

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial

Daniele Costa de Mesquita

**ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NA
GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS:**

um estudo no Quadrilátero Ferrífero – MG

Belo Horizonte

2023

Daniele Costa de Mesquita

**ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NA
GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS:**

um estudo no Quadrilátero Ferrífero – MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Laudaes

Área de concentração: Análise Espacial

Belo Horizonte

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

M582a Mesquita, Daniele Costa de
Análise da integração de águas superficiais e subterrâneas na gestão de recursos hídricos: um estudo no Quadrilátero Ferrífero – MG / Daniele Costa de Mesquita. Belo Horizonte, 2023.
122 f. : il.

Orientador: Sandro Laudares
Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Geografia

1. Hidrogeologia. 2. Recursos hídricos - Quadrilátero ferrífero (MG). 3. Gestão Integrada de Recursos Hídricos. 4. Águas subterrâneas. 5. Lagos. 6. Rios. I. Laudares, Sandro. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 556

Daniele Costa de Mesquita

**ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NA
GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS:**

um estudo no Quadrilátero Ferrífero – MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como
requisito como requisito parcial para obtenção do título
de Mestre em Geografia.

Área de concentração: Análise Espacial

Prof. Dr. Sandro Laudares (orientador)

Prof. Luiz Eduardo Panisset Travassos

Prof. Úrsula Ruchkys de Azevedo

Belo Horizonte, 31 de março de 2023

AGRADECIMENTOS

Ao Victor, por me incentivar a tentar, por me dar forças nos momentos difíceis, por me apoiar durante todo esse tempo, por todo amor, carinho e paciência, além das correções e orientações. Acima de tudo, por acreditar em mim, mais que eu mesma.

À Claudia Romeu, que me ajudou a ressignificar esse processo, me acalmou nos momentos de desespero e me fez chegar até o fim.

Ao meu orientador Sandro Laudaes, por entrar nessa comigo. Obrigada pela confiança!

À minha família, que nunca entendeu muito bem o meu trabalho, mas sempre me apoiou e acreditou em mim.

Ao Rodrigo Sergio de Paula, que lá em 2011 me ajudou a dar os primeiros passos na Hidrogeologia e desde então me ensinou tudo que podia sobre o assunto. Sua contribuição na minha jornada é indescritível.

Aos amigos que de perto ou de longe, de alguma forma, me incentivaram.

Aos usuários do fórum MGB-IPH, cujas respostas me ajudaram diversas vezes durante este trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial que contribuíram para minha formação.

À CAPES, pela bolsa que me permitiu este mestrado.

“Physical geography and geology are inseparable scientific twins”

(Roderick Impey Murchison)

RESUMO

As águas subterrâneas e superficiais constituem um sistema integrado em contínua interação e, portanto, em processo de interferência mútua. Diante disso, estudos com enfoque na gestão de recursos hídricos devem considerar esta interação entre os meios para avaliação da disponibilidade hídrica qualquer que seja a área em questão. Soma-se a isso os aspectos sociais quando se trata de recursos hídricos, fazendo com que os estudos com enfoque em sua gestão se justifiquem em diferentes aspectos. Neste trabalho buscou-se subsidiar a gestão integrada dos recursos hídricos, considerando as águas superficiais e subterrâneas na avaliação da disponibilidade hídrica na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Foi utilizado o Modelo de Grandes Bacias – MGB para regionalização de vazões, a partir das quais estimou-se a oferta hídrica com base na Q7,10. As demandas hídricas foram calculadas com base nos pontos outorgados em águas superficiais e subterrâneas disponíveis no Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos e a relação entre oferta e demanda foi classificada conforme o Indicador de Disponibilidade Hídrica – IDHidr. Os resultados indicam que o uso das águas subterrâneas reduz a classificação de escassez e aumenta o atendimento às demandas hídricas. O produto final é disponibilizado em aplicativo de geovisualização, funcionando como forma de divulgação da informação para a comunidade em geral e, com isso, podendo vir a ser utilizado na participação pública na gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: hidrogeologia, águas subterrâneas, geotecnologias, SIG.

ABSTRACT

Groundwater and surface water constitute an integrated system in continuous interaction and, as such, in a process of mutual interference. Therefore, studies focusing on water resources management should consider this interaction between the systems when assessing water availability, whatever the area in question. This work sought to support the integrated management of water resources, considering surface and groundwater in the assessment of water availability in the Quadrilátero Ferrífero region, in Minas Gerais. The Quadrilátero Ferrífero region is known for its large mineral reserves, mainly iron ore from the Cauê Formation, the same geological unit that houses the main regional aquifer of the region. To carry out this integrated analysis, the Large Basin Model – MGB was used for regionalization of flows and to calculate availability. Water demands were calculated based on public data while classification was done using the Water Availability Indicator – IDHidr. The results indicate that the use of groundwater reduces the classification of scarcity and increases the fulfillment of water demands. The final product was made available in a geovisualization application, serving as a way of disseminating information to the community in general and, therefore, may be used in public participation in the management of water resources, as provided for in the Water Law.

Keywords: hidrogeology, underground water, geotechnologies, GIS.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CARACTERIZAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CICLO HIDROLÓGICO.....	8
FIGURA 2. CARACTERIZAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ZONAS SATURADA E NÃO SATURADA NO SUBSOLO	9
FIGURA 3. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA DIVIDIDA EM SUB-BACIAS E DIAGRAMA DE PERCURSO DA ÁGUA ATÉ A SAÍDA DA BACIA.....	17
FIGURA 4. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CICLO HIDROLÓGICO SIMULADO PELO MODELO DE GRANDES BACIAS.....	18
FIGURA 5. CUBO CARTOGRÁFICO.....	33
FIGURA 6. LOCALIZAÇÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO NO ESTADO DE MINAS GERAIS	35
FIGURA 7. MUNICÍPIOS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	36
FIGURA 8. FAIXAS DE DESENVOLVIMENTO HUMANO MUNICIPAL.....	37
FIGURA 9. ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO HUMANO DOS MUNICÍPIOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.	37
FIGURA 10. GEOLOGIA SIMPLIFICADA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO APRESENTANDO A DISTRIBUIÇÃO DO EMBASAMENTO CRISTALINO, SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS, SUPERGRUPO MINAS E GRUPO ITACOLOMI. BASEADO EM DORR (1969) E ROMANO (1989).....	40
FIGURA 11. COLUNA ESTRATIGRÁFICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	42
FIGURA 12. MAPA DA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS PEDOMBIENTES IDENTIFICADOS NA APA SUL RMBH E SUA LOCALIZAÇÃO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	45
FIGURA 13. MAPA DE COBERTURA E USO DA TERRA NOS MUNICÍPIOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	48
FIGURA 14. DIVISÃO HIDROGRÁFICA NACIONAL – REGIÕES HIDROGRÁFICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG – 2022.	51
FIGURA 15. BACIAS ABRANGIDAS PELO QUADRILÁTERO FERRÍFERO NAS MESORREGIÕES HIDROGRÁFICAS DO ALTO SÃO FRANCISCO E DOCE.....	52
FIGURA 16. COMPARTIMENTAÇÃO DA BACIA DO RIO DOCE EM REGIÕES FISIOMORFICAS	56
FIGURA 17. FLUXOGRAMA DE METODOLOGIA DO TRABALHO.....	61
FIGURA 18. BACIAS HIDROGRÁFICAS NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO E ÁREA SELECIONADA PARA O ESTUDO.....	62
FIGURA 19. FLUXOGRAMA DE APLICAÇÃO DO MODELO MGB.....	64
FIGURA 20. ÁREAS MODELADAS E DRENAGENS DA ÁREA DE ESTUDO GERADAS PELO IPH HYDROTOOLS.....	67
FIGURA 21. MINIBACIAS GERADAS PELO IPH HYDROTOOLS PARA AS ÁREAS MODELADAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	67
FIGURA 22. PROCESSO DE DEFINIÇÃO DE CLASSES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA PELA COMBINAÇÃO DE MAPAS, E A INTERSEÇÃO DAS CRH COM A MINIBACIA, GERANDO AS UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA.....	68
FIGURA 23. MAPA DE URHS EXTRAÍDO PARA AS ÁREAS MODELADAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.	69
FIGURA 24. ESTAÇÕES HIDROMETEOROLÓGICAS SELECIONADAS PARA A ÁREA EM ESTUDO.....	72
FIGURA 25. CURVA DE PERMANÊNCIA OBSERVADA E SIMULADA PARA AS ESTAÇÕES SÃO BRAS DO SUAÇUI MONTANTE, BELO VALE, ALBERTO FLORES E PONTE NOVA DO PARAÓPEBA NA BACIA DO RIO PARAÓPEBA.....	83
FIGURA 26. CURVA DE PERMANÊNCIA OBSERVADA E SIMULADA PARA A ESTAÇÃO HONÓRIO BICALHO MONTANTE, NA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS	84
FIGURA 27. CURVA DE PERMANÊNCIA OBSERVADA E SIMULADA PARA AS ESTAÇÕES ACAIACA JUSANTE, FAZENDA OCIDENTE, NA BACIA DO RIO PIRANGA	84
FIGURA 28. CURVA DE PERMANÊNCIA OBSERVADA E SIMULADA PARA AS ESTAÇÕES RIO PIRACICABA E CARRAPATO (BRUMAL), NA BACIA DO RIO PIRANGA	85
FIGURA 29. COMPARATIVO DAS VAZÕES MÉDIAS DE LONGA DURAÇÃO OBSERVADAS E SIMULADAS.....	86
FIGURA 30. COMPARATIVO DAS VAZÕES MÍNIMAS Q7,10 OBSERVADAS E SIMULADAS	86
FIGURA 31. DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	88
FIGURA 32. DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO... ..	90
FIGURA 33. DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE OUTORGA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	92
FIGURA 34. DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE OUTORGA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	92
FIGURA 35. PROPORÇÃO DA VAZÃO OUTORGADA POR FINALIDADE DE USO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	93

FIGURA 36. PROPORÇÃO DA VAZÃO TOTAL OUTORGADA NAS BACIAS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.	94
FIGURA 37. PROPORÇÃO DA VAZÃO OUTORGADA POR FINALIDADE DE USO DA ÁGUA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS, À ESQUERDA, E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, À DIREITA	95
FIGURA 38. DEMANDA HÍDRICA CONSIDERANDO AS VAZÕES DE RETIRADA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS SUB-BACIAS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	98
FIGURA 39. DEMANDA HÍDRICA CONSIDERANDO VAZÕES DE RETIRADA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NAS SUB-BACIAS DA REGIÃO DO	98
FIGURA 40. DEMANDA HÍDRICA CONSIDERANDO O SOMATÓRIO DAS RETIRADAS EM ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NAS SUB-BACIAS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	99
FIGURA 41. SITUAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO COM BASE NO IDHIDR	100
FIGURA 42. SITUAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO COM BASE NO IDHIDR	101
FIGURA 43. VISUALIZAÇÃO DO WEBMAP CRIADO PARA DISPONIBILIZAR OS PRODUTOS GERADOS NO DECORRER DO TRABALHO.	103

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – INDICADORES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA	21
TABELA 2 - UNIDADES TERRITORIAIS ESTRATÉGICAS DA BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS.	54
TABELA 3 - DESCRIÇÃO DE DADOS UTILIZADOS E SUAS RESPECTIVAS FONTES	65
TABELA 4 - ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO.....	70
TABELA 4 - ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO.....	71
TABELA 5 - ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO.....	71
TABELA 6 – ESTAÇÕES CLIMÁTICAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO	72
TABELA 7. VALORES ADOTADOS PARA OS PARÂMETROS DE VEGETAÇÃO	73
TABELA 8. VALORES DE REFERÊNCIA DOS COEFICIENTES ESTATÍSTICOS NASH, NASH-LOG E BIAS	74
TABELA 10 - CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ÍNDICE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA – IDHIDR	79
TABELA 11 - ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA PARA CALIBRAÇÃO DAS ÁREAS MODELADAS.	81
TABELA 12 - VALORES DOS COEFICIENTES ESTATÍSTICOS DE NASH, NASH-LOG E BIAS NAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA	82
TABELA 12 – ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E SUAS MINIBACIAS CORRESPONDENTES	82
TABELA 14 – QUANTIFICAÇÃO DA Q7,10 E DE SUA VAZÃO OUTORGÁVEL EM ÁGUAS SUPERFICIAIS DAS UNIDADES DE ANÁLISE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	87
TABELA 15 – QUANTIFICAÇÃO DAS RESERVAS HÍDRICAS SUBTERRÂNEAS NAS UNIDADES DE ANÁLISE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	89
TABELA 16 – QUANTIFICAÇÃO DA DISPONIBILIDADE TOTAL (ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS) NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.	90
TABELA 17 – NÚMERO DE CAPTAÇÕES E VAZÃO OUTORGADA NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	91
TABELA 17 - FINALIDADE DE USO DAS VAZÕES DEMANDADAS EM ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO EM ORDEM DECRESCENTE DE USO	94
TABELA 19 - VAZÃO OUTORGADA E PROPORÇÃO POR FINALIDADE DE USO EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NAS BACIAS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.	96
TABELA 20 - VAZÃO OUTORGADA E PROPORÇÃO POR FINALIDADE DE USO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS BACIAS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	97

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESES	3
3. OBJETIVO DA PESQUISA	3
4. JUSTIFICATIVAS	4
5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
5.1. ÁGUA: CONCEITOS E PROCESSOS	7
5.2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA	11
5.2.1. Modelagem numérica	14
5.2.2. Indicadores de disponibilidade hídrica	20
5.3. GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	22
5.4. CARTOGRAFIA E SIG	26
5.5. MUDANÇAS NO CONSUMO DA INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	32
6. CARACTERIZAÇÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	35
6.1. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS	35
6.2. ASPECTOS GEOLÓGICOS	39
6.2.1. Os limites do Quadrilátero Ferrífero e suas principais serras	40
6.2.2. A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero	41
6.3. ASPECTOS DO MEIO FÍSICO	44
6.4. ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS	49
6.5. ASPECTOS HIDROGRÁFICOS	50
6.5.1. Bacia Federal do Rio São Francisco	51
6.5.2. Bacia Federal do Rio Doce	55
6.5.3. Águas subterrâneas	57
7. METODOLOGIA	61
7.1. DEFINIÇÃO DAS BACIAS	61
7.2. MODELAGEM	63
7.2.1. Etapa de pré-processamento	65
7.2.2. Dados e parâmetros de simulação	70
7.2.3. Calibração	73
7.3. QUANTIFICAÇÃO DAS DEMANDAS HÍDRICAS	77
7.4. SETORIZAÇÃO DAS BACIAS A PARTIR DO IDHDIR	78
7.5. DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO DE GEOVISUALIZAÇÃO	79
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES	81

9. CONCLUSÕES	104
10. REFERÊNCIAS	105

1. INTRODUÇÃO

A água tem importância não apenas para consumo humano, mas para inúmeras atividades socioeconômicas. Devido a isso, a Organização das Nações Unidas (ONU), em 1992, elaborou a Declaração Universal dos Direitos da Água, afirmando a necessidade da água para a vida, e estabelecendo a água como um direito fundamental. A demanda por água é crescente em nossa sociedade e, ainda de acordo com a ONU, espera-se que esta demanda cresça em 50% no mundo. O aumento da demanda resulta em aumento do estresse hídrico e culmina na necessidade de que se conheça bem a disponibilidade hídrica nas diferentes regiões brasileiras.

Os recursos hídricos têm duas partes importantes: os superficiais, aqueles representados por rios e lagos; e os subterrâneos, com destaque para os aquíferos. Para que se estabeleça uma gestão eficiente de seus recursos, é necessário considerar os recursos hídricos superficiais e subterrâneos como um sistema único, visto que ambos são parte de um mesmo ciclo hidrológico. No entanto, comumente a avaliação da se limita aos recursos superficiais, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica.

Essa visão integrada é aplicada à área objeto deste estudo, o Quadrilátero Ferrífero (QF), que se destaca como uma das principais regiões produtoras de minério de ferro no mundo. A unidade geológica hospedeira dos corpos de minério de ferro e ouro no QF, as formações ferríferas bandadas da Formação Cauê, além do seu potencial mineral, correspondem também ao principal aquífero do Quadrilátero Ferrífero, com alta disponibilidade hídrica (MOURÃO, 2007).

A existência de água na principal unidade geológica para mineração de ferro é causa de um conflito de interesse. Quando esta avança de encontro ao aquífero, a água prejudica ou impossibilita o processo, necessitando ser removida de forma a permitir o avanço da lavra. Assim, a exploração do minério da Formação Cauê, levou, a partir da década de 1980, a uma necessidade de rebaixamento do nível de água para viabilizar a exploração desse minério pela indústria mineradora da região (MOURÃO, 2007). Tal atividade de rebaixamento deflagrou conflitos de uso pois exigem o bombeamento de volume de água superior à recarga dos aquíferos, atividade pode vir a ameaçar o abastecimento público e a manutenção de ecossistemas frágeis. Uma boa gestão dos recursos hídricos nesta região é, portanto, imperativa.

Ainda que a região apresente conflitos de uso dos recursos hídricos, a avaliação da disponibilidade para outorga por parte do órgão responsável ainda é realizada de forma isolada. As águas superficiais possuem vazões de referência, mas as águas subterrâneas são outorgadas utilizando-se apenas dados pontuais, sem que se considere a inter-relação dos meios hídricos. Diante disso, neste trabalho propõe-se a utilização de um modelo numérico de regionalização de vazões para cálculo da oferta hídrica e análise da conexão entre os meios para avaliar a disponibilidade hídrica no Quadrilátero Ferrífero considerando tanto as águas superficiais quanto as subterrâneas, respondendo assim à hipótese de que a integração dos dados permitirá uma melhor classificação das bacias que compõem a área de estudo em relação a sua real disponibilidade hídrica. O modelo escolhido foi o Modelo de Grandes Bacias (MGB), que se baseia em processos e simula todas as etapas do ciclo hidrológico, incluindo o escoamento superficial e subterrâneo. Conhecendo a disponibilidade superficial e subterrânea e conhecendo as demandas hídricas da região, foi possível utilizar um Indicador de Disponibilidade Hídrica (IDHidr, CONEJO *et al.*, 2009) para classificar as bacias do Quadrilátero Ferrífero quanto a disponibilidade dos recursos hídricos para seus múltiplos usos.

Nesta dissertação foram desenvolvidas todas as etapas necessárias para a classificação das bacias do QF em relação a disponibilidade hídrica. O capítulo 2 apresenta as hipóteses do trabalho. O capítulo 3 explicita os objetivos gerais e específicos. O Capítulo 4 apresenta as justificativas para este trabalho. No capítulo 5 são apresentadas discussões acerca dos conceitos e processos da água, de disponibilidade hídrica, da gestão de recursos hídricos e cartografia e Sistema de Informações Geográficas. O capítulo 6 apresenta uma caracterização do QF. O capítulo 7 explicita a metodologia aplicada no desenvolvimento das atividades deste trabalho e o capítulo 8 apresenta os resultados e discussões e, por fim, o capítulo 9 apresenta as conclusões do estudo.

2. HIPÓTESES

A integração de dados de águas superficiais e subterrâneas permitirá uma melhor classificação das bacias que compõem a área de estudo em relação a sua real disponibilidade hídrica, na avaliação demanda versus disponibilidade, e a geovisualização desses dados atenderá a uma das demandas da gestão integrada de recursos hídricos.

3. OBJETIVO DA PESQUISA

O principal objetivo deste trabalho é realizar avaliação da disponibilidade hídrica, considerando águas superficiais e subterrâneas de forma integrada, para fins de geovisualização, no Quadrilátero Ferrífero.

Os objetivos específicos incluem:

- 1) Delimitar as bacias hidrográficas existentes na região do QF, bases para a análise proposta;
- 2) Quantificar as demandas hídricas nas bacias delimitadas;
- 3) Quantificar a disponibilidade hídrica nas bacias delimitadas de forma integrada, considerando águas superficiais e subterrâneas;
- 4) Setorizar as bacias a partir de um índice de disponibilidade hídrica, apresentando a distribuição espacial da relação disponibilidade versus demanda em mapa síntese;
- 5) Desenvolver um aplicativo *web* de geovisualização para apresentação dos dados e resultados.

4. JUSTIFICATIVAS

A oferta de água em quantidade suficiente e qualidade adequada é fundamental para o desenvolvimento humano. O aumento progressivo das demandas hídricas para suprimento a diversos usos da água evidencia conflitos e desafia a garantia da segurança hídrica. O desequilíbrio do balanço hídrico é uma das dimensões da insegurança hídrica, que somado a dimensões de operação e de gestão dos recursos hídricos e do saneamento, e a variabilidades e mudanças do clima, favorecem a instalação de crises hídricas, como as que afetaram o Brasil na última década. Como exemplo de locais que podem apresentar insegurança, citam-se algumas das grandes regiões urbanas do País: São Paulo e Distrito Federal, com captações próximas às cabeceiras dos principais rios; Recife, Vitória, Santos e Florianópolis, concentradas em zonas litorâneas e abastecidas a partir de bacias de pequeno porte e rios de baixa vazão; Fortaleza e Rio de Janeiro, dependentes de transposições de bacias; e Curitiba, Belo Horizonte e Goiânia, que sofrem com as pressões urbanas sobre seus mananciais e reservatórios de abastecimento (ANA, 2021).

Visando a garantia da segurança hídrica, a Agenda 2030, documento adotado na Assembleia Geral da ONU em 2015, apresenta como um dos seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para 2030, o Objetivo 6: Água Limpa e Saneamento: Assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos. O ODS 6 possui 8 metas relacionadas à “disponibilidade de recursos hídricos, demandas e usos da água para as atividades humanas, ações de conservação dos ecossistemas aquáticos, redução de desperdícios e acesso ao abastecimento de água, esgotamento sanitário e tratamento dos esgotos” (ANA, 2019, p. 9).

As 8 metas do ODS, conforme as Nações Unidas – Brasil, são:

6.1 Até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo a água potável e segura para todos

6.2 Até 2030, alcançar o acesso a saneamento e higiene adequados e equitativos para todos, e acabar com a defecação a céu aberto, com especial atenção para as necessidades das mulheres e meninas e daqueles em situação de vulnerabilidade

6.3 Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente

6.4 Até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água, e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água

6.5 Até 2030, implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis, inclusive via cooperação transfronteiriça, conforme apropriado

6.6 Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos

6.a Até 2030, ampliar a cooperação internacional e o apoio à capacitação para os países em desenvolvimento em atividades e programas relacionados à água e saneamento, incluindo a coleta de água, a dessalinização, a eficiência no uso da água, o tratamento de efluentes, a reciclagem e as tecnologias de reuso

6.b Apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais, para melhorar a gestão da água e do saneamento (ONU-BRASIL)

Dentre as 8 metas do ODS 6, merecem destaque as metas 6.4, que propõe aumento da eficiência de uso da água e garantia de retiradas sustentáveis visando reduzir a escassez de água, e 6.5, que prevê a implementação da gestão integrada de recursos hídricos. Para a meta 6.4, pode-se destacar ainda dois indicadores utilizados para mensurá-la: 6.4.1 - Alteração da eficiência no uso da água ao longo do tempo; e 6.4.2 - Nível de stress hídrico: proporção das retiradas de água doce em relação ao total dos recursos de água doce disponíveis.

O nível de estresse hídrico fornece uma estimativa da pressão pelos recursos de água doce renováveis, superficiais e subterrâneos, exercida pelo total de demandas, para todas as finalidades de usos. Esse indicador é obtido a partir da relação entre as disponibilidades hídricas e as demandas por água.

Com o crescimento das demandas hídricas, torna-se indispensável o desenvolvimento de metodologias que avaliem a disponibilidade hídrica de forma cada vez mais criteriosa. E que a avaliação desta disponibilidade seja calculada considerando os recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

O Quadrilátero Ferrífero, área objeto deste estudo, é conhecido por abrigar grandes empreendimentos minerários que exercem pressão sobre os recursos hídricos, principalmente os subterrâneos. Além disto, nesta área localizam-se alguns municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), terceira maior aglomeração urbana do país. Os mananciais que abastecem a RMBH são predominantemente superficiais e apresentam vulnerabilidade quanto ao atendimento das demandas futuras, com destaque para o rio das

Velhas e os afluentes do rio Paraopeba, principais mananciais, responsáveis pelo atendimento de, respectivamente, 65% e 27% das demandas de Belo Horizonte (ANA, 2021) e cujas bacias localizam-se dentro dos limites do QF.

Não há, no entanto, estudos que integrem águas superficiais e subterrâneas em relação a disponibilidade e demandas sobre estes recursos na região e avaliem as bacias hidrográficas sob esta ótica dentro dos limites do QF. Diante disso, justifica-se a avaliação da disponibilidade hídrica na região levando considerando a interação entre o aquífero e as águas superficiais na região do Quadrilátero Ferrífero e a classificação das bacias que o compõem.

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1. ÁGUA: CONCEITOS E PROCESSOS

A água é a origem e o princípio de todas as coisas. A afirmação atribuída ao filósofo Tales de Mileto (625 a.C. – 558 a.C.) reitera a importância da água para a vida, essencial para o consumo humano, para a navegação, para a agricultura e para a indústria, além de ser parte dos ciclos biogeoquímicos e da diversidade biológica do planeta Terra. A água é o recurso mais importante fornecido pelos sistemas da Terra.

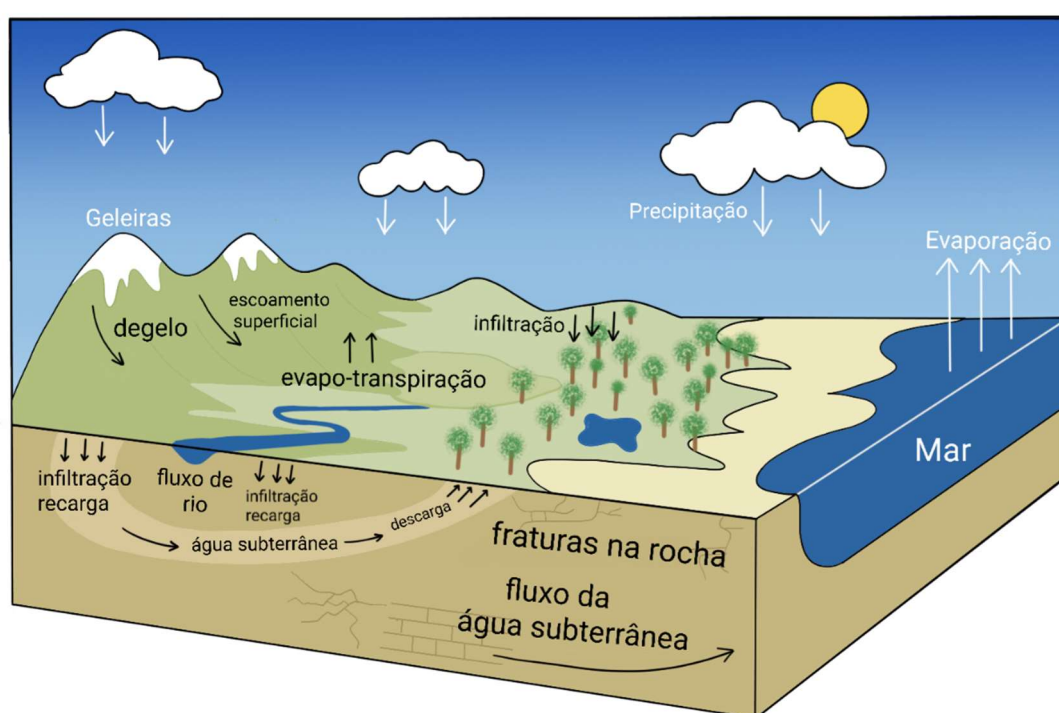
De acordo com Christopherson (1997), um sistema é qualquer conjunto ordenado e interconectado de entidades e suas propriedades, que estão ligados por fluxos de energia e matéria, em oposição ao ambiente circundante fora do sistema. Um sistema é composto por vários subsistemas e seus elementos podem ser organizados em série ou entrelaçados entre si. Sob esta ótica, Peterson (2014, p. 8) define tanto a Terra, quanto o ambiente físico, como um sistema, ou seja, uma “entidade composta por partes inter-relacionadas”, definição essa que está ligada ao conceito de Geossistemas.

Cavalcanti e Correa (2016, p. 6) apontam que, para Bertrand, o conceito de geossistema é definido como “uma entidade natural formada pelas relações entre os componentes da natureza e impactada pela ação da sociedade”. Sochava, por sua vez, define o termo geossistema como “unidade natural de todas as categorias possíveis, do geossistema planetário – envelope geográfico ou ambiente geográfico em geral – ao geossistema elementar – fácies físico-geográfica” (SOCHAVA, 1963 *apud* CAVALCANTI e CORREA, 2016, p. 6). O envelope geográfico, citado por Sochava, foi definido por Isachenko e corresponde à “parte externa da crosta terrestre que inclui a litosfera (com 4 a 5 km de espessura), a hidrosfera, a troposfera (altitude entre 8 e 16 km) e a biosfera” (CAVALCANTI e CORREA, 2016, p. 6).

A Terra opera como um sistema aberto, recebendo energia de uma fonte externa, o sol, e irradiando energia de volta para o espaço (CHRISTOPHERSON, 1997). Em termos de matéria, no entanto, a Terra é um sistema fechado em que 4 sistemas abertos interagem. Dentro dos sistemas da Terra, tanto a matéria quanto a energia são armazenadas e recuperadas, e a energia é transformada de um tipo para outro. Destes sistemas, três deles são abióticos e um é biótico, cada um deles chamado de esfera. A esfera biótica é chamada biosfera e as esferas abióticas são a atmosfera, a litosfera e a hidrosfera. Toda a água que existe na atmosfera, na superfície do planeta e na crosta terrestre formam a hidrosfera, esteja ela na forma líquida, sólida ou gasosa.

Na hidrosfera, cada lugar onde a água é armazenada constitui um reservatório (GROTZINGER e JORDAN, 2013). A água na superfície terrestre e abaixo dela circula entre os diversos reservatórios: dos oceanos, da atmosfera e dos continentes. As trocas de energia entre a água e a atmosfera impulsionam o sistema climático e a troca de energia e matéria que ocorre quando a água flui, conecta a atmosfera, oceano, terra e seres vivos (CHRISTOPHERSON, 1997). Esta circulação da água do planeta, envolvida numa sequência quase contínua de movimento e mudança, é denominada ciclo hidrológico, figura 1.

Figura 1. Caracterização esquemática do ciclo hidrológico



Fonte: Instituto Água e Terra¹

O ciclo hidrológico, conforme Hess (2013), pode ser visto como uma série de reservatórios interligados por vários processos de transferência e em um processo de troca constante de umidade em termos de sua localização geográfica e seu estado físico, em um sistema fechado e circular. Durante o ciclo, a água circula pela atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera (CHRISTOPHERSON, 1997). Em termos gerais, durante o ciclo hidrológico, a água em estado líquido na superfície da Terra evapora para se tornar vapor de água na atmosfera. Sob certas condições atmosféricas, o vapor de água se condensa em minúsculas gotas, formando nuvens,

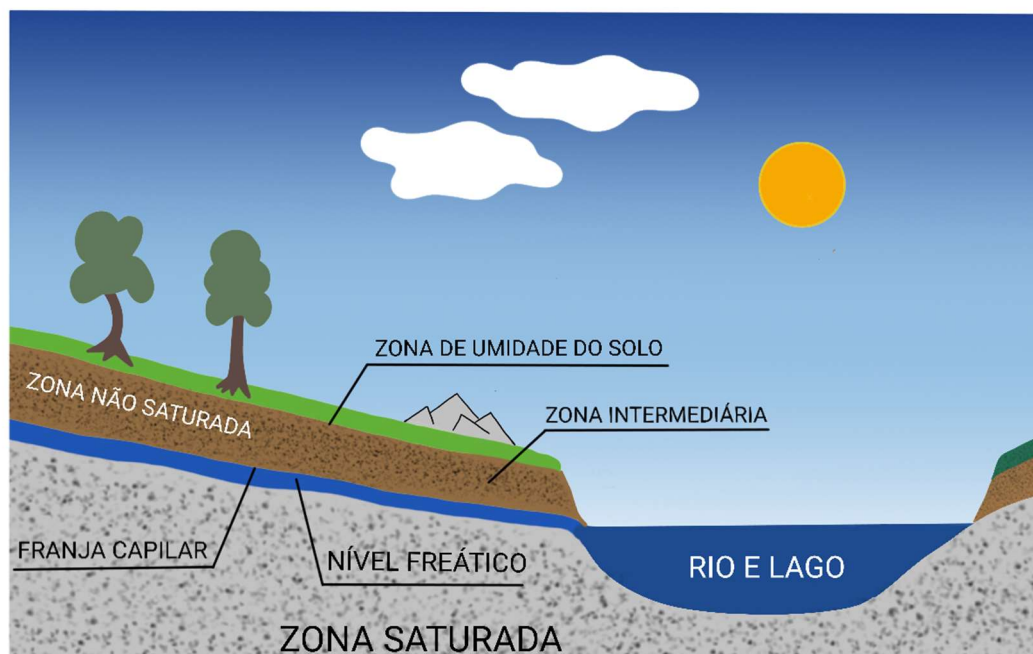
¹ Instituto Água e Terra - Governo do Estado do Paraná. Disponível em < <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Aguas-Subterraneas-Origem-e-ocorrencia> >. Acesso em: 15. Mai. 2022.

e então pode precipitar, como água líquida ou como gelo, sobre o mar, os continentes ou serem revaporizadas ainda no ar. A precipitação que cai sobre os continentes segue por várias vias do ciclo hidrológico.

Parte da água que cai sobre os continentes e escorre sobre sua superfície. Esse movimento, chamado deflúvio, escoamento superficial ou *run-off* se dá pela ação da gravidade, das partes mais altas para as mais baixas do terreno, nos leitos de rios e riachos. As águas que escoam em superfície formam as águas superficiais, cujo destino final são, normalmente, os oceanos.

A outra porção desta água precipitada sobre os continentes encharca os solos, num processo chamado infiltração. Horton (1933) definiu infiltração como a taxa máxima à qual dado solo pode absorver a precipitação numa certa condição, taxa esta que decresce exponencialmente com o tempo, até atingir uma taxa constante, à medida que o solo se torna saturado. Durante a infiltração, parte da água fica retida em níveis mais próximos da superfície do devido a ação da força de adesão ou de capilaridade, constituindo a zona não saturada, enquanto outra porção, sob a ação da gravidade, atinge as zonas mais profundas do subsolo, constituindo a zona saturada (figura 2).

Figura 2. Caracterização esquemática das zonas saturada e não saturada no subsolo



Fonte: Boscardin Borghetti *et al.* (2004) *apud* ABAS²

² Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Águas subterrâneas: o que são?. Disponível em: <<https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/>>. Acesso em 15. Mai. 2022

A zona não saturada é a parte do solo em que os poros estão preenchidos parcialmente por água ou ar, acima do nível freático (MANOEL FILHO, 2008). Na zona não saturada, parte dessa água evapora através do solo superficial e retorna à atmosfera. Outra parte move-se pela biosfera por meio das plantas, num processo chamado transpiração. Essas perdas de água, evaporadas a partir da umidade do solo e transpiradas pelas plantas, foi denominado por Thornwaite (1948) como evapotranspiração. A zona saturada, conforme Manoel Filho (2008), por sua vez, se situa abaixo da zona não saturada e nela todos os vazios do terreno estão preenchidos por água. Por sua vez, o nível freático é a superfície que separa a zona saturada da zona de aeração, ou seja, corresponde ao topo da zona saturada, podendo permanecer a grandes profundidades, ou se aproximar da superfície horizontal do terreno, conforme as características climatológicas da região ou o volume de precipitação e escoamento da água.

Quando a precipitação se infiltra no solo ou em rochas, formam-se as águas subterrâneas, outro componente importante da hidrosfera. Parte das águas subterrâneas desagua, ou descarrega, na superfície dos terrenos, formando as nascentes. Uma outra parcela forma o fluxo de base que deságua nos rios ou diretamente nos lagos e oceanos. O volume total de água subterrânea é muitas vezes maior do que a quantidade de água encontrada em rios e lagos e sua distribuição é muito mais ampla do que as águas superficiais. Enquanto lagos e rios são encontrados apenas em alguns lugares, a água subterrânea é essencialmente universal, existindo abaixo da superfície da Terra em todo o planeta (HESS, 2013).

Os reservatórios de águas subterrâneas são chamados aquíferos, palavra de origem latina: *aqua*, água e *ferre*, suportar. A definição de aquífero varia de acordo com a fonte. O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) define aquífero como “uma formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições naturais”. Outros autores (FETTER, 2001; FEITOSA *et al.*, 2008; GROTZINGER e JORDAN, 2013), no entanto, associam o termo aquífero a uma unidade geológica que pode armazenar e transmitir água em quantidade suficiente para suprir poços.

Um aquífero pode ser abastecido por infiltração direta ou indireta e as regiões infiltrantes são chamadas zonas de recarga. Quando a água infiltra diretamente no aquífero, por suas regiões aflorantes ou fraturamentos, a recarga é do tipo direta. Quando a água chega ao aquífero a partir de fluxo subterrâneo indireto, ou seja, vindo de uma camada confinante inferior ou superior, ou

lateralmente, de outro sistema; ou ainda quando a água tem origem no escoamento superficial, a partir dos cursos d'água, a recarga é do tipo indireta (SIMMERS, 1990).

Dada a natureza cíclica das águas, os aquíferos apresentam também zonas de descarga de suas águas, ou seja, locais por onde as águas emergem de volta a superfície, alimentando rios ou jorrando com pressão por poços artesianos e fechando o ciclo hidrológico. Em uma situação hipotética ideal, a recarga e a descarga estão equilibradas e o reservatório de água subterrânea e a superfície freática permanecem constantes. Mas a variação pluviométrica ao longo do ano, alterações climáticas, assim como intervenções antrópicas nas águas superficiais e/ou subterrâneas afeta este equilíbrio.

A variação pluviométrica natural, ao longo do ano, faz variar as taxas de recarga de um aquífero conforme a estação: seca ou chuvosa. Períodos de seca prolongados ou alterações ambientais, como desmatamento, por exemplo resultam em desequilíbrio do sistema e diminuição do suprimento de água para os aquíferos, que por sua vez diminuem a oferta de água para rios e nascentes. A captação de águas superficiais e a extração de água dos aquíferos, também afeta o equilíbrio do sistema. De fato, a conexão hidráulica entre os meios superficiais e subterrâneos é complexa e se dá em escalas variadas no tempo e no espaço. Ainda, conforme as condições hídricas locais, podem ocorrer inversões nos processos de recarga e descarga, seja por processos naturais ou antrópicos (CASTANY, 1971; CUSTODIO e LLAMAS, 1976; WINTER *et. al.*, 1998).

Assim, evidencia-se a inter-relação entre águas subterrâneas e superficiais, parte de um único ciclo hidrológico, que constituem um sistema único, em dinâmica e contínua interação. Desse modo, qualquer interferência em um dos meios refletirá, a curto ou longo prazo, em todo o sistema. Diante disso, entender as relações entre águas superficiais e subterrâneas é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente no que se refere à determinação da disponibilidade hídrica.

5.2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

O conceito de disponibilidade hídrica se refere a quantidade de água efetivamente disponível para seus múltiplos usos de forma duradoura ou permanente (VIEIRA, 2006). Conejo *et al.* (2009) colocam que a estimativa desta quantidade, também conhecida por vazão de referência, pode variar de acordo com a interpretação associada às características da bacia e às finalidades

do seu uso. Ainda, conforme a Agência Nacional de Águas (ANA), a disponibilidade hídrica é uma vazão de referência para fins de gestão, que representa a oferta de água a ser considerada no balanço hídrico. De fato, esta vazão de referência apresenta certa variabilidade no território nacional.

Em águas superficiais, a vazão total se refere ao escoamento superficial e uma parcela do escoamento subterrâneo (CONEJO *et al.*, 2009). Para cursos d'água, a ANA adota uma vazão mínima de referência relacionada a uma garantia de 95%. Portanto, em trechos de rio ela corresponde à vazão média diária com 95% de permanência, podendo ser a Q95 anual (quando estimada a partir de todo histórico de vazões) ou a Q95 mensal (quando estimada considerando a série de vazões de cada mês do ano) quando aplicável e disponível.

Em Minas Gerais, no entanto, a Portaria IGAM nº 40, de 04 de outubro de 2019, definiu a vazão de referência a serem utilizadas em águas superficiais sob responsabilidade do estado

Art. 2º – A vazão de referência a ser utilizada para o cálculo das disponibilidades hídricas superficiais no Estado de Minas Gerais é a vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência – Q7,10.

Art. 3º – O limite máximo de captações em recursos hídricos a serem outorgados nas bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais, para cada seção considerada em condições naturais, será de 50% (cinquenta por cento) da Q7,10, ficando garantidos, a jusante de cada intervenção, fluxos residuais mínimos equivalentes a 50% (cinquenta por cento) da Q7,10.

Parágrafo único – O limite máximo de captações em recursos hídricos nas Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UPGRHs – Rio Pará, Rio Paraopeba, Rio das Velhas, Rios Jequitai e Pacuí, Rio Urucuia, Rio Pandeiros e Rio Verde Grande, para cada seção considerada em condições naturais, será de 30% (trinta por cento) da Q7,10, ficando garantidos a jusante de cada intervenção, fluxos residuais mínimos equivalentes a 70% (setenta por cento) da Q7,10 (IGAM, 2019)

A Q7,10 é uma vazão estatística calculada a partir dos dados de regionalização de vazão obtidos nas estações fluviométricas do Estado, a partir de séries históricas de monitoramento. A estimativa é realizada calculando-se a média dos sete valores mínimos diários consecutivos de vazão, para cada ano, durante o período de 10 anos. A partir dela é realizado o balanço hídrico do curso d'água em questão, de forma que, somando-se todos os pontos de captação, este valor ainda seja respeitado conforme previsto na portaria.

Numa visão sistêmica, a disponibilidade hídrica não se limita às águas superficiais, é preciso considerar também a disponibilidade de águas subterrâneas. Não há, no entanto, uma vazão de

referência estabelecida para águas subterrâneas nem nacional, nem tampouco estadual, o que representa um problema para a gestão de recursos hídricos.

Manzione (2015, p. 184) exemplifica este problema citando o caso das concessões de outorga no Rio São Francisco. Neste caso, o Rio São Francisco tem pontos outorgados para captação superficial e pontos da sua bacia em que também são outorgados pontos de captação de águas subterrâneas. Dada a relação entre essas águas, em que o aquífero abastece o rio, essa situação configura uma dupla outorga em que o volume total captado não é considerado. Como aponta o autor, é necessário que, ao calcular a disponibilidade hídrica, o volume referente às águas subterrâneas também seja considerado.

A disponibilidade de recursos hídricos subterrâneos está relacionada as suas reservas. Existem quatro categorias de reservas de águas subterrâneas: permanentes ou geológicas, reguladoras ou renováveis, naturais e exploráveis (CASTANY, 1971). As Reservas permanentes representam o volume não variável de água acumulada no aquífero. Estão ligadas às águas mais antigas, armazenadas no tempo geológico, associadas a sistemas de fluxo intermediário a regional.

As reservas reguladoras, ou renováveis, por sua vez, estão associadas ao balanço hídrico das águas subterrâneas (FEITOSA *et al.*, 2008). De acordo com Feitosa *et al.* (2008, p. 661) a reserva reguladora “traduz um estado de equilíbrio dinâmico entre a recarga e a descarga (vazão de escoamento natural) do sistema aquífero, indicativo de que não existe variação no armazenamento”. Ou seja, sob condições naturais, um volume de água recarrega o aquífero enquanto um mesmo volume é descarregado. Assim, entende-se a reserva renovável como correspondente à recarga anual do aquífero, que, em teoria, é o mesmo que o escoamento de base dos rios.

Reservas naturais referem-se a soma das reservas permanente e renováveis, ou seja, é a reserva total. Já a reserva explorável refere-se ao conceito de *safe yield* norte-americano, que define a quantidade máxima de água que é seguro retirar de um aquífero, sem prejuízos ao manancial ou consequências indesejáveis (FETTER, 2001). Fetter aponta que o termo já foi alvo de críticas sob o argumento de não levar em consideração a inter-relação entre águas subterrâneas e superficiais, podendo ser prejudicial ao sistema. No entanto, o conceito deve ser considerado para fins de gestão, visando evitar a superexploração do aquífero.

A determinação da reserva explotável deve ser avaliada de acordo com as condições locais. Em geral, a boa prática dita que esta parcela seja algo entre 25% e 50% das reservas reguladoras, mas este valor pode variar de acordo com a localidade. Na Bacia do São Francisco, por exemplo, o Plano de Recursos Hídricos 2016-2025 prevê uma vazão explotável de 20% da recarga média anual, visando manter 80% do escoamento de base nos corpos d'água superficiais na época de estiagem.

