

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**MATHEUS DE CASTRO FIUSA**

**AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS CLIMÁTICAS E ANTRÓPICAS NA  
DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA DO ALTO RIO DAS  
VELHAS: UMA ANÁLISE DE DADOS ENTRE 1970 E 2020**

**BELO HORIZONTE**

**2025**

**MATHEUS DE CASTRO FIUSA**

**AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS CLIMÁTICAS E ANTRÓPICAS NA  
DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA DO ALTO RIO DAS  
VELHAS: UMA ANÁLISE DE DADOS ENTRE 1970 E 2020**

Monografia apresentada ao curso de Geologia  
da Universidade Federal de Minas Gerais,  
como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Geologia.

Orientação: Prof. Dr. Rodrigo de Paula  
Prof. Msc. Wallace M. P. Neto

**BELO HORIZONTE**

**2025**

**MATHEUS DE CASTRO FIUSA**

**AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS CLIMÁTICAS E ANTRÓPICAS NA  
DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA DO ALTO RIO DAS  
VELHAS: UMA ANÁLISE DE DADOS ENTRE 1970 E 2020**

Monografia apresentada ao curso de Geologia  
da Universidade Federal de Minas Gerais,  
como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Geologia.

Data da defesa: 04/02/2025

Prof. Dr. Rodrigo Sergio de Paula - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Paulo Galvão - UFMG

Msc. Fernando Alves Carneiro - SGB

**BELO HORIZONTE**

**2025**

A minha mãe, que sempre esteve ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Sergio de Paula, por ser tão atencioso e dedicado ao ensino e pesquisa, por sempre estar à disposição para uma dúvida ou uma conversa, e ao meu Coorientador, Prof. Msc. Wallace Maciel Pacheco Neto, que sempre esteve de prontidão para ajudar com qualquer problema que aparecesse.

Aos meus chefes e colegas de trabalho no Serviço Geológico do Brasil, em especial Fernando Alves Carneiro, Maria Antonieta Mourão e Marcelo Sacchi, por sempre me encorajarem e ajudarem nesse mundo da hidrogeologia.

A minha mãe, Mariana de Castro, meu irmão, Lucas de Castro, minha avó, Otavina Mariana, minha Tia, Marina Mariana, meus animais de estimação, Luna (em memória), Estrela e Leo, por estarem comigo nos bons e maus momentos, por me incentivarem e por serem porto seguro na minha vida.

Aos amigos que fiz pela vida, em especial aos que fiz durante a graduação e que passaram e passam por essa árdua, mas recompensante experiência, que é estudar geologia. Deniro Felipe, Victor Queres, Gabriel Tosi, Thais Viana, Mateus Batista, Carla Garcia, e grande elenco. Aos meus amigos de outros cursos, principalmente João Vitor Evangelista. A minha graduação não seria a mesma sem vocês.

E por fim, mas não menos importante, eu agradeço a mim mesmo, que não desisti!

## RESUMO

As últimas décadas vêm sendo marcadas por mudanças climáticas em todo mundo e isso tem afetado dinâmicas atmosféricas e conseqüentemente a disponibilidade hídrica por todo mundo. A região do alto rio das Velhas representa a porção mais inicial da bacia estadual do rio das Velhas e compreende duas importantes regiões do estado de Minas Gerais: Belo Horizonte (capital) e a porção central do Quadrilátero Ferrífero. Desde 1970 até 2020 diversos aspectos da área de estudo se modificaram, desde a forma que ela é ocupada, como seus recursos hídricos são utilizados e até os aspectos climáticos, com isso esse trabalho se propõe a avaliar como essas mudanças impactaram a bacia. Foram adotadas diferentes metodologias, onde bancos de dados disponibilizados por órgãos gestores como Igam, INMET e ANA foram submetidos a consistências, filtros, estatística que resultaram em gráficos e alimentaram os métodos de Isoietas e Polígonos de Thiessen, balanço hídrico por Thornthwaite e Matter (1955) e seus subprodutos como o cálculo da evapotranspiração Real e o Índice de aridez. Foram selecionadas 8 estações pluviométricas, 1 estação de medição de temperatura e consistidos dados de 2838 captações subterrâneas e 1266 captações superficiais. Grande parte dos dados foram geoespacializados para demonstrações gráficas do comportamento delas no tempo e no espaço. A pluviometria da área mostrou uma média de 1498,02 mm no período analisado, não houve redução entre a razão de pluviosidade por dias de chuva, se mantendo em 14,3 mm/dia. Foram definidos ciclos de alta e baixa pluviosidade em relação a média analisada, além de 8 subáreas coincidentes com os polígonos de Thiessen. A espacialização da pluviometria pelos métodos de Thiessen e Isoietas mostrou resultados de pluviosidade média distintos, mas próximos da média global observada. A temperatura teve um acréscimo médio de 1,5°C entre o primeiro e último ciclo. O balanço hídrico resultou em um leve decréscimo do excedente hídrico, principalmente em ciclos de baixa, e redução progressiva do déficit hídrico. A evapotranspiração real apresentou baixa variação, com tendência de redução, principalmente em ciclos de baixa associada ao aumento da temperatura. O índice de aridez apresentou aumento global em todas as subáreas, com aumento nos ciclos de baixa e redução nos ciclos de alta. Para a componente antrópica foi observado o crescimento da urbanização na bacia, que representou 50% desde os anos 1980 até 2020, e da mineração, com crescimento de 150% no mesmo período. A utilização de captações aumentou exponencialmente, principalmente a partir da década de 80, partindo de 0,2 m<sup>3</sup>/s para 13 m<sup>3</sup>/s em meados da última década, com destaque para a estação de Bela Fama que explora 8,53 m<sup>3</sup>/s no leito do rio das Velhas. Os resultados mostram que há um

grande aumento exploração na bacia associada a aumento da temperatura que vem reduzindo a quantidade de água disponível. Os locais mais críticos observados estão sobre as unidades aquíferas de complexos metamórficos e correspondem a cidade de Belo Horizonte, Contagem e Nova Lima, onde pelo menos 50% de toda a captação subterrânea da área é retirada.

Palavras-chaves: captações; balanço climatológico; crise climática; Quadrilátero Ferrífero, águas subterrâneas.

## ABSTRACT

The last decades have been marked by climate changes worldwide, affecting atmospheric dynamics and consequently water availability globally. The upper Velhas River region represents the initial portion of the Velhas River basin in Minas Gerais state, encompassing two important regions: Belo Horizonte (the state capital) and the central portion of the Iron Quadrangle. From 1970 to 2020, several aspects of the study area have changed, including land occupation, water resource utilization, and climate. This study aims to assess how these changes have impacted the basin. Different methodologies were employed, using databases provided by management agencies such as IGAM, INMET and ANA. These data underwent consistency checks, filters, and statistical analysis, generating graphs and feeding into the Isohyetal and Thiessen Polygon methods. Water balance was calculated using the Thornthwaite and Matter (1955) method, along with sub-products like actual evapotranspiration and the aridity index. Eight rainfall stations and one temperature measurement station were selected, and data from 2838 groundwater and 1266 surface water abstractions were validated. Most data were georeferenced for graphical representation of their behavior over time and space. The area's rainfall averaged 1498.02 mm during the analyzed period, with no reduction in the rainfall-to-rainy-day ratio, remaining at 14.3 mm/day. High and low rainfall cycles were defined in relation to the analyzed average, along with eight sub-areas coincident with the Thiessen polygons. Spatialization of rainfall by the Thiessen and Isohyetal methods showed distinct average rainfall results, close to the observed global average. The temperature showed an average increase of 1.5°C between the first and last cycle. The water balance resulted in a slight decrease in water surplus, mainly in low cycles, and a progressive reduction in water deficit. Actual evapotranspiration showed low variation, with a decreasing trend, mainly in low cycles associated with increased temperature. The aridity index showed a global increase in all sub-areas, with an increase in low cycles and a reduction in high cycles. Regarding the anthropogenic component, urban growth in the basin represented 50% from the 1980s to 2020, and mining grew by 150% in the same period. The use of water abstractions increased exponentially, mainly from the 1980s onwards, going from 0.2 m<sup>3</sup>/s to 13 m<sup>3</sup>/s in the mid-last decade, with emphasis on the Bela Fama station that exploits 8.53 m<sup>3</sup>/s in the Velhas River bed. The results show a large increase in exploitation in the basin associated with increased temperature, which has reduced the amount of available water. The most critical locations observed are over the aquifer units of metamorphic complexes and correspond to the cities of

Belo Horizonte, Contagem, and Nova Lima, where at least 50% of all groundwater abstraction in the area is withdrawn.

Keywords: water catchments; climatological balance; climate crisis; Quadrilátero Ferrífero; groundwater.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. (A) MAPA DESTACANDO OS MUNICÍPIOS QUE COMPÕEM A BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS E SUA DRENAGEM PRINCIPAL, O RIO DAS VELHAS, COM SUA NASCENTE NO SUDESTE DA ÁREA. (B) MAPA DAS 7 SUB-BACIAS DA BACIA ESTADUAL DO RIO DAS VELHAS QUE PERTENCEM AO ALTO VELHAS. A ESQUERDA MAPAS IDENTIFICANDO A ÁREA NO ESTADO DE MINAS GERAIS (VINHO) E NO BRASIL (CINZA CLARO).....	15
FIGURA 2 - MAPA HIDROGRÁFICO COM AS PRINCIPAIS DRENAGENS NA ÁREA DE ESTUDO. DESTAQUE PARA O RIO DAS VELHAS CRUZANDO A ÁREA DE SUDESTE A NORTE E SEUS PRINCIPAIS AFLUENTES. ....	18
FIGURA 3 - COLUNA ESTRATIGRÁFICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (ENDO ET AL. 2019) .....	20
FIGURA 4 - DESENHO ESQUEMÁTICO COM DESTAQUE PARA OS SISTEMAS DE NAPPES CURRAL (VERMELHO), MARCANDO O PRIMEIRO EVENTO TECTÔNICO, OURO PRETO (PRETO) MARCANDO O SEGUNDO EVENTO (ENDO ET AL. 2019). ....	24
FIGURA 5 - MAPA DE UNIDADES AQUÍFERAS DA REGIÃO DO ALTO RIO DAS VELHAS. MODIFICADO DE MAGALHÃES ET AL.(2022), ANDRADE (2023) E ZUPO (2024). SISTEMA DE COORDENADAS: SIRGAS 2000 UTM ZONA 23S. ....	30
FIGURA 6 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DO HIDROWEB/ANA NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS. EM VERMELHO AS 36 ESTAÇÕES INICIAIS E EM PRETO AS ESTAÇÕES SELECIONADAS PELOS CRITÉRIOS DAS SÉRIES CONTÍNUAS E DE PELO MENOS 30 ANOS. ....	32
FIGURA 7 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES AUTOMÁTICAS DO INMET, COM DESTAQUE PARA A ESTAÇÃO BELO HORIZONTE (ROXO), USADA PARA COMPOR O BANCO DE DADOS DESTE TRABALHO, E AS DEMAIS ESTAÇÕES (AMARELO).....	35
FIGURA 8 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DO WIDROWEB/ANA NA ÁREA DE ESTUDO E ENTORNOS. (A) ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS (BRANCO) E ESTAÇÃO NÃO SELECIONADA (MARROM) POR NÃO ESTAR NO LEITO DO PRINCIPAL RIO DA BACIA, O RIO DAS VELHAS. (B) AMPLIAÇÃO DA ÁREA DA ESTAÇÃO FAZENDA ÁGUA LIMPA PARA IDENTIFICAÇÃO DAS DUAS ESTAÇÕES QUE FORAM REPRESENTADAS COMO APENAS UMA, DEVIDO A UMA PROVÁVEL REATIVAÇÃO DA ESTAÇÃO POR MEIO DE UM NOVO PROCESSO. ....	39
FIGURA 9 - GRÁFICO DE PLUVIOSIDADE MÉDIA POR ESTAÇÃO COM INDICAÇÃO DA MÉDIA GLOBAL DOS 50 ANOS ANALISADOS E SEU DESVIO DE $\pm 10\%$ . OS DADOS SE COMPORTAM DE FORMA SEMELHANTE EM TODAS AS 8 ESTAÇÕES ANALISADAS, HAVENDO PEQUENAS DISSONÂNCIAS EM ANOS DIFERENTES. ....	42
FIGURA 10 - MÉDIA PLUVIOMÉTRICA COM IDENTIFICAÇÃO DE CICLOS HIDROLÓGICOS E SUAS RESPECTIVAS TENDÊNCIAS NOS ÚLTIMOS 50 ANOS NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS. OS CICLOS DE ALTA PLUVIOMÉTRICA (AZUL) SE DESTACAM POR MAIORES VALORES EM RELAÇÃO À MÉDIA GLOBAL, ENQUANTO OS CICLOS DE BAIXA PLUVIOMÉTRICA (LARANJA) VALORES ABAIXO DA MÉDIA. O INÍCIO E FIM (CINZA) DO PERÍODO DE ANÁLISE ESTÃO DESTACADOS PARA MOSTRAR A INCOMPLETUDE DO INICIAL E FINAL. ....	43
FIGURA 11 - GRÁFICO DA MÉDIA DOS DIAS DE CHUVA (LARANJA) E PLUVIOSIDADE MÉDIA ANUAL (VERDE) POR ANO NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS, NO PERÍODO DE 1970 A 2020. INDICAÇÃO DA TENDÊNCIA DE AMBAS AS VARIÁVEIS POR MEIO DE UMA REGRESSÃO LINEAR QUE INDICA UMA REDUÇÃO NO NOS ÚLTIMOS 50 ANOS, ONDE AMBOS MANTÊM PROPORÇÃO SEMELHANTE. ....	44
FIGURA 12 - ESPACIALIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA UTILIZANDO DA MÉDIA PLUVIOMÉTRICA DE CADA ESTAÇÃO ENTRE 1970 E 2020. (A) MAPA DE THIESSEN + ISOIETAS COM ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DO HIDROWEB IDENTIFICADAS. (B) MAPA DOS POLÍGONOS DE THIESSEN. (C) MAPA DE ISOIETAS (D) MAPA DE ESTRUTURAS MEGAESTRUTURAS DA ÁREA DE ESTUDO COM AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS (BRANCO).....	48
FIGURA 13 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NOS ÚLTIMOS 50 ANOS NA BACIA DO ALTO VELHAS MOSTRANDO A TENDÊNCIA POR CICLO. DESTACA-SE O PRIMEIRO CICLO DE ALTA PLUVIOMÉTRICA ONDE A TEMPERATURA APRESENTOU QUEDA CONSIDERÁVEL QUANDO COMPARADA AOS OUTROS CICLOS. É OBSERVADO UM CRESCIMENTO DOS DADOS ENTRE 1970 E 2020. ....	50
FIGURA 14 - EXTRACTO PLUVIOMÉTRICO POR POLÍGONO DE THIESSEN PELO MÉTODO DE THORNTHWAITTE E MATHER (1955). É OBSERVADO REDUÇÕES LEVES DO EXCEDENTE HÍDRICO (PRECIPITAÇÃO $>0$ ) E AUMENTO DO DÉFICIT HÍDRICO (PRECIPITAÇÃO $<0$ ). ....	52
FIGURA 15 - MAPA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA ÁREA DE ESTUDO POR CICLO PLUVIOMÉTRICO. DA ESQUERDA PARA A DIREITA E DE CIMA PARA BAIXO É POSSÍVEL OBSERVAR AS VARIAÇÕES DENTRO DOS CICLOS DA QUANTIDADE E ESPACIALIDADE DA ÁGUA EVAPORADA NA BACIA.....	56
FIGURA 16 - EVOLUÇÃO DO ÍNDICE DE ARIDEZ POR POLÍGONO DE THIESSEN DA ÁREA DE ESTUDO DURANTE OS CICLOS PLUVIOMÉTRICOS. É OBSERVADO QUE EM CICLOS DE ALTA HÁ UMA TENDÊNCIA DE REDUÇÃO DA ARIDEZ ENQUANTO EM CICLOS DE BAIXA HÁ UM AUMENTO DO ÍNDICE. DE FORMA GLOBAL HÁ UMA TENDÊNCIA DE AUMENTO DO ÍNDICE DE ARIDEZ EM TODAS AS 8 SUBÁREAS.....	58
FIGURA 17 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DO RIO DAS VELHAS IDENTIFICANDO OS MUNICÍPIOS QUE ELAS SE ENCONTRAM. ....	61
FIGURA 18 - GRÁFICOS DE VAZÕES MÍNIMAS, MÁXIMAS E MÉDIAS ANUAIS REGISTRADAS NAS 3 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS ENTRE 1970 E 2020. SÃO OBSERVADOS PICOS MARCANTES DURANTE OS ANOS DE 1980 E	

VALE DURANTE A ÚLTIMA DÉCADA ANALISADA. ....	62
FIGURA 19 - MAPA DE EVOLUÇÃO DE DADOS REPRESENTATIVOS POR DÉCADA, DESDE 1985 A 2015, DO USO E OCUPAÇÃO COM ENFOQUE NA OCUPAÇÃO ANTRÓPICA E MINERAÇÃO NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS. É MOSTRADO O CRESCIMENTO URBANO E MINERÁRIO PRINCIPALMENTE NAS PORÇÕES NOROESTE E OESTE DA ÁREA DE ESTUDO. ....	64
FIGURA 20 - (A) MAPA DE CAPTAÇÕES SEPARADOS ENTRE OUTORGADOS (MAGENTA) E USO INSIGNIFICANTE (ROSA). (B) MAPA DE CALOR DA CONCENTRAÇÃO DE CAPTAÇÕES COM DESTAQUE NOS MUNICÍPIOS DO ALTO RIO DAS VELHAS, DEMONSTRANDO A ALTA CONCENTRAÇÃO DESSAS CAPTAÇÕES EM BELO HORIZONTE, CONTAGEM E NOVA LIMA. ....	67
FIGURA 21 - GRÁFICO DE VAZÃO E QUANTIDADE DE POÇOS EM ATIVIDADES POR ANO NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS PARA CAPTAÇÕES SUBTERRÂNEAS OUTORGADOS. ....	68
FIGURA 22 - GRÁFICO DE VAZÃO E QUANTIDADE DE POÇOS EM ATIVIDADES POR ANO NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS PARA CAPTAÇÕES SUBTERRÂNEAS DE USO INSIGNIFICANTE. ....	69
FIGURA 23 - MAPA DE UNIDADES AQUÍFERAS DO ALTO RIO DAS VELHAS. (MODIFICADO DE ENDO ET AL. 2019 E ADAPTADO DE ANDRADE (2023), MAGALHÃES (2023) E ZUPO (2024)).....	70
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DAS CAPTAÇÕES SUBTERRÂNEAS POR UNIDADE AQUÍFERA NA ÁREA DE ESTUDO. MOSTRA-SE UMA PREDOMINÂNCIA DOS POÇOS EM AQUÍFEROS DE COMPLEXOS METAMÓRFICOS. ....	71
FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO DE EXPLOTAÇÃO POR UNIDADE AQUÍFERA DA ÁREA DE ESTUDO. OS DADOS SE MOSTRAM BASTANTE SEMELHANTES À QUANTIDADE DE CAPTAÇÕES, MOSTRANDO QUE SÃO INTIMAMENTE LIGADOS. ....	72
FIGURA 26 - (A) MAPA DE CAPTAÇÕES SUPERFICIAIS SEPARADAS ENTRE OUTORGADAS (MARROM) E USO INSIGNIFICANTE (AMARELO), ALÉM DO DESTAQUE DADO A CAPTAÇÃO DE BELA FAMA (VERMELHO). (B) MAPA DE CALOR DA CONCENTRAÇÃO DE CAPTAÇÕES COM DESTAQUE NOS MUNICÍPIOS DO ALTO RIO DAS VELHAS. ....	73
FIGURA 27 - GRÁFICO DE VAZÃO E QUANTIDADE DE CAPTAÇÕES SUPERFICIAIS EM ATIVIDADE POR ANO NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS PARA CAPTAÇÕES OUTORGADAS. ....	74
FIGURA 28 - GRÁFICO DE VAZÃO E QUANTIDADE DE CAPTAÇÕES SUPERFICIAIS EM ATIVIDADES POR ANO NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS PARA CAPTAÇÕES DE USO INSIGNIFICANTE.....	75
FIGURA 29 - (A) MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA PRINCIPAL CAPTAÇÃO DO RIO DAS VELHAS, A ESTAÇÃO DE BELA FAMA. (B) AMPLIAÇÃO DA ÁREA ONDE SE LOCALIZA A ESTAÇÃO DE BELA FAMA.....	76

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CHAVE DE CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA SEGUNDO THORNTHWAITE (1948), BASEADO NO ÍNDICE DE ARIDEZ (OMETTO, 1981) .....	38
TABELA 2 - RAZÃO ENTRE PLUVIOMETRIA E DIAS DE CHUVA DENTRO DE CADA CICLO HIDROLÓGICO. ....	45

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA</b> .....	14
	2.1 Localização da área de estudo .....	14
	2.2 Clima .....	16
	2.3 Geomorfologia .....	16
	2.4 Hidrografia .....	17
<b>3</b>	<b>GEOLOGIA</b> .....	19
	3.1 Estratigrafia .....	19
	3.2 Geologia estrutural .....	23
<b>4</b>	<b>HIDROGEOLOGIA</b> .....	26
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	31
	5.1 Banco de dados .....	31
	5.2 Influência climática .....	31
	5.3 Fluviometria .....	38
	5.4 Influências antrópicas .....	40
<b>6</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	42
	6.1 Impactos naturais .....	42
	6.2 Fluviometria .....	61
	6.3 Influências Antrópicas .....	63
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	78
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	80

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos muito tem se estudado sobre mudanças climáticas e crise hídrica, isso atrelado ao intenso crescimento populacional nas últimas décadas tem tomado o debate científico, principalmente na área de geociências.

O Alto rio das Velhas, área de estudo deste trabalho, está localizado na porção centro-sudeste de Minas Gerais, sendo limitada a norte pelos municípios de Belo Horizonte e Sabará e a Sul por Ouro Preto, com uma área de 2700 km<sup>2</sup>. Forma a porção superior da bacia estadual do rio das Velhas, tendo como destaque a nascente nas serras de Ouro Preto. O alto Velhas compreende duas importantes localizações, a cidade de Belo Horizonte, capital do Estado, e o Quadrilátero Ferrífero, uma das mais importantes províncias metalogenéticas do país. Esses locais se destacam pela grande população e empreendimentos minerários, respectivamente. Desde a década de 1970 até os dias atuais a bacia sofreu drásticas mudanças populacionais, econômicas e do meio físico, derivado principalmente dos avanços tecnológicos e demandas de recursos naturais.

Os recursos hídricos da bacia do alto velhas são oriundos principalmente dos aquíferos Cauê, Gandarela e Moeda (Magalhães *et al.* 2023) e do rio das Velhas. Suas águas são usadas para diferentes finalidades e vem tendo, cada vez mais, uma demanda maior por diversos setores da economia. Esse aumento atrelado a fatores naturais e antrópicos pode gerar impactos permanentes na bacia, como desabastecimento.

Estudos como o de Magalhães (2010) e Lemos & Junior (2019) já avaliaram impactos pela qualidade e pelo abastecimento da região do Alto Velhas, indicando avanços significativos na exploração e consumo nas últimas décadas, além do avanço da mineração – principal setor econômico da região.

O objetivo deste trabalho é observar aspectos climáticos, hidrológicos e hidrogeológicos e suas relações com ações antrópicas a partir de 1970 até o 2020 na sub bacia do Alto rio das Velhas. Inicialmente é observado e caracterizado dados primários, como pluviometria, temperatura, poços outorgados, captações superficiais e uso e ocupação, esses dados servirão para gerar dados secundários que ajudam a estabelecer relações importantes como evapotranspiração, distribuição de chuvas, uso de águas e suas finalidades, dentre outros. Finalmente, estabelecido as relações, busca se há e quem causa impactos na bacia e como está a evolução deste impacto no tempo e espaço.

## **2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA**

### **2.1 Localização da área de estudo**

A área de estudo (figura 1) encontra-se na região centro-sudeste de Minas Gerais, compreende totalmente os municípios de Belo Horizonte (Capital do estado), Nova Lima, Rio Acima, Itabirito e Raposos e parcialmente os municípios de Contagem, Santa Luzia, Caeté, Sabará e Ouro Preto. Com 2.739,7 Km<sup>2</sup>, a bacia do Alto rio das Velhas é porção mais a montante da bacia estadual do rio das Velhas, e compreende a nascente do rio das Velhas, a capital mineira e o Quadrilátero Ferrífero (QF) – importante província metalogenética brasileira.

O alto rio das Velhas pertence à bacia estadual do rio das Velhas que, por sua vez, pertence à bacia federal do rio São Francisco, uma importante bacia rica em biodiversidade e que abastece estados do sudeste e nordeste do país.

A região apresenta diversos empreendimentos minerários instalados sobre as serras do QF, devido a presença em abundância de Fe, Au, gemas e outros recursos minerais.

A capital Mineira abriga a maior população do Estado e junto de outros municípios formam a região metropolitana de Belo Horizonte. Seu extenso crescimento nas últimas décadas marca uma demanda por recursos hídricos na bacia de estudo.

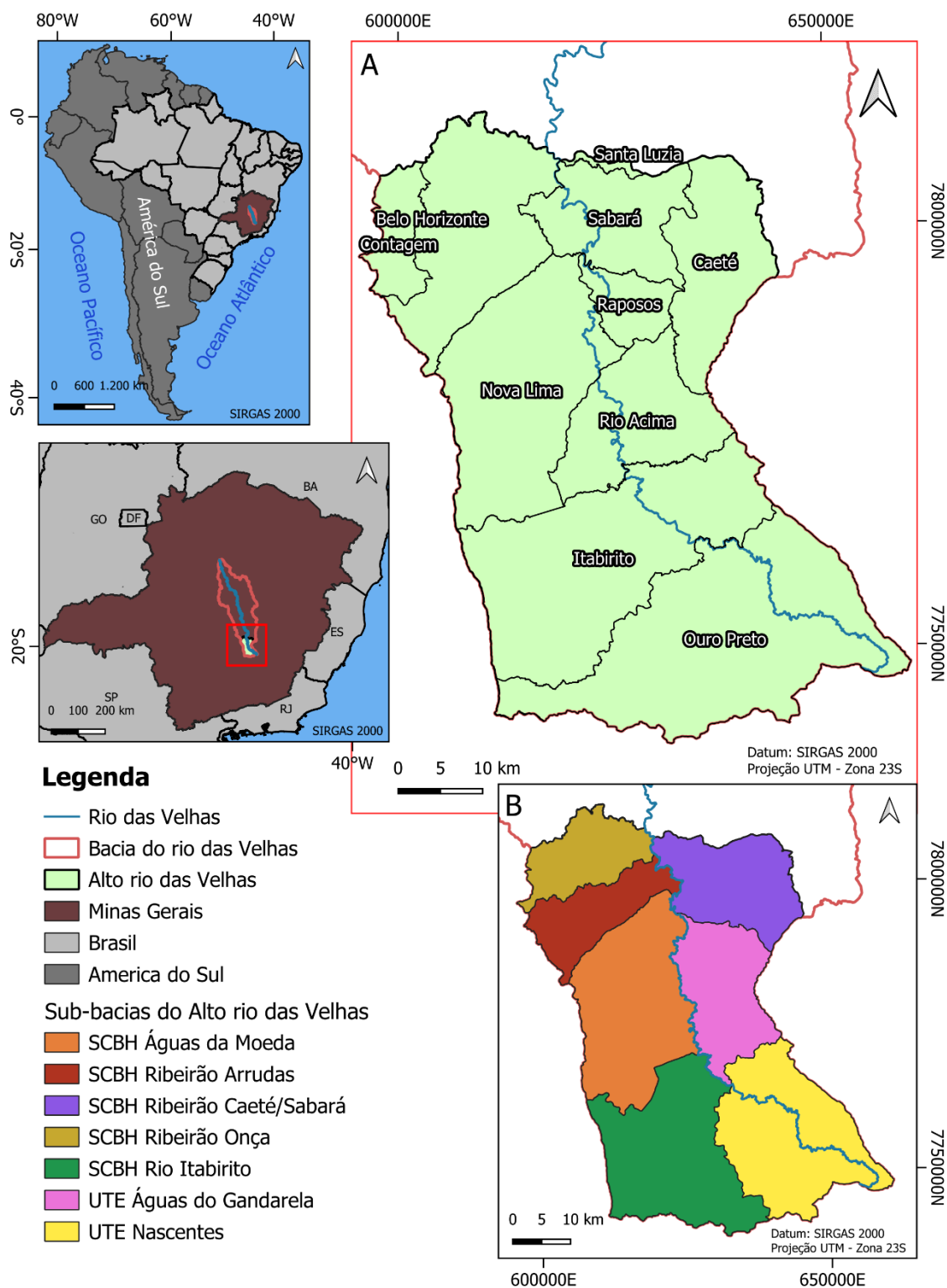


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. (A) Mapa destacando os municípios que compõem a bacia do alto rio das Velhas e sua drenagem principal, o rio das Velhas, com sua nascente no Sudeste da área. (B) Mapa das 7 sub-bacias da bacia estadual do rio das Velhas que pertencem ao alto Velhas. A esquerda mapas identificando a área no Estado de Minas Gerais (vinho) e no Brasil (cinza claro).

## 2.2 Clima

Álvares (2014) classifica segundo Koppen-Geiger (1928) o clima da região como sendo Cwb, isto é, duas estações bem definidas, inverno e verão, sendo um com um clima seco e frio e outro com quente e úmido, respectivamente, podendo ser chamado de subtropical úmido. As normais climatológicas (1991-2020) da estação Belo Horizonte (83587) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), demonstram as duas estações, anteriormente citadas, bem marcadas, com o período de estiagem se iniciando em abril e terminando em setembro, com seu pico em junho/julho. Já o período de chuvas vai de outubro a março com seu pico em dezembro/janeiro (Álvares, 2014; INMET, 2024).

