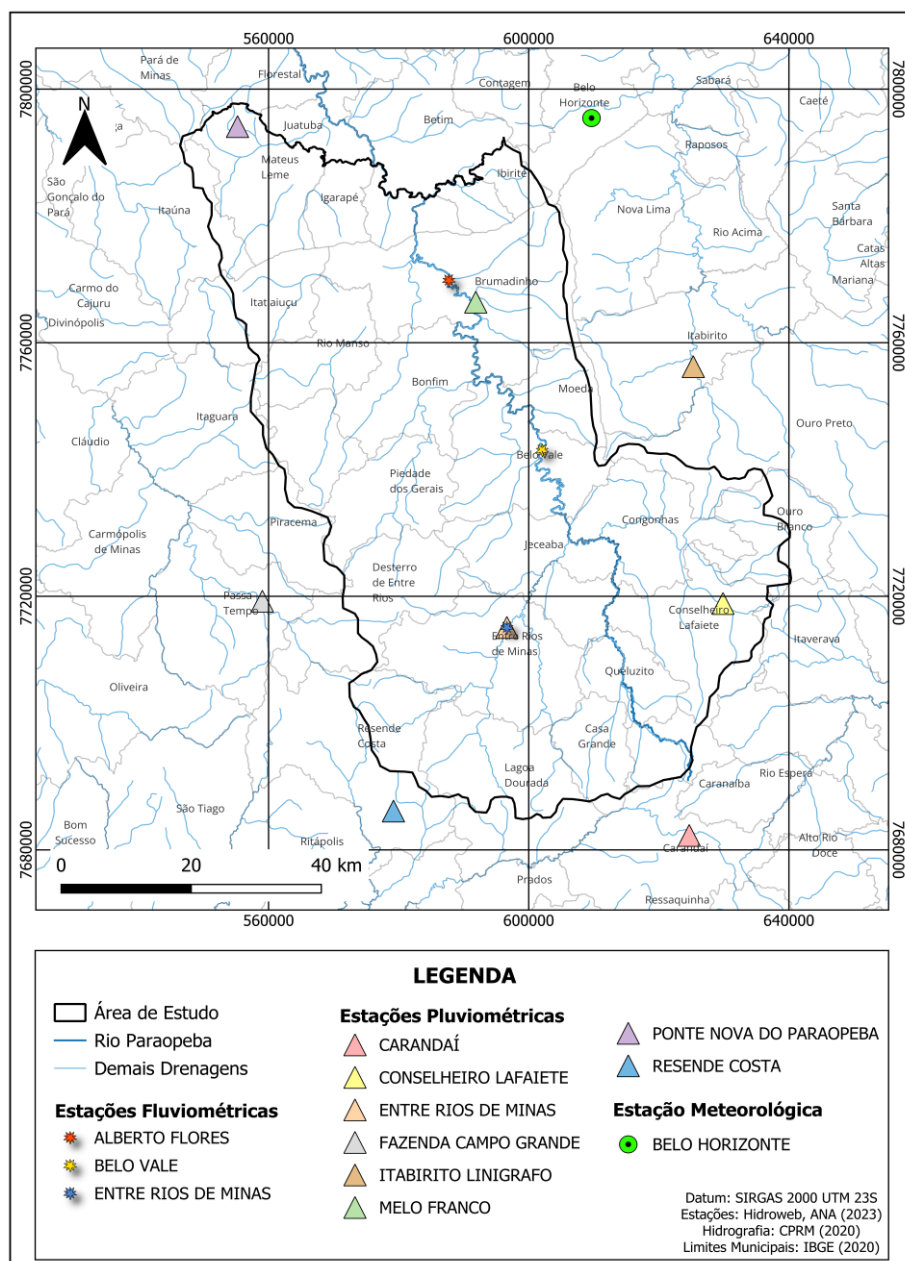


Figura 10 - Mapa de distribuição das estações utilizadas nos métodos de análise na área de estudo.

7.1 Balanço Hídrico Climatológico

7.1.1 Pluviometria

Inicialmente, para avaliar o contexto pluviométrico geral da área foram utilizados os dados de todas as estações pluviométricas em conjunto. Para tal, é importante separar anualmente o período seco e período chuvoso, que se refere aos meses que possuem menor ou maior índice de pluviosidade. Esses períodos são determinados de acordo com o clima característico de uma região, a área de estudo está inserida em um clima úmido, com inverno seco e verão chuvoso, consequentemente, o período seco está nos meses de abril a setembro (outono e inverno), enquanto o período chuvoso se dá nos meses de outubro a março (primavera e verão). Com isso, é possível visualizar a contribuição de cada período na pluviometria total ao ano (Figura 11), comparando a proporção dos dois em termos de precipitação.

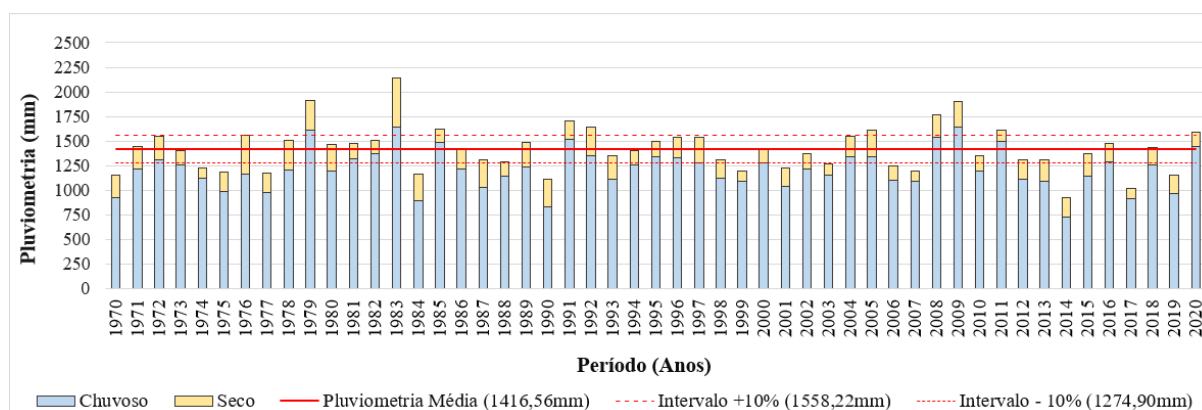


Figura 11 - Gráfico de pluviometria média anual da área, com a discriminação a cada ano do período chuvoso (azul) e seco (beje).

A partir disso, pode-se comparar este comportamento ao longo de todos os anos analisados, verificando se há um padrão ou não, ou ainda alguma mudança, abrupta ou gradual, e em que momento isto ocorre.

Assim, iniciando com os resultados de precipitação da área como um todo, tem-se que a pluviometria média no tempo analisado é 1416,56 mm (Figura 11), com o maior e menor índice pluviométrico ocorridos, respectivamente, nos anos 1983, registrando uma média de 2136,53 mm, e 2014, com 922,83 mm. Observa-se que de 1970 até 1975 os valores são menores, porém deve-se atentar que nesse período estão faltantes dados de duas estações: *Entre Rios de Minas*, que inicia em 1976 e *Itabirito Linígrafo*, que inicia somente em 1984, conforme explicitado no item 6, e isso faz com que a média geral anual seja menor. De maneira geral, o período seco

contribuiu muito pouco com a pluviometria anual na região, como era esperado, e não é observada anomalia comportamental, ou seja, não houve um momento em que os meses de abril a setembro registram altos índices de chuva, ou vice-versa.

Após obter os valores gerais, os métodos de Thiessen e de Isoietas apresentam a configuração pluviométrica interna da área, mostrando, consecutivamente, quais regiões possuem maior influência na precipitação e como ocorre a movimentação das chuvas, de maneira geográfica e matemática, através dos cálculos de cada metodologia.

Os polígonos de Thiessen são interpolados de acordo com a localização das estações utilizadas e da distância entre elas, e a partir dos polígonos o cálculo de precipitação é feito (detalhado no item 6.1), por isso, é considerado um método subjetivo, pois o resultado gerado dependerá da escolha das estações. Os polígonos interpolados na área estão representados na Figura 12.

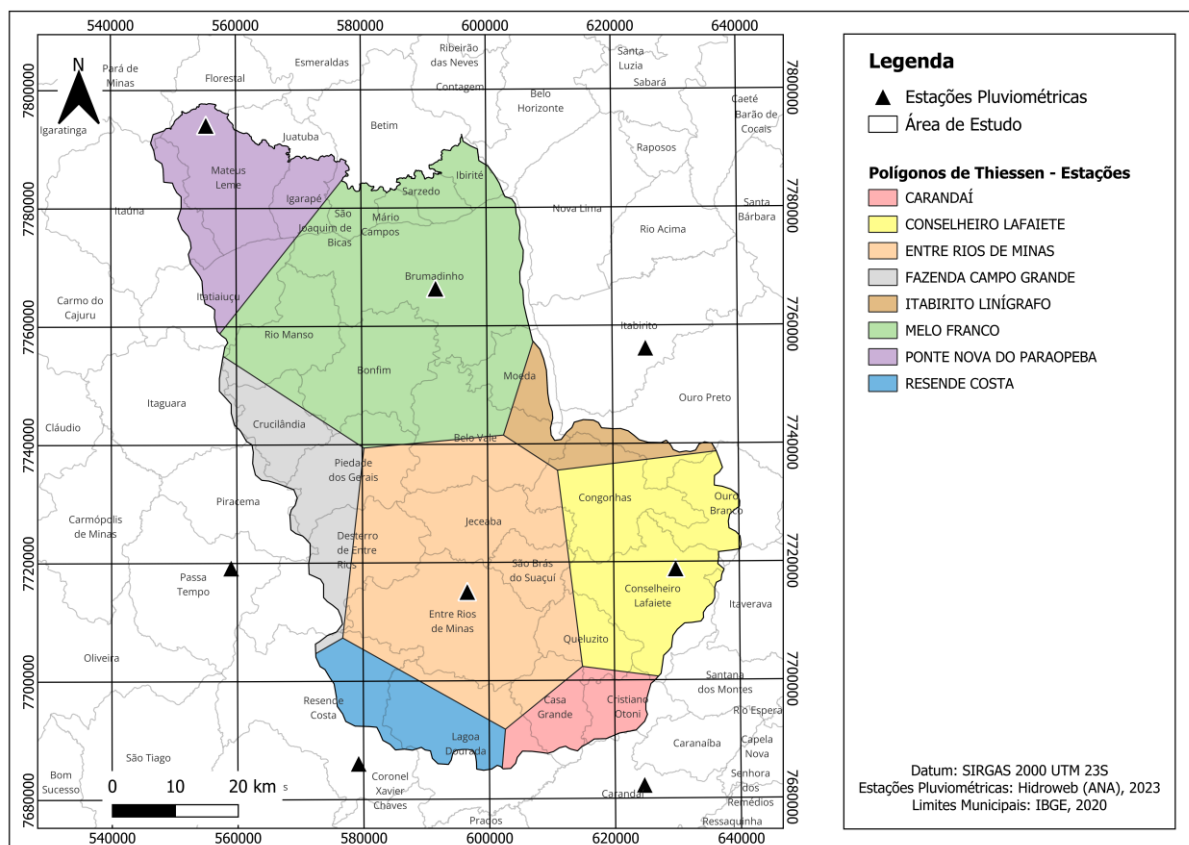


Figura 12 - Mapa de polígonos de Thiessen, representando as áreas de influência de precipitação de cada estação pluviométrica utilizada.

Com base nos cálculos da equação (1), obteve-se, em ordem crescente, os seguintes valores de influência e precipitação média de cada estação: *Itabirito Linígrafo* (3,5% da área e 48,88 mm/ano); *Carandaí* (4,0% da área e 61,43 mm/ano); *Resende Costa* (5,4% da área e

80,71 mm/ano); *Fazenda Campo Grande* (7,5% da área e 110,76 mm/ano); *Ponte Nova do Paraopeba* (10,3% da área e 145,77 mm/ano); *Conselheiro Lafaiete* (14,0% da área e 188,23 mm/ano); *Entre Rios de Minas* (25,0% da área e 355,64 mm/ano) e *Melo Franco* (30,3% e 406,17 mm/ano). Com o somatório, tem-se que a região de estudo possui precipitação média de 1377,61 mm por ano. As informações calculadas estão detalhadas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Informações de cálculo geradas a partir do Método de Thiessen.

Estação	Pluviometria Média Total (mm/Ano)	Área (km²)	Área (%)	Pluviometria - Thiessen (mm/Ano)
Carandaí	1530,83	230,04	4,0%	61,43
Conselheiro Lafaiete	1344,63	802,47	14,0%	188,23
Entre Rios de Minas	1341,05	1434,70	25,0%	335,64
Fazenda Campo Grande	1484,51	427,71	7,5%	110,76
Itabirito Linígrafo	1394,81	200,90	3,5%	48,88
Melo Franco	1340,77	1736,53	30,3%	406,17
Ponte Nova do Paraopeba	1413,36	591,21	10,3%	145,77
Resende Costa	1498,44	308,77	5,4%	80,71
	Total	5732,33	100,0%	1377,61

Em relação ao método de isoietas, de maneira geral, pode-se constatar que a área possui uma pluviosidade característica entre 1400 mm e 1350 mm, com valores superiores somente na borda oeste, conforme representado na Figura 13. Os maiores valores, entre 1500 mm e 1475 mm, se concentram nos municípios de Resende Costa, Casa Grande e Cristiano Ottoni, localizados na borda sul/sudoeste da área, na nascente do rio.

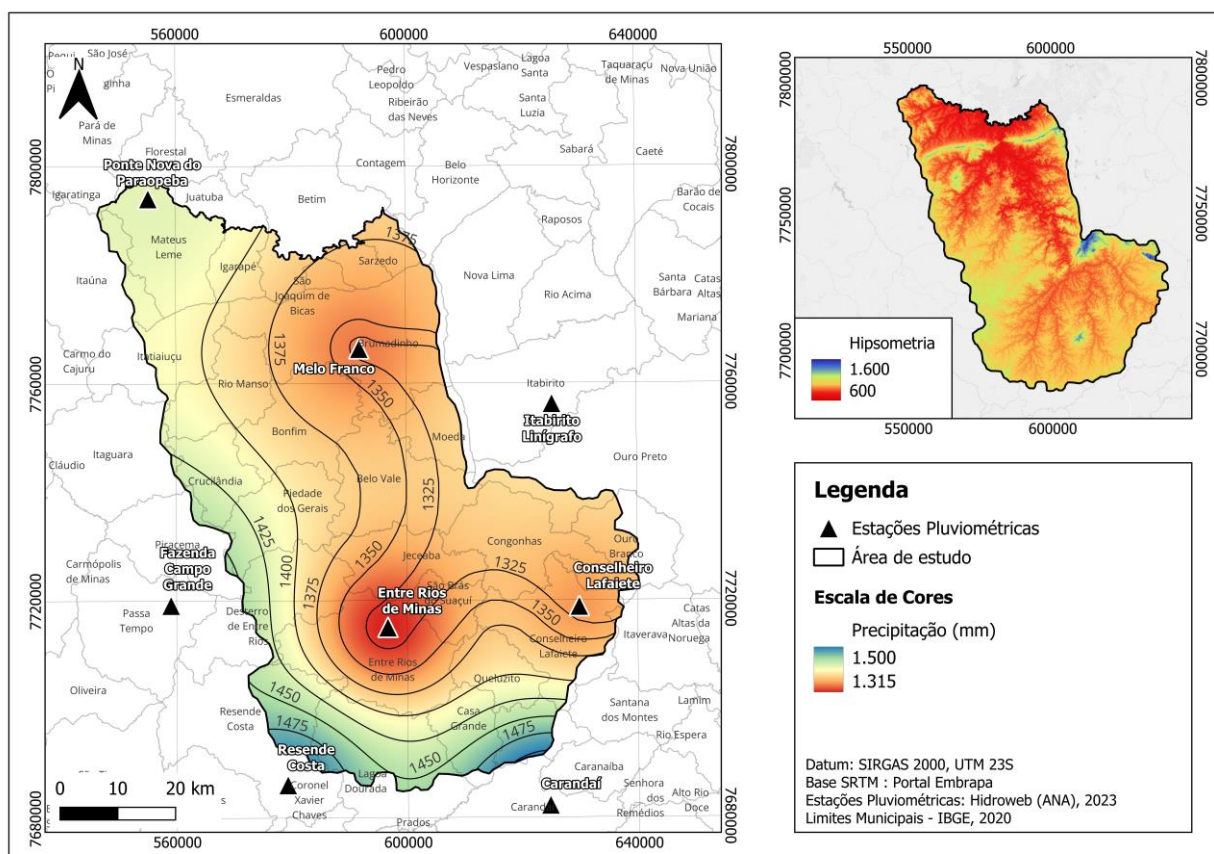


Figura 13 - Mapa de isoietas, mostrando a configuração de pluviosidade dentro da área, de acordo com as estações pluviométricas, com o mapa hipsométrico, para ser feita associação da precipitação com a topografia característica.

É possível observar a movimentação das chuvas em sentido à porção central e nordeste da área, passando pelos municípios Entre Rios de Minas, Jeceaba, Belo Vale e Brumadinho, que possuem os menores valores de precipitação (1350 mm e 1325 mm). Comparando as isoietas com a topografia da região, nota-se que as maiores pluviosidades estão nas regiões mais elevadas (Figura 13). Esse comportamento é coerente com a configuração da área e pode ser explicado pela ocorrência das chamadas chuvas orogênicas ou de relevo, que são causadas devido ao movimento ascendente de ventos úmidos, quando eles são forçados a subir por conta de obstáculos naturais, como montanhas ou elevações no relevo (Torres e Machado, 2008), por isso é esperado que nas porções de maior altitude a precipitação seja maior.

