



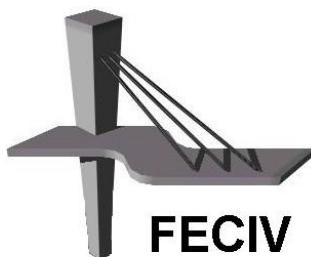
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**OTIMIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO HÍDRICO
SUPERFICIAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO ARAGUARI, TRIÂNGULO MINEIRO**

HÉLIO CORREIA DA SILVA JHUNIOR

UBERLÂNDIA, 15 DE SETEMBRO DE 2017



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



HÉLIO CORREIA DA SILVA JHUNIOR

OTIMIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO HÍDRICO SUPERFICIAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAGUARI, TRIÂNGULO MINEIRO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla

Uberlândia, 15 de setembro de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586o
2017 Silva Jhuniór, Hélio Correia da, 1991-
Otimização do aproveitamento hídrico superficial na bacia
hidrográfica do rio Araguari, Triângulo Mineiro / Hélio Correia da Silva
Jhuniór. - 2017.
241 f. : il.

Orientador: Marcio Ricardo Salla.
Dissertação (mestrado) -- Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.45>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Recurso hídricos - Teses. 3.
Aproveitamento hídrico - Teses. 4. Araguari, Rio, Bacia (MG) - Teses. I.
Salla, Marcio Ricardo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

ATA Nº: 193/2017

CANDIDATO: Hélio Correia da Silva Jhunior

Nº. Matrícula: 11522ECV009

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla

TÍTULO: "Otimização do aproveitamento hídrico superficial na bacia hidrográfica do rio Araguari, Triângulo Mineiro".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Estudos de Aproveitamento Hídrico e Autodepuração em Bacias Hidrográficas nas Unidades de Planejamento de Gestão em Recursos Hídricos dos Rios Paranaíba e Grande (Lado Mineiro)

DATA DA DEFESA: 15 de setembro de 2017

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 09:00h - 11:30h

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE, assim composta: Professores Doutores: **José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU; Marcos von Sperling – DESA/UFMG e Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU** orientador do candidato. Ressalta-se que todos os membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato aprovado. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof. Dr. Marcos von Sperling – DESA/UFMG**

Membro interno: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**

Uberlândia, 15 de setembro de 2017.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Uberlândia, por intermédio da Faculdade de Engenharia Civil, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Prof. Marcio Ricardo Salla, pela amizade, pelos conselhos e pela orientação na realização deste trabalho.

Ao Prof. Carlos Eugênio Pereira, pela orientação na realização deste trabalho.

Ao Prof. José Eduardo Alamy Filho, pela orientação na realização deste trabalho.

À todos os meus familiares, pelo incentivo e pelas orações.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos, pelo convívio, amizade e apoio.

A todos os demais amigos, professores e funcionários que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

“Saber muito não lhe torna inteligente. A inteligência se traduz na forma que você recolhe, julga, maneja e, sobretudo, onde e como aplica esta informação.”

Carl Sagan

JHUNIOR, H. C. S. *Otimização do aproveitamento hídrico superficial na bacia hidrográfica do rio Araguari, Triângulo Mineiro*. 2017. 252p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

RESUMO

A gestão dos recursos hídricos proporciona um melhor aproveitamento, controle e conservação das águas, porém, a complexidade deste planejamento está em atender os usos múltiplos de forma integrada e otimizada para todo o sistema. Para que a sustentabilidade do sistema seja eficiente, a alocação das disponibilidades hídricas entre os seus múltiplos usos deve ser feita em conciliação com as questões ambientais. A otimização de um sistema de recursos hídricos é um problema complexo de engenharia, sendo necessária uma formulação matemática, atrelada a algoritmos computacionais, para que se consiga descrever sua dinâmica natural. Esta é uma área em desenvolvimento, mas que já apresenta ferramentas capazes de gerar soluções aplicáveis à realidade. Dentre elas se destaca o módulo OPTIGES, vinculado ao software de planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas AQUATOOL. Neste contexto, por meio do módulo OPTIGES, este estudo buscou otimizar o aproveitamento hídrico superficial na bacia do rio Araguari, a qual é composta por diversos rios e reservatórios para aproveitamentos hidroelétricos em cascata, além de uma série de outorgas consuntivas. Foram avaliadas metodologias e critérios utilizados na estimativa da vazão de referência ($Q_{7,10}$), base para processos de outorga. Para cálculo da vazão $Q_{7,10}$ foi utilizada a metodologia fornecida pelo Atlas Digital das Águas de Minas, sendo realizada também uma comparação com os valores obtidos pelo método de distribuição de probabilidade de Weibull. As diferenças relativas encontradas entre estas metodologias foram significativas, onde, em 75% dos trechos analisados ao longo da bacia, este valor foi superior a 10%, atingindo um máximo de 161%. Os resultados mostraram que, dependendo do método utilizado, o potencial de aproveitamento hídrico pode ser limitado, assim como ecossistemas que dependem da vazão mínima residual (50% da $Q_{7,10}$) podem estar ameaçados. No que se refere ao estudo de otimização do aproveitamento hídrico ao longo da bacia, foram avaliados critérios sazonais para a estimativa da vazão $Q_{7,10}$ frente ao critério atual (50% da $Q_{7,10}$ anual). Adotando duas estações ao longo do ano (chuvosa e seca), os resultados

encontrados mostraram um aumento da vazão disponível considerando a sazonalidade dos regimes fluviométricos, onde, para o período chuvoso, os valores de $Q_{7,10}$ foram em média 47% maiores que aqueles obtidos pelo critério anual, e para o período seco, em média 10% superiores. Também foi realizada uma análise do percentual máximo da $Q_{7,10}$ a ser outorgado, buscando indicar qual porcentagem representaria uma maior eficiência na otimização do aproveitamento hídrico. Os resultados mostraram que a transição de 50% para 70% da $Q_{7,10}$ como critério de outorga teve o maior impacto no aumento da disponibilidade para captação e na solução de conflitos pelo uso da água. No que se refere às áreas críticas com conflitos entre demandas consuntivas, foram estimados racionamentos necessários em períodos de estiagem para que o volume outorgado não atingisse a vazão mínima residual de 50% da $Q_{7,10}$. Os valores máximos de cortes no volume captado obtidos chegaram a 55%. Apesar disto, a situação geral na bacia hidrográfica quanto à disponibilidade dos recursos hídricos é confortável, principalmente próximo aos rios principais, onde o volume outorgado não chega a 30% do permitido, e junto aos quatro grandes reservatórios (Nova Ponte, Miranda, Capim Branco 1 e Capim Branco 2) do rio Araguari, onde o potencial ainda existente para captação se mostra favorável, com capacidade para abastecer cidades do porte de Uberlândia.

Palavras-chave: Recursos hídricos, outorgas, otimização, AQUATOOL, OPTIGES, rio Araguari, vazão de referência.

JHUNIOR, H. C. S. *Optimization of surface water use in the Araguari river basin, Triângulo Mineiro*. 2017. 252pp. MSc Dissertation, Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2017.

ABSTRACT

The management of water resources provides a better use, control and conservation of water, however, the complexity of this planning is to attend multiple uses in an integrated and optimized way for the entire system. In order for the sustainability of the system to be efficient, the allocation of water availability among its multiple uses must be made in conciliation with environmental issues. The optimization of a water resources system is a complex engineering problem, requiring a mathematical formulation, coupled with computational algorithms, to be able to describe its natural dynamics. This is an area in development, but it already presents tools capable of generating solutions applicable to reality, among them the OPTIGES module linked to the AQUATOOL Decision Support System. In this context, through the OPTIGES module, this study sought to optimize the surface water utilization in the Araguari river basin, which is composed of several rivers and cascade hydroelectric reservoirs, in addition to a series of consumptive grants. Methodologies and criteria used to estimate the reference flow ($Q_{7,10}$), basis for granting processes, were evaluated. In order to calculate the $Q_{7,10}$ flow rate, the methodology provided by Atlas Digital das Águas de Minas was used, and a comparison was made with the values obtained by the Weibull probability distribution method. The relative differences found among these methodologies were significant, where, in 75% of the stretches analyzed along the basin, this value was higher than 10%, reaching a maximum of 161%. The results showed that, depending on the method used, the potential for water utilization may be limited, as well as ecosystems that depend on the minimum residual flow (50% of $Q_{7,10}$) may be threatened. Regarding the study of optimization of the water use along the basin, seasonal criteria were evaluated for the estimation of flow $Q_{7,10}$ against the current criterion (50% of annual $Q_{7,10}$). By adopting two seasons throughout the year (rainy and dry), the results showed an increase in the available flow considering the seasonality of fluviometric regimes, where, for the rainy season, $Q_{7,10}$ values were on average 47% higher than those obtained by the annual

criterion, and for the dry period, on average 10% higher. An analysis of the maximum percentage of $Q_{7,10}$ to be granted was also carried out, aiming to indicate which percentage would represent a greater efficiency in the optimization of the water use. The results showed that the transition from 50% to 70% of $Q_{7,10}$ as a concession criterion had the greatest impact on increasing water availability and conflict resolution. Regarding the critical areas with conflicts between demands, rationing was necessary in drought periods so that the volume granted did not reach the residual minimum flow rate of 50% of $Q_{7,10}$. The maximum values of cuts in the obtained volume reached 55%. Despite this, the general situation in the river basin and the availability of water resources is comfortable, especially close to the main rivers, where the volume granted does not reach 30% of the allowed, and next to the four large reservoirs (Nova Ponte, Miranda, Capim Branco 1 and Capim Branco 2) of the Araguari river, where the potential still exists for captation is favorable, with capacity to supply cities of the size of Uberlândia.

Keywords: Water resources, grants, optimization, AQUATOOL, OPTIGES, Araguari river, reference flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Disponibilidade e demanda de recursos hídricos, ao longo do rio Tietê	25
Figura 2 – Relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica em: (a) principais cursos de água no país; (b) bacia do Paraná	27
Figura 3 – Situação da chuva no período 2012 a 2014.....	29
Figura 4 – Índice padronizado de precipitação.....	30
Figura 5 – Enquadramento dos corpos de água segundo uso	34
Figura 6 – Área irrigável por pivôs centrais, por região hidrográfica no ano de 2014.....	36
Figura 7 – Vazão de retirada para irrigação (m³/s) em 2014	36
Figura 8 – Fluxograma de funcionamento da ferramenta AQUATOOL	66
Figura 9 – Divisão das sub-bacias juntamente com a identificação dos principais rios em toda a bacia do rio Araguari	75
Figura 10 – Estações fluviométricas na bacia do rio Araguari.....	78
Figura 11 – Estações pluviométricas na bacia do rio Araguari	78
Figura 12 – Estações climatológicas responsáveis pelo fornecimento dos dados de evapotranspiração na bacia do rio Araguari	79
Figura 13 – Método do Inverso Ponderado das Distâncias	81
Figura 14 – Esquema do escoamento total modelo HBV	83
Figura 15 – Classificação do uso e ocupação do solo na bacia do rio Araguari	87
Figura 16 – Postos fluviométricos instalados	89
Figura 17 – Outorgas consuntivas na bacia do rio Araguari	91
Figura 18 – Interface Atlas Digital das Águas de Minas.....	95
Figura 19 – <i>Layout</i> para configuração do elemento “toma ou captação” para uma demanda de irrigação	99
Figura 20 – <i>Layout</i> para configuração do elemento “demanda”	101
Figura 21 – <i>Layout</i> para configuração do elemento “conducción ou condução”	106
Figura 22 – <i>Layout</i> para configuração do elemento “aportación ou entrada”	107
Figura 23 – <i>Layout</i> para configuração da aba dados físicos do elemento “embalse ou reservatório”	108
Figura 24 – <i>Layout</i> para configuração da aba volumes do elemento “embalse ou reservatório”	109

Figura 25 – Volumes operacionais de um reservatório	110
Figura 26 – <i>Layout</i> para configuração da aba “Sup./Vol.” do elemento “embalse ou reservatório”	110
Figura 27 – <i>Layout</i> para configuração da aba taxa de evaporação do elemento “embalse ou reservatório”	111
Figura 28 – Topologia da bacia do rio Araguari (alto curso do rio Quebra-Anzol)	112
Figura 29 – Exemplo de uma bifurcação na topologia	115
Figura 30 – Estações fluviométricas utilizadas na calibração dos parâmetros do modelo HBV, e respectivas sub-bacias onde estes foram aplicados.....	127
Figura 31 – Classificação do uso e ocupação do solo na bacia do rio Araguari	128
Figura 32 – Subdivisões da bacia do Ribeirão Santo Antônio	130
Figura 33 – Curvas-chave nas estações fluviométricas PF	132
Figura 34 – Comparação entre dados monitorados e dados simulados de vazão.....	134
Figura 35 – Volumes mensais outorgados em toda a bacia do rio Araguari	136
Figura 36 – Diferenças relativas (DR%) entre os valores de $Q_{7,10}$ com a frequência de ocorrência	138
Figura 37 – Diferenças relativas entre métodos de cálculo da $Q_{7,10}$ para o período de estiagem	140
Figura 38 – Percentual hídrico utilizado baseado na $Q_{7,10}$ calculada pela Equação (15) ($Q_{7,10}$ UFV)	143
Figura 39 – Percentual hídrico utilizado baseado na $Q_{7,10}$ calculada pelo método de distribuição de Weibull ($Q_{7,10}$ SISCAH)	144
Figura 40 – Diferenças relativas (DR%) entre os valores de $Q_{7,10}$ com a frequência de ocorrência	146
Figura 41 – Diferença relativa entre $Q_{7,10}$ seca e $Q_{7,10}$ anual	147
Figura 42 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 50% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período chuvoso.....	150
Figura 43 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 50% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco	151
Figura 44 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 50% da $Q_{7,10}$ com base sazonal para o período chuvoso.....	153
Figura 45 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 50% da $Q_{7,10}$ com base sazonal para o período seco	154

Figura 46 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 60% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período chuvoso.....	158
Figura 47 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 60% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco	159
Figura 48 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 70% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período chuvoso.....	160
Figura 49 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 70% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco	161
Figura 50 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 80% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período chuvoso.....	162
Figura 51 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 80% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco	163
Figura 52 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 90% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período chuvoso.....	164
Figura 53 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 90% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco	165
Figura 54 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 100% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período chuvoso.....	166
Figura 55 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 100% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco	167
Figura 56 – Porcentagem da área da bacia referente a cada intervalo da classificação no período chuvoso.....	168
Figura 57 – Porcentagem da área da bacia referente a cada intervalo da classificação no período seco.....	168
Figura 58 – Porcentagem dos trechos da topologia da bacia acima da volume máximo permitido de captação para cada cenário	169
Figura 59 – Porcentagens da área da bacia do rio Araguari com o volume captado abaixo do máximo permitido para os critérios analisados	171
Figura 60 – Porcentagens da área da bacia do rio Araguari com o volume captado acima do máximo permitido para os critérios analisados	171
Figura 61 – Diferenças entre as áreas com volume captado abaixo do máximo outorgável na mudança para cada critério proposto	172

Figura 62 – Diferenças entre as áreas com volume captado acima do máximo outorgável na mudança para cada critério proposto	172
Figura 63 – Regiões críticas na bacia do rio Araguari, com a localização e o tipo das outorgas	177
Figura 64 – Relatório de análise da região 2 da sub-bacia do rio Uberabinha referente à demanda de abastecimento público	178
Figura 65 – Relatório de análise da região 1 da sub-bacia do rio Uberabinha referente à demanda de abastecimento público	178
Figura 66 – Déficit para as demandas com consumo industrial na região 4	180
Figura 67 – Relatório de análise da região 4 da sub-bacia do rio Capivara referente à demanda por consumo industrial	180
Figura 68 – Déficit apresentado para as demandas com consumo industrial na região 3. 181	
Figura 69 – Relatório de análise da região 3 da sub-bacia do rio Capivara referente à demanda por consumo industrial	181
Figura 70 – Déficit apresentado para as demandas com consumo industrial na região 5. 182	
Figura 71 – Relatório de análise da região 5 da sub-bacia do rio Capivara referente à demanda por consumo industrial	182
Figura 72 – Relatório de análise da região 6 da sub-bacia do rio São João referente à demanda com irrigação	183
Figura 73 – Relatório de análise da região 7 da sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio referente à demanda com irrigação.....	184
Figura 74 – Relatório de análise da região 8 da sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio referente à demanda com irrigação.....	184
Figura 75 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 9	185
Figura 76 – Relatório de análise da região 9 da sub-bacia do Ribeirão das Furnas referente à demanda com irrigação	185
Figura 77 – Déficit apresentado para as demandas com dessedentação animal, lazer, lavagem e paisagismo na região 9.....	186
Figura 78 – Relatório de análise da região 9 da sub-bacia do Ribeirão das Furnas referente à demanda com dessedentação animal, lazer, lavagem, paisagismo, etc. (outros)	186
Figura 79 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 10	187
Figura 80 – Relatório de análise da região 10 da sub-bacia do Médio Araguari referente à demanda com irrigação.....	187

Figura 81 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 11	188
Figura 82 – Relatório de análise da região 11 da sub-bacia do Alto Quebra-Anzol referente à demanda com irrigação	188
Figura 83 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 12	189
Figura 84 – Relatório de análise da região 12 da sub-bacia do Alto Quebra-Anzol referente à demanda com irrigação	189
Figura 85 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 13	190
Figura 86 – Relatório de análise da região 13 da sub-bacia do Alto Quebra-Anzol referente à demanda com irrigação	190
Figura 87 – Distribuição dos volumes armazenados nos 4 grandes reservatórios do rio Araguari – situação atual	192
Figura 88 – Distribuição dos volumes armazenados nos 4 grandes reservatórios do rio Araguari, para o período simulado após o processo de otimização.....	194
Figura 89 – Relatório da demanda fictícia inserida junto ao reservatório de Nova Ponte	196
Figura 90 – Relatório da demanda fictícia inserida junto ao reservatório de Miranda	196
Figura 91 – Relatório da demanda fictícia inserida junto ao reservatório de Capim Branco I	196
Figura 92 – Relatório da demanda fictícia inserida junto ao reservatório de Capim Branco II	196
Figura 93 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1846002 – nov/66 a set/16.....	211
Figura 94 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1847018 – jan/75 a mar/94	211
Figura 95 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1848007 – mai/72 a set/16.....	212
Figura 96 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1848009 – out/75 a jun/16	212
Figura 97 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1848010 – dez/74 a jun/16	213
Figura 98 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1848049 – dez/80 a dez/98	213
Figura 99 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946008 – jan/75 a set/16.....	214

Figura 100 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946009 – jan/75 a jan/16	214
Figura 101 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1948006 –abr/74 a jun/16	215
Figura 102 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946010 – jan/75 a jun/16	215
Figura 103 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946015 – jan/75 a dez/98.....	216
Figura 104 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946018 – jan/00 a ago/16	216
Figura 105 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1947006 – nov/77 a jul/16.....	217
Figura 106 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1947026 – ago/00 a set/16.....	217
Figura 107 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1948005 – abr/67 a jul/16.....	218
Figura 108 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83582.....	220
Figura 109 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83531.....	220
Figura 110 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83521.....	221
Figura 111 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83514.....	221
Figura 112 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83630.....	222
Figura 113 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83579.....	222
Figura 114 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83523.....	223
Figura 115 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83577.....	223

Figura 116 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83574.....	224
Figura 117 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83526.....	224
Figura 118 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60220000 – mai/71 a jun/16.....	226
Figura 119 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60285000 – jan/48 a dez/64	227
Figura 120 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60300000 – jan/75 a jul/92.....	228
Figura 121 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60320005 – jan/02 a nov/15	229
Figura 122 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60230000 – dez/99 a fev/16.....	230
Figura 123 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60335500 – fev/10 a ago/16	231
Figura 124 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60351080 – jan/02 a nov/15	232
Figura 125 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60381000 – jan/76 a jun/16.....	233
Figura 126 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60280000 – nov/88 a jun/16.....	234
Figura 127 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60359080 – fev/07 a nov/15	235
Figura 128 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60358080 – jan/07 a nov/15	236
Figura 129 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60265000 – jan/80 a out/12	237
Figura 130 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60272000 – jan/00 a dez/12	238
Figura 131 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60250000 – jan/00 a dez/12	239

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vazão média por habitante no país	24
Tabela 2– Disponibilidades previstas para as sub-bacias do rio Araguari	28
Tabela 3 – Critérios adotados para concessão de outorga de captação de águas superficiais no Brasil.....	42
Tabela 4– Disponibilidades previstas para as sub-bacias do rio Araguari	142
Tabela 5 – Sub-bacias com áreas críticas	174
Tabela 6– Características reservatórios principais rio Araguari.....	191
Tabela 7– Características reservatórios principais rio Araguari.....	193
Tabela 8– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	226
Tabela 9– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	227
Tabela 10– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	228
Tabela 11– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	229
Tabela 12– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	230
Tabela 13– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	231
Tabela 14– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	232
Tabela 15– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	233
Tabela 16– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	234
Tabela 17– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	235
Tabela 18– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	236

Tabela 19– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	237
Tabela 20– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	238
Tabela 21– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA	239

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

A	Área da bacia hidrográfica
A_i	Área de contribuição da sub-bacia i
A_{total}	Área total da bacia com dados monitorados
$d_{i,j,t}$	Déficit no nível i frente ao fluxo mínimo j no mês t
$DR\%$	Diferença relativa
ETP	Evapotranspiração
ET_{real}	Evapotranspiração real
F_1	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
F_2	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe da transformação logarítmica da vazão
F_3	Coeficiente de correlação de Pearson
F_4	Medida de simetria do ajuste entre a simulação média e a observação média
$F_{objetivo}$	Função objetivo da calibração
FC	Máxima capacidade de armazenamento do solo
G_a	Garantia anual
G_m	Garantia mensal
h	Nível líquido medido no rio
h_0	Altura líquida entre a base da primeira régua e o fundo do canal
I	Volume de água infiltrada
k_0	Coeficiente do escoamento superficial
k_1	Coeficiente do escoamento sub-superficial
k_2	Coeficiente do escoamento base
k_{perc}	Coeficiente de percolação
$K_{\sigma,t}$	Coeficiente de bifurcação de uma condução i
L	Fluxo subsuperficial
$L_{máx.}$	Limite máximo de fluxo subsuperficial
N	Horizonte de estudo
n_{ba}	Número de pontos de bombeamentos do sistema

n_c	Número de conduções do esquema
n_d	Número de demandas
n_e	Número de reservatórios
n_i	Número de níveis no qual o fluxo mínimo de uma condução foi dividido
$n_{i'}$	Número de níveis em que uma demanda foi dividida
n_t	Número de “tomas” que suprem determinada demanda i
P	Precipitação
P_{ef}	Precipitação efetiva
p_i^c	Prioridade atribuída a vazão mínima de uma condução i
p_i^e	Prioridade atribuída ao reservatório i
$p_{i,k}^t$	Prioridade atribuída a “toma” k de uma demanda i
PWP	Parâmetro de saturação do solo
Q	Vazão medida
Q_0	Escoamento superficial
Q_1	Escoamento sub-superficial
Q_2	Escoamento de base
$Q_{7,10}$	Vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência
$Q_{7,10} \text{ SISCAH}$	Vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência calculada pelo método de Weibull via SisCAH 1.0
$Q_{7,10} \text{ total}$	Vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência total em uma bacia monitorada
$Q_{7,10} \text{ UFV}$	Vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência calculada pelo Atlas Digital das Águas de Minas
Q_{90}	Vazão associada à permanência de 90% no tempo
Q_{95}	Vazão associada à permanência de 95% no tempo
$Q_{i,b,t}$	Vazão de uma demanda i no mês t por meio do bombeamento de alimentação b
$q_{i,t}$	Fluxo corrente por uma condução i no mês t
Q_j	Vazão a jusante do trecho
Q_m	Vazão a montante do trecho
Q_{mld}	Vazão média de longa duração
Q_{obs}	Vazão observada
Q_{total}	Vazão total

Q_{sim}	Vazão simulada
R	Volume da água captada que retorna ao curso de água
S_1	Nível líquido no reservatório superior
S_2	Nível líquido no reservatório inferior
SM	Umidade do solo
S_{sup}	Volume captado pela demanda
T	Temperatura
T_{BA}	Vazão de contribuição de cada bombeamento
T_C	Vazão de contribuição de cada condução
T_D	Vazão retirada por cada demanda
T_E	Vazão de contribuição de cada reservatório
$v_{i,t}$	Volume armazenado no reservatório i no mês t
X	Volume de água consumido por determinada demanda
X_0	Centroide
α	Coeficiente de retorno
$\alpha_{i,t}$	Fator de ponderação atribuído ao déficit i no fluxo mínimo no mês t
β	Parâmetro de ajuste HBV/coeficiente de consumo
$B_{i,t}$	Fator de ponderação atribuído ao déficit i em determinada demanda no mês t
$\gamma_{i,t}$	Fator de ponderação atribuído ao déficit i em determinada “toma” no mês t
δ_i	Fator de ponderação atribuído ao volume armazenado no reservatório i
$\%_{retirada}$	Porcentagem captada frente ao máximo outorgável
$\%Q_{7,10}$	Vazão máxima outorgável do trecho para um determinado critério analisado

ABREVIATURAS

ha	Hectare
hab	Habitantes
hm^3	Hectômetro cúbico
km	Quilômetro
km^2	Quilômetro quadrado
km^3	Quilômetro cúbico

<i>L</i>	Litro
<i>m</i> ²	Metro quadrado
<i>m</i> ³	Metro cúbico
<i>mm</i>	Milímetro

SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EVALHID	Evaluación de los recursos Hidricos
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
HEC	Hydrologic Engineering Center
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IRAS	Interactive River-Aquifer Simulation
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution method, University of Arizona
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SSD	Sistemas de Suporte à Decisão
ONU	Organização das Nações Unidas
PD	Programação dinâmica
PL	Programação linear
PNL	Programação não linear

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
	2.1 Gestão das águas no Brasil.....	22
	2.1.1 Disponibilidade hídrica.....	23
	2.1.2 Crise hídrica.....	28
	2.1.3 Usos múltiplos da água	32
	2.2 Vazão de referência	39
	2.2.1 Vazão ecológica	39
	2.2.2 Vazão máxima outorgável	40
	2.2.3 Sazonalidade na vazão de referência	48
	2.2.4 Estimativa da vazão de referência: metodologias para solucionar o problema das falhas temporais e má distribuição espacial das estações de monitoramento.....	50
	2.3 Sistema de Suporte à Decisão	54
	2.3.1 Simulação e otimização.....	56
	2.4 AQUATOOL	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS	72
	3.1 Área de estudo.....	73
	3.2 Dados fluviométricos, pluviométricos e climatológicos	77
	3.3 Regionalização da vazão.....	82
	3.3.1 Modelo chuva-Vazão HBV	82
	3.3.2 Calibração dos parâmetros pertencentes ao modelo chuva-vazão HBV.....	85
	3.5 Postos de monitoramento fluviométrico implantados	87
	3.6 Levantamento das demandas consuntivas e não consuntivas outorgadas ..	89
	3.7 Vazão máxima outorgável.....	92
	3.7.1 Atlas digital das Águas de Minas	93
	3.7.2 SisCAH 1.0 (metodologia comparativa)	96
	3.8 Otimização do aproveitamento hídrico superficial.....	97
	3.8.1 Construção da topologia - AQUATOOL.....	111
	3.8.2 Rede de fluxo e função objetivo.....	112
	3.9 Análises para otimização do aproveitamento hídrico	118

3.9.1 Primeira análise	118
3.9.2 Segunda análise.....	120
3.10 Interpretação quantitativa das análises de otimização do aproveitamento hídrico	124
4 RESULTADOS	125
4.1 Preenchimento de falhas nos dados pluviométricos e de evapotranspiração.....	125
4.2 Calibração e validação dos parâmetros do modelo chuva-vazão HBV	126
4.2.1 Estimativa das vazões.....	130
4.3 Dados de monitoramento fluviométrico implantados	131
4.4 Topologia do sistema hídrico	135
4.5 Análises de otimização do aproveitamento hídrico – períodos críticos	135
4.6 Análises de otimização do aproveitamento hídrico – 1ª análise	136
4.6.1 Determinação da vazão $Q_{7,10}$	137
4.6.2 Impacto da substituição da $Q_{7,10}$ anual pelas $Q_{7,10}$ sazonais na disponibilidade hídrica na bacia do rio Araguari	145
4.6.3 Impacto da mudança do percentual máximo outorgável da $Q_{7,10}$ anual na disponibilidade hídrica na bacia do rio Araguari	156
4.7 Análises de otimização do aproveitamento hídrico – 2ª análise	173
4.7.1 Áreas críticas.....	173
4.7.2 Reservatórios.....	190
5 CONCLUSÕES.....	197
REFERÊNCIAS	199
APÊNDICE A.....	210
APÊNDICE B.....	219
APÊNDICE C.....	225
APÊNDICE D.....	240

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As crises hídricas que afetam o Brasil nos últimos anos têm por origem a falta de um gerenciamento adequado, que conciliada a uma má distribuição espacial e temporal das precipitações, geram os problemas de disponibilidade de água. A falta de um planejamento adequado em políticas de crescimento populacional e em exploração de bacias hidrográficas, ignorando ou menosprezando os aspectos ambientais, estão entre os pontos negativos da gestão hídrica.