A temperatura, coincidente com o esperado por Silva (2007) e Álvares (2014) na sua classificação, acompanha a precipitação nas normais climatológicas (INMET, 2024) com temperaturas mais baixas entre abril e setembro e mais elevadas entre outubro e março. Nimer (1989) calcula uma temperatura média anual de 18°C a 20°C

Nery (2016) calcula a média pluviométrica da região do Quadrilátero Ferrífero (QF) como 1491,4 mm ao ano, mas destaca a amplitude que ocorre entre um ponto e outro, já Cruz *et al.* (2022) calculou uma média histórica para o período de 1984 a 2019 de 1496,2 mm para a região do sinclinal moeda – porção oeste da área de estudo.

O clima na região sofre interferência das porções de serra, que funcionam como barreiras para passagem de umidade (Jardim & Galvani, 2022).

## 2.3 Geomorfologia

Um das primeiras descrições geomorfológicas se dá por Door (1969) quando ele descreve “picos altos e acidentados, longas cadeias de montanhas em *hogback*, platôs elevados, alguns canyons profundos e suaves vales abertos”. Lichte (1979), Barbosa (1980) e Varajão (1991) tentam compartimentar e identificar por idade e processos os aplainamentos do QF, sendo o último, o que fez separações mais simplificadas do relevo o dividindo em 3 grupos: O primeiro correspondente aos altos topográficos, controlados por rochas ferruginosas e quartzíticas; o segundo ao meio de serra, com xistos e filitos; e a base com rochas vulcânicas, granito-gnaiss.

Complementarmente, Salgado *et al.* (2008), calculou para cada um desses 3 grupos a taxa de erosão por meio de sedimentos fluviais. Os primeiros deram de 0,29 a 2,5 m/Ma, o

segundo de 7,95 a 11,82 m/Ma e, por fim, o terceiro com 12,92 m/Ma. Peifer Bezerra (2018) conclui que a litologia é o fator mais importante no controle erosivo e não a inclinação das encostas.

## **2.4 Hidrografia**

Costa (2008) descreve a bacia do alto rio das Velhas como a região da nascente do rio das Velhas na Cachoeira das Andorinhas em Ouro preto, cidade que marca o limite sul dessa bacia, enquanto Belo Horizonte, Contagem e Sabará marcam o limite norte. Esta subdivisão feita por Costa (2008) faz parte da bacia estadual do Rio das Velhas (SF5), que é umas das bacias que alimenta o rio São Francisco.

O rio das Velhas é dividido em 23 regiões para gestão de recursos hídricos, as chamadas Unidades Territoriais Estratégicas (UTE) (CBH Rio das Velhas, 2013). A região do estudo possui 7 dessas UTEs: SCBH Rio Itabirito, SCBH Nascente, SCBH Águas da Moeda, SCBH Águas do Gandarela, SCBH Ribeirão Arrudas, SCBH Ribeirão Caeté/Sabará.

Os principais rios, além do rio das Velhas, são: Rio Itabirito e Rio Maracujá (Figura 2). Destacam-se também alguns ribeirões: Ribeirão Arrudas, Ribeirão Água Suja, Ribeirão Brumado, Ribeirão Cambimba, Ribeirão Capitão Mata, Ribeirões Cardoso e Carioso, Ribeirão Comprido, Ribeirão Congonhas, Ribeirão do Onça, Ribeirão Pampulha, Ribeirão da Prata, etc. (CBH Rio das Velhas, 2013).

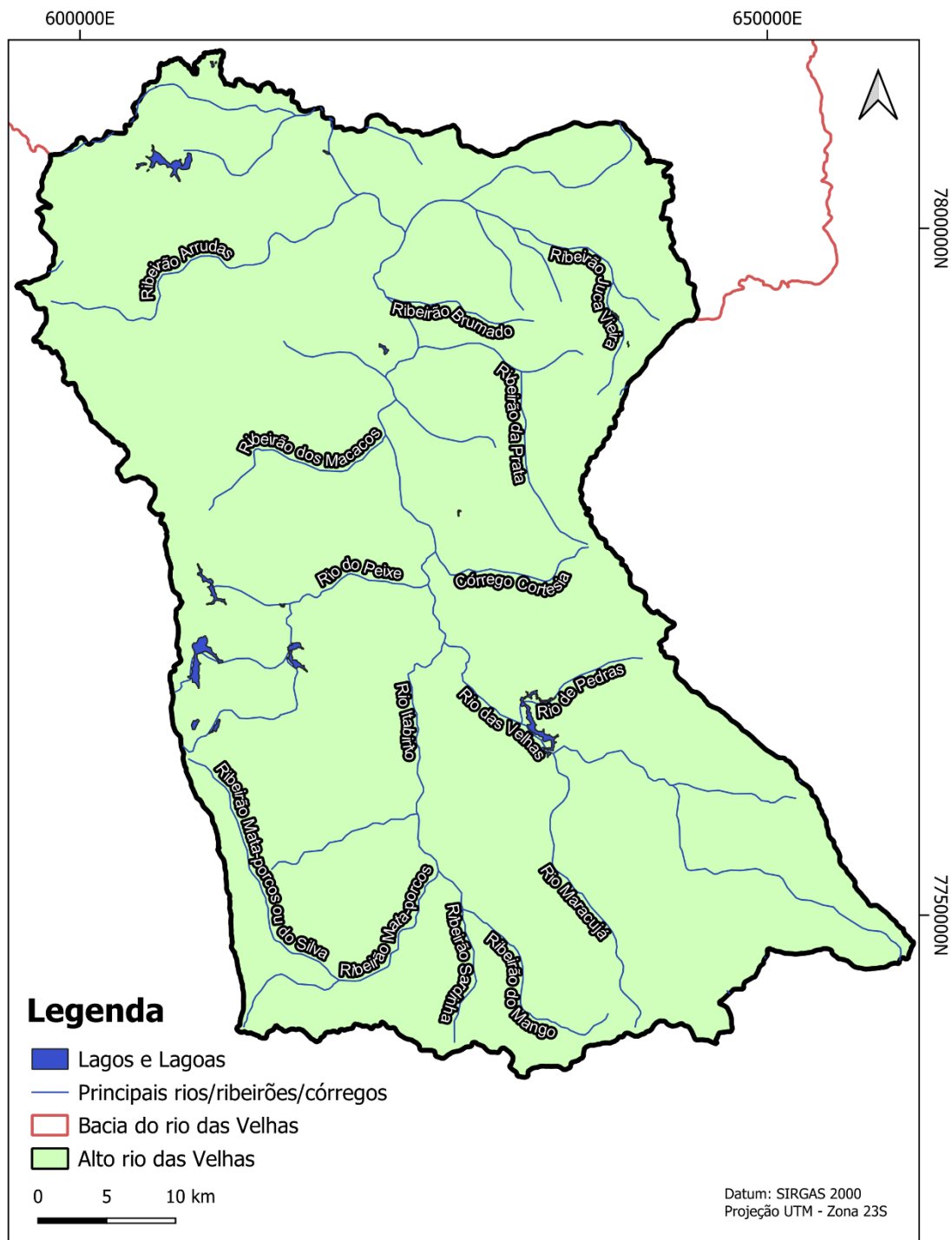


Figura 2 - Mapa hidrográfico com as principais drenagens na área de estudo. Destaque para o rio das Velhas cruzando a área de sudeste a norte e seus principais afluentes.

### **3 GEOLOGIA**

#### **3.1 Estratigrafia**

Endo *et al.* (2020) levantam a evolução do conhecimento geológico acerca do QF em 3 grandes momentos, pré Door, Door e pós Door. Destacando contribuições como de José de Sá, Eschwege (1822) e as primeiras definições estratigráficas de Harder & Chamberlin (1915) e Door *et al.* (1957), chegando a Door *et al.* (1969) com o famoso mapa geológico do Quadrilátero que serviu de base para versões mais modernas com uma estratigrafia muito semelhante ao que se conhece atualmente, apenas com a diferença de não reconhecer o embasamento arqueano, o considerando como rochas intrusivas nas supracrustais. Uma série de trabalhos posteriores ao de Door *et al.* (1969) revisaram e refinaram os dados e interpretações dadas. O mais recente e proeminente foi a revisão do mapa feita por Endo *et al.* (2020).

A litoestratigrafia, assim como a geologia estrutural do Quadrilátero, foi revista por Endo *et al.* (2020), aumentando a região além dos limites propostos por Door (1969), reconhecendo novas feições e características com base nos mapeamentos realizados pela Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) nos últimos 20 anos.

Endo *et al.* (2020) descrevem, da base para o topo: Complexos metamórficos; Supergrupo Rio das Velhas; Supergrupo Minas; Supergrupo Estrada Real; Supergrupo Espinhaço; Unidade sedimentares; A Figura 3 mostra a coluna desenvolvida no trabalho supracitado.

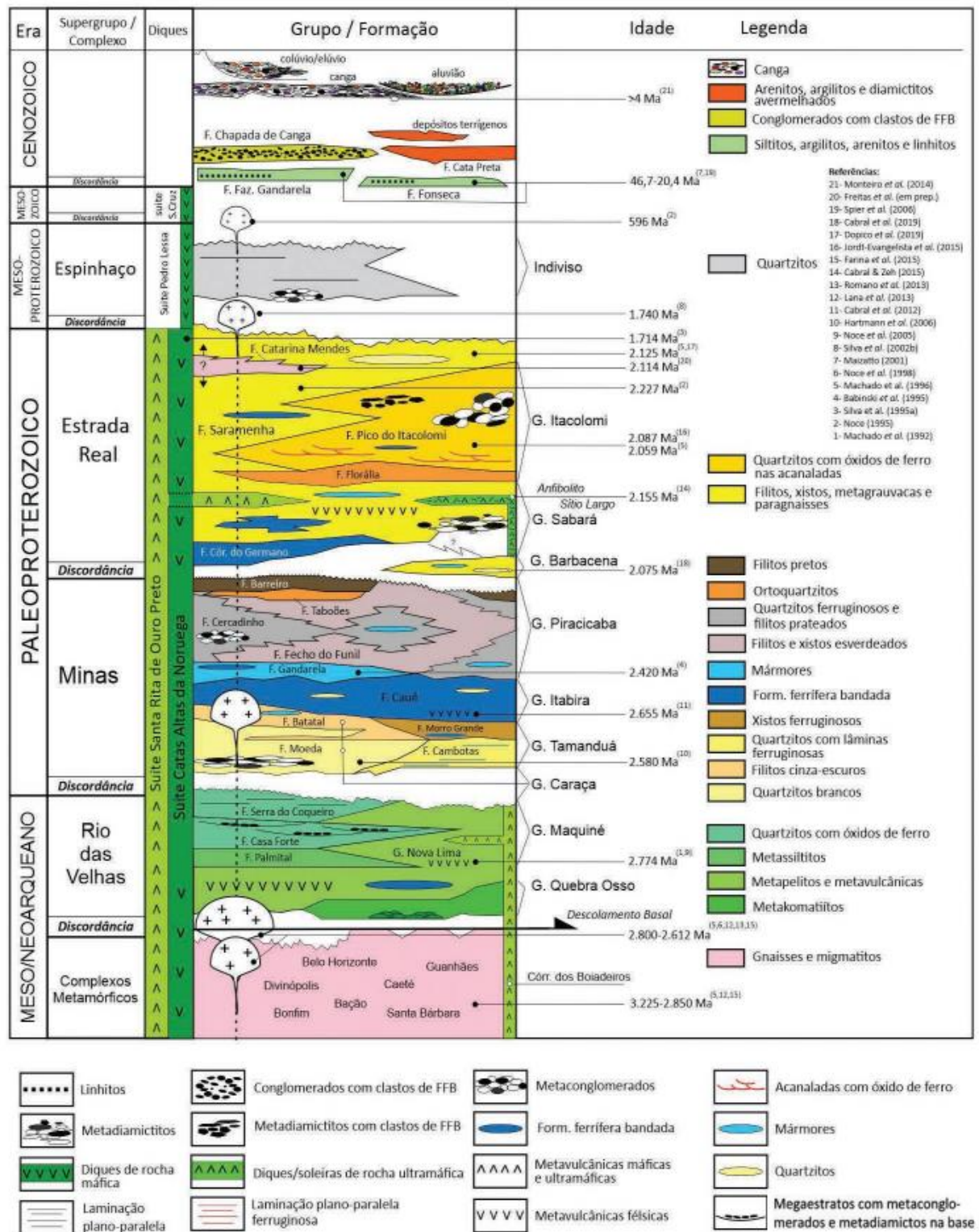


Figura 3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2019)

Os complexos metamórficos são descritos por diversos trabalhos (Guimarães *et al.* 1967, Endo 1997, dentre outros) como sendo compostos por ortognaisse bandados, com corpos localmente anfibolíticos, ortognaisses finamente laminados, migmatitos, corpos intrusivos de granitóides leucocráticos, veios aplíticos e diques máficos. Endo *et al.* (2020)

identificam diferentes complexos, sendo os principais o Belo Horizonte, Bação, Divinópolis, Bom Fim, Guanhães, Caeté e Santa Bárbara. Lana *et al.* (2013) destacam 4 eventos tectono-magmático arqueanos entre 3,2 e 2,6 Ga. O primeiro denominado de Santa Barbará tem idade de 3,22 a 3,2 G.a. e constitui a crosta mais antiga da região, o segundo e terceiro marcam o Rio das Velhas I e II de idade 2,93 e 2,85 G.a. e 2,8 e 2,76 G.a., respectivamente. Por fim, o evento, descrito por Machado *et al.* (1992), que ocorre concomitantemente com o Velhas II chamado de Mamona no Neoarqueano.

O Supergrupo Rio das Velhas é subdividido em 3 grupos segundo Endo *et al.* (2020): Na base o Grupo Quebra Osso; no meio Grupo Nova Lima; e no topo Grupo Maquiné. O Grupo Nova Lima é composto por rochas metavulcanossedimentares químicas, clásticas e clásticas marinhas, com xistos, xistos cloríticos e filitos, subordinadamente ocorrem lentes de filito carbonosos, formações ferríferas, dolomitos e quartzo-ankerita xisto (Lapa seca), metagrauvas e quartzitos, todos de forma descontínua, segundo Door *et al.* (1969) e Vial *et al.* (2007). O Grupo Maquiné, formado por metas sedimentares não marinhas, é subdividido em duas formações: Palmital e Casa Forte (Endo *et al.* 2019). O primeiro é composto por sericita filito, quartzo-clorita xista e xistos, enquanto o segundo por quartzitos, metaconglomerados e metadiamicititos. Endo *et al.* (2020) estimam a espessura do Grupo Maquiné no vale do Rio das Velhas em aproximadamente 3.400 m em uma zona que verge para sudeste. Zucchetti *et al.* (1998), Baltazar & Pedreira (1998) e Baltazar & Zucchetti (2007) descrevem o Supergrupo Rio das Velhas como sendo uma sequência do tipo *greenstone belt*. O Grupo da base foi inserido posteriormente aos dois primeiros grupos por Schorscher (1978), sendo denominado de Grupo Quebra Osso, sendo composto por rochas vulcânicas ultramáficas na borda leste do Quadrilátero. Lobato *et al.* (1998) coloca a idade deste supergrupo entre 2,8 e 2,68 G.a.

Subindo na estratigrafia, tem-se o Supergrupo Minas em discordância com o Supergrupo Rio das Velhas (Door *et al.* 1969) de idade Paleoproterozóica (2584 M.a. (Hartmann *et al.* 2006) e 2420 M.a. (Babinski *et al.* (1995)). Door *et al.* (1969) dividem o Supergrupo em 4 grupos: Grupo Tamanduá, Grupo Caraça, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba. Marcado por sequência de evolução de uma margem passiva (Alkimin & Martins Neto, 2012). O Grupo Tamanduá é composto por Quartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas, xistos quartzosos e argilosos, xistos filíticos e quartzitos, xistos ferruginosos e Formação ferrífera dolomítica (Endo *et al.* 2019) com um pacote de 1 km de espessura (Door, 1969). O Grupo Caraça possui Quartzitos, quartzitos sericíticos, filitos e metaconglomerados da

Formação Moeda e Filitos com BIF's, metacherts, filitos grafiticos e mármore dolomíticos subordinados, com espessuras de 500 e 700 m, respectivamente (Door *et al.* 1969). Os dois Grupos descritos por Door *et al.* (1957) possuem espessuras de 1.100 e 1280 m. O Grupo Itabira possui rochas itabiríticas, itabiríticas dolomíticas, itabiríticas anfíbolíticas e, subordinadamente, rochas filíticas, quartzíticas e mármore da Formação Cauê, seguidas por mármore dolomíticos, filitos dolomíticos, dolomitos ferruginosos, filitos e itabiritos da Formação Gandarela. Já o Grupo Piracicaba é composto por quartzitos ferruginosos, filitos prateados e, subordinadamente, dolomitos, xistos sericíticos e metaconglomerados da Formação Cercadinho. Em contato gradacional com a Formação Fecho do Funil com filitos, filitos dolomíticos, metassiltitos, dolomitos quartzosos e argilosos. No topo com ortoquartzitos da Formação Taboões e filitos grafitosos, filitos e xistos da Formação Barreiro (Door *et al.* 1957).

O Supergrupo Estrada Real, proposto por Teixeira da Costa (1961) e redefinido por Almeida *et al.* (2005) e incluído por Endo *et al.* (2020) é composto pelos grupos Barbacena, Sabará, Itacolomi, representando sucessões do tipo *Flysch* e molassa sin-orogênico de 3625 m de espessura (Door 1969, Reis *et al.* 2002). O Grupo Sabará de idade 2.12 G.a. (Machado *et al.* 1996) possui rochas do tipo clorita xisto, mica xisto intercaladas com metagrauvacas, quartzitos, formações ferríferas bandadas, xisto quartzoso, metapelitos, metassiltitos, filito grafitoso e lentes de dolomito, metarritmito, quartzitos ferruginosos, dolomitos, metadiamicrito e metachert da Formação Saramenha (Almeida *et al.* 2005) também com metavulcânicas félsicas (Noce, 1995) e Ultramáficas (Endo *et al.* 2019) subordinadas. Pomerene (1964), Simmons (1968) e Endo *et al.* (2019) descrevem contatos gradacionais, erosivos ou por falha entre a base da Formação Saramenha e o topo da Formação Piracicaba em diferentes localidades. A Formação Córrego do Germano (Endo *et al.* 2019) é composta por formações ferríferas bandadas granulares e quartzitos ferruginosos e marcam a base do Supergrupo. A Formação Catarina Mendes (Freitas, 2019), no topo, é constituída por biotita-quartzo xisto, quartzitos e filitos (Endo *et al.* 2019). Por fim, o Grupo Itacolomi com as Formações Florália e Pico do Itacolomi, onde o primeiro é composto por ortoquartzitos com espessura de 50 a 350 m e o segundo com quartzitos estratificados com trilhas de óxido de ferro, metaconglomerados com seixos, calhaus e raramente matacões de veio de quartzo, quartzitos, itabiritos e filitos (Endo *et al.* 2019) tendo espessura variada de algumas dezenas de metros até 1,5 Km. (Barbosa 2018, Endo *et al.* 2019). O grupo Barbacena é composto por xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xisto manganésíferos, micaxistos, quartzitos

feldspáticos, filitos intercalados com anfibólitos e metaultramáficas, sendo ele correlativo ao grupo Sabará (Cabral *et al.* 2019)

Duas Suítes aparecem na região, a Suíte ultramáfica Santa Rita de Ouro Preto (Endo *et al.* 2019) e a máfica Catas Altas da Noruega (Raposo 1991, Endo *et al.* 2019). A primeira Suíte apresenta um batólito na região de Santo Antônio do Pirapetinga, *stocks* e diques espalhados pela área (Endo *et al.* 2019). A litologia é marcada por esteatitos e serpentinitos (Jordt-Evangelista & Silva, 2005). Os diques de direção NW-SE, espessos (métricos a decimétricos), deformados por cisalhamento e estão metamorfizados na fácies xisto verde assim como os outros corpos ultramáficos (Gonçalves *et al.* 2011). A essa suíte é atribuída idade pós Supergrupo Minas devido a sua relação de corte com diversas formações do citado (Endo *et al.* 2019). A segunda suíte, posterior aos eventos da primeira, é marcada por diques máficos nos xistos cloróticos do Grupo Sabará e complexo metamórfico de Santo Antônio do Pirapetinga (Raposo, 1991), além de um batólito. A direção desses diques é majoritariamente NW-SE, mas outros *trends* podem ser observados (Endo *et al.* 2019).

As Unidades Cenozóicas são divididas em 5 formações: Fonseca (Door 1969, Maxwell 1972), Chapa da Canga (Door 1969), Cata Preta (Castro & Ferreira 1997), Fazenda Gandarela e Gongo Soco (Endo *et al.* 2019). A Formação Fonseca é composta por argilitos, siltitos, arenitos, linhitos e conglomerados (Gorceix 1884, Maxwell 1972). A Fazenda do Gandarela possui argilitos, arenitos e linhitos recobertos por argilas vermelhas e cangas (Gorceix 1884). A Chapada de Canga com ortoconglomerados oligomíticos com seixos de itabirito em matriz ferruginosa associado a depósitos de leques aluviais (Sant'anna 1994). A Formação Cata Preta é composta por arenitos maciços avermelhados e diamictitos polimíticos relacionados a leques aluviais (Castro *et al.* 1998). Já a Formação Gongo Soco possui 5 fácies: Diamictitos com clastos ferruginosos e quartzo; Brechas de itabirito e hematita; Diamictitos com calhau itabirítico em matriz argilosa; Arenitos amarelados; Diamictitos com fragmentos itabiríticos e hematíticos em matriz hematítica (Endo *et al.* 2019).

### **3.2 Geologia estrutural**

O Quadrilátero Ferrífero é caracterizado por grandes dobramentos resultantes de diferentes eventos tectônicos (Door 1969, Endo 1997, Almeida *et al.* 2001). As dobras regionais são: Nappe Curral (N-NE); Sistema de Nappes Ouro Preto (S-SW); e dobras de

terceira geração;(Endo *et al.* 2019) (Figura 4).

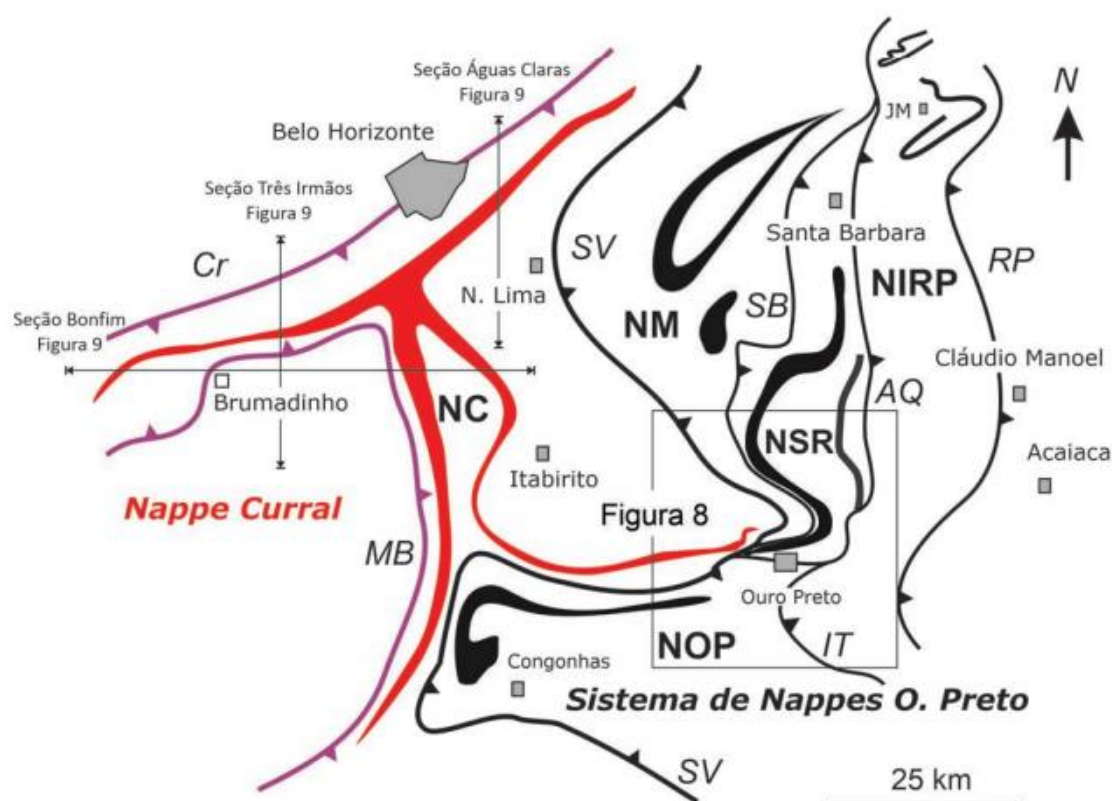


Figura 4 - Desenho esquemático com destaque para os sistemas de *nappes* Curral (Vermelho), marcando o primeiro evento tectônico, Ouro Preto (Preto) marcando o segundo evento (Endo *et al.* 2019).

A *Nappe* curral possui vergência para norte (Endo *et al.* 2005). Na porção norte, aflora o Supergrupo Minas com estratigrafia invertida na Serra do Curral. A zona de charneira da *Nappe* curral marca o encontro com o sinclinal moeda e é denominado por anticlinal curral. No sinclinal Moeda, o flanco da *Nappe* se encontra redobrado onde a porção leste vem a compor o flanco sul do Anticlinal de Mariana e a porção oeste verge para sudoeste até Lavras. A porção sul da *Nappe* Curral se encontra recoberta pela *Nappe* Ouro Preto. Dobras subordinadas ocorrem por toda região, de diferentes perfil e tamanhos a variar da reologia da rocha presente (Endo *et al.* 2019). As principais dobras de segunda ordem são: Anticlinal Bomfim, Anticlinal Curral, Sinclinal Moeda, Sinclinal Mutuca, Anticlinal dos Fechos, Anticlinal Catarina, Sinclinal Gaivotas, Sinclinal Mangabeiras (Endo *et al.* 2019). Duas falhas envolvem a *Nappe* Curral, a primeira a oeste, marcada na interface entre as formações Barreira e Taboões, com forte milonitização, no contato entre o Supergrupo Minas e o Gnaisse Souza Noschese, devido ao alçamento tectônico imposto ao embasamento e no contato do complexo metamórfico Bonfim e os quartzitos do Supergrupo Minas, na região da serra da Moeda, com intensa milonitização e movimento anti-horário, sendo essa falha

chamada de Falha Curral (Endo *et al.* 2019). Já a segunda falha, na porção norte, se chama "Falha Mário Campos", onde o Grupo Sabará cavalga sobre o Complexo Belo Horizonte.

O Sistema de Nappes Ouro Preto é composto por 4 nappes: Maquiné, Santa Rita, Ouro Preto e Itabira-Rio Piracicaba (Endo *et al.* 2019). Onde as principais estruturas são: Sinclinal Gandarela, Sinclinal Ouro Fina, Anticlinal Conceição, Sinclinal Santa Rita, Sinclinório de Itabira, Sinclinório João Monlevade-Rio Piracicaba, Anticlinal de Mariana e Sinclinal Dom Bosco. A vergência desse sistema é para SSW (Endo *et al.* 2019). A *nappe* Maquiné forma a base do Sistema de *Nappes* e movimento as unidades do *Greenstone Belt* e do Supergrupo Minas e foi transportada pelo descolamento basal da Zona de Cisalhamento São Vicente (Endo *et al.* 2019). A *nappe* Santa Rita é delimitada no topo e na base pelas falhas São Bento e Água Quente, respectivamente. Envolvendo porções do greenstone belt Rio das Velhas e do Supergrupo Minas, apresentando boudinagem, segmentação e deformação cisalhante (Endo *et al.* 2019). A *Nappe* Ouro Preto representa a outra porção da falha de Água Quente na base e delimitada no topo pela falha de Itacolomi (Barbosa *et al.* 2017). Nesta *nappe*, diversas formações e complexos são compreendidos gerando sistemas de dobras variados a depender da litologia. Por fim, a *nappe* Itabira-Rio Piracicaba é representada por escamas tectônicas dos supergrupos Rio das Velhas, Minas e Estrada Real, se apresentando em diversas porções em posição estratigráfica normal, sendo redobradas junto de corpos intrusivos da Suíte Borrachudo durante do Brasiliano (Endo *et al.* 2019)

As dobras de terceira geração são desdobramentos ou ampliações geradas durante o Brasiliano que afetaram toda região, gerando novas estruturas por esforços N-S e E-W.

## 4 HIDROGEOLOGIA

Diversos trabalhos vêm sendo feitos na região do Quadrilátero Ferrífero, dentre eles se destacam Braz *et al.* (1998), Beato *et al.* (2006), Mourão (2007), Bertachini (2020), Magalhães *et al.* (2022), Andrade (2023), Zupo (2024). Trabalhos como de Braz *et al.* (1998) identificam apenas aquíferos nas formações Cauê, Cercadinho, Gandarela e Moeda e definem parâmetros hidrodinâmicos iniciais com base em estudos de mineradoras da região.

Trabalhos mais recentes servirão de base para descrever a hidrogeologia e suas componentes dinâmicas, mas sempre retornando a artigos clássicos. Serão eles Magalhães *et al.* (2022) e Andrade (2023). As autoras separam em unidades aquíferas e não aquíferas, onde a primeira são os aquíferos Moeda, Cauê, Gandarela, Piracicaba, Estrada Real (podendo aparecer como aquífero Itacolomi e aquífero/aquícluse Sabará) e depósitos sedimentares, já as segundas, não aquíferas, são os aquíferos complexos TTG, Rio das Velhas, Batatal e suítes intrusivas.

Formando a unidade basal, o aquífero complexos TTG (neste trabalho identificado como aquíferos de complexos metamórficos) é composto pelos complexos Bonfim, Bação (Andrade, 2023) e Belo Horizonte. São fissurais, heterogêneos, descontínuos e anisotrópicos, com manto de intemperismo espesso que funciona de recarga para as fraturas (Beato *et al.* 2006; Mourão, 2007; Andrade, 2023) a recarga calculada para esse aquífero foi de 18% com uma condutividade hidráulica de  $2,64 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  (Freitas & Bacellar, 2013). Beato *et al.* (2006) classificou as águas desses aquíferos como sendo bicarbonatadas cálcico-sódico-magnesianas, frias, levemente ácidas e pouco mineralizadas.