Além disso, o valor obtido da precipitação média calculada de acordo com a equação (2) foi de 1377,55 mm. As informações detalhadas se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 - Informações de cálculo geradas a partir do Método de Isoietas

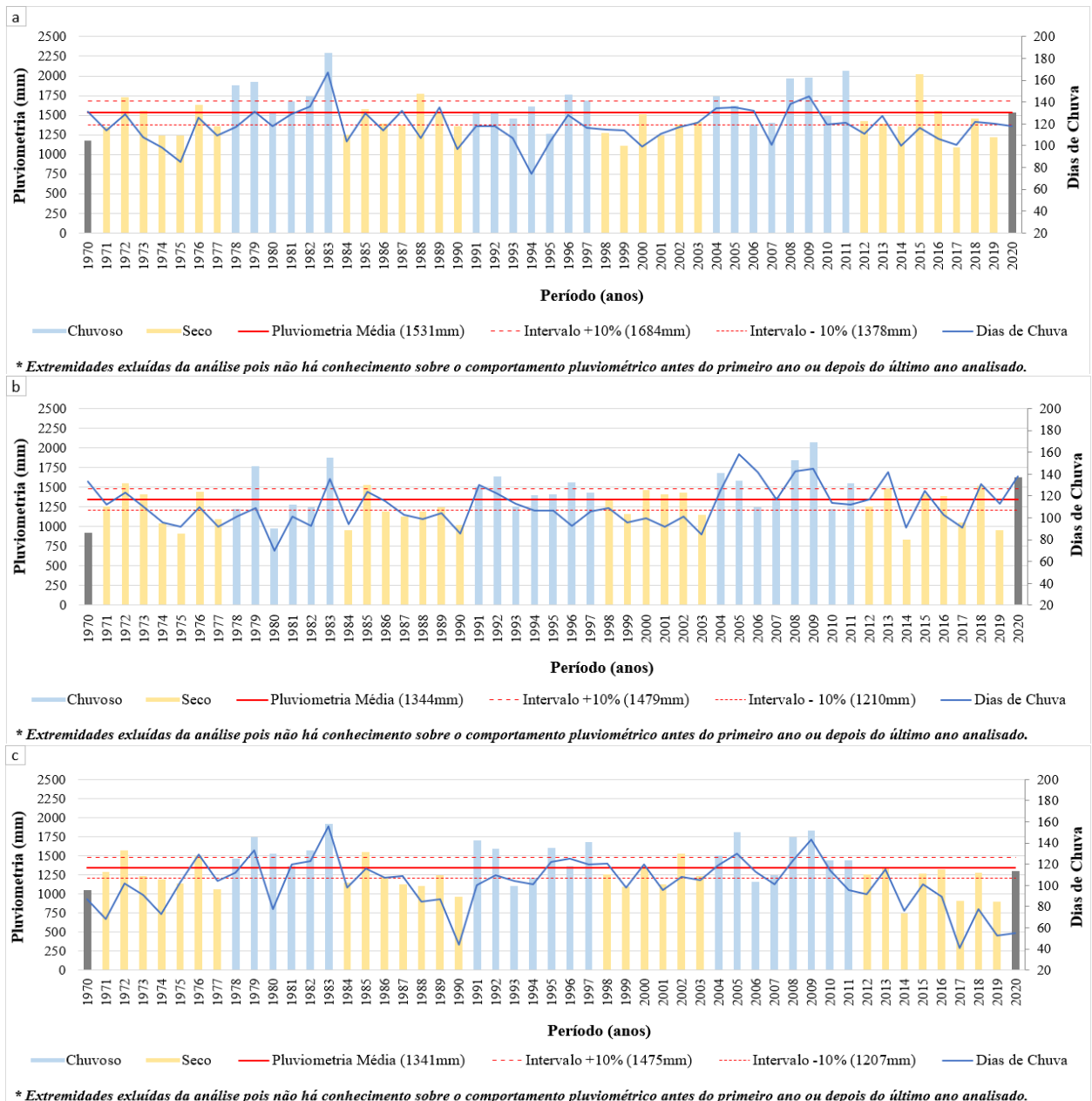
Área entre Isoietas	Precipitação nas Isoietas			Área (km ²)	Produto Pmédia * A
	Pi(mm)	Pi+1 (mm)	Pmédia (i+1) (mm)		
1	1300	1325	1312,50	980,49	1286893,13
2	1325	1350	1337,50	650,26	869722,75
3	1350	1375	1362,50	1108,41	1510208,63
4	1375	1400	1387,50	1052,10	1459788,75
5	1400	1425	1412,50	1204,46	1701299,75
6	1425	1450	1437,50	444,27	638638,13
7	1450	1475	1462,50	200,98	293933,25
8	1475	1500	1487,50	83,99	124935,13
9	1500	1525	1512,50	7,37	11147,13
Total				5732,33	7896566,63
				P (mm/Ano)	1377,55

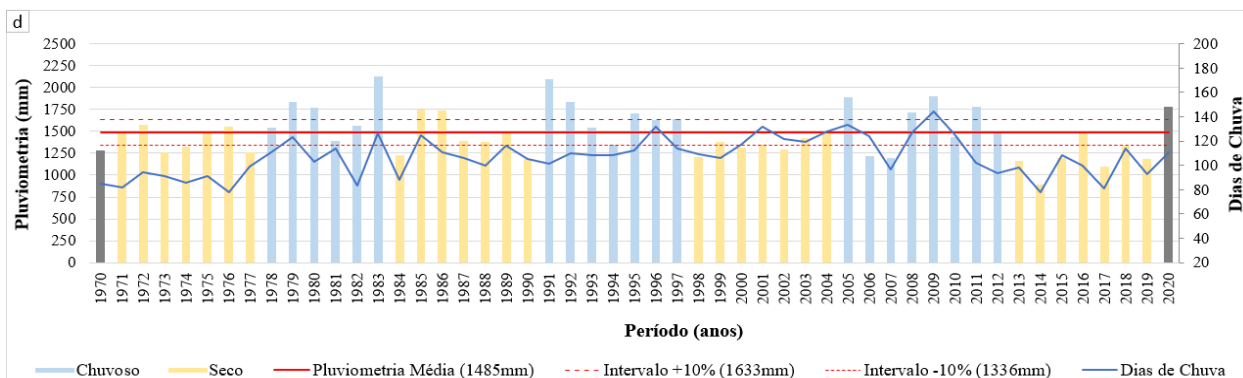
Dispondo-se de ambos os métodos acima para determinar a precipitação média por ano, vê-se que os resultados de 1377,61 mm e 1377,55 mm, os quais correspondem respectivamente a 97,25% e 97,24% da média regional de precipitação medida nas estações (1416,56 mm), atestam a representatividade das estações utilizadas para este estudo na área, por conta da variação desprezível dos valores de precipitação calculados entre os dois métodos e a grande proximidade com o valor medido, apontando para uma confiabilidade nos resultados obtidos.

Outro estudo importante na área é a identificação de ciclos pluviométricos ao longo de todo período analisado. Os ciclos se dividem em ‘seco’ e ‘chuvoso’, e são identificados a partir de anos consecutivos em que a pluviometria média anual tende a ficar abaixo ou acima da média histórica pluviométrica das estações (linha média e intervalo de confiança de +10% e -10%). É possível visualizar a duração, em anos, de cada ciclo, e verificar se eles se repetem, e de que maneira. Os ciclos definidos são relacionados com os dados de dias de chuva, para avaliar a intensidade da precipitação, e ainda, se há relação direta entre os dois parâmetros.

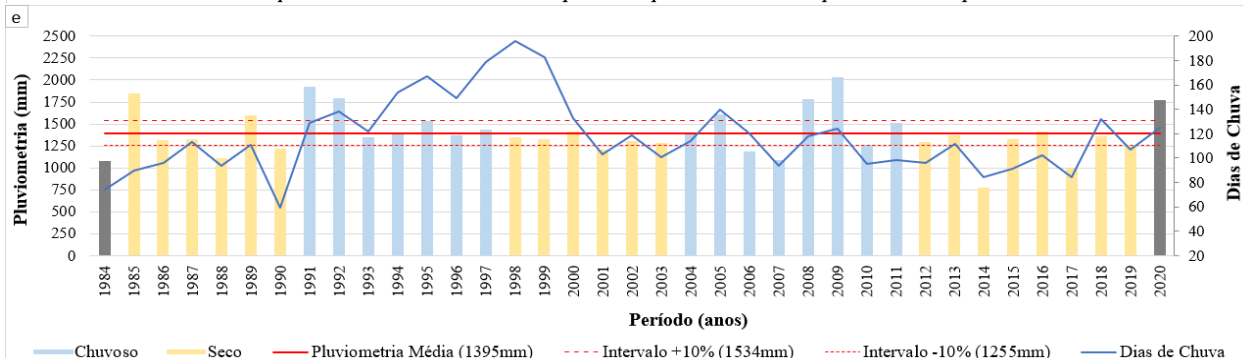
Para a análise dos ciclos pluviométricos, foram analisadas cada estação pluviométrica individualmente, podendo-se comparar cada uma na região, a fim de identificar algum padrão ou anomalia, e com isso saber se área se comporta de maneira homogênea ou não. Ao final, essa análise é feita com os valores compilados de todas as estações em conjunto, e através de regressões lineares e cálculos matemáticos é possível quantificar a evolução pluviométrica ao longo do período estudado.

A análise de cada estação revelou um padrão único de ciclos pluviométricos na região, caracterizado pela alternância entre ciclo seco e chuvoso durante todo o período, com duração de 6 a 8 anos cada (Figura 14). De forma geral, observou-se uma relação direta entre o número de dias de chuva e a média pluviométrica, ou seja, quanto mais dias de chuva, maior é a pluviometria anual acumulada, com exceção apenas da estação *Itabirito Linógrafo*, na qual apresentou uma anomalia destacada entre 1997 e 2000 (Figura 14e), sendo possível perceber um pico de dias de chuva e ao mesmo tempo uma pluviometria anual abaixo da média, ou seja, foram anos de muita chuva, porém fracas.



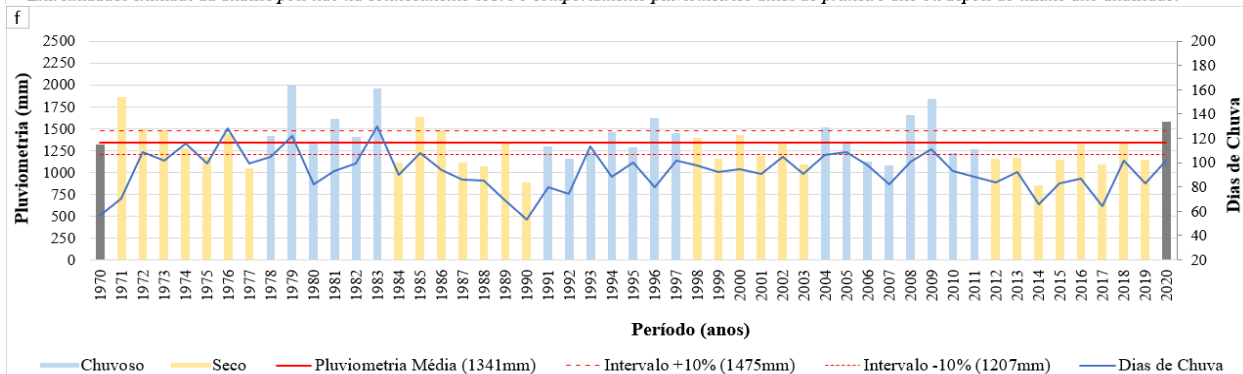


* Extremidades excluídas da análise pois não há conhecimento sobre o comportamento pluviométrico antes do primeiro ano ou depois do último ano analisado.

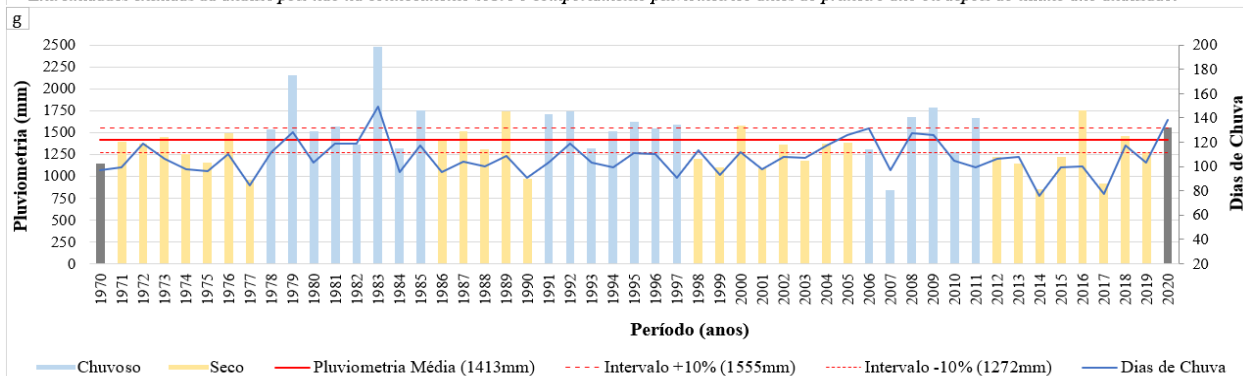


* Dados disponibilizados a partir de 1984.

* Extremidades excluídas da análise pois não há conhecimento sobre o comportamento pluviométrico antes do primeiro ano ou depois do último ano analisado.



* Extremidades excluídas da análise pois não há conhecimento sobre o comportamento pluviométrico antes do primeiro ano ou depois do último ano analisado.



* Extremidades excluídas da análise pois não há conhecimento sobre o comportamento pluviométrico antes do primeiro ano ou depois do último ano analisado.

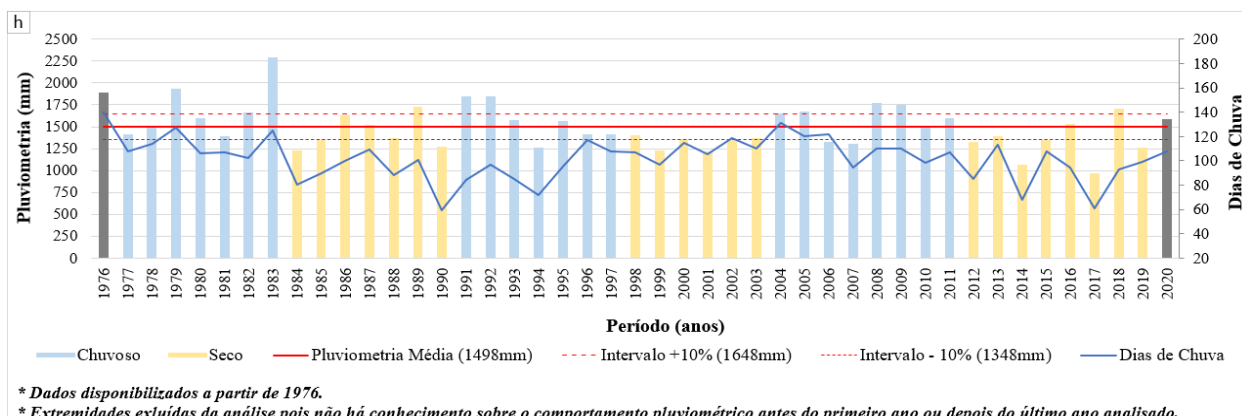


Figura 14 - Gráficos de ciclos pluviométricos, dividido em ciclo chuvoso (barra azul claro) e seco (barra bege), com o histórico de dias de chuva associado (linha azul), para cada estação pluviométrica utilizada, em ordem alfabética. a) Carandaí; b) Conselheiro Lafaiete; c) Entre Rios de Minas; d) Fazenda Campo Grande; e) Itabirito Linígrafo; f) Melo Franco; g) Ponte Nova do Paraopeba; h) Resende Costa.

Por consequência, a análise de ciclos pluviométricos da área como um todo vai refletir esse mesmo padrão, apresentado na Figura 15 abaixo.

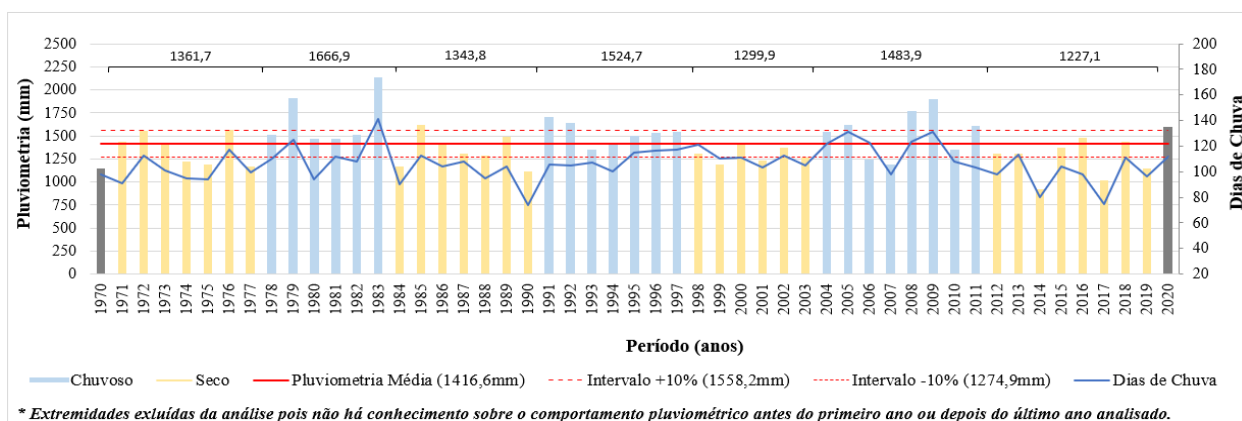


Figura 15 - Gráfico de ciclos pluviométricos da área de estudo, no intervalo de 1970-2020, dividido em ciclo chuvoso (barra azul claro) e seco (barra bege), com o histórico de dias de chuva associado (linha azul).

Nos últimos 50 anos foram observados 4 ciclos de seca (1970-1977; 1984-1990; 1998-2003 e 2012-2019) e 3 ciclos de chuva (1978-1983; 1991-1997 e 2005-2011). O ciclo chuvoso mais intenso registrado ocorreu entre 1978 e 1983, com uma média pluviométrica de 1666,9 mm, ao passo que o ciclo mais seco ocorreu entre 2012 e 2019, registrando 1227,1 mm. Estes ciclos são concordantes com o que outros autores observaram em regiões próximas (Neto, de Paula e Galvão, 2024).

Além disso, foi gerado o gráfico de intensidade pluviométrica média durante os 50 anos analisados (Figura 16), que é o resultado da divisão da pluviosidade média pelo número de dias de chuva de um mesmo ano.

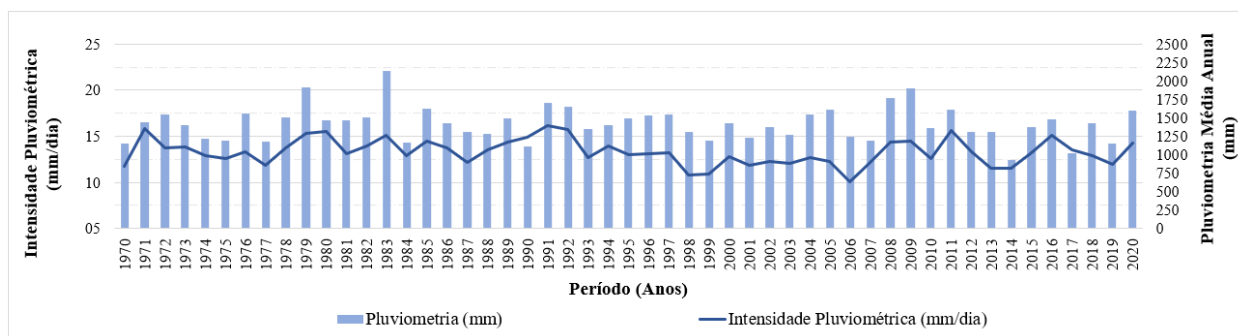


Figura 16 - Gráfico de intensidade pluviométrica média anual da área de estudo, no intervalo de 1970-2020, com a pluviometria média anual em eixo secundário.

Ao realizar a regressão linear dos três parâmetros apresentados – pluviometria, dias de chuva e intensidade pluviométrica – foi constatado que houve uma diminuição significativa na pluviometria média anual ao longo dos 50 anos anteriores a 2020. Já os dias de chuva e a intensidade apresentaram variações muito pequenas durante esse período, de aumento e diminuição respectivamente, que podem ser visualizados abaixo (Tabela 5).

Tabela 5 - Tabela com as informações de cálculo geradas a partir da regressão linear dos históricos de pluviometria, dias de chuva e intensidade pluviométrica, utilizados no estudo.

Variável	$y = ax + b$	Período de tempo (x)	Projeção de Variação (ax)
Pluviometria (mm):	$y = -1,8153x + 5040,3$	50 anos	$-1,8153 \cdot 50 = -92,65$ mm
Dias de chuva:	$y = 0,0316x + 43,577$	50 anos	$0,0316 \cdot 50 = +1,58$ (+2) dias
Intensidade (mm/dia):	$y = -0,0206x + 13,841$	50 anos	$-0,0206 \cdot 50 = -1,03$ mm/dia

Esses resultados atestam que a diminuição de pluviometria não pode ser justificada pelas variações das outras variáveis, pois elas se apresentaram inexpressivas na região, levando em conta a extensão do intervalo de tempo analisado aqui. Diante disso, é possível que esse decaimento seja, em primeiro lugar, em virtude do período escolhido de análise (1970-2020), pois ele inicia e finaliza em meio a um ciclo seco, contabilizando no total quatro ciclos secos e três chuvosos, então naturalmente a resultante geral tende a ser negativa já que há mais momentos de menor precipitação.

Por exemplo, levando em conta a duração de cada ciclo pluviométrico, pode-se inferir que a partir de 2020 até o presente estamos em meio a um ciclo chuvoso. Os gráficos mostram que no ano de 2020 a pluviometria anual é superior aos anos anteriores, apontando para a mudança de ciclo. Além disso, nos últimos anos o estado de Minas Gerais, e a região Sudeste e Sul em geral, têm sofrido com enchentes e chuvas acima da média.

Em 2020 a cidade de Belo Horizonte teve o janeiro mais chuvoso da história, com uma precipitação registrada pelo INMET de 935,2 mm, representando mais da metade esperada para

todo o ano (1602,6 mm). No início de 2022 vários estados, incluindo Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Santa Catarina sofreram com alagamentos causados pela chuva acima da média (O Globo, 2022). Mais recentemente, em 2024, houve um recorde de chuvas na Região Sul, responsáveis pela enchente mais devastadora registrada no Rio Grande do Sul (Félix, 2024). Dessa forma, caso a análise abrangesse esses últimos 4 anos, provavelmente o resultado seria outro, com menor decaimento na pluviometria, e talvez até com uma variação resultante positiva.