Integrar os meios hídricos é essencial para avaliar a real disponibilidade hídrica dos diferentes locais sob análise, permitindo que se classifique cada unidade em questão em relação a esta disponibilidade. Esta integração pode ser realizada por meio de modelagem do sistema e a classificação da disponibilidade por meio de indicadores.

5.2.1. Modelagem numérica

Em ampla definição, modelos expressam representações simplificadas, mentais ou não, que os seres humanos fazem sobre a realidade (D'AMBROSIO, 1996). Rennó e Soares (2000), por sua vez, afirmam que essa representação auxilia no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. Assim, os modelos podem ser de diferentes tipos, conforme a realidade que buscam representar.

Para representações de aspectos ambientais do mundo real, incluindo fenômenos hidrológicos, geralmente muito complexos e dependentes do tempo, é comum que se utilizem os modelos matemáticos. Os modelos matemáticos fazem usos de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros para descrever da melhor forma possível, dentro de duas possibilidades, um fenômeno. Tais modelos podem ser classificados como analíticos e numéricos (CABRAL E DEMETRIO, 2008).

Os modelos analíticos, de acordo com Fetter (2001), são facilmente resolvidos e requerem uma quantidade mínima de dados, pois todos os setores de um parâmetro recebem o mesmo valor. Já os modelos numéricos devem ser usados quando as condições de contorno são complexas ou os parâmetros variam dentro da área modelada, de forma que as soluções numéricas para certas equações necessitem de reformulação para forma algébrica, de forma que as respostas obtidas são aproximações (FETTER, 2001).

Os modelos podem ser, ainda, classificados sob diferentes aspectos (MAIDMENT, 1993; VERTESSY *et al.*, 1993; TUCCI, 1998). De forma geral, conforme Rennó e Soares (2000), os modelos são classificados quanto a/ao:

- a) Tipo de variáveis utilizadas e às probabilidades de ocorrência de eventos, sendo denominados determinísticos ou estocásticos. Modelos determinísticos não consideram a teoria das probabilidades, enquanto em modelos estocásticos pelo menos uma das variáveis é aleatória.
- b) Tipo de relações entre as variáveis, sendo empíricos, quando as relações se baseiam em observações, ou baseados em processos, mais complexos que os empíricos pois buscam descrever os vários processos de um fenômeno.
- c) Forma de representação dos dados, podendo ser discretos, quando aplicados apenas para simulação de um evento individual, ou contínuos, quando simulam longos períodos.
- d) Existência ou não de relações espaciais, podendo ser pontuais, quando consideram que todas as variáveis de entrada e saída são representativas da área estudada, ou distribuídos, quando consideram a variabilidade espacial da área modelada.
- e) Existência de dependência temporal, podendo ser estáticos ou dinâmicos. Os modelos estáticos produzem os resultados a partir da solução das equações do modelo em um único passo. Já os modelos dinâmicos obtêm resultados a partir iterações.

A determinação do tipo de modelo a ser usado depende de fatores como tamanho da área, existência e qualidade dos dados e disponibilidade computacional. A escolha do modelo, no entanto, é apenas uma das etapas do processo de modelagem de um sistema, que vai desde a definição dos objetivos do modelo até a apresentação dos resultados (CABRAL e DEMÉTRIO, 2008).

O início da modelagem se dá com a definição dos objetivos do modelo, ou seja, daquilo que se almeja obter ao modelar. Em sequência, e considerando os objetivos, tem início a modelagem conceitual. O modelo conceitual, aqui entendido conforme Fetter (2001), descreve a condição atual do sistema em estudo, descrevendo todos os processos envolvidos no fenômeno e delimitando suas condições de contorno, variáveis e parâmetros. Segue à modelagem conceitual a escolha do tipo de modelo a ser utilizado, geralmente sob a forma de pacote computacional. Escolhido o modelo, têm início a esquematização do modelo (CABRAL E DEMÉTRIO, 2008).

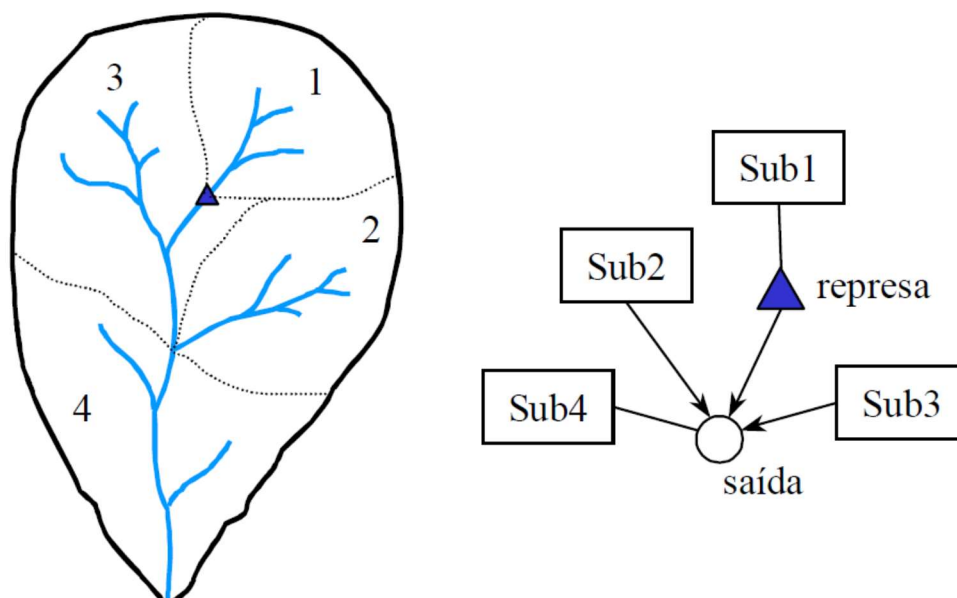
A esquematização do modelo envolve a discretização do problema, seleção do intervalo de tempo de simulação, estabelecimento das condições de contorno, seleção inicial dos

parâmetros, verificação dos dados de entrada e calibração. Conforme Burrough (1998, *apud* RENNO e SOARES, 2000), a discretização do espaço pode ocorrer de duas formas: dividindo-se o espaço em objetos, partes reconhecíveis representadas através de pontos linhas ou polígonos; ou fatiando-se o espaço e formando campos contínuos. Já a calibração é um processo em que se identificam e ajustam parâmetros para que o modelo matemático seja o mais fiel possível à realidade do fenômeno representado (ARAUJO, 2014). Após a esquematização, segue-se para a fase de previsão, definida por Cabral e Demétrio (2008) como a etapa de resposta do modelo, necessária para o entendimento do sistema, ao objetivo definido. Por fim, tem-se a verificação de longo prazo, uma etapa recomendada de ressimulações sistemáticas a longo prazo, a medida que novos dados sejam obtidos.

Dentre os vários tipos de modelos matemáticos existentes estão os modelos hidrológicos, “representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e ou subsuperfície terrestre” (RENNO e SOARES, 2000). O objetivo do modelo hidrológico é determinar os componentes do ciclo hidrológico, portanto, este modelo requer profunda compreensão do ciclo hidrológico e seus processos. Em geral, os modelos hidrológicos descrevem a distribuição espacial da precipitação, a infiltração, a evapotranspiração, a percolação, recarga e descarga do aquífero, assim como o escoamento superficial e subsuperficial, representando estes processos através de métodos matemáticos (RENNO e SOARES, 2000). A consistência do resultado é verificada comparando-se os dados observados com aqueles obtidos a partir da modelagem, durante o processo de calibração. A calibração deverá atentar para o ajuste dos dados observados, bem como para a avaliação do conjunto de parâmetros que assegurem tal ajuste (KAISER, 2007).

A unidade de trabalho de um modelo hidrológico é, geralmente, a bacia hidrográfica. Segundo Collischonn (2001), os modelos hidrológicos também podem ser aplicados a bacias de diferentes dimensões, sejam pequenas, intermediárias (até 300 km²), médias (até 2000 km²) e grandes (maior que 2000 km²). A discretização da bacia é, comumente, realizada dividindo-a em sub-bacias, onde cada uma constitui um sistema agregado, conectadas por ligações que representam os cursos d'água, figura 3.

Figura 3. Representação esquemática de uma bacia hidrográfica dividida em sub-bacias e diagrama de percurso da água até a saída da bacia.



Fonte: Rennó e Soares (2000) baseado em Maidment (1993)

Os modelos hidrológicos têm diversas aplicações. Collischonn (2001, p. 1) aponta algumas destas, como: “estimativa de disponibilidade de recursos hídricos, previsão de vazão de curto e médio prazo, a análise da variabilidade hidrológica, previsão da vazão de curto e médio prazo, análise da variabilidade hidrológica, das consequências de mudanças do uso do solo”. Para cada dimensão de bacia utiliza-se um tipo diferente de modelo para retratar os processos hidrológicos.

Vários modelos hidrológicos podem ser encontrados na literatura. Para melhor representar os fenômenos observados nas bacias encontradas na região do Quadrilátero Ferrífero, escolheu-se para este trabalho o Modelo de Grandes Bacias, que dentre suas várias aplicações, destaca-se por auxiliar na estimativa de vazões para sistemas de suporte à decisão e planejamento de recursos hídricos, por ser capaz de modelar o ciclo hidrológico (figura 4) de forma eficiente.

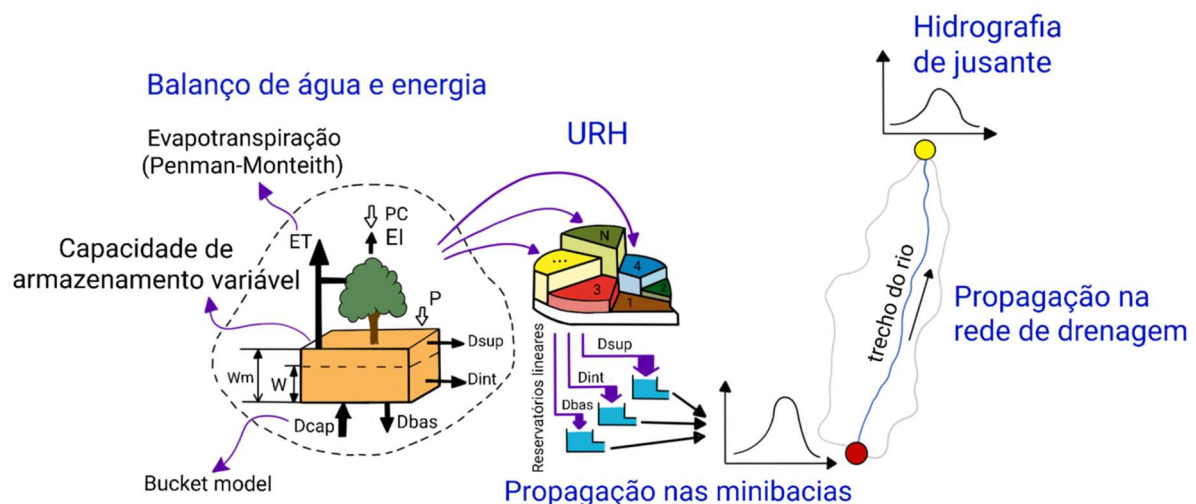
O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MGB-IPH) é um modelo distribuído desenvolvido para aplicações em grandes bacias³. De acordo com o Grupo de Pesquisa de Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, alguns critérios, não definitivos, definem as grandes bacias hidrográficas:

³ Conforme descrito pela equipe desenvolvedora em Hidrologia de Grande Escala < <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/> >. Acesso em 15 mai 2022.

- Regiões geralmente maiores do que 1000 km²;
- Regiões onde os processos de propagação fluvial não podem ser negligenciados, ou seja, que o tempo de viagem da água na rede de drenagem seja grande (alto tempo de concentração) e que os processos de translação e atenuação de ondas de cheias sejam relevantes na compreensão das dinâmicas da bacia.
- Regiões onde a diferença entre os divisores de água superficial e subterrânea pode ser desprezada;
- Regiões onde a chuva e outras características como tipo e uso de solo não podem ser consideradas homogêneas em toda a área, e por isto os métodos clássicos de hidrologia não são adequados;
- Regiões onde a caracterização do terreno é difícil de ser realizada com medições puramente *in-situ*, sendo necessário o apoio de técnicas de SIG e sensoriamento remoto (HGE-UFRGS).

Em grandes bacias, a integração da variabilidade espacial e temporal de um grande número de processos estão envolvidos no comportamento hidrológico apresentado. O MGB é capaz de simular processos hidrológicos nessas bacias, tais como “o balanço de água e energia no solo, evapotranspiração, interceptação, geração e propagação de escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo nos elementos de discretização da bacia hidrográfica; e propagação de vazão na rede de drenagem” (COLLISCHONN *et al.*, 2020, p. 5).

Figura 4. Representação esquemática do ciclo hidrológico simulado pelo Modelo de Grandes Bacias.



Fonte: Collischonn *et al.* (2020, p. 6)

As características do MGB descritas a partir deste ponto foram obtidas de Collischonn *et al.* (2020).

A estrutura do MGB se divide em três módulos:

- i) Módulo de balanço e energia no solo – parte do modelo em que se realizam cálculos de fluxos relacionados aos processos hidrológicos verticais: da atmosfera para o solo, do solo para o aquífero e do solo e vegetação para a atmosfera;
- ii) Módulo de escoamento interno na minibacia – retrata os processos hidrológicos horizontais, da origem do escoamento até a rede de drenagem principal da bacia, representando os fluxos de água superficial, subsuperficial e subterrânea.
- iii) Módulo de escoamento na rede de drenagem – caracteriza os processos horizontais ao longo dos principais rios da bacia.

O MGB utiliza como unidade de trabalho a bacia hidrográfica, discretizada em unidades menores, as minibacias, delimitadas a partir da topografia e ligadas entre si por canais de drenagem, definidas a partir de modelos digitais de elevação. As minibacias podem ser agrupadas em sub-bacias, para facilitar a calibração dos parâmetros, ou subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), também chamadas Classes de Respostas Hidrológicas (CRH), regiões em que o comportamento hidrológico é homogêneo.

Para cada URH, em cada minibacia, é calculado o balanço vertical de água e de energia de forma independente, o que corresponde ao módulo de balanço e energia do solo. Os processos verticais simulados pelo modelo MGB-IPH envolvem o balanço de energia solar na superfície, a interceptação de água da chuva, o balanço de água no solo, a percolação da água para o aquífero e o fluxo ascendente e a geração dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo.

O módulo de escoamento na minibacia refere-se aos processos de escoamento gerados no solo e que sofrem retardo e amortecimento antes de chegar à rede de drenagem. Isso acontece, pois, nem todo fluxo gerado nas minibacias chega as drenagens de forma automática, dado que fluxos subsuperficiais e subterrâneo podem envolver tempos de resposta mais longo. O MGB representa esse fenômeno de retardo e amortecimento dos hidrogramas por três reservatórios lineares, pelos quais os escoamentos fluem, em sequência, sendo um para cada tipo de escoamento gerado: superficial, subsuperficial (ou interno) e subterrâneo. Assim, cada

minibacia invariavelmente têm três reservatórios lineares, de forma a representar matematicamente o processo de propagação da vazão.

O MGB trabalha com parâmetros de vegetação e de solo e com dados de precipitação, vazão e clima. Os dados de precipitação e os dados das variáveis meteorológicas necessárias para calcular a evapotranspiração (temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, e radiação incidente de ondas curtas ou número de horas de sol por dia) constituem as condições de contorno necessárias para a solução das equações que compõe o modelo.

A utilização do modelo MGB-IPH Inercial se apresenta como uma alternativa para estimar as vazões em áreas da bacia em que não existem dados disponíveis. Dentre suas vantagens estão o uso de variáveis comumente utilizadas em trabalhos de regionalização de vazões, além de considerar as vazões subterrâneas, se mostrando assim uma ferramenta útil na modelagem integrada, capaz de auxiliar na gestão dos recursos hídricos.

5.2.2. Indicadores de disponibilidade hídrica

O termo indicador possui diversas definições, conforme a área em que são utilizados. Em termos gerais, indicadores são medidas que representam dados estatísticos para um determinado tempo, local e outras características. Soares *et al.* (2006, p. 113) definem o conceito de indicadores como “a forma mais sintética de agrupamento de dados primários derivados de programas de monitoramento e análises de dados”. Assim, entende-se indicador como uma medida, em geral quantitativa, que descreve as características do fenômeno a que se referem.

Indicadores são utilizados em diversas áreas da sociedade para construir um retrato aproximado de determinadas dimensões da realidade. Dentre os vários existentes, há os indicadores relacionados aos recursos hídricos. Estes indicadores se dividem entre aqueles voltados para controle de qualidade da água e dos ambientes aquáticos e aqueles voltados para a disponibilidade hídrica:

No caso da disponibilidade de recursos hídricos, os indicadores são utilizados para traçar um panorama e comparar os diferentes níveis reconhecidos, que variam da escassez à abundância desses recursos. Geralmente, esses indicadores procuram incorporar dados de vazões de cursos d'água, de população e de retiradas de água para os diferentes usos (CONEJO *et al.*, 2009, p. 5)

Alguns desses indicadores e seus usos, listados por Conejo *et al.* (2009), são apresentados na tabela 1.

Outro índice existente, este proposto por Conejo *et al.* (2009, p. 8), é o Indicador de Disponibilidade Hídrica – IDHidr. Este indicador “normaliza a relação entre as retiradas totais da bacia e a disponibilidade hídrica um valor de referência igual a 1, através de um fator x que indica o limite entre a escassez de água e a suficiência de recursos hídricos para atender a demanda”. Os autores estabeleceram que o limite entre a suficiência e a escassez de água é alcançado quando a retirada total atinge 30% da disponibilidade hídrica e, portanto, $x = 0,3$.

Assim tem-se a equação $IDHidr = \frac{1}{x} \times \frac{Retirada\ total}{Disponibilidade\ hídrica}$.

Tabela 1 – Indicadores de disponibilidade hídrica

Indicador	O que mede	Uso
Indicador da United Nations Population Information Network	Pressão populacional para exprimir os níveis de competição por usos da água	Avaliação de cenários de escassez hídrica
Índice de Falkenmark	Disponibilidade hídrica em termos de recursos hídricos renováveis existente per capita por ano	Avaliação de situação hídrica
Indicador de disponibilidade hídrica per capita	Vazão média de longo período por habitante por ano	Classificação quanto a disponibilidade de recursos hídricos
Indicador “relação entre as retiradas de água e a vazão média de longo prazo”	Relação entre retiradas de água e a vazão média de longo prazo	Classificação quanto à relação entre disponibilidade e demandas hídricas
Índice de retirada de água	Quociente entre a retirada total anual e a vazão média de longo período	Classificação quanto ao estresse hídrico

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

O IDHidr permite a classificação em relação a escassez de água em: suficiente, crítica, muito crítica e extremamente crítica, cada uma delas com um nível de prioridade de gestão. O indicador não considera reservas permanentes de águas subterrâneas nem o impedimento do uso da água por questões de qualidade, no entanto, se apresenta como simples e eficiente para indicar a relação entre disponibilidade e demanda dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Assim, demonstra ser uma boa ferramenta para a gestão dos recursos hídricos como proposto neste trabalho.

5.3. GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A *Global Water Partnership* (GWP) afirma que a gestão dos recursos hídricos do mundo é fundamental para o desenvolvimento humano⁴. A água é um recurso finito e vulnerável, que possui valor econômico em todos os seus usos, devendo ser reconhecida como um bem econômico⁵. O uso da água, portanto, deve se basear em princípios de desenvolvimento sustentável.

Uma boa gestão dos recursos hídricos precisa refletir a natureza fundamentalmente interconectada dos recursos hidrológicos, abordando o tema de forma integrada, não só entre os diversos setores da sociedade, mas também em seus meios. Tal abordagem integrada é chamada de Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) e é definida pela GWP como “um processo que promove o desenvolvimento coordenado e a gestão da água, terra e recursos relacionados, a fim de maximizar o bem-estar econômico e social de maneira equitativa, sem comprometer a sustentabilidade de ecossistemas vitais”.

Diante da importância dos recursos hídricos para a sociedade, o governo brasileiro vem criando leis que buscam proteger esses recursos e regulamentar seu uso. Rebouças (2008) aponta que um momento importante na história da gestão dos recursos hídricos no Brasil se deu com a construção do Sistema Cantareira, em São Paulo, no final da década de 1960. Foi a partir deste momento que se considerou o uso múltiplo da água, já que até então era necessário garantir sua oferta apenas para geração de energia, sem se preocupar com o abastecimento da população.

Diante disso, um importante marco legal em relação a gestão dos recursos hídricos veio com a Constituição Federal de 1988. A partir de então, todo corpo d'água no Brasil passou a ser de domínio público, sejam águas superficiais ou subterrâneas, não podendo mais serem utilizadas livremente pelo indivíduo. A questão ambiental e a gestão da demanda sobre os recursos hídricos, no entanto, só foi alvo de preocupação a partir da 2ª Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92).

Durante a Rio-92 discutiu-se a questão ambiental e conclui-se que, para garantir a oferta de água para a sociedade, seria necessário considerar aspectos ambientais, gestão da demanda

⁴ Global Partnership Water – disponível em: < <https://www.gwp.org/en/About/why/the-water-challenge/> >.

⁵ Baseado nos princípios de Dublin, determinados na Conferência Internacional sobre Água e Meio Ambiente em Dublin, Irlanda, em 1992.

sobre estes recursos e seu uso integrado. Assim, foi aprovada a Agenda 21, que pode ser definida como “como um instrumento de planejamento para a construção de sociedades sustentáveis, em diferentes bases geográficas, que concilia métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica”. A *Seção II: Conservação e Gerenciamento dos Recursos para o Desenvolvimento* da Agenda 21 trata do manejo dos recursos naturais, aqui incluídos solos, água, mares e energia, e de resíduos e substâncias tóxicas.

Segundo Rebouças (2008), a Agenda 21 mudou a visão mundial sobre gestão de recursos hídricos, que passou de gestão da oferta para a gestão das demandas. Com isso, no Brasil, em 1997, foi criada a Lei 9.433/97, conhecida como “Lei das Águas”, que fundamentou a água como um recurso público limitado, que possui valor econômico, é essencial para a vida e cujo uso prioritário deve ser para o consumo humano e animal, instituindo, assim, seu uso múltiplo, ou seja, para diversas finalidades (BRASIL, 1997). Esta definição admitia, pela primeira vez, o caráter finito dos recursos hídricos no território nacional, até então pensados como inesgotáveis.

Rebouças (2008) aponta que a Lei das Águas também instituiu instrumentos de gestão, como o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, além de estabelecer a bacia hidrográfica como unidade de planejamento. Ademais, como apontam Moura e Silva (2017, p. 18), a Lei das Águas ampliou as possibilidades de uso desses instrumentos que tornam viáveis a gestão dos recursos hídricos com “os Planos de Recursos Hídricos (PRH), o enquadramento dos corpos d’água, a outorga dos direitos de uso da água, a cobrança pelo uso de recursos hídricos e o sistema de informações sobre recursos hídricos”.

Para além disso, como afirmam Spinola *et al.* (2016), a Lei das Águas tinha também o objetivo de planejamento com fins de desenvolvimento regional, considerando as peculiaridades ambientais, econômicas e sociais de cada região que faz parte das Bacias Hidrográficas em diversas regiões do Brasil. Para tanto, introduziu a abordagem dos aspectos qualitativos e quantitativos da gestão dos recursos hídricos integrados à gestão ambiental e do solo, assim como ao planejamento dos diversos setores usuários (SPINOLA *et al.*, 2016, p. 74).

Operacionalmente, a gestão integrada das águas e sua implementação se dá através da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) cuja implementação, em âmbito nacional, é de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), criada pela Lei Federal nº 9.984/00. No âmbito estadual, a responsabilidade sobre os recursos hídricos fica a cargo das agências de

águas estaduais, no caso de Minas Gerais, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). E para garantir a participação pública na gestão dos recursos hídricos, foram criados os Comitês de Bacias Hidrográficas: “espaço em que representantes da comunidade de uma bacia hidrográfica discutem e deliberam a respeito da gestão dos recursos hídricos compartilhando responsabilidades de gestão com o poder público”⁶ (ANA). Desta forma, a gestão integrada dos recursos hídricos poderia ocorrer integrando diferentes setores da sociedade e com foco em sua unidade básica de planejamento, as bacias hidrográficas.

A gestão dos recursos hídricos é essencial para garantia da segurança hídrica, se relacionando aos aspectos sociais da água e, principalmente, à sua boa gestão. A *United Nations – Water* define segurança hídrica como

[...] a capacidade de uma população de salvaguardar o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar a subsistência, o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico, para garantir a proteção contra a poluição transmitida pela água e desastres relacionados à água, e para preservar os ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política⁷.

Em relação à segurança hídrica, o Brasil possui o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), que preenche o rol de instrumentos necessários ao alcance de objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos, visando assegurar à atual e às futuras gerações a adequada disponibilidade de água e de atuar na prevenção contra eventos hidrológicos críticos. O PNSH propõe intervenções e medidas de gestão para obtenção de resultados eficazes, e apresenta o Índice de Segurança Hídrica (ISH), que representa as diferentes dimensões da segurança hídrica e incorpora o conceito de risco aos usos da água.

Mais recentemente, no ano de 2021, a ANA lançou o Atlas Água 2021, que apresenta uma avaliação da segurança hídrica do abastecimento urbano. Nesta avaliação, além do tradicional balanço hídrico, foi considerado o componente resiliência do Índice de Segurança Hídrica do PNSH e as características de cada manancial. No total, foram analisados 4.063 pontos de captações superficiais e 14.189 captações subterrâneas. Para compor o quadro de segurança hídrica das sedes urbanas brasileiras, além da vulnerabilidade dos mananciais, a capacidade dos sistemas produtores de água e o desempenho dos sistemas de distribuição, mediante a cobertura da rede e o gerenciamento das perdas, também foram objeto de avaliação (ANA, 2021). Com

⁶ Informação disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/fortalecimento-dos-entes-do-singreh/comites-de-bacia-hidrografica>>. Acesso em: 22 Mai. 2022.

⁷ UN-WATER (2013) – disponível em: < <https://www.unwater.org/publications/water-security-infographic/>>.

isso, um Índice de Segurança Hídrica Urbana foi concebido considerando quatro indicadores e dois sub-índices: a eficiência da produção (combinação dos indicadores de vulnerabilidade do manancial e do sistema produtor) e a eficiência da distribuição (indicadores de cobertura com rede de distribuição e de desempenho técnico da infraestrutura para gerenciamento de perdas). Percebe-se com isso, que a gestão de recursos hídricos pressupõe a utilização de uma enorme quantidade de dados de natureza variada, mas dos quais se podem citar dados geográficos, hidrológicos e climatológicos.

Fitch *et al.* (2016, p. 667) apontam a necessidade de estudos multidisciplinares para atender as demandas de gestão ambiental/hidrológica, que acabam por levar a uma visão de sistemas que inclui a integração de muitos aspectos do ciclo hidrológico com implicações significativas para o gerenciamento de dados. Tal integração exige que os dados “não sejam apenas bem armazenados, mas também bem descritos, facilmente detectáveis e acessíveis e de forma consistente para uso em diferentes modelos em um sistema de modelagem integrado” (FITCH *et al.*, 2016, p. 667).

Para a Organização Meteorológica Mundial, no original em inglês *World Meteorological Organization* (WMO), um meio eficaz e robusto para analisar as informações necessárias para tomadas de decisão é a partir de um sistema de dados integrado. Assim, a WMO apresenta a importância da informação:

Uma rede de informações bem projetada contém sinergismo derivado de três maneiras. Em primeiro lugar, a informação é uma mercadoria que não é destruída pelo seu uso. Assim, se devidamente preservada, pode ser disponibilizada a um custo mínimo para muitos usos não previstos no momento de sua coleta. Em segundo lugar, informação pode ser usada para melhorar a compreensão dos processos hidrológicos. Ao melhorar a compreensão do processo, tanto o conteúdo de informação dos dados existentes e todos os dados futuros são aumentados. Em terceiro lugar, sinergismo evolui aproveitando as conquistas de outros. Novas abordagens e tecnologias para o design de sistemas de informação, como os dados que eles contêm, são commodities recicláveis (WMO, 2008, p. I.2-5)

Fitch *et al.* (2016) se baseiam nas definições da WMO sobre gerenciamento de dados para tratar o gerenciamento de recursos hídricos. Os autores afirmam que um gerenciamento de dados é bem-sucedido quando os dados são detectáveis, disponíveis, acessíveis, compreensíveis e utilizáveis e que estudos bem-sucedidos dependem do desenvolvimento de bancos de dados integrados.

Fitch *et al.* (2016) também discorrem sobre a questão de acesso aos dados, considerada por eles fundamental e enfrentada por todos os usuários de dados de águas subterrâneas, incluindo modeladores, particularmente aqueles que realizam estudos integrados usando várias fontes de dados. Os autores apontam as barreiras ao acesso aos dados, que envolvem a disponibilidade, fragmentação e heterogeneidade dos dados, ou seja, a indisponibilidade destes dados online, assim como sua divisão de forma desigual entre vários provedores, de modo que a estrutura e o conteúdo dos dados são bastante heterogêneos. Isso leva a problemas em seu uso, porque os dados são difíceis de encontrar e, uma vez encontrados, são difíceis de explorar devido ao imenso trabalho necessário para formatar os dados em uma estrutura utilizável comum.

Nesse sentido, os programas computacionais, fortes aliados na tarefa de integração de dados, criação de modelo digital do ambiente de interesse e análise dos resultados, se mostram como uma ferramenta de integração e gestão de recursos hídricos. A operacionalização destas tarefas é função do Geoprocessamento (XAVIER DA SILVA, GOES e MARINO, 2011). O geoprocessamento investiga a Geotopologia da área geográfica em estudo a partir de seus atributos e entidades e pode ser entendido, então, como

[...] um conjunto de conceitos, métodos e técnicas de diversas origens que, operando sobre bases de dados georreferenciados, pode associá-los a bancos de dados convencionais e transformar os dados, que são registros de ocorrências, em ganhos de conhecimento, ou seja, em informação, cujo valor social está na sua capacidade de apoiar decisões (XAVIER-DA-SILVA, GOES e MARINO, 2011, p. 2)

O geoprocessamento, principalmente no Brasil, é um conceito que se associa ao SIG. Um SIG permite a interligação entre objetos gráficos e alfanuméricos, a criação de mapas temáticos e o cruzamento de informações, auxiliando o planejamento e a gestão (FRANCES e PARALTA, 2001). Assim, dada sua capacidade de armazenamento, representação e análise de dados georreferenciados, se demonstra de grande valia para estudos hidrológicos.

5.4. CARTOGRAFIA E SIG

O registro de informações acerca de diversos aspectos da natureza, até pouco tempo atrás, ocorria apenas em documentos e mapas em papel, o que tornava difícil análises que combinassem diversos mapas ou outros dados (CAMARA *et al.*, 1997). O surgimento e rápido desenvolvimento da tecnologia da informática, a partir da segunda metade do século XX, permitiu o surgimento de ferramentas tecnológicas que permitiram armazenar e tratar dados

geográficos em ambiente computacional, abrindo caminho para os mapas digitais e, consequentemente, para as Geotecnologias, como o geoprocessamento e o SIG.

Fitz (2008) apresenta o conceito de geotecnologias, considerado por ele a maior influência na pesquisa geográfica, relacionando-o com a ideia de gestão do espaço geográfico. Para o autor as tecnologias que se relacionam às geociências e permitem avanços em suas pesquisas, principalmente nas áreas de gestão e planejamento, é o que se entende por geotecnologias. Seu uso permite o estudo do espaço geográfico de forma mais ágil e prática, devido a sua funcionalidade. Fitz (2008) aponta também o caráter interdisciplinar da ciência geográfica, que se inter-relaciona com outras ciências e, por consequência, torna os SIGs interdisciplinares, integrando diversos tipos de conhecimento. Apesar disso, como coloca o autor, ainda há pouco interesse nas geotecnologias por parte da Geografia brasileira, o que, para ele, se deve ao afastamento da Geografia do quantitativismo diante do avanço da escola crítica marxista, apontada por Fitz como mal interpretada.

O SIG – Sistema de Informações Geográficas – refere-se a “um sistema computacional que trabalha um número infinito de informações de cunho geográfico” (FITZ, 2008, p. 18). Fitz (2008), para melhor definir um SIG, empresta de Burrough e McDonnell a seguinte definição: “é um poderoso conjunto de ferramentas para coleta, armazenamento, recuperação, transformação e visualização de dados espaciais do mundo real para um conjunto de propósitos específicos (BURROUGH; MCDONNELL, 1998, p. 11 *apud* FITZ, 2008, p. 19). A existência de um SIG prevê a utilização de um computador (hardware) e de programas específicos (software), de tal modo que, se estamos falando de SIG, fica implícita a associação tecnológica envolvida. Diante disso, fica clara a necessidade de uma base de dados georreferenciados. Deste modo, Fitz (2008, p. 20) chega a sua definição final do que seria um SIG: “um sistema utilizado para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados e informações a ele vinculados”.

Ao conceito de SIG associa-se a noção de geoprocessamento. Fitz (2008) define geoprocessamento “como uma tecnologia, ou mesmo um conjunto de tecnologias, que possibilita a manipulação, a análise, a simulação de modelagens e a visualização de dados georreferenciados”. O autor aponta, então, que o geoprocessamento não está necessariamente ligado ao uso de um SIG, sendo considerado uma técnica agregada, uma evolução tecnológica da cartografia. Autores como D’Alge (2001) e Xavier da Silva (2009) apontam que foram os

esforços para automatizar a cartografia que precederam a concepção de ferramentas do SIG. Xavier da Silva considera o Geoprocessamento

[...] um conjunto de conceitos, métodos e técnicas que, atuando sobre bases de dados georreferenciados, por computação eletrônica, propicia a geração de análises e sínteses que consideram, conjugadamente, as propriedades intrínsecas e geotopológicas dos eventos e entidades identificados, criando informação relevante [...] (XAVIER DA SILVA, 2009, p. 42).

Assim, de acordo com o autor, o geoprocessamento associa o uso das bases georreferenciadas aos métodos computacionais para chegar no objetivo final de gerar informação e conhecimento a partir dos dados. D'Alge (2001), por sua vez, aponta a forte relação interdisciplinar entre a cartografia e o geoprocessamento, oriunda da relação que ambas possuem com o espaço geográfico. Segundo o autor o geoprocessamento é a área do conhecimento que usa técnicas matemáticas e computacionais para tratar os processos que ocorrem no espaço geográfico, enquanto a cartografia se ocupa da representação de elementos e fenômenos que ocorrem no espaço geográfico. Fitz (2008), sua vez, afirma a necessidade de boas bases cartográficas para que se faça bom uso das geotecnologias. Entendendo a correlação entre cartografia e geoprocessamento, podemos então discutir quais aspectos da cartografia influenciaram no geoprocessamento e, por consequência, no SIG.

As mudanças pelas quais a Cartografia passou, desde a década de 1960, em relação a conceitos, teorias e métodos, modificou a concepção de mapas (CASTRO, 2007). Com a revolução digital, na primeira metade do século XX, teve início o processo de automatização da Cartografia, culminando na abertura de oportunidades quanto a estruturação, tratamento e gerenciamento de dados, o que levou ao surgimento dos SIGs (SERRADJ, 2014). Ao longo da década de 70, com a difusão dos sistemas de informações geográficas e o aparecimento dos sistemas comerciais tipo CAD, precursores dos primeiros *softwares* de cartografia automatizada, desenvolveram-se novos fundamentos matemáticos voltados para a Cartografia Digital, impulsionando os SIGs, considerados herdeiros da tradição de Cartografia (BOLFE *et al.*, 2011). A cartografia convencional passa ao formato digital e seus conceitos e técnicas, a Cartografia Digital e a Visualização Cartográfica são adotadas e adaptadas ao geoprocessamento, tornando a análise espacial mais interativa (CASTRO, 2007).

O princípio básico da informação espacial é sua associação com um sistema de referência (FITZ, 2008). A forma elipsoide do planeta levou ao uso dos sistemas geodésicos de referência, adotado por cada país a partir de normas específicas e ao qual se associa um referencial de

altimetria e um referencial de gravimetria. Tal elipsoide possui um sistema de coordenadas definidos por posições, denominadas latitudes e longitudes, referentes a distâncias angulares em relação a um eixo imaginário e arbitrário. É esse sistema de coordenadas que dá a posição de pontos na superfície da Terra, que são transportados para o elipsoide de referência por meio de um sistema de projeção cartográficas. Desde os mapas mais antigos até os mapas interativos em ambiente digital da atualidade fazem uso do sistema de coordenadas.

Os mapas, um dos principais produtos da ciência geográfica, são elaborados a partir de dados sobre os aspectos que interessam à abordagem de certo tema. A matriz geográfica, na Cartografia Convencional, organiza esses dados em tabelas que congregam especificamente as séries ditas geográficas – aquelas cujos dados estão colocados em correspondência com lugar, o caminho ou a área de sua proveniência. Já a utilização de SIGs pressupõe a existência de um banco de dados georreferenciados, em que os dados alfanuméricos são vinculados a dados espaciais, cuja manipulação se dá por meio de um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados – SGBD, capaz de controlar a organização físico-lógica dos dados, seu armazenamento, recuperação e atualização (FITZ, 2008). Os dados em um SGBD podem ser do tipo alfanuméricos, constituídos por caracteres e vinculados à estrutura espacial do sistema; ou espaciais, que podem ser representados de forma gráfica.

De acordo com Castro (2007), para representar as informações espaciais, a cartografia faz uso de pontos, linhas e áreas, os modos de implantação, que por sua vez possuem referências no espaço e localizações sistematizadas segundo pares de coordenadas geográficas ou sistemas de coordenadas planas, as projeções. Uma projeção cartográfica procura retratar a superfície terrestre, ou parte dela, sobre uma superfície plana. Para tanto, a cartografia utiliza dos conceitos de Geodesia e sistema geodésico de referência para definir o *datum* planimétrico e altimétrico (MENEZES e FERNANDES, 2016).

Na sua versão digital, de acordo com Fitz (2008), os modos de implantação são compostos por três primitivas gráficas, pontos, linhas e polígonos, representados por um par de coordenadas ou um conjunto de coordenadas, enquanto a projeção se relaciona ao georreferenciamento. Em uma imagem digital georreferenciada, cada pixel que compõe esta imagem, apresenta um par de coordenadas planas e/ou geográficas e um valor 'z' associado (FITZ, 2008).

A distribuição espacial, ou seja, a apreciação e abordagem dos fenômenos com seus métodos de representação, na Cartografia Convencional pode ser discreta, em Cartograma Coroplético,

ou contínua, em Cartograma Isoplético. Na Cartografia Digital, tais métodos passam a ser representados por *Raster* (matricial) ou Vetores. A representação matricial, ou *raster*, é definida pela construção da forma do objeto por um conjunto de células (pixel) em uma grade, geralmente regular, em que, para cada célula, é atribuído um valor ou código (MENEZES e FERNANDES, 2016, p. 200). Produtos advindos do sensoriamento remoto, como imagens de satélites e fotografias aéreas digitais, além de mapas digitalizados, utilizam essa forma de armazenamento (FITZ, 2008, p. 44). Já a representação vetorial utiliza um conjunto de linhas definidas por um ponto inicial, um ponto final e por alguma relação de conectividade (MENEZES e FERNANDES, 2016, p. 200).

Ainda, o conceito de escala em termos cartográficos é essencial para qualquer tipo de representação espacial, uma vez que qualquer visualização gráfica é elaborada segundo uma redução do mundo real (MENEZES e FERNANDES, 2016). Cartograficamente, a escala de um mapa é a razão entre uma medida efetuada sobre este e sua medida real na superfície terrestre. Com a escala cartográfica, a informação geográfica poderá ser visualizada segundo diferentes níveis de detalhamento. O nível de detalhamento de uma informação, a área mapeada e a generalização de um mapa estão relacionados intimamente à escala. A escala, no domínio digital, está associada ao conceito de resolução espacial que, segundo D'Alge (2011), de tal modo que a resolução, tal qual a escala no domínio analógico, é um dos elementos de controle para a generalização e visualização dos dados digitais. Pode-se dizer que a modelagem em níveis de abstração diferentes depende da resolução espacial.

Por fim, os modelos digitais de terrenos (MDT), ou *Digital Terrain Model* (DTM), uma das modelagens mais utilizadas com geotecnologias, considerado como a representação digital da variação contínua de qualquer fenômeno geográfico que ocorre na superfície ou mesmo na atmosfera terrestre, são uma evolução dos blocos diagramas e maquetes utilizados na Cartografia Convencional para representação de volume. Tais modelos proporcionam a possibilidade de construção de uma superfície tridimensional a partir de atributos de dados dispostos no sistema (FITZ, 2008, p. 58).

A comunicação cartográfica, conceito da Cartografia Convencional, com destaque para o Sistema de Comunicação Cartográfica, se utiliza de mapas para representar o mundo real. Sua contraparte no geoprocessamento é o conceito de Visualização Cartográfica, considerada como o uso de imagens gráficas por computador para exibição de mapas, associada a Cartografia

Digital e aos SIGs, e que permite a exploração dos bancos de dados digitais produzidos por essas ferramentas (CASTRO, 2007).

Assim, partindo-se das noções de cartografia e geoprocessamento, chega-se à definição de SIG como um sistema composto por programas computacionais capaz de armazenar e integrar dados georreferenciados, permitir sua manipulação e visualização e auxiliar na gestão e planejamento a partir destes dados (FITZ, 2008). Deste modo, um SIG pode ter diversas funções, dentre elas a aquisição e edição de dados, o gerenciamento do banco de dados, a análise geográfica de dados e a representação de dados (FITZ, 2008).

A porção do sistema responsável pela sua manipulação é Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD), que responde por todas as conexões de dados que resultam em informações, mas não deve ser confundida com a capacidade de um SIG em subsidiar a gestão espacial a partir desses dados. O SIG, por ser capaz de gerar modelos digitais representativos dos fenômenos aos quais se deseja analisar, oferece uma visão mais abrangente dos problemas ambientais. A Geodiversidade, entendida como um todo (físico, a variabilidade ambiental biótica e socioeconômica), também pode ser exibida disponibilizada para análise em qualquer banco de dados georreferenciado (XAVIER DA SILVA e MARINO, 2012). Desse modo, as geotecnologias, SIG e Geoprocessamento, estão evoluindo para uma abordagem pragmática da pesquisa ambiental.

No que se refere a conhecimentos ambientais, dentre os quais consideraremos os de caráter hidrológicos, Xavier da Silva (2016), indica a possibilidade de que tal conhecimento, baseado em dados e informações, seja voltado para “a integração de dados de diferentes origens, a serem colocados em contexto”, remetendo aqui ao conceito de Geoinclusão (XAVIER DA SILVA, GOES e MARINO, 2011).

A Geoinclusão aponta a necessidade de se fazer uso de análises obtidas a partir do geoprocessamento, de forma a “promover a inclusão geográfica ou Geoinclusão, de iniciativas de modificação ambiental na realidade, o que trará conhecimentos específicos locais aos analistas envolvidos e promoverá, dialeticamente, sua própria Geoinclusão, como um prosseguimento natural das inclusões digital e social” (XAVIER DA SILVA, GOES e MARINO, 2011, p. 3). Esse conceito chama a atenção para o processamento adequado da busca por conhecimento ambiental, assim como para o uso das geotecnologias e seus recursos, de

forma que os resultados obtidos tenham mais chances de se tornar uma pesquisa sistemática útil para a sociedade.

Além disso, com a popularização das geotecnologias, mais especificamente da tecnologia de posicionamento global, em inglês *Global Positioning Systems* – GPS, associado a popularização de sistemas de geovisualização como Google Earth e Google Maps, tem possibilitado o surgimento de uma nova vertente geográfica, a Neogeografia, que se caracteriza pelo uso em massa de mapas interativos e GPS em ambiente virtual. O termo se refere então às técnicas e instrumentos geográficos utilizados no dia a dia, para uso pessoal, por não especialistas, e faz analogia ao novo sentido dado à cartografia, resultante desta popularização das geotecnologias (MACHADO, 2014). Entende-se então que a Neogeografia é um fenômeno social e uma nova forma de se relacionar com o espaço físico, que acaba por criar um novo espaço, dessa vez virtual, onde prevalecem as ações colaborativas e a criatividade, que amplia o conceito de Geoinclusão.

5.5. MUDANÇAS NO CONSUMO DA INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

A democratização da Internet, aliada a popularização das geotecnologias, tem criado uma nova forma de consumo das informações geográficas via web. As possibilidades vão desde a apresentação simples de mapas, para os mais diversos propósitos, até recursos mais avançados, como mapeamento interativo através de ferramentas personalizadas. Assim, a troca de informação geográfica via web vem avançando continuamente e novas ferramentas foram surgindo, dentre elas o WebGis. Em linhas gerais, um WEBGIS é definido como um sistema de visualização e interação com mapas em sistema de informação geográfica via internet (CASTRO, 2011).