Acima está o aquífero Rio das Velhas que ocupa grande parte da porção central da área de estudo. São fissurais, descontínuos, anisotrópicos e heterogêneos (Beato *et al.* 2006) com uma taxa de recarga de 20% (Magalhães *et al.* 2022) a 37% (Mourão, 2007). É pouco produtivo e com uma espessura média variando de 200 a 1500 metros (Andrade, 2023), além disso possui um alto índice de fluxo de base (IFB), onde localmente pode se comportar como um aquífero produtivo devido a alta heterogeneidade (Magalhães *et al.* 2022). Mourão (2007) destaca a química dessas águas com uma grande variabilidade, com pH levemente ácidos a levemente básicos, de média a alta mineralização, classificadas como bicarbonatadas cálcico-magnesianas.

O aquífero é heterogêneo e anisotrópico, predominantemente livre, mas localmente confinado, com espessuras variando de 200 m a 1000 m, composto por quartzitos e

conglomerados da formação moeda (Andrade, 2023). Magalhães *et al.* (2022) calculou os parâmetros hidráulicos para o aquífero na porção norte do sinclinal moeda, onde foram identificadas condutividade hidráulica média de  $2,59 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , transmissividade média de  $4,60 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  e armazenamento médio de  $1,40 \times 10^{-1}$ . A taxa de recarga no aquífero, segundo Magalhães *et al.* (2022), foi dada pela média das recargas dos aquíferos Cauê e Gandarela, representando aproximadamente 27%. Mourão (2007) classificou as águas desse aquífero como sendo bicarbonatadas cálcico-magnesianas, de condutividade variada, de pouco a muito mineralizadas, pH levemente ácido (6,3).

Em seguida tem-se o aquífero batatal que é composto por filitos homogêneos com espessura de aproximadamente 100 m, com boa capacidade de armazenamento mais uma incapacidade de transmitir água, podendo funcionar como uma camada confinante do aquífero anterior (Andrade, 2023). Sua recarga, calculada por Magalhães *et al.* (2022), foi de apenas 6%. Mourão (2007) calcula uma condutividade hidráulica de  $6,9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  a  $8,7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  e indica que tais valores estão relacionados a geometria dos planos de foliação, destacando também a alta porosidade e permeabilidade. A autora também destaca a química da água desse aquífero, coletada na faixa tectônica Tamanduá-Mutuca, como sendo bicarbonatada cálcico-magnesianas, com presença de metais pesados, alta mineralização e caráter redutor.

O mais importante aquífero da área, Cauê, segundo Mourão (2007), Magalhães *et al.* (2022) e Andrade (2023) devido à alta produtividade de seus poços, com porosidade fissural e granular, caráter heterogêneo e anisotrópico, sendo majoritariamente livre, mas podendo se apresentar confinado – onde vai apresentar as maiores produtividades. Seus parâmetros hidrodinâmicos são variados, sua condutividade hidráulica é em média  $9,45 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , sua transmissividade média de  $9,75 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  e seu armazenamento médio de  $2,86 \times 10^{-1}$  (Magalhães *et al.* 2022). Sua taxa de recarga tanto por Magalhães *et al.* (2022) quanto por Mourão (2007) é de 39% com um IFB alto devido a alta permeabilidade e condutividade hidráulica. Mourão (2007) destaca a variabilidade composicional das águas dessa unidade, indicando influência de águas de outros aquíferos e presença antrópica. A mesma autora coloca que são águas pouco mineralizadas e de baixa condutividade elétrica, com pH semelhante ao de águas meteóricas. de Paula *et al.* (2018) ao analisar 3 grupos de água sobre o aquífero Cauê classificou as águas sendo predominantemente bicarbonatadas mistas a magnesianas, já Mourão (2007) identificou águas com maior presença de sais, podendo ocorrer águas bicarbonatadas sódicas na região.

Acima do aquífero Cauê se encontra o aquífero Gandarela, em rochas dolomíticas formando aquífero cárstico-fissural, heterogêneo e anisotrópico com capacidade específica de  $2,8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  (Mourão, 2007). Andrade (2023) identificou que o aquífero se apresenta livre ou confinado e com espessura aproximada de 750 m, já Magalhães *et al.* (2022) colocaram sua espessura entre 20 m e 1650 m. A taxa de recarga média desse aquífero por Andrade (2023) é de 28%, para Magalhães *et al.* (2022) é de 17%, para Mourão (2007) é de 22%. A condutividade hidráulica média identificado por Magalhães *et al.* (2022) foi de  $7,38 \times 10^{-8} \text{ m}/\text{s}$ , a transmissividade média de  $5,71 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  e o armazenamento de  $5,60 \times 10^{-2}$ . Mourão (2007) destaca, por meio de dados hidroquímicos, a diferença que pode haver da vazão dentro desse aquífero, destacando a baixa vazão do homoclinal curral e a alta do sinclinal moeda. A autora classifica a água como de pH levemente ácido à básico (6,8 – 8,4), de condutividade elétrica média e pouco mineralizada, sendo denominada como bicarbonatada cálcico-magnésiana, magnésiano-cálcica ou apenas cálcica, dados semelhantes foram observados por de Paula *et al.* (2013).

Aquífero Piracicaba é composto pelo grupo Piracicaba e pelas formações Taboões, Barreiro, Fecho do Funil e Cercadinho (Zupo, 2024). Andrade (2023) classifica este aquífero como fissural, heterogêneo, anisotrópico e de baixa produtividade, além disso possui grande espessura, de aproximadamente 2000 m. Magalhães *et al.* (2022) e Andrade (2023) identificam esse aquífero como confinantes dos aquíferos Cauê e Gandarela. CBH Rio das Velhas (2013) coloca a condutividade hidráulica variando de  $5,05 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{s}$  a  $5,05 \times 10^{-9} \text{ m}/\text{s}$ . Magalhães *et al.* (2022) calculou a recarga deste aquífero em 12%. A hidroquímica feita por Mourão (2007) separa as águas desse aquífero em duas formações, Taboões e Cercadinho, enquanto o primeiro tem a química semelhante ao aquífero Moeda, anteriormente descrito, o segundo já apresenta menores valores de cálcio-magnésio, mas ambas possuem classificação de bicarbonatadas cálcio-magnésianas. A autora coloca a maior concentração de Ca e Mg nas outras formações devido a influência de águas de rochas carbonáticas de formações sobrejacentes, como a fecho do funil (estratigrafia invertida) e a redução por troca de bases nas porções pelíticas da formação Cercadinho.

O aquífero Estrada Real compreende os grupos Itacolomi e Sabará. Andrade (2023) classifica esse aquífero, através do Grupo Itacolomi, como sendo heterogêneo e anisotrópico. Sua condutividade hidráulica é de  $5,05 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{s}$  (CBH Rio das Velhas, 2013). Andrade (2023) descreve a porção do aquífero representado pelo Grupo Sabará como espesso, com aproximadamente 3000 m de espessura e baixa produtividade, semelhante ao grupo aquífero

Piracicaba, de no máximo 0,58 m<sup>3</sup>/h/m. Mourão (2007), descreve a química das águas dessa unidades, por meio da formação sabará, onde foi observado características semelhantes a unidade aquífero Rio das Velhas descrita anteriormente, com pH ácido a básico e condutividade elétrica de baixa a alta, com maior mineralização em rochas associadas a formações carbonáticas, sua classificação é de bicarbonatada cálcico-magnesianas.

O aquífero de suítes intrusivas apresenta distribuição heterogênea pela área. MDGEO (2005) descreve eles como barreiras hidráulicas, Zupo (2024) os caracteriza como de porosidade e permeabilidade secundária, já Mourão (2007) fala que essa porosidade pode ser afetada por estruturas tectônicas que aumentam o escoamento.

Por fim, recobrando todos esses aquíferos, têm-se os aquíferos de depósitos sedimentares ou aquíferos de cobertura, sendo livres, descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos, relacionados aos aluviões e coberturas detrito-lateríticas (Andrade, 2023). Mourão (2007) o coloca como principal zona de recarga dos aquíferos subjacentes, devido a alta condutividade hidráulica. Possui elevada porosidade e condutividade de  $2,52 \times 10^{-4} m/s$  (CBH Rio das Velhas, 2013). Quimicamente esses aquíferos foram divididos em dois grupos: relacionados às cangas e lateritas e relacionado aos elúvios e colúvios. O primeiro apresenta maior mineralização e pH neutro com condutividade elétrica intermediária (~50 µS/cm), já o segundo são águas mais ácidas (5,83-5,97) de baixa condutividade. De forma geral são classificadas como bicarbonatadas cálcico-magnesianas (Mourão, 2007).

A figura 5 mostra o mapa de unidades aquíferas da área do alto velhas feito com base nos trabalhos de Magalhães *et al.* (2022), Andrade (2023) e Zupo (2024).

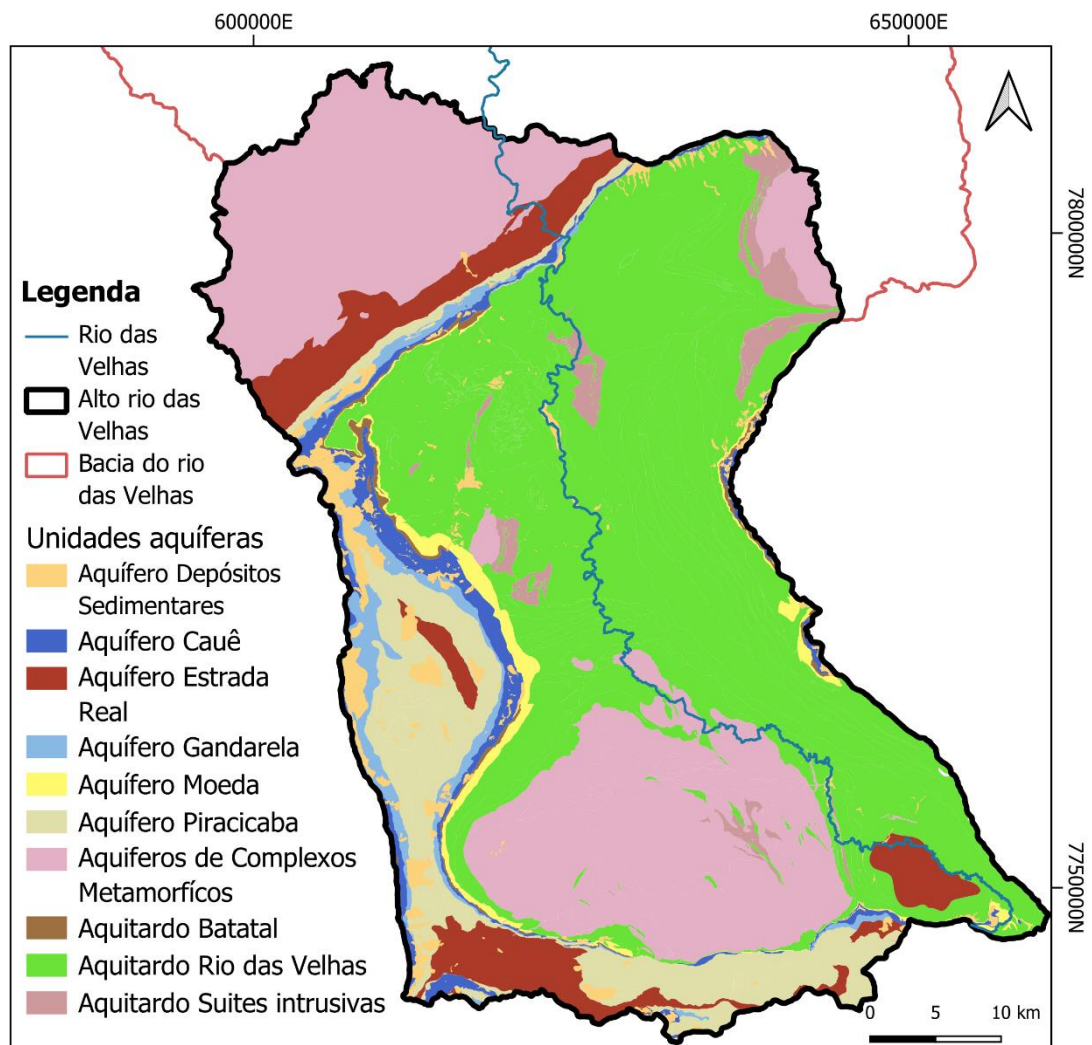


Figura 5 - Mapa de unidades aquíferas da região do alto rio das Velhas. Modificado de Magalhães et al.(2022), Andrade (2023) e Zupo (2024). Sistema de coordenadas: SIRGAS 2000 UTM Zona 23S.

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1 Banco de dados**

Os bancos de dados utilizados neste trabalho são da/o: HIDROWEB da Agência Nacional de Águas – ANA; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE; SIGA-Rio das Velhas; Instituto Nacional de Meteorologia – INMET; Sistema integrado de Informação Ambiental – SIAM pertencente a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento – SEMAD do Governo do Estado de Minas Gerais; Serviço Geológico do Brasil – SGB; e Projeto Map Biomas.

Diversos softwares foram utilizados para construção deste trabalho. Para gestão de dados, o *Microsoft Excel* 2016, nele foram compilados e ajustados dados diversos, que alimentaram outros *softwares*. Para confecção de gráficos, foi utilizada a versão 2.7 do *SciDavis*, com enfoque nos plots de colunas e histogramas e em regressões lineares. Para o geoprocessamento, foi utilizada a versão 3.34 do *Qgis*, com funções de interpolação IDW (Inverso da distância), polígonos de voronoi (neste trabalho identificado como polígonos de Thiessen), além de ferramentas básicas como de recorte, sobreposição, interseção, etc., para ajustes de feições.

### **5.2 Influência climática**

#### **5.2.1 Pluviometria**

O levantamento pluviométrico foi feito por meio do banco de dados do HIDROWEB, site pertencente à Agência Nacional de Águas (ANA). Foi feito um levantamento das estações pluviométricas de dados convencionais disponíveis dentro da área e nos entornos, resultando em um total de 36 estações. Após isso os dados foram planilhados e selecionados as séries que possuíam dados de pelo menos 30 anos completos dentro do período analisado (1970-2020). Posteriormente, foram especializadas as estações e selecionadas aquelas com maior quantidade de séries completas e que fossem mais representativas dentro de distâncias para garantir maior variabilidade e representação dos dados da área, resultando em um total de 8 estações (figura 6) que foram utilizadas para construir esse trabalho.

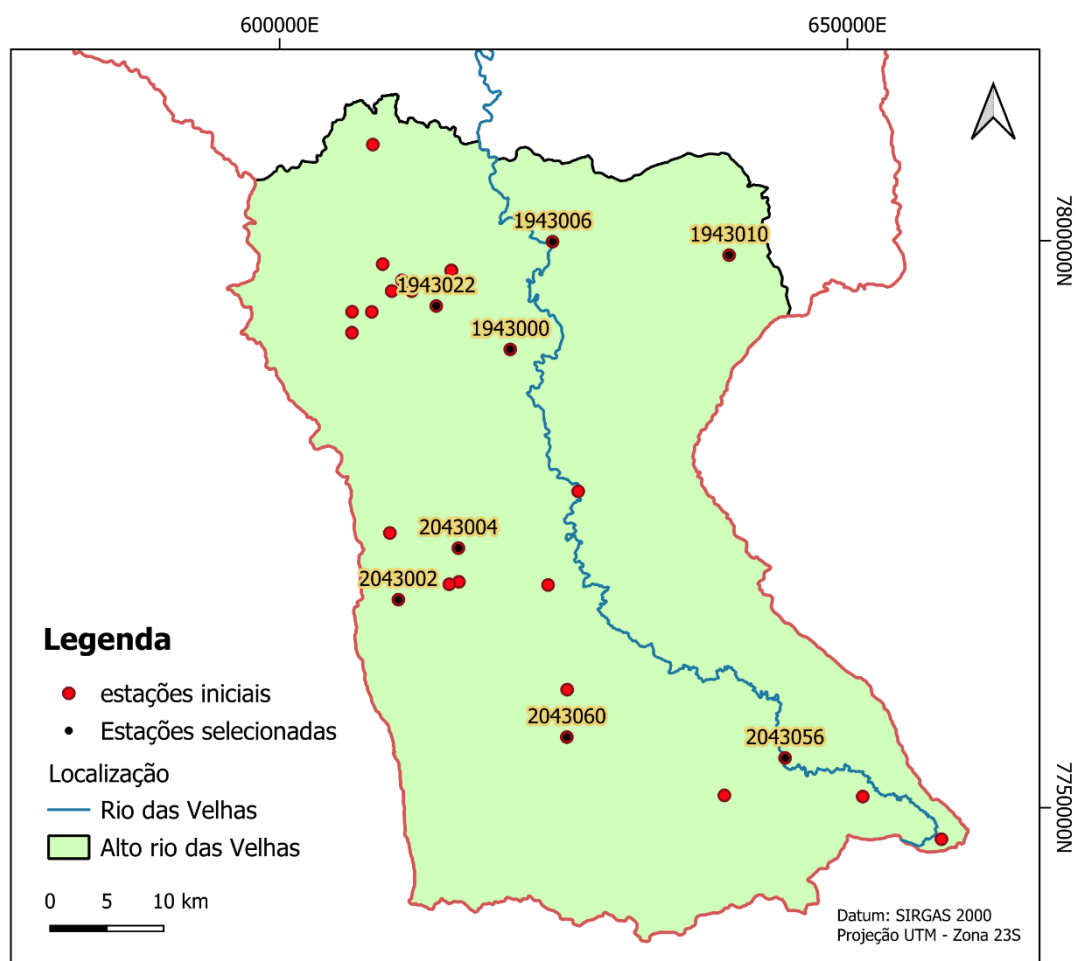


Figura 6 - Mapa de localização das estações pluviométricas do HIDROWEB/ANA na bacia do Alto rio das Velhas. Em vermelho as 36 estações iniciais e em preto as estações selecionadas pelos critérios das séries contínuas e de pelo menos 30 anos.

As planilhas geradas no site foram recalculadas para garantir o valor exato em todo período analisado.

### 5.2.2 Polígonos de Thiessen

O método desenvolvido por Thiessen (1911) consiste em uma média ponderada que leva em conta um polígono de influência de uma estação pluviométrica. Para sua realização, que pode ser feita manual ou digitalmente, é traçado linhas que ligam as estações, na mediatriz dessas linhas é traçada uma reta perpendicular que é descontinuada quando toca a perpendicular de outra linha, assim formando polígonos.

O cálculo da pluviosidade média é feito segundo a equação 1:

$$P_m = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$A_i$  = Área de influência da estação

$P_i$  = Precipitação em milímetros da estação

$A$  = Área total do estudo

$P_m$  = Precipitação na bacia

Foram utilizadas 8 estações pluviométricas (figura 6) que ocupassem o mais homoganeamente possível a área de estudo e que possuíssem séries completas. Para gerar os polígonos, foi preparada uma planilha contendo coordenadas, código da estação e a média pluviométrica do período de 1970 a 2020 em cada estação. Após isso foi inserido a planilha no Qgis v3.34 para que assim fosse utilizada a função “Polígonos de Voronoi” que gerasse os 8 polígonos referentes às estações. Por fim, foi utilizada a função “Adicionar atributos de geometria” para calcular a área de cada polígono gerado. Com todos os dados, foi calculada a pluviometria média pelo método de Thiessen para bacia.

### 5.2.3 Isoietas

O método de isoietas consiste em uma interpolação de dados pluviométricos para gerar linhas equipotenciais de chuva em uma determinada área. Tabios e Salar (1985) e Coleiro *et al.* (2021) comparam métodos de interpolação para dados pluviométricos e concluem que métodos geoestatísticos (como krigagem) são mais robustos, mas apontam que métodos determinísticos (IDW) apresentam resultados satisfatórios.

Para esse trabalho foi aplicado o método determinístico *Inverse Distance Weighting* (IDW), devido ao menor custo computacional, baixa quantidade de pontos e ainda obter um resultado satisfatório mesmo não sendo o mais robusto.

O método consiste em uma interpolação não linear que utiliza vizinhos próximos e atribui pesos para eles, onde o vizinho mais próximo possui um peso maior do que o vizinho mais distante. A equação 2 mostra como é feita essa interpolação.

$$\hat{v}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d^p_i} v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d^p_i}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$\hat{v}_i$  = Valor a ser estimado

$v_i$  = Valor conhecido

$d_i$  = Distância de n pontos

$n$  = Quantidade de pontos

$p$  = peso dada ao ponto estimado

O método foi executado via software Qgis v3.34, com a função “interpolador IDW”. E o resultado foi ajustado manualmente com as ferramentas de edição de feições do próprio *gis*.

O cálculo da pluviosidade média pelo método das isoietas (equação 3) é dado por:

$$P_m = \frac{\sum[A_{i,i+1} \times \frac{P_i + P_{i+1}}{2}]}{A} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$A_i$  = área entre as isolinhas utilizadas

$P_i$  = Valor da isolinhas

$A$  = Área total da bacia

Foram escolhidos dois métodos de avaliação da pluviometria média para a área de estudo como uma forma aumentar a sensibilidade da informação, visto que os dados geram diferentes superfícies para cálculo da pluviosidade.

#### 5.2.4 Temperatura

O banco de dados de temperatura foi retirado do site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Inicialmente foram identificadas 6 estações na área e seus entornos (figura 7), mas apenas 1 estação, a Belo Horizonte, foi selecionada devido aos seus dados estarem com séries mais completas e com menor quantidade de dados vazios, enquanto as outras estações possuíam dados muitos espaçados. A estação se encontra dentro da área de estudo, embora a temperatura não sofra tanto influência pela geografia local, o dado ainda se torna mais representativo pelo menor espaço entre a estação e a localidade analisada.

A estação Belo Horizonte possuía alguns meses sem dados, alguns em sequência outros espaçados entre os anos, porém, para a construção dos dados, foi usada médias mensais por década, e por isso, não afetava a média esperada para aquele mês a ausência de um dado. Os dados de temperatura alimentaram os cálculos de Thornthwaite e Mather (1955).

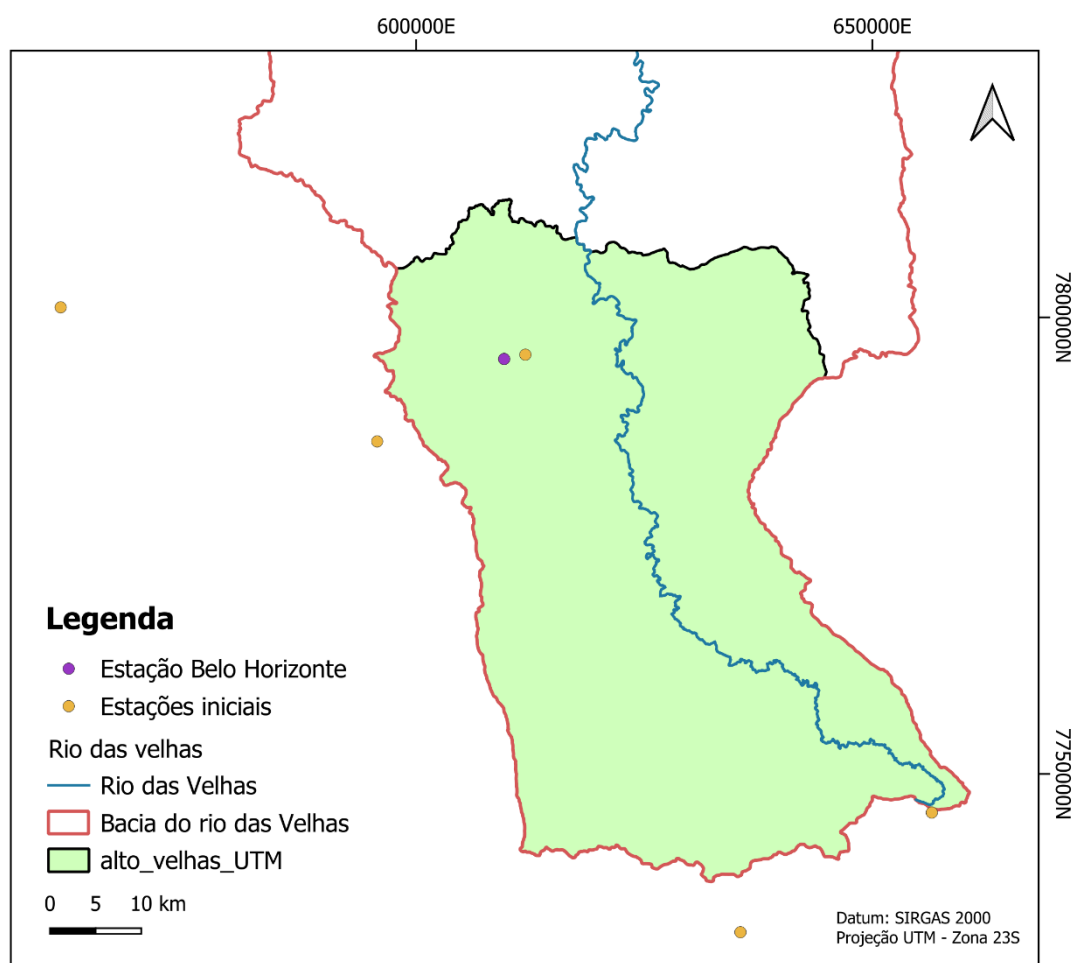


Figura 7 - Mapa de localização das estações automáticas do INMET, com destaque para a estação Belo Horizonte (roxo), usada para compor o banco de dados deste trabalho, e as demais estações (amarelo).

### 5.2.5 Balanço Hídrico

Proposto por Thornthwaite (1948) e complementado por Thornthwaite e Mather (1955), o método consiste em uma sequência de cálculos e relações para determinar características do regime hídrico de uma área.

- I. Cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) (equação 4), segundo Thornthwaite (1948):

$$ETP = 16bi\left(\frac{10t}{I}\right)^\alpha \quad (\text{Equação 4})$$

Onde ETP é a evapotranspiração potencial,  $bi$  parâmetro de radiação para latitude específica,  $t$  é temperatura média mensal,  $I$  nível de calor da região (Equação 5) e  $\alpha$  índice de calor calculado por função complexa (equação 6).

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\alpha = 6,75 \times 10^{-7} I^3 + 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} I + 0,49239 \quad (\text{Equação 6})$$

Associado a ETP, é utilizado o Capacidade de Água Disponível (CAD), que para esse trabalho foi utilizado o Atlas de Irrigação, da Agência Nacional de Águas, que coloca o CAD de cada município do Brasil (ANA, 2021).

- II. Cálculo do Potencial Acumulado de Perda de Água (PAPA), dado por P-ETP. Onde P é a precipitação. Dois cenários podem acontecer (equação 7):

$$\begin{aligned} P - ETP &> 0 \\ P - ETP &< 0 \end{aligned} \quad (\text{Equação 7})$$

Para  $>0$ , PAPA é igual a 0; Para  $<0$ , é somado um valor para que fique igual a 0. Isso significa uma demanda atmosférica de umidade, quando o resultado é positivo, a atmosfera não precisa ser recarregada e a água seguirá para outras funções, quando negativo, a atmosfera está com déficit.

- III. Tendo os dados anteriores alguns cenários são calculados para o armazenamento com base nas equações de Mendonça (1958).

PAPA  $< 0$ :

$$ARM_n = ARM_{n-1} \times e^{\left(\frac{PAPA}{CAD}\right)_n} \quad (\text{Equação 8})$$

PAPA  $> 0$ :

$$ARM_n = ARM_{n-1} + PAPA \text{ para ARM distante do CAD} \quad (\text{Equação 9})$$

$$ARM_n = CAD, \text{ para armazenamento muito próximo do CAD.} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde o ARM é o armazenamento.

Esses valores são calculados mês a mês e a equação aplicada vai depender do mês avaliado.

IV. Agora é calculada a Evapotranspiração Real (ETR) levando em conta dois cenários.

$$ETR = ETP \text{ se } ALT > ETP \quad (\text{Equação 11})$$

$$ETR = P + |ALT| \text{ se } ALT < ETP \quad (\text{Equação 12})$$

Onde ALT é a dado por:

$$ALT = ARM_{mês} - ARM_{mêsanterior} \quad (\text{Equação 13})$$

V. Por fim é calculado o déficit (DEF) e o excedente hídrico (EXC) mensal.

Para déficit (DEF):

$$DEF = ETP - ETR, \text{ para todo } PAPA < 0. \quad (\text{Equação 14})$$

Para excedente (EXC):

$$EXC = PAPA > 0 - ALT \quad (\text{Equação 15})$$

Feitos os devidos cálculos é possível gerar gráficos e tabelas com dados mensais da evolução hídrica da área de estudo. As equações 7 a 15 geram os dados do extrato do balanço hídrico, e ajudam a entender dinâmicas da área.

Para esse trabalho, foi utilizada uma planilha automatizada para calcular mais rapidamente o balanço hídrico desenvolvido por Rollin, Sentelha e Barbieri em 1998, sendo necessário apenas dados de temperatura, precipitação, CAD e latitude.

### 5.2.6 Índice de aridez

O índice de aridez (Ia) foi inicialmente proposto por Thornthwaite (1948) e adaptado por Cunha & Martins (2009) onde o Ia foi calculado segundo a equação 15.

$$Ia = CAD \times \frac{DEF}{ETP} \quad (\text{Equação 15})$$

Os dados são obtidos durante o balanço hídrico anteriormente descrito. Os resultados

são comparados com a Tabela 1 para classificação do índice.

Tabela 1 - Chave de classificação climática segundo Thornthwaite (1948), baseado no índice de aridez (Ometto, 1981)

<b>Climas úmidos (A, B<sub>4</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>)</b>	<b>Índice de aridez (Ia)</b>
<b>r</b> – Pequena ou nenhuma deficiência de água	0 – 16,7
<b>s</b> – Moderada deficiência no verão	16,7 – 33,3
<b>w</b> – Moderada deficiência no inverno	16,7 – 33,3
<b>s<sub>2</sub></b> – Grande deficiência no verão	>33,3
<b>w<sub>2</sub></b> – Grande deficiência no inverno	>33,3

Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2009)

Para esse trabalho, foi adotado o período de deficiência “w”, devido ao período de seca ser no inverno.