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) (2016), o consumo mundial de água tem aumentado em uma proporção maior que o dobro do crescimento populacional. Se este padrão for mantido, estima-se que o consumo alcance 75% das reservas hídricas em 2025, podendo atingir 90% se a demanda nos países em desenvolvimento igualar a dos países desenvolvidos. A escassez já afeta aproximadamente um bilhão de pessoas, que carecem de um acesso mínimo a água, considerando 20 L/(pessoa.dia) a uma distância de captação não superior a 1000 m (ONU, 2016). De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA) (2015), as regiões do nordeste e sudeste brasileiro vêm sofrendo desde 2012 com eventos de seca sem precedentes. O sudeste, região até então imune à estiagem severa, teve uma diminuição drástica no volume armazenado em seus principais reservatórios de abastecimento de água, chegando nos piores casos a uma redução de 22% em relação à média anual.

A escassez na oferta de água para os diversos usos traz consequências diretas no cotidiano da população e na economia do País, exigindo grande atenção na busca por medidas emergenciais e estruturantes nos pontos de captação, além do aprimoramento das políticas de gestão de recursos hídricos no Brasil.

O crescimento do número de outorgas consuntivas e, conseqüentemente, dos conflitos pelo uso múltiplo da água, intensifica o problema de disponibilidade hídrica. Tais conflitos envolvem atividades indispensáveis para o ser humano e a sociedade. A doutrina dos usos múltiplos da água, instituída na Lei nº 9.433, de janeiro de 1997, que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), visa, para os diferentes setores de usuários dos recursos hídricos (abastecimento humano e industrial, atividades agropecuárias, geração de energia, recreação, piscicultura, controle de enchentes, prevenção contra secas, entre outros), a igualdade de direito de acesso à água. A única forma viável e justa para dirimir esses conflitos é o conhecimento dos pontos solicitados, das alternativas e restrições, optando ao final da análise pela solução que beneficie o máximo de usuários com o mínimo de impacto ao meio ambiente.

Segundo Vieira, Santos e Curi (2010), a utilização dos recursos hídricos deve conciliar o planejamento e gestão dentro de um contexto de desenvolvimento sustentável, onde o atendimento das demandas da população atual não venha a comprometer a capacidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades, principalmente nas regiões semiáridas, como é o caso do Nordeste brasileiro, onde as peculiaridades climáticas e ambientais, as atividades humanas e o desenvolvimento social obrigam um uso racional e otimizado dos recursos hídricos.

Para uma gestão dentro de um contexto de desenvolvimento sustentável, o planejamento das outorgas deve considerar as restrições ambientais para que os problemas de escassez e captação não prejudiquem os ecossistemas aquáticos. Nesse aspecto, a legislação ambiental, embora defasada segundo Pinto, Ribeiro e Silva (2016), Medeiros, Souza e Ribeiro (2011) e Vestena et al. (2012), é bem específica quanto as diretrizes limitantes e variam em função do órgão governamental responsável, sendo separadas em domínios estaduais e federal.

Para a concessão de outorga no Estado de Minas Gerais, a Resolução Conjunta SEMAD (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável) – IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) nº 1.548/12 adota, como vazão de referência a fio de água, a vazão mínima com 7 dias de duração e 10 anos de recorrência ($Q_{7,10}$) em base anual, aplicando-se o percentual de 50% dessa vazão para a maior parte do estado, e nas áreas declaradas de conflito pelo IGAM, aplica-se o percentual de 30% da mesma vazão de referência. O critério adotado pelo IGAM, juntamente com o imposto pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), estão entre os mais rígidos do Brasil, podendo impedir a outorga de processos em situações onde há disponibilidade hídrica,

principalmente nos períodos de cheias. De acordo com Pruski et al. (2014) e Costa (2015), a aplicação de vazões de referência anuais limita o uso da água a um valor não correspondente na maior parte do ano, principalmente em regiões com variações no regime sazonal.

Uma análise adequada de todas as variáveis envolvidas em uma gestão hídrica somente se mostra possível com o auxílio de modelos matemáticos com concepções holísticas, dentro de uma visão sistêmica, que contemple os múltiplos interesses dos diferentes setores analisados. Tais modelos devem contar com artifícios que consigam contabilizar as incertezas do comportamento de processos hidrológicos, ou simplificá-los, tornando a representação matemática mais próxima da realidade.

Para Andreu, Capilla e Sanchis (1996), a procura por soluções para os complexos problemas de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos se torna mais eficiente com a utilização de técnicas e ferramentas capazes de auxiliar os processos de análise, operação e tomadas de decisão. Os estudos de gestão em sistemas de recursos hídricos são comumente feitos através de técnicas de otimização equacionadas por algoritmos computacionais. Neste contexto, uma série de pesquisas foram desenvolvidas no âmbito de diminuir a pressão sobre os recursos hídricos e os conflitos entre seus usuários (AZEVEDO, PORTO, & PORTO. 1998; LABADIE, 2004; CRUZ & TUCCI, 2005; FIRMINO, 2007; MORAES et al. 2008; SANTOS et al. 2011; VESTENA et al. 2012; SALLA et al. 2013; OLIVEIRA, PRUSKI, & NUNES, 2013; PRUSKI et al. 2014; SIMÕES & OLIVEIRA, 2014; SALLA et al. 2014a e 2014b; PAREDES-ARQUIOLA et al. 2014a; FERREIRA, 2014; COSTA, 2015; CHÁVEZ-JIMÉNEZA & GONZÁLEZ-ZEAS, 2015; PELLICER-MARTÍNEZ & MARTÍNEZ-PAZ, 2016). Tais estudos foram desenvolvidos por meio de métodos numéricos vinculados a uma ferramenta computacional, que fornece um sistema de suporte à otimização hídrica. Dentre tais ferramentas, destacam-se os softwares de planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas ACQUANET (2016), MODSIM-DSS (2016) e AQUATOOL (2016).

Assim, estudos de otimização do aproveitamento hídrico vêm se tornando cada vez mais importantes. Uma análise socioeconômica, política e ambiental dos usos da água também é fundamental, em vista dos novos paradigmas enfrentados.

Justificativa

Os impactos nos sistemas fluviais, gerados por atividades humanas sem as devidas precauções, já provocam prejuízos atuais e passam a exigir ações para que os recursos hídricos sejam explorados de forma sustentável. Como exemplo, a má gestão associada aos períodos de estiagem tem gerado problemas graves, tais como a redução drástica nos volumes dos reservatórios do sistema Cantareira e do Rio Paraíba do Sul nos anos 2012 a 2015, a escassez recorrente do semiárido nordestino e a queda brusca na geração de energia do Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2014. Em regiões desenvolvidas, a diminuição na disponibilidade hídrica é agravada pelos maiores índices de urbanização, que levam diretamente a um crescimento significativo das demandas múltiplas de água.

O Brasil, tendo na agricultura uma das principais atividades econômicas, faz com que volumes extremamente grandes de água sejam destinados a irrigação de plantações, quando comparado aos outros setores. Segundo a ANA (2016), os Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia e São Paulo concentram cerca de 80% da área ocupada por pivôs centrais, sendo que 75% das reservas nacionais são consumidas pela irrigação.

Mesmo dada a sua importância, a irrigação não ocupa o primeiro lugar na lista de prioridades pelo uso da água. A PNRH (via Lei nº 9.433, de janeiro de 1997) instituiu que, em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais. A Política Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais, conforme Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, estabelece a prioridade para o abastecimento público e a manutenção dos ecossistemas. Já o Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Araguari se limita a priorizar o consumo humano. Assim, os gestores devem balancear a situação, maior volume em oposição à maior prioridade, alocando seu uso da melhor maneira possível.

Todas essas circunstâncias são aplicadas à grande parte do país, não sendo diferente a bacia do rio Araguari, que está inserida na mesorregião do Triângulo Mineiro-MG. Sua área é limitada ao Sul pelo rio Grande e ao Norte pelo rio Paranaíba, sendo banhada por diversos rios, córregos e reservatórios. A situação na bacia é complexa, pois, além das demandas de irrigação e abastecimento, a mesma comporta quatro grandes centrais hidrelétricas (Usinas Hidroelétricas (UHE) com potência instalada acima de 30 MW) em cascata ao longo dos cursos médio e baixo do rio Araguari (CH Nova Ponte, CH Miranda, CH Capim Branco 1 e CH Capim Branco 2), duas pequenas centrais

hidrelétricas (PCH) no alto curso do rio Araguari (PCH Pai Joaquim e PCH Cachoeira dos Macacos) e duas PCH no baixo curso do rio Uberabinha (PCH Martins e PCH Malagone). Assim, a alocação de água para atender as outorgas deve considerar os volumes operacionais necessários para produção de energia destas barragens, assim como sua escala de prioridade. Além disso, a bacia do rio Araguari está situada no Estado com maior restrição ambiental quanto a vazão máxima outorgável.

Todos os argumentos citados justificam a realização de um estudo aprofundado sobre a otimização do aproveitamento hídrico superficial na bacia do rio Araguari, baseando-se nos conflitos de interesse nos usos múltiplos da água.

Objetivos

A presente pesquisa teve como objetivo principal estudar métodos alternativos de concessão do uso da água, visando potencializar seu aproveitamento na bacia do rio Araguari. Neste sentido, foram considerados a utilização de critérios menos restritivos e mais adequados à sazonalidade temporal e espacial dos regimes pluviométricos, visando obter alternativas que minimizem conflitos entre demandas e maximizem o potencial no uso da água. Como objetivos específicos, estão incluídas as seguintes etapas:

- Avaliação da disponibilidade hídrica atual na hidrografia da bacia, considerando a legislação vigente estabelecida pelo IGAM (vazão máxima outorgável igual a 50% da vazão $Q_{7,10}$ em base anual);
- Avaliação da disponibilidade frente aos novos critérios de vazão máxima outorgável, sendo propostos:
 - Percentuais acima de 50% da $Q_{7,10}$, baseada em períodos anuais;
 - Utilização de períodos sazonais no cálculo da $Q_{7,10}$, considerando o percentual de captação igual a 50%;
- Proposição de soluções aos conflitos, com ponderação de níveis de prioridade e restrições no uso múltiplo da água, em regiões críticas com volumes demandados superiores ao máximo permitido para captação.

Estrutura do trabalho

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos. O trabalho se inicia com uma introdução aos temas abordados, com inclusão da importância e motivação para desenvolvê-los. Ainda no primeiro capítulo são apresentados o objetivo do estudo e a estruturação do texto.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica acerca do tema, com ênfase nos conceitos e assuntos abordados. No terceiro capítulo são especificados os métodos e programas utilizados na pesquisa. No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos para cada uma das etapas definidas no item objetivos. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica aborda três subitens principais. O subitem 2.1 aborda a gestão das águas no Brasil por meio de vários subitens relacionados à disponibilidade hídrica, à crise hídrica enfrentada por várias regiões do país e à descrição dos principais usos múltiplos. O subitem 2.2 aborda os aspectos relacionados a estimativa e adoção das vazões de referência para outorga. O subitem 2.3 aborda os sistemas de suporte à decisão no planejamento e gestão de recursos hídricos, focando-se em exemplos de otimização hídrica e nos conceitos e aplicações da programação linear, não-linear e dinâmica. Para finalizar, o subitem 2.4 traz uma sucinta descrição do sistema de suporte à decisão utilizado neste estudo (ferramenta computacional AQUATOOL).

2.1 Gestão das águas no Brasil

A gestão dos recursos hídricos disponíveis na natureza é fundamental para que os ciclos hidrológicos e todos os sistemas deles dependentes mantenham seus funcionamentos de forma contínua e controlada. A PNRH é o segmento governamental responsável por acompanhar, avaliar e implementar os processos responsáveis pelo gerenciamento das águas nos âmbitos estaduais e nacional. Sua gestão fornece os subsídios para o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) realizar o planejamento e tomadas de decisão direcionadas às bacias hidrográficas conflitantes. O SINGREH conta com a colaboração de órgãos públicos e privados na definição de estratégias de gestão integrada, tais como o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a ANA, órgãos gestores estaduais, conselhos estaduais, comitês de bacia e agências de bacia. Nesse contexto, na esfera estadual vale ressaltar que todos os Estados sancionaram suas próprias políticas estaduais de recursos hídricos por meio dos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos. Desta

forma, as políticas públicas destinadas à proteção da água devem observar as necessidades de todos, visando criar um sistema de gestão interno que esteja em conciliação com demais sistemas de outros Estados, buscando sempre tornar o aproveitamento da água mais eficaz e uníssono, sem afetar eventuais particularidades dos povos (BORGES & ROSA, 2015).

Assim, o gerenciamento hídrico visa garantir, à atual e às futuras gerações, água em qualidade e quantidade suficiente, através de uma análise completa da disponibilidade hídrica, conciliando as restrições impostas pela legislação ambiental com os seus múltiplos usos.

2.1.1 Disponibilidade hídrica

O Brasil apresenta a maior disponibilidade de recursos hídricos renováveis do planeta (8.233 km³/ano). Porém, a grande desigualdade na distribuição dos recursos no país o transfere para o 25º lugar quando a análise se refere à disponibilidade hídrica social (43.487 m³/hab.ano) (BORGHETTI, BORGHETTI, & ROSA FILHO, 2011).

Esta diferença fica clara quando se analisa os dados fluviométricos dos cursos de água no território brasileiro. Segundo a ANA (2016), a vazão média nacional é de cerca de 260.000 m³/s, dos quais 205.000 m³/s estão localizados na bacia do rio Amazonas, região com baixa densidade demográfica, restando apenas 55.000 m³/s para as demais regiões, onde grande parte da população reside.

Além das diferenças espaciais, as peculiaridades climáticas fazem com que as precipitações, e consequentemente o regime fluvial, não sejam distribuídos de forma igualitária ao longo do ano. A sazonalidade das estações secas e chuvosas são bem definidas na maior parte do Brasil, de modo que ao final do período seco pode-se observar vazões abaixo da vazão média, chegando inclusive a ausência de água. Essa variação nos índices pluviométricos e vazões também é interanual, ocorrendo anos mais secos e outros mais úmidos. Tal fato estimula o homem a construir obras de infraestrutura, como reservatórios e açudes, com a finalidade de reservar água nos períodos úmidos para ofertar nos períodos mais secos em quantidade e qualidade adequadas às demandas hídricas.

A ONU (2016) utiliza, como indicador de disponibilidade hídrica, o quociente entre a vazão média anual e a população residente, apesar deste não expressar a real disponibilidade de água na bacia. Neste sentido, o Brasil é considerado rico, com uma disponibilidade de 33 mil m³/hab.ano distribuída nas doze regiões hidrográficas, como mostra a Tabela 1 (ANA, 2005).

Tabela 1 – Vazão média por habitante no país

Região hidrográfica	População (10 ⁶ Hab.)	Vazão média	
		(m ³ /s)	(m ³ /hab.ano)
Amazônica	8	131.947	533.096
Tocantins/Araguaia	7	13.624	59.858
Atlântico Nordeste Ocidental	5	2.683	15.958
Parnaíba	4	763	6.456
Atlântico Nordeste Oriental	21	779	1.145
São Francisco	13	2.85	7.025
Atlântico Leste	14	1.492	3.362
Atlântico Sudeste	25	3.179	3.972
Atlântico Sul	12	4.174	11.316
Uruguai	4	4.121	33.893
Paraná	55	11.453	6.607
Paraguai	2	2.368	39.559
Brasil	170	179.433	33.376

Fonte: ANA (2005).

No Brasil, a ANA (2015) define disponibilidade hídrica como uma vazão de alta garantia no tempo, ou seja, uma vazão que estará acessível na grande maioria do tempo, mesmo em períodos secos. Assim, foi estabelecida a Q_{95} , ou vazão incremental de estiagem (vazão com permanência de 95%), definida como a vazão cuja frequência de ocorrência em uma seção do rio é igualada ou superada por 95% dos valores da série. Seu valor, segundo a ANA (2016), é em torno de 12.000 m³/s ou 22% da vazão média, excluindo-se a contribuição da bacia amazônica. Entretanto, a heterogeneidade climática e a hidrogeológica fazem com que estas vazões mínimas variem de 0% a mais de 50% da vazão média.

No território brasileiro, a junção de uma densidade populacional elevada com a ocorrência de vazões específicas de média a baixa leva a uma grande variabilidade espacial da vazão média por habitante e a uma baixa disponibilidade de água para atender as demandas em certas regiões.

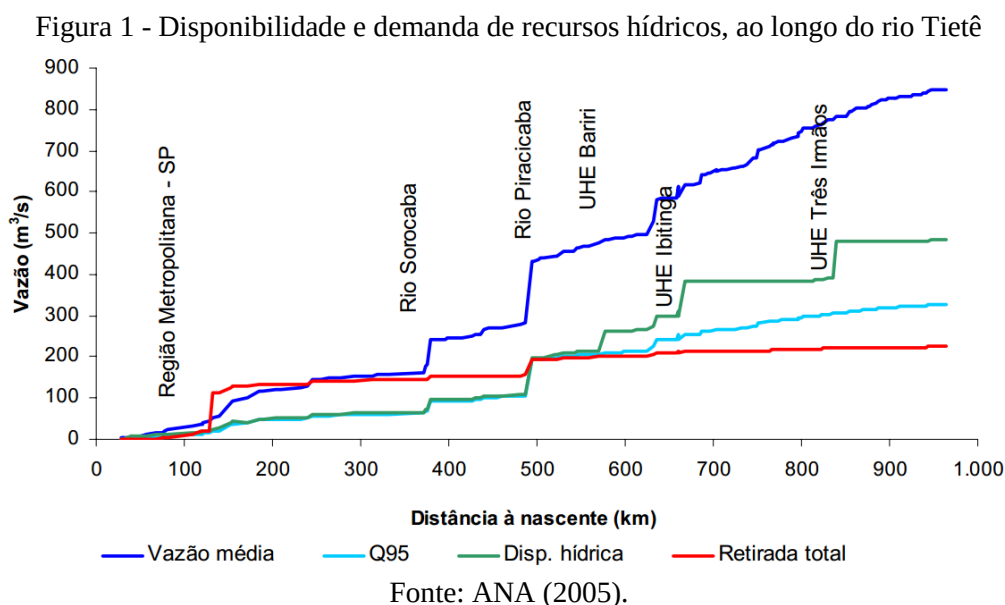
Em termos da relação entre a vazão média e a população, a situação mais crítica é observada na região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, com média inferior a 1.200 m³/hab.ano, sendo que em algumas unidades hidrográficas dessa região são registrados valores de 500 m³/hab.ano, onde vale ressaltar as bacias dos rios Trairi e Pirangi, Paraíba, Capibaribe, Gramame e Goiana. Em situação crítica de disponibilidade, com menos de 500 m³/hab.ano, também se encontram os rios Paramirim, Santo Onofre e Carnaíba de Dentro, Verde, Jacaré, do Pontal e Curaçá na região do

São Francisco, além dos rios Vaza-Barris, Sergipe, Japaratuba, Piauí e Real na região Atlântico Leste (ANA, 2016).

Segundo Tucci (2005), o semiárido do nordeste brasileiro apresenta as piores condições hídricas por conta da combinação do índice de evapotranspiração elevado durante todo o ano, dos baixos níveis de precipitação e do subsolo desfavorável em muitas regiões (água salobra ou formação cristalino), com consequência ao baixo desenvolvimento econômico e social, fazendo com que somente seja possível garantir a oferta hídrica contínua por meio de açudes/reservatórios.

Casos ainda mais críticos são observados em regiões onde existem uma baixa disponibilidade, associada a uma concentração populacional elevada, como é o caso do rio Tietê e dos rios que deságuam na região da Baía de Guanabara, chegando a atingir, segundo a ANA (2015), valores menores que 500 m³/hab.ano.

A Figura 1 representa uma situação de escassez hídrica no rio Tietê, onde são mostrados os valores de vazão média, a vazão com permanência de 95%, a disponibilidade hídrica (regularizada mais incremental de Q₉₅) e a retirada total. O gráfico mostra que as retiradas superam a disponibilidade hídrica no Alto Tietê, na Região Metropolitana de São Paulo, obrigando a busca de fontes externas provenientes principalmente da bacia do rio Piracicaba.



Em regiões com baixa vazão específica natural e baixa ocupação, onde vale citar o caso da planície da região hidrográfica do Pantanal Mato-grossense, os conflitos pelo uso da água são raros e muitas

vezes temporários. Fatores como a baixa declividade e a reduzida disponibilidade natural da região são, de certa forma, compensados pela água originária da drenagem das cabeceiras úmidas dos rios do Pantanal (BORGES & ROSA, 2015).

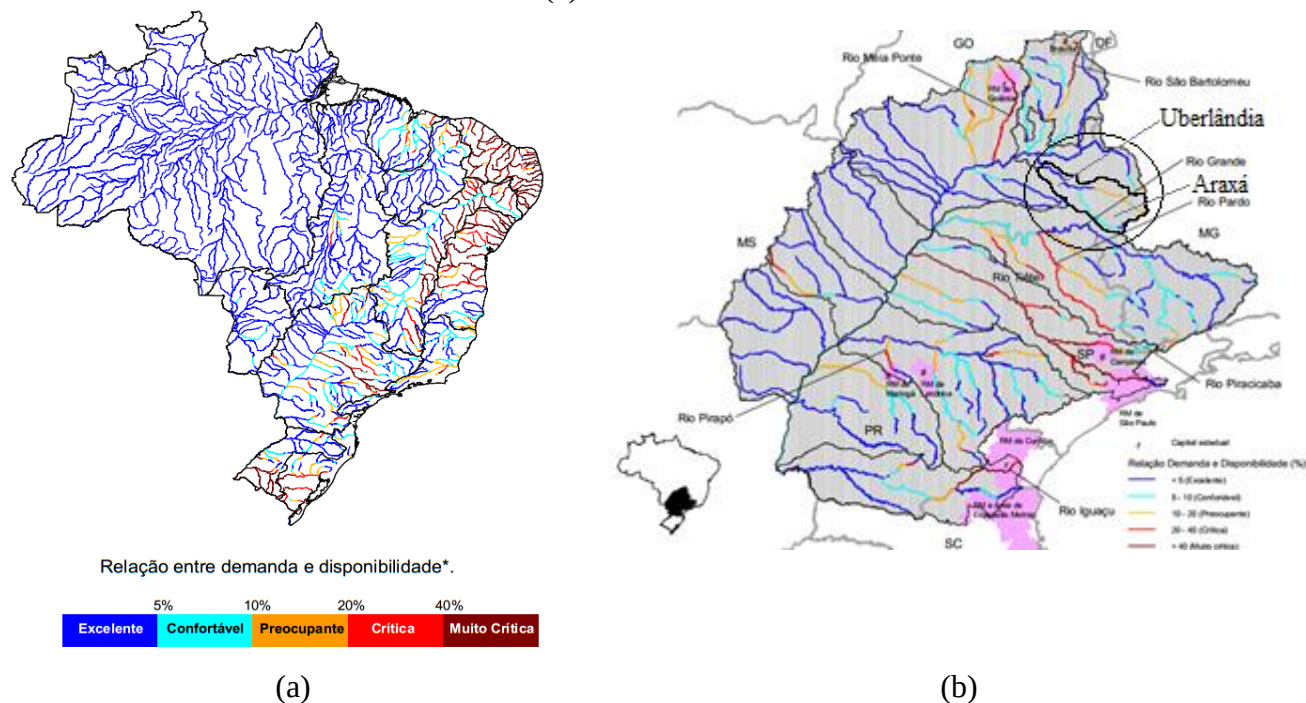
Segundo Lima et al. (2011), no Norte do Brasil são encontrados os maiores valores de vazão média por habitante, resultantes da combinação entre alta vazão específica e baixa densidade populacional. Destacam-se, neste contexto, os valores observados na região hidrográfica Amazônica, com 533 mil m³/hab.ano, e do Tocantins/Araguaia, com cerca de 60 mil m³/hab.ano (ANA, 2005).