Essa redução na pluviometria pode ter sido ocasionada também devido aos índices pluviométricos registrados nos anos de 2014 e 2017, que estão presentes no último ciclo seco e possuem valores muito baixos, e isso acaba conduzindo a linha de tendência mais para baixo, o que explica esse alto valor negativo (-92,65 mm). Nesses dois anos, especialmente 2014, o índice pluviométrico foi muito abaixo do comum, configurando uma situação atípica na região, inclusive, sendo um dos fatores responsáveis pela crise hídrica acarretada em toda a região Sudeste do país nesse mesmo ano, a qual levou à construção do complexo de captação direta no rio Paraopeba a partir de 2015 (Paranaíba, 2015; Marengo e Alves, 2016).

Estudos feitos pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), juntamente com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicam que a principal causa da falta de chuva no verão 2013-2014 foi um intenso, persistente e anômalo sistema de alta pressão atmosférica, que inibiu as correntes ascendentes de ar e dificultou a ocorrência das típicas pancadas de chuva na região Sudeste.

De acordo com Marengo e Alves (2016), essas pancadas de chuva são características no período de verão, causadas por zonas climatológicas que transportam a umidade da Amazônia para o Sul e o Sudeste do Brasil, gerando condições termodinâmicas de forte instabilidade atmosférica. Porém, no verão 2013-2014, uma área de alta pressão, identificada por uma circulação anti-horária sobre o Sudeste do Brasil não permitiu que esse transporte de umidade penetrasse e se desenvolvesse na região, sendo na ocasião desviado para o oeste da Amazônia, o que gerou as chuvas intensas e enchentes nos estados de Rondônia e Acre no verão de 2014 (Espinoza et al., 2014), e a seca principalmente nos estados de São Paulo e Minas Gerais.

Fazendo uma análise mais aprofundada, é possível relacionar os eventos denominados *El Niño* e/ou *La Niña*, com certas características dos ciclos, contemplando o ano de 2017. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC, 2024), o *El Niño* e a *La Niña* são partes de um mesmo fenômeno acoplado (atmosférico-oceânico) que ocorre no oceano Pacífico Equatorial (e na

atmosfera adjacente) periodicamente, em situações nas quais ele está mais quente (*El Niño*) ou mais frio (*La Niña*) do que a média normal histórica. A mudança na temperatura do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais na temperatura e precipitação, influenciando também o Brasil, de maneiras diversas, dependendo da região. Na região Sudeste é observado que o *El Niño* provoca chuvas acima da média, e o oposto ocorre quando há *La Niña*.

De acordo com os registros de ocorrência do INPE/CPTEC (2024) houve a ocorrência de *El Niño* em 1979-1980 de intensidade moderada, em 1982-1983 de intensidade forte, e em 2009-2010 também de intensidade moderada. Ao observar todos os gráficos de pluviometria gerados, os anos de 1979, 1983 e 2009 sempre estão entre os maiores valores de precipitação anual, podendo, então, estar relacionados a esse evento natural. Já para o *La Niña*, registrou-se sua ocorrência em 1999-2000 e 2017-2018 com intensidade moderada, e é possível notar, em todas as estações, valores baixos de pluviometria anual nos anos de 1999 e 2017 (Figuras 14 e 15).

Analisando os parâmetros de dias de chuva e intensidade pluviométrica especificamente a cada ciclo, vê-se novamente que não há uma tendência, positiva ou negativa, de forma relevante ao longo do tempo, capaz de causar alguma mudança no comportamento da pluviometria da área de estudo (Tabela 6).

Tabela 6 - Tabela com as informações dos históricos de pluviometria, dias de chuva e intensidade pluviométrica, a cada ciclo pluviométrico da área de estudo.

Ciclo Pluviométrico	Pluviometria (mm)	Dias de Chuva	Intensidade (mm/dia)
Ciclo 1 (1971-1977) - Seco	1361,71	101	13,42
Ciclo 2 (1978-1983) - Chuvoso	1666,97	115	14,49
Ciclo 3 (1984-1990) - Seco	1343,86	98	13,68
Ciclo 4 (1991-1997) - Chuvoso	1524,77	109	13,93
Ciclo 5 (1998-2003) - Seco	1299,93	110	11,76
Ciclo 6 (2004-2011) - Chuvoso	1483,91	117	12,64
Ciclo 7 (2012-2019) - Seco	1227,12	97	12,66

É possível perceber ainda que o ciclo chuvoso mais intenso (ciclo 2), entre 1978 e 1983, engloba os anos 1979 e 1983, impactados pelo *El Niño*, e o ciclo mais seco (ciclo 7) inclui os anos de 2014, que sofreu uma estiagem atípica, e 2017, que foi impactado pelo *La Niña*.

7.1.2 Temperatura

Para a aplicação da metodologia do Balanço Hídrico Climatológico é preciso, além da análise da pluviometria das estações utilizadas, realizar uma avaliação de temperatura na área, que neste estudo é representada pela estação meteorológica *Belo Horizonte*, pois é a única próxima a área que possui dados de monitoramento completos de temperatura média, mínima e máxima durante todo o período.

A estação de *Belo Horizonte* pôde ser utilizada para a área de estudo mesmo localizada fora de seu limite, pois ela apresentou uma boa consistência, determinada pelo Método de Dupla Massa.

Este método foi desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*U.S. Geological Survey – USGS*), para atestar a consistência de séries de dados meteorológicos mensais e anuais. A metodologia consiste em construir um gráfico cartesiano, relacionando os totais anuais (ou mensais) acumulados da estação de interesse nas ordenadas, e a média acumulada dos totais anuais (ou mensais) da estação, ou estações, mais próximas, a serem comparadas nas abscissas. A consistência dos totais anuais da estação analisada é confirmada quando há uma tendência linear em relação à(s) estação(ões) vizinha(s). (Chierice Jr e Landim, 2014; Oliveira *et al.*, 2008 apud de Andrade *et. al.*, 2018).

A consistência é determinada pelo coeficiente de determinação (R^2), gerado graficamente. Trata-se de uma medida estatística, baseada originalmente nos conceitos de ‘coeficiente de correlação’ de Karl Pearson (Pearson, 1896), e formalizada à análise de regressão linear por Fisher (1925), que avalia o ajuste de um modelo estatístico linear, simples ou múltiplo, medindo a proporção da variação total de uma variável dependente (ou resposta), em uma escala de 0 a 1, sendo expresso também em termos percentuais, que pode ser explicada pelo modelo de regressão. Quanto mais próximo for o coeficiente de 1, ou 100%, melhor é o ajuste linear.

Para a aplicação do método as variáveis de comparação devem ser as mesmas, ou seja, precipitação-precipitação ou temperatura-temperatura. Portanto, neste caso, a estação de interesse a ser plotada nas ordenadas é a estação meteorológica *Belo Horizonte* contendo dados de totais anuais precipitação, comparada com a média acumulada dos totais anuais de precipitação das oito estações pluviométricas utilizadas no estudo.

Dessa forma, como a região possui o mesmo clima de acordo com Köppen (1936) – tropical com inverno seco (Aw) – se os dados pluviométricos da estação *Belo Horizonte*

apresentam uma aderência com a pluviometria da área de estudos, toma-se como premissa que para a variável temperatura essa aderência também será válida.

Segundo Amaral (2018) um R^2 entre 0,70 e 0,89 é considerado de correlação forte, e o Método de Dupla Massa para a estação de interesse apresentou uma consistência de 0,71 ou 71% com a área de estudo (Figura 17), sendo considerada então, satisfatória para sua utilização na análise de temperatura.

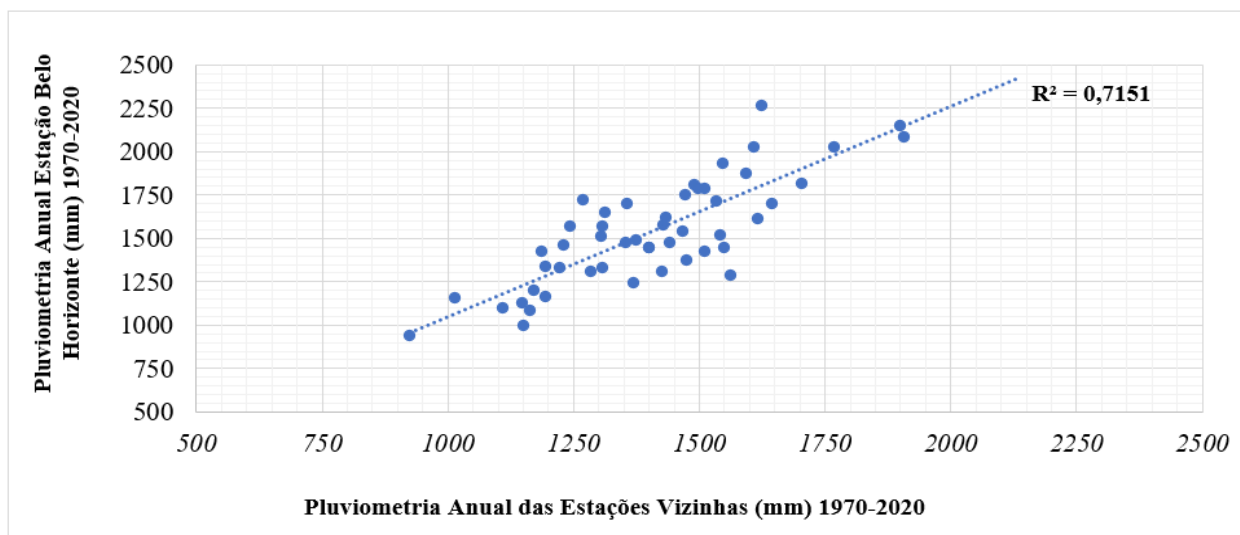


Figura 17 - Gráfico de Dupla Massa para precipitação da estação meteorológica Belo Horizonte, em comparação com as estações pluviométricas utilizadas no estudo.

Dispondo esses dados graficamente (Figura 18) nota-se que houve um aumento geral de temperatura ao longo do intervalo. A temperatura mínima gira em torno de 17°C , a média, em torno de 22°C e a máxima, perto dos 27°C . Analisando as três variáveis de maneira geral, com as linhas de tendência, a mudança é progressiva e de comportamento linear.

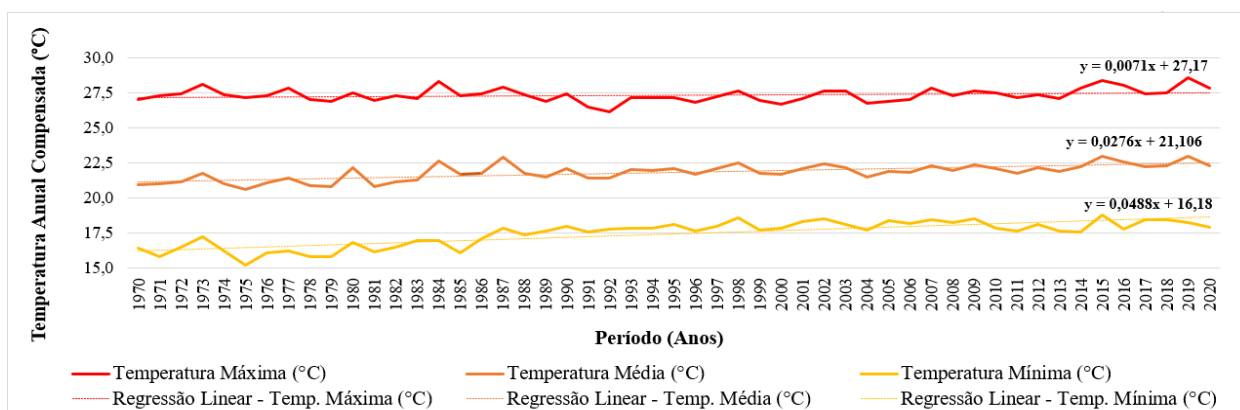


Figura 18 - Gráfico de histórico de temperatura anual compensada, no intervalo de 1970-2020, dividido em temperatura mínima (linha amarela), temperatura média (linha laranja) e temperatura máxima (linha vermelha), com as linhas de tendência (linhas pontilhadas) e regressão linear associada.

Através dos cálculos é possível chegar a uma projeção do aumento total da temperatura no período. A temperatura mínima possui a maior projeção, de 2,44°C, a temperatura média possui uma projeção de 1,38°C, já para a temperatura máxima praticamente não houve mudança, de 0,35°C. As informações calculadas estão detalhadas na tabela abaixo.

Tabela 7 - Tabela com as informações de cálculo geradas a partir da regressão linear dos dados de monitoramento da temperatura utilizados no estudo.

Variável	$y = ax + b$	Período de tempo (x)	Projeção de aumento de Temp. (ax)
Temp. Máxima (°C)	$y = 0,0071x + 27,17$	50 anos	$0,0071 \cdot 50 = 0,35 \text{ °C}$
Temp. Média (°C)	$y = 0,0276x + 21,106$	50 anos	$0,0276 \cdot 50 = 1,38 \text{ °C}$
Temp. Mínima (°C)	$y = 0,0488x + 16,18$	50 anos	$0,0488 \cdot 50 = 2,44 \text{ °C}$

Ao observar o gráfico atentamente observa-se que na temperatura mínima há intervalos locais de mudança nos valores médios: entre 1970-1987 a média está na faixa dos 16°C, entre 1987-2000 ela já se encontra na faixa dos 17,5°C, e a partir de 2001, até 2020, a média já passa de 18°C, corroborando com o aumento aproximado de 2°C.

Em relação a temperatura média, é possível notar que de 1970 até 1987 os valores oscilam mais entre abaixo e acima do valor médio geral, estando, nesse período, com uma média de 21,5°C, a partir de 1988 até 2013 essa oscilação diminui e a grande maioria dos anos registram temperatura no limiar para cima da média geral de 22°C, quando, por fim, entre 2013-2020 os valores já são superiores, com exceção de 2017 e 2018, que registram temperaturas no limiar geral, estando localmente com uma média de 22,5°C, também corroborando com a projeção na faixa de 1°C, já citada. Enquanto isso no comportamento da temperatura máxima não é observada variação destacada (Figura 18).

Isso nos leva a perceber que a região está cada vez mais quente, especialmente durante o inverno, que possui temperaturas cada vez menos contrastantes com as épocas mais quentes, ou seja, seguindo as taxas de crescimento, a temperatura mínima para a área vai ser cada vez maior, e as características do clima, de estações bem definidas (inverno frio e seco/ verão quente e úmido) já não estarão tão destacadas em termos de temperatura por conta do inverno, que se tornará mais quente.

Fazendo uma correlação da temperatura com os ciclos pluviométricos (Tabela 8) vê-se que as temperaturas média e máxima em cada ciclo não apresentam alguma progressão e possuem uma relação direta com o tipo de ciclo: nos ciclos secos as temperaturas são superiores às dos ciclos chuvosos, com exceção apenas da temperatura média do Ciclo 1 (1971-1977). Já

a temperatura mínima aumentou continuamente a cada ciclo até 2003, se estabilizando a partir de então.

Tabela 8 - Temperaturas mínima, média e máxima em cada ciclo pluviométrico definido na área entre 1970 e 2020.

Ciclo Pluviométrico	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Média (°C)	Temperatura Máxima (°C)
Ciclo 1 (1971-1977) - Seco	16,17	21,15	27,51
Ciclo 2 (1978-1983) - Chuvoso	16,34	21,18	27,14
Ciclo 3 (1984-1990) - Seco	17,27	22,04	27,52
Ciclo 4 (1991-1997) - Chuvoso	17,82	21,81	26,89
Ciclo 5 (1998-2003) - Seco	18,17	22,10	27,28
Ciclo 6 (2004-2011) - Chuvoso	18,11	21,97	27,27
Ciclo 7 (2012-2019) - Seco	18,11	22,41	27,78

É possível conectar o aumento da temperatura mínima com a pluviometria de maneira direta, pois dentre os ciclos chuvosos o de maior intensidade (Ciclo 2) foi o de temperatura menor, enquanto o menos intenso (Ciclo 6) foi o que teve a maior temperatura mínima registrada.

A relação entre temperatura e precipitação é complexa e depende de diversos fatores ambientais característicos, como evaporação, transporte atmosférico e formação de nuvens. Dessa forma, o aumento da temperatura pode intensificar ou diminuir a ocorrência de chuvas, provocando chuvas mais intensas em algumas áreas e secas mais prolongadas em outras, como parece ser o caso da área de estudo. Estudos apontam que regiões tropicais e subtropicais são mais suscetíveis a períodos de seca prolongada devido ao aumento da temperatura. Segundo o Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM, 2024), o aumento das temperaturas globais tem intensificado a ocorrência de secas prolongadas em regiões tropicais e subtropicais, de maneira que, mesmo com elevações moderadas de temperatura (1 a 2 °C), a produtividade agrícola nessas áreas tende a diminuir, exacerbando a vulnerabilidade à escassez hídrica.

De acordo com Seminário Regional do Sudeste para o 2º Plano de Ação Brasileiro de Combate à Desertificação e Mitigação aos Efeitos da Seca (CEMADEN, 2024) a região Sudeste do país tem registrado secas severas desde 2014, sendo as mais severas apresentadas: 2014-2015 (toda Região Sudeste); em 2015 (norte MG e SP-noroeste e central); em 2017 (norte de MG e noroeste e centro do Estado de SP); em 2021 (todo estado SP e sudoeste de MG) e 2023 (centro do Estado de SP, noroeste e nordeste de MG e todo ES). Durante este seminário a Coordenação Estadual da Defesa Civil do Estado de Minas Gerais afirmou (CEMADEN, 2024):

Decretamos 102 municípios em estado de seca. Os períodos de seca estão mais contínuos, avançando em direção ao sul do estado. Temos algumas ações para

minimizar os impactos, como o projeto de dessalinização das águas. Nosso foco é prevenção e fortalecer os municípios.

7.1.3 Método de Thorthwaite e Mather

Partindo para a análise do balanço hídrico climatológico por Thorthwaite e Mather (1955), ao longo dos 50 anos analisados, o excedente hídrico sempre foi superior ao déficit, apresentando um extrato positivo em todas as décadas, conforme detalhado na Tabela 9.

O comportamento das estações varia um pouco, porém é notável que desde o ano 2000 o balanço final é menor, exceto para estação *Carandaí*, que apresenta um aumento em 2000-2010 em relação a década anterior. Especialmente na última década, é nítido que há menos discrepância entre o excedente e o déficit gerado para todas as estações, pois os valores diminuem mais drasticamente, ou seja, houve um déficit maior (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores do extrato do balanço hídrico (excedente hídrico – déficit hídrico) de cada estação pluviométrica, a cada década estudada.