### 5.3 Fluviometria

Semelhantemente os dados de pluviometria, os dados fluviométricos foram retirados da plataforma HIDROWEB – ANA, iniciando com um total de 5 estações na bacia ou próxima a ela (figura 8). As estações foram selecionadas de acordo com as que possuíam a maior quantidade de dados dentro dos 50 anos estudados e que estivessem na calha do rio principal, finalizando em 3 estações fluviométricas, onde duas estão dentro da área de estudo e uma está a montante do alto rio das Velhas.

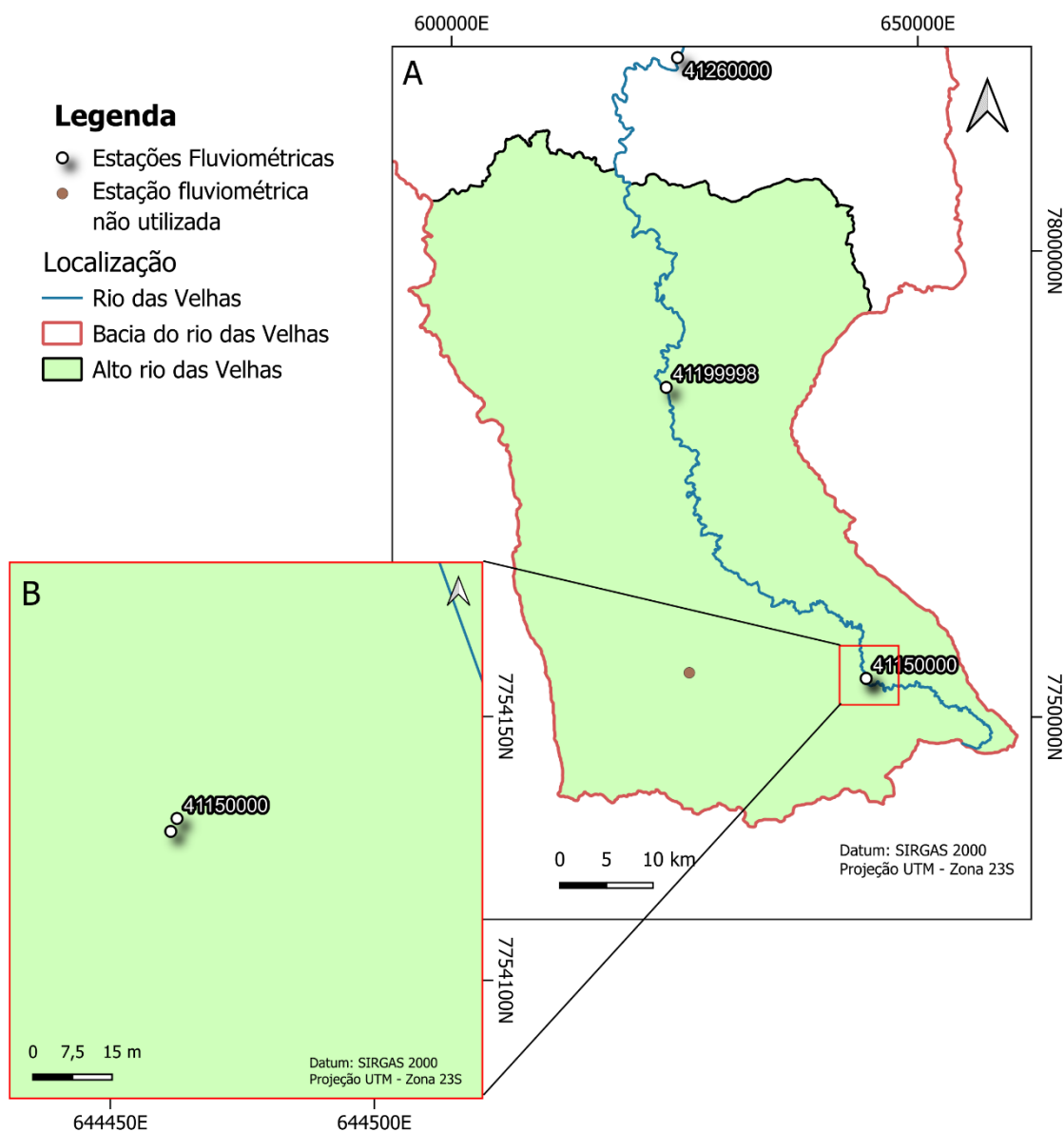


Figura 8 - Mapa de localização das estações fluviométricas do WIDROWEB/ANA na área de estudo e entornos. (A) Estações fluviométricas selecionadas (Branco) e estação não selecionada (marrom) por não estar no leito do principal rio da bacia, o rio das Velhas. (B) Ampliação da área da estação Fazenda Água Limpa para identificação das duas estações que foram representadas como apenas uma, devido a uma provável reativação da estação por meio de um novo processo.

A estação Fazenda água limpa e Fazenda água limpa montante foi representada na forma de uma única estação devido ao fato de serem dois processos separados de uma mesma localização de dados que se complementam.

Foram refeitos as médias mensais para garantia do dado correto visto que foram identificados dados sem utilização completa de todos os dados diários, mesmo que a planilha gerada disponibilize esse dado.

## 5.4 Influências antrópicas

### 5.4.1 Uso e ocupação

Para o uso e ocupação foi utilizada a base de dados do projeto MapBiomias v.9, cujo banco de dados se iniciou em 1985. Para avaliar a evolução do uso e ocupação de forma mais dinâmica e compatível com a área de estudo foram feitos filtros nos dados para que melhor expressassem as características necessárias.

Primeiramente foram destacadas as urbanizações e as minerações da área, onde o primeiro engloba casas, comércios e indústria. Esse filtro foi utilizado para observar como o ser humano tem ocupado os espaços da bacia e como a mineração tem se espalhado, visto que a região engloba o Quadrilátero Ferrífero. Em um segundo momento foram selecionados anos representativos para cada década, a fim de observar a expansão das variáveis no tempo. O ano intermediário e coincidente com o início dos dados foi visto como mais representativo, logo foram comparados os anos de 1985, 1995, 2005 e 2015.

### 5.4.2 Captações subterrâneas e superficiais

Os dados de captações subterrâneas e superficiais foram cedidos pelo órgão gestor de águas do Estado de Minas Gerais, o Igam, por meio de uma planilha *Microsoft Excel* contendo todos os processos que o Estado já possuiu/possui – considerando processos deferidos, renovados, cancelados, indeferidos, etc.

Para a consistência dos dados foi feito uma série de filtros e avaliações estatísticas:

- I. Identificação dos processos pertencentes a bacia estadual do rio das Velhas na coluna “Bacia Estadual Recurso”;
- II. Separação entre captação superficial e subterrânea na coluna “Tipo”;
- III. Separação entre uso insignificante e outorgado por meio da coluna “Uso Insignificante”;
- IV. Identificação de poços que possuam os seguintes dados: Vazão e Coordenadas;
- V. Definição do tempo de atividade dos poços e captações superficiais pelos seguintes parâmetros:
  - a. Para poços, aqueles que possuíam “ano da perfuração” e “data de vigência da certidão”, foi considerado a diferença entre os anos deles. Para aqueles que possuíam apenas a data de perfuração, foi considerada

a data do processo mais nova para determinação do tempo de atividade. Para os que possuíam apenas a “data de vigência da certidão”, foi reduzido 25 anos. Para os poços que não possuíam nem “ano da perfuração” e “data de vigência da certidão”, foram descartados.

- b. Para captações superficiais foi feito algo semelhante, porém foi considerado apenas a “Data de vencimento. Portaria” e “Finalidades”. Aqueles que possuíam abastecimento público com finalidade, foram reduzidos 35 anos da data de vencimento da portaria para definir o início da captação. Aqueles que tinham qualquer outra finalidade, foram reduzidos a 10 anos da data de vencimento da portaria. Os que não possuíam a data de vencimento, foram descartados.

- VI. Por fim, foram feitas validações no *software Qgis* v3.34. Onde foram consistidas as localizações dos poços e captações nos municípios declarados, ou seja, ver se o município indicado na planilha coincidia com a coordenada informada. Aqueles que não coincidiam, foram descartados.

Não foi verificado se dois ou mais processos pertenciam ao mesmo poço, apenas se os dados não se sobrepõem geograficamente, o que já garante, em parte, que os poços não sejam os mesmos. A quantidade inicial de poços foi de 6638, e, após a consistência, foram utilizados 2838, onde 2148 são outorgados e 690 de uso insignificante. Já as captações se iniciaram com 1442 e, após a consistência ficaram 1266, onde 168 são outorgadas e 1098 de uso insignificante.

## 6 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 6.1 Influência climática

#### 6.1.1 Caracterização pluviométrica

Nos últimos 50 anos as chuvas na região do Alto rio das Velhas se distribuíram de forma heterogênea, variando anual ou localmente. A fim de olhar a área com mais detalhe, ela foi subdividida utilizando dos polígonos gerados pelo método de Thiessen, representados pelas 8 estações pluviométricas previamente selecionadas (Figura 6), já que essas áreas representam melhores variações detalhando melhor o comportamento pluviométrico da área. Utilizando-se das 8 estações, foi construída a série histórica de cada uma na figura 9, onde é possível observar o comportamento da chuva através das médias anuais de cada ponto de medição. Embora haja anos onde a curva correspondente a uma determinada estação não coincide inteiramente com o padrão daquele ano, a figura mostra um comportamento global pluviométrico similar em todas as 8 áreas, mas não homogêneo, visto que é possível observar uma alta amplitude entre uma estação e outro em um mesmo ano, podendo superar os 700 mm, demonstrando assim que fatores geográficos distribuem heterogeneamente a quantidade de água meteórica que alimenta a região. Outro ponto a se observar são as amplitudes interanuais, onde a variação de chuva em uma mesma estação pode superar os 1000 mm, indicando mudanças externas à bacia, onde é disponibilizado para o meio menor ou maior quantidade de chuvas.

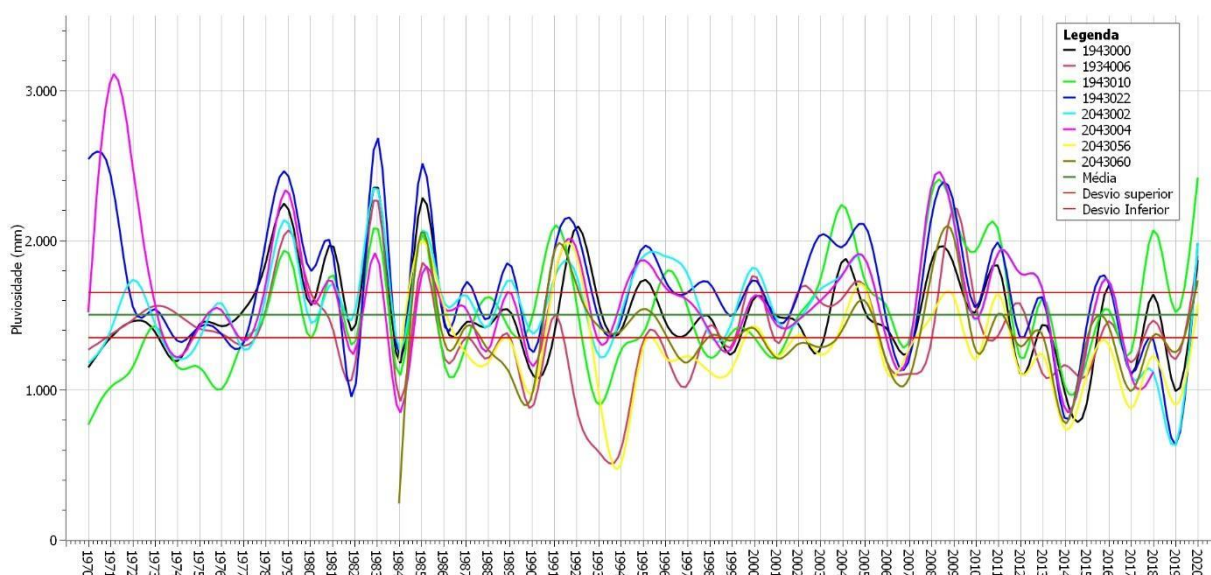


Figura 9 - Gráfico de pluviosidade média por estação com indicação da média global dos 50 anos analisados e seu desvio de  $\pm 10\%$ . Os dados se comportam de forma semelhante em todas as 8 estações analisadas, havendo pequenas dissonâncias em anos diferentes.

A média global calculada para o período estudado, de 1970 a 2020, através da média

anual de todas as estações, foi de 1498,02 mm anuais, semelhante ao encontrado por Nery (2016) e Cruz *et al.* (2022). É possível notar valores extremos (outliers), mas que não afetam os valores médios para área, visto que há um grande volume de dados que compensam esse valor, sendo não necessário sua remoção.

O gráfico também mostra que estação 1943022 (azul escuro) mantém as maiores médias anuais durante todo o período, enquanto a estação 2043056, desde sua entrada em 1984, apresenta as menores médias na maior parte do período analisado. As demais estações apresentaram valores intermediários.

É possível observar ciclos hidrológicos na Figura 10 diferenciados por cor, das médias globais anuais, onde azul são ciclos com chuvas acima da média global e laranja abaixo da média global. A linha de cor vermelha representa uma regressão linear feita que mostra a tendência da pluviometria por ciclo na área. O primeiro e último ciclos foram descartados dos ciclos já que não foi possível identificar seu real início – antes dos anos de 1970 - e seu final – depois do ano de 2020 – respectivamente.

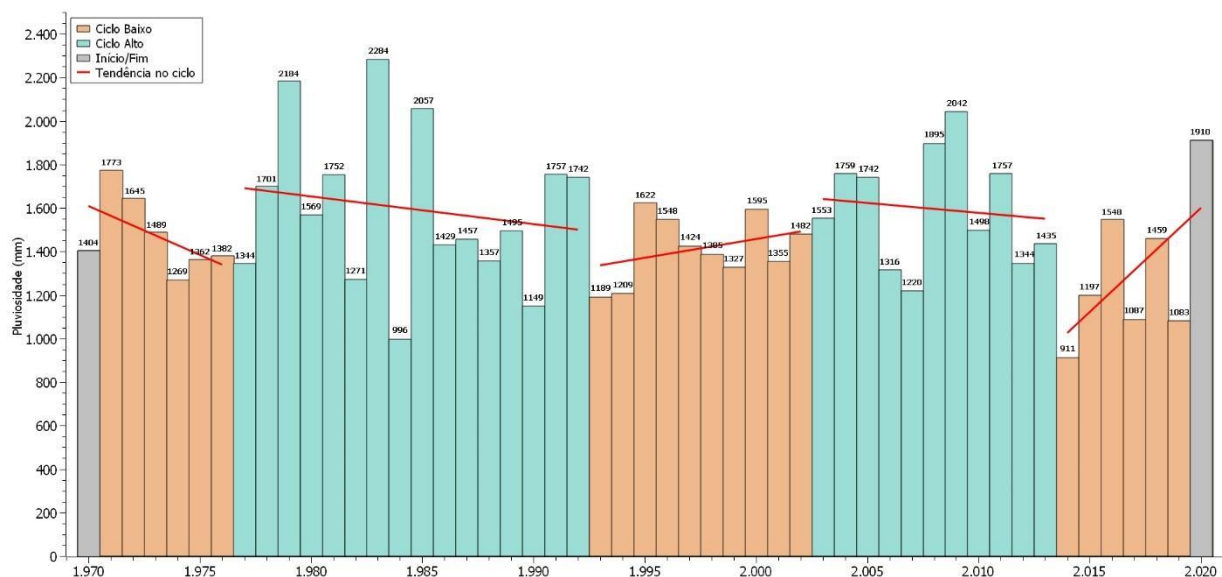


Figura 10 - Média pluviométrica com identificação de ciclos hidrológicos e suas respectivas tendências nos últimos 50 anos na bacia do Alto rio das Velhas. Os ciclos de alta pluviométrica (azul) se destacam por maiores valores em relação à média global, enquanto os ciclos de baixa pluviométrica (laranja) valores abaixo da média. O início e fim (cinza) do período de análise estão destacados para mostrar a incompletude do inicial e final.

Os ciclos de alta, mostram um caráter geral levemente descendente, enquanto o de baixa mostra-se ascendente. As retas de tendência mostram reduções entre 9 e 12 mm nos ciclos de alta e aumento de 17 mm no ciclo de baixa (completo). O primeiro e último ciclo mostram redução de 45 e aumento 95 mm, respectivamente, mas por não apresentarem início e fim bem definidos não representam valores reais.

Em relação a distribuição da chuva ao longo dos dias no período analisado, tem-se na Figura 11 a relação, ano a ano, entre dias de chuva e a pluviosidade média anual, além disso, mostra duas retas de tendência para ambos os dados.



Figura 11 - Gráfico da média dos dias de chuva (Laranja) e pluviosidade média anual (verde) por ano na bacia do alto rio das Velhas, no período de 1970 a 2020. Indicação da tendência de ambas as variáveis por meio de uma regressão linear que indica uma redução no nos últimos 50 anos, onde ambos mantêm proporção semelhante.

O resultado mostra que a pluviosidade média anual não demonstra um padrão com os dias de chuva na área de estudo, isto é, não há uma relação direta entre ter mais ou menos dias de chuva com maior ou menor volume de água. Melhor exemplificando, observa-se que nos anos de 1984 onde se tem 124 dias de chuva e apenas 995 mm acumulados, contrapondo o ano de 2020, que acontece o contrário, onde, em apenas 80 dias, choveu 1910 mm. Esses dois anos mostram extremos na bacia, mas não representam os eventos do meio século, apenas exemplificam que não há um padrão. Outro exemplo é quando se olha para 1985, ano seguinte ao observado anteriormente, teve-se 110 dias de chuva e 2050 mm de chuva, ou seja, muitos dias e muita chuva, demonstrando assim que não é possível estabelecer uma relação direta entre dias de chuva e quantidade de chuva. Após se fazer regressão linear em ambos é notada uma tendência de diminuição, que possivelmente está atrelada a mudanças climáticas que vêm sendo observadas nas últimas décadas.

Em média chove durante 3 meses e meio por ano na bacia, com uma média de 14,3 mm por dia ou 0,9% do total anual. É importante ressaltar que a maior parte desses dias está concentrada entre os meses outubro e abril e que essa distribuição não é homogênea entre os dias.

As relações entre dias de chuva e pluviosidade são importantes marcadores para

entender diversos fatores, entre eles o papel de recarga que a chuva tem para os aquíferos. As regressões lineares feitas mostram que a diminuição de chuva está levemente mais acentuada que a diminuição dos dias de chuva, o que em curto prazo pode não apresentar consequências visíveis, mas a longo prazo, atrelado a também redução dos dias de chuva, representará reduções significativas na recarga, além de impactos como enchentes e movimentos de massa, visto que a chuva, mesmo que menor, se concentra em poucos dias e o solo (principal meio de transmissão de águas meteóricas para a subsuperfície) não conseguirá absorver toda a água.

Ao se comparar os ciclos hidrológicos, anteriormente estabelecidos, com os dados de média de dias de chuva e pluviosidade (tabela 2) tem-se que os ciclos anteriormente observados possuem uma razão entre eles que se mantém constante. É observado um valor médio de 14,5 nos 3 ciclos centrais, bem semelhante a média global encontrada anteriormente de 14,3, isso representa uma proporcionalidade dentro da bacia, implicando que períodos mais ou menos chuvosos possuem uma distribuição homogênea durante os dias nos últimos 50 anos.

Tabela 2 - Razão entre pluviometria e dias de chuva dentro de cada ciclo hidrológico.

<b>Ciclo</b>	<b>Período</b>	<b>Pluviosidade média no ciclo (mm)</b>	<b>Média de dias de chuva no ciclo</b>	<b>Razão pluviosidade / dias de chuva</b>
Baixa	- 1976	1364	98	13,6
Alta	1977 - 1992	1611	110	14,6
Baixa	1993 - 2002	1447	101	14,3
Alta	2003 - 2013	1595	111	14,3
Baixa	2014 -	1305	91	14,3

A diferença da quantidade média de chuva entre o ciclo de baixa e os ciclos de alta é de aproximadamente 150 mm, mas tendo apenas 10 dias a mais de chuva, demonstrando assim, mais uma vez a proporção que se mantém dentro da bacia entre dias de chuva e pluviosidade.

Novamente, é importante reafirmar que, embora haja uma proporção clara de distribuição de chuva na bacia, a realidade se mostra distante dos valores e a redução observada nas variáveis, embora baixa, pode representar consequências significativas para a bacia no futuro.

As chuvas se distribuíram ao longo do último meio século de diferentes formas da região, sua variância local e temporal demonstra que diversos fatores redistribuem a chuva na região, mas isso tentará ser justificado à frente.

### 6.1.2 Espacialização Pluviométrica

A Figura 12 contém uma série de mapas que caracterizam os principais meios de controle da distribuição pluviométrica na região da bacia do Alto rio das Velhas. O primeiro mapa mostra a utilização de duas técnicas combinadas de avaliação de distribuição de chuva, isoietas e Thiessen, onde oito estações pluviométricas automáticas (2043060, 2043056, 1943010, 1943006, 1943000, 1943022, 2043002 e 2043004) foram usadas de base para sua construção. Ao lado estão 3 mapas, sendo dois deles o mapa dos polígonos de Thiessen e isoietas individualizados (Figuras 12 B e C, respectivamente) e o último o mapa das principais estruturas encontradas dentro do alto Velhas.

A região do Alto Rio das Velhas apresenta uma distribuição heterogênea de chuva, podendo ser dividida em 2 regiões principais, separadas pela Isoieta de 1500 mm de chuva que, coincidentemente, separa, quase que igualmente, em dois grupos de 4 polígonos de Thiessen.

O primeiro Grupo de polígonos compreende as estações 2043060, 2043056, 1943010 e 1943006, com pluviometria inferior a 1500 mm de chuva anualmente, mas que abrange aproximadamente 60% da calha do rio das Velhas. A menor quantidade de chuvas coincide com a cabeceira do Velhas, tendo valores inferiores a isolinha de 1300 mm/ano (polígono 2043056). Adicionalmente, os outros três polígonos que formam esse Grupo não atingem valores muito superiores de chuva embora os polígonos 2043060 e 1943010 possuam uma pequena área acima da Isoieta de 1500 mm, mas, em média, os valores são inferiores a 1400 mm. Em relação às estruturas da região, essas estações se encontram interna e/ou proximamente colocadas a elas, tal posição pode reduzir chuvas que chegam a área dessas estações, já que as estruturas funcionam como barreiras para a passagem de nuvens e umidade.

O segundo Grupo apresenta valores superiores a 1500 mm/ano e abrangem 40% da calha do rio sendo composto pelas estações 1943000, 1943022, 2043002 e 2043004. Diferente do primeiro Grupo, este chega a registrar até 1735 mm por ano de chuva na cidade de Belo Horizonte (estação 1943022). Chama atenção nesse grupo a localização das estações pluviométricas usadas, diferentemente das do primeiro, essas se encontram em regiões sem barreiras próximas, em especial as estações 1943022, 2043002 e 2043004, que estão sobre o Homoclinal do Curral e Sinclinal Moeda, respectivamente, e registram a maior pluviosidade da área. Já a estação 1943000, entre as 4 do grupo, representa a menor chuva com um valor de 1543 mm, mas ainda satisfazendo os critérios estabelecidos, porém se encontra em um local mais baixo aos pés do Homoclinal curral. Assim como o outro bloco, este possui uma pequena

área com valores inferiores a 1500 mm. A média do Grupo é superior a 1600 mm de chuva. Em resumo, a divisão entre dois grandes grupos pluviométricos foi a melhor forma de visualizar a distribuição de chuva na região.

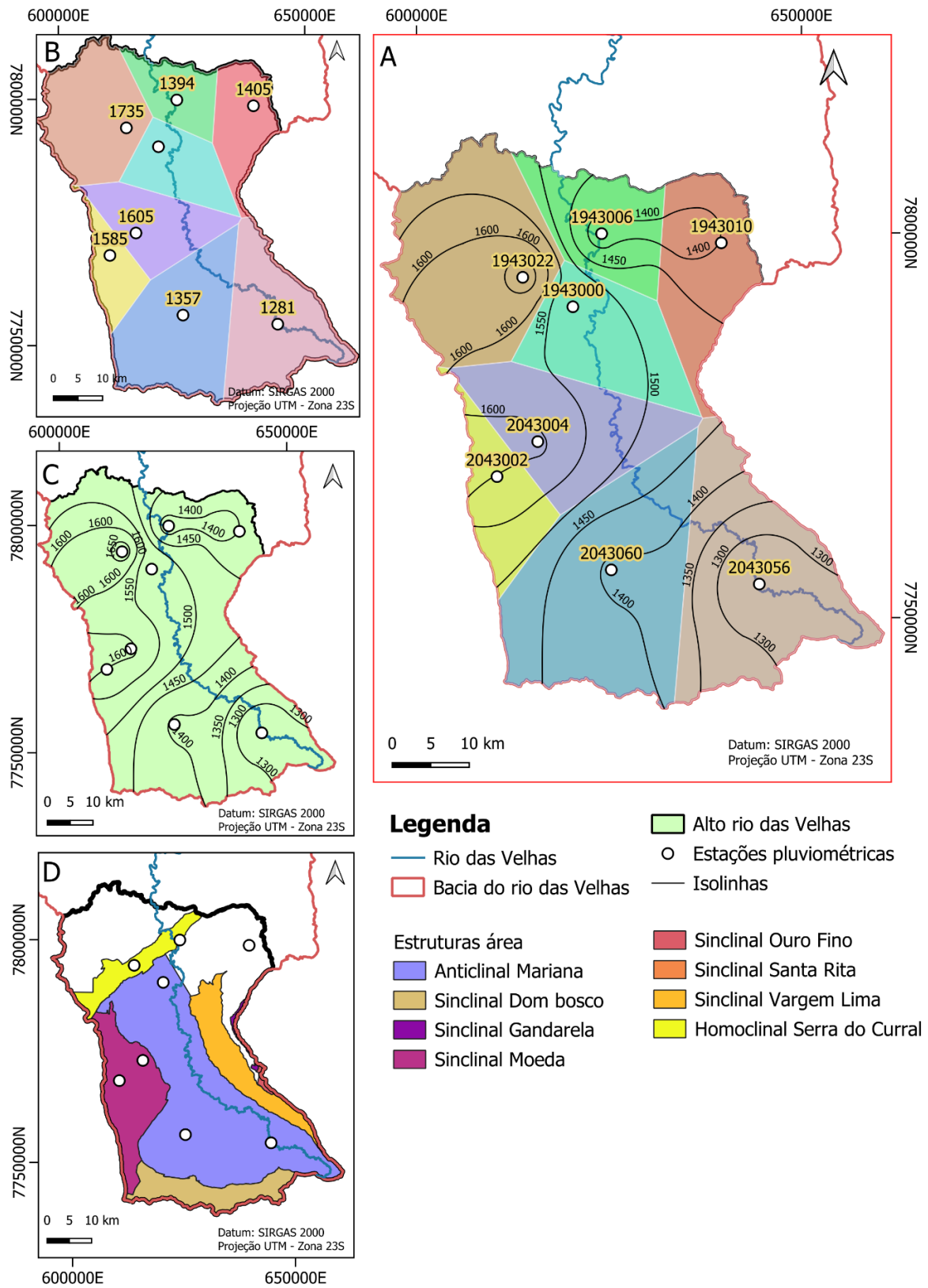


Figura 12 - Espacialização pluviométrica utilizando da média pluviométrica de cada estação entre 1970 e 2020. (A) Mapa de Thiessen + Isoietas com estações pluviométricas do HIDROWEB identificadas. (B) Mapa dos polígonos de Thiessen. (C) Mapa de isoietas (D) Mapa de estruturas megaestruturas da área de estudo com as estações pluviométricas (branco).

O método do polígono de Thiessen, teve como resultado uma média de chuva para área de 1526,68 mm/ano, com maior pluviometria na área da estação 1943022 e o menor na estação 2043056. Para título de comparação, quando calculada a média aritmética dos resultados encontrados pelo método, a pluviosidade resultou em 1488,25 mm, ou seja, quase 40 mm a menos que pelo método aplicado, porém, como Thiessen utiliza não só a pluviosidade, mas também pondera pela área (equação 1), ele se torna mais sensível a variações. Para o método de Isoietas, foi calculada (equação 3) uma pluviometria média de 1469,7 mm da área, nos últimos 50 anos.

Dentre as estações usadas, a estação 1943022 apresenta a maior série de dados, além de sofrer menores interferências pela geografia do local.

Os valores calculados pelos dois métodos mostraram uma diferença superior a 50 mm, tal diferença pode ser explicada pela complexidade da distribuição de chuvas na região, devido principalmente a configuração geográfica com vales e serras, que não são perceptíveis por nenhum dos métodos. Além disso, a interpolação gerou diversos círculos concêntricos, no método das isoietas, que tiveram que ser ajustados manualmente, podendo ter causado interferências. Entretanto, ambos os métodos obtiveram valores próximos ao encontrado anteriormente neste trabalho e em trabalhos referenciados, tornando os resultados obtidos satisfatórios, mas com ressalvas.

Quando se calcula a média dos valores obtidos por ambos os métodos, é encontrado o valor de 1498,19, valor igual ao calculado anteriormente no gráfico da seção 6.1.

### 6.1.3 Temperatura

A temperatura é um importante componente em diversos processos naturais e antrópicos. Observar sua variação ao longo do tempo é importante para ajudar a justificar diversos eventos. A Figura 13 mostra, por ciclo, a temperatura média anual na estação Belo Horizonte, além da tendência, também por ciclo.