Vestena et al. (2012) realizaram uma análise geral das condições de disponibilidade hídrica nos principais rios e bacias do Brasil. Seu estudo envolveu as bacias hidrográficas do Paraná e Uruguai, grande parte das regiões hidrográficas do Atlântico Sudeste e Sul, além dos rios Tocantins e São Francisco. Apesar da elevada disponibilidade natural de água, são registrados conflitos pelo uso da água em vários pontos destas regiões. A principal causa se encontra na intensa e desordenada ocupação do território, onde os conflitos pelo uso da água envolvem, essencialmente, problemas associados à qualidade da água requerida para determinados usos e o consumo excessivo de água para irrigação.

A Figura 2a mostra a relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica ao longo dos principais cursos de água no país. A disponibilidade, em rios com reservatórios em seu curso, é a vazão regularizada pelo sistema de reservatórios a montante, com 100% de garantia, somada à vazão com permanência de 95% dos trechos não regularizados; em rios sem reservatórios, a disponibilidade é a vazão com permanência de 95% (ANA, 2005).

A Figura 2b mostra, em mais detalhes, a relação entre demanda e disponibilidade hídrica nos principais cursos de água da região hidrográfica Paraná, onde está localizada a bacia do rio Araguari. A localização da bacia do Rio Araguari está indicada na Figura 2b, inserida nas mesorregiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, onde estão municípios como Uberlândia e Araxá.

Figura 2 – Relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica em: (a) principais cursos de água no país; (b) bacia do Paraná



Fonte: ANA (2005).

Assim, por meio da Figura 2b, pode se concluir que a situação da disponibilidade hídrica na bacia do rio Araguari está entre preocupante e confortável, dependendo da região. No Alto Araguari a relação entre demanda e disponibilidade está entre 5% e 10%, considerada adequada pela ANA (2005). No Baixo Araguari a situação é ainda melhor, onde esta relação é menor que 5%, mas ao longo do Quebra-Anzol esta situação é diferente, chegando a 20% a relação entre demanda e disponibilidade, considerada preocupante pela ANA (2005). Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari (CBH - Araguari) (2016), a disponibilidade hídrica na bacia é acima de 20 L/s.km².

A Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) (2007), por meio da vazão de referência Q₉₅, obteve dados de disponibilidade hídrica em cada uma das sub-bacias do rio Araguari (Tabela 2).

Tabela 2– Disponibilidades previstas para as sub-bacias do rio Araguari

Sub-bacia	Modelo de Simulação Q ₉₅ (L/s)
Foz do Araguari	121.240,00
Rio Uberabinha	13.600,00
Capim Branco 1 e 2	105.110,00
Médio Araguari	100.750,00
Ribeirão das Furnas	3.000,00
Rio Claro	3.270,00
Baixo Quebra-Anzol	61.720,00
Ribeirão Santa Juliana	1.420,00
Ribeirão Santo Antônio	5.260,00
Alto Araguari	24.870,00
Rio Galheiro	5.190,00
Rio Capivara	9.120,00
Ribeirão do Salitre	3.830,00
Ribeirão do Inferno	3.890,00
Alto Quebra-Anzol	30.490,00
Ribeirão Grande	1.560,00
Rio São João	4.390,00
Rio Misericórdia	6.390,00

Fonte: COPASA (2007).

2.1.2 Crise hídrica

Apesar de alarmantes as situações da disponibilidade hídrica em várias regiões do Brasil, nada é comparável com a escassez gerada pela crise hídrica dos últimos 5 anos. O subitem 2.1.1 apresenta dados de disponibilidade hídrica resultante do monitoramento dos cursos de água ao longo de décadas, entretanto, as estimativas atuais levam a crer que esta realidade está mudando, chegando a pontos críticos nas regiões nordeste e sudeste do país.

Segundo a ANA (2016), a disponibilidade hídrica nas regiões semiáridas e metropolitanas brasileiras sofre uma gradativa e intensa redução desde 2012. Para Jardim (2015), a crise hídrica no Brasil foi extrema, onde a redução nos índices pluviométricos afetou diretamente a vazão dos rios, principalmente em regiões mais populosas.

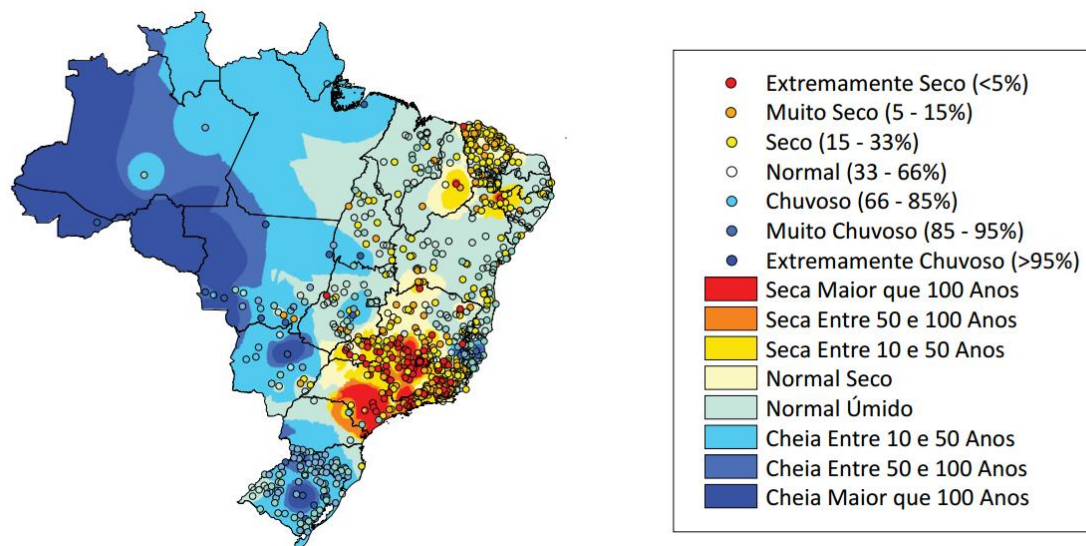
No território nacional, a anormalidade das chuvas nos últimos anos impactou de forma significativa no volume acumulado em reservatórios de abastecimento público e de geração de energia elétrica. Ações regulatórias imediatas foram necessárias para minimizar os efeitos da escassez e preservar os estoques de água para os usos múltiplos (ANA, 2015).

Apesar da importância de suas consequências, a compreensão das causas dessas alterações climáticas, principalmente pluviométricas, ainda é imprecisa devido ao curto período de observações das anomalias.

O grau de severidade da falta de chuvas foi medido após a análise de dados de 950 estações pluviométricas da ANA (2015), sendo consideradas apenas aquelas com pelo menos os últimos trinta anos de dados completos. Deste modo, foram estimados os tempos de retorno esperados para os anos 2012 a 2014, período ápice da crise hídrica. As estimativas obtidas foram interpoladas a fim de gerar mapas de tempo de retorno que representem espacialmente o grau de excepcionalidade dos eventos de seca ocorridos neste período (conforme Figura 3).

Nos anos de 2012 a 2014 a situação no Semiárido Brasileiro foi extremamente crítica. Os índices pluviométricos tiveram tempos de retorno superiores a 100 anos em 2012 e 2013, retornando em 2014 a uma frequência normal, mas abaixo da média. Em 2012, a ANA (2015) classificou quase 90% das estações (163 estações) da região do Semiárido como secas, sendo que em 36% delas os totais estiveram entre as 3 piores secas já registradas. O ano de 2012 também afetou significativamente o sul do Brasil, principalmente na região do baixo rio Uruguai, onde a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM) do Rio Grande do Sul classificou o evento como muito ou extremamente seco em mais de 90% das estações.

Figura 3 – Situação da chuva no período 2012 a 2014

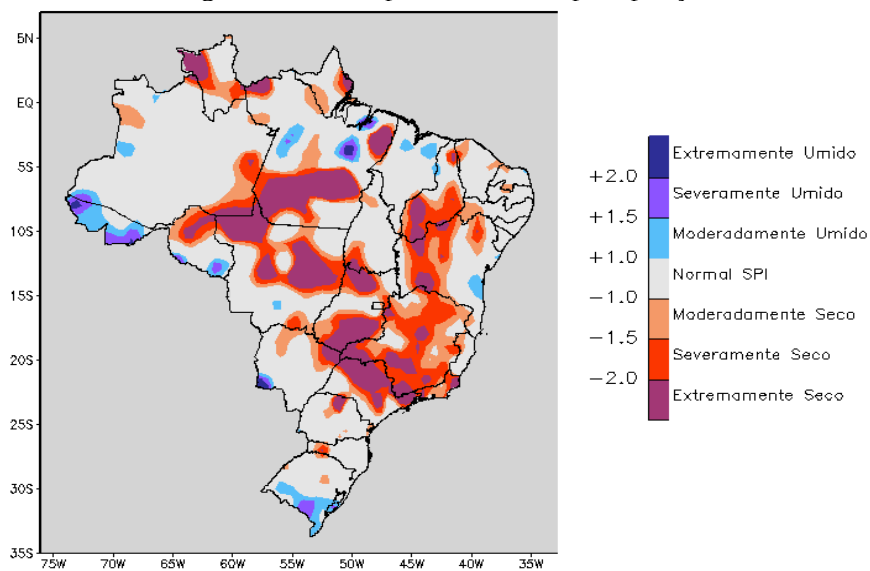


Fonte: ANA (2015).

Ainda na Figura 3, observa-se que a região sudeste teve seu período crítico no ano de 2014, onde ocorreu uma seca extremamente atípica, com probabilidades de ocorrência inferiores a 1% (tempo de retorno superior a 100 anos). A ANA (2014), levando em consideração apenas estações com mais de 50 anos de dados, verificou-se que em 25% delas a chuva de 2014 ficou entre as 3 piores já registradas. No estado de São Paulo, o DAEE contabilizou 50% das estações com média abaixo do esperado, sendo que em 30% o evento foi o mais seco já registrado.

Coelho, Cardoso e Firpo (2015a) calcularam o índice padronizado de precipitação para os verões de dezembro de 2013 a março de 2014 e de dezembro de 2014 a março de 2015 da região sudeste de São Paulo. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) define índice padronizado de precipitação como o número de desvios padrão de que a precipitação cumulativa observada se afasta da média climatológica, para uma variável aleatória com distribuição normal. Os valores encontrados para esse índice foram -3,66 e -1,47, respectivamente, que segundo a classificação de severidade de seca do INMET representa um evento extremamente seco em 2013/2014 e severamente seco em 2014/2015. A Figura 4 mostra o índice padronizado de precipitação em todo o país para janeiro de 2014.

Figura 4 – Índice padronizado de precipitação



Fonte: INMET (2016).

Almeida & Benassi (2015) afirmam que a queda dos índices pluviométricos na região sudeste diminuiu a diluição de efluentes agrícolas e domésticos não tratados que chegaram aos reservatórios, ocasionando um processo acelerado de eutrofização.

Com precipitações próximas às mais baixas já registradas, os principais reservatórios de abastecimento urbano da região Sudeste tiveram de operar no limite mínimo de suas capacidades. Um dos casos mais críticos foi o do Sistema Cantareira, em São Paulo.

Segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), o Sistema Cantareira é formado por um conjunto de reservatórios, túneis e canais com capacidade de armazenar água para o abastecimento público de cerca de 9 milhões de pessoas residentes nas zonas norte, central, parte da leste e oeste da capital paulista e em cidades nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.

O reservatório do Cantareira usualmente acumula água nos meses de outubro a fevereiro, onde os índices pluviométricos são maiores, o que garante bons volumes para os usos múltiplos ao longo do período de estiagem seguinte. Entretanto, entre outubro/2013 a março/2014, as precipitações anômalas causaram uma redução significativa no volume dos cursos de água das bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, áreas de contribuição ao Sistema Cantareira. Isto ocasionou a redução das vazões médias mensais afluentes aos reservatórios do Sistema Cantareira. Segundo a ANA (2015), registrou-se um valor de vazão média anual igual a $8,70 \text{ m}^3/\text{s}$, que é o menor valor desde 1930, o que corresponde a cerca de 22% da média anual da história ($39,44 \text{ m}^3/\text{s}$) e a 40% da vazão média de 1953 ($21,81 \text{ m}^3/\text{s}$), até então o menor valor de vazão média anual da história.

Entretanto, o estado mais crítico foi em janeiro de 2015, onde os reservatórios atingiram seu menor volume histórico de armazenamento (5%), levando o governo do Estado de São Paulo a instalar um sistema de bombeamento para transportar águas do volume morto, visando evitar o colapso de abastecimento da cidade de São Paulo (SABESP, 2016).

De acordo com Coelho et al. (2015b), os eventos de seca sobre o sudeste do Brasil foram ocasionados pelas condições atípicas de atividade convectiva na região tropical do norte da Austrália. A consequência principal foi a formação de um sistema atípico de alta pressão sobre o oceano Atlântico já aquecido, levando os sistemas frontais a realizarem trajetórias oceânicas. Isto beneficiou o aquecimento oceânico, que por meio da incidência de radiação solar, transportou umidade tropical (do Atlântico e da Amazônia) para o sul do Brasil, e desfavoreceu a formação de eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), principal fonte de produção de chuva na região sudeste do Brasil.

Segundo Otto et al. (2015), é muito difícil associar as mudanças climáticas recentes dos eventos de seca no Brasil à contribuição humana através de emissão de gases de efeito estufa.

Assim, a crise hídrica atípica enfrentada principalmente pela região sudeste é resultado de uma série de fatores, entre eles o mau planejamento da gestão hídrica na região, a alteração do regime de chuvas e falta de consciência de grande parte dos usuários. Os reflexos dessa crise foram abrangentes, aumentando o custo de alimentos e principalmente do abastecimento humano (PIZA, BUENO e PIZA, 2016).

No caso específico da bacia do rio Araguari, o período mais crítico foi observado entre os anos de 2012 a 2014, sendo em 2013 o ano de menor escassez. Segundo a ANA (2015), em 2012 grande parte da área de drenagem da bacia teve precipitações dentro do normal previsto. Entretanto, 90% das estações do Alto Araguari registraram uma diminuição nos índices pluviométricos com probabilidades de ocorrência de 15%, sendo considerado um evento entre seco e muito seco. Em 2013 toda a bacia teve precipitações dentro do normal previsto, com algumas exceções, onde dados monitorados na sub-bacia do Uberabinha registraram uma diminuição nos índices pluviométricos com probabilidades de ocorrência de 15% a 33%. Em 2014, a ANA (2015) registrou o pior período de escassez na bacia do Araguari. A seca ocorrida teve tempos de retorno entre 10 e 50 anos, com estações pluviométricas registrando uma diminuição nos índices pluviométricos com probabilidades de ocorrência menores que 5%.

O CBH do Rio Araguari, durante o ano de 2015, discutiu o desenvolvimento e a implementação do Plano de Contingência para Enfretamento da Crise Hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, que visa o monitoramento e gestão das sub-bacias declaradas ou com potencial de conflitos e mananciais urbanos.

Contudo, fica claro que o gerenciamento dos recursos hídricos feito de forma consciente é fundamental para evitar e combater eventos extremos como os citados anteriormente.

2.1.3 Usos múltiplos da água

A Lei Federal nº 9.433, de janeiro de 1997, prediz que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas. Assim, todos os setores usuários têm igualdade de acesso aos recursos hídricos. A Política Nacional faz uma ressalva a esta regra onde, para situações de

escassez, os usos prioritários da água passam a ser o consumo humano e a dessedentação de animais. Como as demandas para os mais diversos usos vêm crescendo, o número de conflitos também cresceu.

Segundo Sosinski (2010), a agricultura irrigada é a maior consumidora, utilizando cerca de 70% da água disponível. No país, a agricultura concentra-se na região Centro-Oeste, Sudeste e Sul, que detêm, juntas, cerca de 28,2% da quantidade hídrica nacional e cerca de 64,11% da população.

Desde 2005, o enquadramento dos corpos de água segundo suas classes passou por uma reavaliação, visando implantar condições mais adequadas de qualidade da água para as atividades humanas. Esta reformulação foi registrada por meio das Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 274:2000 e nº 357:2005 (SOUZA et al. 2014). Assim, a resolução 357 do CONAMA passou a estabelecer a classificação das águas doces segundo as atividades a ela destinadas, conforme a Figura 5.

Os Comitês de Bacia de cada Estado são os responsáveis por propor ao órgão competente o enquadramento dos corpos de água da bacia hidrográfica em classes de uso e conservação, conduzir ao Departamento de Recursos Hídricos tal classificação, aprovar o Plano da respectiva bacia hidrográfica e acompanhar sua implementação.

Também cabe aos Comitês organizar todo o processo de outorgas do uso da água. São eles os responsáveis por aprovar os valores a serem cobrados pelo uso da água da bacia hidrográfica, realizar o rateio dos custos de obras, programas e serviços de interesse comum a serem executados na mesma, e compatibilizar os interesses dos diferentes usuários da água, dirimindo, em primeira instância, os eventuais conflitos.

Figura 5 – Enquadramento dos corpos de água segundo uso

CLASSE	DESTINO
ESPECIAL	abastecimento para consumo humano após desinfecção preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral
CLASSE 1	abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado proteção das comunidades aquáticas recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película proteção das comunidades aquáticas em terras indígenas
CLASSE 2	abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional proteção das comunidades aquáticas recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer com os quais o público possa vir a ter contato direto aquicultura e a atividade de pesca
CLASSE 3	abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras pesca amadora recreação de contato secundário dessedentação de animais
CLASSE 4	navegação harmonia paisagística

Fonte: CONAMA (2016).

Os usos da água são classificados como usos consuntivos, no caso de se utilizar a água para abastecimento público urbano ou rural, indústria, irrigação ou dessedentação animal, e não consuntivos, no caso, por exemplo, de uso da água para geração hidrelétrica, navegação ou lazer. Esta classificação ocorre em função da quantidade hídrica demandada e das perdas quali-quantitativas geradas após os usos. A demanda hídrica é obtida pelo cálculo da “vazão de retirada”, volume de água que é retirado de um corpo de água em determinado intervalo de tempo para atender a determinado uso (ESTEVES, 2011).

Segundo Heller & Padua (2006), o uso consuntivo é responsável pela retirada de uma certa quantidade de água, que depois de utilizada, é devolvida em menor volume, e em grande parte dos casos com qualidade inferior, gerando uma perda quali-quantitativa. Esta parte da vazão retirada que retorna é denominada “vazão de retorno”. Seu cálculo é obtido pela multiplicação da vazão de retirada por coeficientes de retorno para cada uso. A água não devolvida, ou seja, a diferença entre a vazão de retirada e a vazão de retorno representa a “vazão de consumo”. De acordo com ANA (2013), os coeficientes de retorno usados são, em média, 0,8 para abastecimento urbano, 0,8 para abastecimento rural, 0,8 para abastecimento industrial, 0,2 para irrigação e 0,2 para criação de animais.

Em 2015, a ANA atualizou as estimativas de demandas hídricas consuntivas no Brasil. A demanda consuntiva total estimada foi de 2.275,07 m³/s. O setor de irrigação foi responsável pela maior parcela de retirada (55% do total), seguido das vazões captadas para fins de abastecimento humano urbano (22%), industrial (15%), animal (6%) e abastecimento humano rural (2%). A vazão efetivamente consumida foi de 1.209,64 m³/s. Segundo Tucci & Mendes (2006), no Brasil, os principais usos consuntivos da água são divididos em irrigação (63%), abastecimento humano (18%), setor industrial (14%) e uso animal (5%). A irrigação é a maior parcela consumidora dos recursos hídricos na bacia do rio Araguari, com 55,48% (CBH-Araguari, 2016).

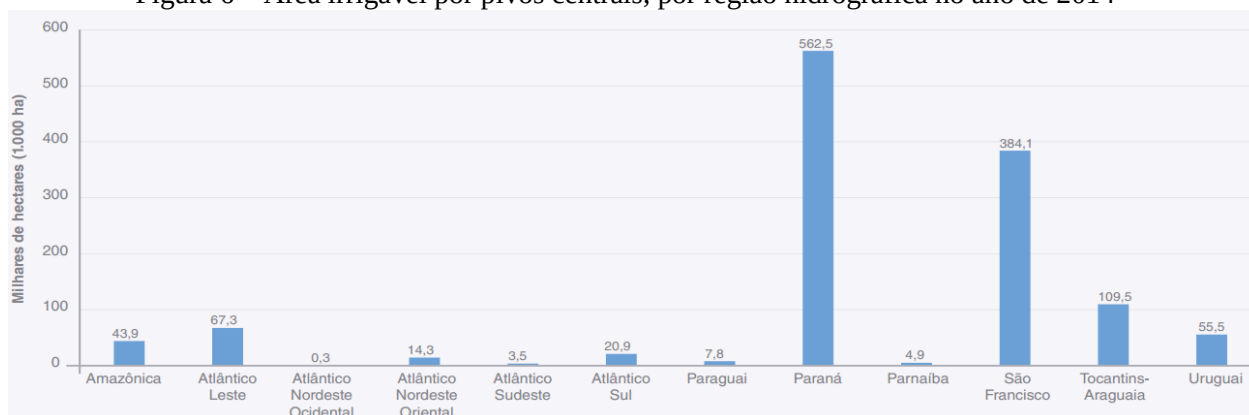
A sequência traz uma descrição mais detalhada para cada uso da água.

- Irrigação

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a área irrigada no Brasil em 2014 foi estimada em 6,11 milhões de hectares ou 21% do potencial nacional, que corresponde a 29,6 milhões de hectares. Observa-se expressivo aumento da agricultura irrigada no Brasil nas últimas décadas, crescendo sempre à taxa superior a do crescimento de área plantada total. Nos últimos anos tem-se destacado a expansão dos métodos de irrigação localizada e por pivô central.

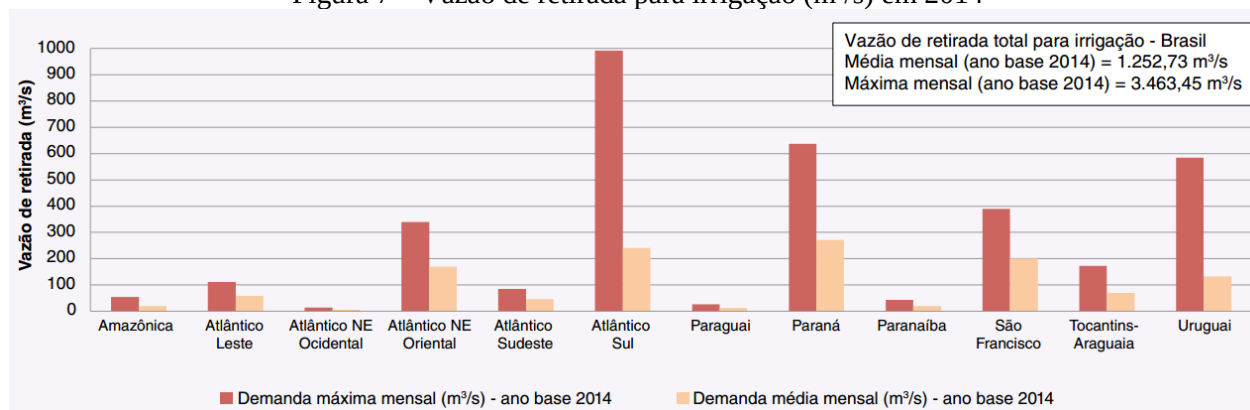
Cerca de 80% da área ocupada por pivôs centrais estão em Minas Gerais, Goiás, Bahia e São Paulo. A Figura 6 mostra as demandas de irrigação por divisão hidrográfica nacional, com destaque para as maiores áreas ocupadas por pivôs nas regiões do Tocantins-Araguaia e São Francisco e na bacia dos rios Grande, Paranapanema e Paranaíba (ANA, 2016).

Figura 6 – Área irrigável por pivôs centrais, por região hidrográfica no ano de 2014



Fonte: ANA (2016).

Júnior & Nicácio (2014) ressaltam que cerca de 96% das áreas irrigadas no Brasil são privadas. O restante das áreas estão contempladas em perímetros públicos de irrigação, alocados em regiões com elevado déficit hídrico, em especial no semiárido. A vazão média mensal estimada para o uso em irrigação no Brasil, em 2014, foi de 1.252,73 m³/s. Os quantitativos de retirada para irrigação por região hidrográfica são apresentados na Figura 7. Considerando os meses de maior demanda hídrica (meses mais secos) e que toda a área equipada para irrigação seria irrigada, a vazão captada poderia alcançar 2.673 m³/s em determinados períodos do ano (ANA, 2016). Segundo Souza et al. (2014), o alto consumo de água com irrigação provoca perdas significativas, induzindo ao desperdício e à contaminação de águas superficiais e subterrâneas. Somente o uso eficiente no processo da irrigação pode amenizar os prejuízos causados aos recursos hídricos e ao solo.

Figura 7 – Vazão de retirada para irrigação (m³/s) em 2014

Fonte: ANA (2016).

- Indústria

A água consumida em demandas industriais varia de acordo com o ramo de tecnologia da empresa, podendo ser desde a sua incorporação nos produtos até a lavagem de materiais, equipamentos e instalações, nos sistemas de refrigeração e geração de vapor. Assim como os demais usos consuntivos, uso industrial é um fator de poluição hídrica, podendo ser considerado o principal deles. A água proveniente de outorgas industriais pode retornar contaminada por resíduos tóxicos, como metais pesados e restos de materiais em decomposição (SOUZA et al. 2014).

- Abastecimento público

Heller & Padua (2006) afirmam que o abastecimento público mantém uma relação conflitante, de um lado seu uso satisfaz as necessidades primordiais do homem, de outro, ele provoca impactos. Para que essa dupla reação com o meio ambiente seja sustentável, o planejamento adequado é fundamental.

Os gestores são responsáveis pela instalação dos sistemas de abastecimento público e pela garantia de uso da água em quantidade estritamente necessária, sem usos supérfluos (JÚNIOR, 2016). Assim, dois pontos principais devem ser minimizados:

- as perdas físicas no sistema, relacionadas a vazamentos de água, que correspondem a uma grande porcentagem do que é aduzido. Segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2013), as perdas de água são elevadas no Brasil e têm se mantido em níveis próximos a 40% nos últimos doze anos, ainda que seja possível notar uma leve tendência de queda nos últimos anos. De acordo com o CBH Araguari (2016), as perdas físicas chegam a 27% na cidade de Uberlândia-MG;

- os desperdícios no interior das instalações prediais, que depende de uma conscientização de cada usuário.