A visualização tem importância essencial para a transmissão do conhecimento. MacEachren define o termo como

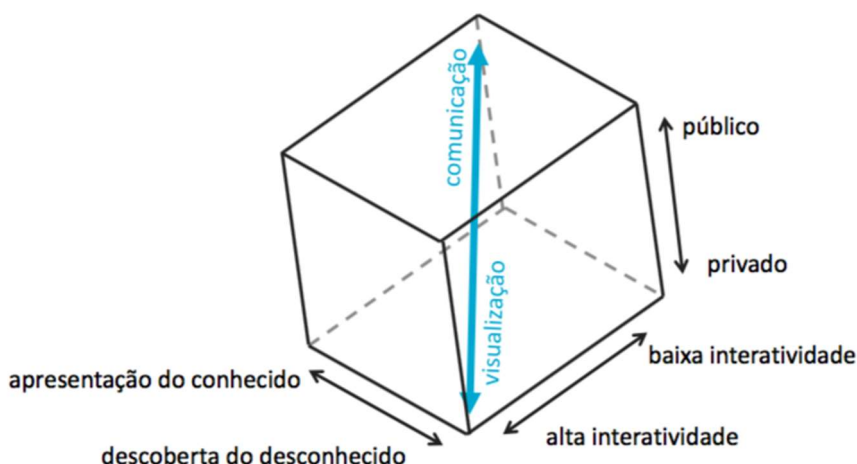
[...] uma habilidade humana de desenvolver imagens mentais (muitas vezes de relações sem formas visíveis) juntamente com o uso de ferramentas que podem facilitar e aumentar essa capacidade. Ferramentas de visualização bem-sucedidas permitem que nossos processos visuais e cognitivos se concentrem quase que automaticamente nos padrões descritos, em vez de gerar mentalmente esses padrões (MACEACHREN, 1992, p.12)

Diante disso, os mapas têm papel fundamental na transmissão de conhecimento, auxiliando no processo cognitivo de transferência de conceitos, organizando os conhecimentos mais abstratos a partir de padrões concretos. A Visualização Cartográfica, ou seja, a preocupação com a comunicação na interface de exibição o mapa para o usuário final, se mostra uma aliada nesse processo. Na era digital, esta visualização ocorre cada vez mais em uma interface baseada na web, utilizando-se técnicas computacionais. Os webGIS involuntariamente estabeleceram uma nova forma de compartilhamento e visualização de informações geográficas que ajudam muito a compartilhar e analisar dados espaciais. Para Castro (2018, p. 232), “ao conjunto de técnicas cartográficas e computacionais tem sido atribuído na literatura especializada o termo Geovisualização (GVis)”. Uma definição para o termo foi dada por MacEachren

Geovisualização pode ser definida como o uso de representações visuais concretas – seja em papel ou através da tela do computador ou outras mídias – para tornar contextos e problemas espaciais visíveis, de forma a engajar a mais poderosa habilidade de processamento de informações humana, aquela associada à visão (MACEACHREN, 1992 *apud* SLOCUM, 2008, p. 12)

MacEachren, no entanto revisitou esta definição baseando-se em seu modelo do Cubo Cartográfico, figura 5. Nesse modelo gráfico, a visualização é contrastada com a comunicação ao longo de três dimensões: privada versus pública, apresentação do conhecido versus descoberta do desconhecido, e o grau de interatividade. Assim, MacEachren redefiniu Geovisualização como “uma atividade privada em que o desconhecido é revelado em um ambiente altamente interativo, enquanto a comunicação é o contrário: uma atividade pública em que conhecido é apresentado” (MACEACHREN, 1994, *apud* SLOCUM, 2008, p. 12).

Figura 5. Cubo Cartográfico



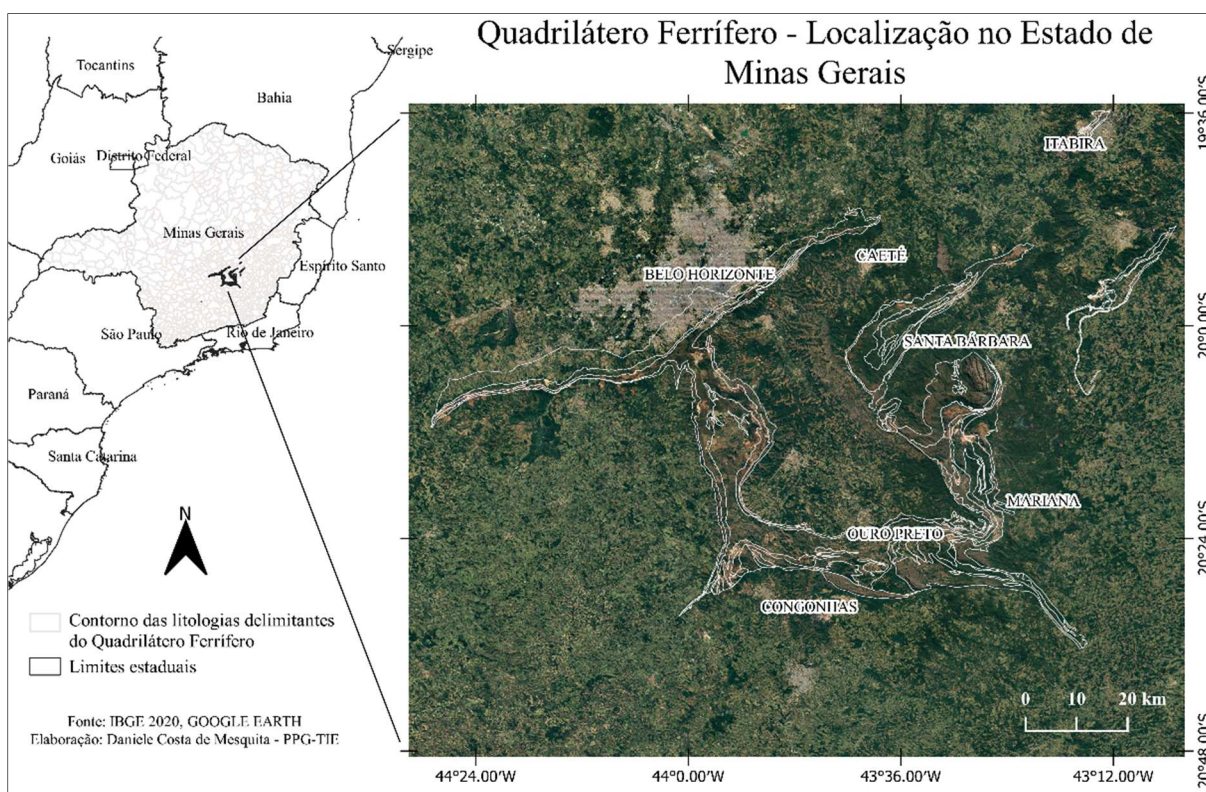
Fonte: MacEachren, 1994.

É crescente o uso da geovisualização em pesquisas e no desenvolvimento de projetos que incorporam participação pública (WEINER *et al.*, 2002). Para Weiner (2002), estas ferramentas auxiliam no processo de participação e tomada de decisão de grupos da comunidade. Assim, a Geovisualização, com auxílio da tecnologia, funciona como aliada da divulgação da informação para a comunidade em geral e, com isso, pode vir a ser utilizada na participação pública na gestão dos recursos hídricos, conforme previsto na Lei das Águas. Este trabalho vai utilizar-se da geovisualização na web para apresentar os resultados da avaliação de demanda versus disponibilidade de recursos hídricos no Quadrilátero Ferrífero.

6. CARACTERIZAÇÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero localiza-se na região sudeste do Estado de Minas Gerais e ocupa uma área de aproximadamente 7.000 km², figura 6. É reconhecido internacionalmente por abrigar grandes reservas de ouro, manganês, bauxita, pedras preciosas e, principalmente, de ferro.

Figura 6. Localização do Quadrilátero Ferrífero no Estado de Minas Gerais



Fonte: Elaborado pela autora

6.1. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

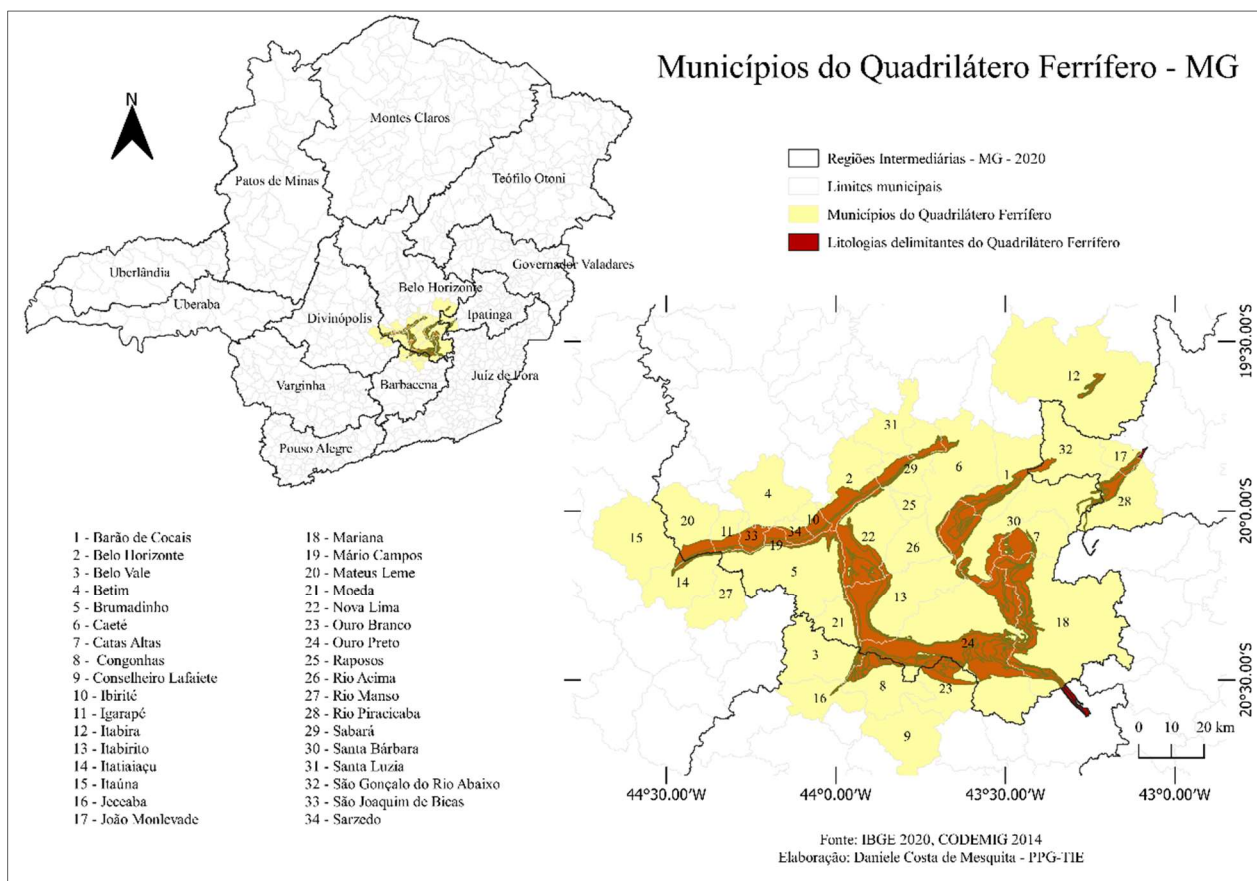
A delimitação do Quadrilátero Ferrífero não parte de uma institucionalidade político-administrativa oficial, ou seja, não é um território formalmente estabelecido, mas sim reconhecido social e geograficamente (SOUZA, 2021). Seus limites e sua denominação se devem a forma grosseiramente quadrilátera de suas serras, compostas majoritariamente por litologias itabiríticas⁸ e elevadas em seus quatro lados por erosão diferencial.

Desde a descoberta do ouro no final do século XVII até os dias de hoje, a região do Quadrilátero Ferrífero abriga a maior concentração urbana do estado de Minas Gerais (AZEVEDO *et al.*,

⁸ O itabirito é uma rocha metamórfica química ou vulcanoquímica, geralmente formada pela ação metamórfica sobre depósitos marinhos ricos em ferro e sílica. Texturalmente é finamente bandada com alternância entre camadas silicáticas (geralmente quartzo) e óxidos de ferro como a hematita ou magnetita.

2012). Seus limites incluem 34 municípios (UFOP, 2020), figura 7, e população estimada, em 2021, de cerca de 4.665.000 habitantes, conforme o IBGE⁹. A maioria de seus municípios faz parte da Região Intermediária de Belo Horizonte, na região central do Estado de Minas Gerais.

Figura 7. Municípios da Região do Quadrilátero Ferrífero

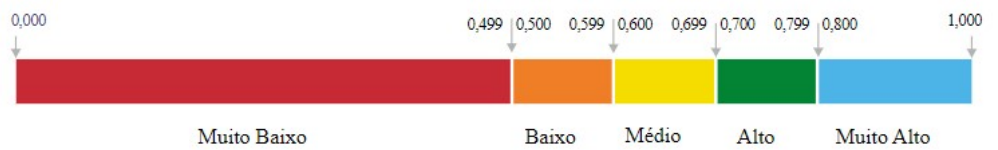


Fonte. Elaborado pela autora

No que se refere ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) calculadas a partir dos dados dos Censos Demográficos do IBGE 2010, figura 8, a maioria dos municípios apresenta índices entre 0,6 e 0,9, sendo a maioria enquadrada na faixa de alto desenvolvimento humano, com os municípios de Nova Lima e Belo Horizonte na faixa de muito alto desenvolvimento humano, figura 9.

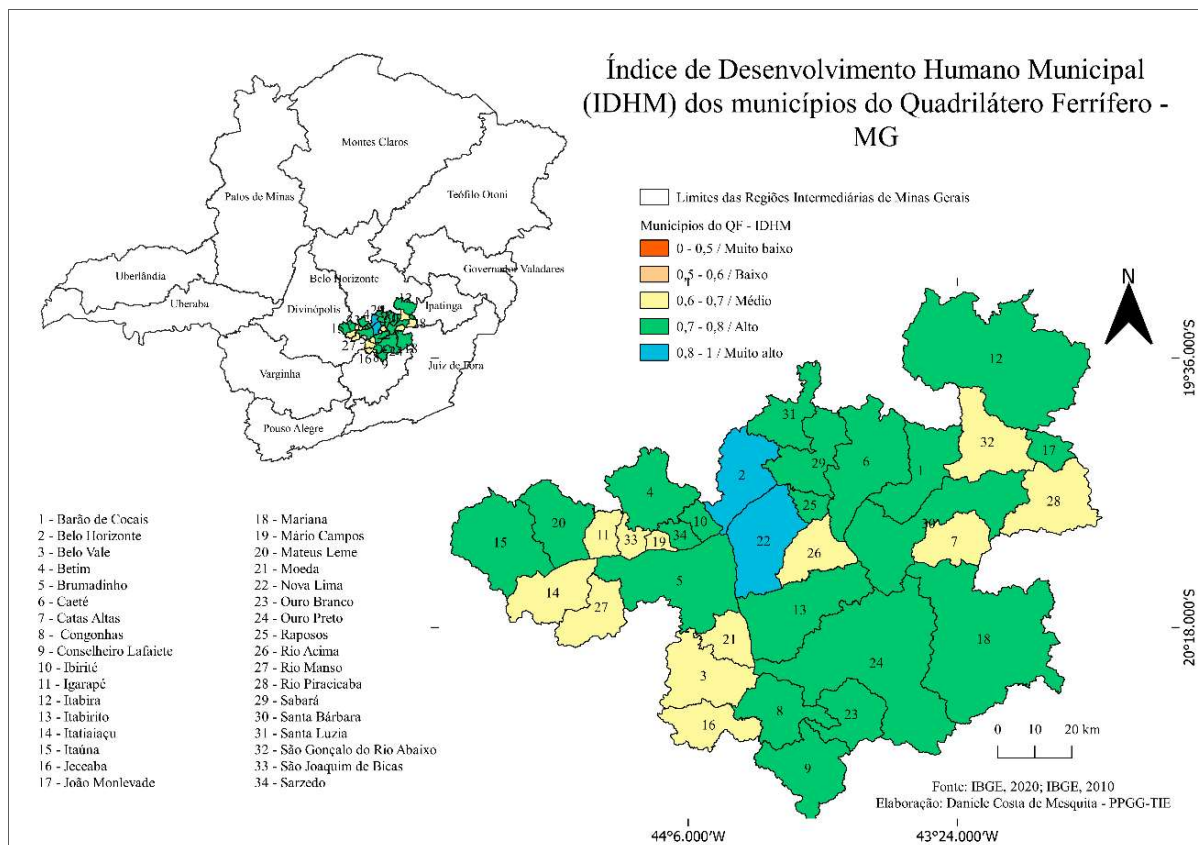
⁹ Dado compilado a partir de informações do Cidades@, sistema agregador de informações do IBGE sobre municípios brasileiros, disponíveis em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>.

Figura 8. Faixas de desenvolvimento humano municipal.



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil.

Figura 9. Índice de Desenvolvimento Humano dos municípios do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Elaborado pela autora.

Machado (2009) aponta que a denominação Quadrilátero Ferrífero tem autoria controversa, mas foi introduzida na literatura por Dorr (1959). John Van. N Dorr II, geólogo do *United States Geological Survey* (USGS) chegou ao Brasil na década de 1940 e, juntamente com geólogos do DNPM (Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, atual Agência Nacional de Mineração) e da USGS, foi responsável pelo mapeamento geológico, em escala 1:25.000 da área da região central de Minas Gerais onde se localiza o Quadrilátero Ferrífero e pela compilação do relatório acerca da geologia regional da área.

É uma região que se destaca pela sua história de exploração mineral. De acordo com Roeser e Roeser (2010) os primeiros avanços na região se deram por parte dos bandeirantes, em busca

de esmeraldas, no final do século XVII. Ao invés de esmeraldas, os bandeirantes encontraram ouro, nos vales dos rios onde seria, futuramente, Minas Gerais, por volta de 1693 (MACHADO, 2009). Assim, no fim de século XVII, a região foi alvo de uma “corrida do ouro”, que terminou com a descoberta de várias jazidas aluvionares e a fundação de vilas nessas localidades:

Contudo, a notícia dos descobrimentos motivou novas entradas levando mineiros práticos das lavras de São Paulo e os achados proliferaram rapidamente. Primeiro na região de Ouro Preto e Mariana, as famosas “Minas Ferais dos Cataguás” que incluíam jazidas como as de Itaverava, Itatiaia, Antônio Dias, Padre Faria, Bento Rodrigues, Ribeirão do Carmo, e logo se expandiram para Inficionado (Santa Rita Durão), Furquim, São Caetano (Monsenhor Horta), Ouro Branco, Casa Branca, Itabira do Campo (Itabirito), Catas Altas da Noruega e muitas outras (MACHADO, 2009, p. 18)

A exploração mineral também incentivou o desenvolvimento de diversos estudos na região, muitos voltados para a descrição de espécies minerais e vegetais e em prol do desenvolvimento da mineração. Conforme Machado (2009), os primeiros trabalhos, ou Memórias, referentes à capitania de Minas Gerais revelam interesse maior na geologia e mineralogia local do que em outros aspectos da região. As primeiras representações gráficas da geologia do Quadrilátero Ferrífero datam de 1818, de autoria de Wilhelm Ludwig von Eschwege, que publicou um perfil geológico identificando dezesseis unidades litológicas entre o Rio de Janeiro e Vila Rica (atual Ouro Preto). É dele, também, conforme Machado (2009, p. 65), a denominação de Espinhaço para a cadeia de montanhas de direção N-S, existentes no território mineiro e que funciona como divisor de águas entre as Bacias do São Francisco e do Doce. Ainda, a primeira publicação sobre o minério de ferro foi realizada por Harder e Chamberlin (1915) que apresentaram um ordenamento estratigráfico e um mapa geológico da região central do estado de Minas Gerais, área correspondente ao QF, evidenciando a importância dos depósitos de minério de ferro locais.

A mineração foi e ainda é a base da economia para a maioria dos municípios do QF. Desde o ciclo do ouro até os dias atuais, estabeleceu-se na região uma estrutura produtiva voltada para a atividade extrativa, principalmente de ferro e ouro. Estas substâncias fazem parte da classe de minerais metálicos que, de acordo com a ANM (2020) responderam por cerca de 80% do valor total da produção mineral brasileira no ano de 2019. Ainda, em 2019, houve expressiva participação do ferro nos minerais metálicos comercializados. Dada suas grandes reservas minerais, o Quadrilátero Ferrífero é a mais importante província mineral do sudeste do país, a mais importante do estado de Minas Gerais, e o segundo lugar no ranking de produtor de minerais metálicos do Brasil, perdendo apenas para o estado do Pará, onde se localiza a província mineral de Carajás.

Assim, é forte a presença de complexos minerários instalados na região do Quadrilátero Ferrífero. Conforme, Souza (2021), a extensão dos complexos já ocupa áreas significativas sobre as serras da região, com níveis cada vez maiores de continuidade

[...] destaca-se a abrangência dos complexos minerários instalados nos principais limites do Quadrilátero (correspondente às serras que o conformam). À exceção de áreas a sudeste (de difícil acesso, no entorno de áreas ambiental e culturalmente preservadas nos municípios de Ouro Preto e Mariana) e de uma porção territorial a leste, correspondente ao Parque Nacional da Serra do Gandarela e à Reserva Particular do Patrimônio Natural do Santuário do Caraça, a extensão cada vez maior dos complexos atinge níveis de continuidade relevantes sobre as principais serras que delimitam o polígono (SOUZA, 2021, p. 12)

Dos municípios que compõem o Quadrilátero Ferrífero, apenas aqueles referentes a RMBH, que têm uma economia dinâmica e fortemente influenciada por Belo Horizonte, detentora de cerca de 73% do PIB, tem forte participação do setor de serviços (AZEVEDO *et al.*, 2012).

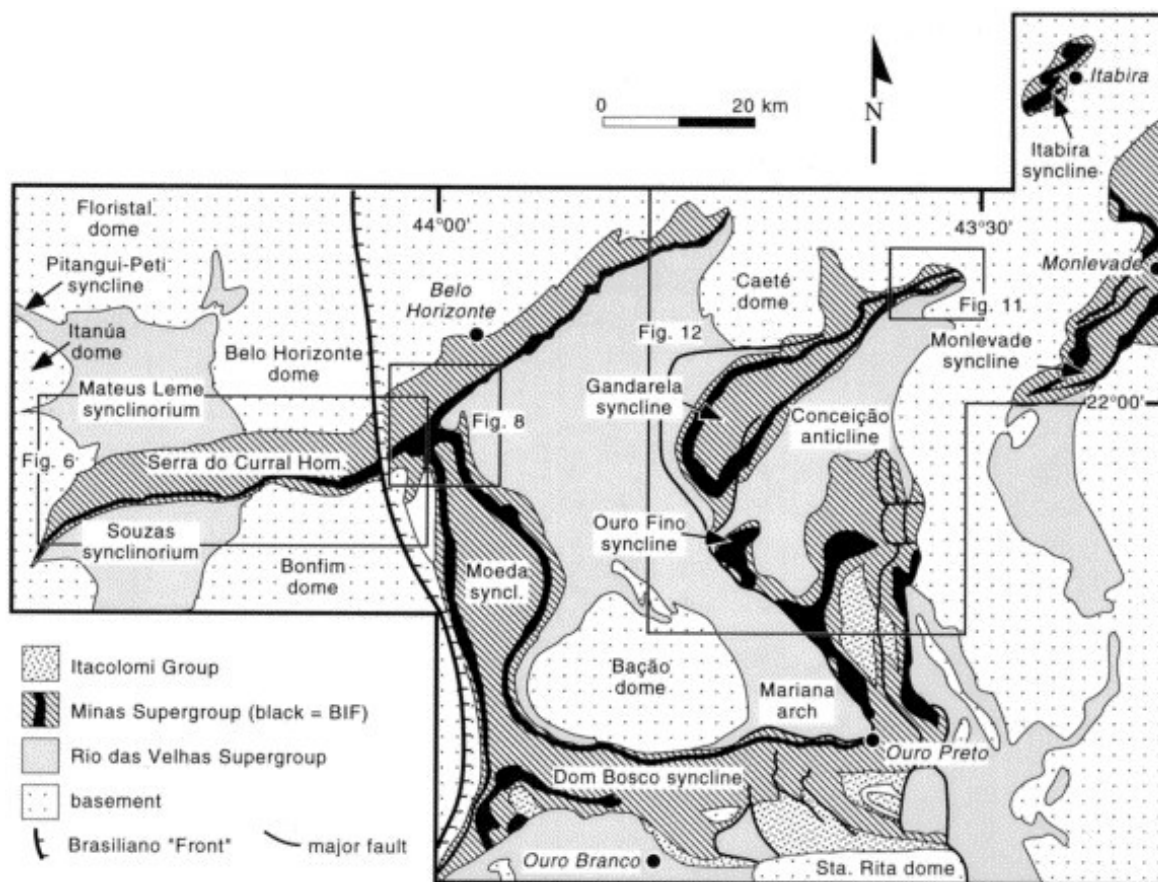
6.2. ASPECTOS GEOLÓGICOS

Em termos geológicos, QF se encontra inserido no extremo sudeste do Cratón São Francisco, área formada basicamente de terrenos granito-gnáissicos, *greenstone belts*, e sequências supracrustais proterozóicas (figura 10).

A tectônica da região, por sua vez, é marcada por eventos extensionais e compressionais superpostos, decorrentes de dois ciclos tectônicos, Transamazônico e Brasileiro, que resultaram em megaestruturas de dobramento, os sinclinais e anticlinais, e megafalamentos. Estes eventos tiveram papel importante na formação do relevo do QF (VARAJÃO, 1991).

Um mapa completo da geologia do Quadrilátero Ferrífero, em sua versão mais atual, do ano 2019, elaborado pela Universidade Federal de Ouro Preto, escala 1:150.000, é apresentado no anexo I.

Figura 10. Geologia simplificada do Quadrilátero Ferrífero apresentando a distribuição do embasamento cristalino, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi. Baseado em Dorr (1969) e Romano (1989).



Fonte: Alkmin e Marshak, 1998.

As subseções a seguir detalham os limites do QF e o detalhamento dos componentes de sua estratigrafia regional.

6.2.1. Os limites do Quadrilátero Ferrífero e suas principais serras

As serras que dão nome a região são um arranjo de sinclinais sustentado pelos metassedimentos do Supergrupo Minas, de idade Proterozóica, entre 2,5 bilhões e 542 milhões de anos. (ROSIERE e CHEMALE, 2000, p. 1).

O Sinclinal Dom Bosco, com direção E-W, representa o limite sul do QF. Definido, em especial, pelas camadas quartzíticas e itabiríticas do Super Grupo Minas, se liga, em seu extremo oeste, diretamente ao Sinclinal Moeda, caracterizando uma continuidade física entre ambos (CHEMALE JR, ROSIERE e ENDO, 1992, p. 107).

O Sinclinal Moeda, com direção N-S, representa o limite oeste do QF. Conecta-se em seu extremo norte à Serra do Curral, uma megaestrutura de aproximadamente 100 km de extensão,

em direção NE-SW, que define o limite norte do QF. Sua composição é dada, basicamente, por rochas do grupo Piracicaba, Itabira e Caraça (CHEMALE JR, ROSIERE e ENDO, 1992). Está conectada ao Sinclinal Moeda em seu extremo NE e ao Sinclinal de Santa Rita em seu extremo NW.

O limite leste do QF é definido pelo Sistema Cambotas-Fundão, composto, principalmente, pelas seguintes estruturas: Serra das Cambotas, Complexo Caeté, Sinclinal Gandarela, Sinclinal de Ouro Fino e Sinclinal de Santa Rita, incluindo Sinclinal Conta História, Sinclinal de Alegria e front Fazendão (CHEMALE JR, ROSIERE e ENDO, 1992). Dentre estas, o Sinclinal de Santa Rita está fisicamente interconectado as demais estruturas limitantes do QF.

O Sinclínório de Itabira, extremidade nordeste do QF, tem seu traçado definido por camadas de formação ferrífera, enquanto seu núcleo é majoritariamente composto por quartizitos do Grupo Piracicaba. Este domínio não se liga as demais estruturas do QF, estando fisicamente separado, a cerca de 20 km a nordeste.

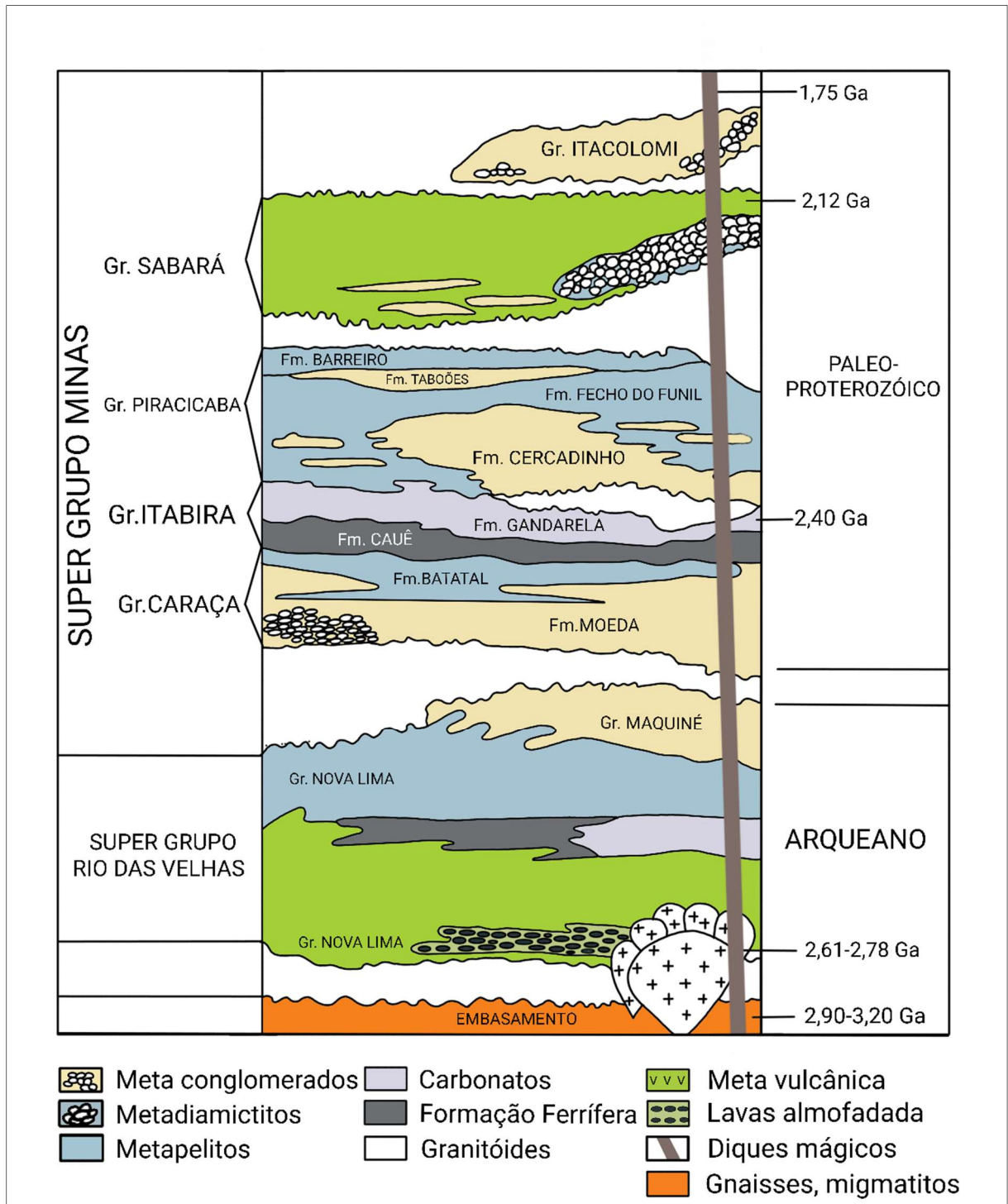
6.2.2. A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero

A estratigrafia da região, inicialmente proposta por Harder e Chamberlin (1915), foi modificada ao longo dos anos por diversos autores, dentre eles: Dorr (1969), Ladeira (1980), Alkmim *et al.* (1988), Chemale Jr. *et al.* (1994), Renger *et al.* (1994), Almeida *et al.* (2002 e 2005) e Almeida (2004).

Chemale Jr. *et al.* (1994), caracterizam a estratigrafia do QF, figura 11, como um embasamento granito-gnáissico de idade arqueana, ao qual se sobrepõe o Supergrupo Rio das Velhas, uma sequência vulcano-sedimentar do tipo *greenstone belt*, também arqueano. Em sequência, tem-se o Supergrupo Minas, sua principal feição, formado pelos grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. Por fim, se encontram as rochas do Grupo Itacolomi.

O Supergrupo Minas é uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozóica (BABINSKI *et al.*, 1991; MACHADO *et al.*, 1989), sendo constituído por xistos, quartizitos, dolomitos e formação ferrífera, assentada discordantemente sobre gnaisses e mica-xistos, cuja organização utilizada ao longo do trabalho se baseia na proposição estratigráfica de Dorr (1969) com a incorporação dos resultados alcançados pelos estudos de Renger *et al.* (1994), Almeida *et al.* (2002 e 2005) e Almeida (2004), que resulta em quatro grandes grupos que totalizam mais de 4.000 m de espessura de sedimentos para o Supergrupo Minas: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará.

Figura 11. Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Alkmim e Marshak, 1998.

O Grupo Caraça é constituído por metassedimentos clásticos e compreende duas formações: Moeda (base) e Batatal (topo) (MAXWELL, 1958; WALLACE, 1958). A Formação Moeda é caracterizada predominantemente por quartzitos sericíticos finos a grossos, filitos quartzosos e

lentes de metaconglomerados com seixos e matacões provenientes de veios de quartzo. A Formação Batatal é constituída de filitos sericíticos e grafitosos com intercalações de chert e finas camadas lenticulares de formação ferrífera (MAXWELL, 1958). Tais unidades sobrepõem discordantemente as unidades do Supergrupo Rio das Velhas. Seus estratos resistem à erosão, favorecendo a formação de serras que se elevam acima das regiões menos resistentes do embasamento cristalino.

O Grupo Itabira é constituído por seqüências de sedimentos químicos plataformais que são englobados em duas formações: Cauê (base) e Gandarela (topo) (Dorr, 1958a). A Formação Cauê é predominantemente caracterizada por formações ferríferas bandadas (BIF) e subordinadamente caracterizada por lentes de quartzitos ferruginosos, itabiritos manganíferos e filitos. Essas formações ferríferas foram metamorfisadas em fácies xisto-verde a anfibolito, configurando algumas variedades litológicas como: itabiritos, itabiritos anfibolíticos, itabiritos dolomíticos e “hematititos” (corpos de minérios compostos predominantemente por hematita). São as rochas do Grupo Itabira que apresentam alto interesse econômico na região, por abrigarem as jazidas de ferro e o principal aquífero regional.

Sucede o Grupo Itabira as rochas do Grupo Piracicaba, de natureza detrítica e transgressiva. Este grupo é dividido em quatro formações, da base para o topo: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A Formação Cercadinho é constituída por quartzitos, quartzitos ferruginosos, filitos ferruginosos e dolomíticos, e dolomitos. A Formação Fecho do Funil é constituída por filitos, filitos dolomíticos e dolomitos impuros. A Formação Taboões é composta por ortoquartzitos finos e equigranulares e a Formação Barreiro por filitos e filitos grafitosos.

A unidade superior do Supergrupo Minas é o Grupo Sabará, que apresenta espessura estimada em torno de 3000 metros, compreendendo uma seqüência turbidítica associada à diamictitos, conglomerados e tufos vulcanoclásticos.

Sobre as rochas do Supergrupo Minas repousa o Grupo Itacolomi. O Grupo Itacolomi definido por (DORR, 1969) é constituído de duas fácies: uma fácies quartzítica, denominada de tipo Itacolomi, e a outra filítica, designada de Santo Antônio.

6.3. ASPECTOS DO MEIO FÍSICO

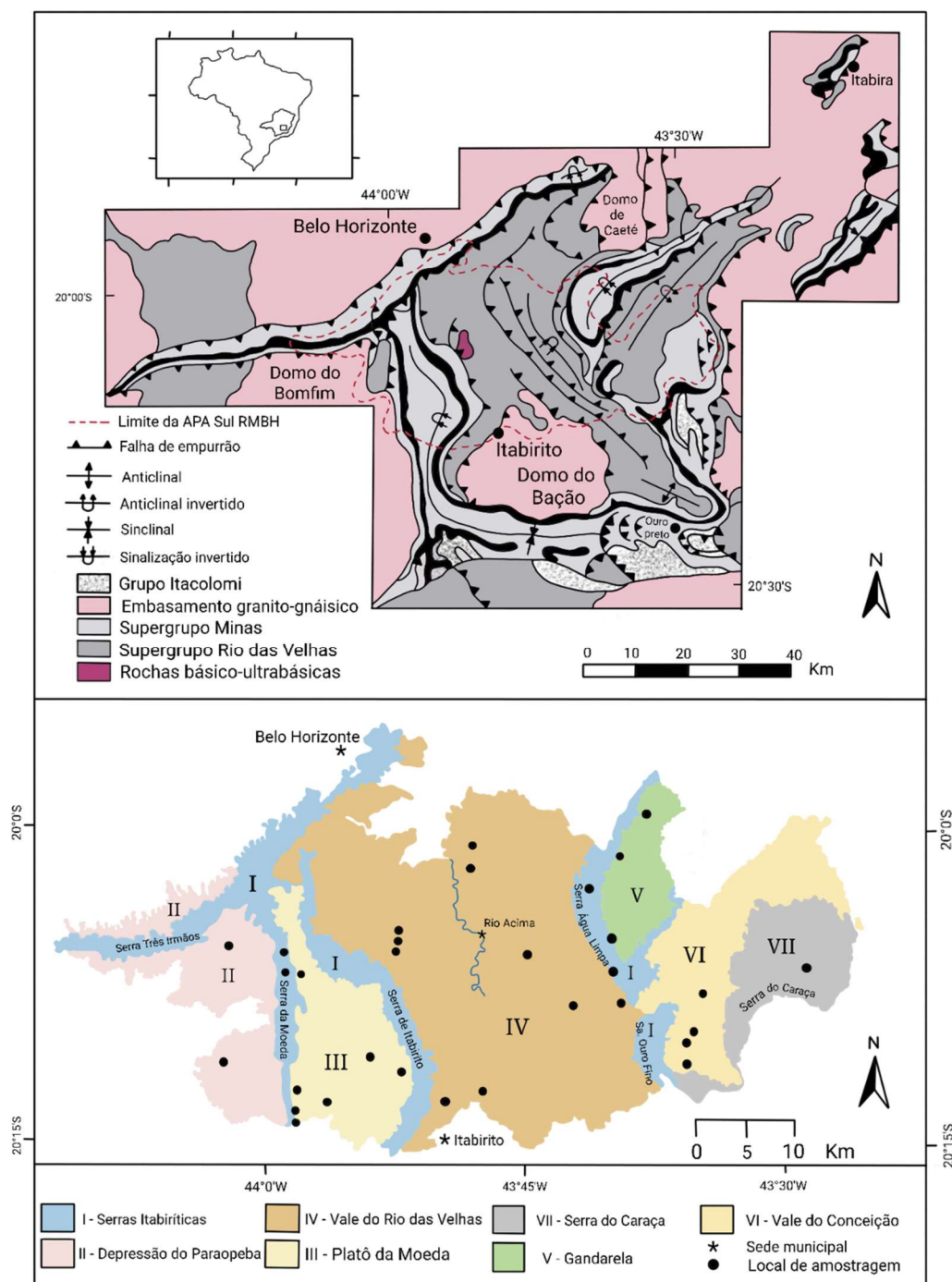
O relevo do Quadrilátero Ferrífero é bastante distinto. Suas estruturas, os sinclinais e anticlinais, foram submetidas a erosão diferencial desde o Cretáceo, o que promoveu a inversão do relevo. Atualmente, os anticlinais, correspondem aos vales dissecados, enquanto os sinclinais, que delimitam as bordas do QF, correspondem a estruturas elevadas, as cristas das serras, sustentadas por litologias do Supergrupo Minas.

A erosão diferencial se manifesta onde os quartzitos e itabiritos do Supergrupo Minas, mais resistentes, permaneceram como cristas aplainadas, enquanto gnaisses migmatíticos tornaram-se terras baixas, dada sua menor resistência a erosão (VARAJÃO, 1991, p. 138). Conforme Varajão (1991), as variações altimétricas observadas no QF, entre 600 e 2070 m de altitude, estão ligadas as variações litoestruturais, que interferem na distribuição e características dos solos da região.

Carvalho Filho, Curi e Shinzato (2010) desenvolveram um estudo do solo em região representativa do Quadrilátero Ferrífero, na Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA SUL RMBH), que abrange tratos expressivos do seu território e de quase todas as províncias geomorfológicas que o compõem, figura 12. Os autores apontam a predominância de solos pouco evoluídos, com forte influência do material de origem, com destaque para solos de constituição ferruginosa, indicativo de domínio dos processos erosivos sobre a pedogênese.

Ainda de acordo com eles, na área predominam afloramentos rochosos de grandes dimensões, além da expressiva presença de Cambissolos e Neossolos Litólicos, em áreas côncavas e fundos de vale. Já nos topos de serra é típica a ocorrência de Latossolos Vermelhos perférricos, no entanto, é mais comum que se encontre Latossolos nas encostas íngremes, preferencialmente de conformação convexa. Em geral, os materiais perférricos estão relacionados aos itabiritos, dolomitos ferruginosos e rochas básica-ultrabásicas (CARVALHO FILHO, CURI e SHINZATO, 2010, p. 915). Os autores identificaram sete pedoambientes: Depressão do Paraopeba, Serras Itabiríticas, Platô da Moeda, Vale do Rio das Velhas, Gandarela, Vale do Conceição e Serra do Caraça. Tais pedoambientes refletem as variáveis geológicas e geomorfológicas da região, apresentando padrão de ocorrência característicos.

Figura 12. Mapa da distribuição geográfica dos pedoambientes identificados na APA Sul RMBH e sua localização no Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Carvalho Filho, Curi e Shinzato, 2010, p. 9059834

De acordo com os autores, a Depressão do Paraopeba não se encontra dentro dos limites do Quadrilátero Ferrífero propriamente dito. Este pedoambiente apresenta feições fisiográficas representativas dos terrenos granito-gnáissicos, relevo de amplitude modesta e espesso manto de alteração. Os autores apontam predominância de Latossolos Vermelhos de textura argilosa, em geral álicos, às vezes com horizonte B pouco espesso, levando a ocorrência de voçorocas,

por exposição do horizonte C, de natureza muito friável, que se estende a grandes profundidades. Nas encostas de vale e fundos de grotas, ocorrem associados a Cambissolos, dominantes. Já nas áreas de maior dissecamento e relevo mais acidentado, ocorrem Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos.

As Serras Itabiríticas, por sua vez, apresentam formações pedimentares, diretamente relacionadas aos Latossolos Vermelhos perférricos. Tais serras se apresentam como alinhamento de cristas aguçadas, sobre vertentes muito íngremes, com solos rasos (Neossolos Litólicos e Cambissolos) e picos isolados constituídos de hematitas compactas, como, por exemplo, o Pico do Itabirito (CARVALHO FILHO, CURI E SHINZATO, 2010, p. 907). Estas serras apresentam, como característica distintiva, extenso capeamento de canga recobrimdo grande parte dos topos arredondados, às vezes se estendendo pela encosta interna.

O Platô da Moeda se apresenta estruturalmente como um sinclinal geomorfologicamente suspenso. Este pedoambiente apresenta solos perférrico de coloração vermelha intensa, em alguns casos com tonalidade bastante escurecida, em seus flancos. Apresenta também concrecionamento, principalmente no relevo colinoso, cujos solos, em geral relacionados à Formação Gandarela, são classificados como Plintossolos Pétricos concrecionários (CARVALHO FILHO, CURI E SHINZATO, 2010, p. 907). Ainda, em suas áreas mais baixas, ou em relevo levemente deprimido, predominam os Latossolos Vermelhos perférricos, enquanto na zona central, de maior amplitude territorial, predominam os Cambissolos Hápticos. Já nas encostas íngremes dos vales que a dissecam, predominam Neossolos Litólicos, com horizonte A assente sobre a rocha ou sobre saprolito duro, em associação com Neossolos Regolíticos, alguns com exíguo horizonte B. A estes últimos, em geral relacionados a filitos e filitos dolomíticos do Grupo Piracicaba, está associada a ocorrência de voçorocas, em razão da grande friabilidade e profundidade do horizonte C.

O Vale do Rio das Velhas é constituído por dois conjuntos principais: o primeiro, relacionado ao curso do Rio das Velhas, marcado por relevo acidentado, com elevações íngremes e vales encaixados profundos; o segundo, marcado pela alternância de alinhamentos rochosos, intercalados por patamares escalonados de topografia relativamente suave.