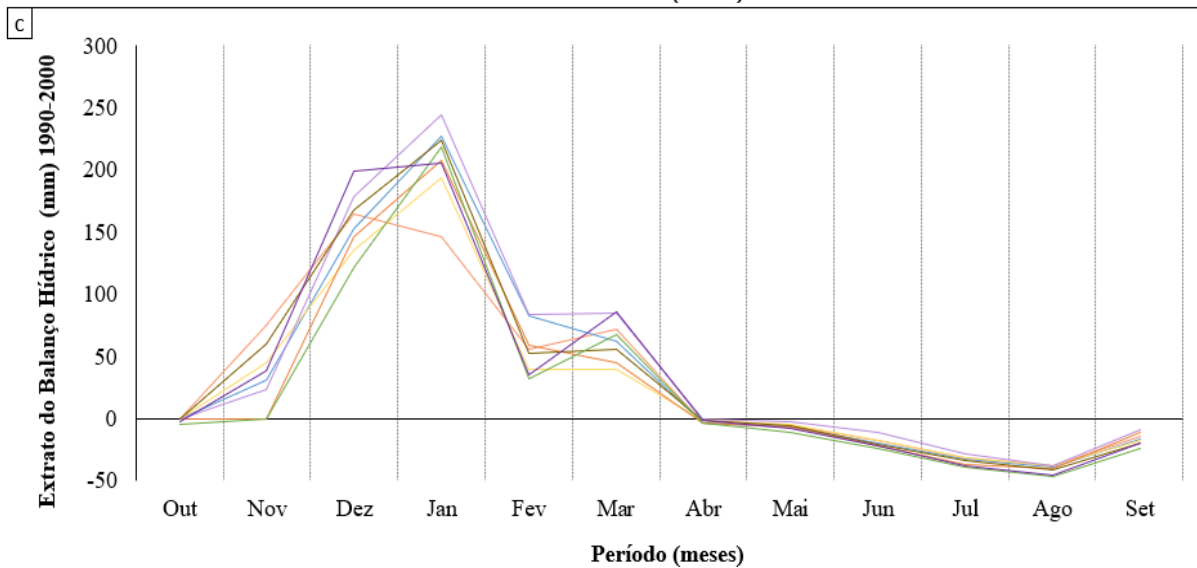
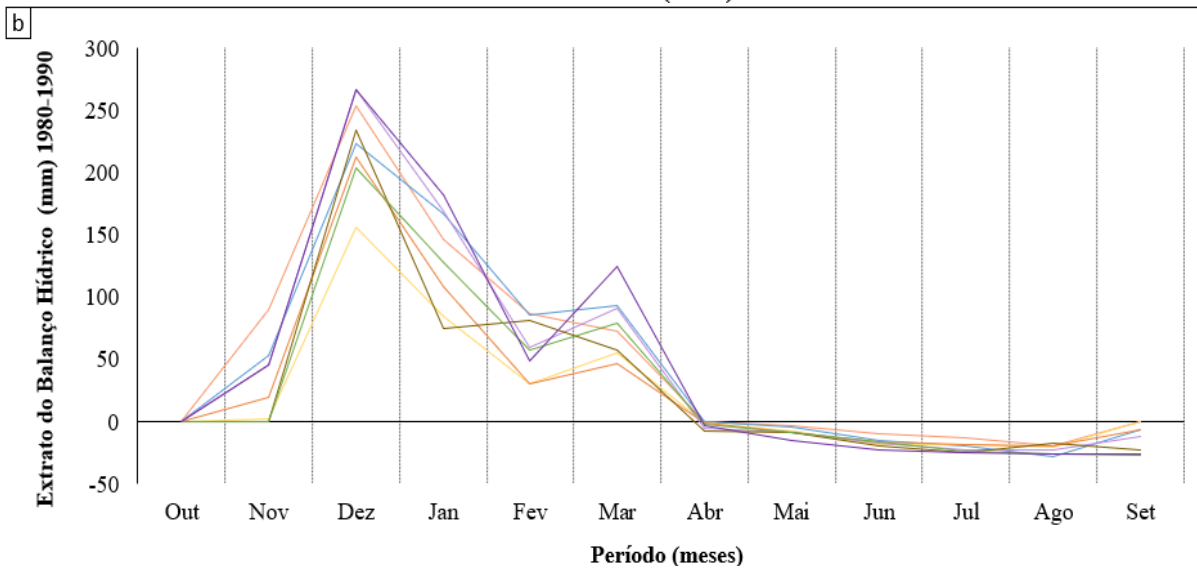
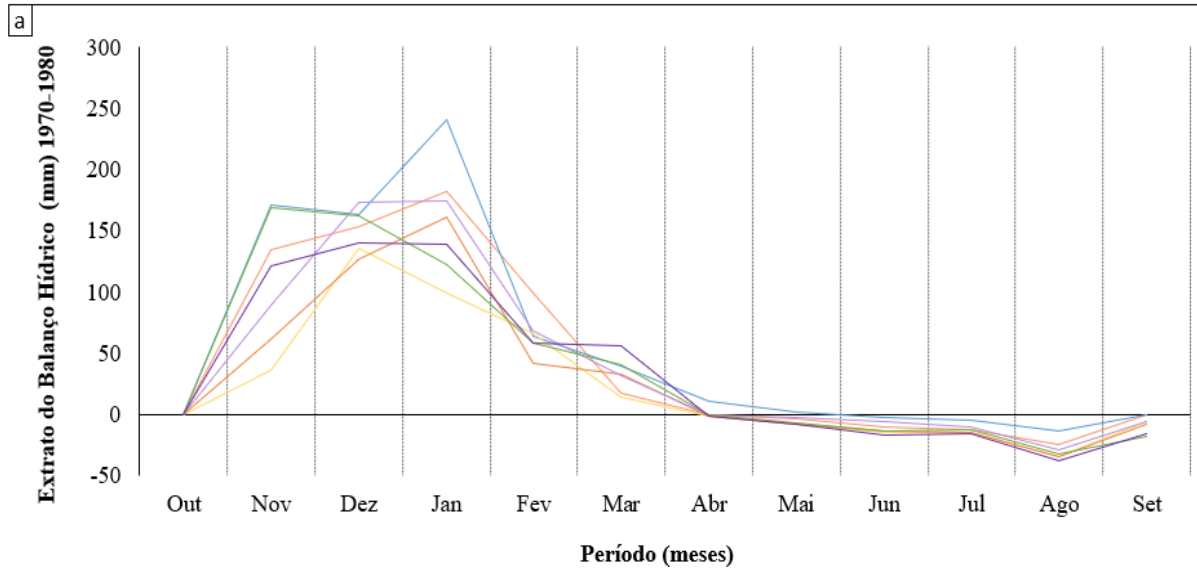
EXTRATO BALANÇO HÍDRICO POR DÉCADA								
Década	Carandaí	Resende Costa	Conselheiro Lafaiete	Entre Rios de Minas	Fazenda Campo Grande	Itabirito Linígrafo	Melo Franco	Ponte Nova do Paraopeba
1970-1980	535,55	671,14	272,95	345,96	485,81	-	470,67	420,09
1980-1990	607,19	552,08	264,79	348,39	547,59	351,07	367,65	552,67
1990-2000	404,99	435,45	342,99	335,75	523,33	438,37	285,05	427,55
2000-2010	481,29	422,45	428,46	367,75	401,76	331,25	262,98	251,25
2010-2020	443,90	291,00	223,30	123,06	269,30	250,23	137,38	242,42

Através dos gráficos de extrato mensal do balanço hídrico (Figura 19), observa-se que os valores de excedente hídrico em geral estão diminuindo, especialmente na última década, 2010-2020, no qual o valor mais alto não passou de 200 mm, pertencente a estação *Carandaí* (Figura 19e), enquanto nas décadas anteriores os maiores valores estavam entre 200 mm e 250 mm.

Já o déficit hídrico apresentou comportamento semelhante em todas as décadas, com os menores valores na faixa dos -50 mm, sempre no mês de agosto (Figura 19). Na década 2000-2010 é possível observar que no mês de outubro também houve um déficit relevante em praticamente toda a região (Figura 19d), com exceção de *Carandaí* e *Conselheiro Lafaiete*, que apresentaram valores de extrato positivo no mês. O mesmo acontece em 2010-2020, porém de maneira menos significativa (Figura 19e).

Outra característica notável é o comportamento registrado entre os meses de fevereiro e março, no qual há sempre um aumento de excedente hídrico, que depois volta a reduzir. Como dito anteriormente, os maiores déficits estão contidos no mês de agosto, porém eles logo diminuem no mês seguinte, de setembro, quando finaliza o ano hidrológico, mas nas décadas

de 1980-1990 e 2010-2020 esse comportamento é ligeiramente diferente, com algumas estações se mantendo constantes, com nenhuma ou praticamente nenhuma variação (Figura 19b e 19e).



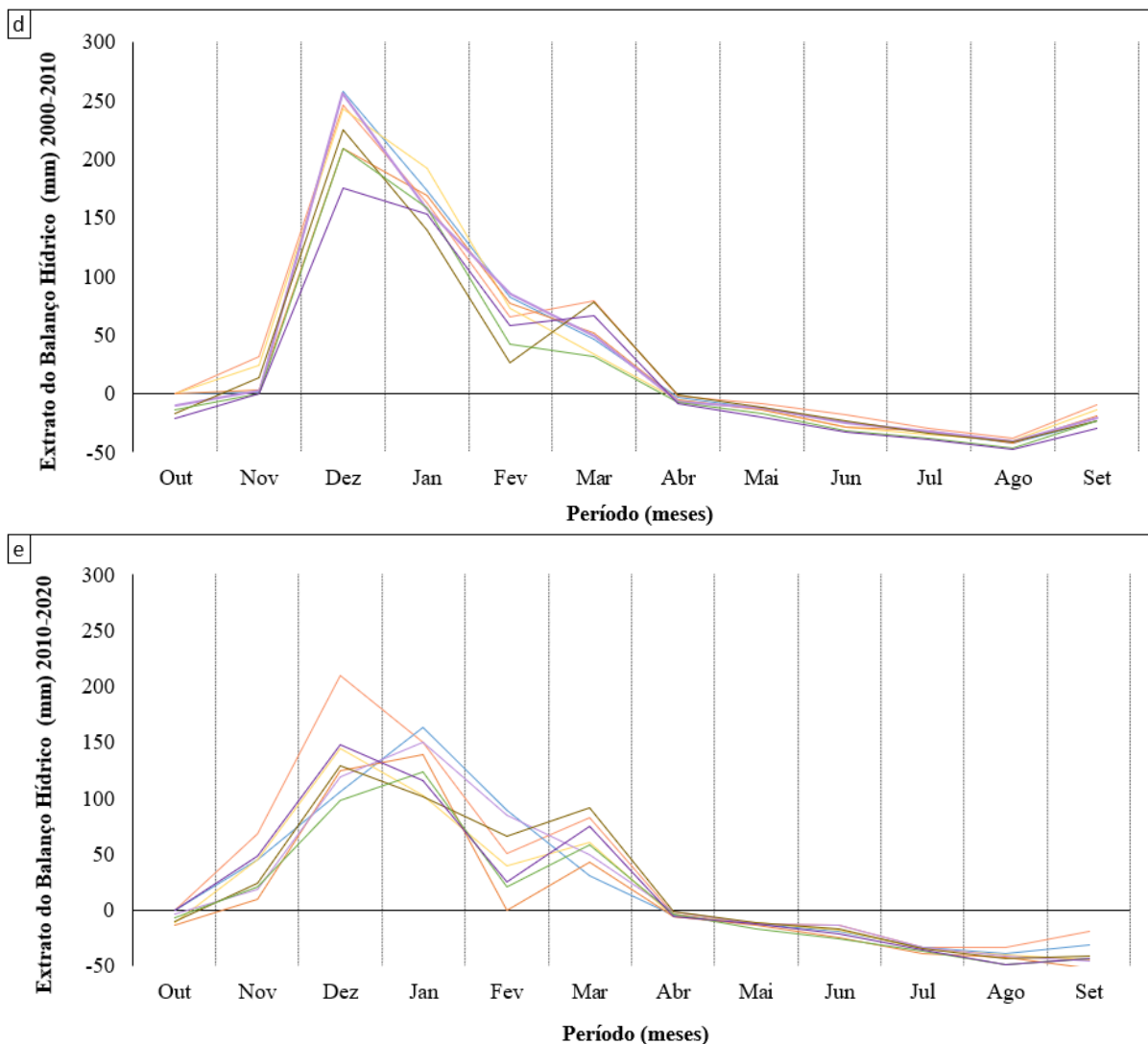


Figura 19 - Gráficos do extrato mensal do balanço hídrico de todas as estações pluviométricas, agrupados por década. a) extrato mensal na década 1970-1980. b) extrato mensal na década 1980-1990. c) extrato mensal na década 1990-2000. d) extrato mensal na década 2000-2010. e) extrato mensal na década 2010-2020.

Fica claro que na região o balanço hídrico se comporta de acordo com o esperado para as características de pluviosidade durante o ano, em que o período de seca ocorre entre os meses de outubro e dezembro, gerando déficit hídrico, e os períodos de chuva ocorrem de janeiro a março, resultando no excedente hídrico.

A partir dos resultados obtidos de evapotranspiração real (ETR) e déficit hídrico (DEF), é possível chegar ainda ao índice de aridez a cada década e analisar de maneira consistente a evolução da área ao longo dos anos estudados quanto à disponibilidade de água no ambiente, além de identificar as zonas mais áridas.

Os Índices de Aridez calculados evidenciam que em toda a área o potencial de desertificação está aumentando, não numa escala alarmante, porém notável desde as últimas

duas décadas. É possível perceber que o processo de desertificação aumenta em direção à jusante, já que a estação *Carandaí* é a única que apresenta apenas o índice r de pouca deficiência de água e é a que está mais próxima à nascente, ao passo que as estações *Melo Franco* e *Ponte Nova do Paraopeba*, mais próximas ao limite superior da área, são as que apresentam índice w de deficiência moderada desde os últimos 30 anos (Tabela 10).

Tabela 10 - Informações de evapotranspiração real (ETR), déficit hídrico (DEF), com resultado do índice de aridez (Ia) e a classificação de subtipo climático correspondente, por década, de 1970 até 2020, referente a cada estação pluviométrica utilizada no balanço hídrico climatológico.

ÍNDICE DE ARIDEZ								
Carandaí					Resende Costa			
	ETP (ETR) (mm)	DEF (mm)	Índice (Ia)	Classificação	ETP (ETR) (mm)	DEF (mm)	Índice (Ia)	Classificação
1970-1980	940,15	51,78	6,33	r	971,14	20,77	2,46	r
1980-1990	971,43	45,21	5,35	r	944,99	71,63	8,72	r
1990-2000	933,47	108,52	13,37	r	922,08	119,88	14,95	r
2000-2010	960,49	105,02	12,57	r	926,81	138,68	17,21	w
2010-2020	971,56	116,32	13,77	r	945,91	141,95	17,26	w
Conselheiro Lafaiete					Entre Rios de Minas			
	ETP (ETR) (mm)	DEF (mm)	Índice (Ia)	Classificação	ETP (ETR) (mm)	DEF (mm)	Índice (Ia)	Classificação
1970-1980	913,59	78,13	9,84	r	913,25	78,49	9,88	r
1980-1990	952,05	64,37	7,78	r	947,50	68,95	8,37	r
1990-2000	932,41	109,35	13,49	r	920,64	121,15	15,13	r
2000-2010	928,74	136,56	16,91	w	923,27	142,06	17,69	w
2010-2020	920,38	167,27	20,90	w	894,90	192,78	24,77	w
Fazenda Campo Grande					Itabirito Linígrafo			
	ETP (ETR) (mm)	DEF (mm)	Índice (Ia)	Classificação	ETP (ETR) (mm)	DEF (mm)	Índice (Ia)	Classificação
1970-1980	938,98	52,74	6,46	r	-	-	-	-
1980-1990	930,54	85,89	10,61	r	917,55	98,65	12,04	r
1990-2000	951,89	89,87	10,86	r	919,68	121,85	14,84	r
2000-2010	916,30	149,01	18,70	w	913,18	151,92	18,63	w
2010-2020	936,08	151,57	18,62	w	926,37	161,05	19,47	w
Melo Franco					Ponte Nova do Paraopeba			
	ETP (ETR) (mm)	DEF (mm)	Índice (Ia)	Classificação	ETP (ETR) (mm)	DEF (mm)	Índice (Ia)	Classificação
1970-1980	908,36	83,10	10,43	r	896,72	94,58	12,23	r
1980-1990	913,61	102,54	12,79	r	900,18	115,80	14,92	r
1990-2000	888,15	153,31	19,68	w	903,52	137,77	17,69	w
2000-2010	886,23	178,81	23,00	w	864,09	200,80	26,96	w
2010-2020	904,25	183,11	23,08	w	918,90	168,29	21,24	w

Analisando a evolução de ETR e DEF para a área como um todo nota-se que a evapotranspiração durante todo o período estudado é menor no limite superior da área de estudo (mais a jusante do rio Paraopeba), enquanto na borda inferior se concentra maior evapotranspiração (mais a montante). É possível observar que na década de 1980-1990 houve um aumento de ETR na porção centro-sul da área em relação à década anterior, e a partir de então, a cada década subsequente ocorre uma movimentação progressiva dos menores valores de ETR da borda superior da área em direção à parte central (Figura 20).

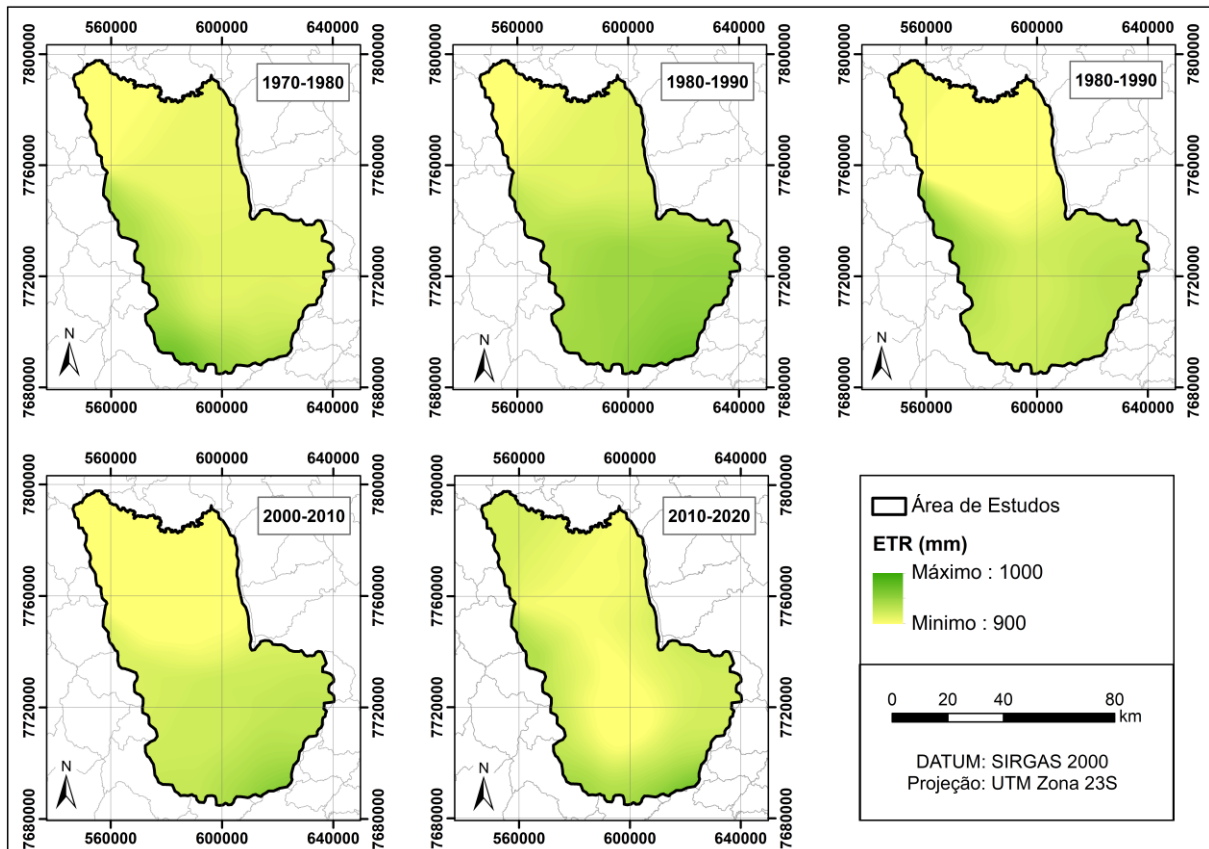


Figura 20 - Mapas de concentração da evapotranspiração real dentro da área de estudos a cada década estudada, de 1970 até 2020.

Já para o déficit hídrico fica evidenciado seu aumento progressivo em toda a área a cada década, nas quais vê-se um aumento pronunciado de 1980-1990 para 1990-2000 e mais ainda para 2000-2010. De maneira complementar, oposta ao ETR, os maiores valores de DEF estão sempre no limite superior, enquanto na borda inferior apresenta menor déficit hídrico, e a partir de 1980-1990 é possível ver claramente a mesma movimentação da parte superior da área em direção à porção central, porém de maiores valores de DEF (Figura 21).