Assim como nos demais usos consuntivos, o impacto ambiental mais significativo em uma instalação de abastecimento é o retorno da água em forma de esgoto sanitário. Segundo a ANA (2014), um balanço quantitativo dessa realidade revela que 70% da água captada para abastecimento público retorna aos cursos de água, sendo 80% deste volume composto por esgoto sanitário. Além

deste, de acordo com Heller & Padua (2006), outros potenciais impactos das instalações de abastecimento de água que, entretanto, podem ser considerados de pequena magnitude se comparados com atividades mais impactantes como a mineração, são:

- as obras de captação superficial, que podem provocar erosões nas margens e assoreamento nos leitos;
- nas obras de captação com construção de barragem de acumulação, os impactos ambientais do represamento podem ser significativos, tanto sobre a qualidade da água, quanto sobre o ambiente local, inclusive com disseminação de doenças;
- os resíduos gerados na operação das estações de tratamento de água, como água de lavagem dos filtros e de descarga de decantadores e floculadores, que necessitam ser tratados convenientemente antes de seu lançamento.

- Demanda não consuntiva

Os usos não consuntivos aproveitam a água nos próprios cursos de água, sem precisar retirá-la do sistema de captação, ou após sua captação, retornam integralmente aos seus mananciais. Segundo Souza et al. (2014), são exemplos de uso não consuntivo da água: a geração de energia elétrica, a navegação, a diluição de efluentes, a pesca, a preservação da flora e fauna e a recreação.

A navegação, um dos mais antigos meios de transporte, é também aquele que provoca menor impacto no ambiente, desde que se tomem as medidas necessárias para evitar acidentes com danos ambientais. O aproveitamento da energia hidrelétrica é a principal forma de uso não consuntivo da água. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2016), as usinas hidrelétricas respondem por cerca de 90% da produção de energia elétrica do país. Porém elas são causadoras de um grande impacto ambiental nas regiões onde são instaladas, pois tendem a alagar áreas extensas afetando ecossistemas, a qualidade da água e a população local, necessitando de ações mitigadoras e compensatórias.

Atividades relacionadas à recreação, lazer, harmonia paisagística e turismo também se enquadram em formas de uso não consuntivo da água. Elas afetam, em uma escala menor, a qualidade da água, principalmente as de contato primário, como a natação, o esqui-aquático e o mergulho, devendo assim seguir os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 357:2005.

2.2 Vazão de referência

O crescimento significativo nas demandas de água para múltiplos usos resulta em impactos ambientais e em conflitos pelo uso da água, afetando especialmente a manutenção de ecossistemas aquáticos naturais. Assim a estimativa de uma vazão de referência adequada para os processos de outorga é indispensável.

2.2.1 Vazão ecológica

A importância dos impactos hidrológicos causados por tais demandas impulsionou o desenvolvimento de estudos relacionados a ecohidrologia.

A ecohidrologia estuda as relações entre hidrologia e biota, utilizando os ecossistemas aquáticos como ferramenta base de gestão sustentável dos recursos hídricos. Um dos objetos de estudo da ecohidrologia é a vazão ecológica, de fundamental importância na determinação da disponibilidade hídrica e em processos de outorga de uso da água (PRUSKI et al. 2014). A vazão ecológica é, de uma forma geral, a vazão residual que deve permanecer nos cursos de água após a captação dos volumes outorgados em determinado trecho.

A determinação da vazão ecológica pode ser feita por vários métodos distintos. As principais metodologias estão fundamentadas em processos hidrológicos (histórico do fluxo), hidráulicos (geometria hidráulica), habitats e holísticos (VESTENA et al. 2012).

Segundo Tomaz (2012), ecologistas e ambientalistas encontram dificuldades e divergem entre si na determinação da vazão mínima ecológica. Assim, os valores máximos outorgáveis, que teoricamente deveriam considerar os aspectos ambientais relacionados a manutenção dos ecossistemas, ficam em função de vazões baseadas em análises estatísticas, como, por exemplo, a $Q_{7,10}$.

Segundo Pinto, Ribeiro e Silva (2016), a legislação brasileira adequa a gestão de recursos hídricos às heterogeneidades bióticas, entretanto, a forma como sua integração é feita junto a gestão ambiental é defasada, pois, ainda tem por base conceitos de vazões remanescentes associadas às metodologias hidrológicas quantitativas, anteriores às metodologias ecológicas e ambientais atuais. De acordo com Medeiros, Souza e Ribeiro (2011), as outorgas no Brasil são liberadas por meio da adoção de um valor único de vazão ecológica, determinada por métodos hidrológicos baseados em dados de séries históricas de vazão, desconsiderando a escala espaço-temporal e a variabilidade

hidrológica, intrínsecos aos escoamentos hidrológicos, além das características dos micro-habitats ao longo do curso de água.

Segundo Longhi & Formiga (2011), as metodologias atuais utilizadas na estimativa de vazões de referência não foram desenvolvidas considerando aspectos principais de proteção ambiental. Só recentemente, com a crescente preocupação com as questões ambientais, é que surgiram metodologias especialmente desenvolvidas para a determinação de vazões ecológicas, que incorporam variáveis ambientais na concepção, tais como metodologias Habitat e as metodologias Holísticas. Entretanto, a carência de metodologias que englobam estes aspectos é alarmante, especificamente para aplicação em rios tropicais brasileiros, com características distintas dos rios de regiões de clima temperado, de onde provem a maior parte destes métodos ecológicos (LONGHI & FORMIGA, 2011).

Vestena et al. (2012) desenvolveram um estudo onde são consideradas, no cálculo da vazão ecológica, a biota do curso de água e suas relações. Os resultados sugeriram que os métodos atuais para a determinação de uma vazão de referência são defasados, pois, estes não garantem o volume mínimo de água necessário à manutenção de ecossistemas fluviais. Assim, para que as captações de água sejam feitas de forma mais adequada são necessárias novas análises para avaliar com mais precisão as alterações espaciais e também temporais dos processos hidrológicos. Embora exista o consentimento de que não há um valor singular capaz de garantir a conservação dos ecossistemas aquáticos, nenhuma legislação estadual ou federal considerou em seu texto a importância da adoção de hidrogramas ecológicos e a sazonalidade da oferta hídrica (PINTO, RIBEIRO e SILVA, 2016).

2.2.2 Vazão máxima outorgável

Cada Estado brasileiro estabelece seu próprio critério de outorga e direito de uso da água, ou seja, cada domínio estadual possui uma vazão máxima outorgável, também chamada de vazão de referência.

De acordo com a ANA (2005), as vazões de referência utilizadas para deferimentos de usos da água no Brasil são baseadas nos seguintes métodos: vazão média mínima de sete dias com período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$), vazões associadas às permanências de 95% (Q_{95}) e 90% (Q_{90}) e vazões médias de longo período. A Tabela 3 mostra estes critérios para concessão de outorga de captação de águas superficiais no território nacional.

As metodologias usuais para estimativa destas vazões de referência são baseadas em modelos estatísticos de distribuição probabilística, dentre eles: Gumbel, log-normal II, Pearson tipo III e log-Pearson tipo III para eventos máximos, Weibull, log-normal III, log-Gumbel, Pearson tipo III e log-Pearson tipo III, para os mínimos (HIDROTEC, 2016). Métodos de curva de permanência também são bastante difundidos nestas estimativas, principalmente na estimativa das vazões Q_{90} e Q_{95} .

Em Minas Gerais, o IGAM utiliza o trabalho Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais, elaborado por Souza (1993), para a estimativa da $Q_{7,10}$. De uma forma geral, este trabalho se baseia em tipologias regionais homogêneas hidrológicas e de rendimentos específicos médios mensais, assim como contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência (MOREIRA, 2010). Sua metodologia estima o valor da vazão $Q_{7,10}$ em função da vazão característica da seção de interesse e do fator de proporção fornecido pela função de inferência regionalizada, obtida pela tipologia homogênea.

Silveira, Moura e Andrade (2006) determinaram a $Q_{7,10}$ no rio Cuiabá, Mato Grosso, visando obter informações sobre a disponibilidade hídrica antes da implantação do reservatório de aproveitamento múltiplo de Manso (APM Manso) e sobre as alterações no ciclo natural fluviométrico decorrentes de sua construção. Foram estimados os valores de $Q_{7,10}$ por meio de três métodos de distribuição diferentes, sendo eles: de Gumbel, log-normal e de frequência. Os resultados obtidos pelas três metodologias foram próximos, sendo obtida uma melhor consistência para as distribuições de frequência e de Gumbel. A diferença relativa entre a $Q_{7,10}$ adotada e a de log-normal, com o resultado mais discrepante, foi de -15,76%.

Tabela 3 – Critérios adotados para concessão de outorga de captação de águas superficiais no Brasil

Domínio	Órgão gestor	Legislação que institui a política de recursos hídricos	Vazão máxima outorgável em cursos de água superficiais	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
União	Agência Nacional de Águas (ANA)	Lei Nº 9.433/1997	70% da Q ₉₅ podendo variar em função das peculiaridades de cada região. Sendo que para cada usuário individual, pode ser outorgado no máximo 20% da vazão outorgável. ¹	Não existe, em função das peculiaridades do País, podendo variar o critério. ¹	1,0 L s ⁻¹	Resolução ANA 542/2004 ¹
Acre	Instituto de Meio Ambiente do Acre (IMAC)	Lei Nº 1500/2003 ^{2,5}	-	-	-	-
Alagoas	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SE-MARH)	Lei Nº 5.965/1997 ⁶	90% da Q _{90reg}	Decreto Estadual N.º 6/2001 ⁷	1000 L h ⁻¹ (0,28 L s ⁻¹)	Decreto Estadual N.º 6/2001 ⁷
Amapá	Secretaria de Meio Ambiente do Amapá	Lei 686/2002 ^{1,8}	-	-	-	-
Amazonas	Secretaria de Mineração, Geodiversidade e Recursos Hídricos (SEMGRH)	Lei nº 2.712/2001 ¹	-	-	-	-
Bahia	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA-BA)	Lei Nº 11.612/ 2009 ⁹	80% da Q ₉₀	Decreto Estadual N.º 6.296/97 ¹⁰	0,5 L s ⁻¹	Decreto Estadual N.º 6.296/97 ¹⁰
Ceará	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH-CE)	Lei Nº 14.844/2010 ^{1,11}	90% da Q _{90reg}	Decreto Estadual N.º 23.067/94 ¹²	2,0 m ³ h ⁻¹ (0,56 L s ⁻¹ – para águas superficiais e subterrâneas)	Decreto Estadual N.º 23.067/94 ¹²
Distrito Federal	Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal (ADASA-DF)	Lei Nº 2.725/2001 ^{1,13}	80% Q _{7,10} , Q ₉₀ ou Q _{ml}	Decreto Nº 22.359/2001 ¹⁴	1 L s ⁻¹	Decreto Distrital N.º 22.359/2001 ¹⁴
Espírito Santo	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA-ES)	Lei Nº 5.818/1998 ¹⁵	50% da Q _{7,10} (exceto para os corpos de água na Região Hidrográfica do Rio Itaúnas, do Rio São Mateus, do Rio Barra Seca e em cursos de água intermitentes, que a vazão de referência a ser considerada é a Q ₉₀)	Instrução Normativa IEMA Nº 010/ 2007 ¹⁶	1,5 L s ⁻¹ (máximo 43200 L dia ⁻¹)	Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos CERH Nº 017/2007 ¹⁶

Continuação Tabela 3 - Critérios adotados para concessão de outorga de captação de águas superficiais no Brasil

Domínio	Órgão gestor	Legislação que institui a política de recursos hídricos	Vazão máxima outorgável em cursos de água superficiais	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
Goiás	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH-GO)	Lei Nº 13.123/1997 ¹⁷	70% da Q ₉₅	Resolução Nº 09/2005 ¹⁷	Não estão ainda definidos	-
Maranhão	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA-MA)	Lei Nº 8.149/2004 ¹⁸	20% da Q ₉₀	Decreto Nº 27.845/2011 ¹⁹	0,20 L s ⁻¹	Decreto Estadual Nº 27.845/2011 ¹⁹
Mato Grosso	Secretaria de Estado de Meio Ambiente/Superintendência de Recursos Hídricos (SURH/SEMA)	Lei Nº 6.945/1997 ¹	70% da Q ₉₅	Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CEHIDRO) Nº 27/2009 ²⁰	0,25% da Q ₉₅ para os cursos de água com vazão de referência (Q ₉₅) até 200 L s ⁻¹ ; e até 0,5 L s ⁻¹ para cursos de água com vazão de referência (Q ₉₅) superiores a 200 L s ⁻¹	Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CEHIDRO) Nº 27/2009 ²⁰
Mato Grosso do Sul	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL)	Lei Nº 2.406/2002 ²¹	70% Q ₉₅	Resolução do Conselho estadual de recursos Hídricos CERH/MT Nº 25/2014 ²²	2,5 L s ⁻¹ para derivações; 1,5 L s ⁻¹ para captação por usuário; e 2,5 L s ⁻¹ para atendimento a pequenas populações	Resolução do Conselho estadual de recursos Hídricos CERH/MT Nº 25/2014 ²²
Minas Gerais	Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM)	Lei Nº 13.199/1999 ²³	50% da Q _{7,10} (30% da Q _{7,10} nas bacias hidrográficas dos Rios Jequitaiá, Pacuí, Uruçuia, Pandeiros, Verde Grande, Pará, Paropeba e Velhas, exceto as áreas destas bacias consideradas pelo IGAM como de conflito pelo uso da água, que será outorgado até o limite de 50% da Q _{7,10})	Resolução Conjunta SEMAD-IGAM Nº 1548/2012 ²⁴	1,0 L s ⁻¹ para a maior parte do Estado e 0,5 L s ⁻¹ para as regiões de escassez (águas superficiais)	Deliberação Normativa CERH - MG Nº 09, de 16 de junho de 2004 ²⁵
Pará	Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará (SEMA-PA)	Lei Nº 6.381/2001 ¹	70% Q ₉₅	Diário Oficial Nº 31770/2010 Secretaria de Estado de Meio Ambiente Instrução Normativa Nº 55/2010 ²⁶	86 m ³ dia ⁻¹ , com a vazão instantânea máxima de 1L s ⁻¹ , para qualquer uso	Secretaria de Estado de Meio Ambiente Alteração da Resolução CERH N.º 09 /2009 ²⁷

Continuação Tabela 3 - Critérios adotados para concessão de outorga de captação de águas superficiais no Brasil

Domínio	Órgão gestor	Legislação que institui a política de recursos hídricos	Vazão máxima outorgável em cursos de água superficiais	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
Paraíba	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESPA-PB)	Lei Nº 6.308/1996 ¹	90% da Q _{90reg}	Decreto Estadual 19.260/1997 ¹	2,0 m ³ h ⁻¹ (0,56 L s ⁻¹ para águas superficiais e subterrâneas)	Decreto Estadual 19.260/1997 ¹
Paraná	Instituto das Águas do Paraná	Lei nº 12.726/1999 ²⁸	50% da Q ₉₅	Decreto Estadual 4646/2001 ²⁹	1,8 m ³ h ⁻¹ (0,5 L s ⁻¹)	Instituto das águas do Paraná Portaria 006/2011 ³⁰
Pernambuco	Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC	Lei N.º 11.426/1997 ¹	80% Q ₉₀ ^{2, 31}	-	0,5 L s ⁻¹ ou 43 m ³ dia ⁻¹ (águas superficiais)	Decreto Estadual 20.423/98 ³²
Piauí	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí (SEMAR-PI)	Lei Nº 5.165/2000 ³⁴	80% da Q ₉₅ ²	-	-	-
Rio Grande do Norte	Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SERHID-RN)	Lei Nº 6.908/1996 do Estado do Rio Grande do Norte ¹	90% da Q _{90reg}	Decreto Estadual Nº 13.283/97 ³⁵	1,0 m ³ h ⁻¹ (0,28 L s ⁻¹)	Decreto Estadual Nº 13.283/97 ³⁵
Rio Grande do Sul	Secretaria do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul – SEMA-RS	Lei Estadual Nº 10.350/1994 ¹	-	Não há ainda norma fixando essa vazão. ⁴	Média mensal até 2,0 m ³ dia ⁻¹ (águas subterrâneas)	Decreto Estadual 42047/2002 ¹
Rio de Janeiro	Instituto Estadual do Ambiente (INEA)	Lei 3239/1999 ³⁶	50% da Q _{7,10}	Portaria da Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA) Nº 567/ 2007 ³⁷	0,4 L s ⁻¹ e 34.560 L dia ⁻¹	Resolução do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) Nº 63/2012 ³⁸
Rondônia	Secretaria de Estado de Desenvolvimento Ambiental (SE-DAM)	Lei Complementar Nº 255/2002 ¹	-	-	-	-

Continuação Tabela 3 - Critérios adotados para concessão de outorga de captação de águas superficiais no Brasil

Domínio	Órgão gestor	Legislação que institui a política de recursos hídricos	Vazão máxima outorgável em cursos de água superficiais	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
Roraima	Fundação Estadual do Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia de Roraima – FEMACT ³⁹	Lei Nº 547/2006	80% da $Q_{7,10}$ ou Q_{90} ou Q_{mlp} , ou ainda, na ausência das anteriores, vazões instantâneas medidas pelo usuário pelo menos nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril que corresponde ao período seco no estado (no caso de abastecimento humano e dessedentação de animais, os limites poderão atingir até 90% da $Q_{7,10}$)	Decreto nº 8.123/2007 ⁴⁰	1L s ⁻¹	Decreto nº 8.123/2007 ⁴⁰
Santa Catarina	Sistema de Informações de Recursos Hídricos do Estado de Santa Catarina (SIRHESC)	Lei Nº 9.748/1994 ⁴¹	50% da Q_{98}	Portaria SDS 036/08 - Critérios Gerais de Outorga alterada pela Portaria SDS nº 051/2008 ⁴²	1 m ³ h ⁻¹ (0,28 L s ⁻¹)	Portaria SDS 036/08 - Critérios Gerais de Outorga alterada pela Portaria SDS nº 051/2008 ⁴²
São Paulo	Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE)	Lei Nº 7.663/1991 ⁴³	50% da $Q_{7,10}$	Lei Nº 9.034/1994 ⁴⁴	5 m ³ dia ⁻¹	Portaria DAEE nº 2292/2006 Reti-ratificada em 03/08/2012 ⁴⁵
Sergipe	Secretaria de Estado do Planejamento de Sergipe (SEPLANTEC/SE)	LEI Nº 3.870/1997 ⁴⁶	90% da Q_{90}	Resolução Nº 01/2001 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH/SE) ⁴⁷	2.500 L h ⁻¹ , ou cerca de 0,7 L s ⁻¹	Resolução Nº 01/2001 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH/SE) ⁴⁷
Tocantins	Instituto Natureza do Tocantins (NATURATINS)	Lei Nº 1.307/2002 ^{1, 48}	75% da Q_{90}	Decreto Estadual Nº 2.432/2005 ⁴⁹	21,60 m ³ dia ⁻¹	Portaria NATURA-TINS Nº 118/2002 ¹

Fonte: ANA (2016).

¹(ANA, 2005) ²(ANA, 2007) ³(OLIVEIRA, IARA DE CASTRO E, 2013) ⁴(GRANZIERA, 2013) ⁵(ESTADO DO ACRE, 2003) ⁶(ESTADO DE ALAGOAS, 1997) ⁷(ESTADO DE ALAGOAS, 2001) ⁸(ESTADO DO AMAPÁ, 2002) ⁹(ESTADO DA BAHIA, 2009) ¹⁰(ESTADO DA BAHIA, 1997) ¹¹(MATOS, 2012) ¹²(ESTADO DO CEARÁ, 2010) ¹³(DISTRITO FEDERAL, 2001b) ¹⁴(DISTRITO FEDERAL, 2001a) ¹⁵(ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 1998) ¹⁶(IEMA, 2007) ¹⁷(CERH/GO, 2012) ¹⁸(ESTADO DO MARANHÃO, 2004) ¹⁹(ESTADO DO MARANHÃO, 2011) ²⁰(CEHIDRO-MT, 2009) ²¹(ESTADO DO MATO GROSSO DO SUL, 2002) ²²(CERH/MS, 2014) ²³(ESTADO DE MINAS GERAIS, 1999) ²⁴(IGAM, 2012) ²⁵(CERH/MG, 2004) ²⁶(SEMA/PA, 2010) ²⁷(CERH/PA, 2010) ²⁸(ESTADO DO PARANÁ, 1999) ²⁹(ESTADO DO PARANÁ, 2001) ³⁰(IAP, 2011) ³¹(BENETTI; LANNA; COBALCHINI, 2003) ³²(ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998) ³³(ESTADO DO PIAUÍ, 2000) ³⁴(ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, 1997) ³⁵(ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1999) ³⁶(ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1999) ³⁷(SERLA, 2007) ³⁸(INEA, 2012) ³⁹(ESTADO DE RORAIMA, 2006) ⁴⁰(ESTADO DE RORAIMA, 2007) ⁴¹(ESTADO DE SANTA CATARINA, 1994) ⁴²(SDS/SC, 2008) ⁴³(ESTADO DE SÃO PAULO, 1991) ⁴⁴(ESTADO DE SÃO PAULO, 1994) ⁴⁵(DAEE, 2012) ⁴⁶(ESTADO DO SERGIPE, 1997) ⁴⁷(CONERH/SE, 2001) ⁴⁸(ESTADO DO TOCANTINS, 2002) ⁴⁹(ESTADO DO TOCANTINS, 2005)

Silva, Marques e Lemos (2009) avaliaram três metodologias de cálculo para as vazões mínimas de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} . A área de estudo foi a bacia hidrográfica do rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias. Foram avaliadas as metodologias propostas pela Eletrobrás (1985) apud Silva et al. (2009), por Chaves et al. (2002) apud Silva et al. (2009) e o método da vazão específica. Os valores das vazões mínimas de referência estimados pelas três metodologias foram comparados com os valores de vazão mínima observados em cada uma das 28 estações fluviométricas da região estudada. Os valores de vazão mínima observados foram estimados por análise probabilística (Log-Normal a dois e três parâmetros, Pearson III, Log-Pearson III e Weibull), no caso da $Q_{7,10}$, e curvas de permanência para Q_{90} e Q_{95} . As diferenças relativas médias entre o valor observado e o estimado pelas metodologias da $Q_{7,10}$ foram significativas, sendo percentuais de 26,78%, 100,67% e 94,29%, para os métodos tradicional, Chaves et al. (2002) e da vazão específica, respectivamente. As demais vazões de referência obtiveram diferenças relativas entre o valor observado e o estimado iguais a 22,67%, 42,96%, 40,99%, para a Q_{90} , e 29,69%, 51,29%, 48,55%, para a Q_{95} , considerando, respectivamente, os métodos tradicional, Chaves et al. (2002) e da vazão específica.

Queiroz et al. (2010) desenvolveram um estudo buscando modelar as séries de vazões mínimas de 1 e de 7 dias com período de recorrência de 10 anos observadas em rios do estado do Paraná. Foi utilizado a distribuição de probabilidade generalizada de valores extremos (GEV) por meio do método dos momentos de combinação linear das estatísticas de altas ordens. A comparação dos resultados estimados para $Q_{1,10}$ e $Q_{7,10}$ revelaram que, em apenas uma estação (82170000), a relação entre $Q_{7,10}$ e $Q_{1,10}$ foi menor que 1. Queiroz et al. (2010) também concluíram que a proporcionalidade entre a vazão de 1 e a de 7 dias estimada foi de até 10% para 53,19% das estações. A maior diferença foi obtida na estação de número 65985000, onde essa proporcionalidade apresentou uma variação de 74,2%. Os resultados indicaram que as vazões $Q_{1,10}$ são mais restritivas do que as vazões $Q_{7,10}$, tornando-as, do ponto de vista ecológico, mais interessantes como vazão de referência.

Pinto et al. (2010) realizaram a estimativa $Q_{7,10}$ da estação hidrológica Ponte do Itabapoana, instalada no rio Itabapoana, localizado na divisa entre Espírito Santo e o Rio de Janeiro. Foram comparadas os valores encontrados pelos métodos de distribuições de probabilidades de Gumbel, Weibull e Log-Normal 3 parâmetros. A distribuição Weibull obteve o melhor ajuste na estimativa da vazão

mínima média de sete dias. A diferença relativa entre as demais metodologias e a de Weibull foram de 1% para Gumbel e 4% para Log-Normal 3 parâmetros.

Leme & Chaudhry (2005) determinaram a vazão mínima de sete dias consecutivos do médio rio Jaguari Mirim por meio da análise dos dados existentes em série histórica de 50 anos, considerando as metodologias de distribuição probabilística de Gumbel e Weibull. Além disso, foram feitas estimativas pelos métodos de regiões hidrológicas semelhantes, sendo eles o método da vazão média das mínimas anuais de um mês de longo período e o método da vazão média das mínimas anuais de sete dias de longo período. Os métodos das regiões hidrológicas semelhantes forneceram $Q_{7,10}$ próximas, sendo 2,08 m³/s a vazão média das mínimas anuais de um mês de longo período, e 2,05 m³/s a vazão média das mínimas anuais de sete dias de longo período. Entretanto estes resultados foram significativamente superiores aqueles obtidos por Gumbel e Weibull, sendo 18,86% e 17,14% maiores que a vazão $Q_{7,10}$ de 1,75 m³/s, obtida por meio da distribuição de Gumbel, e 19,54% e 17,82% maiores que a vazão $Q_{7,10}$ de 1,74 m³/s, obtida por meio da distribuição de Weibull.

Chaves et al. (2002) compararam duas metodologias para a estimativa das vazões mínimas Q_{90} . Foram comparados o método tradicional de regressão regional com o método alternativo proposto baseado em técnicas de interpolação e extrapolação automática em ambiente SIG. Os resultados estimados por estes métodos foram comparados com valores Q_{90} observados obtidos por curvas de permanência de séries históricas fluviométricas da bacia do rio Itapicuru. A diferença relativa foi significativa para alguns pontos da bacia, chegando a 161% para o método proposto, e 527,6% para o tradicional.

Silva et al. (2006) compararam os valores de $Q_{7,10}$ calculados com base em modelos de probabilidade de séries históricas com aqueles obtidos pela metodologia de Souza (1998) apud Silva et al. (2006). Sua área de estudo foi a sub-bacia do Alto Rio Grande, em Minas Gerais. Os métodos probabilísticos aplicados foram os de Log-normal 3 parâmetros, Weibull e Gumbel. A metodologia de Souza (1998) apud Silva et al. (2006) é utilizada pelo IGAM na estimativa da $Q_{7,10}$ para o estado de Minas Gerais. A diferença relativa entre os valores obtidos pela metodologia adotada pelo IGAM e aquela estimada pelos métodos estatísticos teve um valor médio de 20% para as estações de monitoramento utilizadas, chegando a um máximo de 46,34%.