Na área do primeiro conjunto predominam Cambissolos Hápticos. Em regiões mais íngremes, ocorrem solos lépticos ou líticos, com frequência associados a Neossolos Litólicos. Os trechos de maior encaixe das drenagens, de relevo muito íngreme (escarpado e montanhoso), apresentam Neossolos Litólicos e Cambissolos lépticos ou líticos, além de pequenos

afloramentos de rocha. Menos frequentes, Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos tendem a ocorrer em nível topográfico inferior. Na área do segundo conjunto do Vale do Rio das Velhas, onde predominam metassedimentos do Grupo Maquiné dobrados com acentuado ângulo de mergulho, o relevo é marcado pela extensa presença de afloramentos rochosos, alinhados em cristas de direção SE-NW, intercaladas por vales de profundidade variável e trechos relativamente extensos de relevo suave. Predominam Cambissolos de textura média, com elevados teores de areia, além de Neossolos Litólicos, sob campo ou campo cerrado.

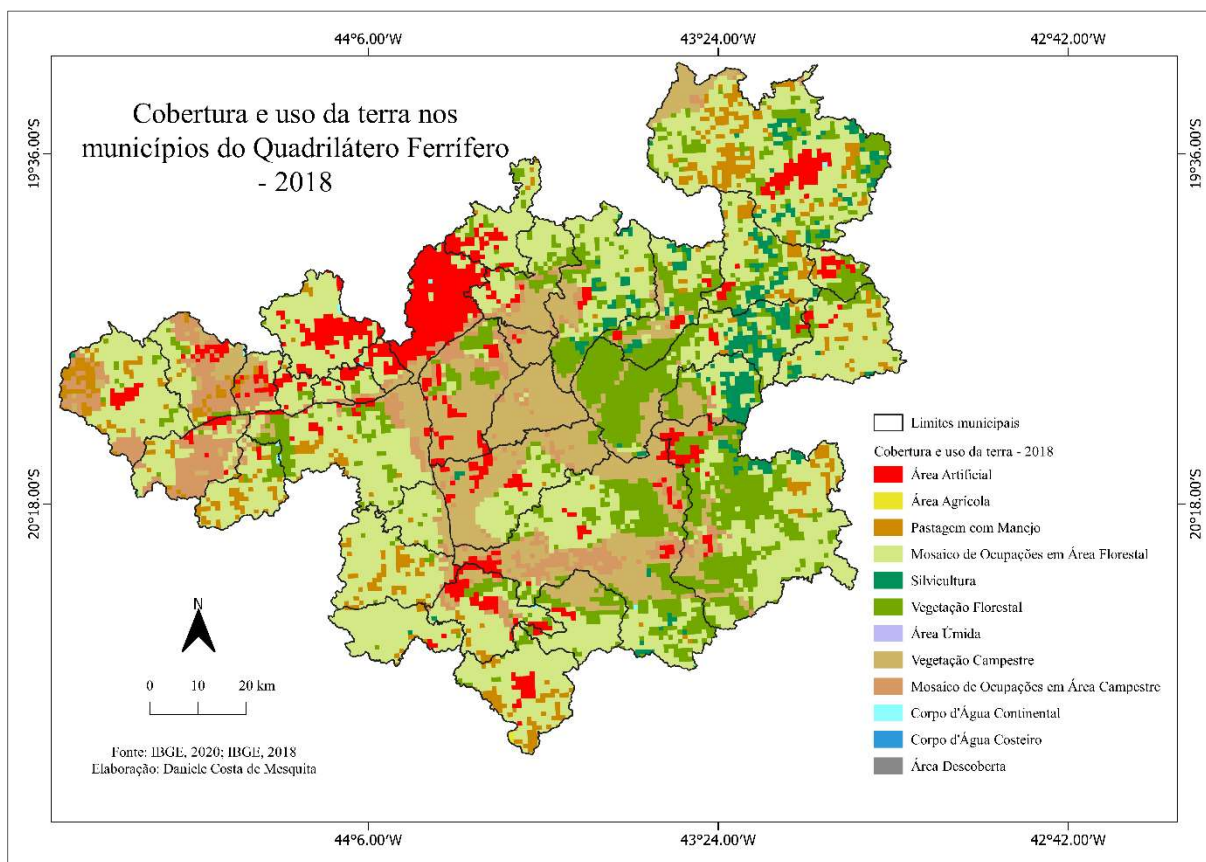
No Gandarela, o relevo se apresenta bastante acidentado, com elevações de perfil côncavo e topos estreitos, entremeadas por vales encaixados. Na área, ocorrem dois conjuntos pedológicos: os solos relacionados aos dolomitos ferruginosos da Formação Gandarela, que ocorrem em faixa adjacente às serras, com predomínio de Cambissolos Háplicos, de caráter perférico, e ocorrência menor de Latossolos Vermelhos perféricos; e os solos relacionados às rochas do Grupo Piracicaba, em geral, Cambissolos Háplicos.

No Vale do Conceição, que corresponde a um anticlinal invertido se distinguem duas unidades de paisagem. Nas cabeceiras, em um patamar elevado situado logo abaixo das escarpas quartzíticas do Caraça, encontra-se uma superfície aplainada, constituída por colinas convexas de topos relativamente amplos, em que predominam Cambissolos Háplicos. Logo abaixo das cabeceiras do vale, o relevo é montanhoso e forte ondulado, com predominância de Cambissolos, sobretudo nas encostas côncavas e trechos mais íngremes, com ocorrência menor de Latossolos Vermelho-Amarelos, ambos de textura argilosa, em topos um pouco mais amplos e encostas de conformação convexa.

Por fim, na Serra do Caraça, um conjunto serrano de grandes dimensões, com cristas em altitudes variadas e vales intermontanos embutidos, grande parte da área é representada por exposições rochosas (quartzitos), com intercalações de solos muito rasos (Neossolos Litólicos) sob campo rupestre.

Em relação a vegetação, Jacobi e Carmo (2008) apontam que o Quadrilátero Ferrífero está inserido na zona de transição entre a Mata Atlântica e o Cerrado. Medina *et al.* (2005), identificam para a Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA SUL RMBH), 14 classes de coberturas e uso terra. As coberturas vegetais são 7: mata, cerrado, campo gramíneo/campo cerrado, capoeira, campo rupestre, áreas alagadas e reflorestamento. As demais classes são: afloramento rochoso, solo exposto, agricultura, pastagem, área urbana, mineração e corpos d'água.

Figura 13. Mapa de cobertura e uso da terra nos municípios do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaborado pela autora

As matas se referem a formações mesófilas de estrato mais alto, podendo alcançar até 20 m, incluindo aqui as matas ciliares, caracterizado pela perda de suas folhas durante a época seca. Ocorrem em áreas em que a hidrografia proporciona condições favoráveis ao seu desenvolvimento. A classe cerrado se refere as áreas mais densas de vegetação arbóreo-arbustiva, de porte médio, com sub-bosque pouco expressivo. Sua ocorrência está ligada a altitudes superiores a 800 m, em locais de relevo ondulado, onde predominam colinas dissecadas e morros baixos. De forma semelhante, o campo cerrado também tem sua ocorrência associada a altitudes superiores a 800m. É uma classe cuja formação vegetal é associada, composta de cerrado intercalado com vegetação graminóide e herbácea do campo, e, conforme Medina *et al.* (2005), é a mais expressiva da APA Sul.

A capoeira, por sua vez, ainda de acordo com Medina *et al.* (2005), é relacionada a áreas em primeira fase de sucessão vegetal após ação antrópica, marcada por grandes variações nas características da vegetação, de acordo com seu grau de recuperação. Enquanto o campo rupestre tem sua ocorrência associada a afloramentos rochosos. A vegetação desta classe está assentada diretamente sobre as rochas, em pequenas camadas de solo descontínuo.

Ainda, as áreas alagadas se referem a vegetação que ocorre em planícies aluviais, variando desde comunidades vegetais pantanosas até comunidades campestres, de acordo com a quantidade de água no local e o tempo de permanência desta. E por fim, as áreas de reflorestamento são representadas por áreas plantadas por espécies florestais comerciais, comumente o *Eucalyptus* (MEDINA *et al.*, 2005, p. 29).

6.4. ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS

Com relação ao clima, a região pode ser classificada segundo o sistema de classificação de Koppen (1931), que utiliza dados de temperaturas médias mensais, precipitação média mensal e precipitação anual total para elaborar suas categorias espaciais e limites (CHRISTOPHERSON, 1997). Neste sistema as letras maiúsculas designam as categorias climáticas por latitude, em geral baseadas em critérios de temperatura, do Equador (A) aos pólos (E), mais uma categoria H para o caso especial das terras altas, enquanto dentro de cada classificação climática, letras minúsculas adicionais são usadas para indicar as condições de temperatura e umidade. Assim, tem-se:

A – Tropical (regiões equatoriais)

B – Seco

C – Mesotérmico (regiões subtropicais úmidas, mediterrâneas e costeiras)

D – Microtermal (regiões continentais úmidas, subárticas)

E – Polar (regiões polares)

H – Highland (em comparação com terras baixas na mesma latitude, as terras altas têm temperaturas mais baixas e maiores índices de precipitação)

Segundo SCHOBENHAUS *et al.* (2001), a temperatura média no QF é de aproximadamente 23°C, enquanto a pluviometria média está em torno de 1.380 mm. Já Davis *et al.* (2005a) realizaram estudo de padrões pluviométricos por meio do cálculo das precipitações médias mensais e elaboração de hietogramas anuais. Os resultados mostram que o trimestre mais chuvoso (novembro, dezembro e janeiro) representa de 55 a 59% da precipitação média anual, enquanto o trimestre mais seco (junho, julho e agosto) entre 2 e 3%.

O clima da região é caracterizado por duas estações bem definidas: (i) quente e úmida, que ocorre no período de outubro a março, e (ii) fria e seca, que se estende de abril a setembro. O verão é chuvoso e o inverno seco, aliado a uma temperatura média superior a 18°C no mês mais frio.

Assim, de acordo com a classificação climática de KÖPPEN (1931), parte da região apresenta tipo climático Cwa, subtropicais úmidos de inverno seco, enquanto as regiões mais elevadas têm características do tipo Cwb, clima subtropical de altitude. No clima tipo Cwa, o verão é pelo menos dez vezes mais chuvoso do que o inverno, de modo que 70% da chuva cai durante os meses mais quentes, e somente 30% cai nos meses mais frios. Já no clima tipo Cwb, uma classificação mais baseada na temperatura, todos os meses possuem temperatura média abaixo de 22 °C e pelo menos quatro meses apresentam média acima dos 10 °C.

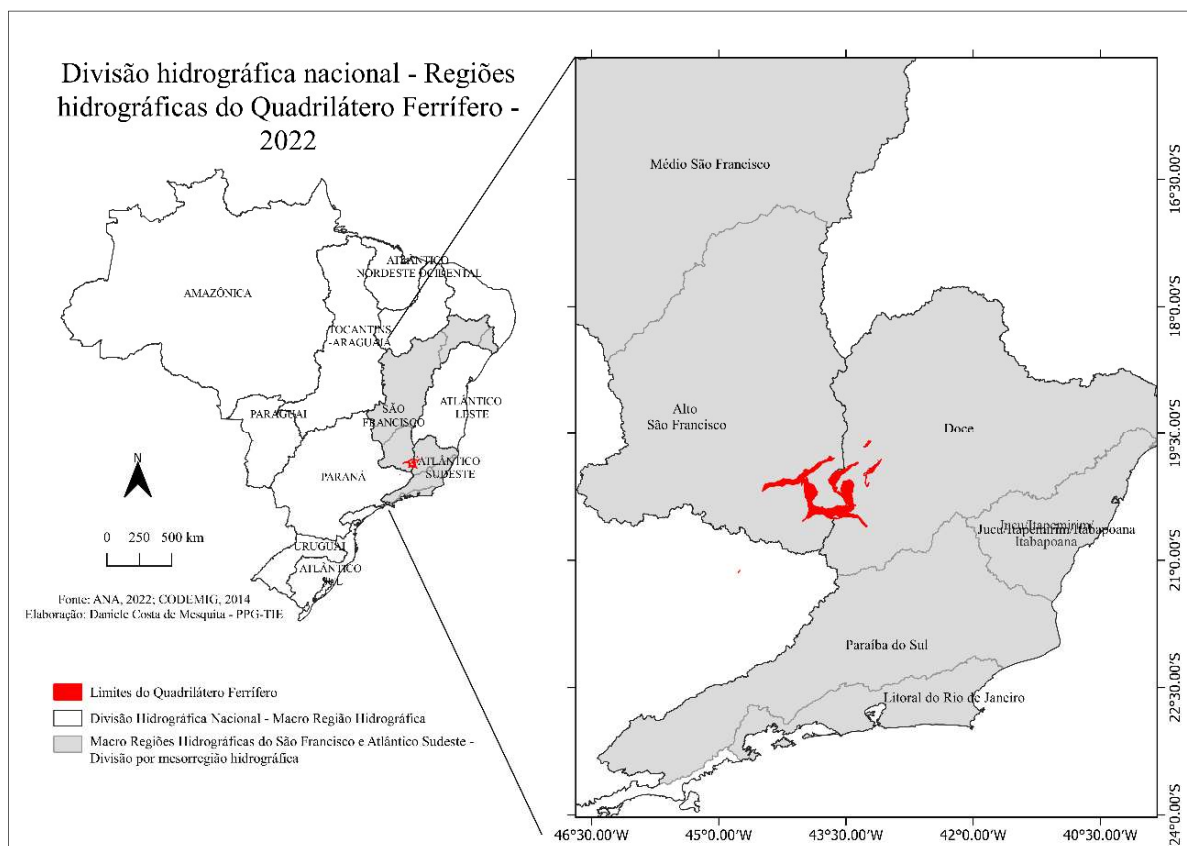
No entanto, segundo Ribeiro e Mol (1985), devido às ações antrópicas e alterações ambientais, o clima de hoje no QF enquadra-se no tipo Aw de savana tropical. Neste tipo de clima (Aw), a zona de convergência intertropical faz com que os verões sejam mais úmidos do que os invernos, porque as chuvas de convecção acompanham o deslocamento deste sistema meteorológico. Assim, o mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm e equivale a menos de 4% da precipitação anual total. O w significa a condição de inverno seco, quando as chuvas saem da área e a alta pressão domina (CHRISTOPHERSON, 1997).

Por fim, de acordo com Mourão (2007), a umidade relativa do ar apresenta valores máximos em torno de 79% no mês de janeiro e mínimos de cerca de 64% no mês de agosto, coincidindo com o incremento da insolação. A evapotranspiração real média, obtida por meio de balanço hídrico, encontra-se entre 928 e 1059 mm/ano. A estimativa da evapotranspiração potencial média, feita pelo método de Thornthwaite, resultou em valores de 964,9 mm/ano para a estação de Ibirité e 992,6 mm/ano para a estação de Belo Horizonte. Mourão (2007) ainda definiu que o déficit hídrico ocorre no período de abril a setembro (MOURÃO, 2007, p. 21).

6.5. ASPECTOS HIDROGRÁFICOS

O Quadrilátero Ferrífero se encontra nos limites das Macrorregiões Hidrográficas do São Francisco e do Atlântico Sudeste, com sua porção oeste na Mesorregião Hidrográfica do Alto São Francisco e sua porção leste na Mesorregião Hidrográfica do Doce, figura 14. Neste local estão presentes as cabeceiras de duas grandes bacias hidrográficas, a Bacia do Rio São Francisco, cujos afluentes drenam a porção Oeste e Central do QF, e a Bacia do Rio Doce, cujos afluentes drenam sua porção leste.

Figura 14. Divisão hidrográfica nacional – Regiões hidrográficas do Quadrilátero Ferrífero – MG – 2022.



Fonte: Elaborado pela autora

6.5.1. Bacia Federal do Rio São Francisco

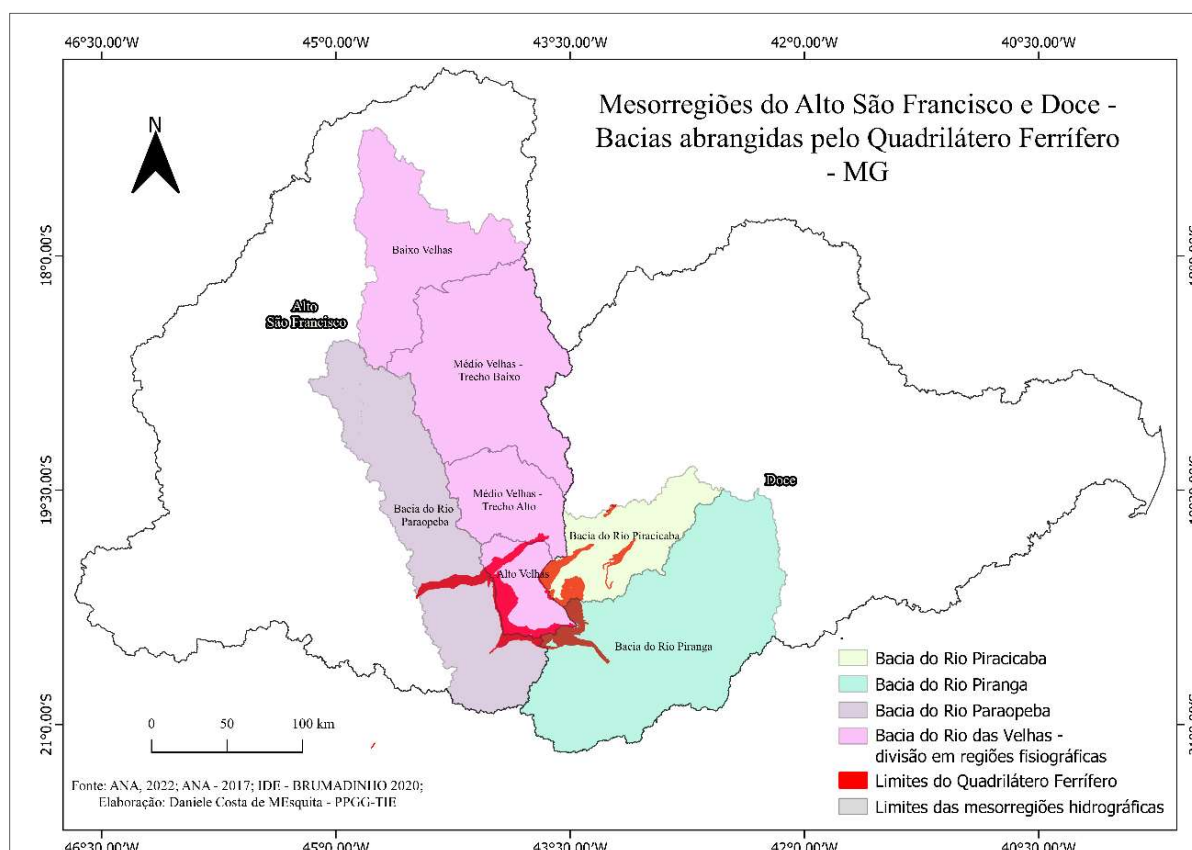
A bacia hidrográfica do rio São Francisco, uma das 12 macrorregiões hidrográficas brasileiras, possui extensão total de 2863 km e área de drenagem em torno de 639.219 km². Sua nascente está localizada em Minas Gerais, na Serra da Canastra, e sua foz no oceano Atlântico, na divisa dos estados de Alagoas e Sergipe. A gestão da bacia é de responsabilidade do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF), criado por decreto em junho de 2001.

O Rio São Francisco tem como maiores afluentes os rios: Paraopeba, das Velhas, Paracatu, Urucuia, Corrente e Grande. Em sua área de drenagem encontram-se diversos reservatórios para controle de vazão e/ou geração de energia elétrica, dentre as quais se destacam: Três Marias, em Minas Gerais, Sobradinho, Paulo Afonso e Itaparica, na Bahia e Xingó, localizado entre os estados de Alagoas e Sergipe.¹⁰

¹⁰ <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>

Para fins de gestão, a bacia é dividida em quatro zonas ou regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco¹¹ e composta por dezoito Comitês de Afluentes. Parte do QF se localiza no Alto São Francisco, figura 15, representadas pelas bacias do Paraopeba, sob gestão do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, e do Rio das Velhas, gerido pelo CBH Rio das Velhas. O divisor de águas dessas bacias é a Serra da Moeda.

Figura 15. Bacias abrangidas pelo Quadrilátero Ferrífero nas Mesorregiões Hidrográficas do Alto São Francisco e Doce



Fonte: Elaborado pela autora

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba possui área total de 12.054,25 km², representando 5,14% do território da bacia do rio São Francisco e abrangendo 48 municípios, dentre os quais 35 tem sede na bacia. O Rio Paraopeba tem sua nascente localizada no município de Cristiano Ottoni e sua foz na represa de Três Marias, no município de Felixlândia, ambos em Minas Gerais. Os principais rios de sua rede hidrográfica são: Paraopeba, Águas Claras, Macaúbas, Betim, Camapuã e Manso. O Alto Paraopeba e partes do médio Paraopeba drenam a porção oeste do QF.

¹¹ <https://cbhsaofrancisco.org.br/o-cbhsf/>

Já a Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, maior afluente em extensão da bacia do Rio São Francisco, possui área de 27.857,05 km², orientada no sentido sudeste para noroeste. Abrange 51 municípios, 15 deles na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Suas nascentes estão localizadas nos limites da Área de Proteção Ambiental da Cachoeira das Andorinhas, município de Ouro Preto, enquanto sua foz, no Rio São Francisco, se encontra na localidade de Barra do Guaicuí, município de Várzea da Palma (MG). Seus principais rios são: Cipó, Corrente, Pardo, Onça, Bicudo, Picão e Curimatai.

A bacia hidrográfica do Rio das Velhas é subdividida em quatro regiões fisiográficas: Alto Rio das Velhas, Médio Alto Rio das Velhas, Médio Baixo Rio das Velhas e Baixo Rio das Velhas. O Alto Rio das Velhas, que corresponde a cerca de 10% da bacia do Rio das Velhas, está localizado dentro dos limites do QF, figura 14, composta por dez municípios: Belo Horizonte, Itabirito, Nova Lima, Raposos e Rio Acima, 100% inseridos em sua área, e Caeté (42%), Contagem (42%), Ouro Preto (50%), Sabará (63%) e Santa Luzia (4%), parcialmente inseridos em sua área. Por abranger parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte, o Alto Rio das Velhas é a unidade de maior contingente populacional. Além disso, em sua área se encontra o Sistema de Abastecimento Integrado Rio das Velhas, responsável por 74% do abastecimento de Belo Horizonte, assim como das cidades de Raposos, Nova Lima, Sabará e Santa Luzia.

Outra divisão de território na Bacia do Rio das Velhas, estabelecido pelo CBH Rio das Velhas, são as regiões de planejamento e gestão de recursos hídricos, denominadas de Unidades Territoriais Estratégicas (UTE). As UTEs são grupos de bacias ou sub bacias hidrográficas contíguas¹², que estabelecem limites territoriais para a criação e atuação dos Subcomitês de Bacia Hidrográfica e cuja delimitação leva em consideração fatores como: prerrogativas geográficas da Lei das Águas, as características e extensão de cada área, número de afluentes diretos, quantidade de municípios, distribuição da população e a existência de mais de uma prefeitura em sua composição.

No Alto Rio das Velhas, área de interesse para este trabalho, as UTEs são: Nascentes, Rio Itabirito, Águas da Moeda, Águas do Gandarela, Ribeirões Caeté-Sabará, Ribeirão Arrudas e Ribeirão Onça. A localização e principais características dessas UTEs são apresentadas na tabela 2.

¹² <https://cbhvelhas.org.br/a-bacia-hidrografica-do-rio-das-velhas/>

Tabela 2 - Unidades territoriais estratégicas da bacia do Alto Rio das Velhas.

UTE	LOCALIZAÇÃO	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS
Nascentes	Possui área de 541,58 km ² integrada pelos municípios de Ouro Preto, onde se localizam as nascentes do Rio das Velhas, e Itabirito	Nessa UTE os principais afluentes do Rio das Velhas são: Rio Maracujá, Ribeirão do Funil, Córrego Olaria e Córrego do Andaime. É uma área de recarga de aquífero considerada, quanto à sua prioridade, Especial para conservação.
Rio Itabirito	Possui área de 541,58 km ² , composta pelos municípios de Itabirito, Ouro Preto e Rio Acima.	Os principais cursos d'água são o Rio Itabirito, Ribeirão Mata Porcos, Ribeirão do Silva, Córrego do Mango e Ribeirão Bação. O Rio Itabirito escoar para o Rio das Velhas, contribuindo de maneira significativa para o abastecimento da população da RMBH. A totalidade da área está inserida no Quadrilátero Ferrífero e sofre pressões de atividades minerárias, expansão das atividades imobiliárias e implantação de infraestrutura viária. Um grande problema na área é o rebaixamento do aquífero pela mineração.
Águas da Moeda	Possui uma área de 544,32 km ² , composta pelos municípios de Itabirito, Nova Lima, Raposos, Rio Acima e Sabará	Os rios principais da UTE Águas da Moeda são o Rio do Peixe, Ribeirão dos Marinhos, Ribeirão Congonhas, Ribeirão Cardoso, Ribeirão Cristais, Córrego Padre Domingos, Córrego Água Limpa, Córrego Fazenda Velha e Córrego Fechos e o Rio das Velhas, que possui extensão de 42,36 km dentro da área delimitada da Unidade Territorial. A totalidade da área desta UTE é considerada, quanto à sua prioridade, Especial para conservação.
Águas do Gandarela	Possui uma área de 323,66 km ² , composta pelos municípios de Caeté, Itabirito, Nova Lima, Raposos e Rio Acima.	O principal rio da UTE é o Ribeirão do Prata. Outros importantes cursos d'água são o Córrego Manso, Córrego Palmital, Córrego Cortesia e Córrego Mingü. Possui duas Unidades de Conservação inseridas parcialmente em seu território, o Parque Nacional da Serra do Gandarela e a APA Sul. Abriga as nascentes de alguns dos principais contribuintes do Rio das Velhas, além da captação do Rio das Velhas localizada em Nova Lima, responsável pelo abastecimento de água da Grande BH. É uma região muito impactada pelo setor minerário, apesar de ser uma área de aquífero que deve ser preservada
Ribeirões Caeté-Sabará	Possui uma área de 331,56 km ² e é composta pelos municípios de Caeté, Raposos, Sabará e Santa Luzia	Os principais cursos d'água da UTE são o Ribeirão Sabará, Córrego Caeté, Ribeirão Juca Vieira e Ribeirão Gaia. A qualidade das águas da UTE Ribeirões Caeté-Sabará encontra-se prejudicada pelo lançamento de esgotos e efluentes industriais na região. A mineração é uma das atividades econômicas que mais pressiona a sub-bacia.

Fonte: Adaptado de CBH Velhas.

Tabela 2 - Unidade territoriais estratégicas da bacia do Alto Rio das Velhas

UTE	LOCALIZAÇÃO	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS
Ribeirão Arrudas	Possui uma área de 228,37 km² e é composta pelos municípios de Belo Horizonte, Contagem e Sabará.	O principal curso d'água é o ribeirão Arrudas e os seus córregos afluentes Barreiro, Jatobá, Ferrugem, Bonsucesso, Cercadinho, Navio Baleia e Taquaril. É a segunda região com maior concentração populacional na Bacia do Rio das Velhas e seu território apresenta expressiva urbanização, representada por 75,7% de sua área total. O Ribeirão Arrudas teve seu leito concretado e sua mata ciliar suprimida em Contagem e Belo Horizonte, além de receber esgotos e efluentes industriais na região. Apesar de a maioria das nascentes serem limpas, o Ribeirão que corta a capital mineira de Oeste a Leste, encontra-se sufocado pela poluição.
Ribeirão Onça	Possui uma área de 221,38 km², composta pelos municípios de Belo Horizonte e Contagem	Os principais cursos d'água da UTE são o Ribeirão Onça, Ribeirão da Pampulha, Córrego da Ressaca, Ribeirão do Cabral, Córrego São João e Ribeirão Isidora. É a unidade com maior concentração populacional da Bacia do Rio das Velhas. Consequentemente, a qualidade das suas águas encontra-se prejudicada pelo lançamento de esgotos e efluentes industriais. Apresenta alto nível de degradação, sendo marcada pela presença de ocupações irregulares e carência de infraestrutura sanitária e urbanística básica, deflagrando, assim, pressões que impactam diretamente o seu estado de preservação e conservação ambiental.

Fonte: Adaptado de CBH Velhas

Conforme a ARSAE-MG (2013, p. 6) o Sistema Integrado de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que abrange 16 dos 34 municípios, é composto por duas grandes bacias de abastecimento: a Bacia do Paraopeba, responsável por 60% da RMBH, predominantemente pela região Oeste; e a Bacia do Rio das Velhas, responsável por 40%, predominantemente pela região Leste. Na bacia do Paraopeba, capta-se água superficialmente no ponto conhecido como Serra Azul, em Juatuba, onde se obtém 2.700 l/s; na Represa Vargem das Flores, em Betim, onde se obtém 950 l/s; e no reservatório de acumulação Rio Manso, em Brumadinho, onde podem ser captados 10.320 l/s. Na bacia do Rio das Velhas tem-se captação superficial diretamente no rio das Velhas, no distrito de Bela Fama, Nova Lima, onde se obtém 8.771,0 l/s.

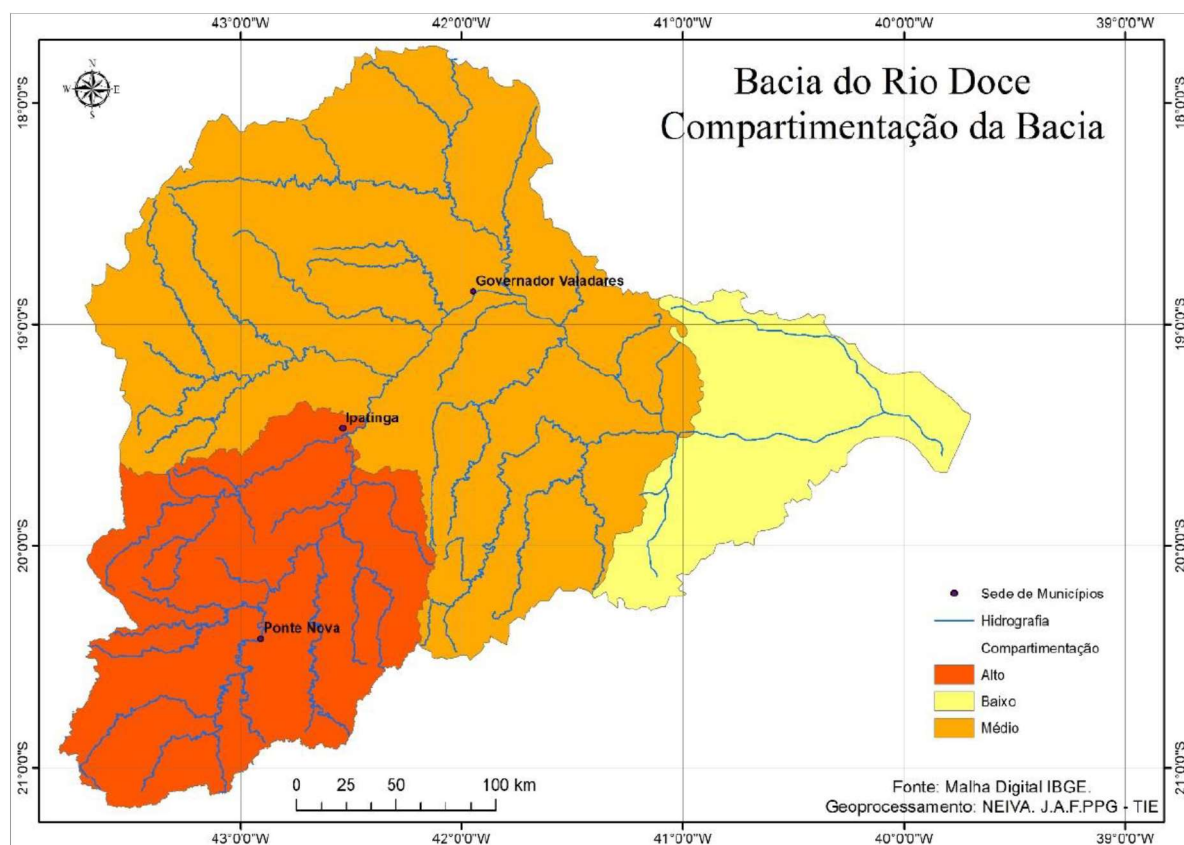
6.5.2. Bacia Federal do Rio Doce

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce tem extensão de 879 km e possui área de drenagem de 86.715 km², dos quais 86% estão no Leste mineiro e 14% no Nordeste do Espírito Santo. Suas

nascentes se localizam nas Serras da Mantiqueira e do Espinhaço, em Minas Gerais, e sua foz se encontra no estado do Espírito Santo. A bacia abrange 200 municípios em Minas Gerais e 28 no Espírito Santo.

A bacia do Rio Doce é dividida em três regiões fisiográficas: Alto, Médio e Baixo Rio Doce, figura 16. Além disso, para fins de planejamento e gestão, a bacia é dividida em sub-bacias, cada uma delas sob responsabilidade de um Comitê de Bacia Hidrográfica. No estado de Minas Gerais são seis sub-bacias: Rio Piranga (DO1), Rio Piracicaba (DO2), Rio Santo Antônio (DO3), Rio Suaçuí (DO4), Rio Caratinga (DO5), Rio Manhuaçu (DO6). Na região do QF se encontram parte da bacia dos rios Piranga e Piracicaba (BARROS e MAGALHÃES JUNIOR, 2019), localizadas no Alto Rio Doce

Figura 16. Compartimentação da Bacia do Rio Doce em Regiões Fisiográficas



Fonte: Neiva (2018, p. 41)

A Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba, afluente da margem esquerda do rio Doce tem 5465 km², abrangendo 21 municípios, todos em Minas Gerais. Suas nascentes se encontram no município de Ouro Preto e sua foz, no Rio Doce, está na divisa entre os municípios de Ipatinga e Timóteo. Compõem a bacia do Rio Piracicaba, as sub-bacias do rio da Prata, pela margem direita, e as sub-bacias do rio Santa Barbara e do rio do Peixe, pela margem esquerda

(ECOPLAN; LUME, 2010). As serras do Caraça e de Antônio Pereira servem como divisores de águas entre as bacias do Rio das Velhas e do Piracicaba.

Por sua vez, a Bacia Hidrográfica do Rio Piranga está totalmente inserida no estado de Minas Gerais, abrangendo de forma total ou parcial, 77 municípios, em uma área de 17.571 km². Suas nascentes se localizam no município de Ressaquinha, cuja sede não se insere na Bacia do rio Doce. Ele percorre 470 km até se encontrar com o Ribeirão do Carmo, formando assim o Rio Doce.

6.5.3. Águas subterrâneas

As águas subterrâneas são ‘armazenadas’ nos aquíferos, unidade hidrogeológica fundamental representada por unidades lito-estratigráficas que lhe dão o nome (DINIZ *et al.*, 2014). No QF, Beato *et al.* 2005, identificaram nove unidades hidrogeológicas, dentre as quais 8 aquíferos, para a região abrangida em seu estudo: Sistema Aquífero Granito-Gnáissico, Sistema Aquífero Xistoso, Sistema Aquífero Formação Ferrífera, Sistema Aquífero Quartzítico, Sistema Aquífero Itabirítico, Sistema Aquífero Carbonático, Sistema Aquífero Quartzito Cercadinho, Sistema Aquífero Granular e Aquitardos.

Posteriormente, Mourão (2007), em sua tese, classificou as unidades hidrogeológicas da área como aquíferos e unidades confinantes considerando suas propriedades hidráulicas e características litológicas dominantes. A autora identificou sete unidades hidrogeológicas: aquíferos inconsolidados, aquíferos quartzíticos, aquífero carbonático, aquíferos em xistos, aquíferos em rochas granito-gnáissicas, aquíferos em formações ferríferas e unidades confinantes.

Segundo Mourão (2007), os aquíferos inconsolidados estão relacionados às formações superficiais continentais cenozóicas e coberturas detrítico-lateríticas e elúvio-colúviais (aquíferos em cangas e lateritas) e apresentam boa capacidade de armazenamento, permitindo a continuidade do escoamento de base durante o período de estiagem, além de ter grande importância na recarga dos aquíferos sotopostos. Já os aquíferos quartzíticos estão relacionados às formações Maquiné, Moeda, Cercadinho, Taboões e Itacolomi e se apresentam bastante heterogêneos e anisotrópicos devido as intercalações de metapelitos presentes.

Ainda segundo a autora, o aquífero Cercadinho pode estar localmente conectado aos aquíferos Gandarela e Cauê, por meio de estruturas tectônicas. O aquífero carbonático, por sua vez, é relacionado as litologias da Formação Gandarela, que dá nome ao aquífero. É um aquífero do

tipo fraturado ou cárstico, que pode ser livre ou se encontrar confinado por unidades metapelíticas ou materiais argilosos. Já os aquíferos em xistos compreendem os aquíferos Nova Lima e Sabará, ambos do tipo fissural e com baixo potencial hidrogeológico, com exceção daqueles relacionados às coberturas coluvionares nos domínios do aquífero Nova Lima, onde se observam descargas de até 150 m³/h, devido à alta capacidade de infiltração destas litologias. Os aquíferos em rochas granito-gnáissicas são aquíferos do tipo fissurais, recobertos por espesso manto de intemperismo responsável por sua recarga e pela do escoamento para os cursos d'água (MOURÃO, 2007).

Os aquíferos em formações ferríferas têm seu principal representante no Aquífero Cauê, apontado como o principal do QF. É um aquífero do tipo fissural ou granular, de elevada heterogeneidade e anisotropia. Apresenta elevado número de nascentes e suas águas são frequentemente bombeadas por poços tubulares profundos com vazões, em geral, maiores que 100 m³/h. Já as unidades confinantes são compostas por rochas de baixa permeabilidade relacionadas as unidades Moeda, Batatal, Fecho do Funil e Barreiro, assim como a diques e *sills* de rochas básicas e depósitos sedimentares argilosos cenozoicos, que agem como barreiras hidráulicas entre os aquíferos (MOURÃO, 2007).

O fluxo subterrâneo regional, de acordo com Mourão (2007), encontra-se delimitado em três compartimentos de origem tectônica: Homoclinal Serra do Curral, Sinclinal da Moeda e Faixa Transpressiva Tamanduá-Mutuca, cujos limites são assinalados pelos xistos do Grupo Nova Lima, rochas granitóides do complexo Bonfim, filitos da Formação Batatal e dolomitos da Formação Gandarela, unidades consideradas de baixa permeabilidade. Deste modo, estes compartimentos apresentam pouca ou nenhuma conexão hidráulica entre os aquíferos de circulação profunda. Nestes compartimentos, as descargas dos aquíferos Cauê e Gandarela são condicionadas pelas estruturas de descontinuidade das rochas. No caso do aquífero Cauê, ocorrem, em sua maioria junto aos contatos com as unidades de topo ou de base, representadas pelas Formações Batatal e Moeda, em pontos de maior dissecação do relevo e com vazões, em sua maioria, superiores a 50 m³/h (MOURÃO, 2007).

Tanto Beato *et al.* (2005), quanto Mourão (2007) identificam o aquífero Cauê como o mais importante da região do QF. No entanto, este aquífero, devido sua associação às formações ferríferas, um dos principais alvos da mineração no QF, está em conflito direto com a atividade mineradora da região, o que faz com que seja o mais afetado em termos de retirada de água, principalmente no que diz respeito a rebaixamentos do seu nível.

Os primeiros rebaixamentos de nível do aquífero registrados na região do Quadrilátero Ferrífero tiveram início na década de 1980. Conforme Tárzia, Sobreiro e Santana (1986), em 1982 a mina de Conceição, em Itabira, começou a enfrentar problemas decorrentes da interceptação do aquífero pelo avanço de lavra, levando à necessidade de rebaixamento do nível d'água na mina. Conforme os autores, em 1983 uma empresa foi contratada para realizar estudos preliminares de desaguamento da mina de Conceição, resultando na perfuração de poço-piloto e piezômetros de controle no piso inferior da mina, em 1985. A mina de Conceição faz parte do Distrito Ferrífero de Itabira. Sobreiro Neto *et al.* (2001), apontam que nas minas desta região as atividades de rebaixamento do aquífero, até a publicação do trabalho de pesquisa, já haviam sido retirados 50 milhões de metros cúbicos de água subterrânea. A modelagem hidrogeológica indicou que desde o início das atividades de desaguamento, ocorre a redução da descarga de água das nascentes associadas aos aquíferos locais, cuja recuperação prevista, após encerramento das atividades de bombeamento é de 14,7% da vazão volumétrica inicial (SOBREIRO NETO *et al.*, 2001).

Ainda, Bertachini (1994) aponta que a lavra da mina de Águas Claras, no município de Nova Lima, bacia do Rio das Velhas, atingiu o nível d'água subterrânea por volta de 1981. No ano de 1986, prevendo-se que em 1990 a mina deveria entrar em cava, tiveram início uma série de estudos para viabilizar esse avanço. Entre 1989 e 1993, na mina de Águas Claras, entraram em operação 15 poços, com profundidade entre 106 e 289 metros, dos quais 9 eram jorrantes (BERTACHINI, 1994). Durante seu período de uso, o sistema de drenos produzia em média 80 m³/h, com rebaixamento da cota 1174 até a cota média de 1113 m. De 1989 até outubro de 1993, já com os poços em operação, foram bombeados onze milhões de metros cúbicos de água, rebaixando os níveis d'água até a cota média de 1020 m. A partir de 1993 até julho de 1994, a bateria de poços atingiu capacidade média de 600 m³/h e a produção mensal de 300.000 m cúbicos. Em média para cada metro rebaixado no nível d'água, foram retirados 115.000 metros cúbicos de água subterrânea (BERTACHINI, 1994). O rebaixamento do aquífero na mina de Águas Claras perdurou até os anos 2000, com vazão média de 252 m³/h, fazendo com o nível d'água chegasse a 275 m abaixo de sua cota inicial, antes da mina entrar em processo de fechamento, quando os poços foram desligados para preenchimento da cava (SPERLING e GRANDCHAMP, 2010)

Na Mina de Capão Xavier, localizada 15km a sul de Belo Horizonte, no distrito de Jardim Canadá, o aquífero também foi submetido a atividade de rebaixamento. As atividades de desaguamento da mina e rebaixamento do nível d'água tiveram início em setembro de 2003

(RUBIO *et al.* 2009), permitindo que a lavra avançasse em cava a partir de junho de 2004. Rubio *et al.* (2009), em estudo sobre o comportamento do rebaixamento por meio de modelagem hidrogeológica, apontaram que, em Capão Xavier, o desaguamento poderia reduzir a vazão de descarga nas bacias de Fechos e Mutuca, áreas de captação para abastecimento da cidade de Belo Horizonte, assim como impactar alguns poços no distrito de Jardim Canadá.