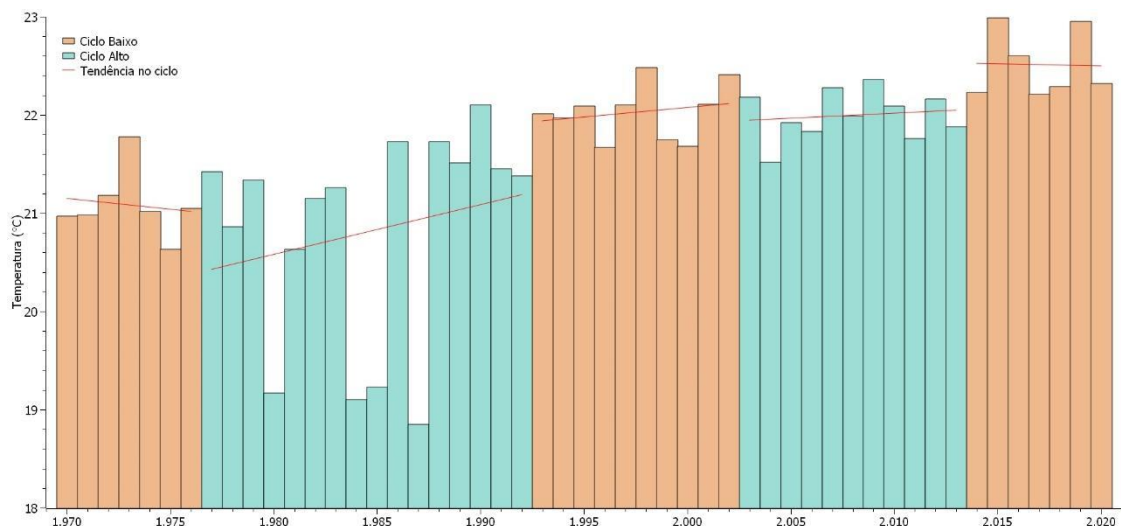


Figura 13 - Evolução da temperatura nos últimos 50 anos na bacia do Alto Velhas mostrando a tendência por ciclo. Destaca-se o primeiro ciclo de alta pluviométrica onde a temperatura apresentou queda considerável quando comparada aos outros ciclos. É observado um crescimento dos dados entre 1970 e 2020.

Assim como na pluviosidade, não se tem informações anteriores e posteriores ao período avaliado neste trabalho, 1970 a 2020, porém algumas considerações importantes acerca do comportamento da temperatura. O primeiro e último ciclo são os únicos que marcam leve diminuição da temperatura, já os ciclos centrais e bem definidos demonstram aumentos, cada vez mais sutis, iniciando em meados da década de 70 e estabilizando no início dos anos de 2010. Embora o primeiro e último ciclos não estejam completos, o comportamento dos ciclos centrais associados ao comportamento prévio dos extremos pode estar indicando um período completo de flutuação da temperatura, e, avaliando de forma geral, pode estar indicando o início de uma redução geral da dela.

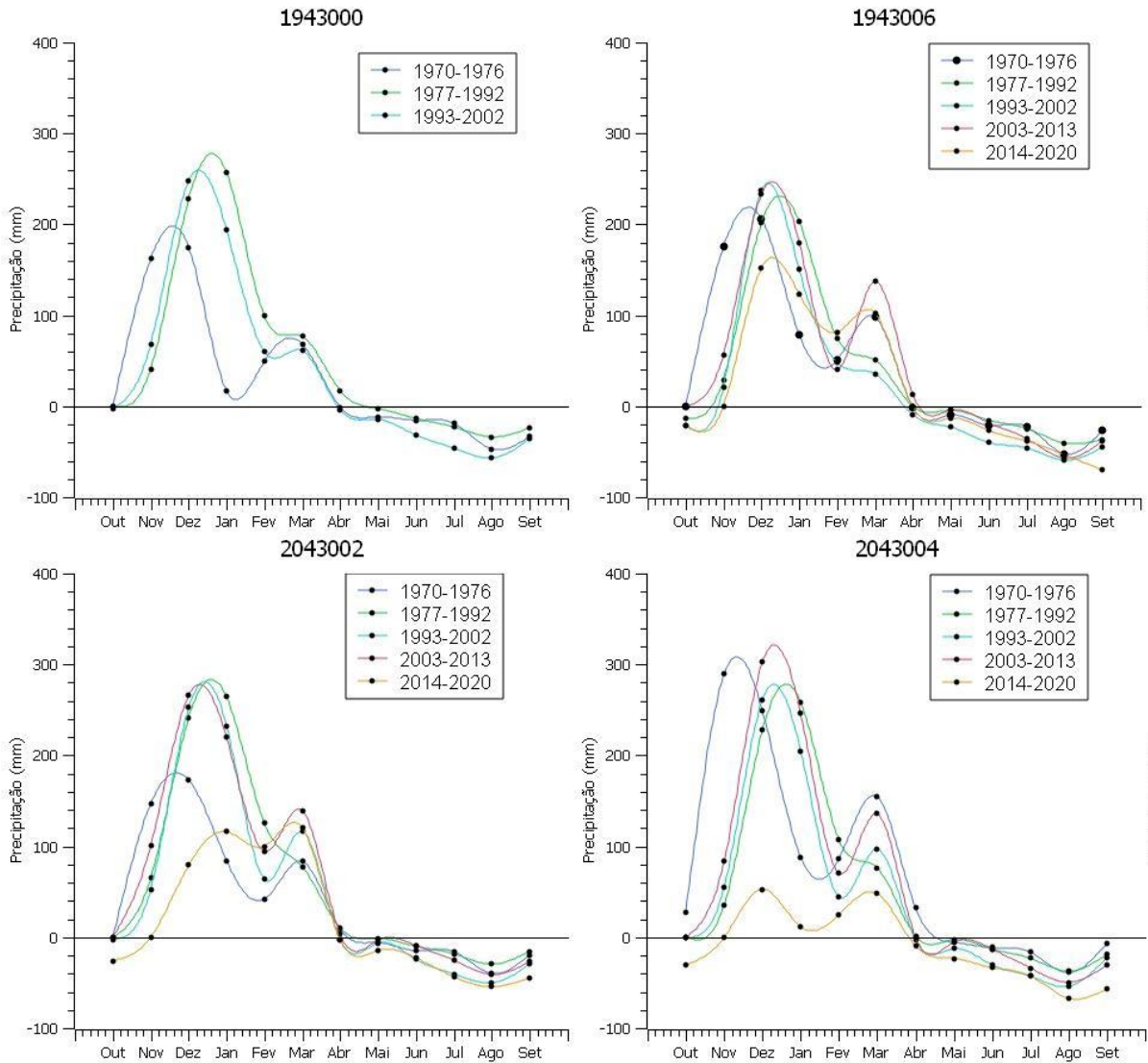
A temperatura média dos 50 anos foi de 21,57°C, já a temperatura média por ciclo foi de 21,08°C, 20,81°C, 22,03°C, 22°C e 22,51°C, representando um aumento de aproximadamente 1,5°C desde os anos 70 até os dias atuais.

O primeiro período de alta, 1977 a 1992, é marcado por um evento de temperaturas baixas, principalmente no durante a década de 1980, onde a temperatura média foi de 20,81°C, com mínima média inferior a 19°C. Contrapondo ao esperado, esse ciclo é marcado pela maior pluviosidade dentro da série analisada, mostrando que temperatura e pluviosidade não se relacionam diretamente. Outro fator importante é a tendência global, enquanto a temperatura aumentou a pluviosidade diminuiu.

#### 6.1.4 Balanço Hídrico

Utilizando dos polígonos de Thiessen, foram feitos balanços hídricos por ciclos de alta

e baixa, previamente estabelecidos, para cada polígono, utilizando o método de Thornthwaite e Mather (1955) no ano hidrológico da região, isto é, de outubro à setembro do ano seguinte, onde o primeiro ciclo começa em outubro de 1970 e termina em setembro de 1977 e a última em outubro de 2014 e se encerra em setembro de 2020 (figura 14).



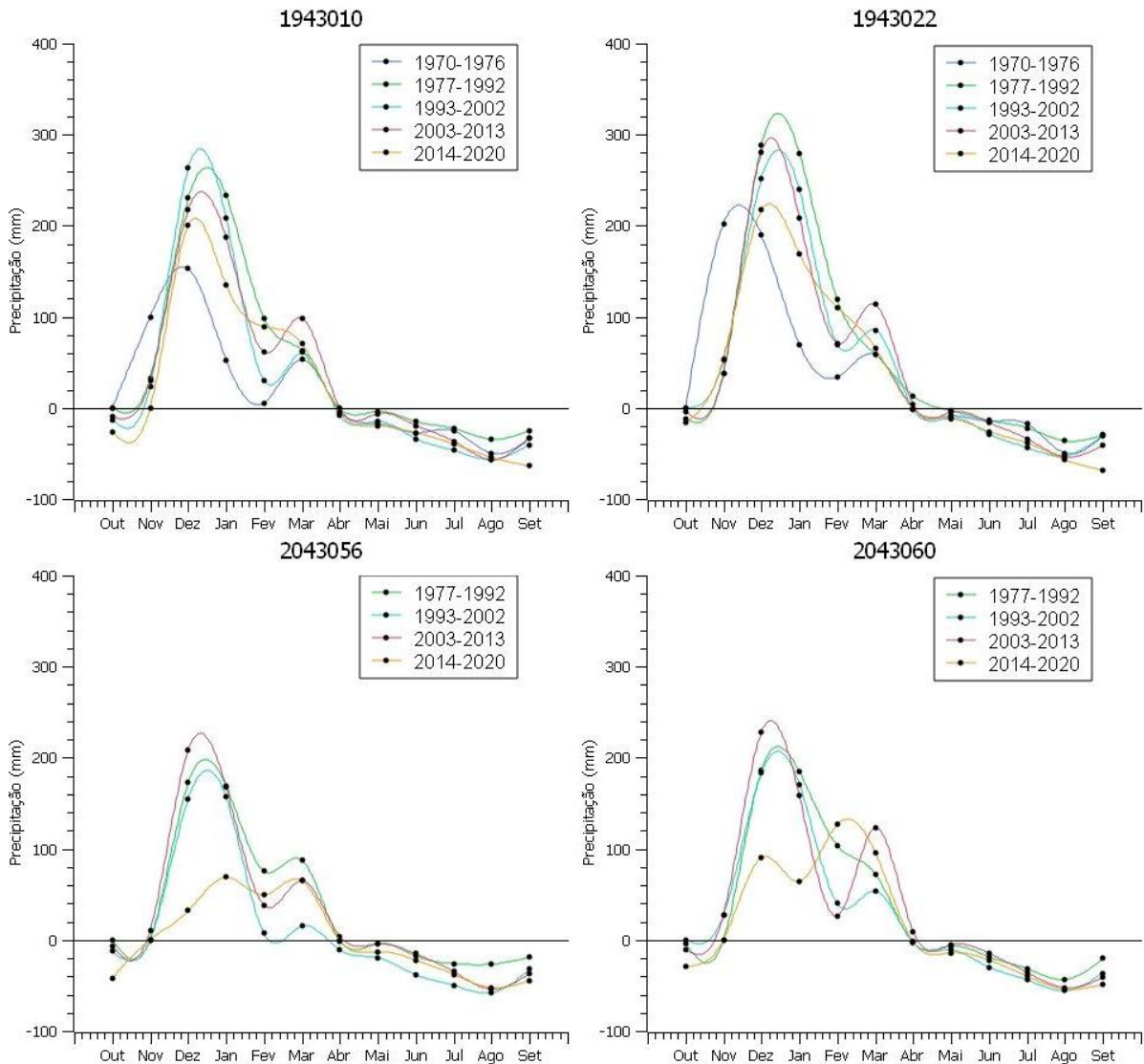


Figura 14 - Extrato pluviométrico por polígono de Thiessen pelo método de Thornthwaite e Mather (1955). É observado reduções leves do excedente hídrico (precipitação >0) e aumento do déficit hídrico (precipitação < 0).

O extrato do balanço hídrico realizado mostra, dentro do ano hidrológico, a relação entre o excedente hídrico, representado por valores superiores a 0 mm, e déficit, com valores inferiores a 0 mm. Essa relação mostra a água disponível ou faltante dentro de cada polígono durante os meses do ano. O período de início do excedente varia entre outubro e novembro e o déficit começa em abril.

O comportamento do excedente e do déficit nos 8 polígonos analisados é bastante semelhante. Ele se inicia por volta de outubro/novembro, tem o pico entre dezembro e janeiro, há uma redução brusca em fevereiro, volta a subir em março até aproximadamente metade do pico de dezembro, isso durante o período de excedente hídrico. Em abril inicia-se o período de déficit hídrico, em maio há uma pequena incursão à neutralidade (precipitação igual a 0) e depois segue diminuindo até agosto, em setembro começa a reduzir o déficit até o início do

excedente, fechando-se assim o ciclo anual.

É notório uma redução do excedente desde o primeiro ciclo até o mais recente, além disso ciclos de alta, na maioria dos polígonos, apresentam os maiores valores de excedente, havendo exceções em alguns polígonos, mas possuindo uma clara tendência de que esses ciclos apresentam valores mais altos. Já os ciclos de baixa, embora apresentem valores menores, seus valores ainda são bastante próximos dos ciclos de alta, ainda mais quando se nota que dois dos três ciclos de baixa não possuem séries completas, devido ao período de análise, tornando apenas o ciclo central (1993-2002), um ciclo de maior confiabilidade nos resultados. Já dentro do déficit o padrão é mais bem estabelecido, tendo os ciclos de baixa com as maiores perdas, enquanto os ciclos de alta são mais atenuados, mas semelhante ao observado no excedente, os valores são bem próximos.

Ao se olhar para a passagem de tempo, a redução entre os 3 ciclos centrais (aqueles com séries completas de dados), em grande parte dos polígonos avaliados, é de aproximadamente 30 mm no pico de dezembro/janeiro, já no pico de março, o comportamento em cada polígonos é variado, tendo ciclos de baixa sobrepondo ou sendo sobrepostos por ciclos de alta. Os valores máximos de excedente giram em torno de 330 mm nos polígonos 1943022 durante o ciclo de alta de 1977-1992, durante o período de dezembro/janeiro. O déficit hídrico apresenta aumento sutil em todos os polígonos de forma geral, mantendo-se próximo a 50 mm no pico de agosto, sendo apenas nos polígonos 2043056, um aumento mais significativo de aproximadamente 30 mm.

Como observado anteriormente, o balanço hídrico foi feito de acordo com os ciclos, esses são marcados por valores pluviométricos abaixo ou acima da média global esperada para a área. Ao se confrontar os dados obtidos no balanço com a pluviometria, não é possível estabelecer, em primeiro momento, uma relação de causa, uma vez que o período de maior excedente é o segundo ciclo de alta (2003-2013), que possui menor pluviometria quando comparado ao primeiro ciclo (1977-1992), entretanto, a variável temperatura pode ser a responsável por isso, uma vez que durante o primeiro ciclo, a temperatura se apresentou abaixo da média, mesmo com uma pluviometria elevada. Olhar para os ciclos de baixa poderia ajudar a entender se realmente a temperatura influenciou na redução do excedente no primeiro ciclo de alta, uma vez que se espera que maior chuva implicaria em maior excedente, porém, por haver apenas um ciclo completo de baixa, sua comparação fica comprometida. Considerações podem ser feitas a respeito, como o fato de o ciclo de baixa manter valores de excedente bem semelhantes na maior parte das áreas com o primeiro ciclo de alta, mesmo sendo um período

de baixa chuva, mas de temperaturas mais elevadas, tornando quase que proporcional a relação, onde maiores pluviosidade e menores temperaturas são compensadas por menores pluviosidades e maiores temperaturas.

É notado também que há uma progressão no início do excedente hídrico de outubro para setembro em grande parte das áreas, principalmente em ciclos mais atuais. Uma possibilidade para esse evento vem em decorrência da redução dos dias de chuva, que podem estar se iniciando mais tardiamente na bacia e, conseqüentemente, prolongando o déficit hídrico na região, e como essa redução também acontece na quantidade, não há reflexos de aumento nos meses seguintes, apenas uma leve redução, como observado anteriormente.

Dentre todas os 8 polígonos, o 2043056 e 2043060 apresentam os menores valores de excedente de toda a bacia, logo, seguindo a tendência observada de redução, essas áreas devem ser as de maior cuidado. Os dados de déficit para todas as áreas são semelhantes e colocam os 8 polígonos em alerta durante o período de estiagem.

#### 6.1.5 Evapotranspiração

A evapotranspiração está ligada a quantidade de água que retorna a atmosfera ao invés de carregar aquíferos e rios. A Figura 15 mostra a evapotranspiração por ciclo, a partir do segundo ciclo (1977-1992), onde foram utilizados os valores das 8 estações pluviométricas após balanço hídrico.

Os mapas de evapotranspiração mostram variações por toda bacia, com valores entre 804 mm e 940 mm. Os mapas referentes aos ciclos de baixa mostram valores mais baixos de evapotranspiração, principalmente o ciclo de 1993 a 2002, onde, regiões de Santa Luzia, Caeté, Raposos, Ouro Preto e, principalmente, Sabará apresentam valores bem próximos do limite inferior (804 mm), em contraposição, existem pequenas regiões que mostram valores levemente maiores (laranja) em Belo Horizonte e sul de Nova Lima. O ciclo de baixa de 2014-2020 apresenta uma distribuição mais homogênea, com valores intermediários de ETR, com exceção da porção sudeste de Nova Lima, que apresenta valores mais baixos. Entretanto, os valores desse último ciclo não apresentam série completa de dados e novamente deve ser observado com cautela.

Para os ciclos de alta algo diferente acontece. O primeiro ciclo apresenta valores semelhantes aos ciclos de baixa, com valores baixos mais significativos no centro-sul de Itabirito e no município de Sabará, tendo apenas um leve laranja no sudoeste de Nova Lima,

porém de forma geral, os valores se encontram homogeneamente baixos em toda a bacia. Já o segundo ciclo é marcado por valores opostos ao observado no primeiro, com uma ETR alta por toda bacia, com destaque para a região sul de Nova Lima, onde é identificado os valores mais altos da série histórica.

A evapotranspiração é controlada por dois fatores principais, a quantidade de água disponível e a temperatura. O primeiro ciclo de alta é representado por baixos valores de ETR, mesmo sendo um ciclo com os maiores valores pluviométricos na região. Entretanto, como visto anteriormente, esse ciclo é marcado pelos menores valores de temperatura, principalmente durante a década de 1980 (englobada por esse ciclo), resultando em uma grande disponibilidade de água, mas que não consegue ser evaporada dentro do esperado, uma vez que a temperatura para isso é mais baixa do que a média da região. O contrário é visto no segundo ciclo de alta, quando as duas variáveis estão em alta, gerando valores significativos, mesmo a pluviometria não sendo tão alta quanto a do primeiro ciclo, demonstrando-se assim a importância que a temperatura tem no processo.

Dentro dos ciclos de baixa, onde a pluviometria é a variável que reduz, não é notado diferenças significativas do ciclo de alta de baixa temperatura, mas há destaques a serem feitos em relação a regiões anteriormente identificadas de menor pluviometria. As porções Sudeste e Nordeste da área, principalmente no primeiro ciclo de baixa de 1993-2020 demonstram o limite da influência da temperatura em relação a pluviometria, marcando os menores valores de ETR, principalmente na porção Nordeste, isso se dá devido a distribuição heterogênea na região, onde essas áreas recebem a menor quantidade de chuva em toda bacia. Acerca do último ciclo, mesmo com série de dados incompleta, é possível notar um aumento da evapotranspiração, principalmente nas regiões destacadas anteriormente, isso se dá pelo aumento da temperatura que evapora cada vez mais a água na região.

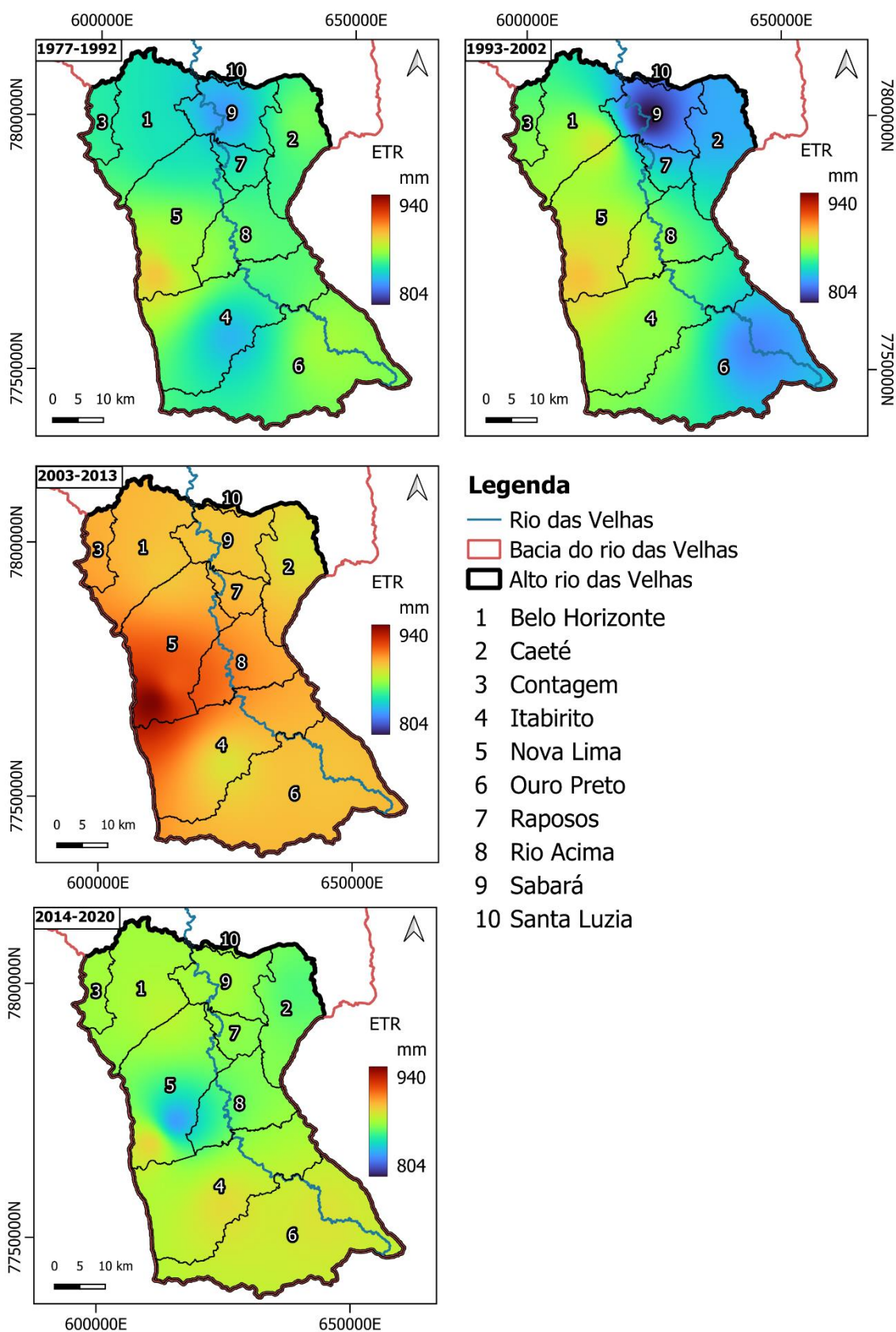
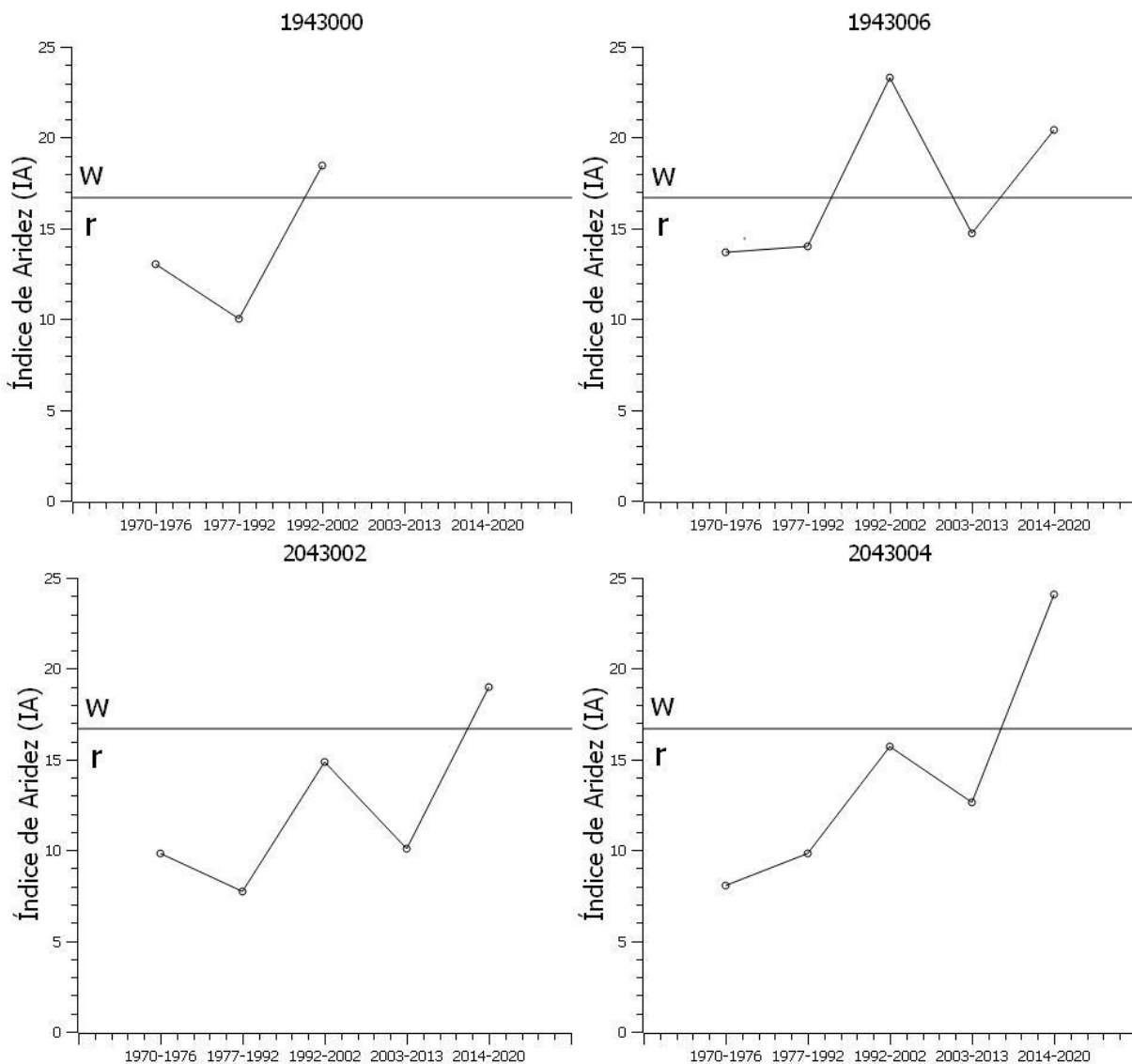


Figura 15 - Mapa de evapotranspiração real da área de estudo por ciclo pluviométrico. Da esquerda para a direita e de cima para baixo é possível observar as variações dentro dos ciclos da quantidade e espacialidade da água evaporada na bacia.

### 6.1.6 Índice de aridez

O índice de aridez é indicador do nível de perda de água em uma bacia, isto é, quanto distante da segurança hídrica essa bacia está. A Figura 16 mostra a evolução por ciclo do índice de aridez em cada um dos 8 polígonos de Thiessen criados.



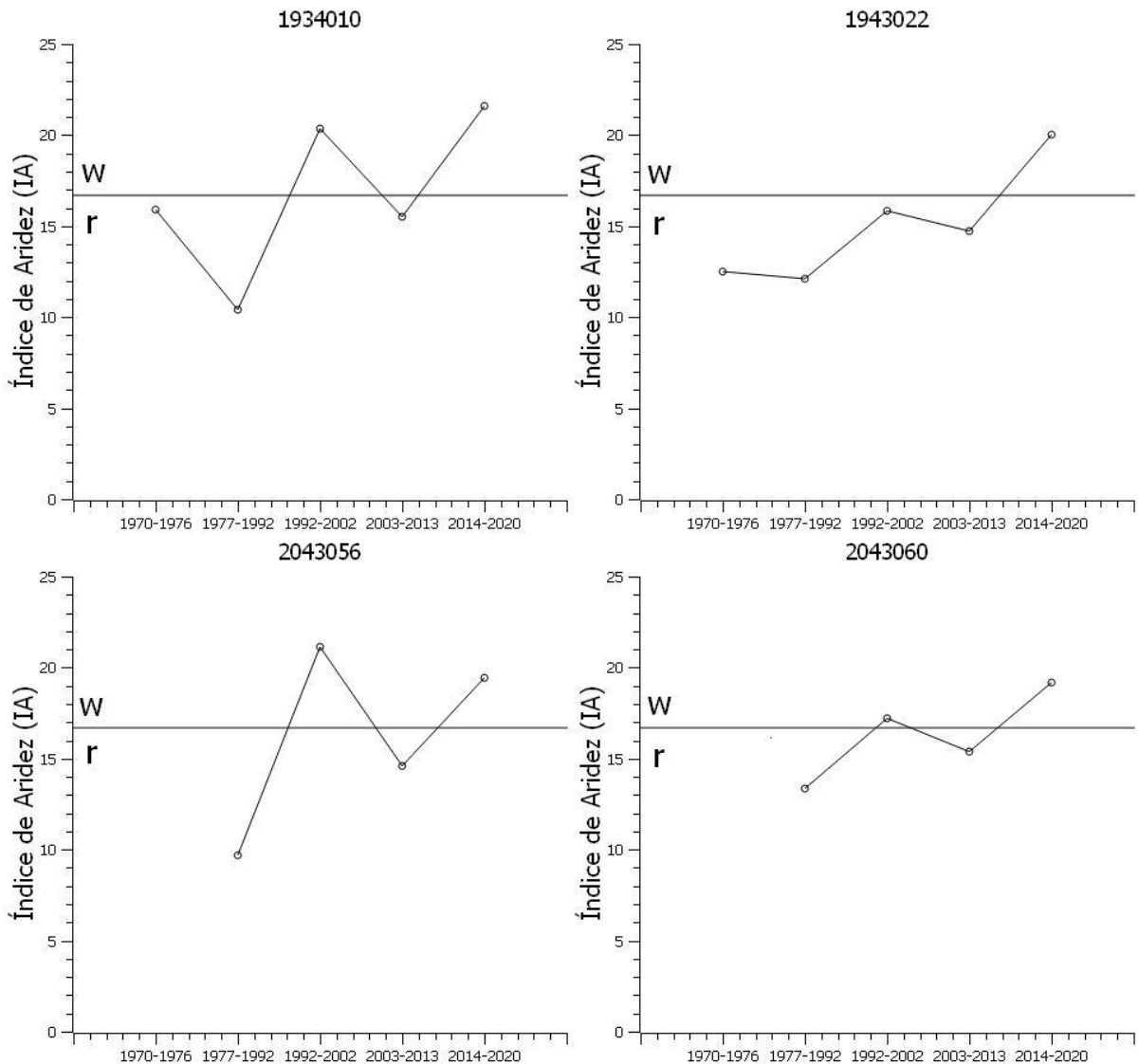


Figura 16 - Evolução do índice de aridez por polígono de Thiessen da área de estudo durante os ciclos pluviométricos. É observado que em ciclos de alta há uma tendência de redução da aridez enquanto em ciclos de baixa há um aumento do índice. De forma global há uma tendência de aumento do índice de aridez em todas as 8 subáreas.