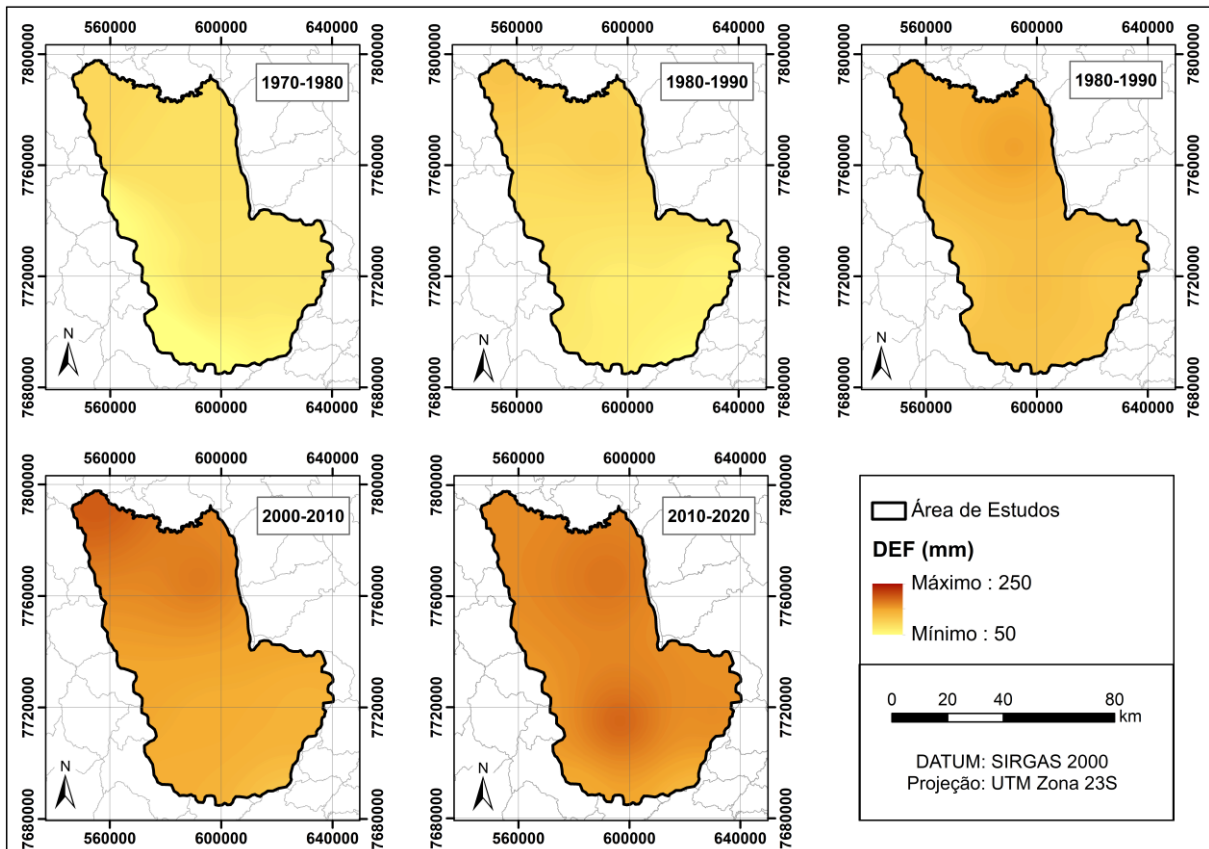


Figura 21 - Mapas de concentração do déficit hídrico dentro da área de estudos a cada década estudada, de 1970 até 2020.

O fato de os valores de excedente hídrico estarem diminuindo, mesmo que de forma vagarosa, evidencia que o aumento nas temperaturas mínima e média anual influencia na capacidade de retenção de água na área, pois, como observado na análise pluviométrica, há uma influência do aumento da temperatura no decaimento na precipitação, e com menos chuva, consecutivamente, há menos água disponível no solo para repor a água perdida, aumentando, dessa forma, o déficit hídrico.

Esses resultados são suficientes para identificar as regiões de maior potencial de aridez e ver claramente que a tendência atual e para o futuro próximo é que esse processo se intensifique cada vez mais. Por isso, é fundamental voltar a atenção para isso e começar a pensar em soluções viáveis de mitigação, ou até mesmo, reversão.

Conforme o Seminário Regional do Sudeste para o 2º Plano de Ação Brasileiro de Combate à Desertificação e Mitigação aos Efeitos da Seca (CEMADEN, 2024) as secas são recorrentes e têm se intensificado nos últimos anos, e o aumento na frequência e na intensidade das secas pode contribuir para a intensificação do processo de desertificação. Na Região Sudeste aproximadamente 37% apresenta um nível entre moderado e crítico.

7.2 Análise Fluviométrica

Para avaliar a fluviometria foram utilizados dados históricos de vazão de três estações fluviométricas – *Alberto Flores*, *Belo Vale* e *Entre Rios de Minas* – inseridas na área e possuem informações durante o período de 1970-2020 (Figura 10).

Através dos resultados gerados (Figura 22) é possível perceber um comportamento fluviométrico semelhante nas três estações, com valores médios de *Alberto Flores* e *Belo Vale* oscilando num range de 30 m³/s a 80 m³/s, no qual *Alberto Flores* possui uma vazão geral ligeiramente maior – 59,29 m³/s – do que *Belo Vale* – 47,34 m³/s. Os picos mais acentuados observados de *Belo Vale* e *Alberto Flores* respectivamente estão nos anos de 1979 (78,11 m³/s e 105,17 m³/s), 1983 (87,47 m³/s e 117,14 m³/s) e 2009 (75,29 m³/s e 96,54 m³/s), e maior queda em 2014 (16,38 m³/s e 23,99 m³/s), porém analisando todo o período de 1970 até 2022 não houve uma mudança brusca no padrão.

A estação *Entre Rios de Minas* possui valores gerais bem inferiores, oscilando entre 6 e 12 m³/s. As maiores discrepâncias estão em 1983 (16,12 m³/s), 1990 (18,32 m³/s) e no ano de 2014, no qual a vazão registrada foi de 2,90 m³/s, com uma média geral durante todo o período de 8,37 m³/s.

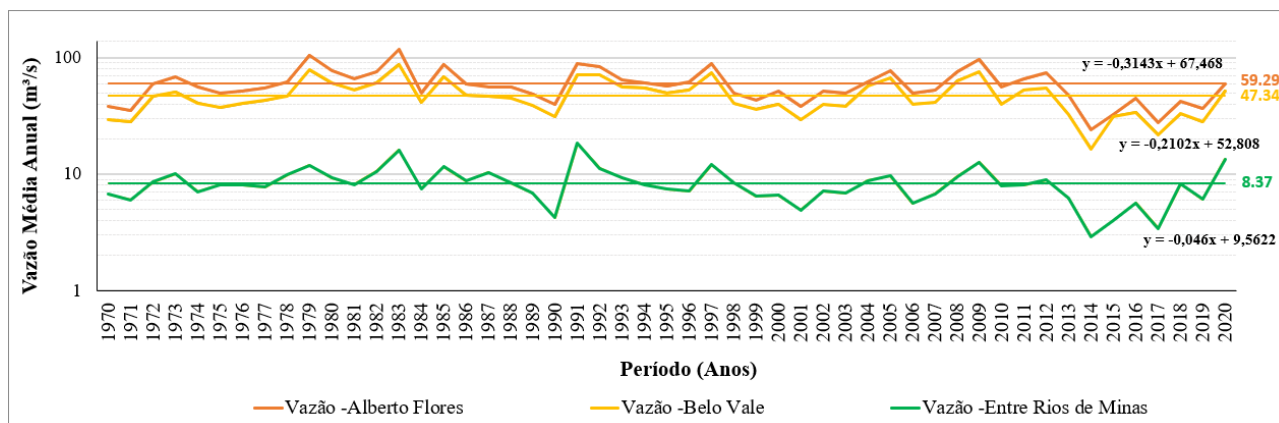


Figura 22 - Gráfico de vazão média anual, em m³/s, das estações fluviométricas Alberto Flores (linha laranja), Belo Vale (linha amarela) e Entre Rios de Minas (linha azul), no período de 1970 a 2020, com as respectivas médias gerais (linhas retas), e equações de regressão linear.

Ao realizar uma regressão linear dos dados de vazão média anual das estações fluviométricas *Alberto Flores*, *Belo Vale* e *Entre Rios de Minas* em todo o período estudado vê-se que há para todas um decaimento na vazão da bacia hidrográfica na área. Por meio dos cálculos é possível chegar a uma projeção da diminuição total da vazão de cada estação no período. A estação *Alberto Flores* possui a maior projeção, de -15,71 m³/s, a estação possui

uma projeção de 1,38°C, já para a temperatura máxima praticamente não houve mudança, de 0,35°C. As informações calculadas estão detalhadas na tabela abaixo.

Tabela 11 - Tabela com as informações de cálculo geradas a partir da regressão linear dos dados de monitoramento de vazão média anual utilizados no estudo.

Variável	$y = ax + b$	Período de tempo (x)	Projeção de decaimento da vazão (ax)
Vazão Média Anual - Alberto Flores (m³/s)	$y = -0,3143x + 67,47$	50 anos	$-0,3143 \cdot 50 = -15,71 \text{ m}^3/\text{s}$
Vazão Média Anual - Belo Vale (m³/s)	$y = -0,2102x + 52,81$	50 anos	$-0,2102 \cdot 50 = -10,51 \text{ m}^3/\text{s}$
Vazão Média Anual - Entre Rios de Minas (m³/s)	$y = -0,046x + 9,56$	50 anos	$-0,046 \cdot 50 = -2,3 \text{ m}^3/\text{s}$

É sabido que em 2015 se iniciou a captação de 5 m³/s diretamente no rio Paraopeba, através de um complexo da Copasa localizado em Brumadinho (Paranaíba, 2015; Parreiras, 2023), o que pode explicar a queda de maior intensidade na vazão registrada na estação *Alberto Flores*, que se encontra no mesmo município.

Ao associar esses resultados com os ciclos pluviométricos da área é possível observar que os valores de vazão média anual registrados são maiores e observam-se mais picos durante os ciclos chuvosos (1978-1973; 1991-1997; 2004-2011). Da mesma maneira, nos ciclos secos, os valores de vazão registrados foram os menores, especialmente no último ciclo, entre 2012 e 2020 (Figura 23).

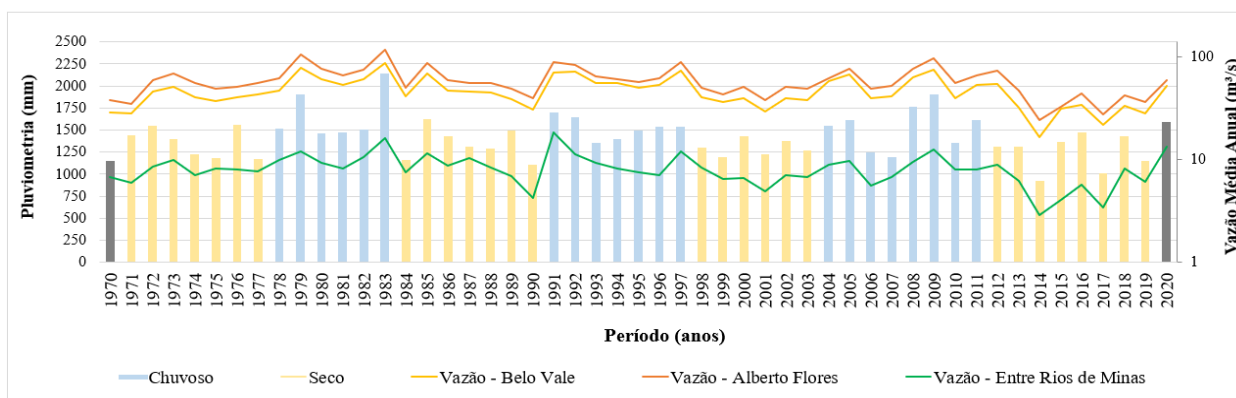


Figura 23 - Gráfico de vazão média anual, em m³/s, das estações fluviométricas Alberto Flores (linha laranja), Belo Vale (linha amarela) e Entre Rios de Minas (linha azul), sobreposto ao gráfico de ciclos pluviométricos da área de estudos no período de 1970 a 2020.

Os valores de vazão médios de cada ciclo estão detalhados na Tabela 12, atestando a relação direta entre a pluviometria e a fluviometria na região.

Tabela 12 - Vazão média das estações fluviométricas Alberto Flores, Belo Vale e Entre Rios de Minas, para cada ciclo pluviométrico definido na área de estudos entre 1970 e 2020.

Ciclo Pluviométrico	Vazão Média - Alberto Flores (m ³ /s)	Vazão Média - Belo Vale (m ³ /s)	Vazão Média - Entre Rios de Minas (m ³ /s)
Ciclo 1 (1971-1977) - Seco	53,62	40,90	7,92
Ciclo 2 (1978-1983) - Chuvoso	83,84	64,51	10,96
Ciclo 3 (1985-1990) - Seco	56,75	45,45	8,22
Ciclo 4 (1991-1997) - Chuvoso	72,05	61,45	10,50
Ciclo 5 (1998-2003) - Seco	47,10	37,23	6,69
Ciclo 6 (2004-2011) - Chuvoso	66,95	54,61	8,61
Ciclo 7 (2012-2019) - Seco	41,04	31,43	5,66

A avaliação fluviométrica também aponta que há uma queda pronunciada no ano de 2014 na vazão média geral das três estações estudadas, convergindo com fatores ambientais ocorridos no mesmo ano como a estiagem atípica do verão 2013-2014 devido a fatores naturais climatológicos atmosféricos (Marengo e Alves, 2016).

Analisando o gráfico com a distribuição das estações fluviométricas na área tem-se que esses resultados de valores médios de cada estação apresentam um comportamento esperado, pois a vazão aumenta da estação mais à montante, *Entre Rios de Minas*, para a estação *Belo Vale*, e, consecutivamente para *Alberto Flores*, estação mais próxima à jusante. Além disso, enquanto as estações Alberto Flores e Belo Vale estão localizadas diretamente no rio Paraopeba, Entre Rios de Minas está em um afluente, no rio Brumado, ou seja, um curso de água menor que desemboca no rio principal da bacia hidrográfica, neste caso o rio Paraopeba, aumentando o seu volume, então a vazão registrada nessa estação representa o volume do afluente (Figura 24).

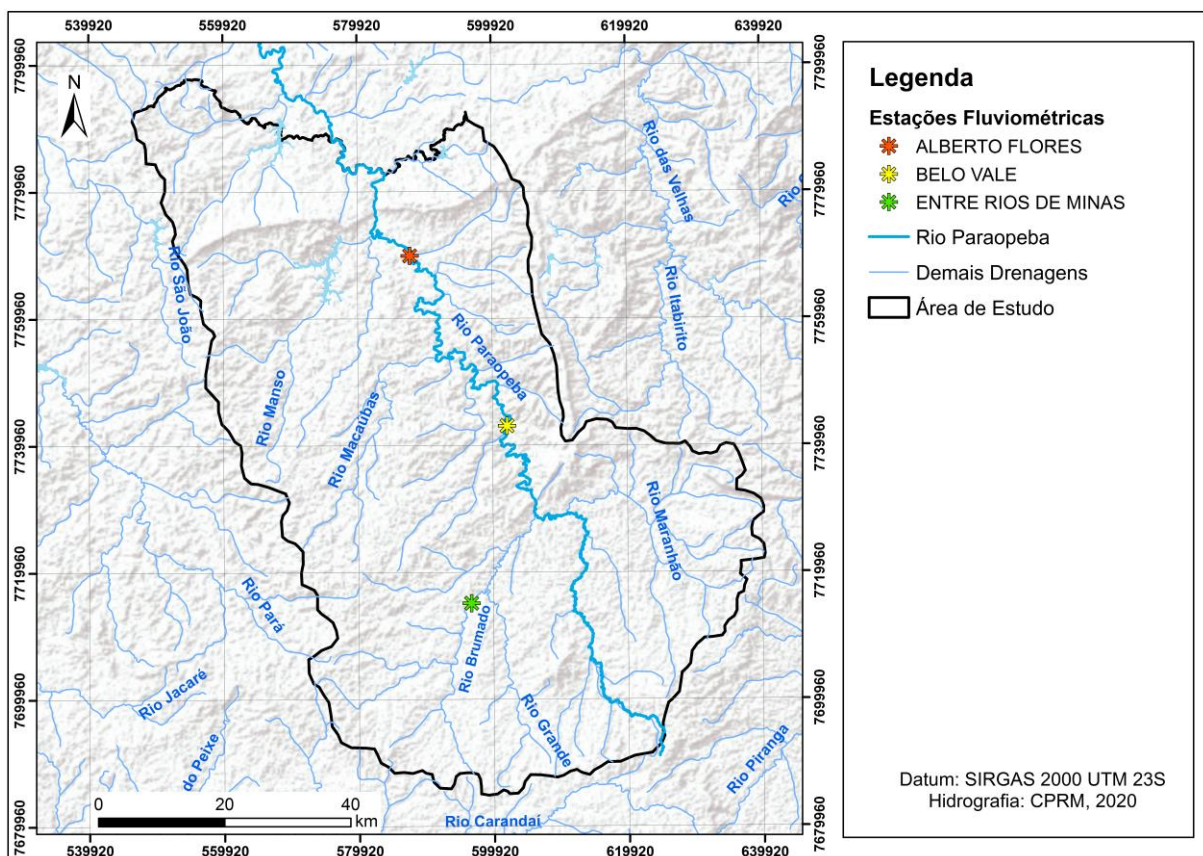


Figura 24 - Mapa com a localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo em relação aos cursos d'água na área.

7.3 Avaliação de Captações

Com os dados de captações de 1984 até 2020 foi possível analisar a evolução do uso de água superficial e subterrânea na área de estudos, discriminando também as porções onde houve maior crescimento de concessões e consequente maior demanda de recurso hídrico da bacia hidrográfica durante esse período.

Para a água superficial, de 1984 até 1993 as captações, tanto para cadastro de uso insignificante quanto poços outorgáveis de uso significativo, se mantiveram constantes em termos de quantidade de captação, com valores médios respectivos de 0,007 m³/s e 0,012 m³/s, mas em 1994 houve um aumento significativo na captação de uso significativo, permanecendo praticamente constante até 2016, com um volume médio de 0,252 m³/s, quando há um novo aumento destacado, atingindo volume captado na faixa de 4,61 m³/s, aumentando levemente até 2020, para 6,88 m³/s (Figura 25a).

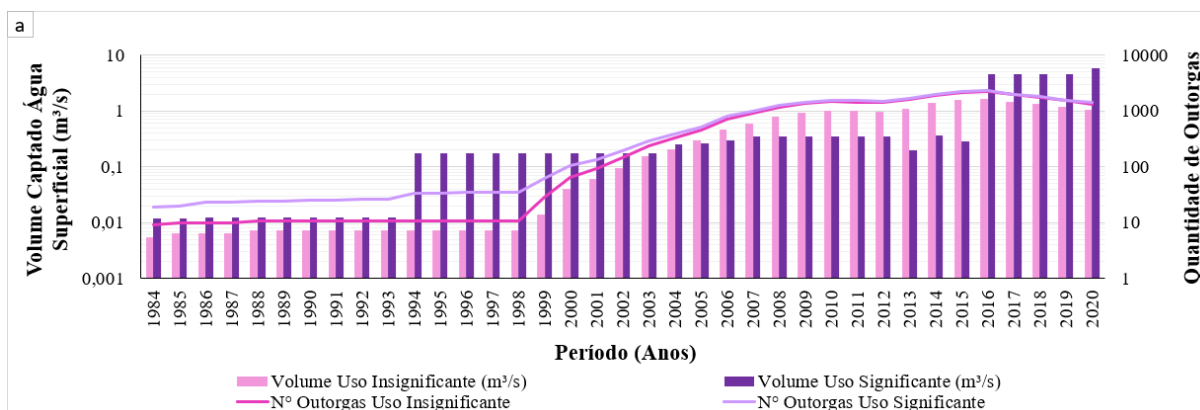
Já para o cadastro de uso insignificante a captação foi constante até 1998, com um volume médio de 0,007 m³/s, quando começou a crescer de maneira gradativa, ficando inclusive

com uma captação mais relevante do que para uso significativo, a partir de 2005, até 2016, atingindo 1,66 m³/s, quando começa a diminuir de maneira sútil até 2020, registrando 1,03 m³/s. (Figura 25a).

Em relação às outorgas de água subterrânea para os dois tipos de uso houve um crescimento gradual nas vazões de captação. Nos primeiros 6 anos, até 1990, o crescimento foi maior, com volumes captados neste ano para uso insignificante e significativo, respectivamente, de 0,091 m³/s e 0,827 m³/s. A partir de então o aumento foi lento ao longo do período. Pode-se notar um aumento um pouco maior de 2005 para 2006 no uso significativo – 3,06 m³/s para 4,08 m³/s (Figura 25b).