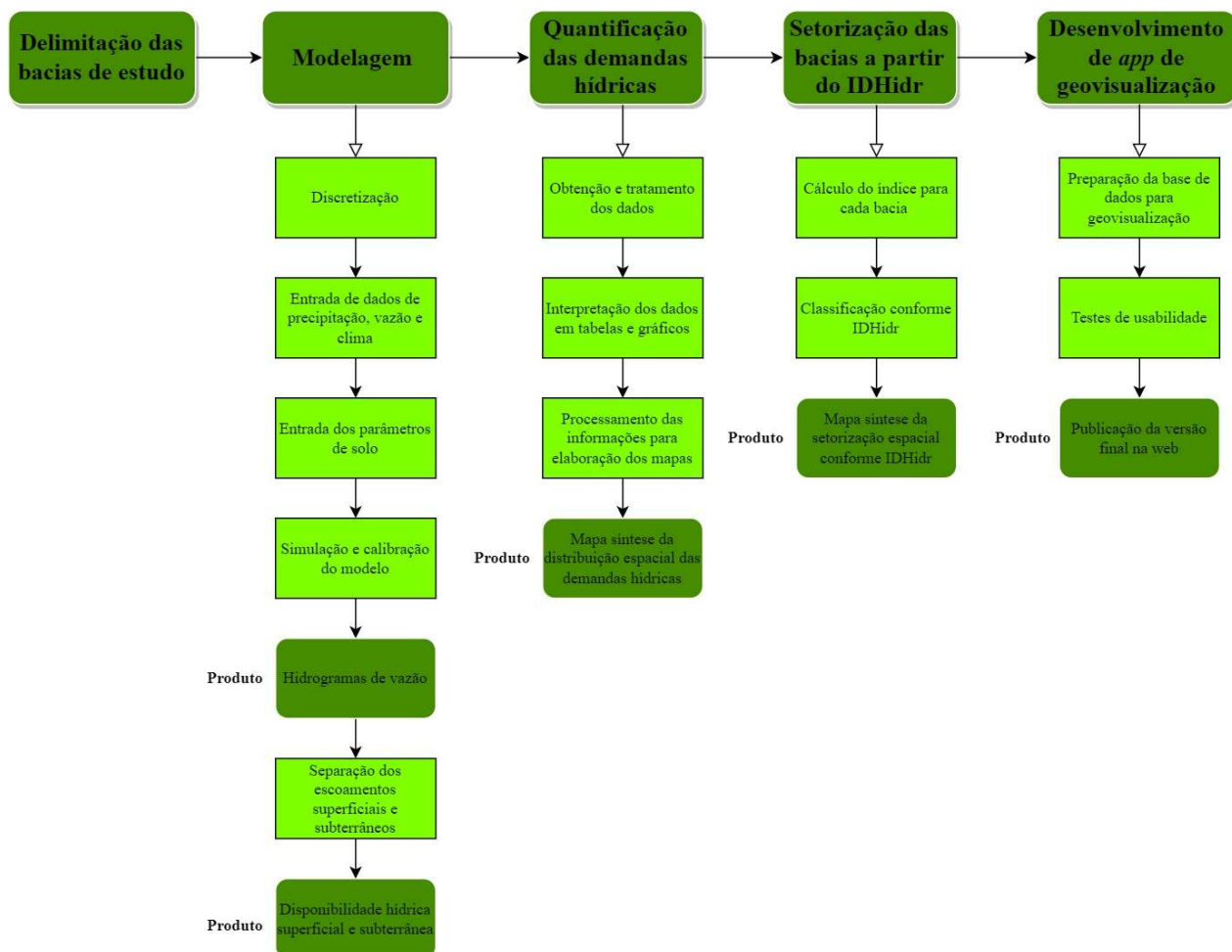
Na Mina Casa de Pedra, em Congonhas, a operação do sistema de rebaixamento nível teve início em 1990, quando o piso da mina atingiu a cota 1165 m, interceptando o nível d'água da Formação Cauê. No mesmo ano foram perfurados os primeiros poços tubulares, PA e PB, e os primeiros piezômetros para o monitoramento do nível d'água subterrânea. Em Casa de Pedra o nível d'água já foi rebaixado mais de 190 m e o sistema de bombeamento ainda se encontra em atividade.

Outro local onde foi identificado a ocorrência de rebaixamento do nível d'água foi na Mina de Várzea do Lopes. Ferreira Xavier *et al.* (2016, p. 8) apontam que a potenciometria da região foi modificada por atividade de desaguamento e apresentava fluxo “convergingo para o interior da cava, comportamento esperado para uma área onde opera um sistema de rebaixamento do nível d'água”. Os autores comparam dados dos anos de 2007 e 2009, quando ainda não havia tido início as atividades de desaguamento, com dados de 2014, que indicam que neste meio tempo, iniciou-se o rebaixamento do nível d'água em Várzea do Lopes. Também foram identificadas atividades de rebaixamento na Mina do Pico de Itabirito, em Itabirito, a partir de 1994, com a perfuração de dois poços na cava (BERTACHINI *et al.*, 1999), assim como atividades citadas por Mourão (2007) nas minas de Córrego do Feijão e Jangada, porém sem maiores informações.

7. METODOLOGIA

A fim de atingir o objetivo geral deste trabalho de realizar avaliação da disponibilidade hídrica, considerando águas superficiais e subterrâneas de forma integrada e então a sua visualização através de métodos webGIS, diferentes atividades conceituais e práticas foram executadas. Cada etapa de trabalho foi detalha nas seções subsequentes. O fluxograma abaixo, figura 17, apresenta de forma resumida tais de atividades.

Figura 17. Fluxograma de metodologia do trabalho

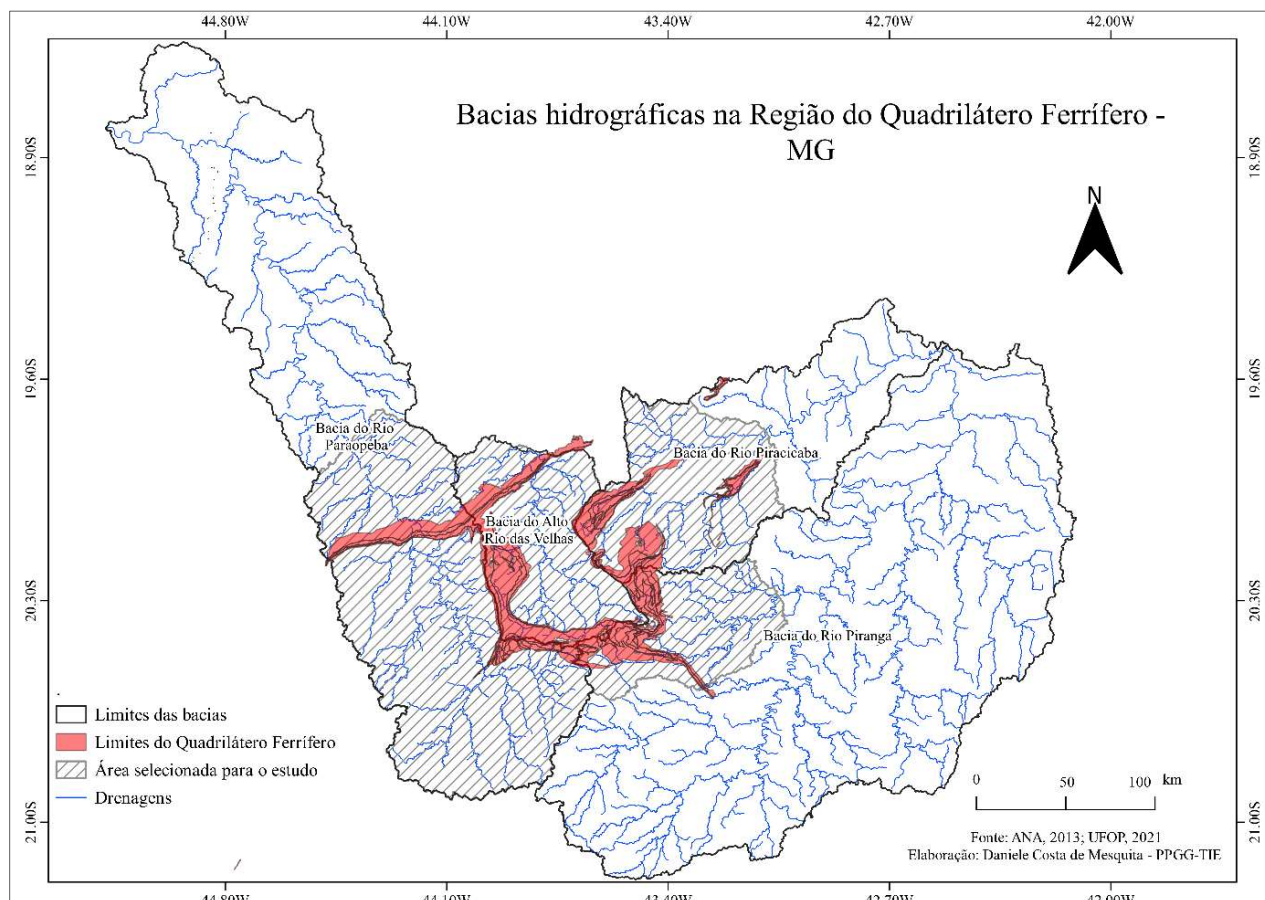


Fonte: Elaborado pela autora

7.1. DEFINIÇÃO DAS BACIAS

Estão presentes na região do Quadrilátero Ferrífero as bacias dos rios Paraopeba, das Velhas, Piranga e Piracicaba. Essas bacias, no entanto, não são abrangidas em sua totalidade. Diante disso, identificou-se, a partir da interseção do mapa de drenagens com os limites do QF, as sub-bacias de interesse para este trabalho, figura 18.

Figura 18. Bacias hidrográficas na Região do Quadrilátero Ferrífero e área selecionada para o estudo



Fonte: Elaborado pela autora

A Bacia do Alto Rio das Velhas foi considerada em sua totalidade. No entanto, para fins de análise, optou-se por utilizar as Unidades Territoriais Estratégicas (UTE) delimitadas pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. As UTEs que compõem a região do Alto rio das Velhas são: UTE Nascentes, SCBH Rio Itabirito, UTE Águas do Gandarela, SCBH Água da Moeda, SCBH Ribeirão Caeté/Sabará, SCBH Ribeirão Arrudas e SCBH Ribeirão Onça.

Na Bacia do Paraopeba trabalhou-se com as sub-bacias do alto Paraopeba e parte do médio Paraopeba. Compõem o alto Paraopeba: Córrego Vargem Grande, Rio Maranhão, Rio Pequeri, Ribeirão do Esmeril, Ribeirão da Barra, Ribeirão Contendas, Ribeirão dos Marinheiros, pela margem direita; e Córrego Poço D'anta, Rio da Prata, Córrego Bejaúba, Rio Brumado – Camapuã, Ribeirão dos Paivas ou Pedras, Ribeirão dos Cordeiros, Ribeirão da Mutuca, Rio Macaúbas, pela margem esquerda. Já o médio Paraopeba é composto por: Ribeirão Águas Claras, Rio Manso, Ribeirão Mateus Leme, Ribeirão Serra Azul, Ribeirão das Lajes, Ribeirão da Piedade, Ribeirão Casa Branca, Ribeirão Sarzedo, Rio Betim, Ribeirão Grande.

Na Bacia do Rio Piracicaba, a área selecionada abrange, pela margem esquerda, a sub-bacia do Ribeirão do Turvo, sub-bacia do Rio Maquiné e sub-bacia do Ribeirão Gomes de Melo, e pela margem direita, a sub-bacia do Rio Santa Bárbara, cujos principais afluentes são os rios Conceição e Una. Enquanto na bacia do Rio Piranga, a área modelada refere-se a sub bacia do rio do Carmo (2.277,95 km²), cujos principais afluentes são o rio Gualaxo do Norte e o rio Gualaxo do Sul.

Após a definição da área de trabalho e delimitação das sub-bacias, deu-se início ao processo de modelagem, cuja metodologia é apresentada na seção seguinte.

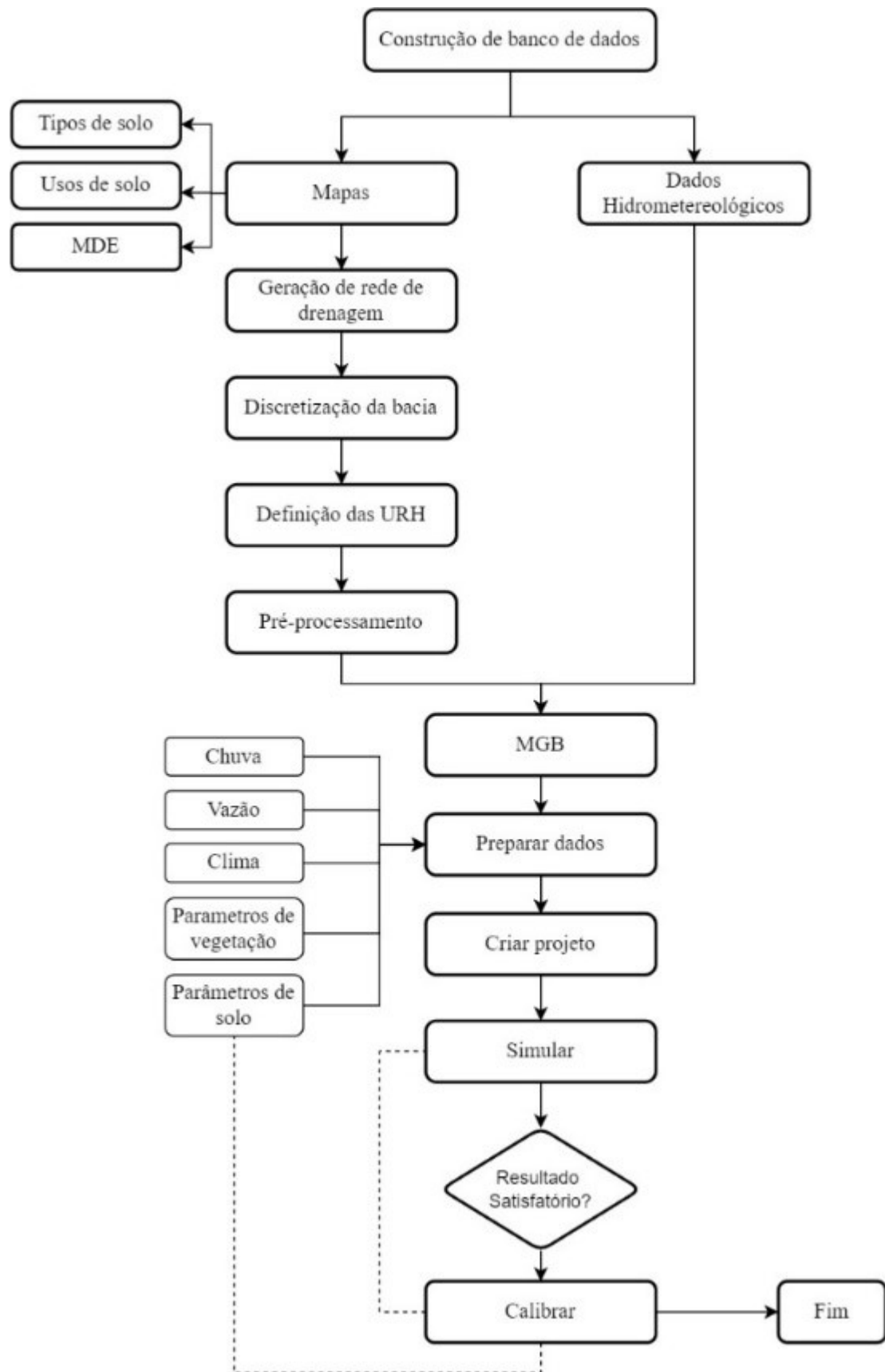
7.2.MODELAGEM

O estudo foi realizado utilizando-se o modelo descrito no capítulo 5: MGB - Modelo de Grandes Bacias para determinação da vazão de base das drenagens e da vazão de recarga dos aquíferos. O uso do MGB segue uma sequência aproximada de sete passos, sendo:

- i) Construção do banco de dados;
- ii) Geração das minibacias;
- iii) Geração das URHs;
- iv) Preparação de dados de precipitação, vazão e clima;
- v) Entrada dos Parâmetros de vegetação e de solo;
- vi) Simulação;
- vii) Calibração.

Os três primeiros passos são também chamados de etapa de pré-processamento. Os três seguintes são a etapa de preparação do modelo em si. Um fluxograma de atividades de modelagem, conforme Alves *et al.* (2020), pode ser observado na figura 19.

Figura 19. Fluxograma de aplicação do modelo MGB



Fonte: Alves *et al.* (2020)

7.2.1. Etapa de pré-processamento

O processo de modelagem tem início pela construção do banco de dados. Neste trabalho foram utilizados dados de diversas fontes, conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Descrição de dados utilizados e suas respectivas fontes

Dado	Fonte	Disponível em:
Limites municipais	IDE-SISEMA - Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis
Limites da Bacia do Paraopeba	IDE Brumadinho	http://ide.projetoalumadinho.ufmg.br/
Limites das Bacias do Piranga e Piracicaba	Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA	https://dadosabertos.ana.gov.br/
Limites da Bacia do Rio das Velhas	VelhasMAP - Siga Rio das Velhas	https://siga.cbhvelhas.org.br/siga-riodasvelhas/map
Subdivisão da Bacia do Rio Das Velhas	VelhasMAP - Siga Rio das Velhas	https://siga.cbhvelhas.org.br/siga-riodasvelhas/map
Subdivisão da Bacia do Rio Paraopeba	Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba	https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/images/Resumo_Executivo.pdf
Hidrografia ottocodificada	IDE-SISEMA - Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos	https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis
Modelo digital de elevação	Brasil em Relevo - Embrapa	https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/index.htm
Cobertura e uso da terra	Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra 2020 - IBGE	https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto
Mapa de solos	Universidade Federal de Viçosa, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais e Fundação Estadual do Meio Ambiente	https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis
Séries históricas de precipitação e vazão	Portal HidroWeb	https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas
Normais climatológicas	Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET)	IPH HydroTools
Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul	Fan <i>et al.</i> 2015	https://www.ufrgs.br/lsh/products/remote-sensing/simplified-hydrological-response-units-map-for-south-america/

Fonte: Elaborado pela autora

Segue-se então a discretização, ou seja, a delimitação das minibacias. Neste trabalho optou-se por utilizar o IPH-Hydro Tools, um pacote de ferramentas que funciona como um *plug-in* do software livre Quantum GIS. Tal escolha se baseia no bom desempenho apresentado por esta ferramenta na delimitação de bacias (SIQUEIRA *et al.* 2016) e sua compatibilidade com o QGIS.

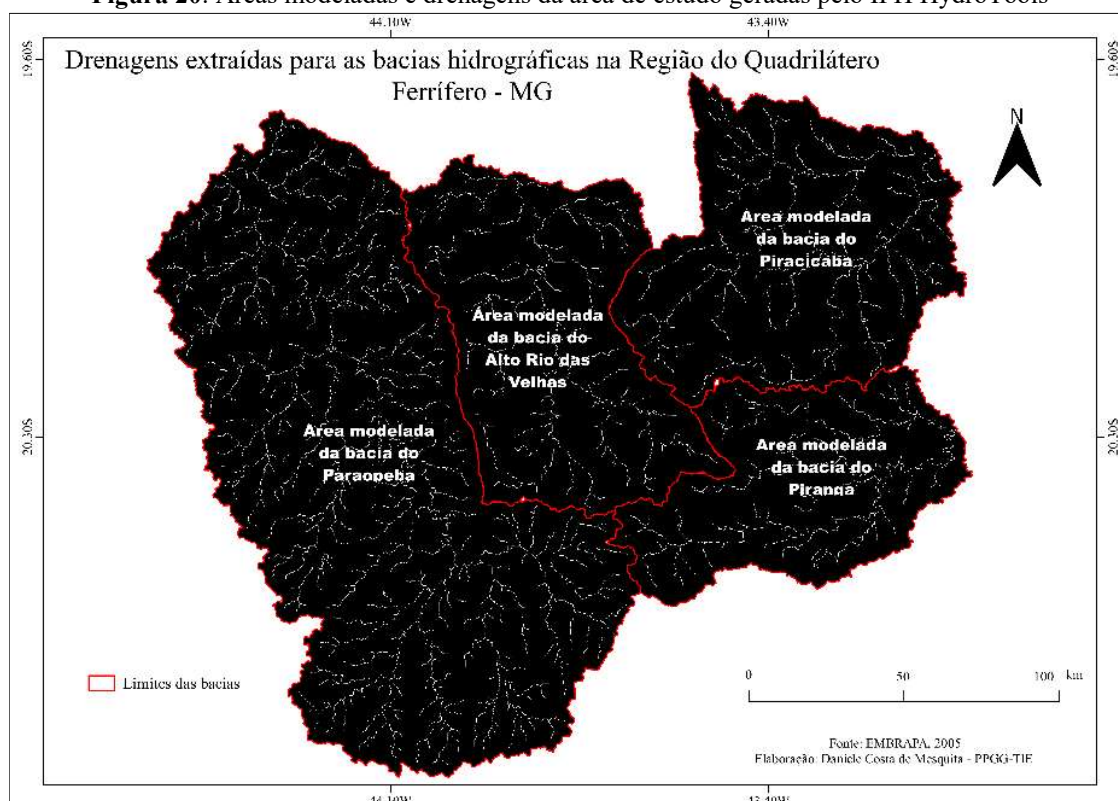
O IPH Hydro Tools realiza a delimitação das minibacias a partir do geoprocessamento de um modelo digital de elevação (MDE). O processo de delimitação envolve vários passos. O primeiro deles é eliminar depressões topográficas que ainda possam existir, dadas por uma área de uma ou mais células contíguas com elevação menor que as células vizinhas, resultando em áreas sem definição de saída, denominadas depressões espúrias. Este processo é necessário para evitar erros na definição do escoamento superficial.

Na sequência, são calculadas, para cada célula do MDE, as direções de escoamento, criando-se um arquivo de direções de fluxo. Em seguida é realizada a estimativa de área de drenagem acumulada, que será utilizada para definir a rede de drenagem. E por fim, é estabelecido um valor limite de área de drenagem para existência de um curso d'água, realizando-se assim a extração da rede de drenagens. Para as bacias do QF, considerou-se o valor mínimo de 10.000 m.

Em seguida, foi realizada a delimitação da bacia do modelo, baseando-se em um ponto de exutório. Adotou-se como critério para demarcação do exutório o limite previamente delimitado na interseção dos limites do QF e as drenagens das bacias de interesse, gerando as áreas a serem modeladas conforme figura 20.

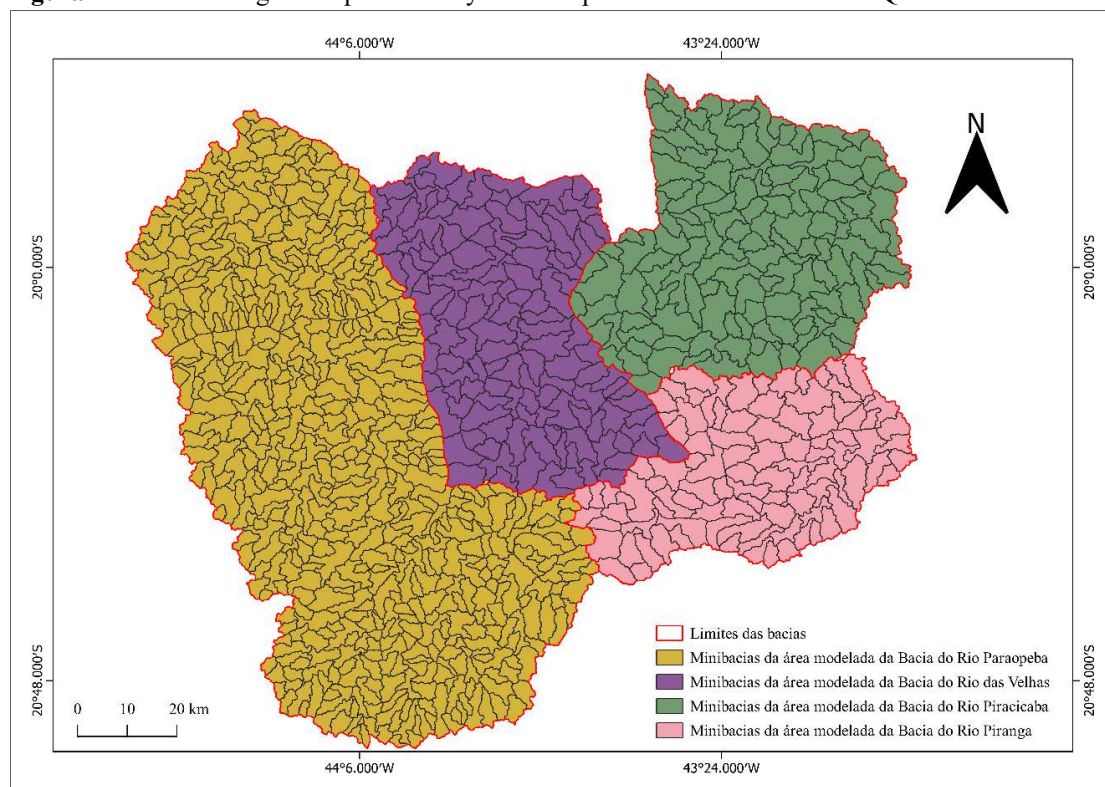
A seguir, definiu-se a rede de drenagem principal e a segmentação da rede de drenagem em trechos, que resultam, por fim, na definição da bacia imediata de contribuição a cada um dos trechos, as chamadas minibacias do modelo. Foram definidas, ao todo, 889 minibacias, sendo 537 na Bacia do Paraopeba, 128 na Bacia do Alto Rio das Velhas, 129 na Bacia do Piracicaba e 95 na Bacia do Piranga, figura 21.

Figura 20. Áreas modeladas e drenagens da área de estudo geradas pelo IPH HydroTools



Fonte: elaborado pela autora

Figura 21. Minibacias geradas pelo IPH HydroTools para as áreas modeladas do Quadrilátero Ferrífero.

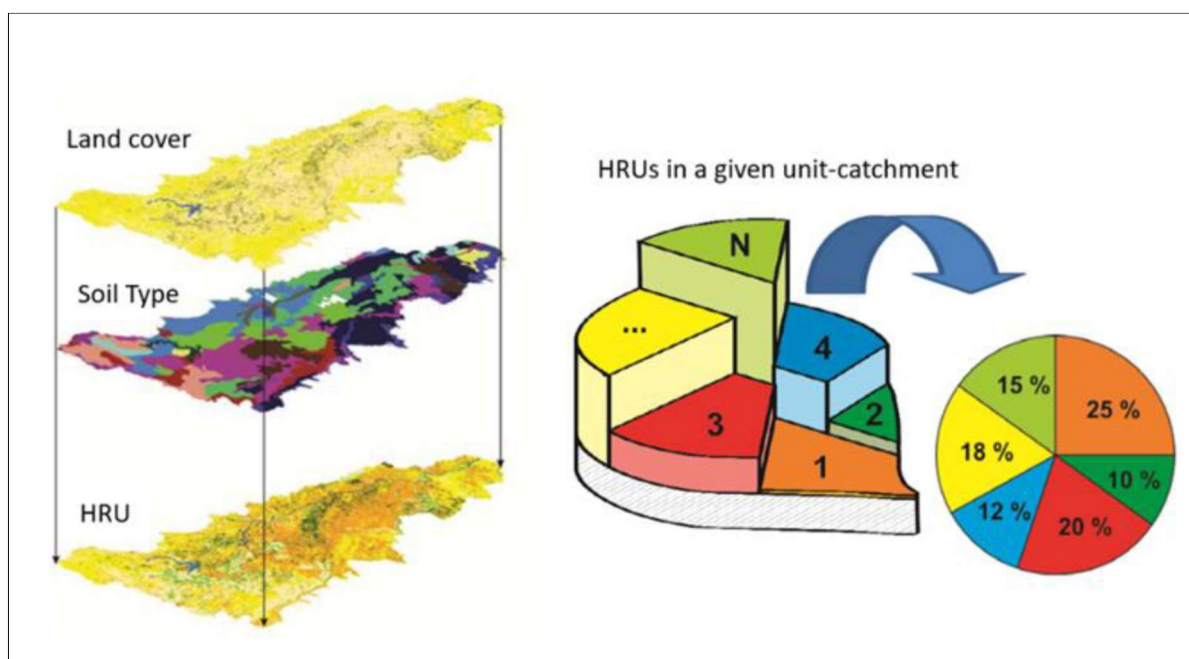


Fonte: Elaborado pela autora.

A partir interseção dos mapas de solo e de uso e cobertura vegetal são obtidas as unidades de resposta hidrológica (URHs) para as áreas de interesse, figura 22. No QF, foi realizada a análise destes mapas, bem como a interseção dos mesmos e avaliou-se que, o mapa de URHs da América do Sul (FAN *et al.*, 2015) atendia as necessidades de modelagem. Neste mapa, as classes de solo são agrupadas de acordo com seu potencial de escoamento, da seguinte forma:

- Baixo potencial, ou solos profundos: latossolos, nitossolos, chernossolos, plintossolos, vertissolos, organossolos e argissolos;
- Alto potencial, ou solos rasos: neossolos, litossolos, luvisolos, cambissolos;
- Solos saturados e de várzea: gleissolos, fluvisolos, planossolos e espodossolos;
- Áreas semi-impermeáveis: afloramentos rochosos;
- Água.

Figura 22. Processo de definição de Classes de Resposta Hidrológica pela combinação de mapas, e a interseção das CRH com a minibacia, gerando as Unidades de Resposta Hidrológica.



Fonte: Collischonn *et al.* (2020)

De modo semelhante, as classes de uso e cobertura da terra também são agrupadas por semelhança hidrológica, também em cinco classes, a saber:

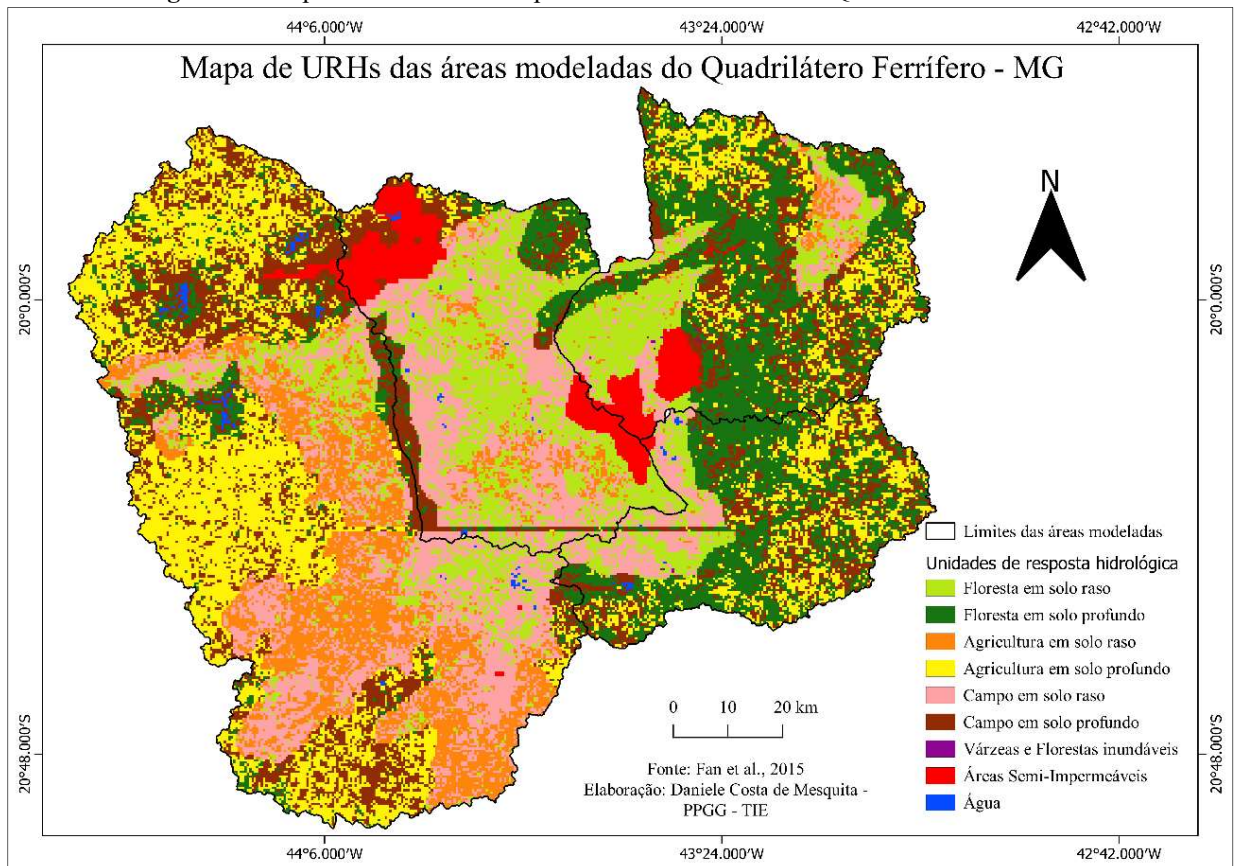
- Agricultura: compreende a agricultura intensiva e demais coberturas com características semelhantes, incluindo pastagens;
- Áreas artificiais (e.g. áreas urbanas) são locais com capacidade elevada para geração de escoamento superficial;

- Campos: As formações arbustivas, estepes e todos os tipos de cerrado e campo, bem como as suas subclasses;
- Floresta: Todas as classes de florestas;
- Florestas inundáveis ou várzeas: Florestas hidrófilas, manguezais, igapós e várzeas

Assim, tem-se o mapa de respostas hidrológicas, com nove classes: 1) Agricultura em solo profundo; 2) Agricultura em solo raso; 3) Campo em solo profundo; 4) Campo em solo raso; 5) Floresta em solo profundo; 6) Floresta em solo raso; 7) Várzea e florestas inundáveis; 8) Água; e 9) Áreas semi-impermeáveis (FAN *et al.*, 2015, p. 6).

A figura 23 apresenta as unidades de resposta hidrológica para o QF. Com isto, finalizou-se o processo de discretização.

Figura 23. Mapa de URHs extraído para as áreas modeladas do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Elaborado pela autora

7.2.2. Dados e parâmetros de simulação

Após a conclusão da discretização das unidades de resposta hidrológica para a área de estudo, a etapa seguinte da modelagem refere-se a entrada no modelo dos dados de precipitação, vazão e clima, obtidos na construção do banco de dados. O período de simulação escolhido para o QF foi de 01/01/1994 a 31/12/2014. Este intervalo de tempo foi escolhido baseado na disponibilidade e consistência dos dados a serem utilizados. Assim, para a área em estudo, foram selecionadas as estações pluviométricas que possuíam séries históricas com pelo menos 95% dos dados para este período, totalizando 35 estações pluviométricas e 17 estações fluviométricas para a área de interesse, tabela 5. Em análise posterior, das 17 estações fluviométricas, 9 foram selecionadas para a modelagem, levando-se em consideração o tamanho de sua área de drenagem e a possível interferência antrópica nos seus valores de descarga.

Tabela 4 - Estações pluviométricas selecionadas para o estudo

Código da Estação	Nome	Município	Bacia
1943006	Sabará	Sabará	Alto Rio das Velhas
1943010	Caete	Caete	Alto Rio das Velhas
1943022	Caixa de Areia	Belo Horizonte	Alto Rio das Velhas
1943055	Belo Horizonte (Horto)	Belo Horizonte	Alto Rio das Velhas
2043002	Lagoa Grande (MMV)	Nova Lima	Alto Rio das Velhas
2043004	Rio do Peixe (MMV)	Nova Lima	Alto Rio das Velhas
2043042	Represa das Codornas	Nova Lima	Alto Rio das Velhas
2043043	Represa do Miguelão (MMV)	Nova Lima	Alto Rio das Velhas
2043056	Fazenda Água Limpa Jusante	Ouro Preto	Alto Rio das Velhas
2043060	Itabirito Linigrafo	Itabirito	Alto Rio das Velhas
1944004	Ponte Nova do Paraopeba	Betim	Rio Paraopeba
1944026	Barro Preto	Mateus Leme	Rio Paraopeba
1944027	Juatuba	Mateus Leme	Rio Paraopeba
1944055	Betim - COPASA	Betim	Rio Paraopeba
1944062	Fazenda Santa Rita	Mateus Leme	Rio Paraopeba
2043005	Conselheiro Lafaiete	Conselheiro Lafaiete	Rio Paraopeba
2043013	Congonhas - Linigrafo	Congonhas	Rio Paraopeba
2044008	Melo Franco	Brumadinho	Rio Paraopeba
2044016	Fazenda Benedito Chaves	Itatiaiuçu	Rio Paraopeba
2044019	Fazenda Vista Alegre	Mateus Leme	Rio Paraopeba
2044020	Calambau	Itauna	Rio Paraopeba
2044021	Alto da Boa Vista	Mateus Leme	Rio Paraopeba
2044024	Fazenda Curralinho	Mateus Leme	Rio Paraopeba
2044026	Fazenda Coqueiros	Itauna	Rio Paraopeba

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 5 - Estações pluviométricas selecionadas para o estudo

Código da Estação	Nome	Município	Bacia
2044041	Fazenda Laranjeiras - Jusante	Itauna	Rio Paraopeba
2044043	Estiva	Mateus Leme	Rio Paraopeba
2044052	Jardim	Mateus Leme	Rio Paraopeba
2044053	Escola de Veterinária	Mateus Leme	Rio Paraopeba
2044054	Serra Azul	Mateus Leme	Rio Paraopeba
1943001	Rio Piracicaba	Rio Piracicaba	Rio Piracicaba
1943007	Santa Barbara	Santa Barbara	Rio Piracicaba
1943027	Usina Peti	São Gonçalo do Rio Abaixo	Rio Piracicaba
2043059	Colégio Caraça	Santa Barbara	Rio Piracicaba
2043011	Fazenda Paraíso	Mariana	Rio Piranga
2043009	Acaiaca - Jusante	Acaiaca	Rio Piranga

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 6 - Estações fluviométricas selecionadas para o estudo

Código da Estação	Nome	Drenagem	Bacia	Área de drenagem (km²)
41199998	Honório Bicalho Montante	Rio das Velhas	Alto Rio das Velhas	1550
41180000	Itabirito Linígrafo	Rio Itabirito	Alto Rio das Velhas	302
41151000	Fazenda Água Limpa Jusante	Rio das Velhas	Alto Rio das Velhas	173
40740000	Alberto Flores	Rio Paraopeba	Rio Paraopeba	4120
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	Rio Paraopeba	Rio Paraopeba	5680
40579995	Congonhas Linígrafo	Rio Maranhão	Rio Paraopeba	569
40810350	Fazenda Laranjeiras	Córrego Mato Frio	Rio Paraopeba	10.2
40811100	Jardim	Ribeirão Serra Azul	Rio Paraopeba	113
40821900	Bom Jardim Montante	Ribeirão Mateus Leme	Rio Paraopeba	32.5
40822995	Mateus Leme Aldeia	Ribeirão Mateus Leme	Rio Paraopeba	113
40823500	Suzana	Ribeirão Mateus Leme	Rio Paraopeba	154
40710000	Belo Vale	Rio Paraopeba	Rio Paraopeba	2770
40549998	São Bras do Suaçui Montante	Rio Paraopeba	Rio Paraopeba	462
56610000	Rio Piracicaba	Rio Piracicaba	Rio Piracicaba	1163
56640000	Carrapato (Brumal)	Ribeirão Santa Barbara	Rio Piracicaba	420
56335001	Acaiaca Jusante	Rio do Carmo	Rio Piranga	1371
56240000	Fazenda Paraíso	Rio Gualaxo do Sul	Rio Piranga	857

Fonte: Elaborado pela autora

Os dados climáticos foram obtidos através do próprio MGB-IPH baixa as normais climatológicas diretamente do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os postos selecionados são apresentados na tabela 6. Buscou-se utilizar ao menos duas estações climáticas por bacia e, por isso, utilizou-se a estação Viçosa para a bacia do rio Piranga, visto que não havia estação localizada dentro de seus limites.

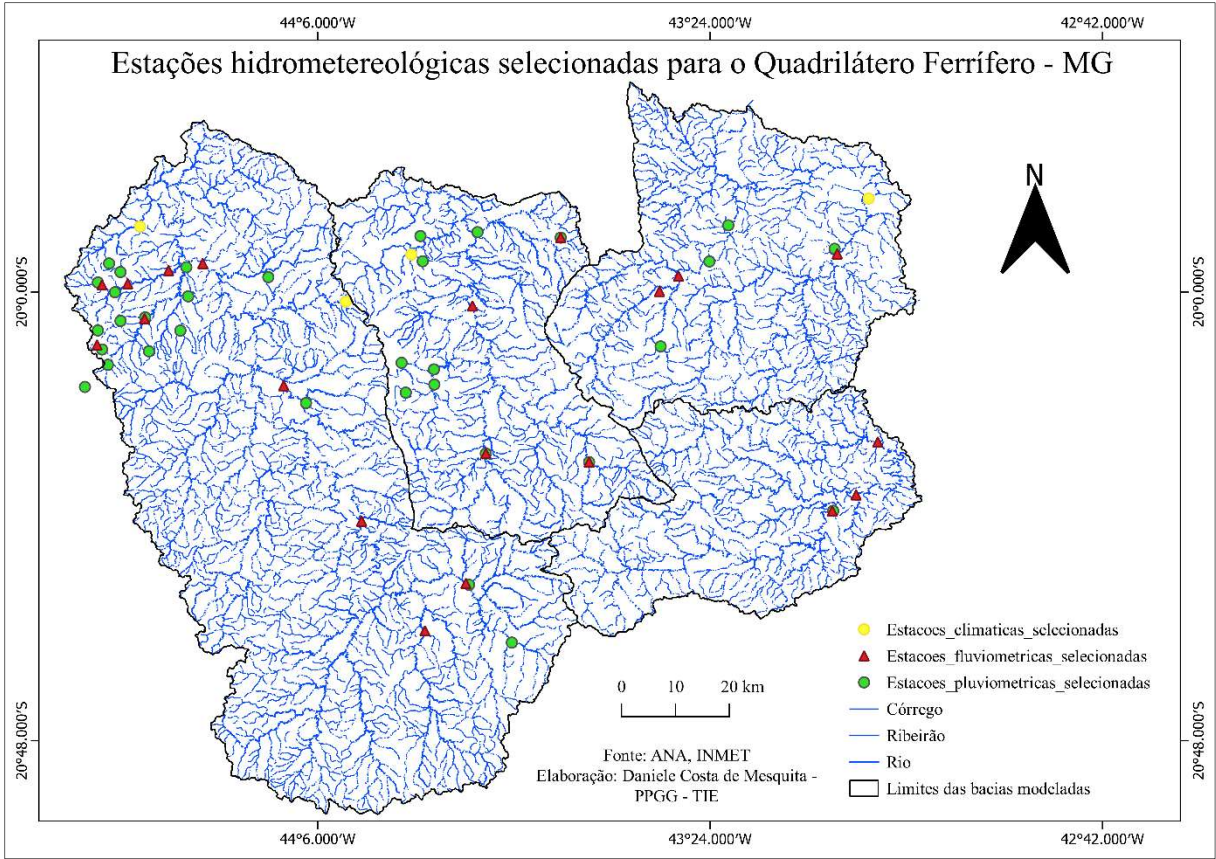
Tabela 7 – Estações climáticas selecionadas para o estudo

Código da estação climática	Nome
83581	Florestal
83587	Belo Horizonte
83591	João Monlevade
83632	Ibirité
83642	Viçosa

Fonte: elaborado pela autora

Os dados de precipitação, vazão e clima são interpolados para a área de estudo, algo que foi realizado pelo próprio MGB. O software utiliza o método do vizinho mais próximo para realizar esta ação. A localização das estações hidrometereológicas selecionadas para o estudo é apresentada na figura 24.

Figura 24. Estações hidrometereológicas selecionadas para a área em estudo



Fonte: Elaborado pela autora

A próxima etapa realizada foi a entrada dos parâmetros de vegetação. Tais parâmetros não são alterados durante o processo de calibração, sendo considerados, portanto, fixos. Os parâmetros de vegetação definidos são: albedo (α), índice de área foliar (IAF), altura da vegetação (h) e resistência superficial (r_s) em boas condições de umidade do solo. Os valores utilizados neste trabalho, tabela 7, basearam-se nas características da bacia e os estudos de Bayer e Collischonn (2013), que realizaram uma ampla revisão destes parâmetros.

Tabela 8. Valores adotados para os parâmetros de vegetação

URH	Albedo (α)	IAF	Altura (h)	r_s
Floresta em solo raso	0,11	6,0	10	100
Floresta em solo profundo	0,16	9,0	20	150
Agricultura em solo raso	0,15	1,0	0,50	40
Agricultura em solo profundo	0,26	4,0	2,0	150
Campo em solo raso	0,13 - 0,18	1,0 - 0,4	5,0	40
Campo em solo profundo	0,13 - 0,18	1,0 - 0,4	10,0	80
Várzeas e Florestas inundáveis	0,10	2,0	0,50	10
Áreas semi-impermeáveis	0,15	1,0	0,5	0
Água	0,08	1,0	0,1	0

Fonte: elaborado pela autora

Por fim, definem-se os parâmetros iniciais de solo, que serão posteriormente calibrados. Estes parâmetros referem-se a: armazenamento máximo de água na camada de solo (W_m); relação entre saturação e armazenamento do modelo utilizado para balanço de água no solo (b); escoamentos subsuperficial (K_{int}) e subterrâneo (K_{bas}); índice de porosidade do solo (XL); fluxo ascendente do aquífero (CAP); balanço de água no solo (W_c) e parâmetros relacionados ao tempo de propagação dos escoamentos superficial (CS), subsuperficial (CI) e subterrâneo (CB) nas minibacias.

Após as etapas de entrada de dados, segue-se para a simulação e calibração do modelo, ajustando-se os parâmetros de entrada de solo até que se obtenha um bom ajuste entre as vazões observadas e simuladas.

7.2.3. Calibração

A calibração foi feita modificando-se manualmente os parâmetros de solo para cada uma das sub-bacias do modelo até que se obtivesse um bom ajuste entre as vazões observadas e simuladas. A avaliação da performance do modelo é dada pelos coeficientes estatísticos Nash-Sutcliffe (NASH) e sua forma logaritmica (NASH-log) (NASH e SUTCLIFFE, 1970) e pelo

valor de *Bias* (ou viés) obtido entre valores observados e simulados (MORIASI *et al.*, 2007). A tabela 8 apresenta os intervalos e suas classificações.