O índice de aridez (Ia) da área estudada mostra um padrão ascendente em todas as 8 subáreas. Todas iniciam com pouca ou nenhuma deficiência de água (r), sendo essa uma característica do primeiro ciclo. O segundo ciclo é marcado por uma redução do índice de aridez em quatro áreas, uma leve ascensão em duas e o aparecimento do índice de em outras duas, onde todas ainda se encontram em 'r'. O terceiro ciclo apresenta um evento de aumento brusco do índice de aridez em todas as 8 áreas, onde cinco delas passam para a zona de deficiência moderada no inverno (w) e outras 3 ficam próximas ao limite entre 'r' e 'w'. O quarto ciclo apresenta uma redução, brusca em algumas áreas, onde 4 das 5 áreas retornam para a zona 'r', sendo que a quinta área não fornece mais dados. Por fim, o último ciclo marca uma passagem de todas as áreas para a zona 'w'.

O índice de aridez segue um padrão semelhante em todas as áreas, não em valor, mas em comportamento. Quando avaliamos ciclo a ciclo, é possível observar a influência de diversas variáveis. O primeiro ciclo, marcado por baixa pluviometria e temperaturas mais amenas, um grande excedente e um baixo déficit hídrico. Novamente, sua análise deve ser feita com cautela, devido à incompletude dos dados, porém é possível observar indícios de como essas variáveis se mostram bons controladores do índice, principalmente o déficit hídrico, que é controlado principalmente pela quantidade de chuva que acomete a região.

O segundo ciclo, o primeiro de alta pluviométrica, marcado por redução em grande parte dos valores do índice de aridez, apresenta como diferencial alta pluviosidade e baixa evapotranspiração real – devido a uma temperatura abaixo da média durante esse ciclo. Embora se possa relacionar que chovendo muito e evaporando pouco aumentaria a água disponível na bacia, o balanço hídrico mostrou que essa época não apresentou valores de excedente significativos, ao contrário, seus valores foram iguais ou inferiores ao outro ciclo de alta e ao primeiro ciclo de baixa. Mas uma relação pode ajudar a entender porque esse período apresentou os menores valores do índice, embora o impacto no excedente não tenha sido aparente, no déficit a história é diferente, e isso pode ser explicado pela baixa evapotranspiração (consequência da baixa temperatura) que no inverno foi ainda mais significativa, tornando as perdas nesse período ainda mais atenuadas, e como o déficit é fundamental para o índice de aridez, sua redução implica numa redução nos valores da aridez para esse período.

O ciclo seguinte traz um efeito quase que contrário ao observado anteriormente, marcado por temperaturas mais altas que os ciclos anteriores, baixa ETR e baixa pluviosidade, alto excedente hídrico e o mais baixo déficit entre as séries completas. Sua principal relação se dá no inverno, quando temperaturas mais elevadas continuam evaporando o baixo volume de água que alimentou a bacia no período, marcando um avanço progressivo nos valores de déficit e consequentemente nos valores de IA tornando esse ciclo o primeiro a entrar na classificação ‘w’.

O quarto ciclo, e último de série completa, se difere do segundo ciclo apenas pela alta ETR – consequência da temperatura mais elevada. Este ciclo demonstra a relação entre chuva e evaporação na bacia para geração de um déficit, onde, mesmo com temperaturas elevadas, a quantidade de água que alimentou o sistema atenuou a perda durante o inverno e reduziu o déficit, fazendo com que o índice de aridez retornasse a zona ‘r’ em todas as áreas que tinham ido para ‘w’.

Por fim, o último ciclo, de baixa pluviometria e baixa evapotranspiração – com as mais

altas temperaturas -, baixo excedente e alta déficit, representa resultados esperados, uma vez que a baixa ETR é consequência das baixa quantidade de água entrando na bacia, e como a temperatura é a mais elevada entre todos os ciclos o déficit gerado é significativo, visto que o período de “abastecimento” da bacia foi bastante comprometido e a perda acentuada, como reflexo, esse é o primeiro ciclo onde todas as áreas, com dados, entram na zona ‘w’.

#### 6.1.7 Influencias observáveis

A evolução do índice de aridez na bacia do alto rio das Velhas é uma consequência de diversos fatores naturais. Usando-se deste índice é possível ver fortes indícios de como aspectos naturais que acometem a área de estudo geram impactos por toda a área de estudo, principalmente aumentando o processo de desertificação.

Analisando conjuntamente diversas variáveis na seção 6.1, foi possível notar como mudanças, mesmo que sutis, em apenas uma delas podem resultar em alterações significativas no comportamento hidroclimático da área. Pluviometria e dias de chuva vêm reduzindo, mas seus impactos ainda não são visíveis, uma vez que a menor pluviometria observada é por questões cíclicas e não pela redução vista pela regressão.

O aumento da temperatura se mostrou a mais significativa mudança dentro da bacia, impactando diretamente o balanço hídrico e suas resultantes. Tal aumento representou perdas de águas crescentes em todas as 8 subáreas do alto Velhas. Com um aumento de aproximadamente 1,5°C entre o primeiro e último ciclo, esse valor vem reduzindo o excedente e aumentando o déficit da região, tornando a bacia cada vez mais árida.

De forma geral, é possível notar impacto na bacia, ou pelo menos um princípio de impacto, principalmente em ciclos mais recentes, onde fica mais notável as mudanças descritas até aqui. Dentre os 8 polígonos estabelecidos, chama atenção o 2043056, 2043060, 1943010 e 1943006, sendo as áreas onde os impactos naturais tendem a ser expressivamente mais representativos, devido a serem locais onde a pluviometria e, conseqüentemente, o excedente hídrico são mais baixos, além disso, embora não apresentem grande diferença de déficit em relação a outras áreas, devendo isso a mais baixa ETR nessas regiões – o que em parte pode ser significativo mesmo estando abaixo dos valores de outras regiões, uma vez que a água disponível para evaporar é menor e ainda sim mantém-se com valores próximos das demais localidades avaliadas -, os 4 polígonos apresentam os piores resultados, sendo necessária maior atenção nessas áreas.

## 6.2 Fluviometria

A área de estudo apresenta 2 pluviômetros principais e 1 externo, instalados na calha do rio principal, o rio das Velhas. A Figura 17 mostra a localização dos fluviômetros, o mais a montantes, Fazenda Água Limpa, se encontra no município de Ouro Preto e próxima a nascente do Velhas, o segundo, na porção central da área, se encontra próxima ao mais importante ponto de retirada de água da região, a estação de Bela Fama, e, mais jusante externa ao Alto Velhas, a estação Pinhões, que será usada ponto de controle.

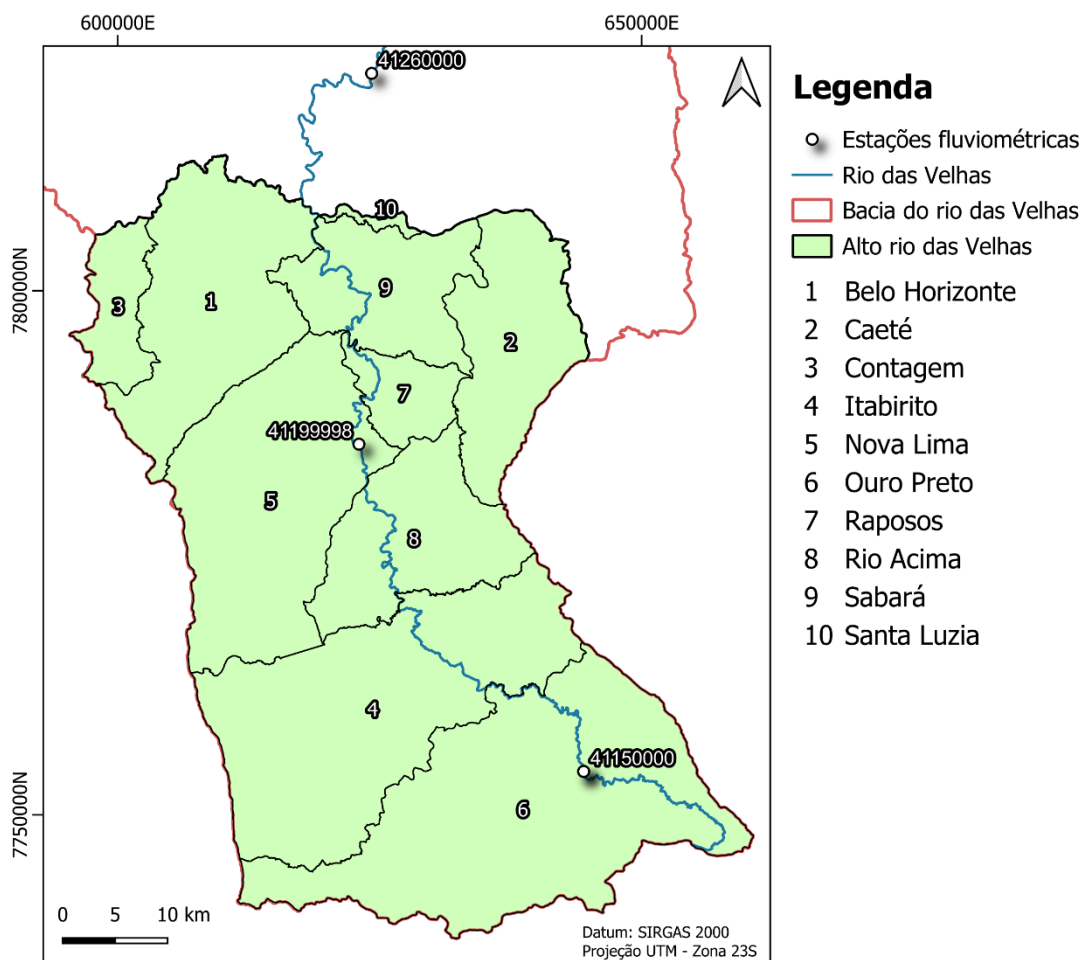


Figura 17 - Mapa de localização das estações fluviométricas do Rio das Velhas identificando os municípios que elas se encontram.

A Figura 18 mostra a flutuação da vazão máxima, mínima e média anual em  $m^3/s$  nas últimas 5 décadas. Seus picos e vales são bem marcados e coincidentes em todas as 3 estações. Do topo para a base, eles mostram a região da nascente (Faz. Água Limpa), centro da bacia (Honório Bicalho) e borda superior (Pinhões).

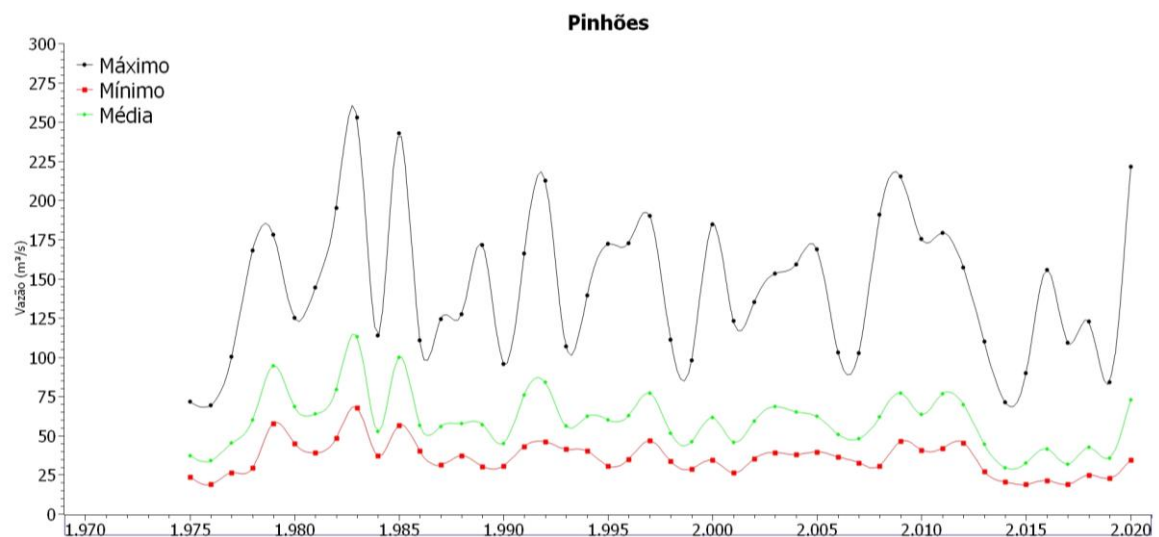
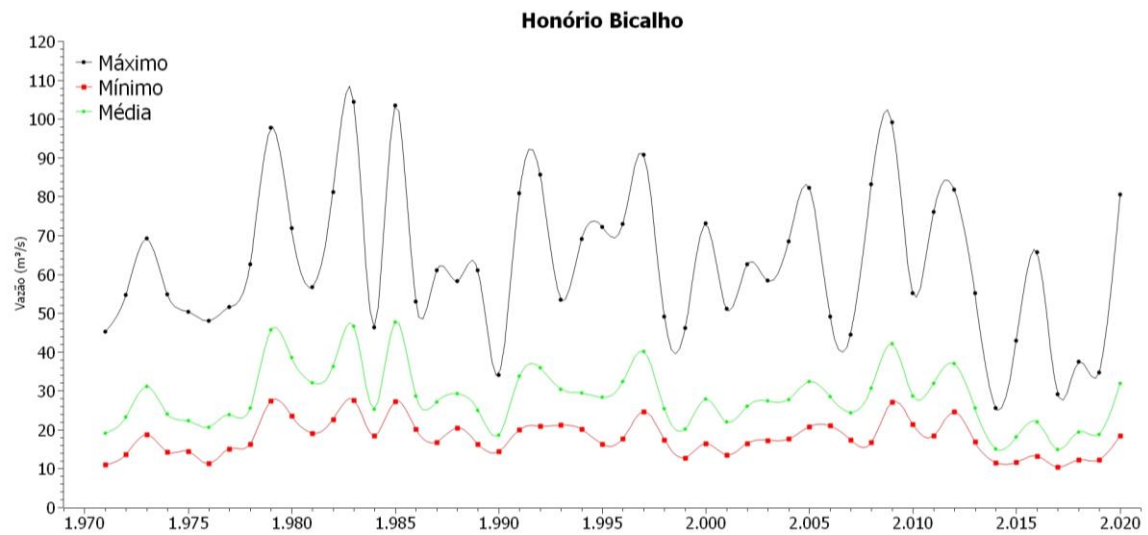
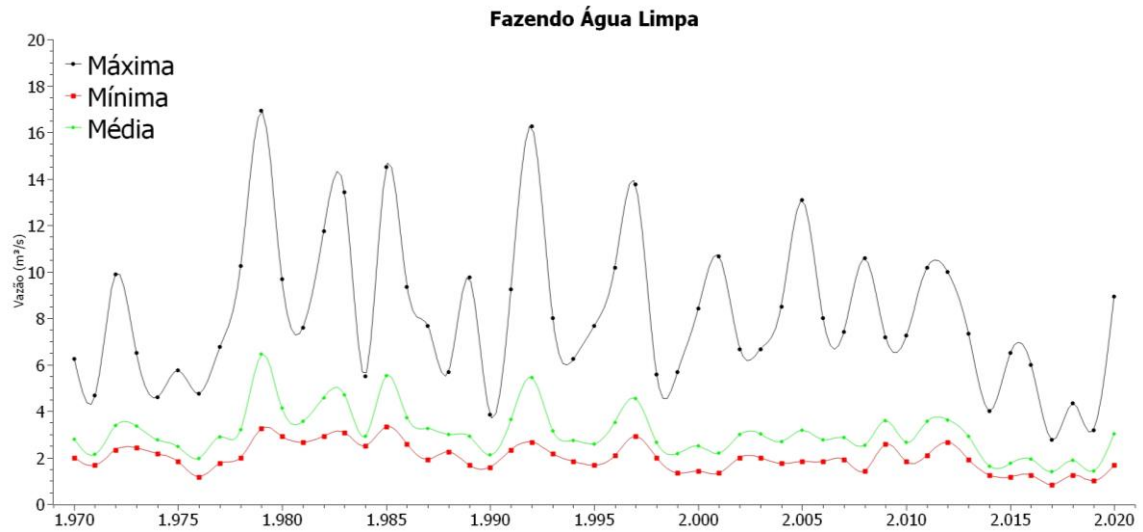


Figura 18 - Gráficos de vazões mínimas, máximas e médias anuais registradas nas 3 estações fluviométricas entre 1970 e 2020. São observados picos marcantes durante os anos de 1980 e vale durante a última década analisada.

Os 3 fluviômetros apresentam comportamento similar, com média e mínima com menor

variação e máxima com grande variação interanual. há uma redução da vazão em todas os 3 fluviômetros, sendo mais marcada nos picos da vazão máxima. Essas reduções são sutis, mas são mais proeminentes em estações fluviométricas a jusante do que as a montante.

Quando se compara a vazão do rio com a pluviometria da região, nota-se a forte influência das chuvas na vazão do rio, principalmente quando avaliamos os picos e vales. Os principais picos pluviométricos são nos anos de 1979, 1983, 1985 e 2009, enquanto os fluviométricos são em 1979, 1983, 1985, 1992, 1997, 2009 e 2012, mostrando uma boa aderência entre, principalmente quando olhamos para os anos que não coincidem e vemos que sua pluviometria está na média, embora não marque um pico significativo. Já os vales pluviométricos se dão em 1984 e 2014, enquanto os fluviométricos acontecem em 1976, 1990, 2014, 2017 e 2019, mostrando não ter uma aderência e podendo significar influências externas como excesso de captações ou barramentos nesses anos.

De forma geral, são observados 3 pontos distintos de vazões do rio das Velhas, com um aumento de vazão média de 9 vezes entre a primeira e segunda estação e 20 vezes entre a primeira e a última, mostrando o porte do rio em um percurso de mais de 150km, mesmo sofrendo influências das características naturais anteriormente descritas e de possíveis características antrópicas que serão descritas a seguir.

## **6.3 Influências Antrópicas**

### **6.3.1 Uso e ocupação**

Pensar na ocupação humana e suas ações no meio é uma forma de começar a mensurar influências antrópicas. A Figura 19 mostra a evolução do uso e ocupação na região da bacia do Alto rio das Velhas, nas últimas 4 décadas.

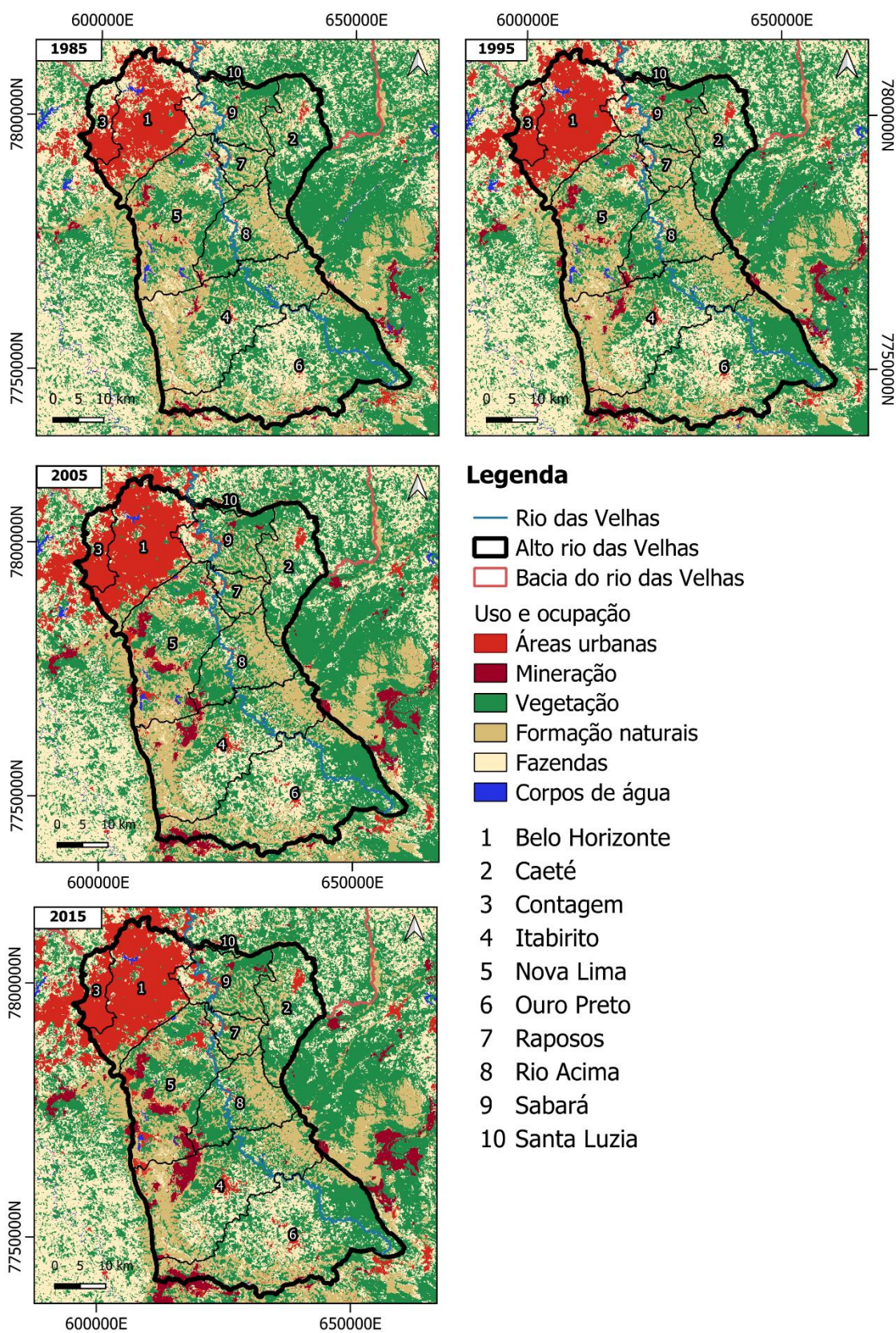


Figura 19 - Mapa de evolução de dados representativos por década, desde 1985 a 2015, do uso e ocupação com enfoque na ocupação antrópica e mineração na bacia do alto rio das Velhas. É mostrado o crescimento urbano e minerário principalmente nas porções noroeste e oeste da área de estudo.

Foram destacadas 2 feições importantes: Áreas urbanas e mineração. Além delas, florestas, formações naturais (áreas pouco ou nada vegetadas), fazendas e corpos d'água compõem as diferentes finalidades de uso da terra.

O uso e ocupação na bacia do alto rio das velhas é bem diverso, onde, desde 1985 até 2020, a urbanização e a mineração cresceram significativamente. A primeira década é marcada por uma concentração urbana sobre a região dos municípios de Belo Horizonte e Contagem, enquanto nos outros municípios a mancha é localizada e muito pequena. Já a mineração se encontra nos municípios de Nova Lima, Itabirito e Ouro Preto, essencialmente sobre o sinclinal moeda. A década seguinte mostra um aumento expressivo da urbanização na porção norte de Belo Horizonte e leste de Contagem, além disso, municípios como Nova Lima, Caeté, Itabirito e Sabará começam a apresentar manchas maiores de urbanização. A mineração aumenta nas áreas anteriormente citadas, sem novas ocorrências. O início de 2000 continua com o aumento em todos os municípios citados e das minerações. A última década segue o padrão da anterior.

Em termos numéricos, em 40 anos a urbanização cresceu mais de 50%, saindo de uma área aproximada de 275,92 km<sup>2</sup> para uma área de 414,2 km<sup>2</sup>. Já a mineração apresentou crescimento ainda maior, tendo sua área mais que triplicada, partindo de 25,73 km<sup>3</sup> para 90,83 km<sup>2</sup>. Esse crescimento tem importantes implicações para a configuração climática e hidrológica na região, uma vez que processos de antropização tendem a impermeabilizar solos, desviar e/ou encanar cursos de água, dentre outros. Outro importante fator é o aumento progressivo da demanda hídrica, seja pela sociedade civil, seja pela indústria e comércio.

É importante ressaltar que os locais de mineração e mais intensa urbanização são coincidentes com as áreas de maior pluviosidade da bacia, o que pode resultar em uma redução da penetração dessa chuva no subsolo, uma vez que a utilização de concreto e asfalto nessas áreas impede tal ação e aumenta fluxos superficiais. Esse evento é especialmente significativo em cidades e menos frequente em zonas de mineração, uma vez que nesses casos há uma super-exposição do substrato, tornando essas áreas fortes pontos de recarga do subsolo.

O rio das Velhas percorre apenas as cidades de Rio Acima, Nova Lima, Raposos e Sabará, sendo em Nova Lima o menor contato com a mancha de urbanização. Sobre fluxos superficiais maiores, resultantes de áreas urbanizadas ou impermeabilizadas, o rio não receberia essa água direto, uma vez que, embora cruze zonas urbanas, a área é muito pequena. Esses fluxos alimentariam o Velhas através de seus afluentes.

### 6.3.2 Captações subterrâneas

A região do Alto rio das Velhas compreende uma grande quantidade de mineradoras e indústrias, além da capital do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, com isso possui uma alta demanda hídrica, não só superficial, mas também subterrânea.

A Figura 20 mostra os poços que existem ou já existiram na área, divididos em uso insignificante e outorgas. A distribuição de captações subterrâneas na área não distingue em regiões para uso insignificante ou outorgas, mas há notória concentração de poços na margem oeste do rio das Velhas, principalmente sobre as manchas urbanas e minerárias, onde essa segunda se destaca por captações outorgadas predominando

A distribuição de poços por município, assim como diversos componentes deste trabalho é bem heterogênea. A Figura 19 b mostra, por meio de um mapa de calor, as captações em cada município dentro da bacia do Alto Velhas.

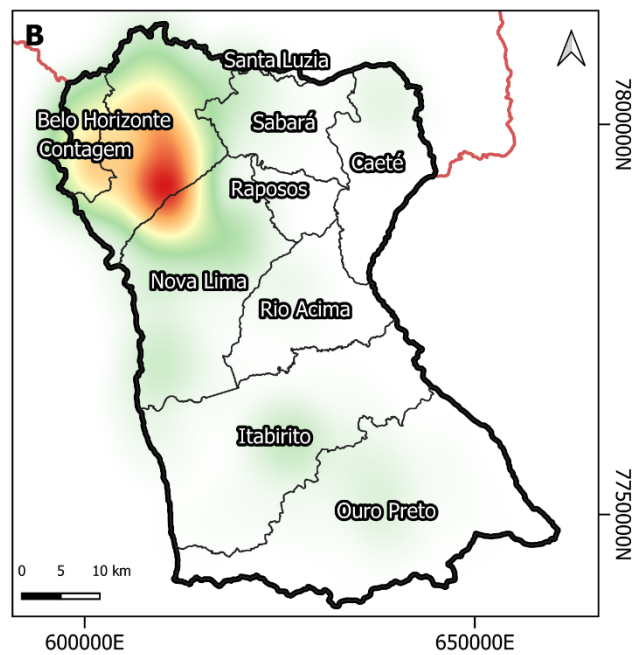
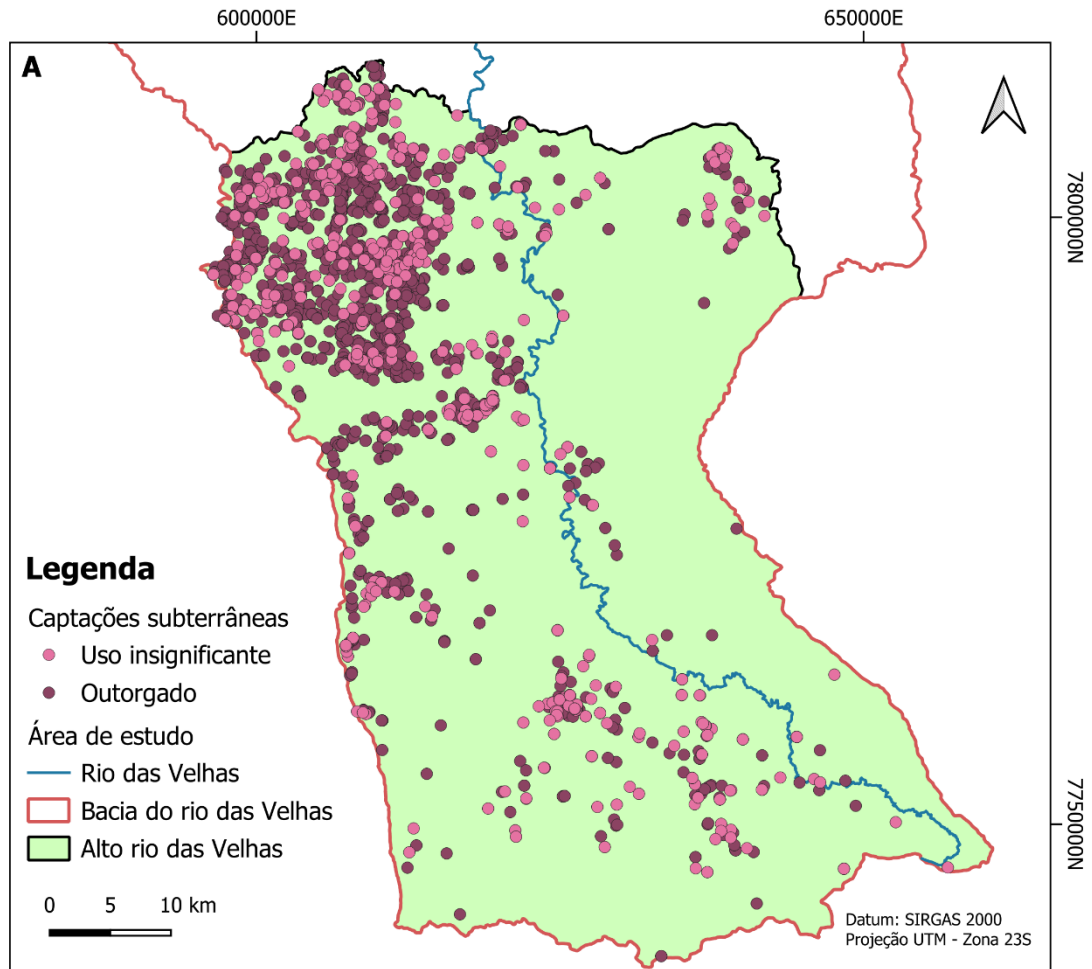


Figura 20 - (A) Mapa de captações separados entre outorgados (magenta) e uso insignificante (rosa). (B) Mapa de calor da concentração de captações com destaque nos municípios do Alto rio das Velhas, demonstrando a alta concentração dessas captações em Belo Horizonte, Contagem e Nova Lima.