Além disso, a partir de 2013 percebe-se que a captação para ambos os usos, insignificante (0,604 m³/s) e significativo (4,61 m³/s), começou a diminuir até 2020, registrando 0,357 m³/s e 2,96 m³/s (b).

Em relação a quantidade de outorgas observa-se para o uso de água superficial um aumento destacado a partir de 1998, crescendo de maneira gradativa até 2010, quando então essa quantidade se estabiliza. Para o uso de água subterrânea desde 1984 é observado um aumento progressivo até 2000, se mantendo a partir sem mudanças bruscas. Para ambos, de 1984 até 1999 há uma pequena superioridade das captações significantes para as insignificantes, e então essa diferença diminui, se tornando em alguns momentos praticamente nulos – entre 2009 e 2020 para água superficial, e entre 2000 e 2004 para água subterrânea (Figura 25).



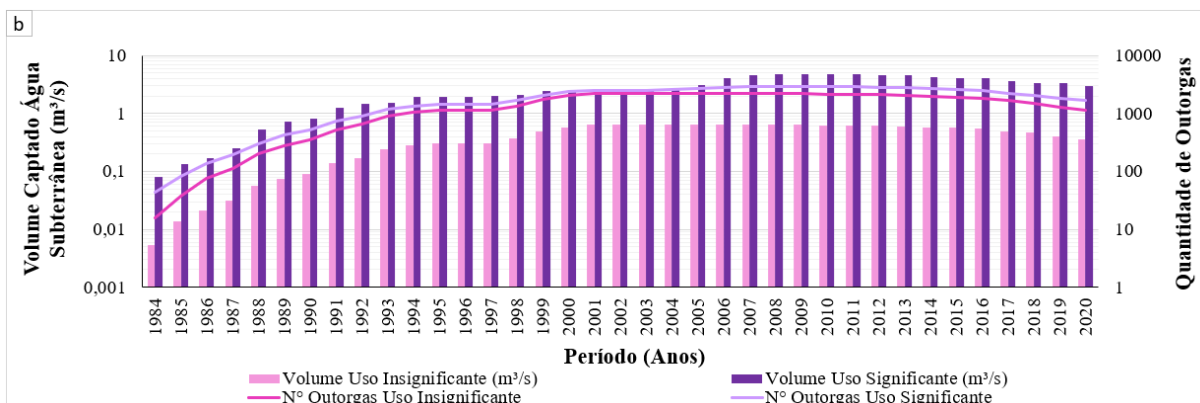


Figura 25 - Gráficos de vazão média anual e quantidade de outorgas, referente às captações na área de estudo, de água superficial (a) e água subterrânea (b), para uso insignificante (rosa) e uso significativo (roxo).

O crescimento abrupto da captação de água superficial para uso significativo de 1994 provém de uma série de novos poços outorgáveis provenientes da Copasa, no rio Paraopeba diretamente e em outros afluentes da bacia, distribuídos por toda a área, nos municípios de São Joaquim de Bicas, Rio Manso, Bonfim, Belo Vale, Congonhas, São Brás do Suaçuí e Entre Rios de Minas (Figura 26). O crescimento de 2015 para 2016 pode estar relacionado ao fato de a Copasa inaugurar o complexo de captação do rio em Brumadinho em dezembro de 2015 (Figura 26). A taxa de aumento foi de 4,36 m³/s, (de 0,282 m³/s em 2015 para 4,64 m³/s em 2016), o que condiz com a capacidade de captação de 5 m³/s do complexo.

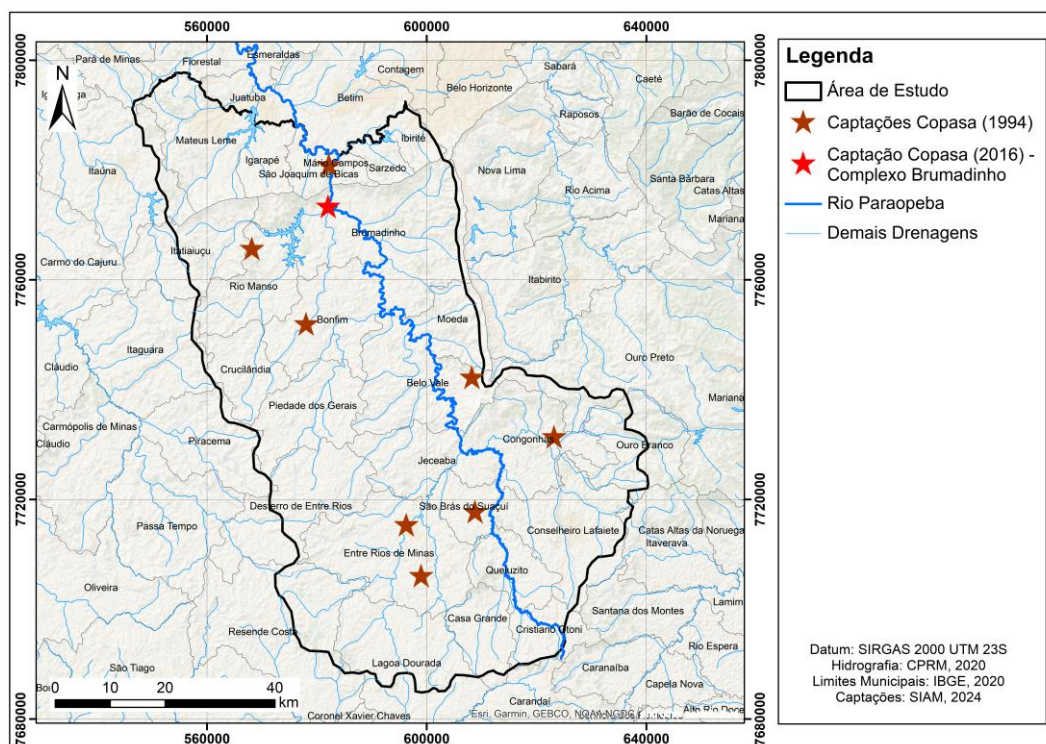


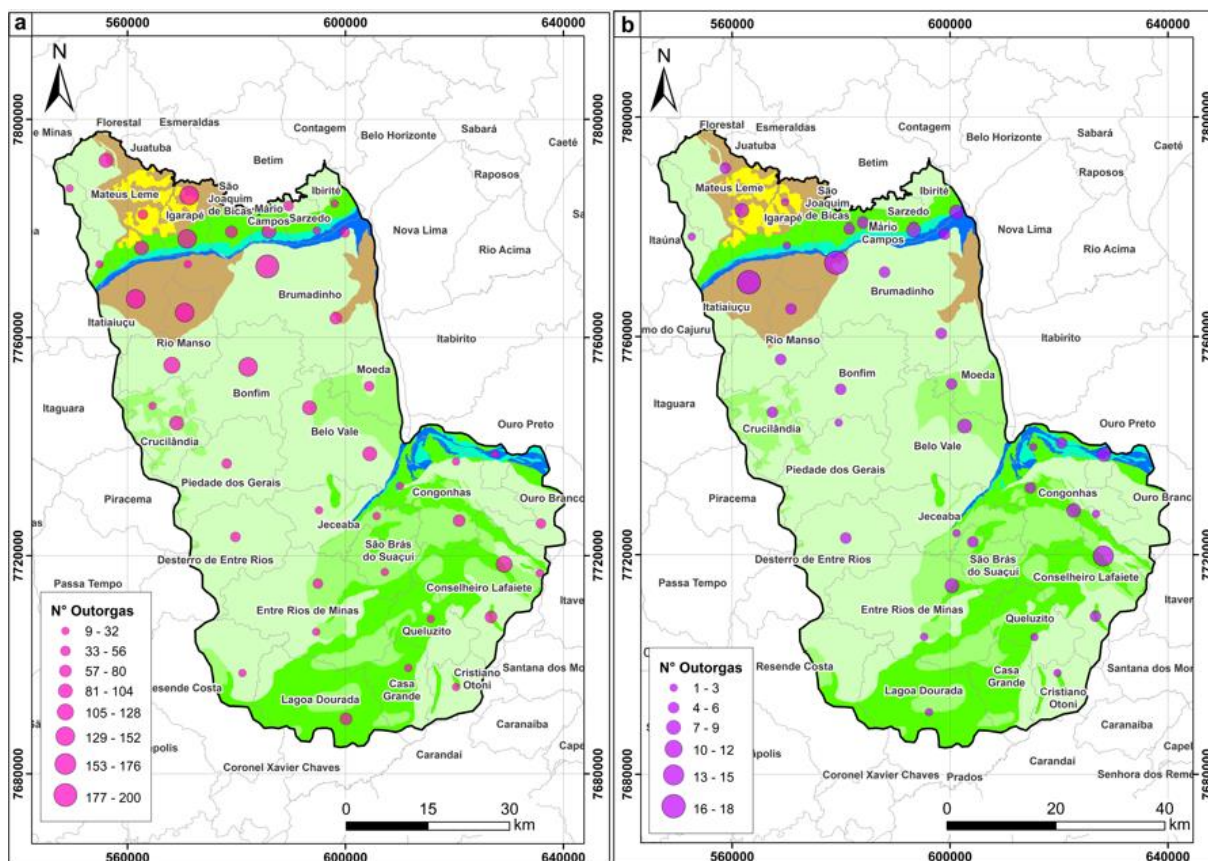
Figura 26 - Localização das captações da Copasa de Uso Superficial outorgadas no ano de 1994 (cor marrom) e no ano de 2016 (cor vermelha).

Para a avaliação das captações é importante compreender a dinâmica de distribuição das outorgas no período estudo em termos de localização geográfica, e também contexto hidrogeológico, pois faz toda a diferença na capacidade e potencial de retirada de água.

Através da Figura 27a é possível observar que as captações superficiais de uso insignificante possuem uma quantidade muito maior que para uso significativo (Figura 27b). Para ambos os usos na porção centro-oeste, nos locais onde há o predomínio do aquífero Embasamento (Piedade dos Gerais; Desterro de Entre Rios; Jeceaba) há menos captações (Figura 27).

As maiores concentrações são observadas nos municípios do entorno da Serra do Curral (Mateus Leme, Igarapé, São Joaquim de Bicas, Mário Campos, Brumadinho). Nesses locais, aonde se encontram os aquíferos Coberturas Sedimentares Estrada Real, Piracicaba, no conjunto Itabira/ Caraça (aquíferos Gandarela, Cauê e Moeda, e aquífero Batatal) há maior concentração de captações do que no aquífero Embasamento, ou seja, nas unidades mais produtivas de água. No município Brumadinho as captações estão por toda sua área, e há pequenas concentrações sobre as unidades aquíferas na sua borda superior e no contato entre o aquífero Embasamento e aquífero Rio das Velhas. Nos municípios de Itatiaiuçu e Rio Manso há uma quantidade alta de captações e também se observa uma preferência sobre o aquífero Rio das Velhas do que sobre o aquífero Embasamento (Figura 27).

Nos municípios ao sul da área (Lagoa Dourada, Casa Grande, Cristiano Ottoni, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Queluzito, São Brás do Suaçuí) as captações se concentram sobre o aquífero Estrada Real ou nas proximidades do contato entre esta unidade e o aquífero Suítes Intrusivas e/ou Embasamento. Nessa porção o município Conselheiro Lafaiete é o que possui maior concentração de captações. Por fim, em Ouro Preto é observado que os poços estão preferencialmente sobre o aquífero Piracicaba e conjunto Itabira/Caraça (Figura 27).



LEGENDA

Unidades Hidrogeológicas



 Área de Estudo

 Outorgas Insignificantes

 Outorgas Significantes

Datum: SIRGAS 2000 UTM 23S
 Limites Municipais: IBGE (2020)
 Outorgas: SIAM (2024)

Figura 27 - Mapas contendo todas as outorgas concedidas entre 1984 e 2020 de captação superficial, para uso insignificante (a) e significativa (b), de acordo com a distribuição geográfica (municípios) e hidrogeológica (unidades hidrogeológicas).

Ao realizar a contabilização da soma de vazão média captada por todas as outorgas concedidas em cada município, tem-se que para o uso insignificante os 10 municípios de maior volume captado (Tabela 13) estão diretamente relacionados às maiores concentrações de captações (Figura 27a).

Tabela 13 - Tabela contendo os valores somados da vazão média, para uso insignificante, do total de captações de água superficial concedidas em cada município entre 1984 e 2020, referentes aos 10 municípios da área de estudos com maior soma, dessa forma, maior vazão média de captação outorgada, em m³/s.

TOTAL DE VAZÃO MÉDIA DE CAPTAÇÃO (m³/s)	
Brumadinho	0,232
Igarapé	0,229
Rio Manso	0,199
Mateus Leme	0,174
Itaiaiuçu	0,106
Conselheiro Lafaiete	0,105
Bonfim	0,103
Belo Vale	0,102
Congonhas	0,085
Crucilândia	0,078

Já para o uso significativo, entre os municípios de maior volume médio de captação são observadas algumas exceções (Tabela 14): o município de Ouro Branco está em segundo lugar, mesmo tendo uma pequena quantidade de poços outorgáveis, e isso se deve ao fato de que uma captação sozinha possui vazão de 1 m³/s, pertencente à Gerdau Açominas S/A, empresa que atua neste município na produção de aço, detendo sua maior usina no mundo.

Os municípios de São Joaquim de Bicas e Entre Rios de Minas também possuem menor concentração de poços outorgáveis comparando com os demais (Figura 27b), porém estes municípios estão dentre os que tiveram captações da Copasa em 1994 (Figura 26), com capacidade média, respectivamente, de 0,11 m³/s e 0,053 m³/s (duas captações – uma de 0,04 m³/s e uma de 0,013 m³/s), o que pode explicar suas colocações entre os locais de maior volume de captação dentro da área (Tabela 14).

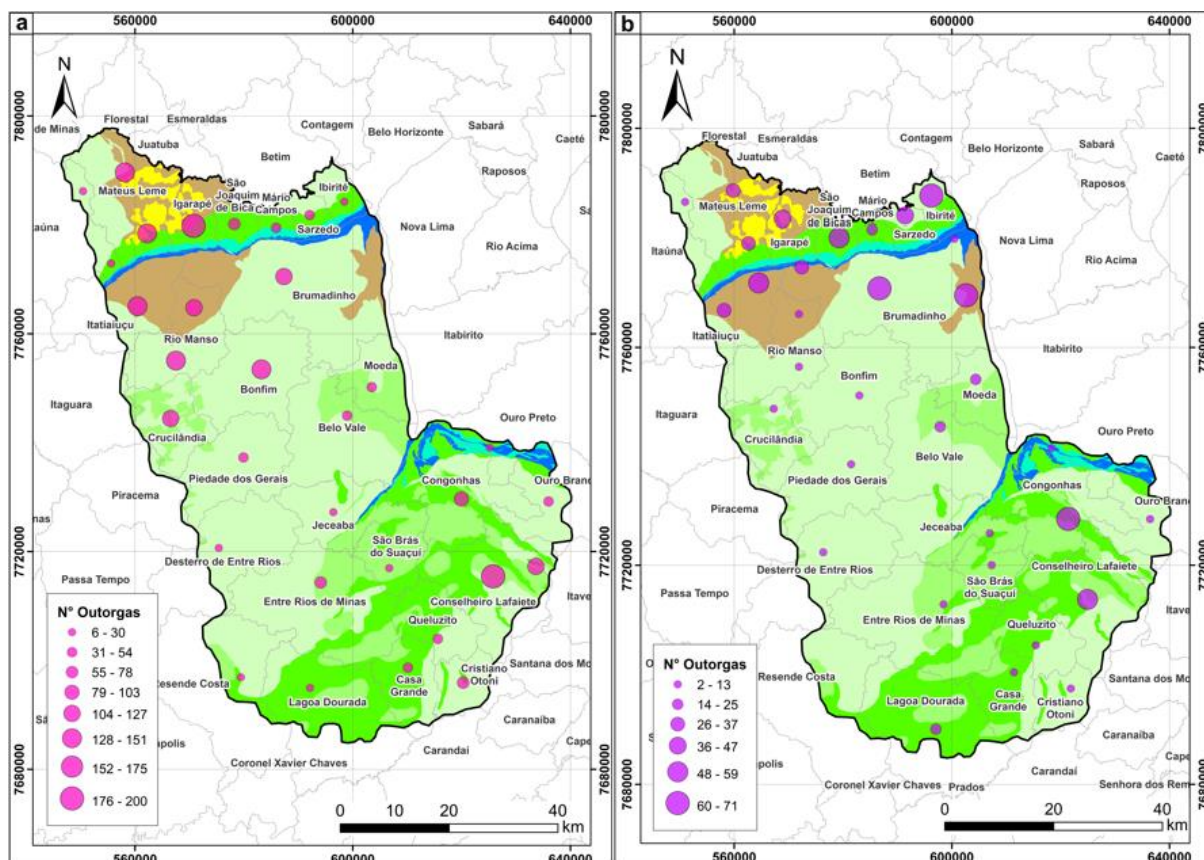
Tabela 14 - Tabela contendo os valores somados da vazão média, para uso significativo, do total de captações de água superficial concedidas em cada município entre 1984 e 2020, referentes aos 10 municípios da área de estudos com maior soma, dessa forma, maior vazão média de captação outorgada, em m³/s.

TOTAL DE VAZÃO MÉDIA DE CAPTAÇÃO (m³/s)	
Brumadinho	4,444
Ouro Branco	1,008
Ibirité	0,303
Belo Vale	0,166
Conselheiro Lafaiete	0,153
Ouro Preto	0,147
São Joaquim de Bicas	0,110
Itaiaiuçu	0,065
Entre Rios de Minas	0,055
Moeda	0,039

Em relação às captações subterrâneas destacam-se os municípios que circundam a Serra do Curral (Mateus Leme, Igarapé, São Joaquim de Bicas, Mário Campos, Brumadinho, Ibité), e os municípios a sudeste Congonhas e Conselheiro Lafaiete (Figura 28). Nos municípios ao norte estão as unidades hidrogeológicas mais potencias – as unidades aquíferas Moeda, Batatal, Cauê, Gandarela e Piracicaba, e os aquíferos Rio das Velhas e parte do Estrada Real.

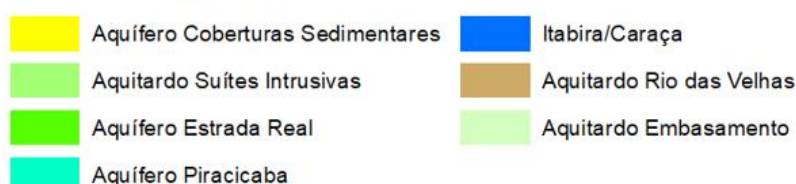
Em Brumadinho as outorgas se concentram no contato do aquífero Embasamento com o aquífero Rio das Velhas, e também nas unidades aquíferas presentes no limite superior do município. Já em Congonhas e Conselheiro Lafaiete o contexto hidrogeológico se dá pelos aquíferos Embasamento e Suítes Intrusivas intercalados com o aquífero Estrada Real, assim como nos municípios Lagoa Dourada, Casa Grande, Cristiano Ottoni, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Queluzito, São Brás do Suaçuí. Nesses locais os poços estão preferencialmente sobre o aquífero Estrada Real ou nos arredores do contato entre essa unidade e os aquíferos presentes (Figura 28).

Para o cadastro de uso insignificante a quantidade de captações é muito superior e distribuem-se geograficamente de maneira semelhante às de uso significativo, porém há uma concentração destacada também nos municípios de Itatiaiuçu e Rio Manso, inseridos no aquífero Rio das Velhas, e em Crucilândia, sobre o aquífero Suítes Intrusivas. Para ambas as utilizações, na porção centro-oeste e sudoeste, onde há somente o aquífero Embasamento, a quantidade de captações é consideravelmente menor (Figura 28).



LEGENDA

Unidades Hidrogeológicas



 Área de Estudo

 Outorgas Insignificantes

 Outorgas Significantes

Datum: SIRGAS 2000 UTM 23S
 Limites Municipais: IBGE (2020)
 Outorgas: SIAM (2024)

Figura 28 - Mapa contendo todas as outorgas concedidas entre 1984 e 2020 de captação subterrânea, para uso insignificante (a) e significativa (b), de acordo com a distribuição geográfica (municípios) e hidrogeológica (unidades hidrogeológicas).