Moreira e Silva (2014) analisaram métodos para estimativa da $Q_{7,10}$ e da vazão média de longa duração (Q_{mld}). Foram consideradas as metodologias do estudo Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais (SOUZA, 1998) e os métodos de regionalização de vazões Tradicional, Proporcionalidade de vazões e Conservação de Massas (MCM). Os resultados foram comparados com os valores obtidos por análise probabilística das séries históricas das 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba. A comparação foi feita por meio da diferença relativa entre o valor observado de $Q_{7,10}$ (análise probabilística) e cada uma das 4 metodologias utilizadas. Os valores médios, considerando as 15 estações, das diferenças relativas foram -4,45%, -11,09%, 12,73% e -45,15%, para os métodos tradicional, Proporcional, MCM e dos Deflúvios, respectivamente.

Tais estudos mostram o impacto e a importância do método escolhido para a estimativa de vazões de referência, principalmente na usual $Q_{7,10}$.

2.2.3 Sazonalidade na vazão de referência

Além disso, a sazonalidade do regime de ocorrência das vazões, se considerada no cálculo dos volumes máximos outorgáveis, pode apresentar um potencial aumento na disponibilidade de uso dos recursos hídricos (COSTA, 2015).

Euclides, Ferreira e Faria Filho (2006) analisaram o critério de outorga sazonal no cálculo da $Q_{7,10}$ frente a base anual atualmente utilizada pelo IGAM. O objetivo foi otimizar o uso da água visando potencializar sua aplicação na agricultura irrigada. Foram utilizadas vazões diferenciadas para os períodos seco e chuvoso do ano, tendo como área de estudo a região hidrográfica do rio Grande, pertencente ao Estado de Minas Gerais. Os resultados mostraram que é possível aumentar a vazão a ser outorgada em até 61,8% (35,6 m³/s no período seco para 57,6 m³/s no período chuvoso). Nas demais sub-bacias estudadas do rio Grande, utilizando o mesmo procedimento, foi possível um acréscimo na vazão de 52,4% (217,9 m³/s no período seco para 332,1 m³/s no período chuvoso).

Silva, Marques e Lemos (2011) avaliaram a sazonalidade na vazão mínima de referência $Q_{7,10}$ considerando períodos trimestrais na base de cálculo, tendo como área de estudo a bacia hidrográfica do rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias. Os resultados da consideração da sazonalidade na disponibilidade hídrica implicaram em aumentos da vazão outorgável de 379 % no primeiro trimestre, 174,5 % no segundo trimestre, 36,1 % no terceiro trimestre e 14,7 % no quarto trimestre.

Flumignan et al. (2016) avaliaram o impacto da utilização da vazão de referência Q_{95} mensal em substituição à anual como critério para concessão de outorgas no rio Dourados, Mato Grosso do Sul. Foram utilizados dados disponíveis no banco de dados da Agência Nacional de Águas referentes às estações fluviométricas 64609000 (estação Dourados) e 64610000 (estação Porto Wilma). Para a Estação Dourados foi verificado que, em 8 meses do ano, os valores mensais da Q_{95} igualam ou superam os obtidos pelo critério anual. Nos meses de março e junho a Q_{95} é 14,2% superior a Q_{95} anual. Para os meses de outubro e novembro, os valores de Q_{95} mensal foram 10,7% menores que o índice anual. Comportamento semelhante foi encontrado para a estação Porto Wilma, onde em oito meses do ano a Q_{95} mensal foi igual ou superior a anual, chegando a um máximo de 27,9%. O mês de outubro apresentou a menor Q_{95} , sendo esta 7,5% inferior à anual.

Cordeiro & Marques (2012) avaliaram o impacto da sazonalidade na estimativa da Q_{90} no estado de Tocantins frente ao critério atual, com base anual. Foram adotados três períodos sazonais: seco (agosto, setembro, outubro e novembro), chuvoso (dezembro, janeiro, fevereiro e março) e o período normal (abril, maio, junho e julho). Foram estimados acréscimos médios de 320% e 46% na vazão de referência nos meses dos períodos chuvoso e normal, respectivamente. Já no período seco, o critério sazonal reduziu a disponibilidade outorgável em 17%.

Oliveira, Pruski e Nunes (2013) realizaram um estudo de disponibilidade das águas superficiais na bacia hidrográfica do ribeirão Entre-Ribeiros, em Minas Gerais, onde foram avaliados o impacto na mudança da porcentagem máxima outorgável de 30% (antigo critério) para 50% (critério atual) da vazão de referência definida pelo IGAM. Também foram analisadas vazões de referência com bases mensais frente ao cálculo em base anual atualmente em vigor. Os resultados obtidos evidenciaram que a mudança do critério de 30% para 50% da $Q_{7,10}$ anual promoveu aumentos de 5% a 170% no percentual de trechos em que o somatório das outorgas não superou a vazão máxima outorgável. Já o uso do critério de 30% da $Q_{7,10}$ mensal proporcionou aumentos de até 209% no percentual dos trechos atendidos.

Costa (2015) constatou que a troca da vazão $Q_{7,10}$ com base de cálculo anual para mensal proporcionou um crescimento da disponibilidade hídrica no alto curso da bacia hidrográfica do rio Uberaba, chegando a um aumento nas vazões escoadas de 2.488% no mês de fevereiro. Entretanto, no mês de outubro a disponibilidade hídrica reduziu em 47,22% quando comparado com a $Q_{7,10}$ anual. Também foram avaliadas as porcentagens máximas outorgáveis de 30%, 50% e 70% da $Q_{7,10}$,

sendo o critério atual (50% da $Q_{7,10}$) aquele que apresentou o maior potencial na disponibilidade hídrica.

De acordo com Pruski et al. (2014), o emprego das vazões mensais em substituição às anuais representou um alto potencial para a melhoria das condições de uso dos recursos hídricos na bacia do rio Paracatu, com aumento no potencial de uso de 10% nos meses de menor disponibilidade até valores que excedem os 200% nos meses de maior abundância dos recursos hídricos superficiais. A utilização da Q_{95} mensal em substituição à Q_{95} anual resultou em vazões até 37% menores nos meses de escassez, e valores que excedem os 100% nos meses chuvosos.

Bof (2010) realizou a comparação entre vazões de referência estimadas com base anual e mensal para os critérios do IGAM ($Q_{7,10}$) e da ANA (Q_{95}), tendo como base de estudo as estações de monitoramento fluviométrico da bacia hidrográfica do rio Paracatu. Considerando o critério do IGAM, a mudança da base anual para a base mensal proporcionou um aumento do volume permissível para outorga entre 91 a 168%. Para o critério da ANA, o aumento no volume outorgável varia entre 26,7% a 67,1%, sendo no período de julho a outubro a Q_{95} mensal chega a valores inferiores a Q_{95} anual.

Estes estudos mostram que o uso de vazões com bases mensais possibilita um aproveitamento mais racional e seguro dos recursos hídricos.

2.2.4 Estimativa da vazão de referência: metodologias para solucionar o problema das falhas temporais e má distribuição espacial das estações de monitoramento

As metodologias usuais para estimativa destas vazões de referência são baseadas em modelos estatísticos de distribuição probabilística.

Estes métodos de análise estatística dependem fundamentalmente de séries históricas obtidas em postos de monitoramento. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH/ANA (2016), estão em operação no País, por meio de diversas entidades, cerca de 8.760 estações pluviométricas e 4.133 fluviométricas. Das estações fluviométricas, 948 têm monitoramento de qualidade de água e 537 têm medições sedimentométricas.

Frente ao tamanho desta rede hidrológica de monitoramento, dificilmente estarão disponíveis dados em todos os locais de interesse. A existência de lacunas temporais e espaciais levam a aplicação de metodologias robustas para seu preenchimento.

-Metodologias de preenchimento de falhas e ausências em séries históricas monitoradas

O preenchimento de falhas e a extensão das séries são realizados por meio de correlações, segundo critérios consagrados, tais como as regressões lineares simples e potenciais (EUCLYDES, SOUZA e FERREIRA, 1999).

Métodos de interpolação determinista também são usuais, onde vale destacar o método do inverso ponderado das distâncias. Segundo Girardi et al. (2013) e Silva (2011), este método é muito utilizado para interpolar e gerar Modelos Digitais de Terreno (MDT), além da estimativa do comportamento espacial e temporal de um determinado dado climatológico. Sua metodologia consiste em utilizar todos os pontos amostrados que estejam próximos a um ponto a ser estimado, sendo sua contribuição proporcional ao inverso de sua distância (SOARES, 2000). Ou seja, quanto mais perto, maior a influência na estimativa do dado. Este método permite a complementação ou construção de uma nova série de dados a partir de um conjunto de dados pontuais conhecidos (LADIM, 2000).

-Metodologias para compensação da má distribuição espacial das estações de monitoramento

A má distribuição espacial das estações de monitoramento leva à necessidade do uso de técnicas de transferência de informações entre locais com dados e aqueles totalmente carentes. Desta forma, é usual a aplicação de métodos de regionalização de valores hidrológicos, principalmente aqueles referentes a vazões nos cursos de água. As técnicas de regionalização se baseiam no conceito de região hidrologicamente homogênea (RHH) (EUCLYDES, SOUZA e FERREIRA, 1999). Este conceito subdivide regiões de uma área maior com base na homogeneidade das características hidrológicas (TUCCI, 2005).

-Regiões homogêneas

Em geral, consideram-se as características físicas e climáticas da bacia como fatores principais a exercerem influência no seu comportamento hidrológico. Elementos físicos que caracterizam uma região são de grande importância no comportamento hidrológico de uma bacia, sendo capazes de

correlacionar a distribuição espacial da vazão com seu regime pluviométrico (BARBOSA et al. 2005).

Segundo Elesbon (2004), em estudos de gerenciamento de recursos hídricos é fundamental delimitar a homogeneidade hidrológica de cada região em bacias com grandes áreas de drenagem. Cruz (2010) define regiões hidrologicamente homogêneas como áreas de contribuições de bacias e sub-bacias onde a magnitude dos processos hidrológicos ocorre de forma similar, sendo o estudo dos componentes físicos indispensável para sua determinação.

Devido à variabilidade do clima, da topografia, da cobertura vegetal e do tipo de solo, regiões hidrologicamente homogêneas não devem se estender por grandes áreas. Por outro lado, a delimitação de áreas excessivamente reduzidas, resulta numa carência de dados que prejudica a confiabilidade das estimativas.

O Hidrotec (2016) classifica regiões hidrologicamente homogêneas considerando os critérios da distribuição de frequência das vazões adimensionalizadas de cada estação e a análise do ajuste do modelo de regressão múltipla das vazões médias com as características físicas e climáticas das sub-bacias.

Segundo Calegario (2014), a identificação das regiões hidrologicamente homogêneas é uma das primeiras etapas no estudo de regionalização de vazões, sendo considerada a etapa mais subjetiva e trabalhosa dada a quantidade e diversidade de metodologias. Dentre estas metodologias, destacam-se: o método de Cluster (comumente utilizada), a análise por entropia (mais complexa e que engloba distribuições estatísticas) e a identificação por meio da conveniência geográfica (vantajosa pela simplicidade e facilidade de aplicação, mas com certa subjetividade).

A delimitação de regiões hidrológicas considerando a continuidade geográfica/hidrológica associa semelhanças do comportamento dos cursos de água a fatores climáticos e fisiográficos. Nesta forma de delimitação são consideradas características hidrológicas, climáticas, geológicas, morfometria, cobertura vegetal e de tipo de solo. (CALEGARIO, 2014)

O uso e ocupação do solo desempenha papel fundamental na forma como a drenagem hidrológica ocorre nas bacias hidrográficas, principalmente cheias em áreas urbanizadas (ECOPLAN-LUME, 2010). Segundo Tucci (2005) e Blainski et al. (2011), a forma como o uso e ocupação do solo é

distribuído em uma bacia hidrográfica tem efeito significativo sobre a dinâmica hidrológica, em aspectos tanto quantitativos como qualitativos.

-Regionalização de vazões: modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica chuva-vazão é um dos principais mecanismos utilizados para regionalização de vazões.

O número de ferramentas computacionais capazes de realizar a modelagem hidrológica chuva-vazão, ou seja, a transformação de precipitação em vazão de cursos de água superficiais é grande, permitindo, por meio algoritmos matemáticos, a representação do escoamento superficial, subsuperficial e de base. Dentre os vários programas de modelagem chuva-vazão, destacam-se o HEC-HMS - Feldman (2000), IPH II -Tucci et al. (1981) apud Salla et al. (2015), e o EvalHid - Paredes-Arquiola et al. (2014b).

O programa computacional Evaluación de los recursos Hídricos (EvalHid), desenvolvido pela Universidade Politécnica de Valência, concilia uma interface amigável com uma grande capacidade de desenvolvimento de modelos precipitação-vazão em bacias hidrográficas complexas. Além disso, o EvalHid apresenta um reduzido número de parâmetros a calibrar, o que representa um ponto importante em regiões carentes de dados monitorados (SALLA et al., 2015).

O EvalHid permite a avaliação dos recursos hídricos em uma ou várias bacias hidrográficas simultaneamente e com diversos modelos chuva-vazão. São seis os modelos chuva-vazão disponíveis: Témez, HBV, Sacramento, GR2M, GR4J e AWBM. Estes modelos são do tipo agregado com aplicação semi-distribuída, o que significa que a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias, sendo possível em cada uma delas escolher um modelo disponibilizado pelo EvalHid (PAREDES-ARQUIOLA et al., 2014b).

Salla et al. (2015) analisaram a eficiência dos modelos Témez e HBV na simulação da vazão sintética no alto curso do rio Araguari, Minas Gerais. Os resultados mostraram séries sintéticas próximas. Como parâmetro para a medição da qualidade dos resultados foi utilizado o valor da simetria do ajuste entre a simulação média e a observação média ($F_{média}$). O ajuste perfeito é alcançado quando $F_{média} = 1,0$. Nos resultados obtidos a função $F_{média}$ variou entre 0,69 e 0,86, sendo para o modelo Témez valores acima de 0,80 e para o HBV um valor médio de 0,70. Assim, a aplicação

do modelo Témez, demonstrou melhor ajuste em comparação ao modelo HBV. Mas (2013) e Costa (2015) obtiveram resultados contrários. Mas (2013) avaliou as vazões da bacia hidrográfica do rio Túrria, na Espanha, onde a função $F_{média}$ variou entre 0,63 a 0,66 para o modelo Témez e entre 0,78 a 0,80 para o modelo HBV. Costa (2015) em seu estudo no alto curso do rio Uberaba estimou valores da função $F_{média}$ de 0,78 para o modelo Témez e 0,64 para o modelo HBV.

Segundo Salla et al. (2015), a grande quantidade de estações operantes na Espanha possibilitou, por meio da interpolação de dados vizinhos, melhor série de vazões simuladas nas diversas sub-bacias. Ao constatar este fato, Salla et al. (2015) concluiu que o modelo HBV se apresenta mais sensível quanto à qualidade dos dados de entrada de precipitação e evapotranspiração.

O modelo HBV, *Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning model*, originalmente desenvolvido pelo Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para prever o escoamento afluente às centrais hidrelétricas, calcula as vazões de uma bacia hidrográfica por meio da separação entre o volume de chuva que se torna escoamento superficial daquele infiltrado em aquíferos, considerando suas distribuições espaciais e temporais (BERGSTRÖM, 1995 apud ARQUIOLA et al., 2011).

Assim, o gerenciamento dos recursos hídricos pode ser definido como um conjunto de ações governamentais (leis, medidas provisórias, normas e regulamentos) destinadas a administrar o armazenamento, uso, aproveitamento e preservação da água, devendo considerar as fases do ciclo hidrológico e seus aspectos quantitativos e qualitativos.

2.3 Sistema de Suporte à Decisão

Os conflitos pelo uso múltiplo da água, o funcionamento interligado de sistemas de reservatórios e as restrições impostas pela disponibilidade e leis ambientais fazem com que a tarefa de se estabelecer políticas operacionais eficientes relacionadas aos recursos hídricos seja extremamente complicada.

Segundo Lima (2004), o crescimento acelerado e a pluralidade dos usos dos recursos hídricos causados pelo desenvolvimento econômico levaram ao desequilíbrio entre a demanda e a oferta, mo-

tivando assim, os constantes conflitos entre usuários, principalmente em regiões com escassez financeira. Assim, a necessidade de adoção de medidas no sentido de minimizar e administrar esses conflitos se torna cada vez mais evidente.

A análise de sistemas complexos de recursos hídricos pode envolver um grande número de variáveis e restrições, não existindo um procedimento de solução universal para todos os tipos de problemas (VIEIRA, SANTOS e CURI, et al. 2010).

De acordo com Santos et al. (2011), a solução para as dificuldades de planejamento e gestão dos recursos hídricos se encontra na utilização de metodologias e instrumentos capazes de auxiliarem nos processos de análise, operação, e tomadas de decisão.

A simulação matemática permite o cálculo dos volumes de água que podem ser armazenados em reservatórios, captados junto a cursos de água ou canais ou ainda distribuídos entre os múltiplos usos de uma bacia hidrográfica. A partir disto é feita a estimativa dos indicadores de desempenho do sistema, visando as infraestruturas existentes, as disponibilidades hídricas e demandas de água da bacia hidrográfica, além das regras de operação do sistema. Os cenários simulados mostram a evolução do estado da bacia hidrográfica, sendo uma importante ferramenta de suporte à decisão, permitindo identificar as políticas de gestão que asseguram o cumprimento dos objetivos do sistema, nomeadamente a compatibilização das disponibilidades com as necessidades de água (SIMÕES & OLIVEIRA, 2014).

Os crescentes avanços na tecnologia de processamento de informações têm impulsionado a criação e utilização de modelos matemáticos e computacionais integrados como ferramenta de suporte nas tomadas de decisão de problemas complexos de gestão de recursos hídricos.

Segundo Rodrigues (2005), além de permitir a conciliação de modelos matemáticos, estas ferramentas computacionais armazenam um grande número de dados e desempenham rotinas de processamento de dados de entrada, simulação e otimização do comportamento físico e operacional do sistema, além de apresentarem resultados em formato de fácil interpretação. Tal conjunto de características pode ser chamado de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD). A ferramenta AQUA-TOOL, a qual foi utilizada neste estudo, é um exemplo de SSD.

Vieira (2007) afirma que as principais limitações destes modelos estão na desratização dos processos contínuos e na dificuldade de equacionamento matemático de fenômenos físicos que sejam computacionalmente eficientes, conciliando tempo de execução e precisão dos resultados.

Os motivos destas limitações se encontram no fato de que nenhum processo físico poderá ser completamente observado e modelado matematicamente sem que os elementos de incerteza, inerentes a eventos naturais, sejam excluídos. Portanto, nenhuma expressão matemática poderá representá-los com precisão. Entretanto, a opção por uma representação matemática mais complexa leva a um aumento na dificuldade de se obter uma solução. Fatos como o aumento de memória computacional requerida, a necessidade de uma maior amostragem de dados, uma capacidade de processamento mais avançada para os cálculos numéricos de processos de linearizações, discretizações e convergência de cálculos iterativos limitam sua utilização.

2.3.1 Simulação e otimização

Os modelos de simulação tentam representar um sistema físico e prever seu comportamento sob um determinado grupo de condições, não necessitando, praticamente, de nenhuma exigência quanto à natureza do problema, a não ser a de que ele possa ser formulado matematicamente (VIEIRA & CURI, 2016).

Segundo Mauad (2000), a estrutura dos modelos de simulação é baseada em expressões matemáticas capazes de descreverem a operação de um sistema no tempo e no espaço. O objetivo desses modelos é representar e operar um sistema de forma minuciosa e, principalmente, fornecer informações para uma avaliação real do seu comportamento e colaborar nas tomadas de decisão para a solução mais adequada.

A principal limitação destes modelos está no fato de que não é possível restringir o espaço decisório sendo, portanto, a solução alcançada por longos cálculos iterativos, onde são processadas repetidas simulações para diferentes alternativas, analisando e comparando os resultados, ou seja, pelo método de tentativa e erro.

Braga (1987) apud Vieira (2011) afirma que são dois os modelos básicos de simulação em recursos hídricos. Enquanto um aborda à simulação dos processos hidrológicos, como a transformação de

chuva em vazão, o outro avalia os aspectos de dimensionamento e operação de sistemas de gestão das águas.

Cruz & Tucci (2005) analisaram um modelo de simulação de outorgas visando efetuar o balanço hídrico da bacia do Baixo-Jacuí, no Rio Grande do Sul. Foram utilizadas séries de vazões históricas para o cálculo dos valores de disponibilidade, sendo consideradas previsões de variações nas demandas futuras, a partir do ano de 1998, para os anos de 2010 e 2015. O processo foi efetuado para cada dia, seção a seção, simulando o “cenário” em que a outorga teoricamente foi efetuada. Os resultados foram consistentes e permitem uma melhoria na gestão hídrica da bacia, no que se refere ao múltiplo uso da água.

Os modelos de simulação utilizados para a análise de regras de operação em reservatórios visam o cálculo de balanço hídrico entre as vazões de entrada, de saída e variações no armazenamento. Segundo Vieira & Curi (2016), estes programas podem também incluir estimativas econômicas de prejuízos causados por enchentes, benefícios de geração de energia hidrelétrica e irrigação, pesca e outras características similares.

Santos et al. (2011) analisaram a operação de sistemas de reservatórios e perímetros irrigados, além de outros usos da água visando, por meio de simulações, estabelecer as políticas operacionais em bacias hidrográficas. Foram consideradas os múltiplos usos da água, incluindo captações via reservatórios ou a fio de água, como irrigação e demandas urbanas, controle de cheias, regularização de vazões, prevenção contra as secas e volumes metas dos reservatórios. Santos et al. (2011) também otimizaram as regras de operação de reservatórios, estabelecendo a destinação otimizada dos recursos hídricos existentes para o planejamento e estabelecimento de políticas operacionais. Os resultados se mostraram eficientes para a aplicação em regiões de escassos recursos hídricos, como o semiárido brasileiro, onde as áreas de irrigação são, em geral, abastecidas por reservatórios de pequeno e médio portes e, portanto, mais submissos às variações climáticas.

Os métodos de otimização, assim como os de simulação, são representados por equações matemáticas formadas por variáveis de decisão, mas diferem na forma como o algoritmo é utilizado. Nos modelos de otimização, o algoritmo pode ser resumido em uma função objetivo, onde os processos iterativos buscam minimizá-la ou maximizá-la, de acordo com as restrições impostas. Entretanto,

não existe um procedimento de otimização geral que resolva eficientemente qualquer tipo de problema.

Labadie (2004) realizou um estudo de otimização de sistemas de reservatórios por meio de funções objetivo, visando maximizar a geração de energia e o atendimento de demandas, e minimizar as perdas hídricas e econômicas nos períodos de escassez, respeitando sempre as vazões mínimas no trecho a jusante do reservatório para a preservação dos ecossistemas aquáticos. As restrições utilizadas incluíram as equações de continuidade e os volumes máximos e mínimos de operação de reservatórios.

As técnicas de otimização podem ser resolvidas de forma determinística ou estocástica, implícita ou explícita. A otimização determinística tem como fundamento as variáveis de entrada baseadas em séries históricas e eventos monitorados, ou seja, dados que revelam as condições hidrológicas naturais. Já a otimização estocástica implícita emprega como variáveis de entrada séries geradas por simulações ou por métodos de previsão. A otimização estocástica explícita se baseia em procedimentos estocásticos aplicados às séries históricas originais como variável de entrada, sem a necessidade do conhecimento de eventos futuros (ROS & BARROS, 2003 apud VIEIRA, 2011).

São várias as técnicas de otimização utilizadas na busca pela melhor solução para os problemas que envolvem sistemas de recursos hídricos. As técnicas de programação matemática nas quais os modelos de otimização são baseados podem ser classificadas em linear, dinâmica e não-linear. Labadie (2004) discutiu, em seu estudo de otimização de sistemas de reservatórios, o progresso crescente de pesquisas e aplicações de métodos de programação linear, não linear e dinâmica.

A seguir são apresentadas e discutidas as programações lineares (PL), não lineares (PNL) e dinâmicas (PD).

- Programação linear

Programação Linear (PL) é a técnica de otimização mais desenvolvida e aplicada em gerenciamento de recursos hídricos. Sua utilização vem da flexibilidade oferecida e da fácil adaptação a uma ampla gama de problemas, permitindo análises de grande porte. Existe uma grande disponibilidade de modelos computacionais baseados em programação linear, sendo encontrados em números significativos nos meios comerciais (VIEIRA & CURI, 2016).

A metodologia base da programação linear consiste na reprodução aproximada do comportamento natural de um sistema onde, por meio de um equacionamento linear, são alocados da forma mais eficiente os recursos limitados entre vários objetivos concorrentes, através da maximização ou minimização da função linear objetivo (LIMA, 2004). Entretanto, uma restrição importante da aplicação desta técnica é a exigência de linearidade das funções, que não representa diversos problemas de recursos hídricos.

A programação linear vem sendo amplamente utilizada no planejamento e manejo dos recursos hídricos, mesmo para os que possuem processos não lineares que, nesses casos, são representados matematicamente via artifícios de linearização.

Righetto & Filho (2003) realizaram uma análise da operação dos reservatórios Cruzeta e Armando Ribeiro Gonçalves, Rio Grande do Norte, por meio da programação linear, visando verificar a disponibilidade hídrica destes reservatórios frente aos múltiplos usos da água. Os resultados obtidos indicaram que, apesar da sazonalidade de oferta hídrica anual, é possível utilizar grandes volumes mensais para irrigação sem alterar a operação adequada dos reservatórios analisados.

Na análise feita por Santos et. al. (2011), o processo de otimização foi realizado por meio de algoritmos baseados em técnicas de programação linear, onde a função objetivo buscou minimizar perdas hídricas e maximizar o uso de água em um açude no semiárido paraibano. A programação linear sequencial permitia, a cada iteração, adequar o volume do reservatório após a entrada e saída de água, de modo a fornecer o valor armazenado corretamente. Para a implementação das não-linearidades encontradas nas funções objetivo e das restrições impostas foi utilizada a técnica de linearizações denominada Artifício de Linearização por Segmentos.

Medeiros (1985) apud Lima (2004) realizou uma análise da aplicabilidade da programação linear no plano de aproveitamento múltiplo de recursos hídricos na bacia do Alto Tietê – SP. O estudo visou usos múltiplos na bacia, tais como o abastecimento de água, o controle de enchente, a irrigação e a geração de energia elétrica, buscando atender a demanda da grande São Paulo.

Inúmeros estudos foram realizados conciliando a programação linear com a otimização do uso de recursos hídricos ao longo das últimas décadas, levando ao desenvolvimento de uma série de algoritmos baseados em equacionamentos lineares. Alguns exemplos de programas deste tipo são o MODSIM, ACQUANET, MIKE BASIN e AQUATOOL.