A Figura 21 correlaciona poços em atividade com a vazão para poços outorgados. Há uma relação direta entre vazão e quantidade de poços na região, já que ambos os gráficos apresentam a mesma forma. Quando observamos cada década, notamos saltos importantes. Entre 1970 e 1980 é possível notar quantidades baixas de poços e vazão, possuindo um aumento muito sutil na primeira década analisada. As três próximas décadas são marcadas por um aumento progressivo e significativo, os anos 80 se iniciam com vazões próximas de  $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$  e terminam com vazão de  $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ , representando um aumento de 4 vezes. Na década seguinte, o pico alcançado foi de  $1,52 \text{ m}^3/\text{s}$ , 3 vezes maior que a anterior e 12 vezes maior que a primeira. Por fim, os anos 2000 as vazões ultrapassam  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  e marcam, assim como na década seguinte, o máximo de vazão por poços outorgados nos últimos 50 anos, marcando quase 20 vezes mais água sendo explotada em comparação a primeira década. É importante observar que a partir de 2013 há um declínio de ambos os dados avaliados, isso é marcado principalmente por vencimentos de certidão de outorgas, o que gerou um pequeno “vale”, mas que já é possível observar uma retomada nos dois anos finais.

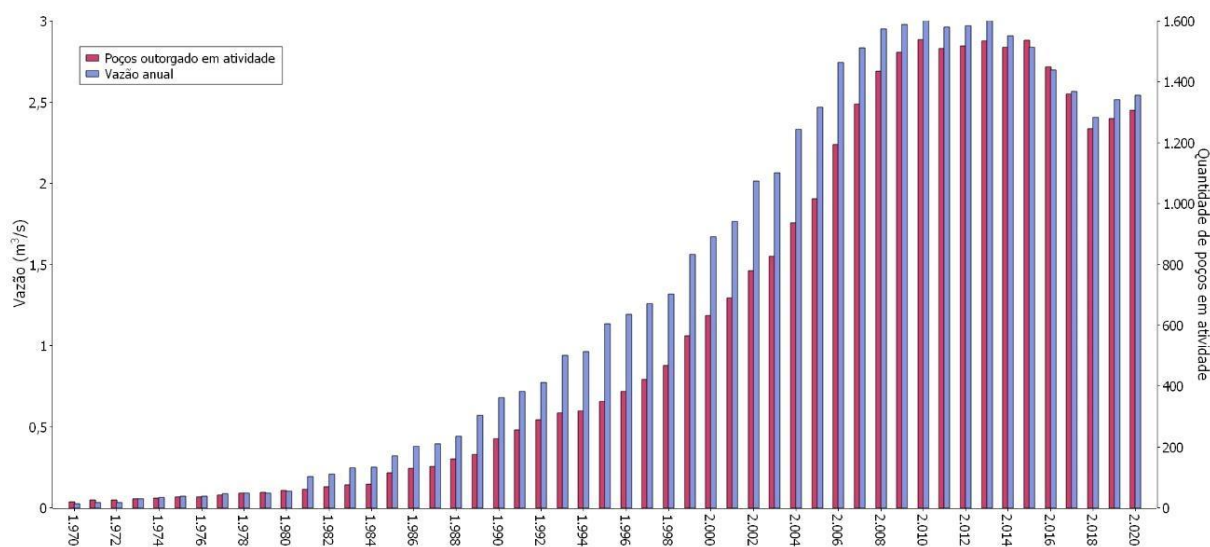


Figura 21 - Gráfico de vazão e quantidade de poços em atividades por ano na bacia do Alto rio das Velhas para captações subterrâneas outorgados.

Em seguida, é possível observar dados semelhantes ao anterior, mas agora para poços de uso insignificante (Figura 22). Para esses dados, há valores a partir de 1998/1999, que coincide com a Lei nº13.199/1999, que instaura o cadastro de uso insignificante no Estado de Minas Gerais. Assim como anteriormente, há uma tendência positiva nos dados, marcado até meados de 2015/2016, quando o declínio desses dados se inicia, marcando principalmente um decréscimo significativo da vazão, que inicialmente foi de  $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$  no ano 2000, teve seu pico em 2016 com  $1,55 \text{ m}^3/\text{s}$  e terminou 2020 com  $0,85 \text{ m}^3/\text{s}$ . Representando um aumento de 10x na fase de ascensão e uma queda de quase 50% do valor em apenas 4 anos. Tal queda pode ser

explicada da mesma forma que o gráfico anterior, mas ela não é acompanhada da queda conjunta dos dados de poços em atividade, podendo indicar que os poços que tiveram sua certidão vencida possuam maior valor de vazão do que os que permaneceram.

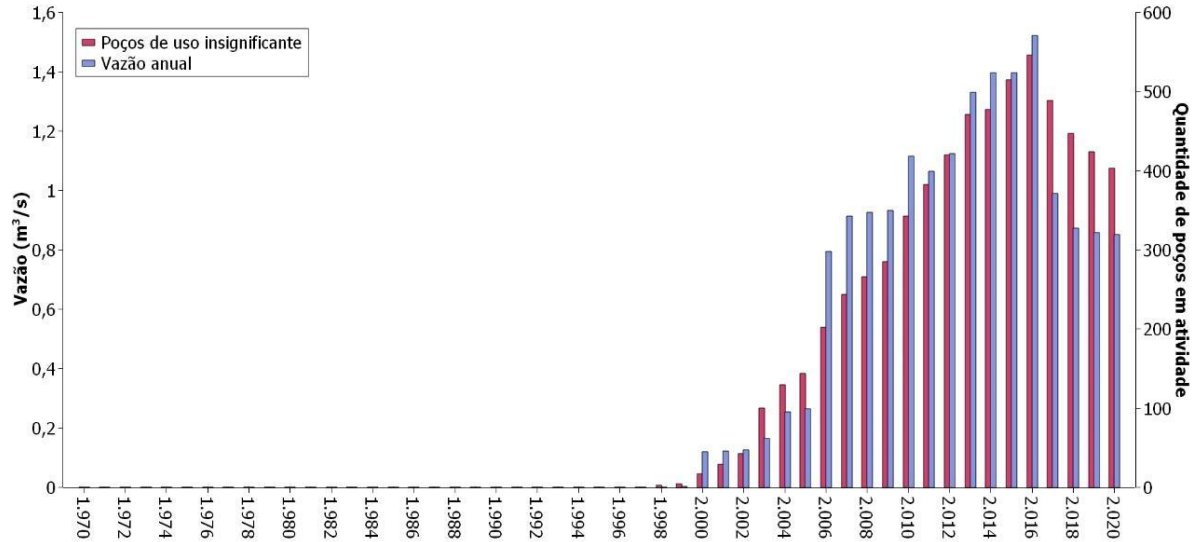


Figura 22 - Gráfico de vazão e quantidade de poços em atividades por ano na bacia do Alto rio das Velhas para captações subterrâneas de uso insignificante.

O crescimento da vazão, principalmente a partir de 1980, acompanha o aumento populacional e industrial do alto Velhas, porém tal aumento representa consequências para a dinâmica de águas subterrâneas na região. Como dito anteriormente, a grande parte das captações está sobre zonas urbanas, principalmente na capital mineira, que tem crescido cada vez mais e reduzido as zonas de recarga locais. Esse crescimento pode resultar em uma redução da água que penetra no solo e alimenta os aquíferos, ao mesmo tempo, o aumento exponencial da vazão aumenta a água que sai deles, reduzindo cada vez mais a reserva renovável. Embora não seja escopo deste trabalho avaliar as reservas aquíferas da região, relações empíricas entre essas duas variáveis dão a entender uma redução delas.

### 6.3.3 Captações subterrâneas por unidade aquífera

Utilizando-se do mapa geológico de Endo *et al.* (2019) e das separações aquíferas feitas por Andrade (2023), Magalhães (2023) e Zupo (2024) foi feito o mapa de unidades aquíferas (figura 23) do alto rio das Velhas, onde são destacados os aquíferos e aquíferos que compõem a região.

Quando comparamos com o mapa de uso e ocupação da região, vemos que as mancha principal de urbanização, na porção noroeste da área, é coincida com os Aquíferos de Complexos Metamórficos e aquífero Estrada Real, se destacando as cidades de Belo Horizonte,

Contagem, Caeté e Itabirito. As demais organizações se concentram principalmente sobre o Aquitardo Rio das Velhas. Já as manchas de mineração (figura 19), tem sua concentração sobre os aquíferos Cauê, Gandarela e Piracicaba, se destacando o primeiro, que hospeda as formações ferríferas, além de ser o principal aquífero da região.

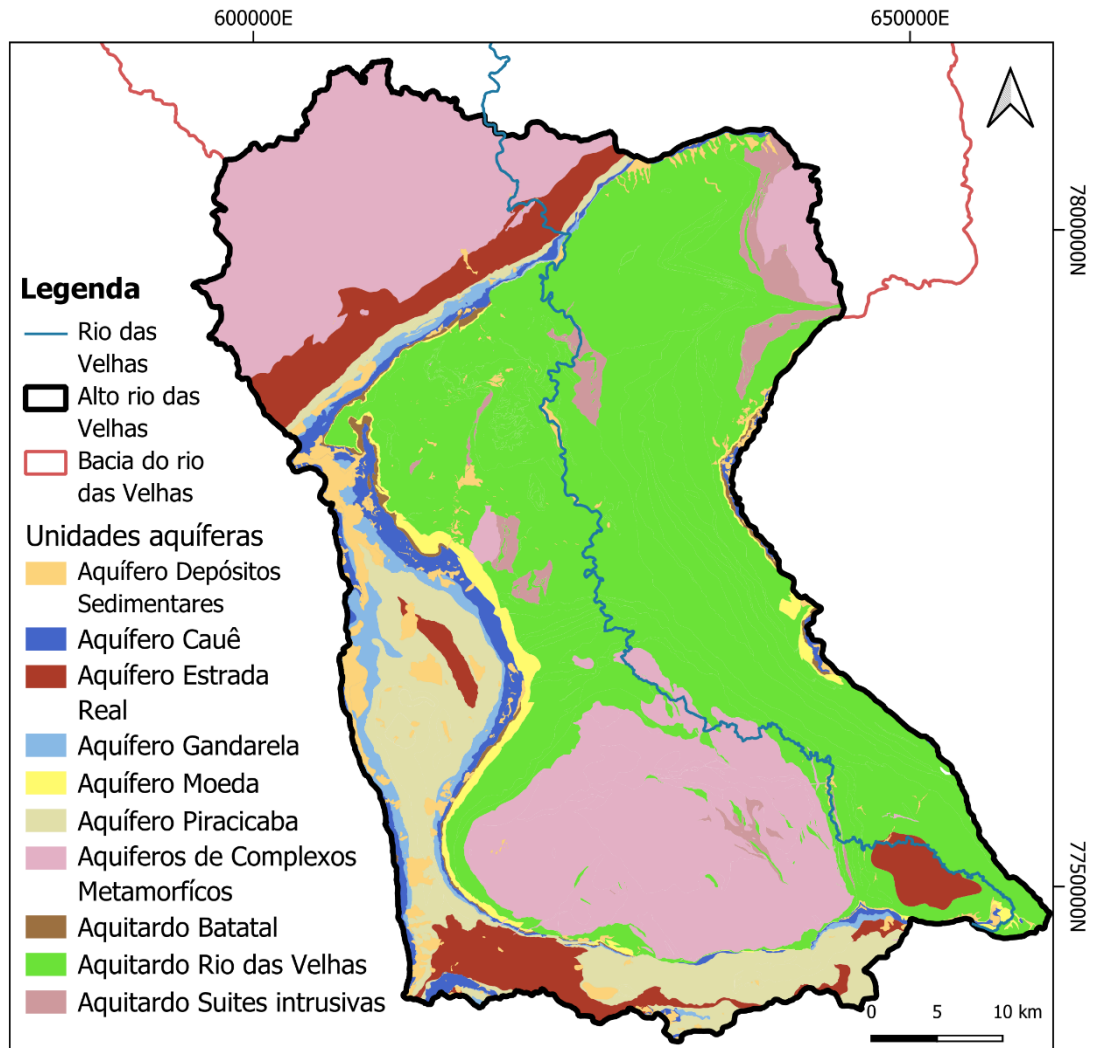


Figura 23 - Mapa de unidades aquíferas do alto rio das Velhas. (Modificado de Endo et al. 2019 e adaptado de Andrade (2023), Magalhães (2023) e Zupo (2024))

Ao se observar a Figura 24 é possível notar a distribuição dos poços por unidade aquífera na região, se destacando os aquíferos de complexos metamórficos com quase 60% dos poços do alto Velhas, seguido pelos aquíferos Estradas Real, Gandarela e Cauê, que juntos somam aproximadamente 18% dos poços. Os dados são coincidentes com o uso e ocupação da área e mostram o caráter urbano e minerário das captações subterrâneas da região.

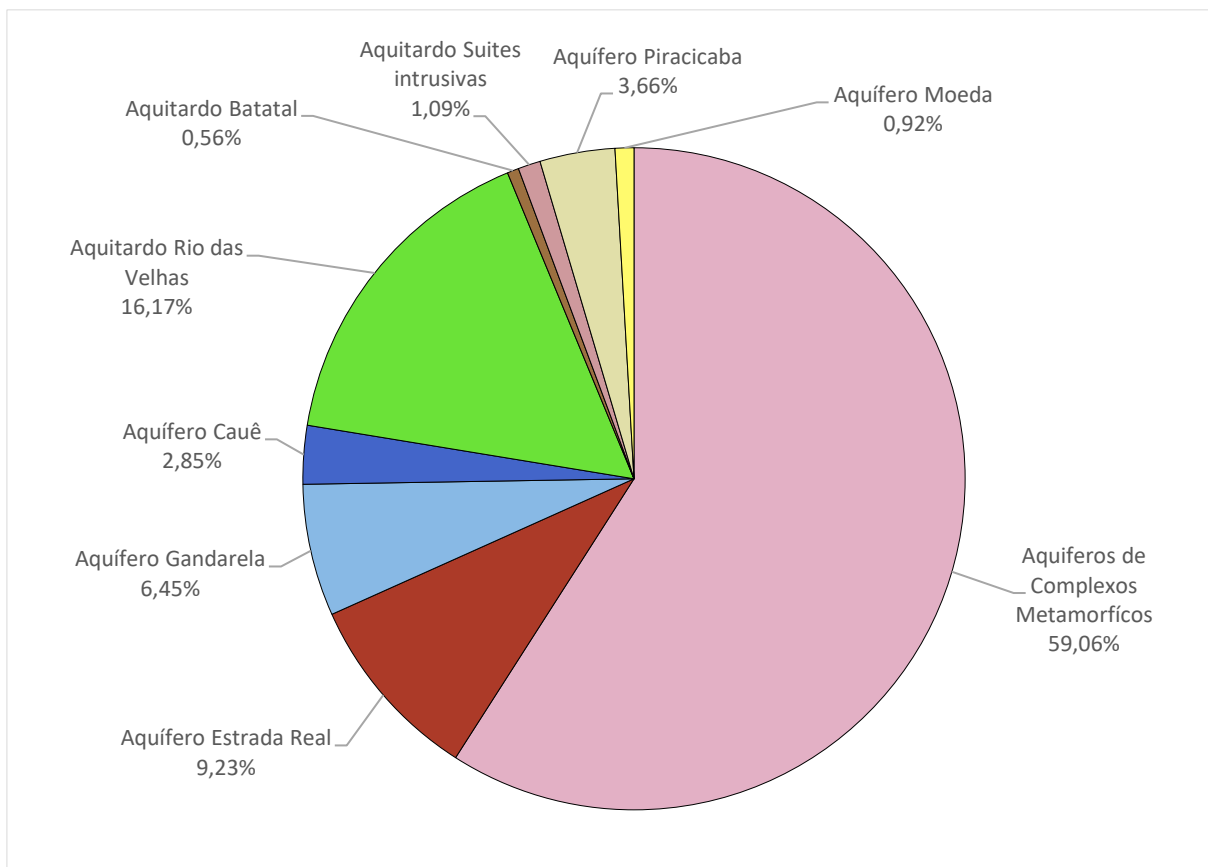


Figura 24 - Distribuição das captações subterrâneas por unidade aquífera na área de estudo. Mostra-se uma predominância dos poços em aquíferos de complexos metamórficos.

Quando confrontamos os dados de exploração por aquífero/aquífero (Figura 25), vemos que a distribuição se mantém semelhante a quantidade de poços por aquífero. Entretanto vale ressaltar quanto essa distribuição, uma vez que o aquífero com maior número de poços e exploração é um aquífero de baixa produção e de poços de baixa vazão. Porém, isso é compensado pelo alto volume de poços instalados, logo, quando somada a exploração, mesmo que individualmente baixa, é superior a poços de alta exploração de outras áreas com aquíferos mais produtivos.

O fenômeno anteriormente observado pode indicar impactos sobre os aquíferos de complexos metamórficos, já que, como observado, são aquíferos de mais baixa vazão e representando uma exploração significativa na área. O impacto não se limita apenas ao aquífero anteriormente citado, uma vez que, aquíferos como Cauê e Gandarela, representam  $\frac{1}{4}$  da vazão total da área.

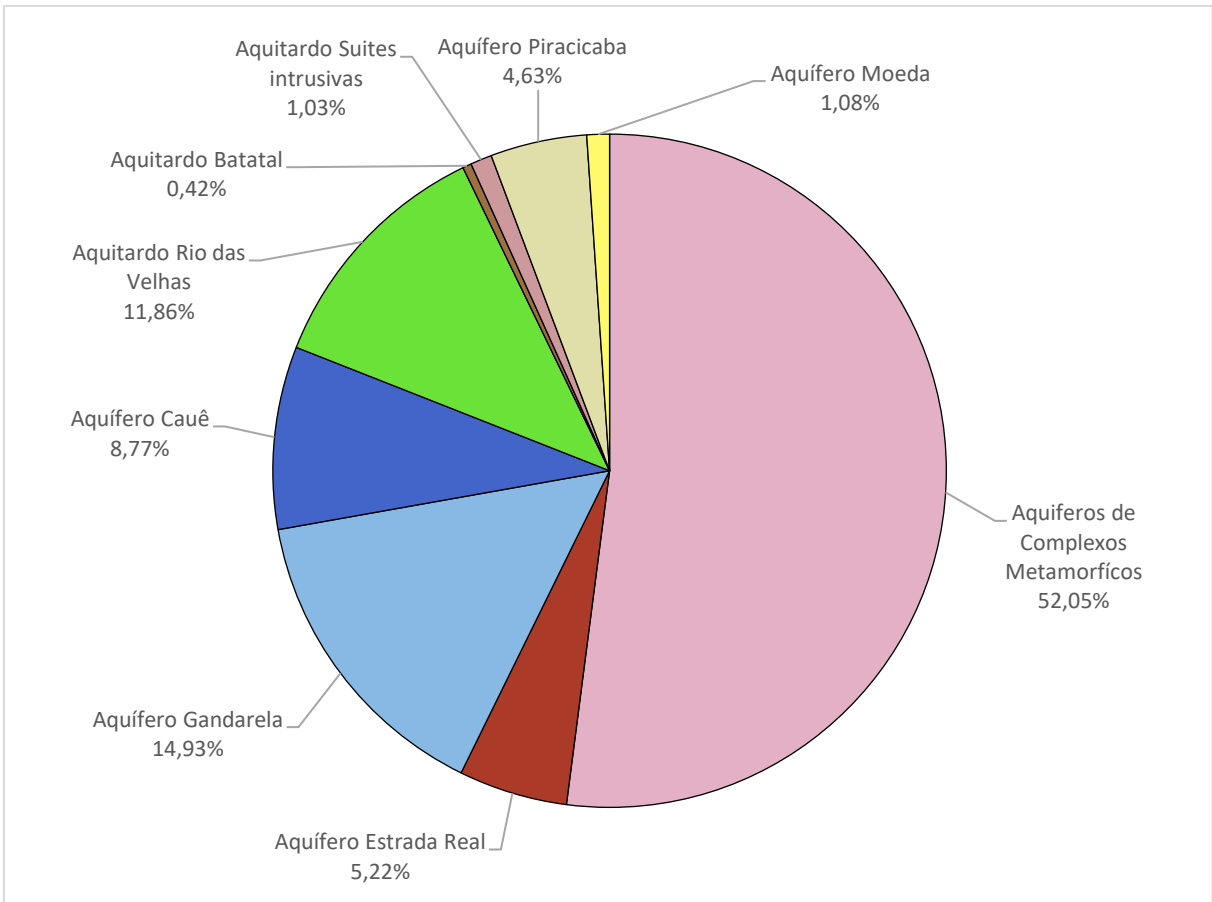


Figura 25 - Distribuição de exploração por unidade aquífera da área de estudo. Os dados se mostram bastante semelhantes à quantidade de captações, mostrando que são intimamente ligados.

#### 6.3.4 Captações superficiais

Uma forma alternativa de captação, são bombeamentos e capturas de águas superficiais de uma bacia. A Figura 26 mostra a distribuição dessas captações superficiais no alto rio das Velhas.

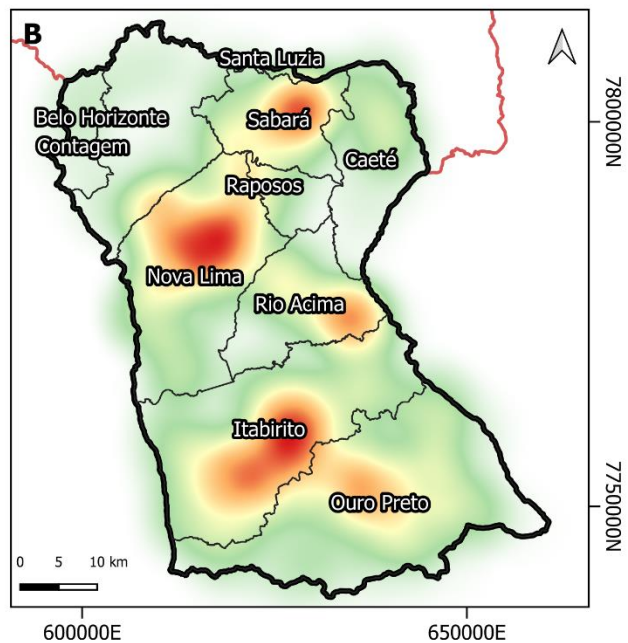
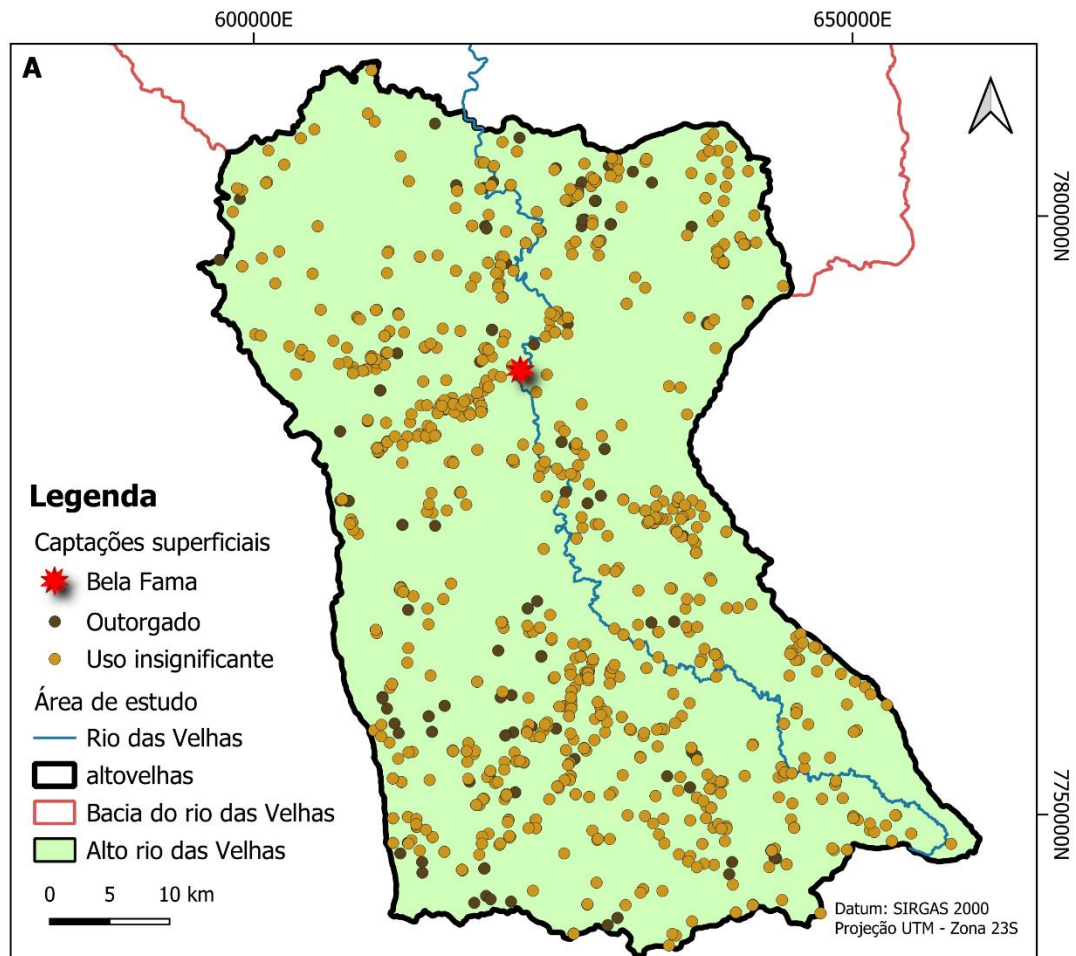


Figura 26 - (A) Mapa de captações superficiais separadas entre outorgadas (marrom) e uso insignificante (Amarelo), além do destaque dado a captação de Bela Fama (Vermelho). (B) Mapa de calor da concentração de captações com destaque nos municípios do Alto rio das Velhas.

A distribuição dos poços na área é variada com uma forte predominância do uso insignificante sobre o outorgado. Não há preferência de localização, além de claro, estar sobre um corpo de água da região. Em relação à distribuição por município, há um efeito contrário ao observado nas captações subterrâneas, onde as captações superficiais se concentram predominantemente fora das manchas urbanas, possuindo alguns pequenos pontos em cidades da região. Se destacam os municípios da porção sul da área, onde se concentram o maior número de captações.

A Figura 27 mostra a relação de captações em atividade e a vazão explorada anualmente em  $m^3/s$  no regime de outorga. Assim como os dados de poços há um crescimento gradual durante as décadas, mas diferente do aspecto exponencial observado nos dados de poços, as captações superficiais mostram um caráter de degrau, sendo o primeiro entre os anos de 1970 e 1994 com vazão de  $<0,005 m^3/s$ , o segundo entre 1995 e 2003 com vazão de  $0,05 m^3/s$ , o terceiro de 2004 a 2012 com vazão de  $0,115 m^3/s$ . entre 2013 e 2020 a vazão flutua entre  $0,17 m^3/s$  e  $0,12 m^3/s$ , com a maior vazão em 2014, 2015 e 2020. Há um fenômeno nos dados quando se compara os dois dados plotados, existe uma relação inversa entre a quantidade de captações e a vazão, em momentos que haviam mais captações, a vazão explorada era menor, isso ficou marcado entre 1970 e 2009. O inverso acontece a partir de 2010, quando começa um declínio de captações em atividade e um aumento das vazões.