Tabela 9. Valores de referência dos coeficientes estatísticos NASH, NASH-Log e *Bias*

Classificação	NASH e NASH-log	BIAS (%)
Muito bom	$0,75 < \text{NASH e NASH-log} \leq 1,00$	$\text{BIAS} \leq \pm 10$
Bom	$0,65 < \text{NASH e NASH-log} \leq 0,75$	$\pm 10 \leq \text{BIAS} \leq \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < \text{NASH e NASH-log} \leq 0,65$	$\pm 15 \leq \text{BIAS} \leq \pm 25$
Insatisfatório	$\text{NASH e NASH-log} \leq 0,50$	$\text{BIAS} \geq \pm 25$

Fonte: MORIASI *et al.* 2007

As métricas de Nash, Nash-log e *Bias* são formas de quantificar a concordância entre a série simulada e observada. O Nash reflete os picos de vazão do hidrograma, enquanto o Nash-log reflete os períodos de recessão. O Bias, por sua vez, é dado por $[(Q_{\text{sim}} - Q_{\text{obs}}) / Q_{\text{obs}}] * 100$ refletindo assim a diferença de volume entre as vazões calculadas e simuladas. Quanto mais próximo de 1, melhores os valores de Nash e de Nash-log. Quanto mais próximo de zero, menor o viés entre a série simulada e observada e, portanto, melhor a qualidade do valor do parâmetro *BIAS*.

Além da avaliação a partir dos coeficientes estatísticos, também se compararam as curvas de permanência observadas e simuladas, geradas pelo software MGB-IPG. A curva de permanência relaciona a vazão e a porcentagem do tempo, e pode ser definida como a relação entre a magnitude e a frequência das vazões para uma dada bacia, caracterizando uma estimativa da porcentagem de tempo que uma dada vazão é superada ou igualada num período histórico da sua construção.

Por fim, compararam-se os resultados das vazões médias de longa duração (Q_{mld}) e as vazões mínimas $Q_{7,10}$ obtidos nas estações fluviométricas do modelo (valores simulados) com resultados calculados (valores observados) para essas mesmas estações. Para o cálculo das vazões observadas utilizou-se o *software* SisCAH 1.0 - Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SOUSA *et al.*, 2009), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) da Universidade Federal de Viçosa.

A simulação utilizando o MGB resulta nos hidrogramas e no balanço hídrico das minibacias, de onde se podem extrair as vazões de escoamento superficial e de escoamento subterrâneo, a precipitação e a evapotranspiração na área das bacias, necessários para o cálculo disponibilidade hídrica.

7.2.4. Cálculo da disponibilidade hídrica

Para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial utilizou-se a vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q7, 10$), vazão de referência utilizada pelo IGAM para concessão de outorgas de direito de uso de recursos hídricos para a área em estudo. O limite máximo outorgável para captação para as bacias do Rio Paraopeba e Rio das Velhas é de 30% da $Q7,10$, enquanto nas demais bacias este limite é de 50% da $Q7,10$ (IGAM, 2020). Em outras palavras, o limite máximo outorgável corresponde a 30 ou 50% da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos.

A análise foi realizada utilizando-se como referência espacial as otobacias da base hidrográfica otocodificada nível 4 para a bacia do Rio Piracicaba, nível 5 para as bacias do Rio Piranga e do Rio Paraopeba, visto que não existe para estas bacias sub-unidades de análise. Já a bacia do Rio das Velhas é subdividida em UTEs, que foram a base da análise. Assim, para cada unidade de análise, definiu-se qual minibacia representaria seu exutório, utilizando-se dos dados da minibacia para o cálculo da $Q7,10$. Deste modo, a partir das vazões simuladas diárias resultantes da modelagem, os valores da $Q7,10$ foram estimados, utilizando-se o método probabilístico de Gumbel, por ser este um dos métodos mais comuns e utilizados neste tipo de estimativa.

Por sua vez, a disponibilidade hídrica subterrânea não possui um valor determinado para captação. De forma geral, considera-se que não se deve exceder a taxa média anual de recarga, e a boa prática dita algo entre 25 e 50% das reservas reguladoras. O Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do São Francisco 2016-2025 (2015) prevê uma exploração de 20% da reserva renovável.

Já a disponibilidade hídrica subterrânea da Bacia do Rio Doce, da qual fazem parte a as bacias dos rios Piracicaba e Piranga tem o valor de exploração considerado de 30% da reserva reguladora (PIRH DOCE, 2010).

Para a estimativa da reserva explotável nas unidades de análise foram realizados os cálculos baseados no fluxo de base e no balanço hídrico local a partir das 9 estações fluviométricas selecionadas. Considerou-se que a reserva reguladora, ou renovável, corresponde à recarga anual do aquífero, que, em teoria, é o mesmo que o escoamento de base dos rios (Feitosa *et al.*, 2008, p. 661). Assim, calculou-se o valor dessas reservas para depois aplicar sobre o resultado obtido o percentual de referência.

Deste modo, primeiramente foram analisadas as curvas de recessão dos hidrogramas, que se referem ao período do ciclo hidrológico anual em que a contribuição do escoamento superficial direto é mínima, ou seja, em que a vazão do rio é alimentada pelo escoamento de base. Conforme definido por Mourão (2007), este período ocorre entre abril e setembro na região do QF.

Os métodos para a separação das vazões a partir de um hidrograma podem ser do tipo gráfico ou pela aplicação de filtros. Os métodos gráficos, no entanto, tendem a ser mais subjetivos e variar conforme o entendimento do hidrólogo. Para eventos complexos, com muitos picos e recessões, como é o caso nas estações fluviométricas do estudo, os filtros digitais são mais práticos e apropriados. Assim, por sua maior objetividade e facilidade de aplicação, para realizar a separação dos hidrogramas, optou-se por utilizar a aplicação Filtro de Eckhardt (Eckhardt, 2005). O filtro digital de Eckhardt separa os hidrogramas de vazão total (y_i) em dois sinais, um de alta frequência, correspondente ao escoamento rápido ou superficial (f_i), e um de baixa frequência, a vazão de base (b_i), num tempo i , de modo que:

$$y_i = f_i + b_i \quad (1)$$

De acordo com Eckhardt (2005), durante a estiagem a vazão de base (b_i) vai decrescer de forma exponencial devido a depleção do aquífero. Assim, em qualquer tempo i , a vazão deve ser menor ou igual a vazão total observada no mesmo tempo, assim:

$$b_i = a \cdot b_{i-1} + b \cdot y_i \quad (2)$$

Sendo “a” o coeficiente de depleção calculado a partir da análise do período de recessão do hidrograma, utilizando o intervalo de tempo Δt e a vazão observada nesse intervalo, segundo a equação:

$$a = e^{-\Delta t/k} \quad (3)$$

Em que, k é uma constante estimada a partir dos dados observados de vazão (Q) observados num dado intervalo de tempo (Δt) pela equação:

$$k = -\Delta t / \ln(Q_{(t+\Delta t)} / Q_{(t)}) \quad (4)$$

E “b” o máximo percentual de escoamento de base em relação a vazão máxima em um longo período de tempo, também chamado $BFI_{\max}$. O $BFI_{\max}$ foi determinado segundo Collischonn e Fan (2012), a partir da equação:

$$BFI_{\max} = 0,8344 \cdot Q_{90} / Q_{50} + 0,2146 \quad (5)$$

Com isso, a equação final do filtro de Eckhardt é a seguinte:

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}).a.b_{i-1} + (1-a).BFI_{max}.y_i}{1-a.BFI_{max}} \quad (6)$$

Obteve-se assim o valor médio do escoamento de base, que foi então utilizado para estimar as reservas exploráveis das bacias referentes as estações fluviométricas utilizadas, conforme Novais *et al.* (2018). Converteu-se o escoamento de base em descarga subterrânea média anual (Q_m), representativa do volume de contribuição anual do aquífero à rede de drenagem. Seguiu-se então o cálculo da descarga específica (Q_{esp}) de cada estação fluviométrica, correspondente à relação entre o Q_m e a área de drenagem de sua respectiva bacia para assim estimar os deflúvios subterrâneos nas unidades de análise. O deflúvio específico se dá por:

$$Q_{esp} = \frac{Q_m}{A} \cdot 3,17 \times 10^{-5} \quad (7)$$

Em que Q_{esp} é expresso em (L/s.km²). Assim, a partir de do Q_{esp} estimaram-se as reservas renováveis de acordo com a equação:

$$R_r = Q_{esp} \times A \times 31536 \quad (8)$$

Onde R_r se refere as reservas renováveis em m³/ano. Essa estimativa não considera a contribuição individual de cada aquífero, mas o total da contribuição proveniente de águas subterrâneas (NOVAIS *et al.*, 2018). Com isso, foram estimadas as reservas renováveis, em que se aplicou as proporções definidas nos PDRH das bacias às quais as unidades de análise fazem parte, obtendo-se assim as estimativas de reserva explorável, cujo valor foi somado ao da disponibilidade hídrica superficial para a estimativa da disponibilidade conjunta dos meios superficiais e subterrâneos. Os resultados foram utilizados para cálculo de classificação conforme o índice escolhido para este trabalho.

7.3. QUANTIFICAÇÃO DAS DEMANDAS HÍDRICAS

A terceira atividade busca atender o objetivo de quantificar as demandas hídricas nas bacias delimitadas. De acordo com a ANA (2019), a demanda de água corresponde à estimativa da vazão de retirada, ou seja, à água captada no corpo hídrico, destinada a atender os diversos usos consuntivos, constituídos das captações a fio d'água, de nascentes ou a partir de poços. É considerado uso consuntivo aquele em que a água é retirada e consumida, de forma total ou parcial, e não retorna diretamente ao corpo d'água (ANA, 2019). No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos prevê o controle quantitativo dos usos da água por meio da outorga dos direitos de uso de recursos hídricos. No estado de Minas Gerais, este controle é de

responsabilidade do IGAM e os dados são disponibilizados ao público em uma plataforma digital, a partir do Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH).

Deste modo, para quantificar as demandas hídricas para a área em estudo foram utilizados os dados das outorgas obtidas no CNARH, publicadas até janeiro de 2022, válidas e localizadas dentro dos limites da área em estudo. Foram consideradas apenas aquelas cujo o tipo de outorga fosse “direito de uso”, o tipo de interferência fosse “captação”, a situação da outorga fosse “outorgado” e o status fosse “operando”. Assim, foram obtidos 2480 processos em águas superficiais e 504 em águas subterrâneas.

Os dados foram verificados e validados para eliminar duplicidades, bem como conferidos em relação a sua localização espacial. Os processos em águas superficiais possuem associados a eles um código referente ao trecho de drenagem ao qual pertencem, baseado na classificação de Otto Pfafstetter (ANA, 2006), que foi utilizado para a espacialização dos resultados. Para os processos em águas subterrâneas, foi necessário realizar uma classificação, baseada na localização do ponto em relação a bacia, associando a informação gerada à base ottocodificada. Para fins de análise considerou-se que todas os valores captados ocorrem simultaneamente ao longo da rede de drenagem.

Os dados foram então analisados em relação aos valores outorgados e finalidades de uso, bem como sua distribuição espacial. Os resultados foram utilizados para o cálculo necessário para classificação conforme o índice escolhido para uso neste trabalho.

7.4.SETORIZAÇÃO DAS BACIAS A PARTIR DO IDHDIR

A terceira atividade visa atingir o objetivo de setorizar as bacias a partir de um índice de disponibilidade hídrica, apresentando a distribuição espacial da relação disponibilidade versus demanda. O índice escolhido para esta atividade foi o IDHidr, que relaciona as retiradas totais da bacia e a disponibilidade hídrica, utilizando um valor normalizado e as classifica em relação à escassez de água em: suficiente, crítica, muito crítica e extremamente crítica, cada uma delas com um nível de prioridade de gestão, tabela 10.

Tabela 10 - Classificação e descrição do Índice de Disponibilidade Hídrica – IDHidr

Classe IDHidr	IDHidr	Classificação e descrição	Prioridade de Gestão
1	0 a 1	Suficiente. Há suficiência de água, mesmo nos períodos de estiagem, para o atendimento das diversas demandas de água. Eventuais problemas são mais decorrentes da falta de infra-estrutura e sistema de saneamento básico.	4
2	1 a 3,5	Crítica. A retirada total ainda não ultrapassa a disponibilidade hídrica, mas já surgem crises e conflitos, dado que nem toda a água da bacia está acessível nas estiagens. A tendência é o agravamento da situação ao longo do tempo. A gestão de recursos hídricos é necessária para prevenir e reverter situações que causem danos às populações ou inibam as atividades econômicas.	3
3	3,5 a 7	Muito crítica. A retirada total supera a disponibilidade hídrica. A exploração de água é elevada em relação à água disponível. O início retardado das chuvas ou a ocorrência de períodos de estiagens mais prolongadas poderá ser suficiente para provocar consideráveis prejuízos sócio-econômicos. Ação governamental é essencial visando reduzir os impactos sobre a população, as atividades econômicas e ao meio ambiente.	2
4	>7	Extremamente crítica. O consumo (1) de água ultrapassa a disponibilidade hídrica da bacia. Não há água suficiente mesmo fazendo-se o reuso da água. A região é dependente de outras fontes de água, tais como, importação de água de outras bacias e utilização da água subterrânea. A taxa de reuso da água tende a ser elevada, razão pela qual o aspecto qualitativo é de fundamental importância. A gestão de recursos hídricos é questão prioritária na região	1

Fonte: Conejo *et al.* (2009, p. 13)

Calculou-se o índice a partir da equação:

$$IDHidr = \frac{1}{x} \times \frac{Retirada\ total}{Disponibilidade\ hídrica}$$

Deste modo, cada unidade de análise foi classificada e foram elaborados os mapas de setorização das bacias do QF.

7.5. DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO DE GEOVISUALIZAÇÃO

Por fim, a quarta atividade se propõe a atender o objetivo de desenvolver um aplicativo *web* de geovisualização para apresentação dos resultados. A criação de um *webgis* para este fim pode ser feita a partir de softwares que possuam função de transformar a representação gráfica carregada no programa em *mapfiles*. O software utilizado foi Qgis 3.18.1-Zürich, que permite que um *shapefile* seja transformado em *mapfile* por uma opção de exportação para MapServer, permitindo sua incorporação ao *webgis*.

A criação do *webgis* começou pela escolha de uma plataforma. As plataformas populares incluem ArcGIS Online, Mapbox, Carto e OpenStreetMap. Para esse trabalho foi escolhido o

ArcGIS Online, uma plataforma baseada em nuvem que permite aos usuários criar, compartilhar e usar mapas, aplicativos e dados, além de fornecer ferramentas para analisar dados e criar mapas interativos. Os dados podem ser armazenados na nuvem ou em um sistema de arquivos local e os mapas podem ser compartilhados com outros usuários e acessados em qualquer dispositivo. Grande parte da funcionalidade do ArcGIS Online pode ser usada gratuitamente criando uma conta individual em seu site (www.arcgis.com).

Assim, os dados gerados durante a pesquisa foram adicionados à nuvem, o conteúdo foi organizado e o para o compartilhamento público foi criado um “aplicativo web” a partir de modelo de visualização básica disponibilizado pela plataforma.

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A calibração do modelo MGB-IPH para as bacias propostas se mostrou viável. Das estações fluviométricas selecionadas, 9 foram utilizadas como referência, tabela 11, durante a calibração para comparação de hidrógrafas e coeficientes estatísticos resultantes. Além disso, também foram comparados as curvas de permanência e os valores de vazão média de longa duração (Q_{mld}) e a vazão mínima ($Q_{7,10}$). Os resultados se mostraram adequados.

Tabela 11 - Estações de referência para calibração das áreas modeladas.

Código da Estação	Nome	Bacia	Minibacia
40549998	São Bras do Suaçui Montante	Bacia do Rio Paraopeba	511
40710000	Belo Vale	Bacia do Rio Paraopeba	523
40740000	Alberto Flores	Bacia do Rio Paraopeba	530
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	Bacia do Rio Paraopeba	535
41199998	Honório Bicalho Montante	Bacia do Alto Rio das Velhas	125
56335001	Acaiaca Jusante	Bacia do Rio Piranga	93
56337000	Fazenda Ocidente	Bacia do Rio Piranga	90
56610000	Rio Piracicaba	Bacia do Rio Piracicaba	124
56640000	Carrapato (Brumal)	Bacia do Rio Piracicaba	115

Fonte: Elaborado pela autora

Na área modelada da bacia do Rio das Velhas o valor de NASH foi de 0,527 e de NASH-Log de 0,668, classificados como “satisfatórios”, enquanto o Biais -1,457%, classificado como muito bom.

Na bacia do Rio Paraopeba, a estação Belo Vale apresentou valores satisfatórios, com NASH e NASH-Log de 0,504 e 0,548, respectivamente. Já as estações São Brás do Suaçui Montante, Alberto Flores e Ponte Nova do Paraopeba apresentaram valores de NASH menores que 0,50 (0,428, 0,477 e 0,482, respectivamente), o que poderia indicar que as vazões de pico estariam mal representadas, visto que esses valores são classificados como insatisfatórios. As vazões de base, no entanto, refletidas pelo NASH-log apresentaram valores de 0,591 na estação São Brás do Suaçui Montante, 0,511 na estação Alberto Flores e 0,554 na estação Ponte Nova do Paraopeba, classificados como satisfatórios. Todos os Biais foram menores que 10%, o que indica que os volumes simulados não divergiram muito dos observados.

Os valores de NASH obtidos na área modelada bacia do Rio Piracicaba ficaram abaixo de 0,5 também, refletindo um atraso nas vazões de pico simuladas. Os valores de NASH, no entanto, foram considerados satisfatórios.

Para a bacia do Rio Piranga, o NASH foi de 0.667, enquanto o NASH-log ficou em 0.708, valores classificados como “bons”, já o Bias foi de 0,107% na estação Acaiaca Jusante. Enquanto na estação Fazenda Ocidente o Nash ficou em 0,596 e o Nash-log em 0,587, valores satisfatórios. O Bias foi de 0,107% e -9,93%, respectivamente, ambos os valores classificados como muito bons. A tabela 12 apresenta um resumo dos valores obtidos para os coeficientes estatísticos para cada estação avaliada durante o processo de calibração. Os hidrogramas gerados são apresentados nos anexos.

Tabela 12 - Valores dos coeficientes estatísticos de NASH, NASH-log e Bias nas estações de referência

Nome da Estação	Bacia	NASH	NASH-log	Bias (%)
São Bras do Suaçui Montante	Bacia do Rio Paraopeba	0,428	0,591	2,324
Belo Vale	Bacia do Rio Paraopeba	0,504	0,548	-5,507
Alberto Flores	Bacia do Rio Paraopeba	0,477	0,511	5,359
Ponte Nova do Paraopeba	Bacia do Rio Paraopeba	0,482	0,554	-1,22
Honório Bicalho Montante	Bacia do Alto Rio das Velhas	0,527	0,668	-1,457
Acaiaca Jusante	Bacia do Rio Piranga	0,667	0,708	0,107
Fazenda Ocidente	Bacia do Rio Piranga	0,596	0,587	-9,93
Rio Piracicaba	Bacia do Rio Piracicaba	0,299	0,567	1,916
Carrapato (Brumal)	Bacia do Rio Piracicaba	0,14	0,54	10,184

Fonte: Elaborado pela autora

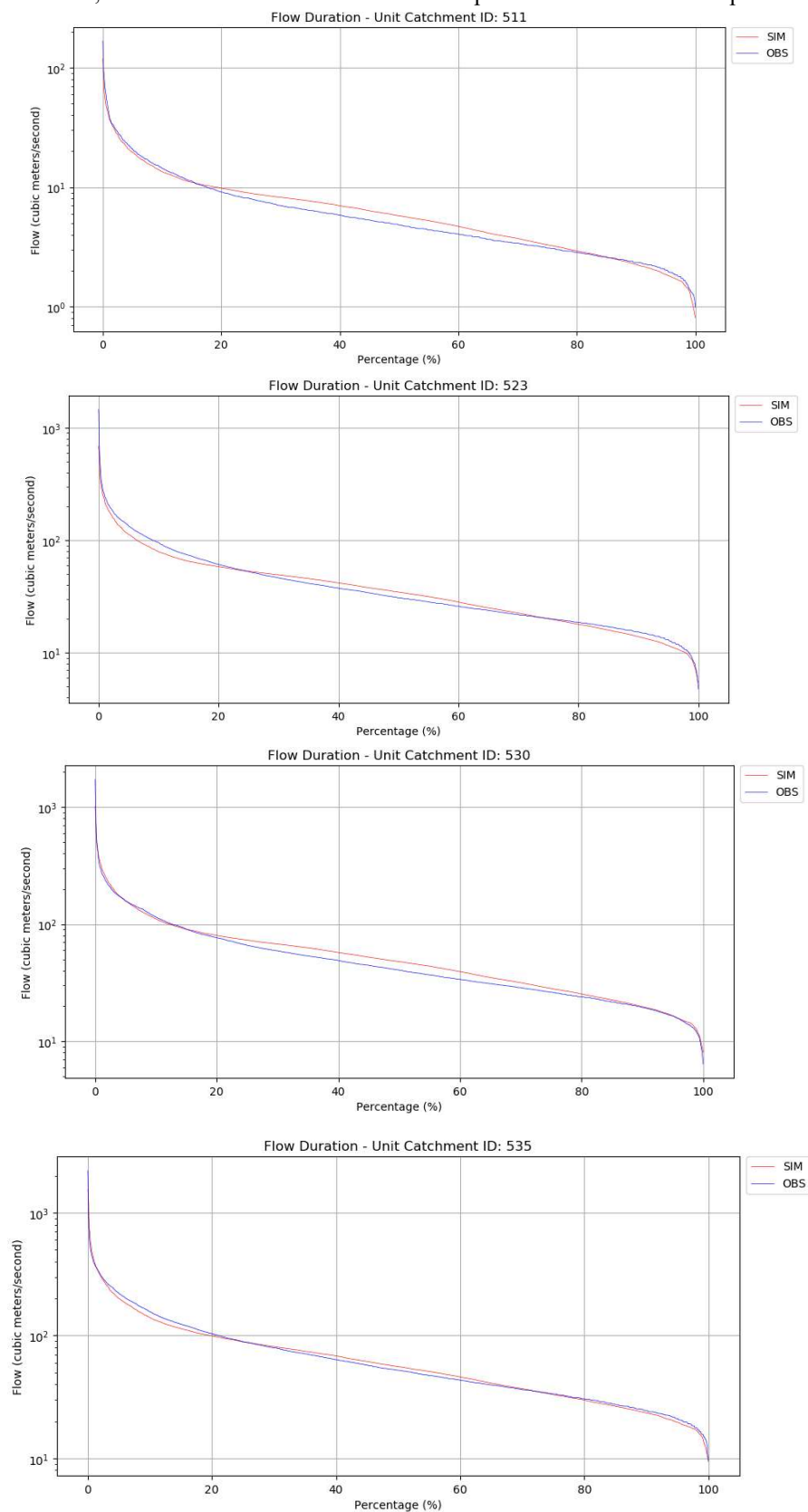
Durante o processo de calibração também foram avaliadas as curvas de permanência das vazões simuladas, que mostraram um bom ajuste entre vazões observadas para todas as bacias. Este ajuste, principalmente das vazões mínimas, é de grande importância para avaliação da disponibilidade hídrica. As figuras 25 a 28 apresentam as curvas de permanência para as estações de referência. Como as figuras geradas pelo MGB-IPH são nomeadas de acordo com as minibacias do modelo, a tabela 13 apresenta a minibacia e sua respectiva estação pluviométrica.

Tabela 13 – Estações fluviométricas e suas minibacias correspondentes

Nome	Minibacia
São Bras do Suaçui Montante	511
Belo Vale	523
Alberto Flores	530
Ponte Nova do Paraopeba	535
Honório Bicalho Montante	125
Acaiaca Jusante	93
Fazenda Ocidente	90
Rio Piracicaba	124
Carrapato (Brumal)	115

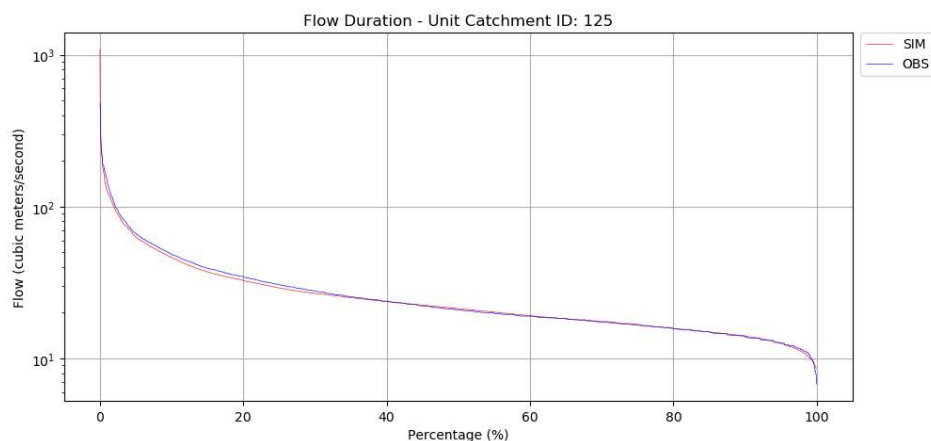
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 25. Curva de permanência observada e simulada para as estações São Bras do Suaçui Montante, Belo Vale, Alberto Flores e Ponte Nova do Paraopeba na bacia do rio Paraopeba



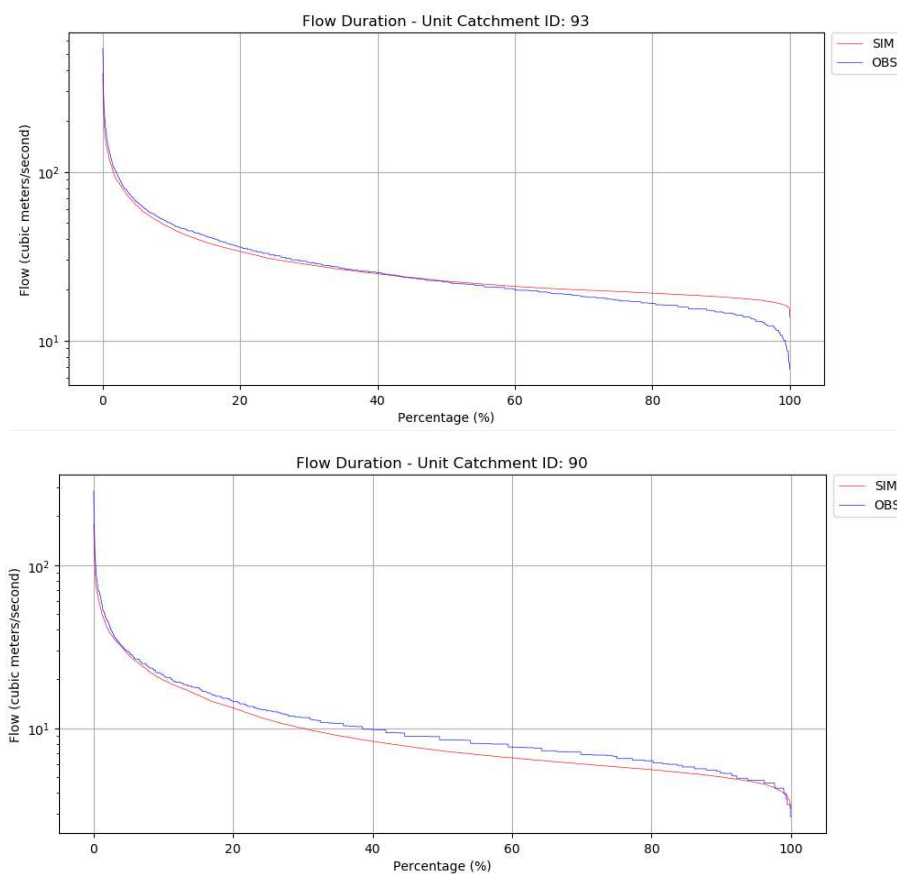
Fonte: MGB-IPH

Figura 26. Curva de permanência observada e simulada para a Estação Honório Bicalho Montante, na bacia do Alto Rio das Velhas



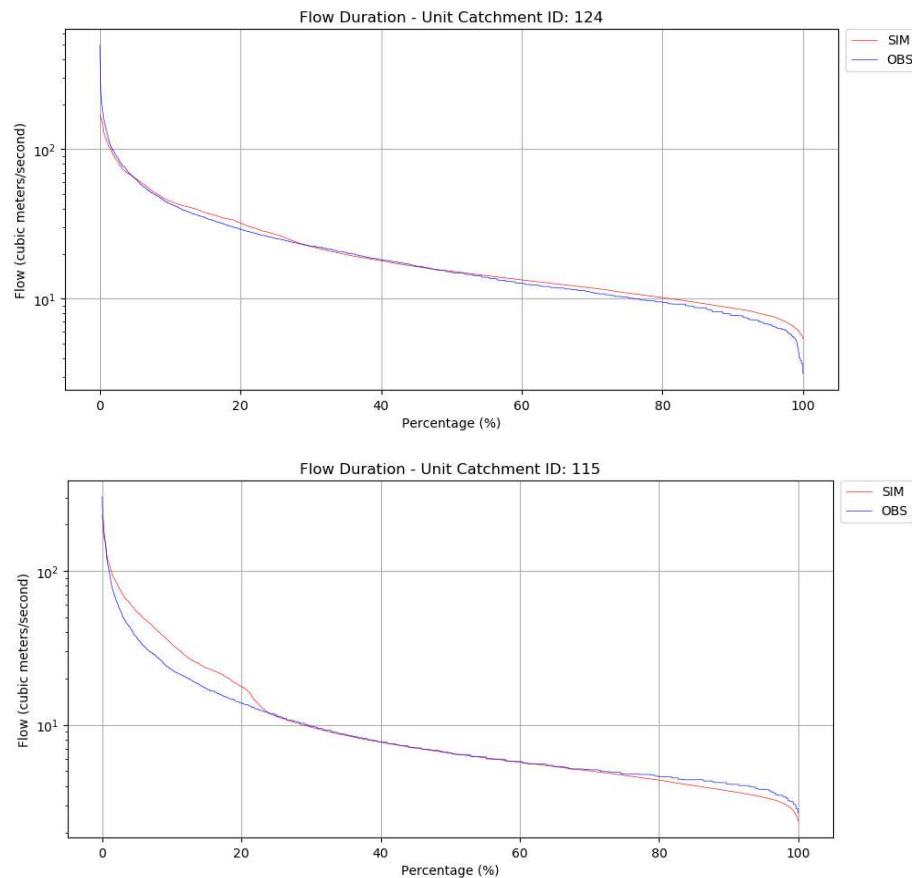
Fonte: MGB-IPH

Figura 27. Curva de permanência observada e simulada para as estações Acaiaca Jusante, Fazenda Ocidente, na bacia do Rio Piranga



Fonte: MGB-IPH

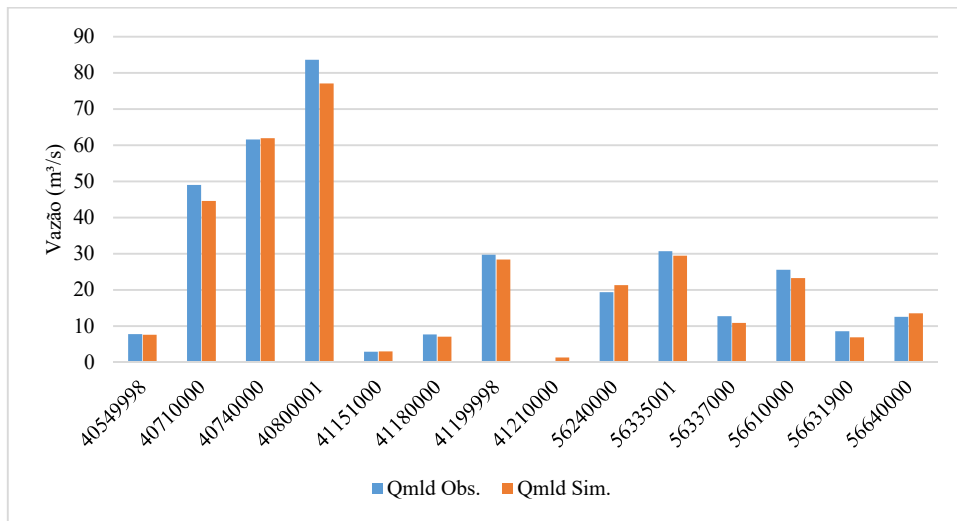
Figura 28. Curva de permanência observada e simulada para as estações Rio Piracicaba e Carrapato (Brumal), na bacia do Rio Piranga



Fonte: MGB-IPH

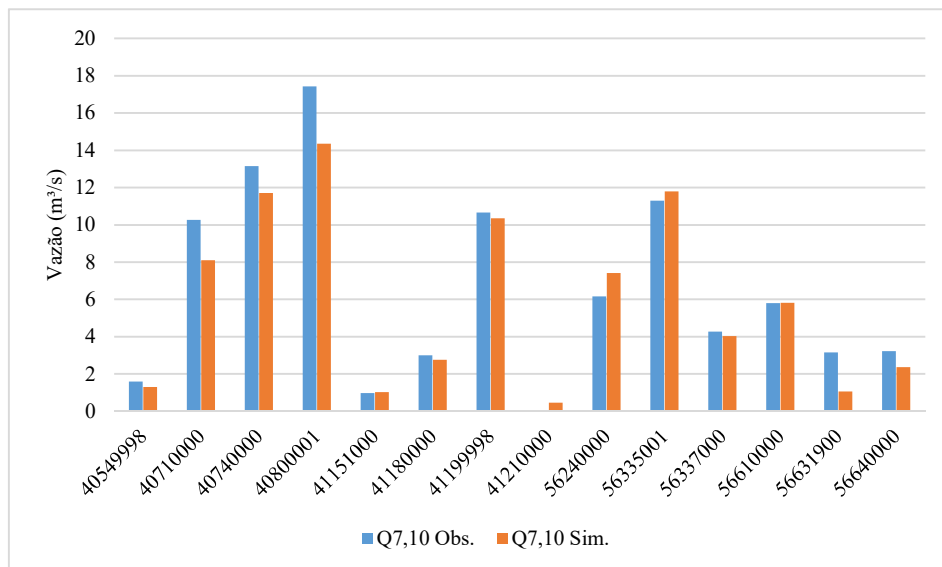
Por fim, as vazões médias de longa duração (Q_{mld}) e a vazão mínima $Q_{7,10}$ das estações pluviométricas utilizadas foram comparadas aos resultados obtidos a partir da simulação, com a maior diferença entre observado e simulado ocorrendo na estação 56631900 – ETA São Bento, na bacia do rio Piracicaba, onde a vazão simulada é aproximadamente 20% menor que a observada. Os valores simulados para a Q_{mld} se mostraram bastante coerentes com aqueles observados, figuras 29 e 30. As vazões mínimas também apresentaram coerência entre observado e simulado e, novamente, a estação 56631900 (ETA São Bento) apresentou valores bastante divergentes, com vazão aproximadamente 66% menor que a observada. Ainda, pode-se considerar que os resultados demonstram que os valores simulados são aceitáveis para esse estudo.

Figura 29. Comparativo das vazões médias de longa duração observadas e simuladas



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 30. Comparativo das vazões mínimas Q7,10 observadas e simuladas



Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos e as análises realizadas demonstram que o modelo MGB-IPB se mostrou adequado para simular as vazões nas bacias hidrográficas em estudo. Ainda que os alguns valores dos coeficientes estatísticos não tenham tido uma boa classificação, os valores do coeficiente NASH-Log demonstram um bom ajuste para os períodos de recessão e estiagem. Ainda, a comparação as curvas de permanência demonstram uma boa aderência entre as frequências das vazões no tempo analisado, enquanto o comparativo entre as vazões médias e mínimas confirma uma boa simulação nas bacias.

Disponibilidade hídrica

A disponibilidade da oferta hídrica na região do Quadrilátero Ferrífero foi estimada e avaliada com base na vazão outorgável conforme o órgão regulador do estado de Minas Gerais, ou seja, a vazão mínima de 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos, a Q7,10, para as águas superficiais. Já para as águas subterrâneas as estimativas utilizadas nas avaliações se deram conforme diretrizes do Plano Diretor de Recursos Hídricos das bacias hidrográficas do rio São Francisco e do Rio Doce. Os resultados foram especializados em relação às bacias da região e as sub-bacias que as compõem o QF.

As estimativas de disponibilidade de águas superficiais indicam que, para as bacias do QF, a vazão disponível se encontra entre 0,04 e 3,24 m³/s, com média de 1,14 m³/s. A tabela 14 apresenta os valores obtidos.

Tabela 14 – Quantificação da Q7,10 e de sua vazão outorgável em águas superficiais das unidades de análise do Quadrilátero Ferrífero

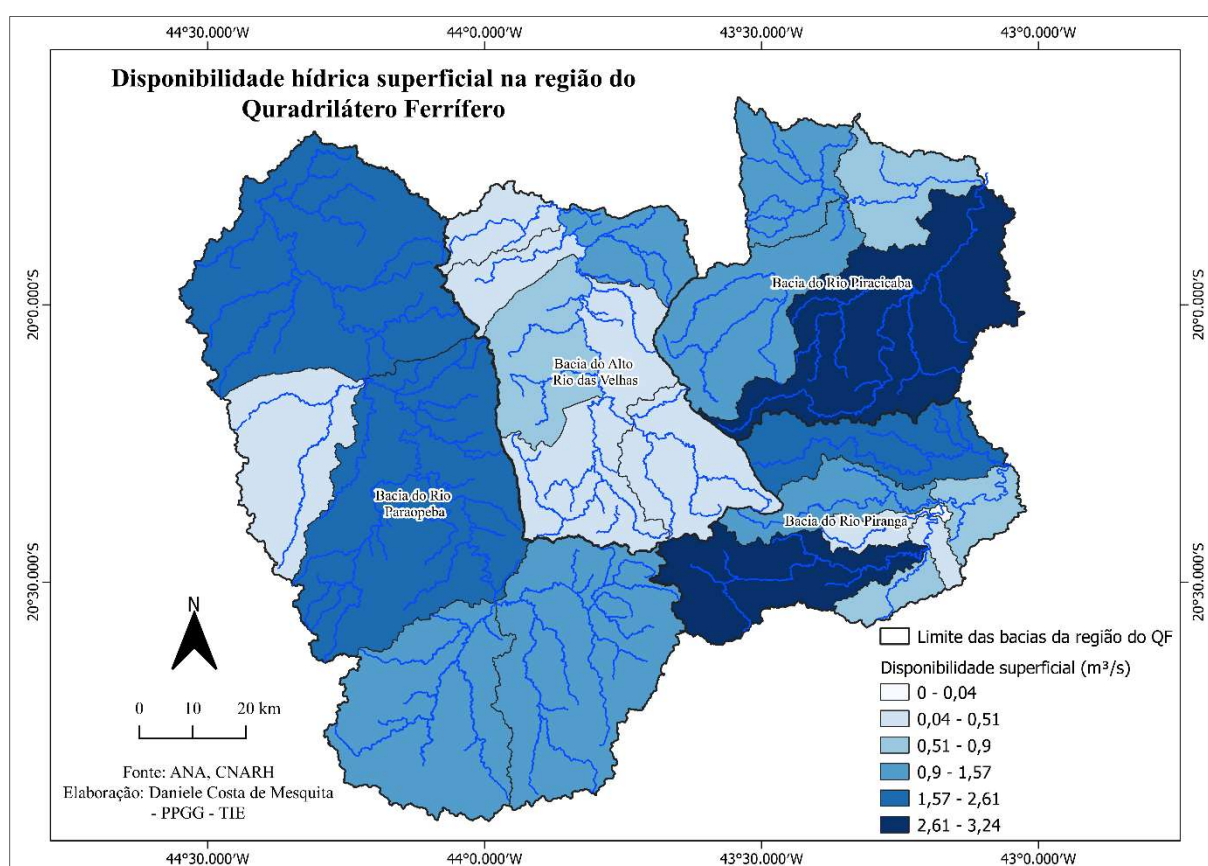
Bacia	Sub-bacia	Q7,10 (m³/s)	Disponibilidade (m³/s)
Bacia do Rio Piracicaba	7886	6.47	3.24
	7887	1.79	0.90
	7888	2.58	1.29
	7889	3.13	1.57
Bacia do Rio Piranga	78968	1.27	0.63
	78969	6.08	3.04
	78962	5.21	2.61
	78963	1.80	0.90
	78964	2.99	1.49
	78965	0.09	0.04
	78966	1.01	0.51
	78967	0.68	0.34
Bacia do Rio Paraopeba	76965	8.07	2.42
	76966	1.06	0.32
	76967	7.71	2.31
	76968	3.90	1.17
	76969	4.18	1.25
Bacia do Rio das Velhas	Ribeirão Arrudas	0.716	0.21
	Ribeirão Onça	0.75	0.23
	Águas do Gandarela	1.41	0.42
	Nascentes	0.9	0.27
	Águas da Moeda	2.52	0.76
	Ribeirão Caeté/Sabará	3.9	1.17
	Rio Itabirito	1.23	0.37

Fonte: Elaborado pela autora

A figura 31 apresenta a distribuição espacial das disponibilidades hídricas em águas superficiais. Observa-se que a bacia do Alto Rio das Velhas é a que apresenta as menores vazões disponíveis, variando entre 0,04 e 0,51 m³/s. A bacia do Rio Paraopeba tem a maior parte de sua área com vazões disponíveis variando entre 0,9 e 2,61 m³/s (3240 – 9396 m³/h). Ambas são sub-bacias do Rio São Francisco, onde o IGAM prevê a vazão outorgável em 30%.

Já as bacias dos rios Piracicaba e do Rio Piranga, ambas sub-bacias do Rio Doce, apresentam as maiores vazões disponíveis, ainda que tenha sido considerado, conforme portaria do IGAM (2020), que a vazão outorgável na região é de 50% da Q_{7,10}.

Figura 31. Disponibilidade hídrica superficial na região do Quadrilátero Ferrífero



Em relação à disponibilidade hídrica subterrânea, considerando-se a necessidade de realizar uma análise integrada da disponibilidade, as estimativas foram realizadas a partir do escoamento de base médio e apresentada em função da reserva explorável. Esta forma de determinação deve ser encarada com cautela, dadas as limitações e incertezas do método, que, no entanto, funciona bem para determinar a ordem de grandeza das reservas exploráveis, com intuito de auxiliar a gestão de recursos hídricos.

Os valores estimados variaram entre $1,48 \times 10^6$ e $1,84 \times 10^8$ m³/ano. A média para o QF foi estimada em torno de $6,9 \times 10^7$ m³/ano. Os resultados são apresentados na tabela 15.