O MODSIM é um algoritmo de simulação e otimização, baseado em programação linear, e desenvolvido na “*Colorado State University*” por Labadie, Pinela e Bode (1984). Consiste em uma rede de fluxo de simulação de alocação de água que permite, com passos de cálculo mensais, obter uma solução para o objetivo imposto. Suas versões, atuais e anteriores, comprovaram sua eficácia quando aplicados em sistemas complexos de bacias hidrográficas, como a Bacia de Poudre no Colorado (LABADIE, HUTCHISON e FERGUSON, 1986).

Segundo Firmino (2007), o MODSIM representa uma ferramenta útil no desenvolvimento de técnicas de análise de sistemas de recursos hídricos no Laboratório de Sistema de Suporte a Decisão da Escola Politécnica da USP. Adaptações realizadas pela USP garantiram a ampliação das aplicabilidades desta ferramenta nos sistemas de recursos hídricos de diferentes regiões do país, indicando que este modelo pode ser extremamente útil na análise de alocação da água em bacias complexas.

Azevedo, Porto e Porto (1998) utilizaram o modelo MODSIM em uma análise da bacia do rio Piracicaba. Seus estudos permitiram avaliar a capacidade deste programa de combinar simulação e otimização, chegando a conclusão de que o MODSIM está entre os melhores neste ponto. A justificativa para tal afirmação está na sua alta capacidade de produzir soluções para satisfazer metas, prioridades e limitações específicas, sendo ainda capaz de avaliar “*trade-offs*” em regiões com conflitos entre os múltiplos usos da água em períodos de escassez.

Já Yancheva & Temelkova (2006) utilizaram o sistema de suporte à decisão MODSIM na análise da bacia Iskar, na Bulgária, em períodos de tempo mensal e sazonal, visando a possibilidade de um melhor aproveitamento hídrico.

O ACQUANET é um modelo de otimização de rede de fluxos para simulação de bacias hidrográficas utilizando técnicas de programação linear. Este modelo foi desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões - LabSid, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e é uma versão modernizada da ferramenta MODSIM. Segundo Vieira (2007), por meio deste modelo é possível criar e analisar redes complexas compostas por reservatórios interligados com um grande número de demandas, além dos trechos de canais responsáveis por seu abastecimento.

De acordo com Schardong et al. (2009), o modelo ACQUANET possui todas as características de um sistema de suporte à decisão, pois, este é capaz de realizar a interação entre o usuário e o computador por meio de uma interface amigável. Além disso, a forma como é estruturado o problema, e as possibilidades de análise dos resultados, auxiliam no processo de tomada de decisão. O desempenho do seu algoritmo na solução de problemas de alocação de água foi considerado satisfatório em sistemas hídricos que permitem uma modelagem linear.

Vale destacar também o modelo MIKE BASIN 2000, desenvolvido pelo *Danish Hydraulic Institute*, Dinamarca. Segundo Albertin, Mauad e Daniel (2006), este modelo é uma potente ferramenta capaz de realizar análises hidrológicas independentes e multiobjetivas para sistemas de abastecimento, irrigação, produção de energia elétrica, considerando ou não vazões mínimas, além de estudos qualitativos da água. A otimização do modelo é realizada por meio da integração com a função SOLVER do Excel. Lima (2002) utilizou o modelo MIKE BASIN na análise de conflitos de usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia, em São Paulo. Os resultados indicaram a necessidade de reservação como solução aos períodos de escassez.

Maia (2009) empregou o programa MIKE BASIN em uma análise quanti-qualitativa dos usos múltiplos do reservatório de Barra Bonita, em São Paulo. O estudo demonstrou que o cenário otimizado foi aquele onde foram estabelecidas prioridades iguais para geração de energia e navegação.

A descrição da ferramenta AQUATOOL é feita separadamente no item 2.4.

- Programação dinâmica

A Programação dinâmica (PD) é um método para a otimização de processos de decisão em vários estágios, sendo muito utilizada na análise de sistemas de recursos hídricos. Segundo Celeste, Santana e Santos (2016), a PD é o método mais adequado para solucionar problemas que envolvem processos de decisão sequencial em vários estágios, que variam em intervalos de tempo, assim como em função das atividades a serem atendidas, de rotas para pontos geográficos, etc., indicando em qual ponto do processo a decisão deve ser feita.

A base da programação dinâmica é o princípio da otimalidade, onde um problema composto por múltiplos objetivos é dividido em uma série de etapas mais simples, sendo a solução de cada uma das variáveis obtida separadamente (SIMONOVIC, 1992 apud LIMA, 2004). A PD possui melhor

desempenho sobre problemas não lineares, caracterizados pela tomada de decisão sequencial e aspectos estocásticos (YEH, 1985 apud VIEIRA & CURI, 2016).

A principal vantagem em sua aplicação está na adaptabilidade a sistemas complexos, estimulando sua aplicação na otimização de políticas operacionais de armazenagem de recursos hídricos. Um exemplo típico é a operação de um reservatório, onde o problema pode ser definido em estágios, como a determinação da sequência de reservação a ser alocada no tempo.

A PD se difere totalmente das demais técnicas de otimização, pois, nela não existe um padrão de solução do problema. Um ponto limitante da programação dinâmica é o problema da dimensionalidade. Este empecilho surge quando a discretização do problema é elevada, fazendo com que a otimização exija grandes quantidades de memória e de tempo de processamento (BARROS, 1997 apud CELESTE SANTANA e SANTOS, 2016).

Ponnambalam & Adams (1996) desenvolveram um estudo baseado em programação dinâmica estocástica para análise de multi-reservatórios, visando determinar a melhor forma de gerir os reservatórios responsáveis pelo fornecimento de água para irrigação e geração de energia nas cidades de Parambikulam e Aliyar, Índia.

Segundo Vieira & Curi (2016), apesar de ser mais compatível com problemas de gerenciamento de recursos hídricos, não são encontrados programas computacionais baseados em equacionamento dinâmico. Possivelmente, o principal fator que impede o desenvolvimento de modelos de uso geral seja os requerimentos de memória e de tempo de processamento elevados. Analisando o número de variáveis que o presente trabalho irá quantificar, este tipo de programação se torna inviável, sendo limitado pela capacidade de *hardware* disponível. Entretanto, o fator determinante é o resultado fornecido, que não necessariamente é o mais otimizado, sendo necessária um refinamento dos valores obtidos.

- Programação não linear

A Programação Não-Linear (PNL) se caracteriza principalmente pelo elevado tempo de processamento, quando comparado com outros métodos. O equacionamento envolvido nos modelos não lineares é mais complexo do que nos casos de programação linear e dinâmica (YEH, 1985 apud

VIEIRA, 2011). Os avanços nos sistemas de *hardware* dos computadores vêm estimulando a aplicação da programação não linear na solução de problemas de recursos hídricos. Mas, o não fornecimento de uma solução ótima global ao final do cálculo ainda representa um limitante importante, já que obriga o usuário a realizar um refinamento dos resultados.

Segundo Cirilo (1997), PNL se baseia em uma formulação matemática mais geral, sem simplificações, e com uma grande capacidade de abrangência, garantindo assim uma vantagem sobre as demais formas de programação. As desvantagens apresentadas são poucas, mas limitam sua aplicação no desenvolvimento de pesquisas. Dentre elas, vale ressaltar a incerteza de que o resultado obtido pode não ser global devido a não linearidade dos problemas e o tempo elevado de processamento na busca da solução ótima.

Moraes et al. (2008) desenvolveram um algoritmo matemático, com técnicas de programação não-linear, que utiliza uma metodologia de decomposição por variáveis, onde consideram na função objetivo e nas restrições, aspectos quantitativos e de qualidade. O principal objetivo foi a maximização aproveitamento hídrico na bacia hidrográfica do Pirapama, no Estado do Pernambuco. Os resultados demonstraram que, uma vez considerado o aspecto qualitativo da água, juntamente com os outros aspectos, a redução na disponibilidade hídrica da bacia foi considerável.

Francazo et al. (2000) apud Lima (2004) realizaram a otimização do sistema da Bacia do Rio Paranaíba, considerando as usinas de Emborcação, Nova Ponte, Itumbiara, Cachoeira Dourada e São Simão, situadas na região Sudeste do Brasil. A otimização visou determinar as vazões a serem liberadas e reservadas a cada mês, cuja função objetivo buscou minimizar os valores vertidos resultantes de regras de operação ao longo do período analisado.

A capacidade de processamento dos computadores atuais permite a aplicação de algoritmos com equacionamento não linear, resultado em ferramentas capazes de analisar problemas relacionados a gestão de recursos hídricos, onde vale destacar o IRAS (SIMÕES & OLIVEIRA, 2014) e o HEC (2016).

O *Interactive River-Aquifer Simulation* (IRAS) foi inicialmente desenvolvido pela Universidade de Cornell, em conjunto com o *International Institute for Applied Systems Analysis* e com a *Resources Planning Associates*. O IRAS trabalha em escala diária e mensal. Seu processamento se baseia em estruturar os fluxos de água por meio de arcos ou nós, e a partir disto realizar a análise

requerida. Os arcos podem ter sentido de fluxo unidirecional ou bidirecional, sendo determinado pelo nível de água que ocorre nos nós unidos por esse arco. Os arcos bidirecionais são recomendados na estruturação de redes de drenagem de regiões planas, onde o sentido de escoamento depende da distribuição de água pela região. Perdas de água por evaporação e por infiltração nos arcos podem ser contabilizadas durante o processo de análise. O modelo conta também com uma ferramenta de avaliação da qualidade de água, com opção de cálculos diários (SIMÕES & OLIVEIRA, 2014).

O estudo que Simões & Oliveira (2014) desenvolveram visou analisar a política de operação dos reservatórios do Vale Sorraia (Portugal), definindo, por meio de regras de operação, as descargas mensais necessárias para atender as demandas de água das áreas a jusante e as perdas por infiltração nos canais.

Segundo Mauad (2000), o modelo IRAS é indicado para estudos hidrológicos de sistema de uso integrado de água para abastecimento doméstico, industrial, irrigação e geração de energia, além de uma análise prioritária no que diz respeito a vazões mínimas exigidas nos mananciais e, consequentemente, ideal para o planejamento do aproveitamento hídrico, visando demandas futuras. Mauad (2000) analisou o confronto de usos múltiplos de água no aproveitamento hidroelétrico em Alqueva, Portugal. Os resultados forneceram a resiliência, confiabilidade e vulnerabilidade do sistema para os diversos usos da água, desenvolvendo estratégias opcionais para garantir o fornecimento de demandas futuras.

Outro programa importante na gestão de recursos hídricos é o *Hydrologic Engineering Center* (HEC) (2016), desenvolvido no Centro de Engenharia Hidrológica, nos Estados Unidos. As principais versões são o HEC-3 e HEC-5, sendo inicialmente desenvolvido para a operação de controle de cheias. O HEC-3 e o HEC-5 possuem características similares no que se refere a capacidade de simulação. A versão HEC-3 (1971) passou por um processo de reestruturação e ampliação, criando a versão mais atualizada, o HEC-5 (1979). Basicamente, estes programas consistem na elaboração de regras de operação de determinado sistema hídrico, baseando seus cálculos em dados de entrada referentes a capacidade de armazenamento dos reservatórios, vazões mínimas e máximas.

Assim, a série HEC é especializada em auxiliar o planejamento e avaliação de reservatórios, e no dimensionamento do controle de inundações. O programa é utilizado na análise otimizada de volumes a serem vertidos em sistemas de reservatórios durante as emergências de inundações, a fim de minimizar danos, mantendo, ao mesmo tempo, um equilíbrio entre o armazenamento e o controle de enchente. Sua capacidade de análise permite simular o comportamento após a inundação retroceder, esvaziando o volume armazenado o mais rapidamente possível. O programa também se mostra eficiente para longos períodos de estiagem ou para combinações das duas situações extremas.

Mohan et. al. (1993) apud Vieira & Curi (2016) realizaram a simulação de quatro regras de operação padrão de reservatórios Indianos com modelo HEC-3, considerando as demandas de geração de energia e de irrigação para, em seguida, calcular a confiabilidade do sistema. Hickey et. al. (2003) utilizaram o modelo HEC-5 na avaliação das inundações e reduções da vazão no rio San Joaquin, da bacia hidrográfica de Sacramento, Califórnia, Estados Unidos, região afetada por grandes inundações nas décadas de 80 e 90.

2.4 AQUATOOL

A ferramenta computacional AQUATOOL, conforme dito anteriormente, baseia-se em uma programação linear, atuando como um sistema de suporte à decisão em estudos de otimização de aproveitamento hídrico. Desenvolvido pela Universidade Politécnica de Valência, o AQUATOOL possui uma grande aplicação técnica e científica em pesquisas nas bacias hidrográficas da Espanha (Júcar, Segura, Tajo, etc.) e em vários outros países (Argentina, Brasil, Itália, México, Bósnia, Chile, Marrocos, Argélia, Equador, Peru, etc.). Sua apresentação em um subitem isolado é justificada pela sua importância no presente estudo.

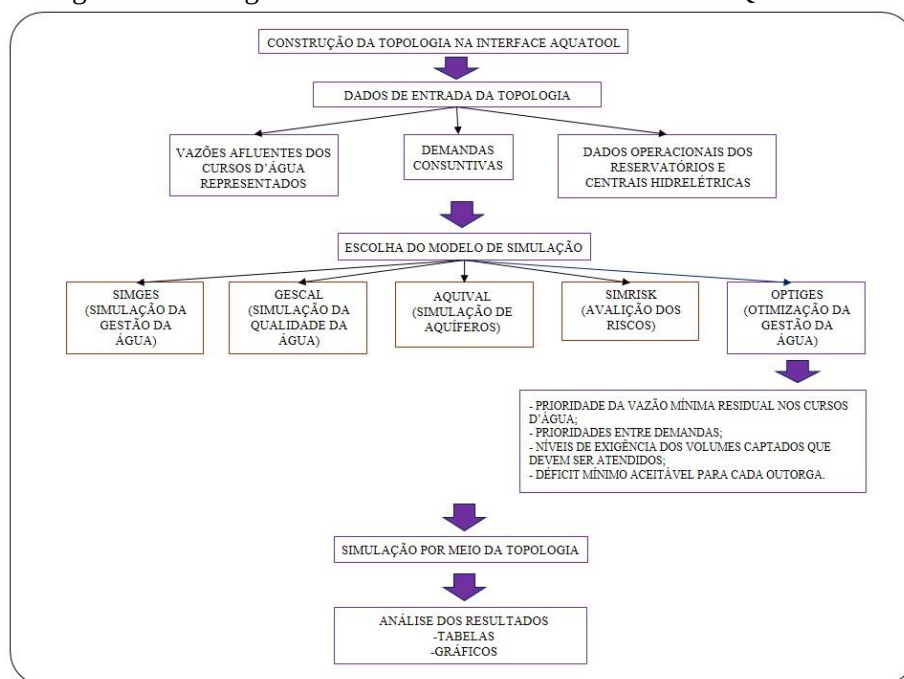
Salla et al. (2014a) afirmaram que o AQUATOOL possui grande aplicabilidade como sistema de suporte a decisão, principalmente no planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas complexas. Consiste em um modelo que avalia o balanceamento hídrico visando satisfazer as necessidades de água de uma região. Com um passo de cálculo mensal, apresenta funções e componentes claramente separados, além de uma grande flexibilidade na concepção, implementação e operação do sistema (ANDREU, CAPILLA e SANCHIS, 1996).

Assim, o funcionamento do AQUATOOL consiste em, a cada mês, atender objetivos pré-estabelecidos. Estes objetivos resultam de restrições quantitativas, como valores mínimos de escoamento em cursos de água ou canais artificiais, de demandas de água a satisfazer e volumes a serem armazenados a níveis máximos e mínimos em reservatórios e aquíferos, e qualitativos, como parâmetros de qualidade da água a serem atendidos.

Basicamente é constituído por um módulo quantitativo (SIMGES), um módulo qualitativo (GESCAL), um módulo de otimização de gestão de bacias (OPTIGES), um módulo de modelagem de fluxos de aquíferos (AQUIVAL), além de módulos de avaliação de riscos de seca (SIMRISK). Cada unidade de controle inclui projeções gráficas e sistemas de gerenciamento de banco de dados, além de comandos para controlar a execução dos modelos e acesso aos módulos para análise e geração de relatórios de resultados (PAREDES-ARQUIOLA, ÁLVAREZ e SOLERA, 2015).

O fluxograma ilustrado na Figura 8 mostra, de forma simplificada, o funcionamento em etapas da ferramenta AQUATOOL e seus respectivos módulos, com destaque para a opção de otimização OPTIGES, base para as análises desenvolvidas neste trabalho.

Figura 8 – Fluxograma de funcionamento da ferramenta AQUATOOL



Fonte: Autor (2017).

São descritas a seguir, com mais detalhes, as opções oferecidas pelo AQUATOOL (2016):

- introduzir e modificar, graficamente se necessário, a configuração de um esquema hídrico para fins de simulação ou otimização;
- introduzir e gerir bases de dados, graficamente referenciadas, contendo as características físicas dos componentes do esquema;
- introduzir e gerir bases de dados relacionados com variáveis de decisão e parâmetros de gestão;
- introduzir e gerir a definição espacial de um aquífero e bases de dados contendo os seus parâmetros hidrodinâmicos, bem como a definição de tensões (por exemplo, bombeamento, recarga, etc.) e variáveis de controle;
- realizar uma simulação da gestão operacional para uma dada configuração, horizonte de tempo e cenário, utilizando diferentes dados hidrológicos e políticas operacionais;
- realizar uma otimização da gestão operacional para uma determinada configuração e horizonte de tempo usando diferentes dados hidrológicos;
- realizar o pré-processamento de um modelo de aquífero distribuído para que ele possa ser incluído como um componente do módulo de simulação de bacia. Isso também permite a simulação separada do aquífero, como um modelo de água subterrânea normal;
- realizar uma avaliação de risco para a gestão do sistema a curto ou médio prazo, utilizando simulação ou otimização, este último caso dando os limites inferiores do risco;
- obter os resultados dos modelos sob a forma de relatórios escritos, detalhados para todo o período ou resumidos como valores médios e indicadores de desempenho;
- obter os resultados dos modelos na forma de gráficos de séries temporais e valores médios, simplesmente apontando para o elemento desejado na representação gráfica da bacia;
- obter os resultados de otimização e simulação, que são armazenados em arquivos, que podem ser usados como dados de entrada para qualquer tipo de pós-processamento específico não incluído no AQUATOOL.

Segundo Andreu, Capilla e Sanchis (1996), essas capacidades permitem selecionar soluções otimizadas de projeto, com critérios de utilidade operacional e desempenho futuros de recursos hídricos de um sistema, verificando e refinando alternativas por meio dos módulos de simulação e análise de sensibilidade.

Sua rede de fluxo é estruturada em elementos singulares e com características distintas, buscando aproximar o máximo da realidade. Os nós são elementos que possuem a função de serem os pontos de confluências dos rios, bem como entradas de água e desvios de fluxo. Os reservatórios, as centrais hidrelétricas e os aquíferos são considerados nós com funções específicas. Os reservatórios possuem a capacidade de armazenamento, representando também lagos. Neles podem ser consideradas a evaporação e as perdas por infiltração em águas subterrâneas. A central hidrelétrica (demandas não consumíveis) faz uso da água, mas não reduz sua quantidade. Os aquíferos simulam o comportamento das águas subterrâneas.

Os canais representam os cursos de água naturais, independente da dimensão. São incluídos cinco tipos de canais: canais sem perdas ou conexão com águas subterrâneas; canais com perdas de infiltração que recarregam um aquífero; canais ligados hidraulicamente a um aquífero, onde a situação hidráulica determina a recarga rio-aquífero; canais com fluxo regido por condições hidráulicas que sempre fluem na mesma direção e canais que podem ter a água fluindo de um modo ou de outro dependendo das condições hidráulicas nas extremidades.

As entradas hidrológicas correspondem ao fluxo de água que entra no sistema. As demandas de consumo e suas conexões representam as outorgas consuntivas, como zonas irrigadas, abastecimentos municipais e industriais, e podem ter capacidade de bombeamento associada. Os elementos de retorno visam retornar a água usada ou não utilizada pelo sistema, a partir de um ou mais centros de demanda, por exemplo, o efluente de uma cidade abastecida que retorna ao rio após tratamento. Instalações de recarga artificial e de bombeamento adicionais permitem a injeção direta de água superficial no aquífero e canais de superfície, respectivamente.

Segundo Álvarez, Hernández e Segura (1986), o AQUATOOL provou ser uma ótima ferramenta para a compreensão dos aspectos quantitativos na gestão de sistemas de recursos hídricos, além de

um bom instrumento para a organização e comunicação de dados. Os resultados fornecem a evolução temporal das variáveis, os valores médios do período de simulação e os indicadores de desempenho apresentados pelo processo.

Salla et al. (2013) utilizaram a ferramenta AQUATOOL na avaliação da variabilidade temporal da vazão turbinada e da produção de energia hidrelétrica nas quatro centrais em cascata existentes na bacia do rio Araguari, frente à necessidade de captação superficial de água para abastecimento do município de Uberlândia-MG. Foram simuladas retiradas pontuais nas centrais hidrelétricas de Miranda e Capim Branco I. Os resultados encontrados indicaram que a implantação de captação superficial em Capim Branco I proporciona menores perdas na produção de energia para o sistema em cascata.

Salla et al. (2014a), por meio dos módulos SIMGES e GESCAL vinculados ao AQUATOOL, analisaram os conflitos nos usos múltiplos da água na bacia do rio Araguari, buscando uma gestão integrada da quantidade e qualidade da água. O balanço hídrico proporcionou uma boa representação da realidade desta bacia, proporcionando um ajuste satisfatório entre os dados de qualidade da água medidos e simulados. Já Salla et al. (2014b) utilizaram o AQUATOOL na bacia do rio Uberabinha, localizada no município de Uberlândia-MG, visando melhorias nos aspectos quantitativos e qualitativos da água. As simulações indicaram possíveis mudanças no planejamento e gestão da referida bacia visando atender as demandas para abastecimento público e também para manter os padrões de qualidade da água requeridos por lei.

Paredes-Arquiola et al. (2014a) aplicaram o AQUATOOL no Sistema de Água do Rio Tormes, na Espanha, onde as demandas agrícolas comprometem as necessidades ambientais do ecossistema fluvial, além das cargas poluidoras agrícolas que afetam a qualidade da água na parte inferior do rio. Foram definidas regras de gestão de água, visando manter o abastecimento público, a vazão residual para a proteção dos ecossistemas aquáticos e os padrões legais de qualidade da água.

Ferreira (2014) realizou simulações de dados quantitativos e qualitativos do médio e baixo cursos do rio Uberaba, localizado na bacia do rio Uberaba, em Minas Gerais. Os resultados obtidos mostraram que a ferramenta é útil para análises de aproveitamento de recursos hídricos, onde a topologia criada possibilita a equipe da autarquia municipal de água e esgoto da cidade de Uberaba analisar os diferentes aspectos de gestão e planejamento na bacia.

Costa (2015) abordou sobre as alternativas de otimização do aproveitamento hídrico superficial na Área de Proteção Ambiental (APA), no alto curso do rio Uberaba, por meio da ferramenta AQUATOOL. Os resultados indicaram a necessidade de implantação de um reservatório de acumulação para suprir o déficit no abastecimento público da cidade de Uberaba – MG.

A utilidade do AQUATOOL como sistema de suporte à decisão é demonstrada, principalmente, pelo fato deste ser atualmente utilizado por duas Agências de Bacias Hidrográficas da Espanha como uma ferramenta padrão, não só para desenvolver os seus planos hidrológicos, mas também para gerir seus recursos hídricos a curto e médio prazo.

Nos casos complexos apresentados, os sistemas de suporte à decisão são reconhecidos como ferramentas valiosas para rastrear alternativas, obter diretrizes operacionais, estimar mudanças na confiabilidade após modificações estruturais e avaliar os riscos envolvidos nas decisões de manejo. Além disso, AQUATOOL provou ser útil para fornecer um quadro de discussão quando existem conflitos no sistema, incluindo a alocação de água, interações superfície-água subterrânea, etc.

O módulo OPTIGES do AQUATOOL possibilita, além das análises citadas anteriormente, um estudo mais aprofundado de otimização de recursos hídricos. O módulo acrescenta a possibilidade do usuário impor pesos a cada um dos objetivos do sistema de simulação e assim definir prioridades, no caso de não ser possível garantir a sua totalidade.

Assim, as regras de operação do sistema passam a ser, essencialmente, baseadas nas demandas, podendo ser definidas prioridades na outorga de água, condicionando sua distribuição em função dos volumes disponíveis (SIMÕES & OLIVEIRA, 2014).

O módulo OPTIGES visa gerir os recursos hídricos cumprindo uma série de critérios, tais como: vazões mínimas residuais; escalas de prioridades entre diferentes tipos de demandas; percentuais de racionamento frente aos déficits encontrados em períodos de escassez; regras de operação de reservatórios buscando armazenar o maior volume possível de água durante estações chuvosas; etc (PELLICER-MARTÍNEZ & MARTÍNEZ-PAZ, 2016).

Em cada passo de cálculo, o módulo de otimização procura minimizar os desvios a esses objetivos, transferindo água disponível para os pontos prioritários de consumo. Quando não houver recursos

hídricos suficientes, haverá déficit nas demandas de menor prioridade (PAREDES-ARQUIOLA et al. 2014a).

A forma como a ferramenta OPTIGES funciona é simples, uma vez que exige apenas a definição dos objetivos do sistema, ficando a cargo do modelo os processamentos matemáticos para encontrar a solução otimizada. Em contrapartida, as opções de distribuição e atribuição tomadas pelo modelo podem distanciar-se das implementadas na realidade e a explicação das diferenças pode tornar-se mais complexa. Apesar disso, segundo Simões & Oliveira (2014), o modelo é adequado para a avaliação da capacidade que um sistema hídrico possui para atender objetivos pré-determinados e para a simulação e elaboração de regras de operação em situações de escassez. Seu estudo abordou a política de operação do sistema AQUATOOL – OPTIGES, estabelecendo objetivos de fornecimento de água para áreas de irrigação na bacia hidrográfica do Vale do Sorraia, Portugal. Foram obtidos resultados com resiliência acima dos 99%.