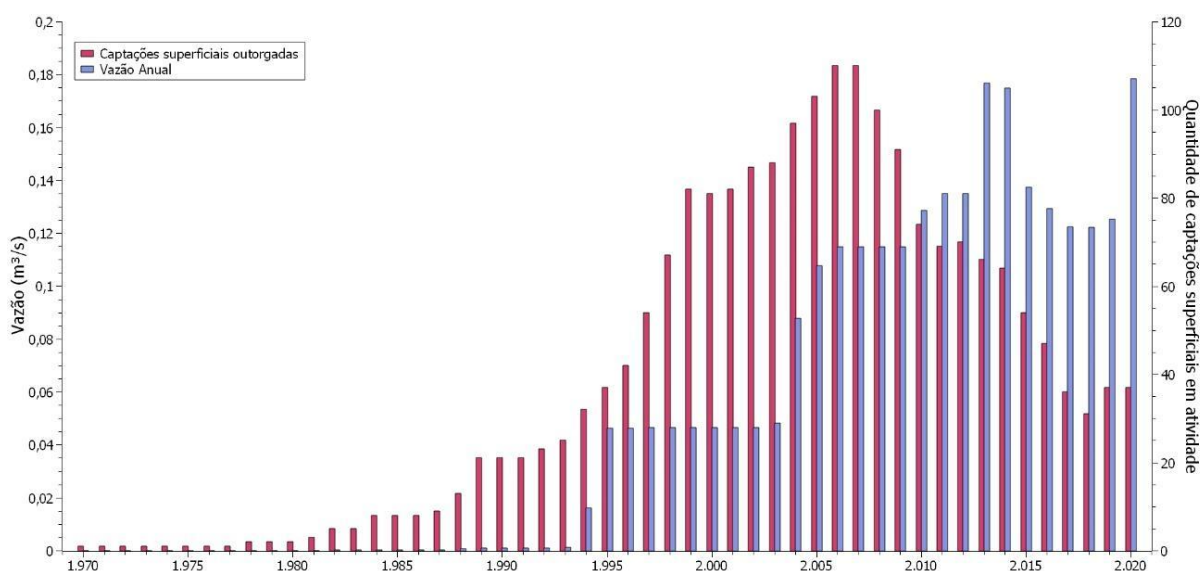


Figura 27 - Gráfico de vazão e quantidade de captações superficiais em atividade por ano na bacia do Alto rio das Velhas para captações outorgadas.

Já as captações superficiais no regime de uso insignificante (Figura 28) apresentam uma tendência semelhante ao de uso de outorga subterrânea, anteriormente descrita, onde há uma

ascensão até o início da última década, quando há uma redução tanto da vazão quanto da quantidade de captações ativas. A maior captação observada acontece durante os anos de 2015/2016, com um montante de 0,7 m<sup>3</sup>/s. Embora a legislação para uso insignificante apareça em 1999, há registros anteriores a essa data, mas que devem ter sido classificados como tal pelo órgão gestor devido ao volume outorgado. A redução se deve ao vencimento das outorgas.

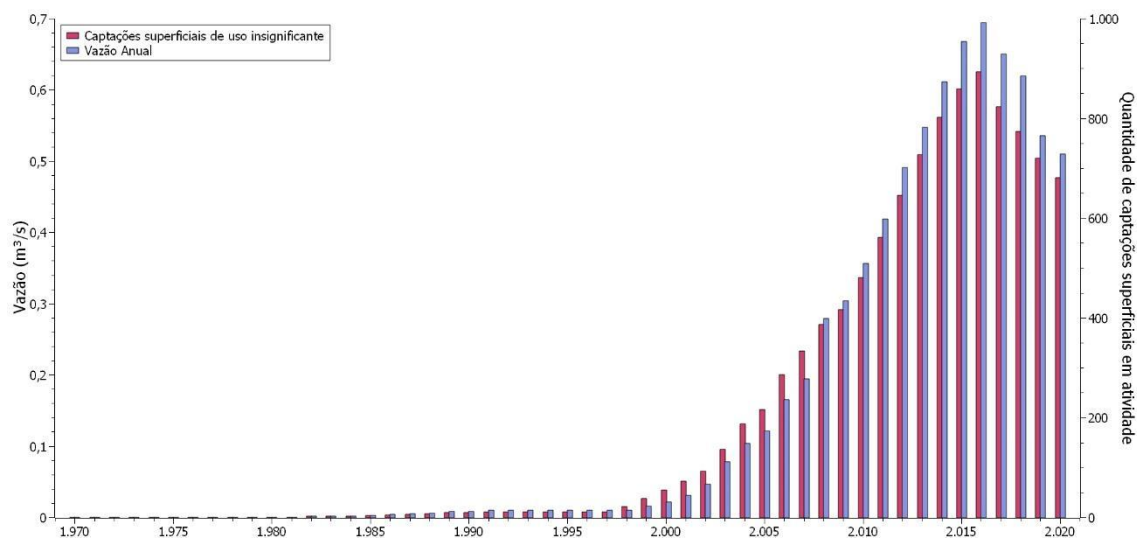


Figura 28 - Gráfico de vazão e quantidade de captações superficiais em atividades por ano na bacia do Alto rio das Velhas para captações de uso insignificante.

Semelhantemente ao observado com as captações subterrâneas, há um crescimento exponencial das captações, atrelada principalmente ao crescimento populacional. Porém, devido a concentração fora das manchas urbanas, é entendido que as captações alimentam principalmente fazendas e sítios às margens dos corpos d'água. Em relação a vazão explorada, quando se compara com a vazão de base do rio das Velhas, uma vez que essa água deságua diretamente nele, não é possível notar, em nenhuma das 3 estações fluviométricas, redução da vazão do rio principal devido ao volume não representar nem um vigésimo da vazão mais baixa observada na estação Honório Bicalho no meio da área, indicando que captações superficiais não representam volume significativo, apresentando uma única exceção que será vista a seguir.

### 6.3.5 Captação de Bela Fama

Dentre as captações superficiais do Alto rio das Velhas, se destaca a captação de Bela Fama, no município de Nova Lima (Figura 29), responsável por abastecer 60% de Belo Horizonte e 40% da região metropolitana (CBH Rio das Velhas, 2019).

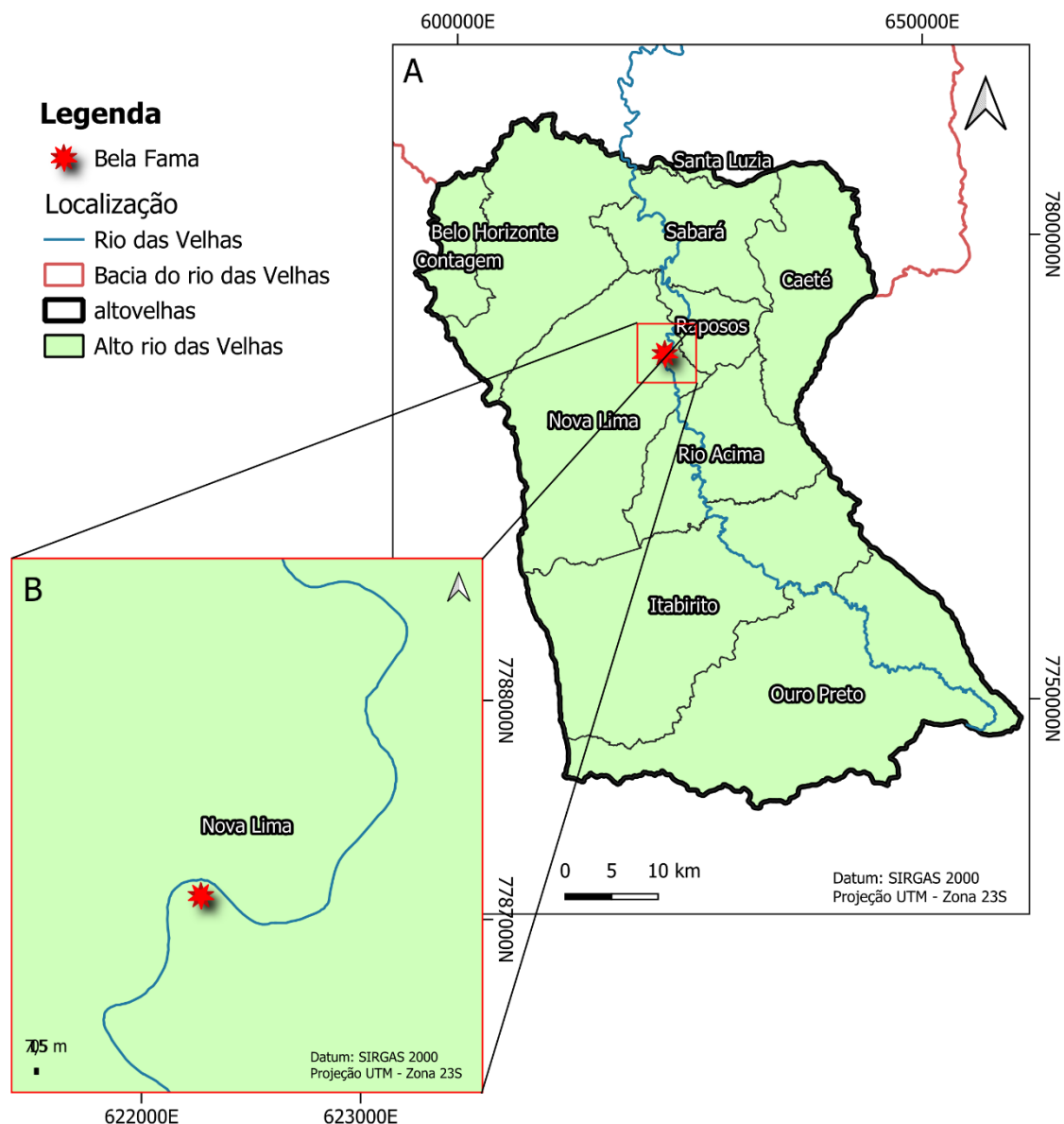


Figura 29 - (A) Mapa de localização da principal captação do Rio das Velhas, a estação de Bela Fama. (B) ampliação da área onde se localiza a estação de Bela Fama.

Com uma outorga de  $8,53 \text{ m}^3/\text{s}$ , essa captação é administrada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e representa a principal retirada em volume do leito do rio das Velhas.

Dentre todas as captações, superficiais e subterrâneas, a estação de Bela Fama se destaca pelo alto volume retirado, representando aproximadamente 4 vezes o volume de todas as outras somadas. Ela está localizada próxima ao fluviômetro de Honório Bicalho, porém a montante dele. Seu alto volume, diferente das outras captações, representa um quantitativo significativo.

### 6.3.6 Influências observáveis

A distribuição das captações na área de estudo é bastante heterogênea, concentrando-se principalmente na região noroeste da área, sobre o aquífero de complexos metamórficos. Com uma captação de aproximadamente 13 m<sup>3</sup>/s no ápice, próximo do ano de 2012, a retirada de água da bacia da alto Velhas tem sua maior captação na porção central da bacia, com a captação da COPASA, a Bela Fama.

Quando se confronta os dados de vazão do rio das Velhas com os dados de captação o resultado é um uma retirada importante de água da bacia, principalmente em momentos de mínima vazão do rio, podendo representar mais de 50% da vazão mínima da pinhões quase 5 vezes a vazão mínima da Fazenda Água Limpa. Demonstra-se assim uma forte perda de água na bacia em períodos de estiagem do rio das Velhas e seus afluentes.

Ao se olhar para as captações subterrâneas, que sozinhas representam cerca de 5 m<sup>3</sup>/s, tem-se que 50% da vazão retirada está em aquíferos fissurais dos complexos metamórficos, em especial sobre o complexo Belo Horizonte. Esses aquíferos são conhecidos pela menor produtividade, porém representam o maior montante de retirada, chamando a atenção para as maiores reduções de disponibilidade hídrica e recarga do rio das velhas nas porções mais a jusante da área por vias subterrâneas. Vale ressaltar que, como essa área está extremamente antropizada, deve haver uma redução significativa da recarga e conseqüentemente do armazenamento, e um aumento do fluxo superficial, devendo ser o principal meio de alimentação dos afluentes da Velhas, em especial o ribeirão Arrudas.

Melo (2016) compara a exploração na estação de Bela Fama dentro da Q7,10 seguindo uma vazão de referência de 11,68 m<sup>3</sup>/s e uma exploração na área montante a estação de 10,57 m<sup>3</sup>/s – valores referentes aos anos de 2000-2015. A autora mostra que dentro da vazão de referência, o rio ainda mante uma vazão sem perdas, porém, dentro de 30% da Q7,10 o rio tem perdas de quase 70% da vazão de referência. Quando se compara com os dados deste trabalho, que usaram o mesmo banco de dados, a influência da retirada de água se dará de forma semelhante ao previsto no trabalho citado com aumento progressivo de perda com o avançar das décadas.

## 7 CONCLUSÃO

A dinâmica, desde 1970 até 2020, na bacia do alto rio das Velhas vem se transformando em diversos aspectos. As componentes naturais apresentaram variações, onde foram definidos ciclos para melhor observar sua influência hidrometeorológica na área. As chuvas e os dias que elas ocorreram mostraram redução sutil e não perceptível dentro do período avaliado, a razão entre as variáveis se manteve constante dentro dos ciclos analisados. A temperatura foi a variável que mais apresentou mudanças significativas, aumentando 1,5°C entre o primeiro e último ciclo avaliado, o que, embora não parece significativo, pode representar mudanças expressivas em diversas relações dentro da bacia. O balanço climatológico retornou diversas variáveis da área, mostrando redução, leve, do excedente hídrico da região, aumento do déficit hídrico, mostrou que a evapotranspiração real está estável em ciclo de baixa, mas sofre forte influência da pluviometria e temperatura em ciclos de alta. Com esses dados foi possível avaliar o índice de aridez e observar sua flutuação entre os ciclos, mas com tendência de aumento entre o início e o fim do período avaliado. As influências naturais observadas estão especialmente ligadas ao aumento da temperatura, e afetam com mais ênfase as regiões sudeste e nordeste da bacia, tornando essas regiões locais de maior atenção e com necessidade de estudos mais detalhados e em menor escala para observar melhor essa influência.

Em relação às variáveis antrópicas, foi observado aumentos do uso e ocupação na área, com enfoque principal na urbanização (casas, empresas e indústria) e mineração, aumentando mais de 50% da sua área em 40 anos, entretanto representando apenas 20% da área total da bacia, com forte concentração na porção noroeste da área. Em relação às retiradas de água da região, sejam por captações subterrâneas ou superficiais, foi observado valores baixos na maioria das captações, exceto em Bela Fama. Falar de influência antrópico na região não é simples, uma vez que não são notadas variações entre uma estação fluviométrica e outra, mas quando observamos a relação de quantidade de retirada total e quanto de água passa pelos fluviômetros, notamos, principalmente em Pinhões – única estação depois da retirada de Bela Fama – percentagem altas do volume total observado sendo retirada por meio de captações.

Avaliar variáveis antrópicas e naturais isoladas é importante para distinguir responsabilidades e observar como dinâmicas são afetadas isoladamente, porém entender que muitas vezes elas estão “trabalhando” juntas pode ser um fator chave para a avaliação completa. Chama-se atenção o aumento do índice de aridez e como ele pode reduzir a médio e longo prazo a vazão do rio das Velhas, associado ao aumento das captações, resulta em uma influência

mista, uma vez que se reduz a Avaliar variáveis antrópicas e naturais isoladas é importante para distinguir responsabilidades e observar como dinâmicas são afetadas isoladamente, chuva – observado sua redução sutil – e aumenta a temperatura, a recarga não acontece, mas a retirada sim.

Para o período analisado, a componente natural se mostrou a principal responsável por impactar negativamente a bacia do alto rio das Velhas, mas é observado que a componente antrópica gera impactos na bacia devido à crescente e frequente retirada de água de aquíferos e rios por toda a região, em especial aquíferos de complexos metamórficos.

Recomenda-se estudos em escala local, em áreas estratégicas, identificadas neste trabalho, para que possam refinar os dados encontrados e ajudar a estabelecer melhores relações. Para componentes naturais, as porções sudeste e nordeste apresentam os dados mais chamativos, para as antrópicas, os municípios de Belo Horizonte, Contagem e Nova Lima, representados principalmente pelos aquíferos de complexos metamórficos, aquífero Cauê, aquífero Gandarela e aquífero Estrada Real, isto é, porção noroeste e oeste da bacia. Nessas regiões destacadas é aconselhado a instalação de uma rede de monitoramento tanto subterrânea quanto superficial, para vazão e qualidade da água, além de mais estações meteorológicas e pluviométricas para refinamento dos dados.

## 8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **HIDROWEB – Séries Históricas**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 07 nov. 2024.

ALKMIM F. F. & MARTINS-NETO M. A. 2012. **Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil**. *Mar. Pet. Geol.* 33, 127-139;

ALMEIDA L. G., OLIVEIRA D. J., ENDO I. 2001. **O arcabouço estratigráfico-estrutural da região de Dom Bosco/Bela Vista, Quadrilátero Ferrífero, como manifestação da orogênese minas com polaridade tectônica para sudoeste**. 11º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, SBG/ Núcleo Minas Gerais, Belo Horizonte. *Anais*, arquivo eletrônico;

ALMEIDA L. G., CASTRO P. DE T. A., ENDO I., FONSECA M. A.. 2005. **O Grupo Sabará no sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: uma revisão estratigráfica**. *Rev. Bras. de Geoc.* 35(2):177-186;

ANDRADE, I. B., DE SOUZA RODRIGUES, A., DE PAULA, R. S., & NOVO, T. A. (2023). **Recarga dos aquíferos no flanco oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

BABINSKI M., CHEMALE JR. F., VAN SCHMUS W. R.. 1995. **The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil**. *Prec. Res.* 72, 235–245;

BALTAZAR O. F. & PEDREIRA A. J.. 1998. **Associações litofaciológicas**. In: M. Zucchetti & O. F. Baltazar (Org.). Projeto Rio das Velhas: Texto explicativo do mapa geológico integrado. Escala 1:100.000. Convênio DNPM/CPRM, Belo Horizonte;

BALTAZAR O.F. & ZUCCHETTI M.. 2007. **Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits**. *Ore Geol. Rev.* 32, 471–499;

BARBOSA G.V. 1980. **Superfícies de Erosão no Quadrilátero Ferrífero**. Revista Brasileira de Geociências. 10(1):89-101.

BARBOSA L. H DO C., ARAÚJO L. P., ASSUNÇÃO P. H. DA S., BOVOLENTA R. G., CANABRAVA R. L. P., CARNEIRO M. B., CIARALLO F., COSTA T. L. DA S., FAVERSANI G., MASSA G. F., GONÇALVES W. F., GUEDES I. N. R., HORTA L. F. C., PEDROSA JR A. C., OLIVEIRA V. Q., SCHFFER P. N. M., ENDO I. 2017. **Falha Itacolomi: uma nova estrutura do Quadrilátero Ferrífero**. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. *Anaisdo Geosudeste 15º Simpósio de Geologia do Sudeste e 19º Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, Diamantina – Minas Gerais;

BARBOSA L. H. DO C.. 2018. **Serra do Itacolomi revisitada: estratigrafia, arcabouço estrutural e aplicação de métodos geofísicos, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 133p.;

BEATO, D.A.C.; MONSORES, A.L.M.; BERTACHINI, 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.9. Parte A.

BEATO, D.A.C.; MONSORES, A.L.M.; BERTACHINI, A. C (2006). **Potencial aquífero nos metassedimentos do quadrilátero ferrífero – região da apa sul rmbh - MG**. Águas Subterrâneas. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23106>

CALOIERO, T., PELLICONE, G., MODICA, G., & GUAGLIARDI, I. (2021). **Comparative analysis of different spatial interpolation methods applied to monthly rainfall as support for landscape management**. *Applied Sciences*, 11(20), 9566.

CARVALHO FILHO, A. de. **Solos e ambientes do Quadrilátero Ferrífero (MG) e aptidão**

**silvicultural dos tabuleiros costeiros. 2008.**

CASTRO E. C. C. & FERREIRA J. E.. 1997. **Aspectos estratigráficos, sedimentares e estruturais dos sedimentos cenozóicos da borda leste do Quadrilátero Ferrífero entre Santa Rita Durão e Fonseca, Minas Gerais.** Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Trabalho Final de Graduação, 49p.;

CASTRO E. C. C., FERREIRA J. E., CASTRO P. DE T. A.. 1998. **Formação Cata Preta: uma nova unidade estratigráfica definida em rochas cenozóicas no extremo leste do Quadrilátero Ferrífero - MG.** In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, 1998, Belo Horizonte. *Anais do XL Congr. Bras. de Geol.* Belo Horizonte, v. 1. p. 82-82;

CBH Rio das Velhas. **Diagnóstico das Unidades Territoriais Estratégicas (UTES) 1 a 7 da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas.** Porto Alegre: ECOPLAN Engenharia Ltda., 2013. Disponível em: [https://siga.cbhvelhas.org.br/publicacoesArquivos/siplan\\_pubMidia\\_Diagnostico\\_UTES\\_1\\_a\\_7.pdf](https://siga.cbhvelhas.org.br/publicacoesArquivos/siplan_pubMidia_Diagnostico_UTES_1_a_7.pdf). Acesso em: 07 nov. 2024.

CBH RIO DAS VELHAS. 2019. **Revista Rio das Velhas – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas**, n. 9, março 2019.

CLINTON, N., & GONG, P. (2013). **Modis detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls.** *Remote Sensing of Environment*, 134, 294–304.

COSTA, M. **Reflexões sobre a política participativa das águas: o caso CBH Velhas/MG.** Dissertação (Mestrado em Geografia). UFMG, Pós-Graduação do Departamento de Geografia, Belo Horizonte, 2008.

CRUZ, C. E., SABADINI HENRIQUES CAETANO, I., VIEIRA MOTA, A. C., FERREIRA, J. J., FERNANDES DE SOUZA, J. V., VELÁSQUEZ, L. N. M., & de PAULA, R. S. (2022). **Caracterização pluviométrica do Quadrilátero Ferrífero na região do Sinclinal Moeda –**

**Minas Gerais.** *Além Dos Muros Da Universidade*, 7(1), 17-35.

da CUNHA, A. R., & MARTINS, D. (2009). **Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP.** *Irriga*, 14(1), 1-11.

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

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

DORR J. V. N. II, GAIR J. E., POMERENE J. B., RYNEARSON G. A.. 1957. **Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero.** *Brazil Depart. Nac. Produção Mineral, Div. Fomento Produção Mineral*, Avulso 81, 31p.;

DORR, J. V. N. **Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero.** Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 1957.

DORR, J. V. N. **Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil.** Geological Survey Profi ssional Paper 641-A, Preparado em Cooperação com o Dep. Nac. Produção Mineral, 1969.

ENDO I.. 1997. **Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais.** São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 243p.;

ENDO I., OLIVEIRA A. H., PERES G. G., GUIMARÃES M. L. V., LAGOEIRO L. E., MACHADO R., ZAVAGLIA. G., ROSAS C. F., MELO R. J.. 2005. **Nappe Curral: Uma**

**megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização.** X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / IV International Symposium on Tectonics. Curitiba. Boletim de Resumos Expandidos, p.: 279-282;

ENDO I., GALBIATTI H. F., DELGADO C. E. R., OLIVEIRA M. M. F. DE, ZAPPAROLI A. DE C., MOURA L. G. B. DE, PERES G. G., OLIVEIRA A. H. DE, ZAVAGLIA G., DANDERFER Fº A., GOMES C. J. S., CARNEIRO M. A., NALINI JR. H. A., CASTRO P DE T. A., SUITA M. T. DE F., TAZAVA E., LANA C. DE C., MARTINS-NETO M. A., MARTINS M. DE S., FERREIRA Fº F. A., FRANCO A. P., ALMEIDA L. G., ROSSI D. Q., ANGELI G., MADEIRA T. J. A., PIASSA L. R. A., MARIANO D. F., CARLOS D. U.. 2019. **Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969).** Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero: [www.qfe2050.ufop.br](http://www.qfe2050.ufop.br);

GUIMARÃES D., MELO S. M. G., MELO E. A. V.. 1967. **O Complexo de Bação.** *Bol. Inst. Geol./EFMOP*, 2(1): 1-12;

FIUME, B., NASCIMENTO, F. M. D. F., MIRANDA, J. S. N., & PAULA, T. L. F. D. (2022). **Mapa hidrogeológico do quadrilátero ferrífero.**

FREITAS F. M.. 2019. **Geocronologia U-Pb em zircões detríticos e caracterização litoestratigráfica das rochas metassedimentares da unidade Catarina Mendes: implicações quanto à evolução geotectônica do Quadrilátero Ferrífero.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. 83p.;

GORCEIX C. H.. 1884. **Bacias terciárias de água doce nos arredores de Ouro Preto (Gandarela e Fonseca), Minas Geraes, Brasil:** Ouro Preto, *Escola de Minas, Annaes*, nº. 3, p. 95-114;

HARDER E. C., CHAMBERLIN R. T.. 1915. **The geology of central Minas Gerais, Brazil:** *Jour. Geol.*, v. 23, nº 4, p. 341-378, nº 5, p. 385-424;

HARTMANN L.A., ENDO I., SUITA M. T. F., SANTOS J. O. S., FRANTZ J. C., CARNEIRO M. A., NAUGHTON N. J., BARLEY M. E.. 2006. **Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes**. *Jour. of South Am. Earth Sci.* 20, 273–285;

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 07 nov. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Gráficos Climatológicos – Estação Belo Horizonte (83587)**. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377>. Acesso em: 07 nov. 2024.

JORDT-EVANGELISTA H. & SILVA M. E. DA. 2005. **Rochas metaultramáficas de Lamim, sul do Quadrilátero Ferrífero, MG: contribuição ao conhecimento do protólito da pedra-sabão**. *Rev. Esc. Minas, Ouro Preto*, 58(1): 11-20;

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. p. 91-102, 1928.

LANA C., ALKMIM F. F., ARMSTRONG R., SCHOLZ R., ROMANO R., NALINI JR. H. A.. 2013. **The ancestry and magmatic Evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil**. *Prec. Res.* 231, 157–173.

Lemos, R. S., & Junior, A. P. M. (2019). **Dinâmica territorial, transformações ambientais e implicações no manancial de abastecimento público da Região Metropolitana de Belo Horizonte-bacia hidrográfica do alto Rio das Velhas, Minas Gerais**. *GeoTextos*.

Lobato L.M., Vieira F.W.R., Ribeiro-Rodrigues L.C., Pereira L.M.M., Menezes M.G., Junqueira P.A., Pereira S.L.N. 1998. **Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero, Part**

**I. Description of selected gold deposits.** *Revista Brasileira de Geociências*, **28**(3):339-354.  
doi: 10.25249/0375-7536.1998339354

MACHADO N., SCHRANK A., NOCE C. M., GAUTHIER G.. 1996. **Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for Greenstone Belt setting evolution of a transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil.** *Earth Planet. Sci. Lett.* 141, 259-276;

MACHADO N., NOCE C. M., LADEIRA E. A., OLIVEIRA O. A. B DE. 1992. **U-Pb geochronology of the Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil.** *Geol. Soc. Am. Bull.* 104, 1221–1227;

MAGALHÃES, L. R. (2010). **Contribuição para revisão do plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas: o impacto da mineração do Alto Rio das Velhas.**

MAXWELL C. H. 1972. **Geology and ore deposits of the Alegria district, Minas Gerais, Brazil.** Washington/US, Geol. Survey Prof. Paper. 72p. 341J.

MAGALHÃES, C. C. D. C., MELO, M. C. D., GUIGUER, N., & PAULA, R. S. D. (2022). **The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil.** *Brazilian Journal of Geology*, 52, e20220005.

MAZROOEI, A., REITZ, M., WANG, D., & SANKARASUBRAMANIAN, A. (2021). **Urbanization impacts on evapotranspiration across various spatio-temporal scales.** *Earth's Future*, 9, e2021EF002045

Melo, M.C. **Segurança hídrica para abastecimento urbano: proposta de um modelo analítico e aplicação na bacia do rio das Velhas, Minas Gerais /.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2016. Tese(doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas

de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Engenharia Civil, 2016-12.

MOURAO, M.A.A. **Caracterização hidrogeológica do aquífero cauê, quadrilátero ferrífero, MG: Subsídios para a gestão dos recursos hídricos no quadrilátero ferrífero.** 2007.

NERY, Flávio Henrique. **VARIABILIDADE PLUVIOMÉTRICA NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS: ANÁLISE DA MÉDIA ANUAL DE PRECIPITAÇÃO DO PERÍODO DE 1991-2002.** *Cadernos do LESTE*, v. 16, n. 16, 2016.

NOCE C. M.. 1995. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.** Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 129 p.;

OMETTO, J.C. 1981. **Bioclimatologia vegetal.** São Paulo: Agronômica Ceres. 440p.

PEIFER BEZERRA D. 2018. **The Pattern and Style of Landscape Evolution in Post-Orogenic Setting.** Tese de Doutorado. Universidade de Glasgow. 271 p.

PROJETO MAPBIOMAS – **Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**, acessado em 01 de setembro de 2024 através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>

RAPOSO F. O.. 1991. **Estratigrafia, petrografia e petrologia.** In: **Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, Brasília, DF. Folha Rio Espera.** Parte II, Capítulo 2. p. 27-88. CPRM/DNPM;

SALGADO A.A.R., BRAUCHER R., VARAJÃO C.A.C., COLIN F., VARAJÃO A.F.D., NALINI JR. H.A. 2008. **Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of (10Be) cosmogenic nuclei.** *Zeitschrift fur Geomorphologie*. 52:317-323.

SANT'ANNA L. G.. 1994. **Mineralogia das argilas e evolução geológica da bacia de Fonseca, Minas Gerais**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de mestrado, 151p.;

SCHORSCHER H. D.. 1978. **Komatiitos na estrutura *greenstone belt*, Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. In: 30º Congr. Bras. Geol., Recife. Soc. Bras. Geol. pp. 292-293;

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE MINAS GERAIS (SEMAD). **SIAM – Sistema Integrado de Informação Ambiental**. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/siam/processo/index.jsp>. Acesso em: 07 nov. 2024.

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

SHINZATO, E.; CARVALHO FILHO, A. de. Pedologia. In: **PROJETO APA Sul RMBH: estudos do meio físico**. Belo Horizonte: CPRM/EMBRAPA/SEMAD, 2005. V5, partes A-B. (Série programa informações básicas para gestão territorial – GATE).

TABIOS, G.Q.; SALAS, J.D. **A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation**. J. Am. Water Resour. Assoc. **1985**, 21, 365–380.

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**. Geography Review, Nova Iorque, v. 38, n. 1, p. 54-101, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1)

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

VIAL D. S., DE WITT E., LOBATO L. M., THORMAN C. H.. 2007. **The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil**: *Ore Geol. Rev.* 32, 511–542;

ZUCCHETTI M., BALTAZAR O. F., RAPOSO F. O.. 1998. Estratigrafia. In: M. Zucchetti & O. F. Baltazar (Org.). **Projeto Rio das Velhas: Texto explicativo do mapa geológico integrado. Escala 1:100.000**. Convênio DNPM/CPRM, Belo Horizonte.