Acerca da vazão média total de captação, para cadastro de uso insignificante, os 10 municípios de maior volume captado possuem relação direta com a quantidade de poços, exceto o município de Sarzedo, que está em oitavo lugar (Tabela 15), acima de Congonhas e Crucilândia, possuindo uma concentração menor de captações (Figura 28a). Neste local, a maioria das captações possuem destinação para cultivo de hortaliças, que é uma das bases de sua economia através principalmente de agricultura familiar (Vince, 2024).

Tabela 15 - Tabela contendo os valores somados da vazão média, para uso insignificante, do total de captações de água subterrânea concedidas em cada município entre 1984 e 2020, referentes aos 10 municípios da área de estudos com maior soma, dessa forma, maior vazão média de captação outorgada, em m³/s.

TOTAL DE VAZÃO MÉDIA DE CAPTAÇÃO (m³/s)	
Conselheiro Lafaiete	0,089
Mateus Leme	0,082
Rio Manso	0,053
Igarapé	0,051
Itaiaiuçu	0,045
Bonfim	0,042
Brumadinho	0,031
Sarzedo	0,025
Congonhas	0,024
Crucilândia	0,023

Para o uso significativo os municípios de maior volume de captação também coincidem com os de maior concentração de poços outorgáveis, com exceção de Ouro Preto (Figura 28b), que possui o segundo maior volume, atrás apenas de Itaiaiuçu (Tabela 16). As captações significantes de água subterrânea neste município dentro da área de estudo pertencem às empresas de mineração de ferro e produção de aço – Ferro+ Mineração S/A; Gerdau Açominas S/A; Vale S/A – por isso, possuem vazões altas, especialmente a empresa Vale, que detém a maior estrutura minerária no município.

Tabela 16 - Tabela contendo os valores somados de vazão média, para uso significativo, do total de captações de água subterrânea concedidas em cada município entre 1984 e 2020, referentes aos 10 municípios da área de estudos com maior soma, dessa forma, vazão média de captação outorgada, em m³/s.

TOTAL DE VAZÃO MÉDIA DE CAPTAÇÃO (m³/s)	
Itaiaiuçu	1,248
Ouro Preto	0,992
Congonhas	0,804
Brumadinho	0,746
Mateus Leme	0,255
Ibirité	0,115
Igarapé	0,092
São Joaquim de Bicas	0,085
Conselheiro Lafaiete	0,081
Sarzedo	0,072

Com o intuito de entender o contexto e as motivações que podem estar associadas a evolução e distribuição das captações na área vistas nas figuras e tabelas acima, foram utilizados os mapas da Coleção 9 da plataforma do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do

Solo no Brasil (MapBiomias), publicados em agosto de 2024, na qual estão apresentados os 38 anos (1985 a 2023) dos mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil (MAPBIOMAS, 2024).

Neste estudo foram aproveitados os mapas de 1985, pois é o primeiro ano de produção do projeto, e dos anos 1990, 2000, 2010 e 2020, enfocados apenas dentro do limite da área de estudo, para visualizar a evolução da cobertura e uso do solo na região (Figura 29).

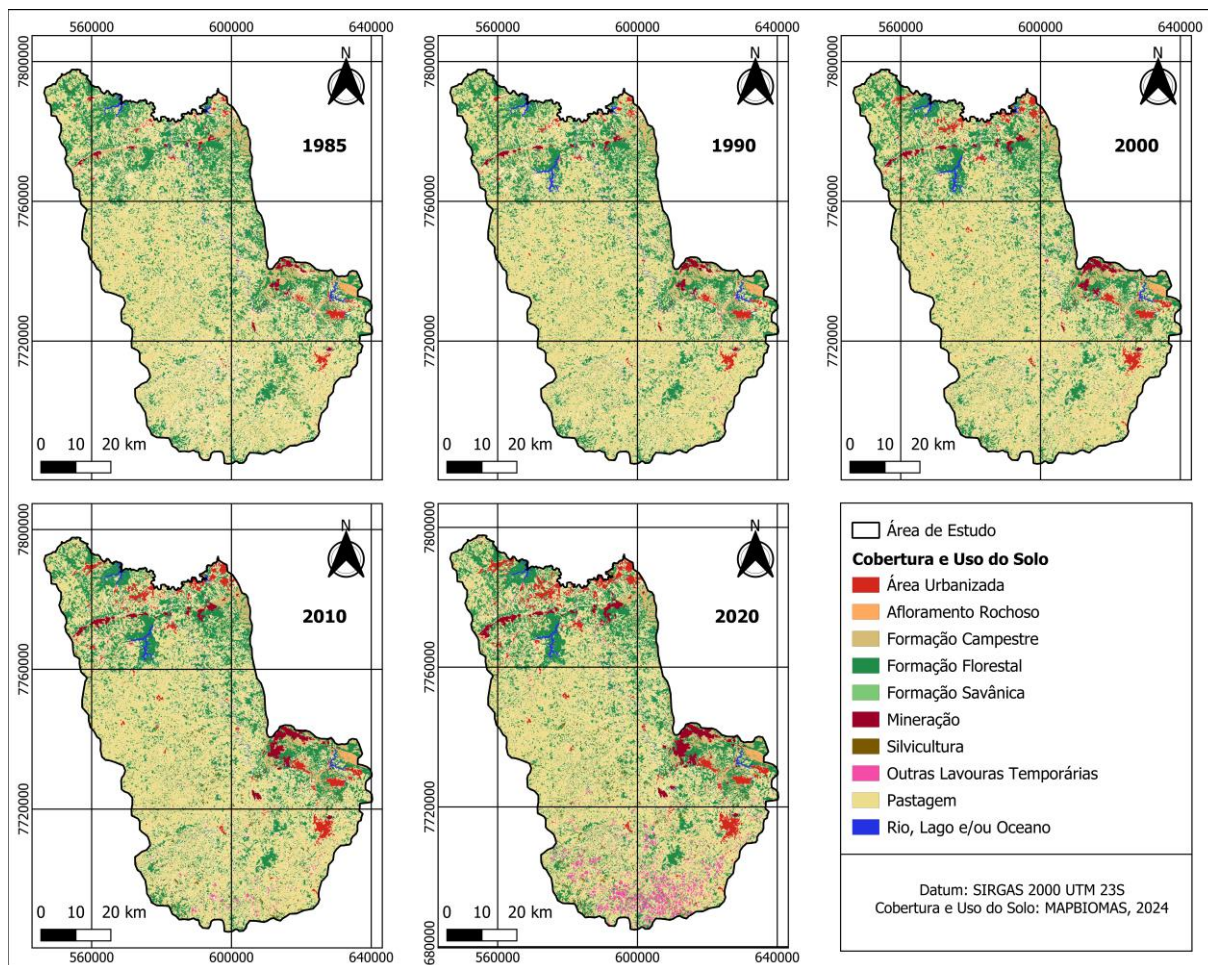


Figura 29 - Mapas de Cobertura e Uso do Solo na área de estudos nos anos 1985, 1990, 2000, 2010 e 2020 (Adaptado de MapBiomias, 2024).

Na análise visual, as mudanças mais perceptíveis são acerca das classes área urbanizada e mineração nas áreas próximas à Serra do Curral e na borda sudeste da área, na região de Ouro Preto, Congonhas e Conselheiro Lafaiete. No município de Ouro Preto se encontram pilhas de rejeitos/estéril de empreendimentos minerários, e em Congonhas e Belo Vale, que também apresentaram aumento da classe de mineração, também existem diversos empreendimentos minerários licenciados e vêm apresentando crescimento das atividades econômicas nos últimos anos (SISEMA, 2021 apud Soares, 2021; Soares, 2021).

Em relação aos municípios ao norte da área (Igarapé, São Joaquim de Bicas, Mário Campos, Sarzedo, Ibirité, Brumadinho), que circundam a Serra do Curral, as atividades relacionadas com mineração são as mais expressivas. Algumas áreas dessa região estão inseridas no Quadrilátero Ferrífero, com jazidas de minerais, sobretudo o ferro. Ademais, estão localizados vários municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte, possuindo uma rica diversidade industrial, por exemplo, nos ramos metalúrgico, automobilístico e petroquímico, além do setor de infraestrutura, como empreendimentos para a produção de energia elétrica, loteamentos, estações de tratamento de esgoto, canais para drenagem e aterros sanitários. A mineração de ferro também está presente nessa região, sobretudo nas serras de Itatiaiuçu, que ainda pertencem ao Quadrilátero Ferrífero, possuindo expressivas minerações (Soares, 2021).

Na porção sul/sudoeste é destacado o aumento de agricultura (Lavouras) – Entre Rios de Minas, Casa Grande, Lagoa Dourada, Cristiano Ottoni – especialmente a partir de 2010, e na porção centro-oeste vê-se um aumento gradual de pastagem substituindo formação florestal e formação savânica. Nesses locais, conforme já observado e avaliado, há menor concentração de captações. Ainda assim, trata-se de uma atividade econômica que demanda uma grande quantidade de água, o que pode explicar o alto volume de captação superficial observado em Entre Rios de Minas (Tabela 14). De acordo com o *The Nature Conservancy* a demanda hídrica pela agricultura é crescente em função da expansão de sistemas de irrigação por pivôs centrais utilizados para a produção de commodities agrícolas (Stein, 2024).

7.4 Avaliação de Impactos

Através da análise correlacionada de todos os parâmetros é possível visualizar os impactos na vazão da bacia hidrográfica do rio Paraopeba na área de estudos. A análise fluviométrica mostrou que a vazão do rio tem diminuído ao longo dos últimos 50 anos até 2020. Além disso, os estudos mostraram que a área está sofrendo uma redução de pluviometria (-92,65mm), ao passo que as temperaturas médias, e principalmente, mínimas tem aumentado (+1,38°C e +2,44°C).

Diante disso, ao avaliar em conjunto o comportamento pluviométrico e fluviométrico percebe-se uma relação direta entre a quantidade de precipitação e o volume do rio durante todo o período de tempo, atestando o impacto natural sobre a vazão do rio, pois observa-se que esse aumento de temperatura contribui para o menor volume de chuvas, e consecutivamente, há menor disponibilidade de água do meio ambiente, afetando assim, o excedente hídrico, que,

como foi atestado, está diminuindo progressivamente, enquanto o déficit hídrico tem aumentado cada vez mais, conforme apontado pelo balanço hídrico climatológico.

Isso fica mais evidente com os resultados obtidos de índices de aridez, os quais apresentaram para toda a área um aumento do potencial de desertificação, especialmente nas últimas duas décadas, a partir de 2000.

Para além dos fatores ambientais que influenciam no decaimento da vazão da bacia, como se sabe, trata-se de uma importante fonte de abastecimento hídrico, principalmente na porção da região metropolitana de Belo Horizonte, além de ser um recurso sustentador de diferentes setores da economia.

Por isso, como foi visto, a área possui intensa presença de captações, superficiais e subterrâneas, e uma maneira de conseguir visualizar a dimensão do seu impacto na vazão da bacia é através da avaliação do volume captado, superficial e subterrâneo, com o volume de excedente hídrico, o qual, podendo também ser chamado de escoamento total, representa a soma do escoamento superficial e subterrâneo.

Essa análise, assim, como o balanço hídrico climatológico, foi separada por décadas, salientando-se que, como os dados de outorgas se iniciam no ano de 1984, as décadas comparadas foram 1980-1990, 1990-2000, 2000-2010 e 2010-2020, sendo a primeira iniciada em 1984. Dessa forma, os valores de excedente hídrico (EXC), em mm, para cada estação pluviométrica estão apresentados a seguir.

Tabela 17 - Tabela com valores de excedente hídrico para cada estação pluviométrica, separado por décadas.

CARANDÁ		CONSELHEIRO LAFAIETE		ENTRE RIOS DE MINAS		FAZENDA CAMPO GRANDE	
Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)
1980-1990*	521,22	1980-1990*	260,13	1980-1990*	257,49	1980-1990*	540,23
1990-2000	513,51	1990-2000	452,34	1990-2000	456,89	1990-2000	613,20
2000-2010	586,31	2000-2010	565,02	2000-2010	509,81	2000-2010	550,76
2010-2020	560,23	2010-2020	390,47	2010-2020	315,84	2010-2020	420,87
ITABIRITO LINÍGRAFO		MELO FRANCO		PONTE NOVA DO PARAÓPEBA		RESENDE COSTA	
Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)
1980-1990*	445,39	1980-1990*	360,60	1980-1990*	582,96	1980-1990*	524,27
1990-2000	560,22	1990-2000	438,36	1990-2000	565,32	1990-2000	555,33
2000-2010	483,16	2000-2010	441,79	2000-2010	452,04	2000-2010	561,12
2010-2020	411,28	2010-2020	320,49	2010-2020	410,71	2010-2020	432,95

* Os dados década 1980-1990 iniciam em 1984

Deve-se levar em conta a porcentagem da área de influência obtida pelo Método de Thiessen (1911) de cada estação pluviométrica utilizada na aplicação do Método de Thornthwaite e Mather (1955), pois como os dados de pluviometria fazem parte da metodologia que gera os resultados de excedente hídrico, levando em conta as áreas de influência, a avaliação

é mais fidedigna com o comportamento real para área de estudos em sua totalidade espacial (Tabela 18).

Tabela 18 - Tabela com valores de excedente hídrico para cada estação pluviométrica, separado por décadas, de acordo com as respectivas áreas de influência dos polígonos de Thiessen gerados.

CARANDAÍ (4,0%)		CONSELHEIRO LAFAIETE (14,0%)		ENTRE RIOS DE MINAS (25,0%)		FAZENDA CAMPO GRANDE (7,5%)	
Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)
1980-1990*	20,85	1980-1990*	36,42	1980-1990*	64,37	1980-1990*	40,52
1990-2000	20,54	1990-2000	63,33	1990-2000	114,22	1990-2000	45,99
2000-2010	23,45	2000-2010	79,10	2000-2010	127,45	2000-2010	41,31
2010-2020	22,41	2010-2020	54,67	2010-2020	78,96	2010-2020	31,57
ITABIRITO LINÍGRAFO (3,5%)		MELO FRANCO (30,3%)		PONTE NOVA DO PARAPEBA (10,3%)		RESENDE COSTA (5,4%)	
Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)	Décadas	EXC (mm)
1980-1990*	15,59	1980-1990*	109,26	1980-1990*	60,04	1980-1990*	28,31
1990-2000	19,61	1990-2000	132,82	1990-2000	58,23	1990-2000	29,99
2000-2010	16,91	2000-2010	133,86	2000-2010	46,56	2000-2010	30,30
2010-2020	14,39	2010-2020	97,11	2010-2020	42,30	2010-2020	23,38

* Os dados década 1980-1990 iniciam em 1984

A partir desses valores de excedente hídrico, devidamente convertidos para m³/s (conforme explicitado no item 6.4), e com os valores de volume captado, superficial e subterrâneo, tem-se que para década mais recente, a partir de 2010, o volume de retirada de água está superior ao excedente hídrico na área de estudos (Tabela 19).

Tabela 19 - Tabela com valores correlacionados do volume de excedente hídrico e volume captado na área de estudo, por década.

Décadas	Excedente Hídrico (m ³ /s)	Volume Captado (Superficial + Subterrâneo) (m ³ /s)	Saldo (Excedente - Volume Captado)	Correlação
1980-1990*	68,16	3,15	+ 65,02 m ³ /s	EXC > (Vsup+Vsub)
1990-2000	87,98	23,56	+ 64,42 m ³ /s	EXC > (Vsup+Vsub)
2000-2010	90,52	50,16	+ 40,36 m ³ /s	EXC > (Vsup+Vsub)
2010-2020	66,16	83,67	- 17,50 m ³ /s	EXC < (Vsup+Vsub)

* Os dados década 1980-1990 iniciam em 1984

Fica evidente que na região de estudo houve uma crescente na captação de água, em uma taxa maior a cada década, de tal forma que de 2010 a 2020 o volume de água retirada se torna superior ao excedente hídrico disponível. Isso significa que começou a haver a superexploração do rio Paraopeba, causando um impacto antrópico significativo na vazão do rio, provocado pelo grande volume de captação subterrânea e superficial na área, extraindo mais água do que o rio tem capacidade de manter e recuperar.

Com isso, caso essa realidade se perpetue, a tendência é que a bacia hidrográfica caminhe para a escassez de recursos hídricos para a população, fauna e flora circundantes, que utilizam desse recurso cotidianamente para sobrevivência e manutenção do meio ambiente.

Além disso, as unidades aquíferas da área estarão cada vez mais sobrecarregadas, sendo também impactadas negativamente, comprometendo seu funcionamento, tendo em vista as suas capacidades de recuperação no tempo, comparadas com a velocidade e quantidade de água retirada hoje, desde um passado recente, de pelo menos 10 anos, e para o futuro.

8 CONCLUSÕES

A partir da avaliação integrada de diversos parâmetros referentes às características ambientais, geológicas, climáticas, hidrogeológicas, e de uso e captação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraopeba na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, foi possível atestar e avaliar os impactos naturais e antrópicos em sua vazão através do tempo, até os dias de hoje.

Foi verificado que ao longo do período analisado houve um decréscimo na precipitação, acompanhada do aumento nas temperaturas médias e mínimas na área. Assim, o comportamento pluviométrico da região, influenciado pela temperatura, mostrou influir na vazão do rio Paraopeba, evidenciando o impacto que a presença/ ausência de chuvas causa na quantidade de água disponível no rio, e na bacia.

Ademais, os resultados do balanço hídrico mostraram que a área está diminuindo sua disponibilidade de água ao longo do tempo. Somado ao fato de que a região está ficando cada vez mais quente, com o aumento contínuo das temperaturas mínimas, a área está também experimentando uma intensificação de seu potencial de aridez, que se agrava da montante para jusante do rio. Essa tendência não se restringe à área do presente estudo, sendo corroborada por outras pesquisas, conforme visto anteriormente, as quais apontam que toda a região Sudeste está sofrendo com o aumento das temperaturas e potencial de desertificação.

A correlação das outorgas com os municípios e unidades hidrogeológicas nas quais estão inseridas revela que a retirada de água está concentrada nas localidades com maior potencial de recursos hídricos, que são nas unidades aquíferas presentes na área, além, também, de se destacarem os municípios mais próximos à Grande Belo Horizonte e região metropolitana, onde a bacia hidrográfica é fundamental para abastecimento da população, assim como municípios de maior atividade minerária, como Ouro Preto, Brumadinho, e seus arredores. Com os valores obtidos de excedente hídrico constatou-se que há um grande impacto antrópico na vazão da bacia, advinda tanto da captação superficial quanto subterrânea.

Tomando conhecimento de tudo o que foi dito acima, fica evidente que tanto os fatores naturais quanto os antrópicos estão convergindo para a escassez de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba. Enquanto as temperaturas e o índice de aridez aumentam e o excedente hídrico diminui, as captações de água continuam a se intensificar. Para a situação atual da bacia hidrográfica nessa região faz-se necessário intensificar os estudos para promover um melhor aproveitamento dos recursos e minimizar os danos à bacia.

Recomenda-se realizar a quantificação dos impactos antrópicos na vazão da área de estudos, para que seja possível avaliar o impacto real das captações de água superficial e subterrânea, de maneira individualizada e consistente estatística e matematicamente. Para que isso seja feito é recomendado o monitoramento sistematizado dos recursos hídricos da bacia do rio Paraopeba. Isso possibilitará a aplicação das metodologias de análise de cone de depressão, modelagem numérica e dinâmica de fluxo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANAMENTO BÁSICO – ANA. **ATLAS IRRIGAÇÃO: uso da água na agricultura irrigada - 2. ed.** 2021. Disponível em: <<https://atlasirrigacao.ana.gov.br/>>. Acesso em: 04 jun. 2024.

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research** **90**, n. 1-2, p. 29-58, jun. 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926898000321>>. Acesso em: 05 fev. 2024.

ALKMIN, F. F.; NOCE, C. M. Outline of the Geology of the Quadrilátero Ferrífero, p. 37-45. *In*: Alkmim, F.F. and Noce, C.M. (eds.) 2006. The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. **IGCP 509 Field workshop, Bahia and Minas Gerais, Brazil**. Field Guide & Abstracts, 114 p.