Chávez-Jiménez e González-Zeas (2015) avaliaram os problemas de escassez de água em diferentes cenários de reduções de contribuições na bacia do Guadalquivir, na Espanha. O estudo buscou a otimização do sistema por meio do modelo de otimização OPTIGES. Como resultado, observou-se que os problemas de escassez de água podem ser reduzidos ou mesmo eliminados, se a limitação do consumo de água em períodos de baixa disponibilidade for bem sucedida, especialmente em recursos para a agricultura.

Pellicer-Martínez e Martínez-Paz (2016) utilizaram o OPTIGES para a simulação do fluxo de volumes de água de recursos de diferentes fontes visando, principalmente, a reutilização direta de águas residuais tratadas do Rio Segura, na Espanha. Já Heinz et. al. (2007) combinaram o módulo de otimização do AQUATOOL com indicadores econômicos e analisaram algumas de suas aplicações no sistema de planejamento de recursos hídricos da União Europeia.

Os diversos exemplos aqui apresentados demonstram a potencialidade do módulo OPTIGES, o qual está vinculado à ferramenta computacional AQUATOOL.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo de otimização dos recursos hídricos na bacia do rio Araguari foi indispensável conhecer as características fundamentais da região analisada e dispor de dados a ela correspondentes, tais como séries históricas de vazão, índices pluviométricos e de evapotranspiração. Dada a magnitude da área de estudo, a quantidade de estações de monitoramento hidrológico foi incapaz de cobrir todos os locais de interesse, apresentando ainda lacunas temporais e espaciais, a que direciona ao uso de metodologias robustas para seu preenchimento. Além disso, para uma análise de disponibilidade hídrica detalhada, foi fundamental estimar séries sintéticas de vazões, por meio de modelagens hidrológicas, devidamente calibradas e, quando necessário, regionalizadas.

Para a análise de otimização em si foi indispensável o estudo aprofundado do módulo OPTIGES do AQUATOOL, conhecendo as ferramentas oferecidas, assim como os métodos e equacionamentos nele embutidos. Além disso, o levantamento dos volumes captados e a estimativa dos valores máximos outorgáveis foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Assim, nos itens a seguir são demonstradas sucintamente as características da área de estudo, assim como as sequências metodológicas utilizadas no estudo da otimização do aproveitamento hídrico superficial da bacia do rio Araguari, a saber: levantamento dos dados de estações fluviométricas, pluviométricas e climatológicas, metodologias para estimativas de dados ausentes ou falhos, critérios para regionalização de vazões, caracterização do modelo utilizado para estimativa de séries sintéticas de vazões e métodos para calibração de seus parâmetros, levantamento das demandas

consuntivas e não consuntivas outorgadas, assim como a metodologia adotada no cálculo das vazões de referência. E, por fim, é feita a descrição dos aspectos principais e funcionamento da ferramenta utilizada, o módulo de otimização OPTIGES.

3.1 Área de estudo

A bacia do rio Araguari está localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro, situada a oeste do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 18°20' e 20°10' de latitude Sul e 46°00' e 48°50' de longitude Oeste. Sua nascente encontra-se no Parque Nacional da Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas e percorre 475 km até a sua foz no Rio Paranaíba, sendo um dos tributários do Rio Grande, que integra a Bacia Transnacional do Rio Paraná. Possui uma área de 22.091 km², com população residente de aproximadamente 1,2 milhões de habitantes distribuída em 18 municípios, sendo eles: Araguari, Araxá, Campos Altos, Ibiá, Indianópolis, Iraí de Minas, Nova Ponte, Patrocínio, Pedrinópolis, Perdizes, Pratinha, Rio Paranaíba, Sacramento, Santa Juliana, Serra do Salitre, Tapira, Tupaciguara e Uberlândia.

Segundo o Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Araguari (CBH - Araguari) (2016), a região ocupada pela bacia do rio Araguari possui como principais atividades econômicas a agropecuária, aquicultura, cultivo de café, cultivos de ciclo anual, cultivo de hortícolas, mineração, indústria de transformação, agroindústrias e turismo. Neste estudo, para facilitar a otimização do aproveitamento hídricos superficial, a bacia do rio Araguari foi dividida em dezoito sub-bacias, conforme ilustra a Figura 9. O mapa representado na Figura 9, assim como os demais presentes nesta dissertação, foram elaborados por meio da ferramenta computacional Q-GIS.

Segue uma simples descrição das dezoito sub-bacias:

- Sub-bacia 01 – Foz do Araguari – 685,69 km². Compreende a área de drenagem localizada entre a barragem de Capim Branco II e a foz do rio Araguari. Ocupa parte dos municípios de Araguari e Tupaciguara;
- Sub-bacia 02 – Rio Uberabinha – 2188,86 km². Compreende a área de drenagem do rio Uberabinha. Ocupa parte dos municípios de Tupaciguara, Uberaba e Uberlândia.

- Sub-bacia 03 – Aproveitamento hidrelétrico (AHE) Capim Branco – 1178,89 km². Compreende a área de drenagem localizada entre as barragens de Miranda e Capim Branco II. Ocupa parte dos municípios de Araguari, Indianópolis e Uberlândia;
- Sub-bacia 04 – Médio Araguari – 1744,98 km². Compreende a área de drenagem dos tributários do rio Araguari localizados no trecho que vai da barragem de Miranda até o fim do remanso do reservatório de Nova Ponte no rio Araguari, excetuando-se as sub-bacias do rio Claro, do ribeirão Santa Juliana, do ribeirão das Furnas e do rio Quebra-Anzol. Ocupa parte dos municípios de Uberlândia, Indianópolis, Uberaba, Nova Ponte, Santa Juliana e Sacramento;
- Sub-bacia 05 – Ribeirão das Furnas – 484,67 km². Compreende a área de drenagem do ribeirão das Furnas. Ocupa parte do município de Indianópolis;
- Sub-bacia 06 – Rio Claro – 484,67 km². Compreende a área de drenagem do rio Claro. Ocupa parte dos municípios de Uberaba, Nova Ponte e Sacramento;
- Sub-bacia 07 – Baixo Quebra-Anzol – 2103,91 km². Compreende a área de drenagem dos tributários do rio Quebra-Anzol localizados no trecho, de jusante para montante, que vai da foz do rio Quebra-Anzol até o fim do remanso do reservatório de Nova Ponte no rio Quebra-Anzol, excetuando-se as sub-bacias do ribeirão Santo Antônio, do ribeirão do Salitre, do rio Galheiro e do rio Capivara. Ocupa parte dos municípios de Nova Ponte, Irai de Minas, Pedrinópolis, Perdizes, Patrocínio e Serra do Salitre;
- Sub-bacia 08 – Ribeirão Santa Juliana – 484,56 km². Compreende a área de drenagem do ribeirão Santa Juliana. Ocupa parte dos municípios de Pedrinópolis, Santa Juliana e Perdizes;
- Sub-bacia 09 – Ribeirão Santo Antônio – 484,56 km². Compreende a área de drenagem do ribeirão Santo Antônio. Ocupa parte do município de Patrocínio;
- Sub-bacia 10 – Alto Araguari – 3028,15 km². Compreende a área de drenagem dos tributários do rio Araguari localizados no trecho, de jusante para montante, que vai do fim do remanso do reservatório de Nova Ponte no rio Araguari até sua nascente, excetuando-se a sub-bacia do ribeirão do Inferno. Ocupa parte dos municípios de Santa Juliana, Sacramento, Perdizes, Araxá, Tapira e São Roque de Minas;

- Sub-bacia 11 – Rio Galheiro – 744,42 km². Compreende a área de drenagem do rio Galheiro. Ocupa parte do município de Perdizes;
- Sub-bacia 12 – Rio Capivara – 1359,65 km². Compreende a área de drenagem do rio Capivara. Ocupa parte dos municípios de Perdizes, Araxá e Ibiá;
- Sub-bacia 13 – Ribeirão do Salitre – 612,82 km². Compreende a área de drenagem do ribeirão do Salitre. Ocupa parte dos municípios de Patrocínio e Serra do Salitre;
- Sub-bacia 14 – Ribeirão do Inferno – 564,29 km². Compreende a área de drenagem do ribeirão do Inferno. Ocupa parte dos municípios de Araxá e Tapira;
- Sub-bacia 15 – Alto Quebra-Anzol – 2302,62 km². Compreende a área de drenagem dos tributários do rio Quebra-Anzol localizados no trecho, de jusante para montante, que vai do fim do remanso do reservatório de Nova Ponte no rio Quebra-Anzol até sua nascente, excetuando-se as sub-bacias do ribeirão Grande, do rio São João e do rio Misericórdia. Ocupa parte dos municípios de Serra do Salitre, Ibiá e Pratinha;
- Sub-bacia 16 – Ribeirão Grande – 249,69 km². Compreende a área de drenagem do ribeirão Grande. Ocupa parte do município de Serra do Salitre;
- Sub-bacia 17 – Rio São João – 962,12 km². Compreende a área de drenagem do rio São João. Ocupa parte dos municípios de Serra do Salitre, Alto Paranaíba e Ibiá;
- Sub-bacia 18 – Rio Misericórdia – 1411,23 km². Compreende a área de drenagem do rio Misericórdia. Ocupa parte dos municípios de Ibiá, Pratinha e Campos Altos.

O clima da região, segundo o CBH Araguari (2016), é marcado por duas estações, uma seca, abrangendo os meses de maio a setembro e outra úmida, com duração de outubro a abril. O clima regional é moldado principalmente pelo relevo que cria condições para as variações climáticas. As precipitações mais elevadas ocorrem próximo aos municípios de Patrocínio e Tapira, chegando a valores anuais superiores a 1.600mm.

A temperatura também é fortemente influenciada pelas diferentes características do relevo. Em áreas onde as altitudes ultrapassam 1.000 metros, como Araxá e Tapira, ocorre a livre circulação

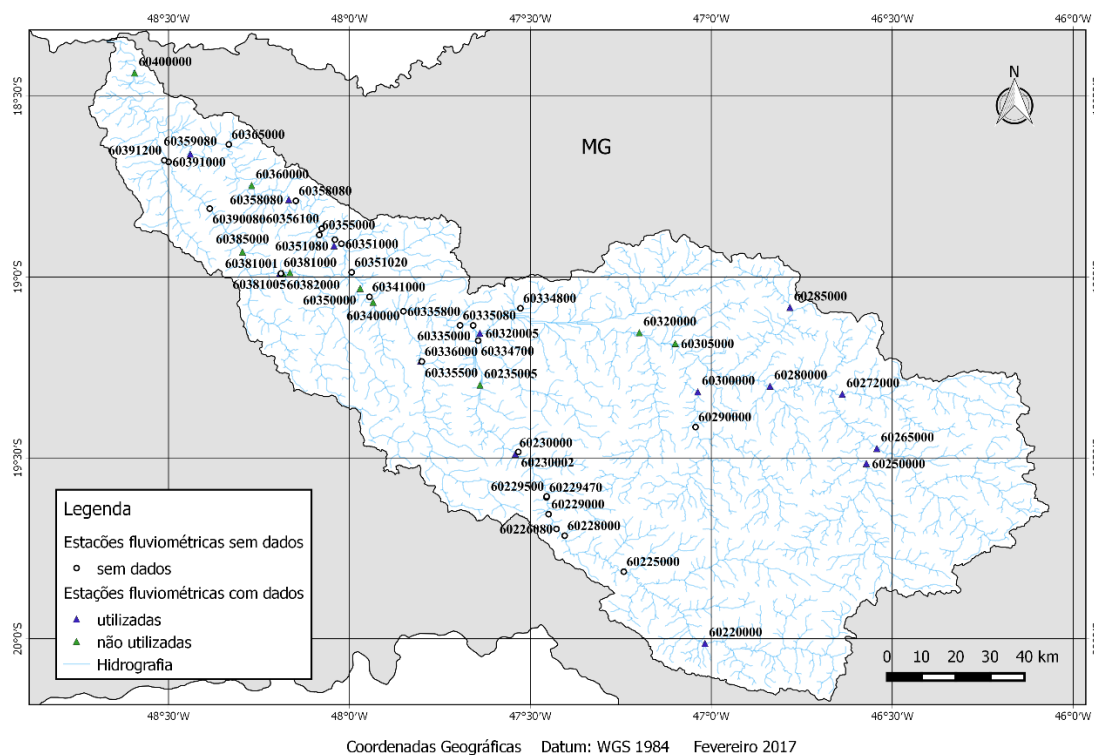
dos ventos, as médias anuais são inferiores a 21°C, no entanto, nos meses mais frios (junho/julho) ficam entre 17°C e 18°C.

3.2 Dados fluviométricos, pluviométricos e climatológicos

Para o desenvolvimento das análises hidrológicas faz-se necessário um banco de dados com grande amostragem capaz de representar o comportamento hídrico na região estudada. Estações de monitoramento fluviométrico, pluviométrico e climatológico fornecem dados suficientes para caracterizar a variabilidade das vazões em um curso de água. Optou-se por séries históricas extensas e com o mínimo de falhas, chegando a um período médio de 40 anos de banco de dados ao longo de toda a bacia.

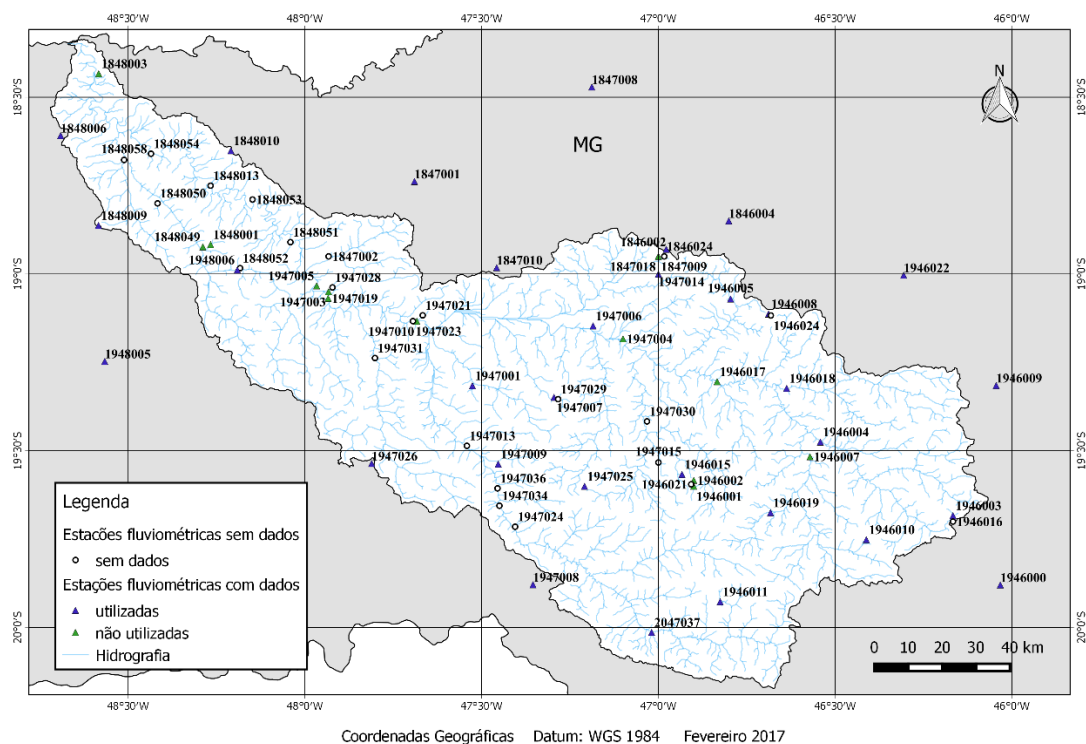
Os órgãos responsáveis pela organização e disponibilidade destas séries históricas foram, principalmente, a ANA e o INMET, que operam as redes fluviométricas e hidrometeorológicas de domínio federal. Dados referentes aos reservatórios hidroelétricos foram providos pela CEMIG e ANEEL, sendo aqueles sobre domínio privado solicitados via ofício. As Figuras 10, 11 e 12 ilustram, respectivamente, as estações fluviométricas, pluviométricas e climatológicas que formam a base de dados da pesquisa, especificando aquelas com dados disponíveis, sem dados monitorados e as utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa. Os dados climatológicos levantados foram a evapotranspiração e temperatura.

Figura 10 – Estações fluviométricas na bacia do rio Araguari



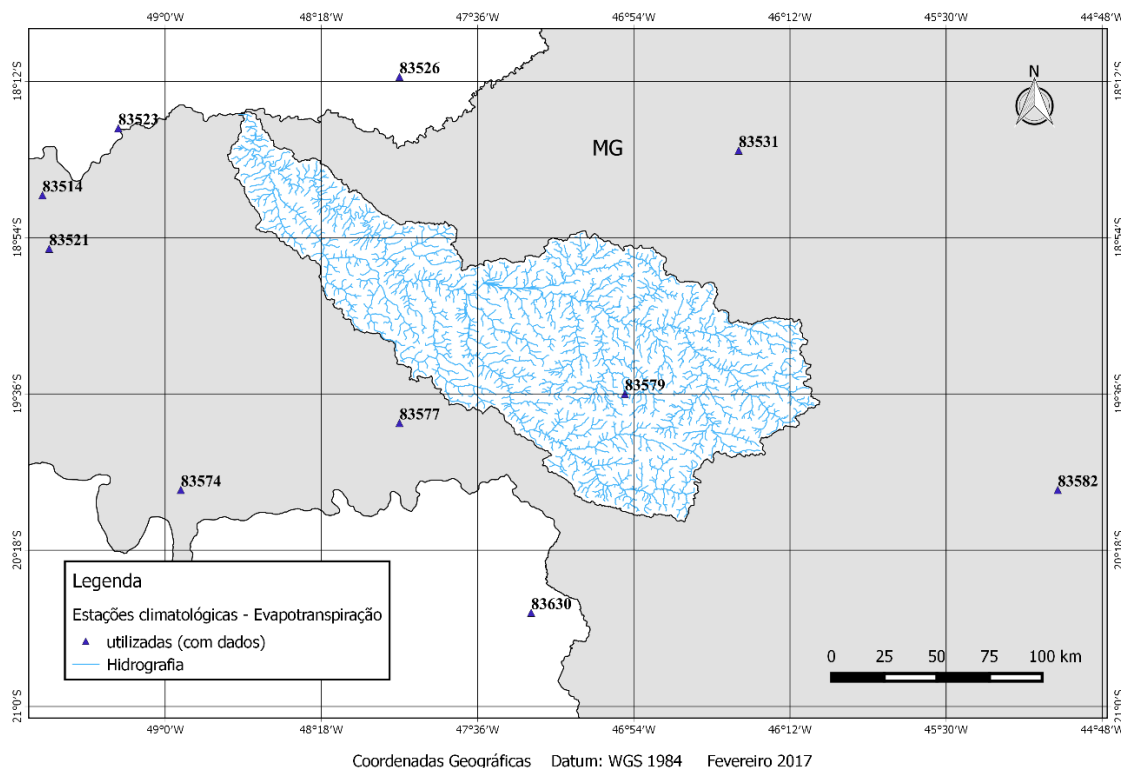
Fonte: Autor (2017).

Figura 11 – Estações pluviométricas na bacia do rio Araguari



Fonte: Autor (2017).

Figura 12 – Estações climatológicas responsáveis pelo fornecimento dos dados de evapotranspiração na bacia do rio Araguari



Fonte: Autor (2017).

Apesar de uma disponibilidade significativa de estações de monitoramento, sua distribuição espacial não é uniforme, com regiões totalmente carentes de dados, além de suas séries históricas não serem ininterruptas ao longo do período monitorado. Assim, dois métodos foram utilizados para o preenchimento de ausências ou falhas nos registros dos dados:

- Método da regressão não linear de função potencial;
- Método do Inverso Ponderado das Distâncias.

A regressão não linear potencial consiste em modelar dados observacionais por meio de uma função que combina duas ou mais variáveis independentes de forma não linearizada por meio de aproximações sucessivas. A expressão característica que correlaciona duas variáveis é mostrada pela Equação (1).

$$X_i = a \cdot X_{i+1}^b \quad (1)$$

Na qual: X_i são as variáveis consideradas; a e b são coeficientes ajustados via linha de tendência.

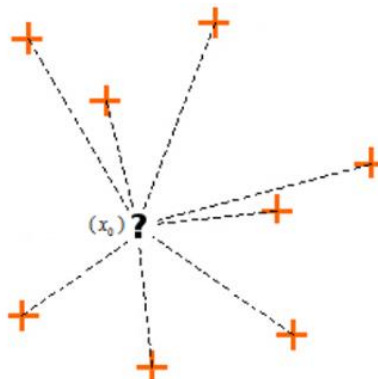
Esse método foi utilizado para o preenchimento das falhas no histórico de dados de evapotranspiração. A opção por este método foi feita considerando sua simplicidade e capacidade de ajuste à série de dados, sempre medida pelo coeficiente de determinação. A equação representativa da série histórica foi construída correlacionando os dados de temperatura ambiente com os dados de evapotranspiração existentes. Consequentemente foi obtida uma expressão diferente para cada uma das estações do INMET, mas com a forma básica da Equação (1), onde a variável X_i refere-se aos valores de evapotranspiração, em mm, e a variável X_{i+1} a temperatura, em °C.

O método do Inverso Ponderado das Distâncias foi aplicado no preenchimento dos dados pluviométricos e na estimativa de dados de precipitação e evapotranspiração nos centroides de cada uma das sub-bacias e subdivisões. Esta segunda aplicabilidade do método do Inverso Ponderado das Distâncias está relacionada à etapa de modelagem hidrológica (item 4.2.1), mais especificamente as subdivisões adotadas para o detalhamento do comportamento hidrológico da bacia do rio Araguaari, descrita no item 3.8.1.

Basicamente, o método do Inverso Ponderado das Distâncias estima, por meio de interpolação determinista, o valor de uma variável em estudo num ponto não amostrado. Este método permite a construção de uma nova série de dados a partir de um conjunto de dados pontuais conhecidos. O cálculo do novo conjunto de dados é feito pela média ponderada dos inversos das distâncias entre ponto sem amostragem e à localização de valores conhecidos.

A Figura 13 traz um esquema deste método, onde o valor de X_0 é ponderado pelo inverso das distâncias de cada uma das amostras vizinhas. A aplicação deste método foi realizada visando dados pluviométricos e de evapotranspiração, necessários para a estimativa de vazões, sendo X_0 o centroide da sub-bacia de interesse.

Figura 13 – Método do Inverso Ponderado das Distâncias



Fonte: Adaptada de Mitas & Mitasova (1999).

O peso dado no cálculo da interpolação determina a influência de um ponto amostrado em relação a outro, diminuindo conforme aumenta a distância ao nó da grade a ser estimada. Os pontos amostrados próximos à localização do nó a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distante ao calcular o valor de um nó. A soma de todos os pesos dados aos pontos amostrados vizinhos é igual a 1, calculado pela Equação (2).

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{P_i}{D_i^\alpha} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{D_i^\alpha} \right]} \quad (2)$$

Na qual: X_0 é o valor interpolado para o ponto de interesse; P_i é o valor do ponto amostrado vizinho; D_i é a distância entre o ponto de interesse e o ponto amostrado; α é o expoente de ponderação (peso); n é o número de pontos amostrados.

Assim, os resultados são variáveis e altamente tendenciosos para valores amostrados próximos ao ponto de interesse. Ou seja, quanto mais próximos os pontos com dados estão dos locais não amostrados, mais representativo são seus valores na estimativa. Assim, a ponderação fica em função da distância linear das amostras aos pontos não amostrados, variando à medida que esta aumenta ou diminui.

Os valores usuais do expoente de ponderação variam de 0 a 10 e exercem efeito significativo sobre os resultados estimados. De acordo com Landim (2000), Girardi et al. (2013) e Silva (2011), o valor usual adotado é 2 por valorizar dados amostrados mais próximos e, de certa forma, descartar aqueles distantes.

Os dados históricos de vazão foram utilizados unicamente como base para a calibração dos parâmetros dos modelos hidrológicos chuva-vazão. Logo, a ausência de dados nas séries históricas fluviométricas não foi preenchida.

3.3 Regionalização da vazão

A pequena quantidade de estações fluviométricas e sua má distribuição espacial ao longo da bacia do rio Araguari resultaram em regiões totalmente carentes de dados monitorados (Figura 10). Somado a isto, o nível de detalhamento da hidrografia criada na ferramenta AQUATOOL para os processos de simulação e otimização levou à necessidade do conhecimento das vazões escoadas nos exutórios das sub-bacias usuais (Figura 9) e subdivisões adotadas dentro de cada uma delas. Estas subdivisões são apresentadas no item 3.8.1, onde é descrita como foi realizada a construção da topologia da bacia no AQUATOOL.

Assim, foi indispensável a utilização de um artifício passível de fornecer estes valores, como modelo chuva-vazão.

3.3.1 Modelo chuva-Vazão HBV

Foi utilizado o programa computacional Evaluación de los recursos Hídricos (EvalHid) para a estimativa das séries sintéticas de vazão, na qual está inserido o modelo chuva-vazão HBV.

Para que este consiga estimar séries sintéticas de vazões são necessários dados de entrada que caracterizem o comportamento hidrológico da bacia, tais como dados pluviométricos, evapotranspiração e área de contribuição em que se deseja estimar tais valores, além de parâmetros referentes ao modelo chuva-vazão escolhido.

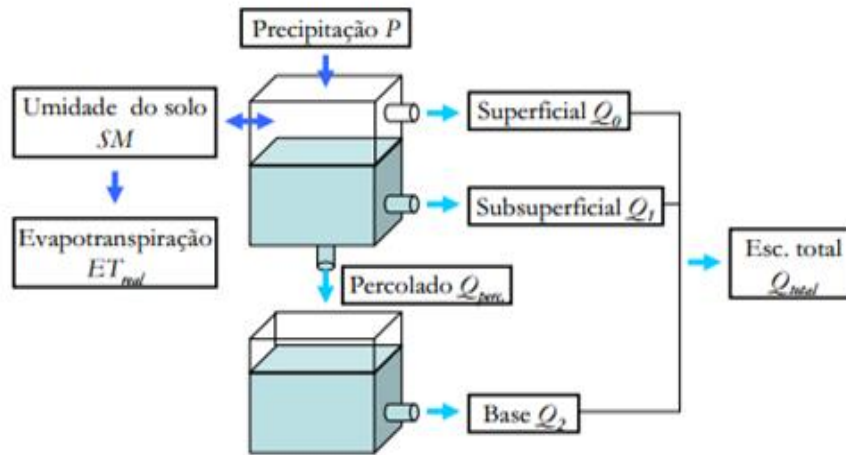
As áreas de contribuição, dados pluviométricos e de evapotranspiração foram obtidos conforme os itens 3.1 e 3.2, respectivamente. As áreas de contribuição ficaram em função da forma como as sub-divisões foram consideradas (item 3.8.1) e obtidas por meio de mapas inseridos na ferramenta Quantum GIS. Os dados pluviométricos e de evapotranspiração foram estimados no centroide de cada uma destas subdivisões pelo método do inverso ponderado das distâncias.