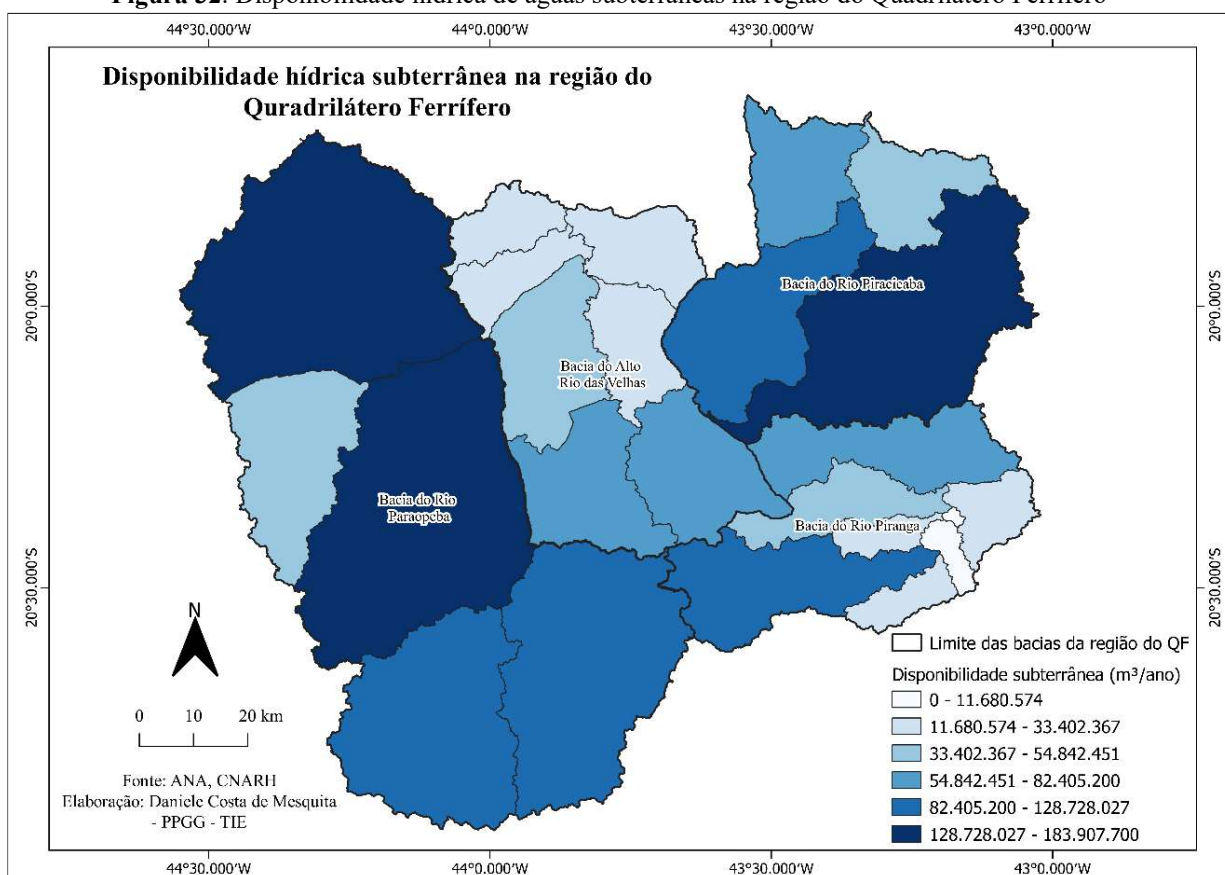
Tabela 15 – Quantificação das reservas hídricas subterrâneas nas unidades de análise do Quadrilátero Ferrífero

Bacia	Sub-bacia	Qesp (L/s.km ²)	Reserva Renovável (m ³ /ano)	Reserva explotável (m ³ /ano)
Bacia do Piracicaba	7886	11.39	5.15E+08	1.55E+08
	7887	11.39	1.36E+08	4.09E+07
	7888	16.79	2.35E+08	7.06E+07
	7889	16.79	4.19E+08	1.26E+08
Bacia do Piranga	78968	16.71	7.30E+07	2.19E+07
	78969	16.71	3.50E+08	1.05E+08
	78962	15.24	2.74E+08	8.21E+07
	78963	16.71	1.04E+08	3.11E+07
	78964	16.71	1.72E+08	5.16E+07
	78965	16.71	4.93E+06	1.48E+06
	78966	16.71	5.83E+07	1.75E+07
	78967	16.71	3.89E+07	1.17E+07
Bacia do Paraopeba	76965	8.13	6.13E+08	1.84E+08
	76966	8.13	1.75E+08	5.25E+07
	76967	8.24	4.89E+08	1.47E+08
	76968	9.86	3.49E+08	1.05E+08
	76969	9.86	4.29E+08	1.29E+08
Bacia do Rio das Velhas	Ribeirão Arrudas	10.64	7.67E+07	2.30E+07
	Ribeirão Onça	10.64	7.44E+07	2.23E+07
	Águas do Gandarela	10.64	1.09E+08	3.26E+07
	Nascentes	15.86	2.71E+08	8.13E+07
	Águas da Moeda	10.64	1.83E+08	5.48E+07
	Ribeirão Caête/Sabará	10.64	1.11E+08	3.34E+07
	Rio Itabirito	15.86	2.75E+08	8.24E+07

Fonte: Elaborado pela autora

A distribuição espacial dos resultados obtidos, apresentada na figura 32, indicam as maiores reservas explotáveis são encontradas nas bacias do Rio Paraopeba e do Rio Piracicaba, enquanto as menores são observadas na bacia do Alto Rio das Velhas.

Figura 32. Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas na região do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaborado pela autora

Com base nos critérios utilizados para os cálculos da vazão superficial e subterrânea e o posterior somatório dos resultados, estimou-se a vazão total disponível nas bacias da região do Quadrilátero Ferrífero. Tais foram colocados na mesma unidade de média para melhor comparação dos resultados e são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Quantificação da disponibilidade total (águas superficiais e subterrâneas) na região do Quadrilátero Ferrífero.

	Sub-bacia	Disponibilidade Superficial (m³/ano)	Reserva explotável (m³/ano)	Total (m³/ano)
Bacia do Rio Piracicaba	7886	102.066.264,00	154.526.479,84	256.592.743,84
	7887	28.224.720,00	40.870.809,99	69.095.529,99
	7888	40.634.136,00	70.587.495,85	111.221.631,85
	7889	49.353.840,00	125.820.285,66	175.174.125,66
Bacia do Rio Piranga	78968	19.983.813,29	21.890.590,08	41.874.403,37
	78969	95.892.093,22	105.041.739,23	200.933.832,45
	78962	82.213.902,57	82.146.257,60	164.360.160,17
	78963	28.398.007,79	31.107.633,89	59.505.641,68
	78964	47.113.141,69	51.608.492,18	98.721.633,87
	78965	1.350.986,29	1.479.892,08	2.830.878,37
	78966	15.975.864,29	17.500.218,37	33.476.082,66
	78967	10.663.138,93	11.680.573,66	22.343.712,59

Tabela 17 – Quantificação da disponibilidade total (águas superficiais e subterrâneas) na região do Quadrilátero Ferrífero.

	Sub-bacia	Disponibilidade Superficial (m³/ano)	Reserva explotável (m³/ano)	Total (m³/ano)
Bacia do Rio Paraopeba	76965	76.348.656,00	183.907.700,10	260.256.356,10
	76966	9.990.604,80	52.514.833,72	62.505.438,52
	76967	72.976.494,62	146.680.415,10	219.656.909,72
	76968	36.916.041,60	104.746.202,78	141.662.244,38
	76969	39.546.144,00	128.728.027,05	168.274.171,05
Bacia do Rio das Velhas	Ribeirão Arrudas	6.773.932,80	23.010.031,82	29.783.964,62
	Ribeirão Onça	7.095.600,00	22.305.775,66	29.401.375,66
	Águas do Gandarela	13.339.728,00	32.606.969,74	459.46.697,74
	Nascentes	8.514.720,00	81.296.633,85	89.811.353,85
	Águas da Moeda	23.831.755,20	54.842.450,70	78.674.205,90
	Ribeirão Caeté/Sabará	36.897.120,00	33.402.367,30	70.299.487,30
	Rio Itabirito	11.636.784,00	82.405.200,43	94.041.984,43

Fonte: Elaborado pela autora

Demandas hídricas

A análise das outorgas cadastradas e disponibilizadas no CNARH permitiu diagnosticar o uso das águas na região do Quadrilátero Ferrífero. No total, foram encontrados 2934 pontos, totalizando 78.103,90 m³/h outorgados, entre captações em águas superficiais e subterrâneas, todas para uso consuntivo. O maior número de outorgas refere-se às captações em águas subterrâneas, que representam aproximadamente 83% do total analisado. No entanto, no que se refere ao valor outorgado, o total de vazão retirado é significativamente maior em captações de águas superficiais, em torno de 61% do valor total. Esses resultados são apresentados na tabela 17.

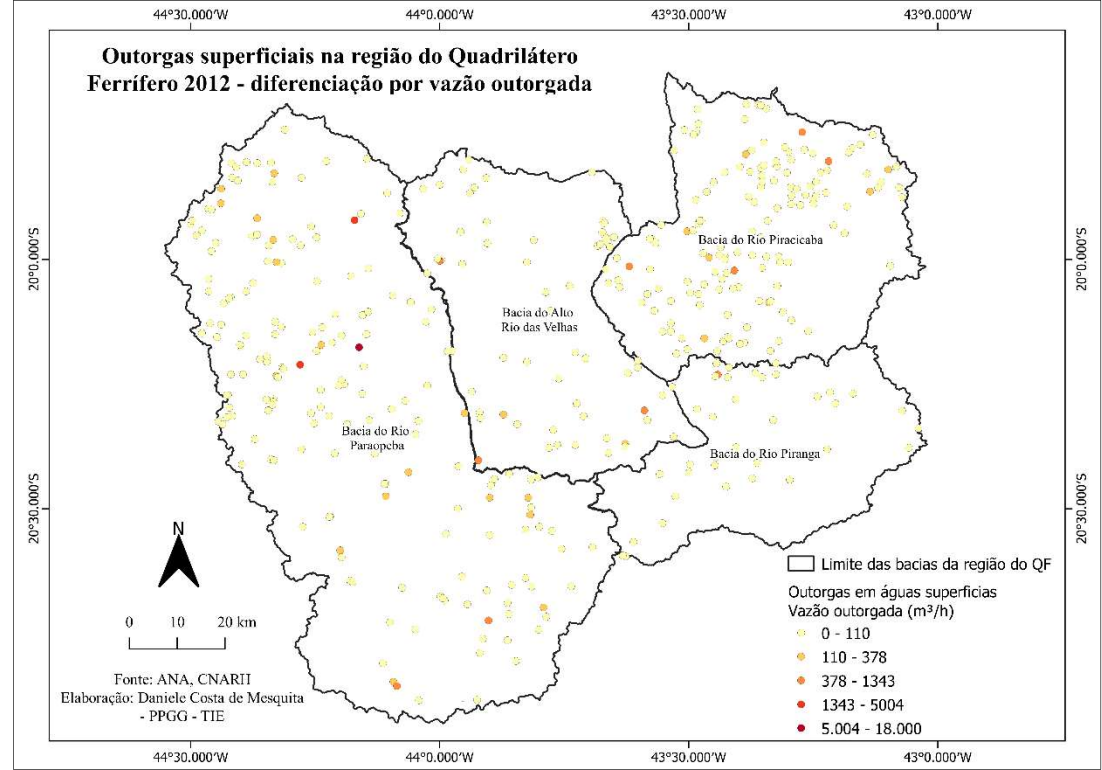
Tabela 18 – Número de captações e vazão outorgada na região do Quadrilátero Ferrífero

	Número de captações	% de captações	Vazão outorgada (m³/h)	% da Vazão outorgada
Subterrâneas	2480	83,11	30.094,16	38,53
Superficiais	454	16,89	48.009,74	61,47

Fonte: Elaborado pela autora

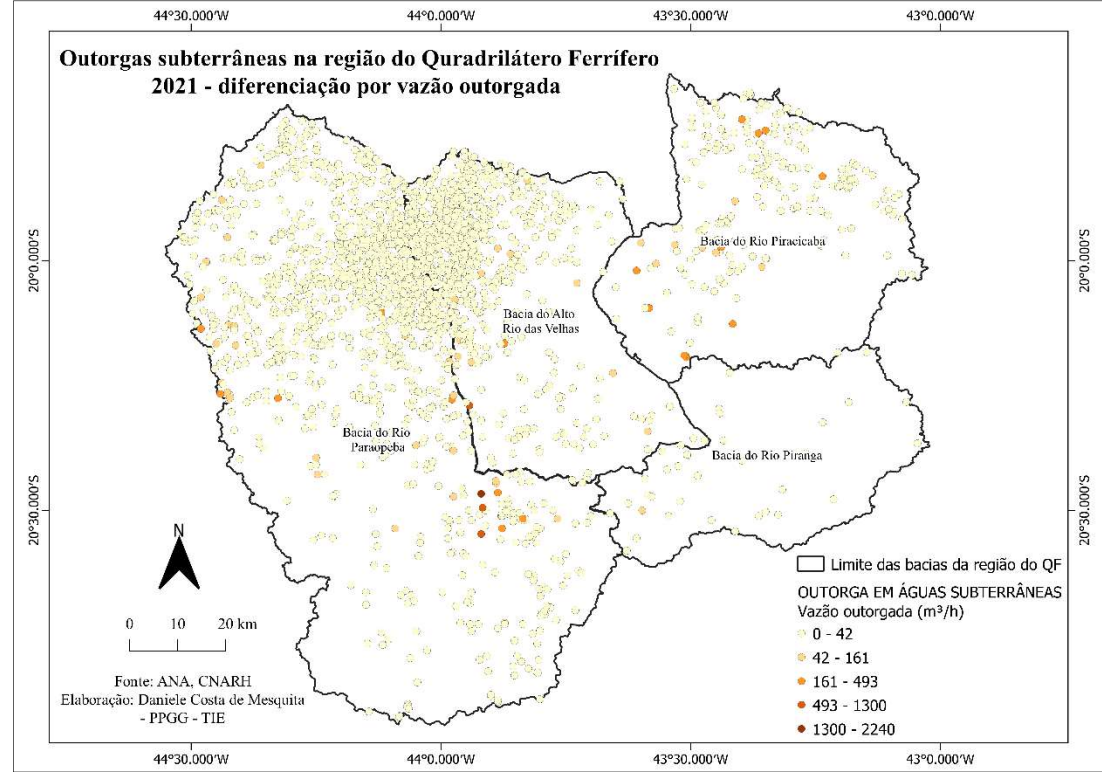
A distribuição espacial dos processos de outorga na região é apresentada em duas figuras, 33 e 34, referentes a outorgas em águas superficiais e outorgas em águas subterrâneas, respectivamente.

Figura 33. Distribuição dos pontos de outorga em águas superficiais na região do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 34. Distribuição dos pontos de outorga em águas subterrâneas na região do Quadrilátero Ferrífero



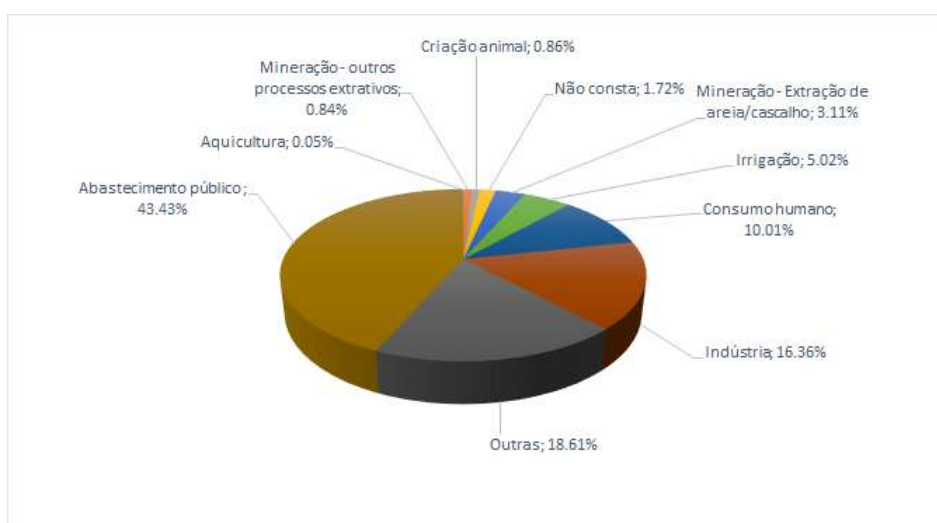
Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se os pontos de outorga em águas superficiais são bem distribuídos nas bacias da região e que a maioria deles representam vazões outorgadas menores que 110 m³/h. No entanto, um único ponto de outorga, na região central da Bacia do Paraopeba, se destaca por apresentar vazão de captação muito acima da média, no valor de 18.000,00 m³/h. O mesmo corresponde à outorga 107810/2019, no Rio Paraopeba, na cidade de Brumadinho, referente a abastecimento público, em nome da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). Diante disso, apesar de ser um valor extremo, não se trata de um valor incorreto e, portanto, foi mantido no estudo.

Em relação aos pontos de vazão em águas subterrâneas, observa-se que apresentam maior concentração região Nordeste da área, no limite entre as bacias do Rio das Velhas e do Rio Paraopeba, onde se localizam os municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte, em sua maioria com vazões menores que 42 m³/h. Nota-se também que os poços com vazões maiores 493 m³/h estão localizados na bacia do Rio Paraopeba, em sua porção sudoeste, onde se localiza a cidade de Congonhas. Por outro lado, bacia do rio Piranga é a que possui menor número de poços, bem como menor vazão outorgada.

Com relação ao uso da água, verificou-se que as finalidades mais representativas em relação à vazão outorgada total, quando se considera o uso de águas superficiais e subterrâneas, referem-se ao consumo humano, indústria e abastecimento público e “outras” figura 35. Dentre as finalidades abrangidas em “outras” tem-se: lavagem de veículos, aspersão de vias e rebaixamento para mineração. As outorgas de rebaixamento para mineração, ainda que representem um número reduzido de pontos outorgados, possuem vazões maiores que 500 m³/h.

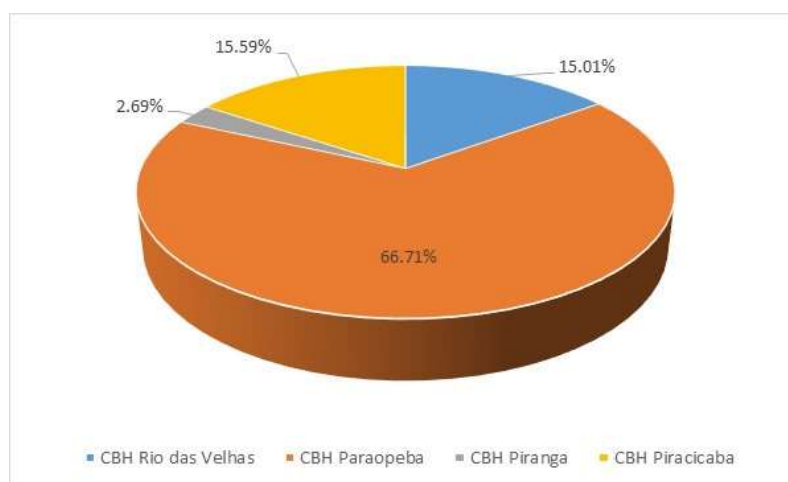
Figura 35. Proporção da vazão outorgada por finalidade de uso no Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaborado pela autora

Foi realizada também a análise da proporção da vazão total outorgada por bacia e observa-se que aproximadamente 2/3 dela se encontra na bacia do Rio Paraopeba, aproximadamente 15% na bacia do Rio das Velhas e na Bacia do Piracicaba e apenas 2,69% na Bacia do Rio Piranga, figura 36.

Figura 36. Proporção da vazão total outorgada nas bacias da região do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Elaborado pela autora

Em relação às vazões por finalidade de uso, observa-se que o abastecimento público representa 43% do total outorgado, o uso industrial em torno de 16% e o consumo humano 10%, tabela 16. Os números refletem o perfil socioeconômico da região, onde boa parte dos municípios fazem parte da região Metropolitana de Belo Horizonte, com grande concentração populacional e predominância de atividades industriais e de mineração.

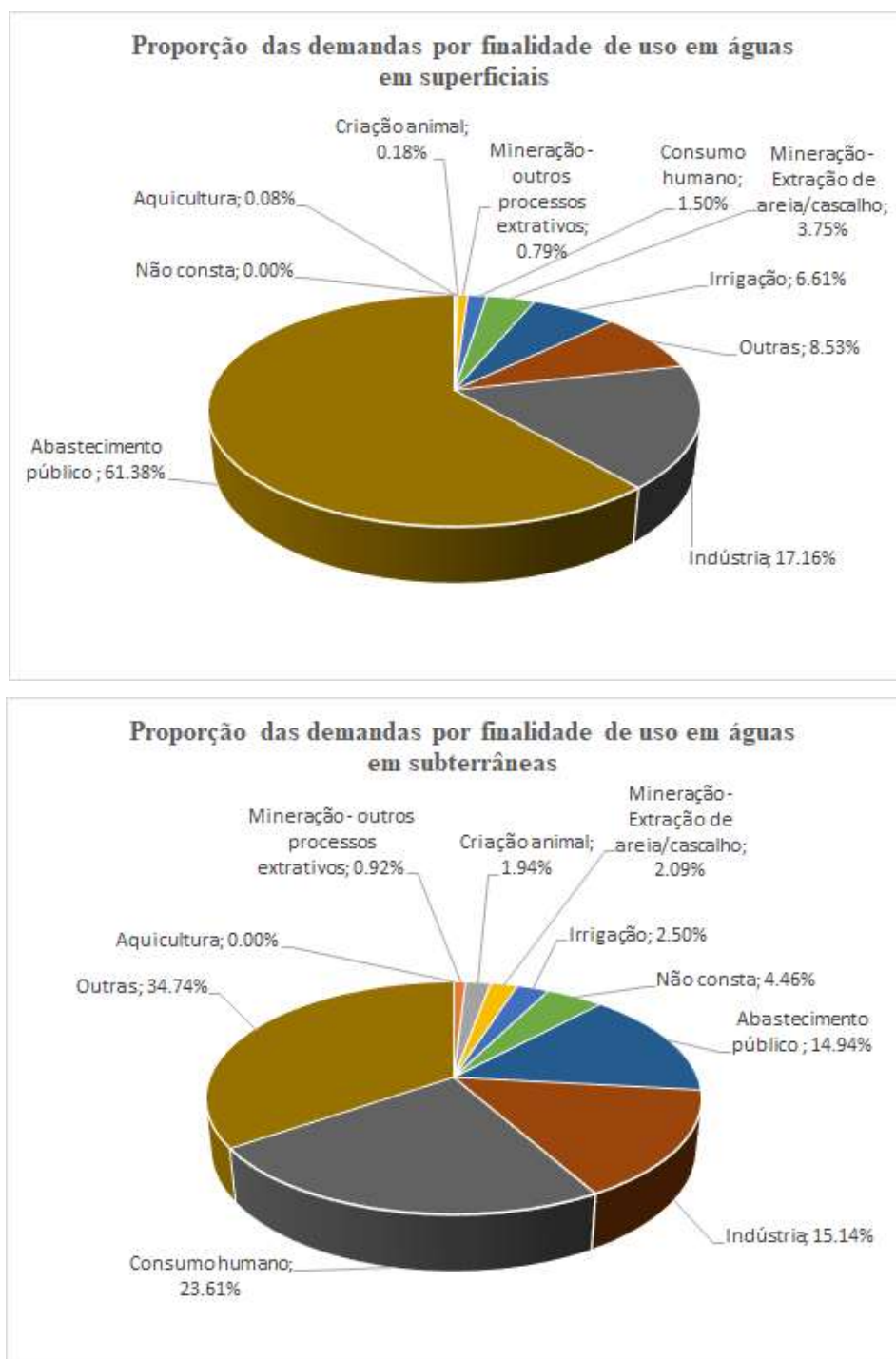
Tabela 19 - Finalidade de uso das vazões demandadas em águas superficiais e subterrâneas no Quadrilátero Ferrífero em ordem decrescente de uso

Finalidade	Vazão outorgada (m³/h)	%
Abastecimento público	33.965,17	43,43
Outras	14.551,14	18,61
Indústria	12.794,85	16,38
Consumo humano	7.826,13	10,02
Irrigação	3.927,41	5,03
Mineração - Extração de areia/cascalho	2.431,33	3,11
Não consta	1.343,05	1,72
Criação animal	670,59	0,86
Mineração - outros processos extrativos	657,12	0,84
Aquicultura	37,11	0,05

Fonte: Elaborado pela autora

Ao analisar separadamente as finalidades de uso da água para a região, nota-se o padrão observado para a análise conjunta se repete, sem que uma das finalidades seja mais representativa que outra no valor final das proporções.

Figura 37. Proporção da vazão outorgada por finalidade de uso da água em águas superficiais, à esquerda, e águas subterrâneas, à direita



Fonte: Elaborado pela autora

A análise por bacia das outorgas em águas superficiais indicou que, para a bacia do Rio das Velhas e do Rio Piracicaba, o uso predominante da água é para abastecimento público, seguido pelo consumo industrial. Já para as bacias do Rio Paraopeba e do Rio Piranga o maior uso da água é para outras finalidades não especificadas, seguido pelo abastecimento público. Os dados são apresentados na tabela 19.

Tabela 20 - Vazão outorgada e proporção por finalidade de uso em águas superficiais nas bacias da região do Quadrilátero Ferrífero.

	Bacia do Rio das Velhas		Bacia do Rio Paraopeba		Bacia do Rio Piranga		Bacia do Rio Piracicaba	
Finalidade	Vazão (m³/h)	%	Vazão (m³/h)	%	Vazão (m³/h)	%	Vazão (m³/h)	%
Abastecimento público	1276,92	36,66	25294,82	72,35	299.52	18.27	2579.24	32.53
Consumo humano	652,56	18,74	61,48	0,18	0	0.00	7.81	0.10
Criação animal	70,16	2,01	8,96	0,03	0	0.00	8.00	0.10
Indústria	959,54	27,55	4806,53	13,75	59.94	3.66	2412.51	30.43
Irrigação	118,76	3,41	1527,3	4,37	164.19	10.02	1365.21	17.22
Mineração - Extração de areia/cascalho	118,37	3,40	1681,34	4,81	2.16	0.13	0	0.00
Mineração - outros processos extrativos	0,9	0,03	348,206	1,00	3.1	0.19	27.68	0.35
Outras	265,73	7,63	1218,44	3,49	1110.08	67.73	1503.31	18.96
Aquicultura em tanque escavado	-	-	13.21	0.04	-	-	23.90	0.30

Fonte: Elaborado pela autora

Em relação às águas subterrâneas, predominam as outras finalidades não especificadas de uso, exceto pela Bacia do Rio Piranga em que a maior proporção de uso é para abastecimento público. É interessante notar que, na Bacia do Rio Paraopeba as retiradas para outras finalidades representam aproximadamente 30% do total e mais da metade desse valor outorgado são de 3 pontos de outorga de baterias de poços tubulares profundo, na região de Congonhas, que podem indicar uso para rebaixamento em mineração. O consumo humano também tem participação significativa de uso nas bacias, representando 33% da retirada na Bacia do Rio das Velhas, 22% na do Piranga e 15% na do Paraopeba. que o uso industrial representa 21% da retirada na bacia do Rio Paraopeba, mas não chega a 10% do uso nas demais bacias. Os dados são apresentados na tabela 20.

Tabela 21 - Vazão outorgada e proporção por finalidade de uso em águas subterrâneas nas bacias da região do Quadrilátero Ferrífero.

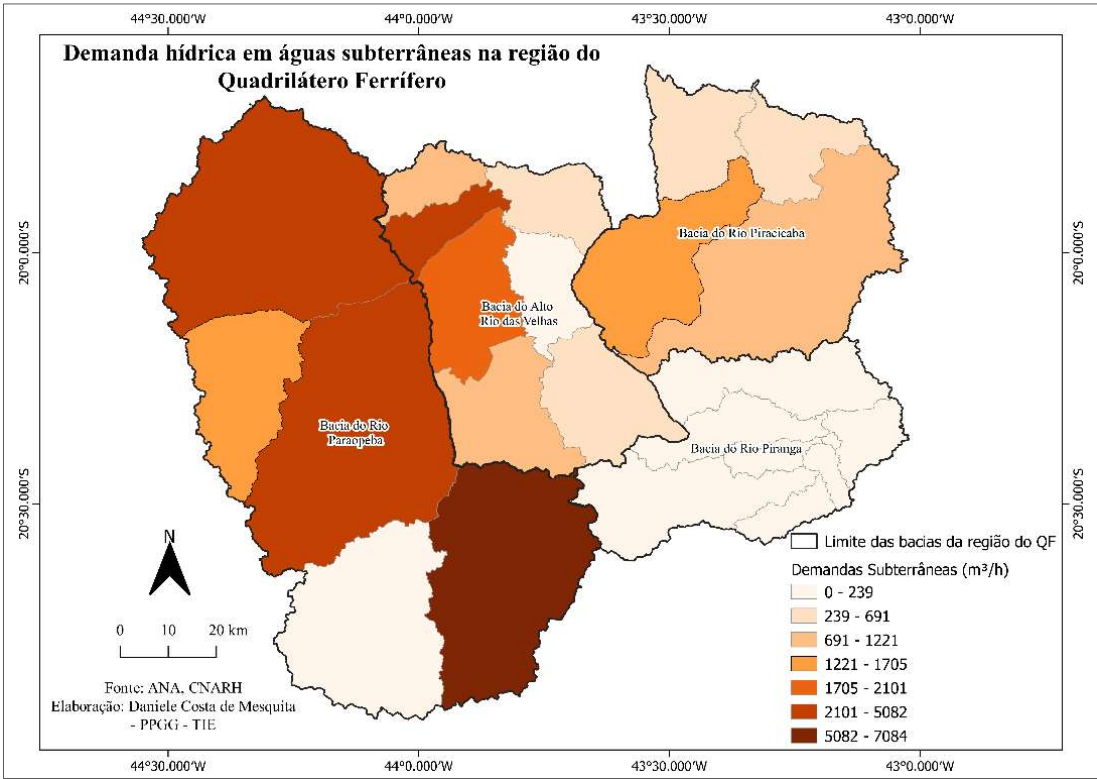
Finalidade	Bacia do Rio das Velhas		Bacia do Rio Paraopeba		Bacia do Rio Piranga		Bacia do Rio Piracicaba	
	Vazão (m³/h)	%	Vazão (m³/h)	%	Vazão (m³/h)	%	Vazão (m³/h)	%
Abastecimento público	942.35	11.43	2576.46	15.03	291.86	63.08	684.20	16.11
Consumo humano	2732.17	33.15	3939.53	22.98	91.64	19.81	340.91	8.03
Criação animal	154.19	1.87	401	2.34	6.48	1.40	21.80	0.51
Indústria	680.31	8.25	3704.58	21.61	0	0	171.42	4.04
Irrigação	276.2	3.35	469.44	2.74	1.8	0.39	4.50	0.11
Mineração - Extração de areia/cascalho	30	0.36	290.46	1.69	0	0.00	309	7.27
Mineração - outros processos extrativos	0	0.00	277.23	1.62	0	0.00	98.08	2.31
Outras	2121.14	25.73	5455.9	31.83	70.09	15.15	2705.63	63.69
Não consta	1306.7	15.85	25.73	0.15	0	0	10.60	0.25

Fonte: Elaborado pela autora

Por fim, foi avaliada a distribuição espacial das demandas de retirada em águas subterrâneas nas sub-bacias da região do Quadrilátero Ferrífero, figura 38. A Bacia do Rio Paraopeba é a que apresenta as sub-bacias com maiores vazões de retirada. É notável que a porção Sudoeste desta bacia apresenta o maior total de vazões retiradas em águas subterrâneas, o que se deve ao fato de ser nesta porção que se localizam os poços com maiores vazões outorgadas, como mencionado anteriormente. A Bacia do Piranga, por sua vez, tem todas as sub-bacias com vazões de retirada até 239 m³/h, sendo a região com menores vazões demandadas em águas subterrâneas.

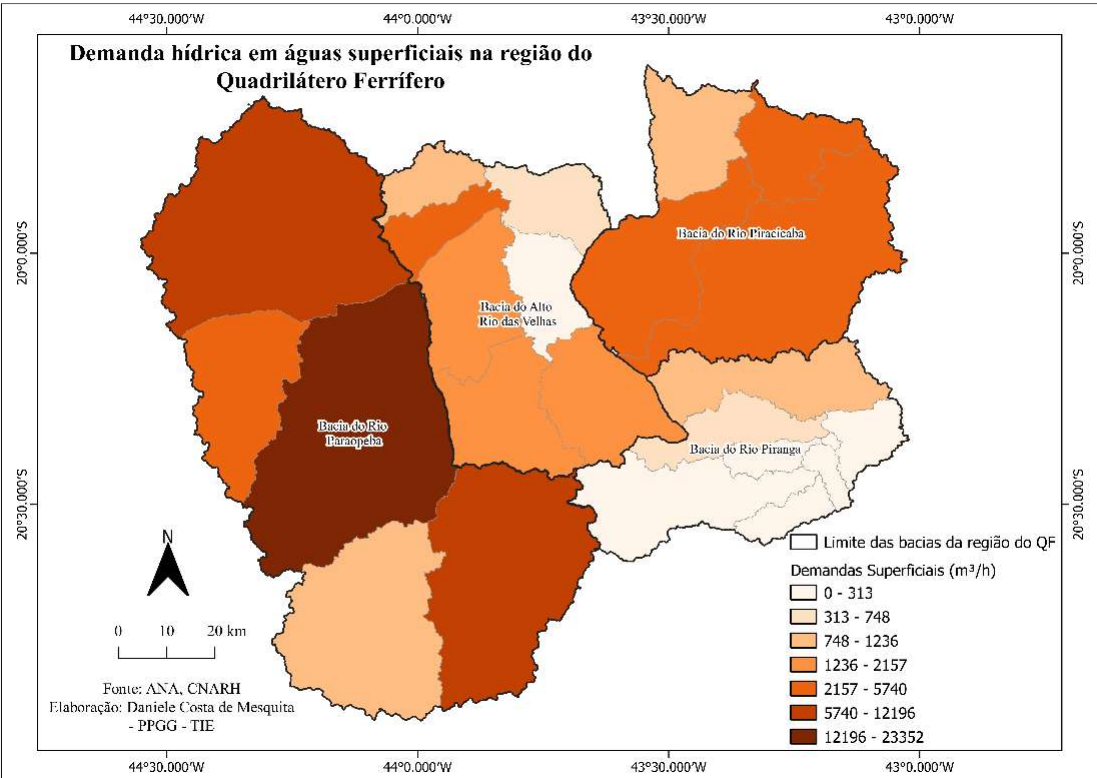
A espacialização dos resultados também demonstra ser a porção central da sub-bacia do Rio Paraopeba a que apresenta as maiores vazões de retirada em águas superficiais, o que se deve a presença do ponto de captação da COPASA para abastecimento público. A porção sul da bacia do Rio Piranga, bem como a porção Centro-oeste da Bacia do Rio das Velhas se apresentam como aquelas com menores vazões retiradas, figura 39.

Figura 38. Demanda hídrica considerando as vazões de retirada em águas subterrâneas nas sub-bacias da Região do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaborado pela autora

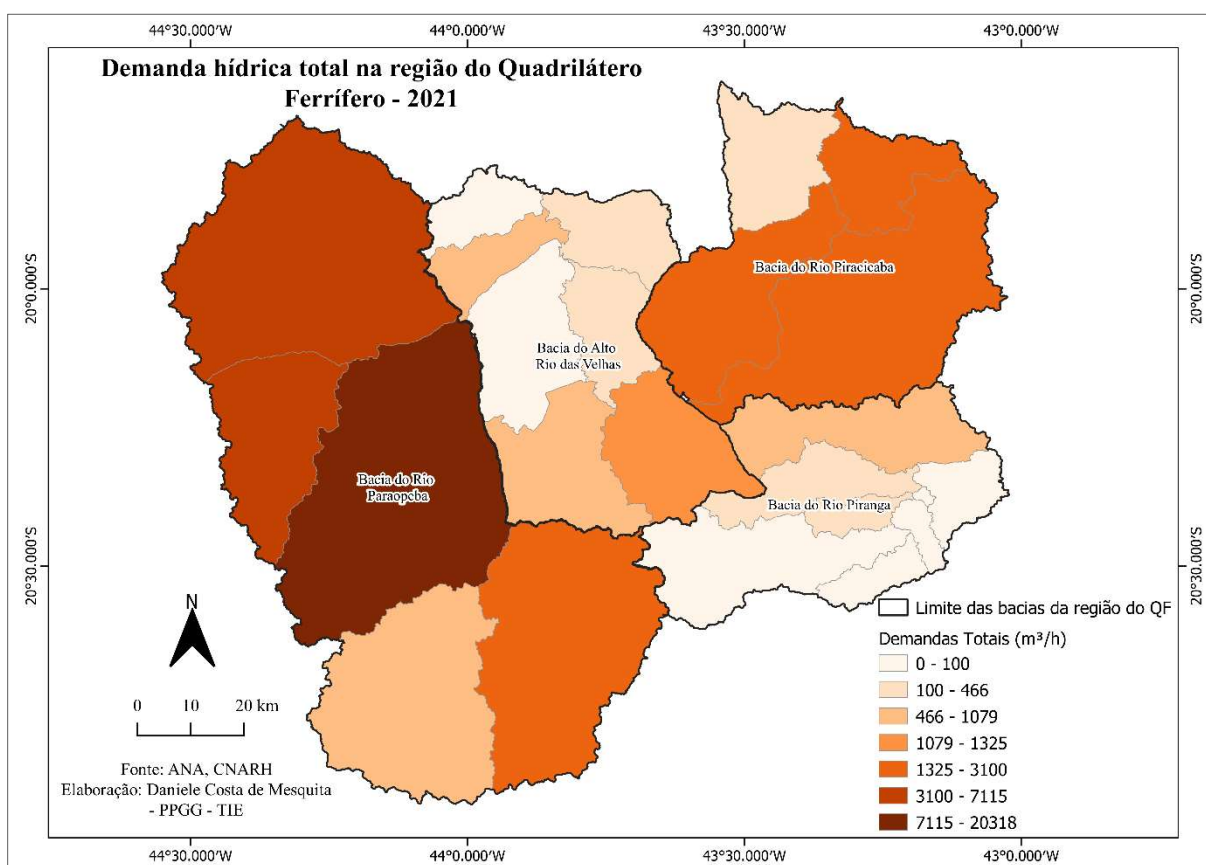
Figura 39. Demanda hídrica considerando vazões de retirada em águas superficiais nas sub-bacias da Região do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaborado pela autora

Ao avaliar o somatório das demandas em águas superficiais e subterrâneas, nota-se que a porção central da bacia do rio Paraopeba e a porção Sul da bacia do Rio Piranga as que apresentam as menores vazões de retirada, figura 40. Essa distribuição das demandas nas sub-bacias da região do QF foi utilizada para gerar a relação disponibilidade versus demanda, conforme o índice IDHidr, que se baseia na disponibilidade hídrica ao invés da vazão média da bacia e emprega um fator que estabelece o limite entre suficiência e escassez de água.

Figura 40. Demanda hídrica considerando o somatório das retiradas em águas superficiais e subterrâneas nas sub-bacias da Região do Quadrilátero Ferrífero

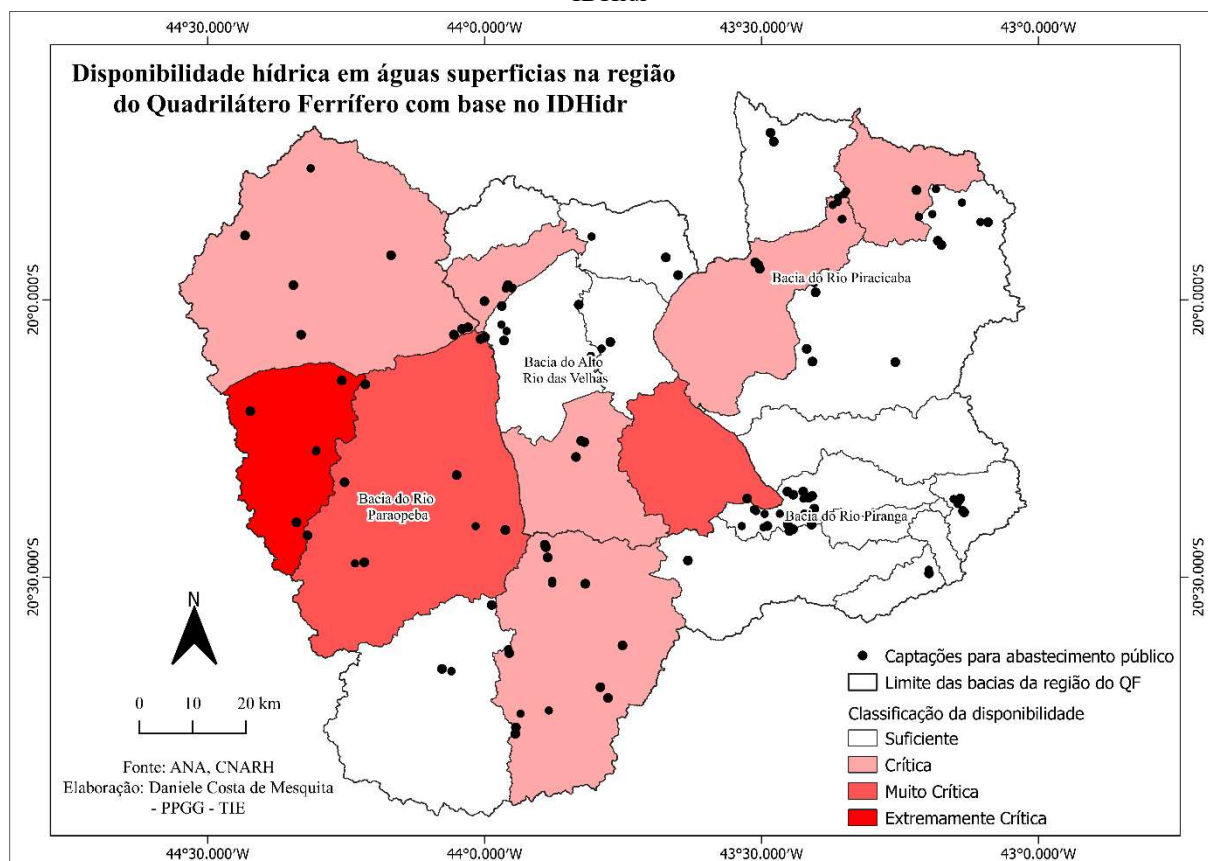


IDHidr

A disponibilidade hídrica é uma relação entre a vazão ofertada e a quantidade demandada em diferentes usos consuntivos em uma bacia hidrográfica. A disponibilidade calculada segundo a vazão de referência estabelecida pelo IGAM e a quantificação das demandas com base nos dados de outorgas disponibilizadas através do CNARH permitiram avaliar e expressar a situação da disponibilidade hídrica na região do Quadrilátero Ferrífero, por meio de um indicador, o IDHidr, um índice quantitativo.

Para melhor avaliar o cenário do Quadrilátero Ferrífero em relação à disponibilidade integrada dos águas superficiais e subterrâneas, primeiramente fez-se a análise dessa disponibilidade apenas em águas superficiais, como é de praxe nesse tipo de avaliação. Assim, realizou-se o cálculo de aplicação do índice para cada uma das sub-bacias da região utilizando-se apenas os dados de oferta e demanda em águas superficiais, figura 41.

Figura 41. Situação da disponibilidade hídrica em águas superficiais do Quadrilátero Ferrífero com base no IDHidr



Fonte: Elaborado pela autora

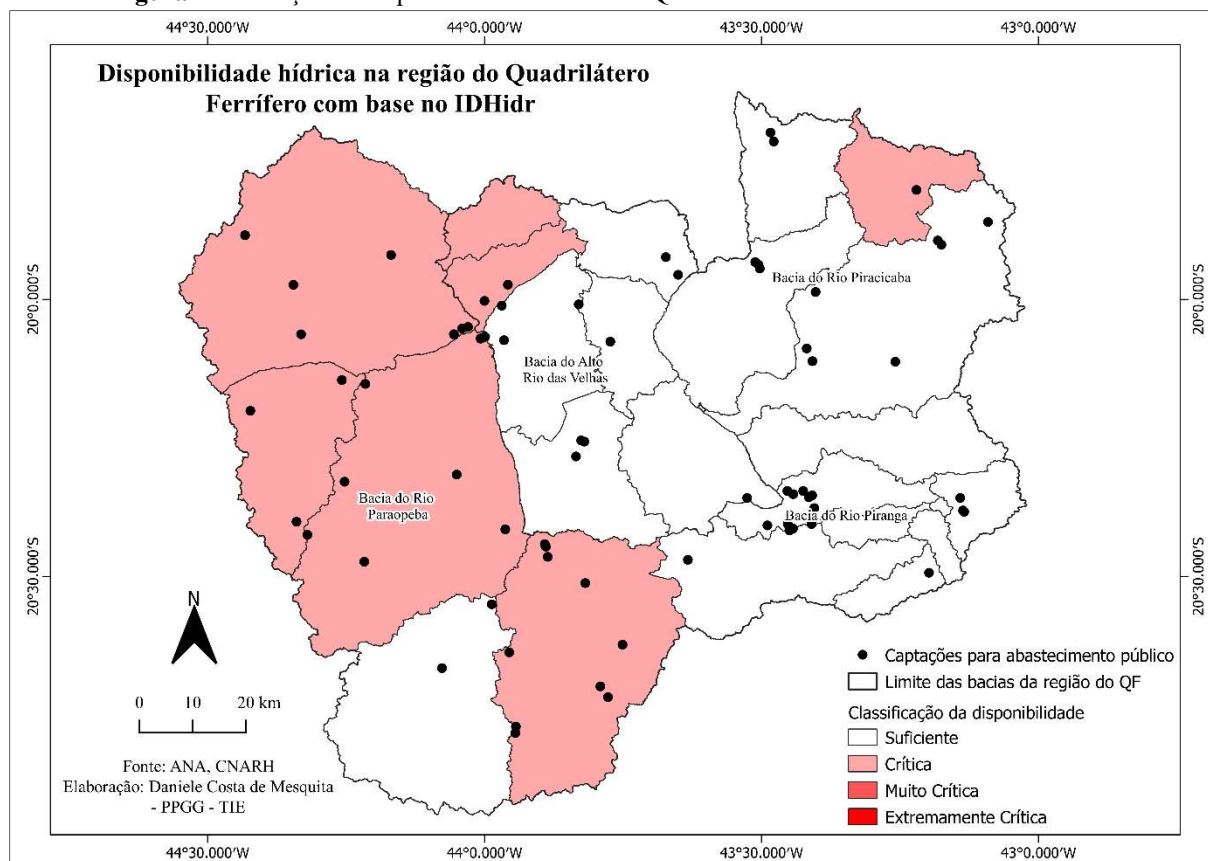
Com os dados espacializados foi possível verificar que as sub-bacias do QF tem sua classificação variando de suficiente a extremamente crítica. Áreas como a bacia do Piranga, parte das bacias do Piracicaba e do Rio das Velhas e uma pequena porção Sudeste da bacia do Rio Paraopeba estão em situação de suficiência, com água disponível mesmo nos períodos de estiagem. Áreas como a porção sudeste da bacia do Rio das Velhas, uma faixa de SE-SW na bacia do Rio Piracicaba e a partes da bacia do Paraopeba se encontram em situação considerada crítica como o índice utilizado, o que significa que, ainda que a retirada total não ultrapasse a disponibilidade, já há conflito de uso na área, pois nem toda água está acessível nos períodos de seca da região.