ALMEIDA, F. F. M., de. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977. Disponível em: <<https://doi.org/10.25249/0375-7536.1977349364>>. Acesso em: 16 out. 2024.

ALMEIDA, L. G.; ENDO, I.; FONSECA, M. A. Sistema de nappes na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG. *In*: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41. **Anais**. Recife, 1978. p. 615.

ALMEIDA, L. G. **Evolução Tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

AMARAL, D. G. P. **Análise do Comportamento e Desempenho Hídrico das Depressões Cársticas da Região da Apa Carste Lagoa Santa (MG)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ANDRADE, C. W. L. de; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. de A.; LIMA, J. R. de S. Análise de consistência de dados de precipitação na bacia hidrográfica do Rio Mundaú, Nordeste do Brasil. *In*: XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. **Anais**. Maceió, Alagoas, 2018. 9p.

ANDRADE, I., B. **Modelo Hidrogeológico de Fluxo do Flanco Oeste do Sinclinal Moeda: Passado, Presente e Futuro do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero – Minas**

Gerais, Brasil. 2023. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

BAPTISTA, M. C.; SILVA, S. F.; DANTAS, M. E.; DUARTE, K. da S.; ALMEIDA, B. F. de; MURICY FILHO, A. de F.; COUTINHO, C. I.; PEDROSA, L. Aspectos gerais do meio físico. *In*: MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. da. Geodiversidade do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: **CPRM**, 2010. p. 17- 34.

BEATO, D. A. C.; MONSORES, A. L. M.; BERTACHINNI, A. C. Hidrogeologia. *In*: **Projeto Apa Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de Proteção Ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte.** Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005. v.6 116p.

BEATO, D. A. C.; MONSORES, A. L. M.; BERTACHINNI, A. C. Potencial Aquífero nos Metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero – Região da Apa Sul RMBH – MG. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2006. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23106>>. Acesso em: 14 jul. 2024.

BEZERRA, D. P. **Quadrilátero ferrífero MG: fatores condicionantes do relevo.** 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CARNEIRO, M. A.; NOCE, C. M.; TEIXEIRA, W. Evolução policíclica do Quadrilátero Ferrífero: uma análise fundamentada no conhecimento atual da geocronologia U-Pb e Geoquímica isotópica Sm- Nd. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 48, n. 4, p. 264-273, 1995. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/directbitstream/533726dd-e3cd-41d5-84ed-44ce1acc3af5/2166985.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

CARNEIRO, M. A.; OLIVEIRA, A. H. Tectonic evolution of southern São Francisco Craton: Three tectonothermal events based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic data. *In*: Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, III. **Anais [...]**, Salvador, p.200-203, 2005.

CARVALHO, A. de. **Processos morfogenéticos e condicionantes associados aos eventos de entulhamento dos fundos de Vales de afluentes do médio/baixo rio Paraopeba/MG.** Dissertação (Mestrado em Geografia) -Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CASTRO, E. C. C.; FERREIRA, J. E. **Aspectos estratigráficos, sedimentares e estruturais dos sedimentos cenozóicos da borda leste do Quadrilátero Ferrífero entre Santa Rita Durão e Fonseca, Minas Gerais.** 1997. Trabalho Final de Graduação (Bacharel em Engenharia Geológica) - Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1997.

CASTRO, E. C. C.; FERREIRA, J. E.; CASTRO, P. T. A. Formação Cata Preta: uma nova unidade estratigráfica definida em rochas cenozóicas no extremo leste do Quadrilátero Ferrífero - MG. *In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Anais do XL Congr. Bras. de Geol.* Belo Horizonte, p. 82-82, 1998.

CASTRO, C. N. D.; PEREIRA, C. N. Revitalização do Rio São Francisco. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA)*. p. 69–76, 2017.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS – CEMADEN/MCTI. **Seminário no Cemaden discute secas e degradação de terra:** 122 municípios da região Sudeste apresentam áreas suscetíveis à desertificação. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/seminario-no-cemaden-discute-secas-e-degradacao-de-terra-122-municipios-do-sudeste-estao-com-areas-susceptiveis-a-desertificacao>>. Acesso em: 17 dez. 2024.

CHEMALE JR, F.; ROSIÈRE, C. A.; ENDO, I. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Prec. Res.**, v. 65, p. 25-54, 1994.

CHIERICE JR, N.; LANDIM, P. M. B. Análise da chuva e vazão na bacia hidrográfica do Rio Pardo. **Geociências (UNESP)**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 244–260, 2014.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO – CBHSF. **CBH Rio das Velhas.** A Bacia do Velhas e as preocupações que a tragédia em Brumadinho levantou há cinco anos. 2024a. Disponível em: <<https://cbhvelhas.org.br/novidades/a-bacia-do-velhas-e-as-preocupacoes-que-a-tragedia-em-brumadinho-levantou-ha-cinco-anos/>>. Acesso em: 12 maio 2024.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO – CBHSF. **CBH do Rio Paraopeba (SF3) – MINAS GERAIS.** 2024b. Disponível em: <<https://cbhsaofrancisco.org.br/comites-de-afluentes/cbh-do-rio-paraopeba-sf3-minas-gerais/>>. Acesso em: 12 maio 2024.

COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS - COBRAPE. **Relatório do Diagnóstico da Bacia do Rio Paraopeba.** 2018. Disponível em: <<https://www.pdrhparaopeba.com>>.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS - CODEMIG. **Portal da Geologia.** 2019. Disponível em: <www.portalgeologia.com.br>. Acesso em: 25 jul. 2024.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS - COPASA. **Release de Resultados 1T20.** Belo Horizonte: 2020.

CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K.; MULLER, G.; QUADE, H.; REIMER, V., ROESER, H. 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento na borda sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 4, p. 785-799, 1980.

DERBY, O., A. The Serra do Espinhaço, Brazil. **The Journal of Geology**, v. 14, n. 5, p. 374-401, 1906. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/30059386>>. Acesso em: 14 mar. 2024.

DORR J. V. N. II. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Washington, DC: US Geological Survey, 1969. 110 p. (*USGS Professional Paper*, 641-A). Disponível em: <<https://doi.org/10.3133/pp641A>>.

ENDO, I. **Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais**. 1997. Tese (Doutoramento em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

ENDO, I.; MACHADO, R. The geology architecture of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais – Brasil) after multiple transpressional and transtensional tectonic events. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BASEMENT TECTONICS*, 14. **Anais**. Ouro Preto, IBTA/UFOP, p. 126-127, 1998.

ENDO, I.; GALBIATTI, H. F.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F.; ZAPPAROLI, A. C.; MOURA, L. G. B.; PERES, G. G.; OLIVEIRA, A. H.; ZAVAGLIA, G.; DANDERFER, F. A.; GOMES, C. J. S.; CARNEIRO, M. A.; NALINI JR, H. A.; CASTRO, P. T. A.; SUITA, M. T. F.; TAZAVA, E.; LANA, C. C.; MARTINS-NETO, M. A.; MARTINS, M. S.; FERREIRA, F. F. A.; FRANCO, A. P.; ALMEIDA, L. G.; ROSSI, D. Q.; ANGELI, G.; MADEIRA, T. J. A.; PIASSA, L. R. A.; MARIANO, D. F.; CARLOS, D. U. **Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. Ouro Preto: Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, 2019a. Escala 1:150.000.

ENDO, I.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F.; ZAPPAROLI, A. C.; CARLOS, D. U.; GALBIATTI, H. F.; CASTRO, P. T. A.; SUITA, M. T. F.; BARBOSA, M. S. C.; LANA, C. E.; MOURA, L. G. B. **Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**.

Ouro Preto: Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, 2019b. Escala 1:150.000.

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

ESPINOZA, J. C.; MARENGO, J. A.; RONCHAIL, J.; MOLINA, J.; NORIEGA, L.; GUYOT, J.L. The Extreme 2014 Flood in South-Western Amazon Basin: The Role of Tropical-Subtropical South Atlantic SST Gradient. **Environmental Research Letters**, v. 9, 2014. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124007>>.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: LABHID, 2008. 812 p.

FÉLIX, T. Entenda como enchentes no Rio Grande do Sul e seca no Pantanal podem estar relacionadas. **CNN Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/entenda-como-enchentes-no-rio-grande-do-sul-e-seca-no-pantanal-podem-estar-relacionadas/>> Acesso em: 11 dez. 2024.

FISHER, R. A. **Statistical Methods for Research Workers**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925.

FIÚZA, P. Três anos após acordo, rede de captação do Paraopeba segue sem prazo de entrega pela Vale. **Portal g1**, 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/08/18/tres-anos-apos-acordo-rede-de-captacao-do-paraopeba-segue-sem-prazo-de-entrega-pela-vale.ghtml>>. Acesso em: 02 out. 2024.

GORCEIX, C. H. Bacias Terciárias d'água doce nos arredores de Ouro Preto (Gandarela e Fonseca), Minas Gerais, Brazil. **Anais da Escola de Minas de Ouro Preto**, Ouro Preto, v. 3, p. 75-92, 1884.

HARDER, E. C.; CHAMBERLIN, R.T. The geology of Central Minas Gerais. **The Journal of Geology**, v. 23, n. 5, p. 385-424, 1915. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/pdf/30066336.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2024.

HERZ, N. **Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Washington, DC: US Geological Survey, 1970. 58 p. (*USGS Professional Paper*, 641-B). Disponível em: <<https://doi.org/10.3133/pp641B>>.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Identificação de municípios com condição crítica para a qualidade de água na bacia do rio Paraopeba.** Belo Horizonte: Igam, 2013.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba:** RF01: Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba - SF3. Belo Horizonte: Igam, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas.** *Biblioteca IBGE. 1:* 3–10. Rio de Janeiro: 1990. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv2269_1.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Banco de Dados Meteorológicos.** 2024a. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 23 jul. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Normais Climatológicas.** 2024b. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 05 nov. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE & CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC. **Condições Atuais do ENOS: Neutralidade; Últimas Ocorrências.** 2024. Disponível em: <<https://www.enos.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 02 out. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA – IPAM. **Quais serão os impactos prováveis destas mudanças no nível global?** 2024. Disponível em: <<https://ipam.org.br/entenda/quais-serao-os-impactos-provaveis-destas-mudancas-no-nivel-global/>>. Acesso em 17 dez. 2024.

KOPPEN, W. Das geographische System der Klimate. *In:* W. Koppen & R. Geiger (Eds.), **Handbuch der Klimatologie.** Gebruder Borntrager, 1936.

LADEIRA, E. A. **Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** 1980. Tese (PósDoutorado em Geologia) - University of Western Ontario, Ontario, 1980. 272p.

LEE, H.; CHAN, Z.; GRAYLEE, K.; KAJENTHIRA, A.; MARTÍNEZ, D.; ROMAN, A. Challenge and response in the São Francisco River Basin. **Water Policy**, v. 16, n. S1, p. 153–200, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/wp.2014.007>>.

MACHADO, N.; NOCE, C. M.; OLIVEIRA, O. A. B. de; LADEIRA, E. A. Evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozóico Inferior, com base em geocronologia U-Pb. *In: SIMPÓSIO GEOLOGIA MINAS GERAIS 5 E SIMPÓSIO GEOLOGIA BRASÍLIA 1. Anais [...]* Belo Horizonte, SBG/NMG. p.1-5, 1989.

MACHADO, N.; NOCE, C. M.; LADEIRA, E. A.; OLIVEIRA, O. A. B. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco craton, Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v. 104, n. 9, p. 1221-1227, 1992.

MACHADO, M. M. M. **Construindo a imagem geológica do Quadrilátero Ferrífero: conceitos e representações**. 256f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MAGALHÃES, C., C., de C. **Modelo Hidrogeológico de Fluxo do Flanco Leste do Sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero – MG): caracterização, impactos e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê**. 2023. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

MAPBIOMAS. **Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias)**. 2024. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 4 dez. 2024.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2016.

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

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F. dos; REBOITA, M. S. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN E DE THORNTHWAITE PARA MINAS GERAIS: CENÁRIO ATUAL E PROJEÇÕES FUTURAS. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 1, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>>. Acesso em: 23 out. 2024.

MEDINA, A. I. M.; DANTAS, M. E.; SAADI, A. Geomorfologia. *In: Projeto Apa Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de Proteção Ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte*. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005. v. 6. 116p.

MILLER, J. A. **Ground Water Atlas of the United States 2000**. Ground Water Atlas of the United States: introduction and national summary. US Geological Survey. 1999. 15p. (*Hydrologic Atlas 730-A*). Disponível em: <<https://doi.org/10.3133/ha730>>.

MINAS GERAIS. **Portaria do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) n° 48, de 04 de outubro de 2019**. Estabelece normas suplementares para a regularização dos recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Disponível em: <<https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49719>>. Acesso em: 14 out. 2024.

MOURÃO, M. A. A. **Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2007. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

NETO, W. P.; DE PAULA, R. S.; GALVÃO, P. H. F. Karst Hydrological Connections of Lakes and Neoproterozoic Hydrogeological System between the Years 1985–2020, Lagoa Santa—Minas Gerais, Brazil. **Water**, v. 16, n.18, 28p, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w16182591>.

O GLOBO. 11 estados enfrentam enchentes e alagamentos neste começo de ano. **Revista Exame**. 2022. Disponível em: <<https://exame.com/brasil/11-estados-enfrentam-enchentes-e-alagamentos-neste-comeco-de-ano/>>. Acesso em: 11 dez. 2024.

OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. A. S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1186–1192, 2008.

PARANAIBA, G. Captação de água no Rio Paraopeba é inaugurada. **Estado de Minas**, 2015. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/12/21/interna_gerais,719259/captacao-de-agua-no-rio-paraopeba-e-inaugurada.shtml>. Acesso em: 02 out. 2024.

PARREIRAS, M. Rio Paraopeba terá nova captação em dezembro, informa Ministério Público. **Estado de Minas**, 2023. Disponível em: <<https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2023/08/15/internagerais,1546025/rio-paraopeba-tera-nova-captacao-em-dezembro-informa-ministeriopublico.shtml>>. Acesso em: 02 out. 2024.

PEARSON, K. Mathematical Contributions to the Theory of Evolution. III. Regression, Heredity, and Panmixia. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, v. 187, p. 253–318, 1896. DOI: 10.1098/rsta.1896.0007.

RAPOSO, F. O. Estratigrafia, Petrografia e Petrologia. *In*: RAPOSO, F. O. (Ed.). **Rio Espera, Folha SF.23-X-B-IV, Estado de Minas Gerais**. Brasília: DNPM-CPRM (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil — PLGB), p. 27-88,1991.

REBOUÇAS, A. C. Sistema aquífero Botucatu no Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8. **Anais[...]**. Recife, ABAS/DNPM/CPRM, p. 500-509, 1994.

RICCOMINI, C. Geologia regional do quadrilátero ferrífero (MG, Brasil): uma tentativa de síntese e novas idéias. **Anais**. Salvador: SBG, p. 199-213, 1982. Disponível em: <http://www.sbgeo.org.br/home/pages/44>. Acesso em: 03 dez. 2024.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p.133-137, 1998.

ROMANO, A. W. **Evolution Tectonique de la region nord-ouest du Quadrilatère Ferrifère - Minas Gerais - Brésil**. 1989. Tese (Pós-Doutorado em Geologia) - Université de Nancy I, Nancy, 1989. 259p.

SALGADO, A. A. R. **Estudo da evolução do relevo do Quadrilátero Ferrífero, MG–Brasil, através da quantificação dos processos erosivos e denudacionais**. 2006. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

SANT’ANNA, L. G. **Mineralogia das argilas e evolução geológica da Bacia de Fonseca, Minas Gerais**. 1994. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

SCHORSCHER, H. D. Komatiitos na estrutura Greenstone Belt Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *In*: Congr. Bras.. Geol., 30. **Resumo das Comunicações**, Recife, p. 292–293, 1978.

SCHORSCHER, H. D. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento Arqueano do Quadrilátero Ferrífero. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 51, p. 766-768, 1979.

SCHORSCHER, H. D.; CARBONARI, F. S.; POLONIA, J. C.; MOREIRA, J. M. P. Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais State: Rio das Velhas Greenstone Belt and Proterozoic Rocks. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARCHEAN AND EARLY PROTEROZOIC CRUSTAL EVOLUTION AND METALLOGENESIS - ISAP - **Excursion Guide (Annex.)**. CPM-SME. Salvador, Bahia, 46 p, 1982.

SILVA, A. M.; CHEMALE JR., F.; KUYJIMIAN, R.; HEAMAN, L. Mafic dyke swams of the Qaudrilátero Ferrífero and Espinhaço range, MG, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, 25, p. 124-137, 1995.

SILVA, M. A.; PINTO, C. P.; PINHEIRO, M. A. P.; MARINHO, M. S.; LOMBELLO, J. C.; PINHO, J. M. M. P.; GOULART, L. E. A; MAGALHÃES, J. R. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2020. 1 mapa, color. Escala 1:1.000.000.

SIMMONS, G. C.; MAXWELL, C. H. Grupo Tamanduá da Serie Rio das Velhas. Brazil: **Dept. Nac. Produção Mineral, Div. Geol. e Min.**, 1961. Bol. 211, 30 p.

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS - SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. 2021. Disponível em: idesisema.meioambiente.mg.gov.br. Acesso em: 23 out. 2024.

SOUZA, S. M. T. (Ed.) Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais. **Belo Horizonte: HIDROSISTEMAS/COPASA**, 1995. 525p. il.

SOUZA PINTO, N. L. DE; HOLTZ, A. C. T; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. 1 ed. São Paulo: Editora Blucher. 1976. 305p.

SUITA, M. T. F.; ENDO, I.; ASSUMPÇÃO, C. S.; ALCÂNTARA, R. M.; MENEZES, I. P. Metacumulados ultramáficos de Santa Rita de Ouro Preto (Ouro Preto): Esteatitos, intrusões acamadadas (máfico?) ultramáficas Paleoproterozoicas (?) e suas implicações. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2007, Diamantina. **Simpósio do Sudeste - Programação e Livro de Resumos**. Diamantina, MG: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleos RJ, MG e SP. p. 92-92, 2007.

SUITA, M. T. F., DANDERFER, F. A., SOUZA, T. P., SILVA, M. V. A., COSTA JUNIOR, J. R. N., PEREIRA, R. R. O Complexo desmembrado e metamorfoisado vulcano-plutônico komatiítico Paleoproterozóico (?) de Catas Altas da Noruega (MG). *In*: GEOSUDESTE 17º SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS E 13º SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2013, Juiz de Fora. **Resumos Geosudeste**. Juiz de Fora, MG: SBG, Núcleo MG. 2013.

STEIN, B. Como equilibrar a demanda por água entre a agropecuária e a população? The Nature Conservancy (TNC Brasil). **Revista Galileu**, 2024. Disponível em: <<https://revistagalileu.globo.com/colunistas/tnc-brasil/coluna/2024/03/como-equilibrar-a-demanda-por-agua-entre-a-agropecuaria-e-a-populacao.ghtml>>. Acesso em: 14 dez. 2024.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, v. 39, n. 7, p. 1082-1089, 1911.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Climatology**, New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. de O. **Introdução à Climatologia**. Ubá: Ed. Geographica (Série Textos Básicos de Geografia), 234p. 2008.

VARAJÃO, C. A. C. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 2, p. 138-145, 1991.

VENTURA, L. C.; BACELLAR, L. A. P. Influência de filitos no padrão de fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto. **Geotecnia**, v. 121, p. 7188, 2011.

VINCE, A. Agricultura familiar une gerações em fazenda na região de Sarzedo. **Portal da Cidade, Sarzedo**, 2024. Disponível em: <https://sarzedo.portaldacidade.com/noticias/agronegocio/agricultura-familiar-une-geracoes-em-fazenda-na-regiao-de-sarzedo-0226>. Acesso em: 14 dez. 2024.

ZACCHI, E. N. P.; SILVA, ADALENE. M.; TOLEDO, C. L. B.; SOUZA FILHO, C. R. As três anomalias elípticas da porção sul do Cráton São Francisco: novos alvos para a mineralização de grafita? **Rev. Bras. Geof.**, v. 25, n. 4, p. 421-431, 2007.

ZUPO, A. **Aplicação e Adaptações de Métodos de Vulnerabilidade Intrínseca em Climats Tropicais – Quadrilátero Ferrífero, Brasil**. 2024. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.