A porção central da bacia do Rio Paraopeba e a porção sudeste da bacia do Rio das Velhas, por sua vez, tem sua situação classificada como muito crítica. Nesta situação, conforme o índice utilizado, períodos de seca prolongados ou até o mesmo o atraso no início das chuvas pode acarretar em prejuízos para a sociedade. Já uma pequena porção a Oeste da bacia do Paraopeba já se encontra em situação extremamente crítica em que o consumo da água está acima da disponibilidade e a gestão de recursos hídricos deve ser prioritária.

Nota-se que quase a metade das captações para abastecimento público da região encontram-se em regiões classificadas como críticas a extremamente críticas. Diante dos cenários de períodos prolongados de estiagem observados na última década na região e as recentes discussões sobre a baixa disponibilidade dos reservatórios de abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, seria interessante investigar mais a fundo a situação local.

O segundo cenário avaliado, e objetivo principal deste trabalho, é a avaliação da disponibilidade hídrica quando se consideram águas superficiais e subterrâneas em conjunto, visto que o potencial das reservas subterrâneas do QF é considerado alto. A figura 42 apresenta os resultados obtidos.

Figura 42. Situação da disponibilidade hídrica do Quadrilátero Ferrífero com base no IDHidr



Fonte: Elaborado pela autora

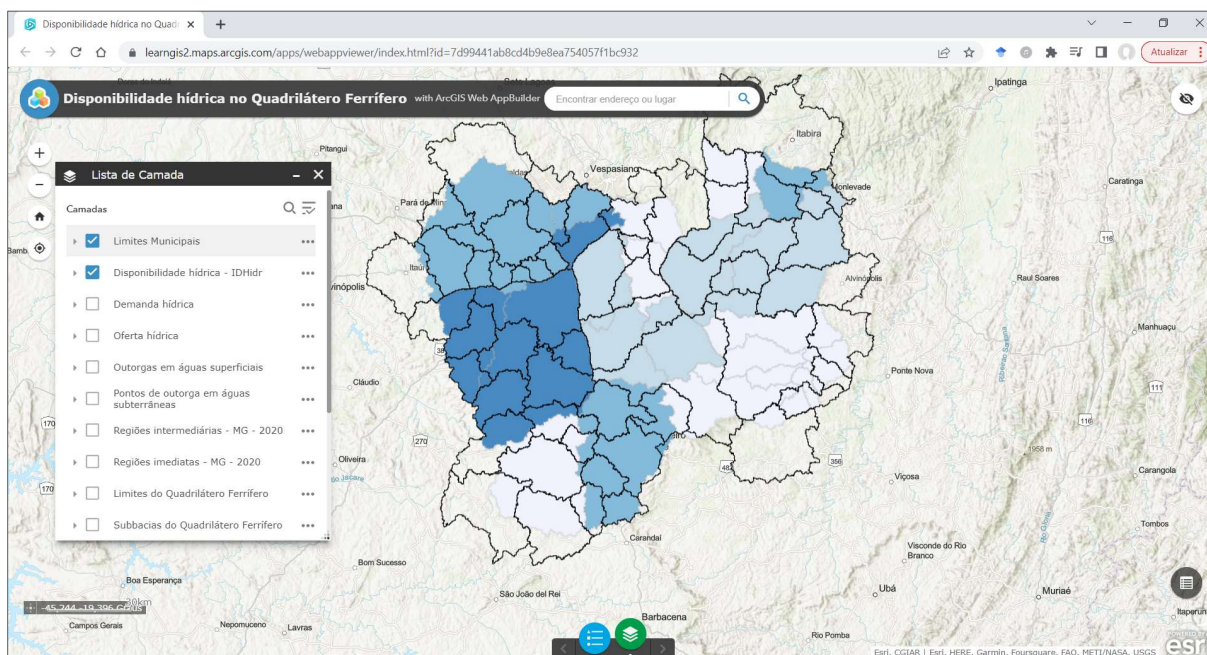
Observa-se que, ao considerar a disponibilidade das reservas renováveis, ainda que tenham sido acrescentadas às demandas as outorgas em águas subterrâneas, a classificação da disponibilidade melhora em quase todas as bacias, exceto na porção mais a Nordeste da bacia do Rio das Velhas. As bacias dos rios Piranga, Piracicaba e das Velhas são majoritariamente classificadas como satisfatórias, enquanto a bacia do Rio Paraopeba tem sua classificação alterada para crítica, em que a disponibilidade é menor nos períodos de estiagem, mas a retirada não ultrapassa a disponibilidade da bacia. Nesse cenário, a gestão de recursos hídricos se faz necessária para evitar o agravamento da situação ao longo do tempo.

As águas subterrâneas já são amplamente utilizadas na região, representando quase 40% da vazão total outorgada. Quase 35% do total outorgado, no entanto, é destinado a ‘outras’ finalidades, dentre as quais constam a lavagem de veículos, aspersão de vias e os rebaixamentos para mineração. Além disso, não há uma regulamentação para a vazão de referência para as outorgas ou metodologia de cálculo da reserva explorável. Assim, ainda que seja inequívoca a importância deste recurso, não se observa um acompanhamento técnico adequado se sua utilização, sendo que as outorgas são analisadas em separado, sem que se considere possíveis impactos do uso de um recurso sobre outro. Em cenários de escassez a Lei das Águas prevê a priorização do consumo humano e de animais, de modo que, visto a diferença que as águas subterrâneas podem ter na disponibilidade das bacias, é de suma importância a gestão adequada desse recurso.

Mapa Web

Os produtos elaborados no decorrer deste trabalho compõem um aplicativo web, onde o usuário pode habilitar todas as camadas ou apenas aquelas de interesse, assim como consultar as outorgas utilizadas, as estações hidrometeorológicas, alterar o mapa base e visualizar os municípios do QF. O aplicativo foi disponibilizado gratuitamente e pode ser acessado de qualquer local, via desktop e mobiles, sendo necessária apenas que o usuário possua conexão com internet. A figura x apresenta uma visualização do webmap. Link para acesso: <https://learnigis2.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=7d99441ab8cd4b9e8ea754057f1bc932>.

Figura 43. Visualização do webmap criado para disponibilizar os produtos gerados no decorrer do trabalho.



Fonte. Elaborado pela autora.

9. CONCLUSÕES

A aplicação do Modelo de Grandes Bacia MGB – IPH para regionalização de vazões se mostrou adequada para o cálculo da vazão mínima Q7,10, que serviu como base para quantificar a oferta hídrica nas bacias analisadas. As reservas explotáveis associadas às águas subterrâneas foram estimadas por meio da separação do escoamento base por meio do Filtro Eckhardt.

As demandas hídricas foram quantificadas a partir das outorgas de uso consuntivo disponibilizadas ao público através do CNARH e a análise dos dados permitiu verificar que existem 2480 outorgas de uso consuntivo em águas subterrâneas, 454 em águas superficiais, mas em relação ao valor outorgado, aquelas em águas superficiais representam 61% do valor total. As principais finalidades de uso são o abastecimento público, que representa 43% do total outorgado, o uso industrial em torno de 16% e o consumo humano, 10%.

A avaliação da disponibilidade com base no IDHidr demonstrou que há diferença na classificação quando se consideram as águas subterrâneas, já amplamente usadas na região. Quando se consideram apenas as águas superficiais observa-se um maior número de sub-bacias em situação crítica, muito crítica ou extremamente crítica. Essa análise se demonstrou útil para demonstrar a importância dos recursos subterrâneos para a classificação da disponibilidade hídrica diante da interação intrínseca dos meios.

A geovisualização via internet se mostrou viável e permite que usuários acessem os dados gerados de forma fácil e sem custo. Com isso, o usuário tem acesso aos dados de forma fácil e sem custos, de modo que a ferramenta se mostra como uma boa alternativa de compartilhamento e exploração das informações, podendo auxiliar na gestão participativa dos recursos hídricos na área estudada.

10. REFERÊNCIAS

- AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Topologia Hídrica**: método de construção e modelagem da base hidrográfica para suporte à gestão de recursos hídricos: versão 1.11. Brasília: ANA, 2006. Disponível em: <<https://dadosabertos.ana.gov.br/>>
- AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **ODS 6 no Brasil**: visão da ANA sobre os indicadores. Brasília: ANA, 2019. 94 p. Disponível em: <https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Busca/Download?codigoArquivo=135728>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil** - Brasília: ANA, 2019. 75 p.: il. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/aceso-tematico/snirh/snirh-1/aceso-tematico/usos-da-agua>>
- AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Atlas Água**: segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília: ANA, 2021. 332 p. Disponível em: <https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/asp/download.asp?codigo=151307&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=90683&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0>
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (BRASIL). **Anuário Mineral Brasileiro**: principais substâncias metálicas. Ano Base 2020. Brasília: ANM, 2021. 23 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>>
- ALKMIM, Fernando F.; MARSHAK, Stephen. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301926898000321>>
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. O embasamento da Plataforma Sul Americana. In: **O Precambriano do Brasil**, p. 1-5. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1984. 378 p.
- ALMEIDA F.F.M. **Geologia do Continente Sul Americano**: Evolução da Obra de Fernando Marques de Almeida. Organizadores: Virginia Mantesso-Neto, Andre Bartoreli, Celso Dal Ré Carneiro, Benjamin Bley de Brito-Neves.. São Paulo. 2004. 647 p.
- ALMEIDA L. G., ENDO I., FONSECA M. A. 2002. Sistema de nappes na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, Anais, p. 615
- ALMEIDA L. G., CASTRO P. T., ENDO I., FONSECA M. A. O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: Uma Revisão Estratigráfica. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 35, n. 2, p. 77-186. 2005.
- Alves, M.E.; Meyer, A.O; Fan, F.M.; Paiva, R.C.D. 2020. **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools**. Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS.

ANGELONI, M. Elementos intervenientes na tomada de decisão. **Ciência da informação**, v. 32, p. 17-22, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ci/a/3RVhpdpmmsgkwCxtCC6sXkt/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 02 ago. 2021.

ARAÚJO, A. S. **Calibração multiobjetivo de modelos hidrológico e de superfície atmosférico**. 121 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2014.

ARSAE-MG. AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Relatório de Fiscalização**: Sistema Integrado de Abastecimento de Água da RMBH – Bacia do Rio das Velhas. Belo Horizonte: ARSAE-MG, 2013a. Disponível em <http://arsae.mg.gov.br/images/documentos/rf_tec_op_saa_bacia_rio_das_velhas.pdf>

ARSAE-MG. AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Relatório de Fiscalização**: Sistema Integrado de Abastecimento de Água da RMBH - Bacia Paraopeba. Belo Horizonte: ARSAE-MG, 2013b. Disponível em: <http://arsae.mg.gov.br/images/documentos/rf_tec_op_saa_sistema_bacia_paraopeba.pdf>

AZEVEDO, Ú. R. D., Machado, M. M. M., Castro, P. D. T. A., Renger, F. E., Trevisol, A., & Beato, D. A. C. (2012). Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. CPRM. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17149>

BABINSKI, M.; CHEMALE JR., F.; VAN SCHMUS, W.R. 1991. Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: **Congresso Brasileiro de Geoquímica**, 3. São Paulo, 1991. Anais. São Paulo, SBGq, vol. 1, p. 628-631

BACANI, V.M. **Geotecnologias aplicadas ao ordenamento físico-territorial da bacia do alto rio Coxim, MS**. 2010. Tese (Doutorado em Geografia Física). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BARROS, Luiz Fernando de Paula; JUNIOR, Antônio Pereira Magalhães. O papel da bacia do Rio Doce na configuração geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero/MG. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 145-167, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/36117>>

BARROS, Luiz Fernando de Paula; OLIVEIRA, Letícia Augusta Faria de. Recente Quadro dos Estudos Sobre Geomorfologia Fluvial no Quadrilátero Ferrífero-MG. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/ugb/app/webroot/sinageo/7/0325.pdf>>

BAYER, D. M.; COLLISCHONN, W. Análise de sensibilidade do Modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l], v. 18, p. 165-179, 2013. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/229615>>

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.

BERTACHINI, Antonio Carlos; GIRODO, Antonio C; GRANDCHAMP, Cesar; SOUZA K. et al. Dewatering of the Pico de Itabirito Iron Mine: an environmental reclamation case study. **Mine, Water & Environment**, 1999. IMWA Congress, Sevilla, Espanha. <https://www.imwa.info/docs/imwa_1999/IMWA1999_Bertachini_339.pdf>

BERTACHINI, Antonio Carlos. Hidrogeologia e desaguamento da mina de Águas Claras. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8, 1994, Recife. Anais... Recife: ABAS/DNPM/CPRM, 1994. p. 274-283. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24426>>

BOLFE, E. L.; VICENTE, L. E.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. de C.; BATISTELLA, M. **A evolução histórica dos Sistemas de Informações Geográficas**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011. 17p. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/922480/1/02511.pdf>> Acesso em: 15 mai 2021.

BOSCARDIN BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. da. **Aquífero Guarani**: A verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba. Grupo Integrado de Aquicultura e Estudos ambientais, Curitiba – PR. 2004. 214p.

BRASIL. Lei nº 9.433/1997. Instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 09 jan. 1997.

CABRAL, J. J. S. P.; DEMETRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C., FILHO, J. M, FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia**: Conceitos e Aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro - RJ, 2008. v1. 812p.

CAMARA, G; DAVIS, C; MONTEIRO, A. M. V. (org). **Introdução à ciência da Geoinformação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M.A.; HEMERLY, A.; MEDEIROS, C.M.B.; MAGALHÃES, G. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Curitiba, SAGRES Editora, 1997.

CARVALHO FILHO, Amaury de; CURI, Nilton; SHINZATO, Edgar. Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 903-916, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pab/a/WvR5dG3Pjpyw9sCYjzqm8rs/?format=html&lang=pt>>

CAVALCANTI, L. C. de S.; CORRÊA, A. C. de B. Geossistemas e geografia no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 61, n. 2, p. 3-33, 2017. Disponível em: <<https://www.rbg.ibge.gov.br/index.php/rbg/article/view/82>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

CASTANY, G. **Tratado Practico de las Aguas Subterraneas**. Barcelona: Omega. 1971.

CASTRO, J. F. M. Comunicação Cartográfica e Visualização Cartográfica. **Boletim Paulista De Geografia**, São Paulo, n. 87, p. 67-83, 2007. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/30939029/BPG_87_Cartografia.pdf> Acesso em: 18 mai 2021.

CHEMALE JR, Farid; ROSIÉRE, Carlos Alberto; ENDO, Issamu. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Um modelo. **Pesquisas em Geociências**, v. 18, n. 2, p. 104-127, 1991. <
<https://www.seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/21350/12319>>

CHRISTOPHERSON, Robert W. **Geosystems: an introduction to physical geography**. New Jersey: Prentice Hall. 1997.

CODEMIG. COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Portal da Geologia de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CODEMIG, 2021. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/sobre--o-projeto/>>. Acesso em: 5 jul. 2021.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em:< <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2500>>

COLLISCHONN, Walter; FAN, Fernando Mainardi. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2013.

Collischonn, W.; Gama, C.H.A.; Siqueira, V.A; Paiva, R.C.D.; Fleischmann, A.S. 2020. **Manual de Referência Teórica do MGB**. HGE, IPH, UFRGS.

CONEJO, João Gilberto Lotufo; MARANHÃO, Ney; BURNETT, João Augusto B., ANTUNES, Bolivar. Sobre um índice de disponibilidade hídrica aplicável à gestão dos recursos hídricos. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande – MS. 2009. Disponível em: < <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=10857>>

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea**. Volume 2. Barcelona: Omega, 1976.

D'ALGE, J. C. L. Cartografia para geoprocessamento. In: **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <<https://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap6-cartografia.pdf>> Acesso em: 15 mai 2021.

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

DE MOURA, Micaella Raíssa Falcão; DA SILVA, Simone Rosa. Lei das águas e a gestão dos recursos hídricos no Brasil: contribuições para o debate. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 13, n. 3, 2017. Disponível em < https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/1686 >

DERBY, Orville. A. The Serra of Espinhaço. **Journal of Geology**, n. 14, p. 374-401, 1906. Disponível em: < <https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.1086/621316>>

DEUS, B. V.; ZEILHOFER, P.; ARAUJO, G. C.; SANTOS, A. S. L. dos. Interpolação Pluviométrica na Bacia do Alto e Médio Rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e

interpoladores. In: **Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 3., 2010, Recife. Anais... Recife: CTG/UFPE. 2010. p 1-7.

DINIZ, J. A. O.; PAULA, T. L. F. de; MONTEIRO, A. B.; FEITOSA, F. A. C.; CARDOSO, A. de C. Taxonomia hidrogeológica - unidades básicas de referência. **XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. 2014. Disponível em: <<http://dspace.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16615>>

DORR, J.V.N. The Cauê Itabirite. In: SBG, Boletim da Sociedade Brasileira de Geociências. São Paulo. v. 7. p. 61-62. 1958a.

DORR, John Van N. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS. Prof. Pap. 641 - A, 1969. 110 p. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/pp/0641a/report.pdf>>

D'AMBROSIO, U. **Educação matemática**: da teoria à prática. Campinas: Papirus, 1996, 121 p.

ECKHARDT, Klaus. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 19, n. 2, p. 507-515, 2005. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.5675?casa_token=Kq0CIJcKf6wAAAAA:UpsgFoDag1FnNSIYE4vniHHTFnBaoQ2OXA0BlSuZkoY3sCvyNG9mMDG47BXJxBAIq5Q9KD5jCHp_1xF1dg>

Fan, F. M.; et al. (2015). Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro, Brasília-DF.

FARIAS, O. G.; FRANCISCO, C. N.; SENNA, M. C. A. Avaliação de métodos de interpolação espacial aplicados à pluviosidade em região montanhosa no litoral sul do estado Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017. Disponível em:<<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/13994>>. Acesso em 24. Out. 2021.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro; FILHO, J. M, FEITOSA; C., DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia**: Conceitos e Aplicações. 3 ed. CPRM: Rio de Janeiro, 2008. 812p.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4th edition. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

FERREIRA XAVIER, A. C., BERTACHINI, A. C., PEREZ BERTACHINI, D., & PEREIRA FILHO, M.. Sistema alternativo para o desaguamento em maciços rochosos de baixa permeabilidade. **Águas Subterrâneas**, [S.l.], 2017 Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28716>>

FITCH, P.; BRODARIC, B.; STENSON, M.; BOOTH, N. Integrated Groundwater Data Management. In: **Integrated Groundwater Management**, 2016. Disponível em: <<https://openresearchlibrary.org/viewer/dcb238ba-0c91-47c7-b339-896dbd03c079/675>>. Acesso em: 09 ago. 2021.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

FRANCÉS, A.; PARALTA, E. Utilização de aplicações informáticas em cartografia ambiental e análise de sistemas hidrogeológicos: exemplos de aplicação. **Seminário sobre a Hidroinformática em Portugal, LNEC, 15-16 Nov. 2001**, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/515>>. Acesso em 20 ago. 2021.

GALVÃO, W. S.; MENESES, P. R. **Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas**. INPE. In: XII SBSR, Goiania. Anais. 2511-2518. 2005. Disponível em:<<http://mar.te.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.01.26/doc/2511.pdf>> Acesso em: 23 out. 2021.

GRANDCHAMP, C.A.P. **Estudo da Recuperação do Aquífero Cauê e do Enchimento da Cava da Mina de Águas Claras, Serra do Curral, município de Nova Lima, MG**. 148f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003

GODINHO, A. L.; GODINHO, H. P. Breve visão do São Francisco, p. 15-24. In: GODINHO, Alexandre Lima; GODINHO, Hugo Pereira. **Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais**. Belo Horizonte: PUC Minas, v. 468, p. 15-23, 2003. <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Dos-Santos-9/publication/284534389_Ontogenese_larval_de_cinco_especies_de_peixes_do_Sao_Francisco/links/5789201e08ae5c86c99ae02a/Ontogenese-larval-de-cinco-especies-de-peixes-do-Sao-Francisco.pdf#page=15>

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para Entender a Terra**. Bookman Editora, 2013.

HARDER EC; CHAMBERLIN RT. The geology of central Minas Gerais, Brazil. Journal of Geology, n. 23, p. 341-378, 1915. Disponível em: <<https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.1086/622256>>

HESS, D. **Mcknight's physical geography: a landscape appreciation**. 11th ed. Pearson, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Normais Climatológicas do Brasil: 1991-2020**. Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>

JACOBI, Cláudia M.; CARMO, FF do. Diversidade dos campos rupestres ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Megadiversidade**, v. 4, n. 1-2, p. 24-32, 2008. Disponível em: <https://institutoprístino.org.br/wp-content/uploads/2020/04/17_Diversidade_dos_campos_rupestres_ferruginosos-1.pdf>

KAISER, I. M. Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos. 273 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

KOPPEN, W. Climatologia. Fundo de Cultura Econômica, Buenos Aires. 1931.

KRIGE, D. A Statistical Approach to Some Mine Valuation and Allied Problems on the Witwatersrand, J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afr, 52, 6, p 119-139, 1951.

LAZARIM, H. A. **Caracterização Hidrogeológica no Extremo Norte no Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Nova Lima, MG**: Proposta de Modelo. 1999. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

LU, G.Y; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. **Computer Geoscience**, v. 34, n. 9, p.1044–1055, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300408000721?casa_token=CUXrrYnkUowAAAAA:zI8dRgLWSu9d18yJuRjXroX41xfjNRxNmDLOWzIsaUphj_xtxsl8gzbAbCLVt0pvIuBuDd-RpWI>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MACEACHREN, A. M. Visualizing uncertain information. In: **Cartography perspectives**, n.13, p.10-19, 1992. Disponível em: <<https://cartographicperspectives.org/index.php/journal/article/view/cp13-maceachren/pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MACHADO, Maria Marcia Magela. **Construindo a imagem geológica do Quadrilátero Ferrífero**: conceitos e representações. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia – Universidade Federal de Minas Gerais. 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-7TRFZC>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MACHADO, N.; SCHRANK, A.; ABREU, F.R.; KNAUER, I.G.; ALMEIDA-ABREU, P.A. Resultados preliminares de geocronologia U-Pb na Serra do Espinhaço Meridional. **Boletim do Núcleo Minas Gerais-Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 10, p. 171-174, 1989.

MACHADO, R. P. P. Os novos enfoques da geografia com o apoio das tecnologias da informação geográfica. **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], n. spe, p. 203-241, 2014. DOI: 10.11606/rdg.v0i0.548. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/85554>. Acesso em: 20 ago. 2021.

MAGALHÃES, I. A. L.; ALMEIDA, K. L.; THIAGO, C. R. L.; JUNIOR, B. S. G.; ZANETTI, S. S.; CECÍLIO, R. A. Análise de métodos de interpolação da precipitação pluvial na região norte do estado do Espírito Santo, Brasil. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 16., 2013, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu:INPE, 2013. p. 5651-5657.

MAIDMENT, David R. Environmental modeling with GIS. In: **GIS and hydrologic modeling**. p. 147-167, 1993. Oxford University Press, New York.

MANZIONE, Rodrigo Lilla. **Águas subterrâneas**: Conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar. Jundiaí: Paco Editorial, 2015. 388 p.

MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economy Geology**, 58, p. 1246-1266, 1963.

MAXWELL, C. H. (1958). The Batatal Formation. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, 2(7), 60-61.

MEDINA, A. I. DE M.; DANTAS, M. E.; SAADI, A. Projeto APA SUL RMBH - Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, 2005. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/10218/rel_apa_sulrmbhv3.pdf?sequence=19> Acesso em: 10 fev. 2023.

MENEZES, P. M. L. de; FERNANDES, M. do C. **Roteiro de cartografia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 25 Mai. 2022

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. Disponível em: <<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=23153>> Acesso em: 10 fev. 2023.

MOURA, Micaella Raíssa Falcão; SILVA, Simone Rosa. Lei das águas e a gestão dos recursos hídricos no Brasil: contribuições para o debate. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 13, n. 3, 2017. Disponível em: <https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/1686> Acesso em: 10 fev. 2023.

MOURÃO, M.A.A. **Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG**. (Tese de Doutorado). Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 297p. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-7AJNZE>>

NASH, J. Eamonn; SUTCLIFFE, Jonh V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>> Acesso em: 10 fev. 2023

NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu**. 2005. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9726>> Acesso em: 10 fev. 2023.

NOVAIS, R. R; MOREIRA, L. L.; VANELI, B. P.; JABOR, P. M. Estimativa das reservas explotáveis da bacia hidrográfica do rio Novo por meio de separação do escoamento de base de hidrogramas de vazões observadas. **6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**. Bento Gonçalves, 2018. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=197&ano=_sexto> Acesso em: 10 fev. 2023.

Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce e dos Planos de Ações de Recursos Hídricos para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2015/01/PARH_Piracicaba.pdf> Acesso em: 10 fev. 2023.

PETERSEN, J. F; SACK, D.; GABLER, R. E. **Fundamentos de Geografia Física**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

REBOUÇAS, A. da C.. Importância da água subterrânea. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

RENGER, F. E., NOCE, C. M., ROMANO, A. W. & MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, v.2, n. 1, p. 1-11. 1994. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11533>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. In: MEIRELLES, MSP. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**/Editores técnicos: Margareth Simões Penello Meirelles, Gilberto Câmara e Cláudia Maria de Almeida – Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf>

Resumo Executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Alagoas, 2016. 300 p. Disponível em: <<https://cbhsaofrancisco.org.br/plano-de-recursos-hidricos-da-bacia-hidrografica-do-rio-sao-francisco/>> Acesso em: 10 fev. 2023.

RIBEIRO, C. M. & MÓL, C. R. F. Avaliação dos parâmetros temperatura e precipitação. In: Anais do Simpósio Situação ambiental e qualidade de vida da região metropolitana de Belo Horizonte (MG). Belo Horizonte, Associação Brasileira de Geologia e Engenharia e Instituto de Geociências da UFMG. p 67-77. 1995.

ROESER, Hubert Matthias Peter; ROESER, Patricia Angelika. O Quadrilátero Ferrífero-MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. **Geonomos**, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11598>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

ROSIÈRE, Carlos A.; CHEMALE JR, Farid. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero—uma visão geral e discussão. **Geonomos**, vol. 8, n. 2, 2000. Disponível em: <<https://www.seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21350>> Acesso em: 10 fev. 2023.

RUBIO, R. F.; GRANDCHAMP, C.; REZENDE, M. L. de; FERNÁNDEZ, D. L.; BERTACHINI, A. C. Dewatering at the Capão Xavier iron open pit mine (MINAS GERAIS, BRAZIL). **Abstracts of the International Mine Water Conference**, Pretoria, Africa do Sul, 2009. Disponível em: <http://www.mwen.info/docs/imwa_2009/IMWA2009_Rubio.pdf> Acesso em: 10 fev. 2023.

SARMENTO, A. P.; WANDERLEY, H.; DA CRUZ, P. P. N. Geração do MDEHC da bacia hidrográfica do Rio Forqueta e determinação das características físicas da bacia. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/antover-sarmento/publication/280100615_geracao_do_mdehc_da_bacia_hidrografica_do_rio_forqueta_e_determinacao_das_caracteristicas_fisicas_da_bacia/links/55a93d2108aea3d086803656/g_eracao-do-mdehc-da-bacia-hidrografica-do-rio-forqueta-e-determinacao-das-caracteristicas-fisicas-da-bacia.pdf>. Acesso em: 29 out. 2021.

SCHOBENHAUS, C. et al. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil (SIGEP)**. 1. ed. Brasília. 2001.

SILVA, F. R. A paisagem do Quadrilátero Ferrífero, MG: potencial para o uso turístico da sua geologia e geomorfologia. **M. Sc., Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte**, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MPBB-79DNDW/1/disserta__o_fabiano_reis_silva.pdf>

SILVA JÚNIOR, O. B., BUENO, E. O., TUCCI, C. E. M., CASTRO, N. M. R. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n. 1, 2002. p. 21-37.

SIMMERS, I. Aridity, groundwater recharge and water resources management. **Groundwater recharge: A guide to understanding the natural recharge**. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, p. 1-20, 1990.

SIQUEIRA, Vinícius Alencar *et al.* IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** [online]. 2016, v. 21, n. 1, pp. 274-287. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>>.

SISEMA. SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2021. Disponível em: <idesisema.meioambiente.mg.gov.br>.

SLOCUM, T. A.; MCMASTER, R. M.; KESSLER, F. C.; HOWARD, H. H.; MC MASTER, R. B. **Thematic cartography and geographic visualization**. Prentice Hall. 2008.

SPERLING, E. von; GRANDCHAMP, C. A. P. Formation of a deep pit lake: case study of Aguas Claras, Brazil. **Journal of Mining and Environment**, vol. 1, n. 1, 2010. Disponível em: <http://jme.shahroodut.ac.ir/?_action=articleInfo&article=6>.

SPINOLA, Carolina de Andrade; VITORIA, Fabricio; CERQUEIRA, Lucas. A Lei das Águas e o São Francisco: os limites da gestão descentralizada dos recursos hídricos no Brasil. **Rde-Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 18, n. 33, 2016.

SOARES, Maria Aparecida. **Análise de indicadores para avaliação de desempenho econômico-financeiro de operadoras de planos de saúde brasileiras: uma aplicação da análise fatorial**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12136/tde-15122006-121519/en.php>>

SOBREIRO NETO, A. F. BERTACHINI, A. C.; GIRODO, A. C.; ALMEIDA, D. C. DE. Hydrogeological model of the itabira iron ore district. IMWA Symposium 2001. **Metalurgia & Materiais ABM (Brazil)**, v. 58, p. 64-70, 2002. <http://www.imwa.de/docs/imwa_2001/HidroModel.pdf>

SOUZA, L. A. Do Quadrilátero Ferrífero ao Quadrilátero Aquífero: territorialidades conflitantes na produção de um espaço social extensivo à Região Metropolitana de Belo Horizonte-MG. **Geosp**, v. 25, n. 3, e-188865, dez. 2021. ISSN 2179-0892. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/188865>>.

SOUSA, Heber Tormentino de. **Sistema computacional para regionalização de vazões**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2009. Disponível em: <http://www.gprh.ufv.br/docs/Dissertacoes_mestrado/Heber_Tormentino_Sousa.PDF> Acesso em: 10 fev. 2023.

TÁRCIA, R.; SOBREIRO NETO, A.; SANTANA, F. Rebaixamento do lençol freático da Mina de Conceição. **Águas Subterrâneas**, 1986. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23630>>

UFOP. Centro de Estudos Avançados: O Quadrilátero Ferrífero 2050. 2020. Disponível em: <<https://qfe2050.ufop.br/>>. Acesso em: setembro de 2021.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS/ABRH, 1998.

VARAJAO, C. A. C. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Geology**, v. 21, n. 2, p. 138-145, 1991. <<http://bjg.siteoficial.ws/1991/n.2/5.pdf>>

VERTESSY, R.A; HATTON, T.J.; O'SHAUGHNESSY, P.J.; JAYASURIYA. M.D.A. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. **Journal of Hydrology**, Volume 150, Issues 2–4, 1993, Pages 665-700, Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002216949390131R>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

VON SPERLING, E.; GRANDCHAMP, C. A. P. Formation of a deep pit lake: case study of Aguas Claras, Brazil. **International Journal of Mining and Environment**, v. 1, p. 49-54, 2010. Disponível em: https://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J_pdf/1030220100106.pdf Acesso em: 10 fev. 2023.

XAVIER-DA-SILVA, J. O que é Geoprocessamento. **Revista do Crea-RJ**, v. 79, n. 1, p. 42-44, 2009. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/lga/tiagomarinino/artigos/oqueegeoprocessamento.pdf>>. Acesso em: 15 mai 2021.

XAVIER-DA-SILVA, Jorge; GOES, M. H. de B.; MARINO, T. B. Geoinclusão: um caminho do dado à informação. **Revista de Geografia-PPGEO-UFJF**, v. 1, n. 1, 2011. Disponível em: <<http://periodicos.ufjf.br/index.php/geografia/article/view/17881>>. Acesso em: 20 ago. 2021

XAVIER-DA-SILVA, J.. Geoprocessamento no Apoio à Decisão. **Continentes – Revista de Geografia**, n. 9, p. 105-115, jul. 2016. Disponível em: <<http://www.revistacontinentes.com.br/index.php/continentes/article/view/106>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

WEINER, Daniel; HARRIS, Trevor M.; CRAIG, William J. Community participation and geographic information systems. In: **Community Participation and Geographical Information Systems**. CRC Press, 2002. p. 3-16.

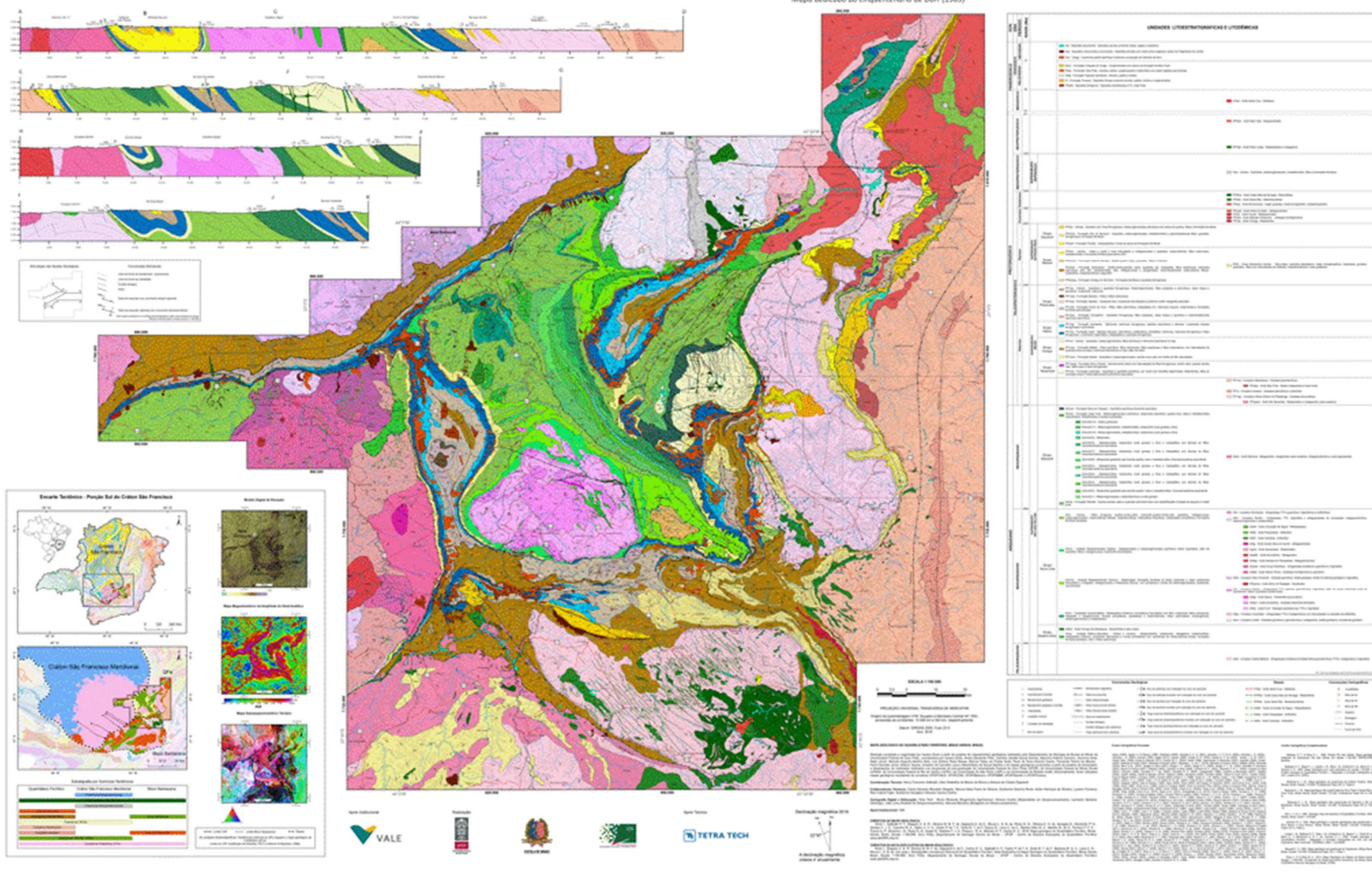
WINTER, T.C.; HARVEY, J.W.; FRANKE, O.L.; ALLEY, W.M. **Ground Water and Surface Water – A single resource**, USGS Circular, n. 1139, p. 1-79. 1998. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/>> Acesso em: 10 fev. 2023

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information**, sixth edition, 2009. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10473> Acesso em: 18 ago. 2021

ANEXOS

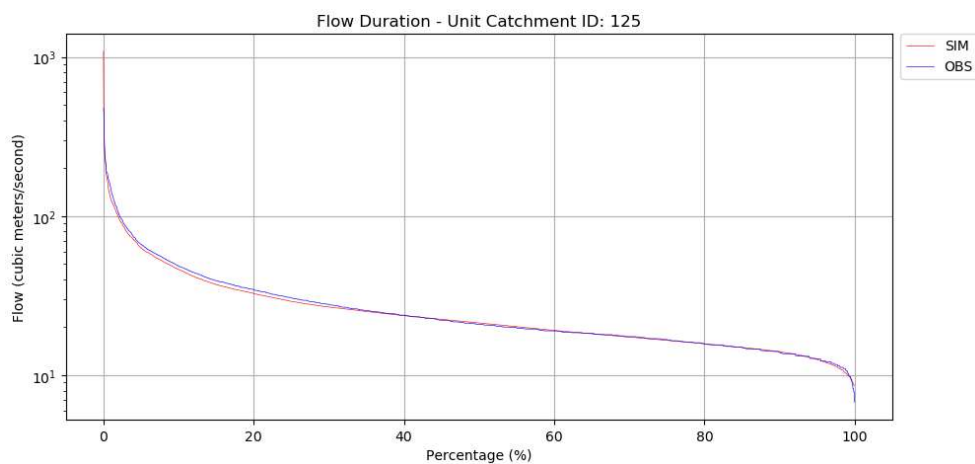
MAPA GEOLÓGICO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS, BRASIL (2019)

Massa dedicada ao cinquentenário de Dery (1962)

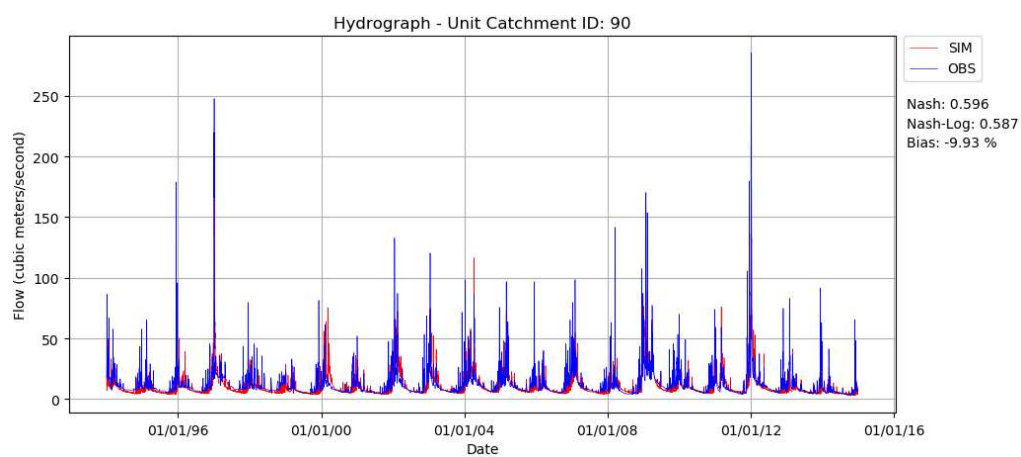
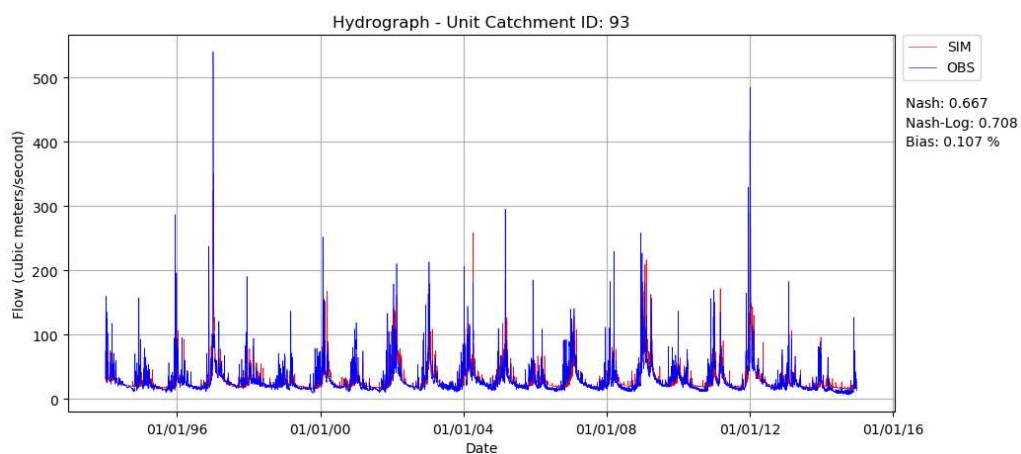


ANEXO 2 – Hidrogramas gerados durante a simulação no MGB-IPH

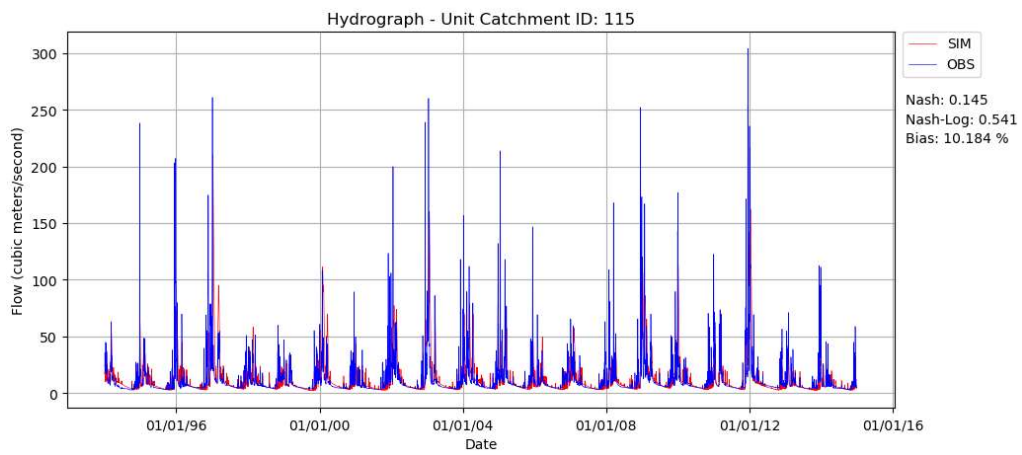
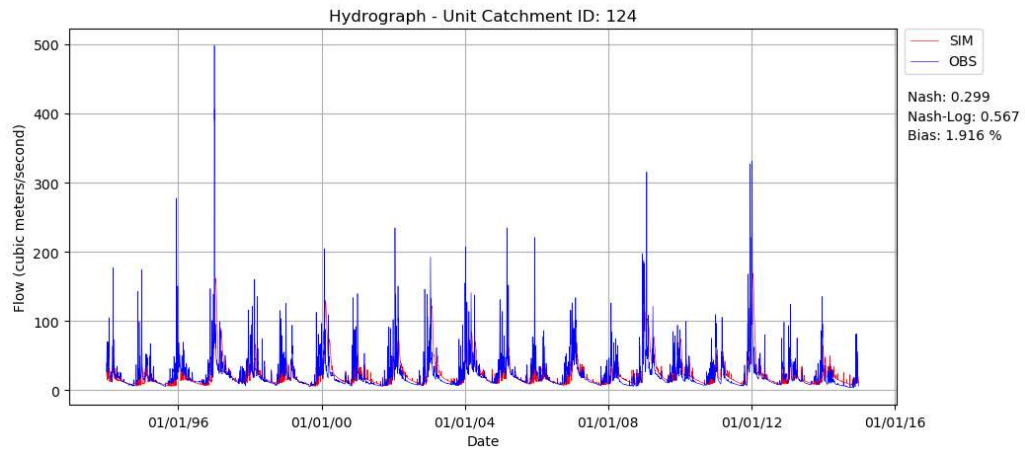
Bacia do Rio das Velhas



Bacia do Rio Piranga



Bacia do Rio Piracicaba



Bacia do Rio Paraopeba