Tendo como dados de entrada os valores de precipitação e evapotranspiração médios mensais para cada subdivisão foi necessário escolher um dos seis modelos chuva-vazão disponíveis em EvalHid:

Témez, HBV, Sacramento, GR2M, GR4J e AWBM. Segundo a literatura consultada (SALLA et al., 2015; MAS, 2013; COSTA, 2015), o método de Témez e HBV são aqueles que fornecem os valores simulados mais próximos da realidade, sendo o modelo HBV mais sensível à qualidade dos dados de entrada de precipitação e evapotranspiração. Assim, optou-se neste trabalho pelo modelo HBV nas estimativas das séries sintéticas de vazão.

O modelo HBV esquematiza o comportamento hidrológico em três módulos: um de precipitação efetiva e umidade do solo, um de evapotranspiração e outro de estimativa de escoamento (soma dos escoamentos superficial, sub-superficial e de base), conforme esquema ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Esquema do escoamento total modelo HBV



Fonte: Salla et al. (2015).

As equações de estado para os módulos em questão são descritas a seguir.

O escoamento superficial, ou precipitação efetiva P_{ef} , depende da umidade do solo no momento da precipitação, obtida por meio da Equação (3).

$$P_{ef} = \left(\frac{SM}{FC} \right)^\beta \cdot P \quad (3)$$

Na qual: SM é a umidade do solo (L); FC é a máxima capacidade de armazenamento do solo (L); P é a precipitação mensal (L) e β é um parâmetro de ajuste do modelo.

A evapotranspiração relaciona a umidade do solo SM e a evapotranspiração real ET_{real} , por meio do parâmetro de saturação do solo PWP , conforme Equação (4).

$$ET_{real} = ETP, se SM \geq PWP$$

$$ET_{real} = ETP \cdot \left(\frac{SM}{FC}\right), se SM < PWP \quad (4)$$

A vazão total Q_{total} é obtida pela soma do escoamento superficial (Q_0), sub-superficial (Q_1) e de base (Q_2), representadas pela Equações (5) a (8).

$$Q_0 = 0, se S_1 \leq L$$

$$Q_0 = k_0 \cdot (S_1 - L_{m\acute{a}x.}) \cdot A, se S_1 > L_{m\acute{a}x.} \quad (5)$$

$$Q_1 = k_1 \cdot S_1 \cdot A \quad (6)$$

$$Q_{perc.} = k_{perc.} \cdot S_1 \cdot A \quad (7)$$

$$Q_2 = k_2 \cdot S_2 \cdot A \quad (8)$$

Nas quais: k_0 é o coeficiente do escoamento superficial (1/T); k_1 é o coeficiente do escoamento subsuperficial (1/T); k_2 é o coeficiente do escoamento base (1/T); $k_{perc.}$ é o coeficiente de percolação (1/T); S_1 é o nível líquido no reservatório superior (L); S_2 é o nível líquido no reservatório inferior (L); L é o fluxo subsuperficial (L); $L_{m\acute{a}x.}$ é o limite máximo de fluxo subsuperficial (L) e A é a área da bacia hidrográfica (L²).

Ao se iniciar o processo de simulação do modelo HBV, devem ser informados a configuração dos oito parâmetros: k_0 , k_1 , k_2 , $k_{perc.}$, $L_{m\acute{a}x.}$, PWP , FC e β , assim como a umidade inicial do solo H_0 , S_1 e S_2 , no tempo inicial.

Os parâmetros k_0 , k_1 , k_2 , $k_{perc.}$, $L_{m\acute{a}x.}$, PWP , FC e β necessitam de calibração para se ajustarem as características hidrológicas da bacia e fornecer vazões sintéticas o mais realista possível.

Neste contexto, foram calibrados os coeficientes dos modelos chuva-vazão nas regiões hidrográficas que dispunham de séries históricas monitoradas.

3.3.2 Calibração dos parâmetros pertencentes ao modelo chuva-vazão HBV

Conforme dito anteriormente, os oito parâmetros do modelo HBV foram calibrados para cada sub-bacia que dispunha de postos fluviométricos com série histórica de vazão como base de comparação.

Assim, foi feito o uso do algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution method, University of Arizona*). Desenvolvido por Duan et al. (1992) apud Paredes-Arquiola et al. (2014b), este algoritmo foi utilizado com sucesso na análise de problemas não lineares de modelos hidrológicos em escala de bacia hidrográfica. Sua programação pondera uma grande quantidade de combinações de valores de parâmetros para encontrar o melhor ajuste entre os dados observados e simulados.

As séries sintéticas de vazão obtidas na simulação do EvalHid foram comparadas com as séries históricas de vazão monitoradas e, por meio de uma adaptação do algoritmo SCE-UA no Visual Basic, realizou-se a autocalibração.

A autocalibração consiste em maximizar o valor médio de quatro funções objetivos. Estas funções equacionam o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe da transformação logarítmica da vazão (lnNS), o coeficiente de correlação de Pearson e a medida da simetria do ajuste entre a simulação média e a observação média.

As equações de cada uma das funções do algoritmo são demonstradas nas Equações (9) a (12). O ajuste perfeito é alcançado quando a média aritmética destas funções (F_1, F_2, F_3 e F_4) é igual a 1, de acordo com a Equação (13).

$$F_1 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (9)$$

$$F_2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\bar{Q}_{obs}(t))]^2} \quad (10)$$

$$F_3 = \frac{\sum_{t=1}^n [(Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})]}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (11)$$

$$F_4 = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}; \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right]^2 \quad (12)$$

$$F_{objetivo} = \max \left(\frac{\sum_{i=1}^4 F_i}{4} \right) \quad (13)$$

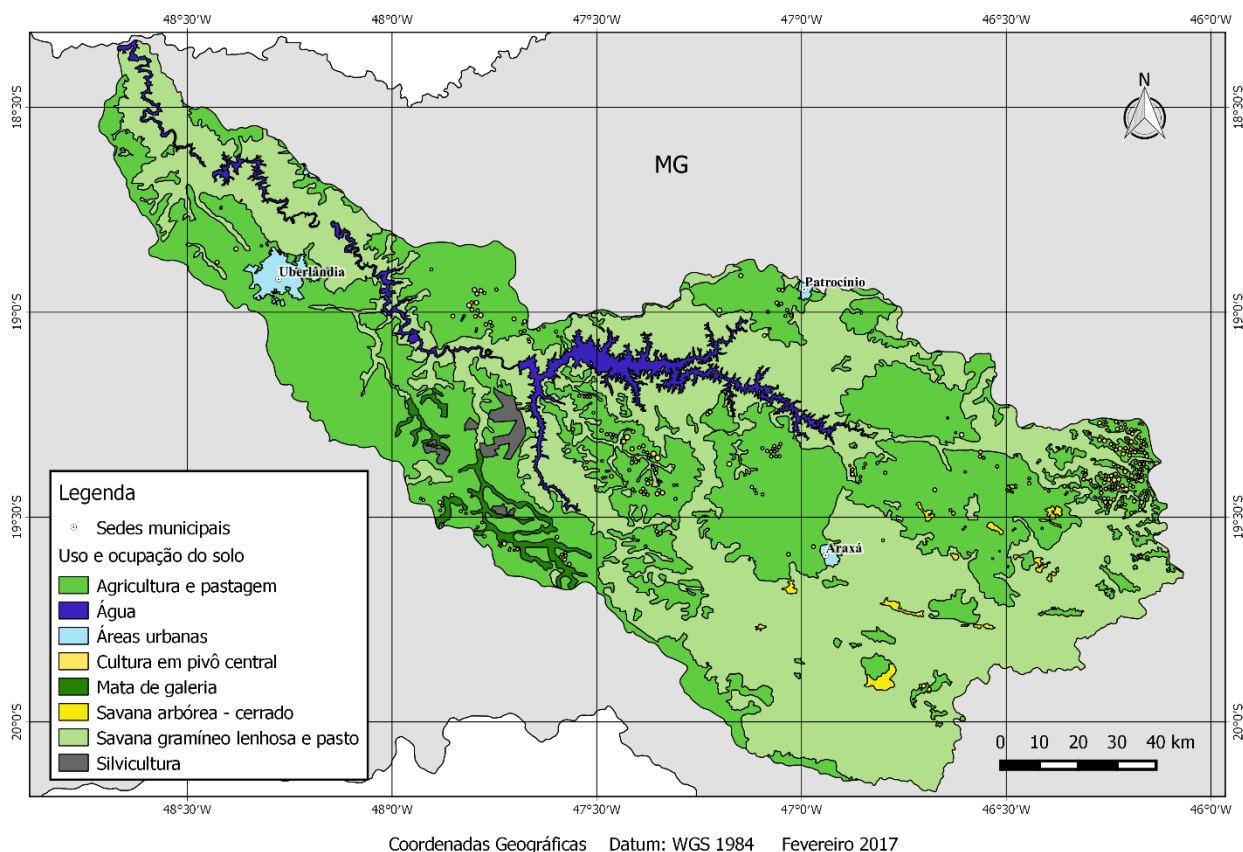
Nas quais: $Q_{sim}(t)$ e $Q_{obs}(t)$ são as vazões simulada e observada, respectivamente, no intervalo de tempo t ; n é o número de meses da calibração; F_1 é o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS); F_2 é o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe da transformação logarítmica da vazão (lnNS); F_3 é o coeficiente de correlação de Pearson; F_4 é a medida de simetria do ajuste entre a simulação média e a observação média e $F_{objetivo}$ é a função objetivo da calibração.

Os parâmetros calibrados também foram utilizados para as sub-bacias sem monitoramento hidrológico. Para isto foi utilizado o conceito de regiões hidrológicamente homogêneas, comum a todas as técnicas de regionalização.

Esta transferência foi baseada em regiões homogêneas, onde foi considerada a continuidade geográfica/hidrológica, sendo mais precisamente a similaridade entre as características geomorfológicas entre as bacias com monitoramento hidrológico com aquelas carentes de dados, e que consequentemente não poderiam obter seus próprios parâmetros calibrados.

A metodologia adotada consistiu na repetição destes parâmetros ajustados para sub-bacias com características de uso e ocupação do solo similares e contínuas entre elas. A Figura 15 foi utilizada como base para esta estimativa.

Figura 15 – Classificação do uso e ocupação do solo na bacia do rio Araguari



Fonte: Autor (2017).

As classes de uso e ocupação do solo utilizadas foram: agricultura e pastagem, cultura em pivô central, mata de galeria, savana arbórea (cerrado), savana gramíneo-lenhosa e pasto, silvicultura e áreas urbanas (CBH ARAGUARI, 2016). As distribuições percentuais de cada uma destas classes na área de uma determinada sub-bacia foram utilizadas como critério para considerar duas regiões similares, com diferenças máximas de 5% para cada classe. Embora seja subjetivo, a opção por este critério foi basicamente devido à sua simplicidade e facilidade de aplicação frente aos demais.

Estes parâmetros foram aplicados ao modelo chuva-vazão como dado de entrada para a estimativa da série sintética de vazão nas sub-bacias com ausência de estação de monitoramento fluviométrico.

3.5 Postos de monitoramento fluviométrico implantados

Conforme descrito anteriormente, a pequena quantidade e má distribuição das estações de monitoramento fluviométrico traz a necessidade de regionalização de vazão. Assim, o monitoramento

fluviométrico ao longo de 18 meses em quatro pontos permite comparar as vazões medidas com as vazões estimadas a partir de modelagem chuva-vazão. O objetivo deste monitoramento é simplesmente avaliar a representatividade do modelo chuva-vazão. A validação do modelo necessita de um maior intervalo de dados monitorados.

Foram realizados o monitoramento em 4 estações fluviométricas na bacia do rio Araguari, sendo 3 estações ao longo do rio Uberabinha e 1 estação nas proximidades do exutório da sub-bacia do Ribeirão Furnas (Figura 16).

A periodicidade dos trabalhos de campo foi mensal, sendo as medições de vazão realizadas uma vez ao mês por meio do equipamento ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) e do programa computacional *River Surveyor*. O processo para a medição das vazões consiste na travessia do ADCP pela seção transversal do curso de água, sendo um trabalho manual e influenciado pelas características físicas das margens.

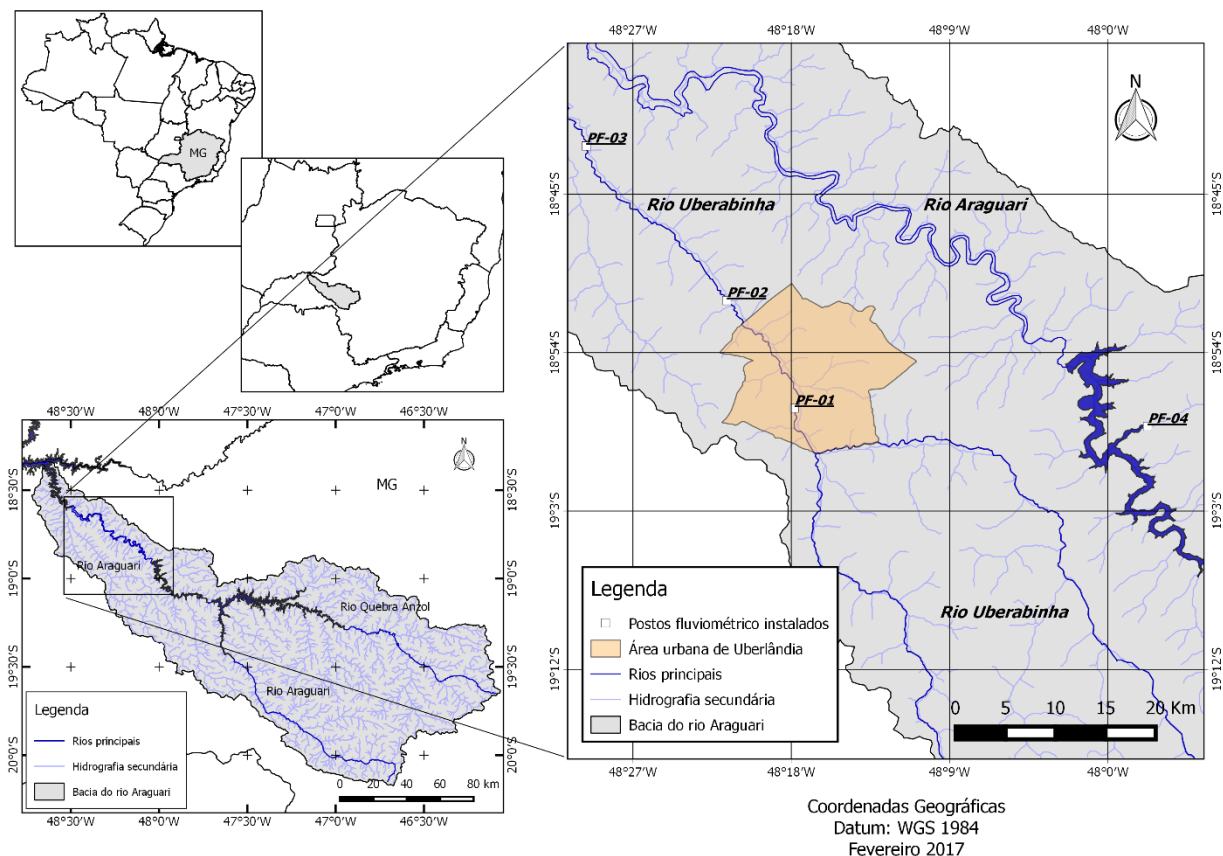
A seção transversal é obtida por meio de um ecobatímetro e o perfil de velocidade obtido pelo efeito doppler são processados no *River Surveyor*, o qual fornece o valor da vazão escoada.

A curva-chave em cada estação fluviométrica foi obtida por meio da correlação entre pares de valores de nível líquido na régua graduada com a vazão de escoamento. A medição do nível líquido é realizada juntamente à da vazão a partir de réguas verticais instaladas nas margens dos mananciais monitorados. As curvas-chaves foram obtidas a partir da equação potencial descrita na Equação (14).

$$Q = a \cdot (h + h_0)^b \quad (14)$$

Na qual: a e b são parâmetros de ajuste; h é o nível líquido medido no rio, em m; Q é a vazão medida, em m³/s; h_0 é a altura líquida entre a base da primeira régua e o fundo do canal.

Figura 16 – Postos fluviométricos instalados



Fonte: Autor (2016).

Os novos valores medidos a cada mês são incorporados ao banco de dados, levando a ajustes na curva-chave e sua equação. Por meio desta equação será possível realizar a estimativa de vazão além do período monitorado.

3.6 Levantamento das demandas consuntivas e não consuntivas outorgadas

O conhecimento das demandas consuntivas e não consuntivas é fundamental em uma análise de otimização hídrica em escala de bacia hidrográfica. O levantamento destas outorgas visa permitir uma análise da disponibilidade hídrica, e buscar novas alternativas nos critérios e prioridades de captação. Além disto, no balanço hídrico e nas modelagens chuva-vazão, as vazões outorgadas são adicionadas às vazões medidas no rio para se obter a vazão natural no rio e, a partir daí, proceder o melhor ajuste entre vazões medidas e simuladas.

Pode-se resumir as outorgas em dois tipos: superficiais e subterrâneas. O estudo desenvolvido nesta pesquisa refere-se à otimização do aproveitamento superficial da água, mas o conhecimento da

interdependência de rios e lagos com a água subterrânea levou a discussão de alguns fatores. Durante o levantamento das demandas foi observado que as outorgas subterrâneas praticamente se equiparam às superficiais, tanto em volume quanto em quantidade. Assim, algum impacto destas retiradas nos cursos de água deveria ser considerado. Entretanto, foram encontradas dificuldades nesta quantificação. Primeiramente, a área de estudo engloba uma hidrografia relativamente grande, sendo esperada que a “ligação” entre rios e aquíferos (efluentes ou influentes) varie de uma região para outra, assim como o tipo de solo, que por meio da condutividade hidráulica exerce grande influência na relação entre água superficial e subterrânea. Considerando apenas estes dois fatores, seria necessário o desenvolvimento de todo um projeto para o levantamento destes dados. Somado a isso, a falta de estudos relacionados a esta situação dificulta e aponta a complexidade desta análise. Diversos autores chegaram a conclusões parecidas (SILVA, 2007 e SOPHOCLEOUS, 2002). Além disso, quantificar qual seria o percentual de escoamento entre as duas condições e qual trecho da hidrografia que seria impactado para cada uma das outorgas subterrâneas se mostrou uma análise extremamente complexa, sem um banco de dados disponível e estudos previamente desenvolvidos.

Outro fator considerado foi o fato dos efeitos das retiradas subterrâneas não serem instantâneos nos cursos superficiais, variando significativamente de acordo com a constituição do aquífero. Somado a isto, seria necessário realizar a separação entre as outorgas na qual a relação entre o fluxo subterrâneo e os rios se caracterizasse do tipo efluente, ou seja, águas subterrâneas escoam na direção do corpo de água superficial, e aquelas afluentes, na qual os rios e lagos abastecem as águas subterrâneas. Esta separação seria necessária, pois, estas duas situações se caracterizam por taxas de escoamento significativamente diferentes.

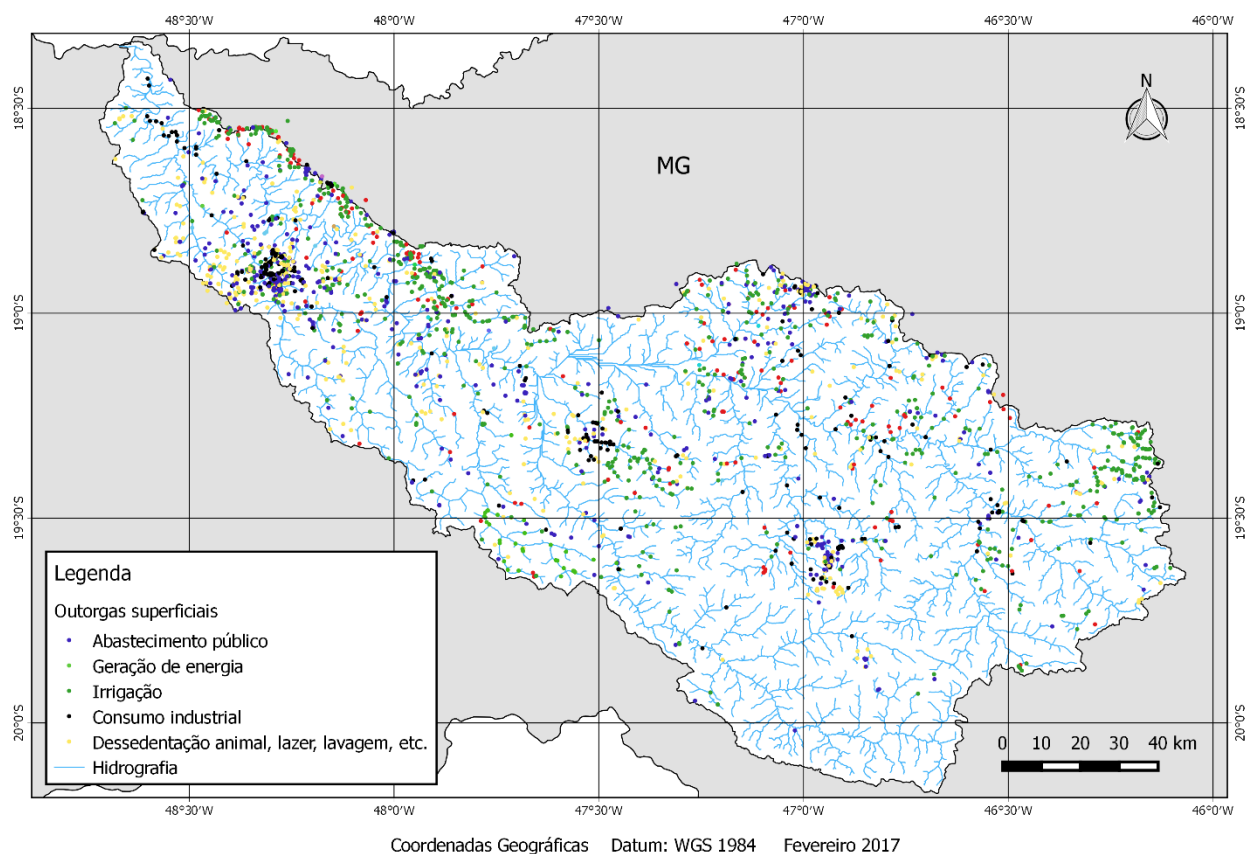
Assim, outorgas subterrâneas foram desconsideradas neste estudo.

As demandas superficiais outorgadas foram divididas em quatro grupos, sendo: consumo humano, irrigação, indústria e dessedentação de animais, além das demandas não consuntivas para geração de energia elétrica.

O levantamento dos dados foi feito junto à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), responsável por coordenar a política estadual de proteção e conservação do meio ambiente e de gerenciamento dos recursos hídricos em Minas Gerais, sendo consideradas apenas as outorgas em vigência no período de realização desta pesquisa.

As informações coletadas junto ao órgão ambiental estadual foram lançadas na bacia do rio Araguari por meio da ferramenta computacional de geoprocessamento que utiliza Sistemas de Informações Geográficas (SIG), o Quantum GIS. A partir do georreferenciamento dos pontos de captação, foi possível quantificar precisamente as vazões outorgadas em cada sub-bacia e trechos dos rios principais. A Figura 17 dá uma noção da quantidade de demandas ao longo da bacia, e consequentemente, a identificação das áreas críticas.

Figura 17 – Outorgas consuntivas na bacia do rio Araguari



Fonte: Autor (2017).

3.7 Vazão máxima outorgável

A outorga de direito de uso de recursos hídricos é um dos critérios da PNRH para assegurar o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos e o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, visando garanti-la as gerações atuais e futuras com impactos mínimos ao meio ambiente. Compete à ANA outorgar, por intermédio de autorização, o direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União, bem como emitir outorga preventiva. Quando a solicitação for junto a um manancial de domínio do Estado de Minas Gerais, a outorga deve ser dada pelo IGAM.

No processo de concessão do direito de uso da água, os órgãos ambientais realizam uma análise da quantidade máxima permissível a ser outorgada, ou seja, uma porcentagem da vazão mínima de referência. O Estado de Minas Gerais utiliza como vazão de referência 50% da $Q_{7,10}$, calculada a partir de uma base anual, sendo considerada uma das legislações mais restritivas.

Entretanto, a vazão de referência calculada a partir de uma base anual limita acentuadamente o volume máximo outorgável na maior parte do ano e, como consequência, o desenvolvimento econômico da região é afetado pela impossibilidade de reservação para um uso posterior.

Dada a sazonalidade fluviométrica na bacia do rio Araguari ao longo do ano, foi realizada a análise do impacto de vazões de referência calculadas em bases mensais na disponibilidade hídrica e no suprimento de demandas.

Um dos aspectos que esta dissertação avaliou foi a interferência e consequente otimização na disponibilidade hídrica para a bacia do rio Araguari alterando o valor máximo da vazão outorgável. Foram analisadas, como critérios alternativos, novas porcentagens da vazão de referência $Q_{7,10}$, sendo avaliados percentuais de 60% da $Q_{7,10}$, 70% da $Q_{7,10}$, 80% da $Q_{7,10}$, 90% da $Q_{7,10}$ e a própria $Q_{7,10}$ em bases sazonais e anuais para o cálculo desta vazão, para cada foz das sub-bacias adotadas e em trechos de interesse dos rios principais.

A vazão $Q_{7,10}$ se baseia em uma metodologia estatística, sendo avaliada como variável ocasional. Sua probabilidade de ocorrência é calculada por meio da aplicação de métodos estatísticos usuais, onde o resultado obtido se refere a um valor que, em média, a cada 10 anos, será igualado ou

inferiorizado pela vazão média de estiagem do rio em um período de 7 dias consecutivos (AGUIAR, 2014).

3.7.1 *Atlas digital das Águas de Minas*

A definição da $Q_{7,10}$, diferente para cada curso de água da hidrografia em estudo, foi realizada via Atlas Digital das Águas de Minas (2016), desenvolvido por Euclides, Ferreira e Faria Filho (2005), em parceria com o Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e duas secretarias de Estado e órgãos vinculados (Secretaria de Estado de Agricultura Pecuária e Abastecimento - SEAPA/ Fundação Rural Mineira - RURALMINAS e SEMAD/IGAM). Este programa disponibiliza um mapeamento completo e atualizado dos recursos hídricos superficiais de todas as bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais, dentre elas a do rio Araguari.

Seu banco de dados conta com equações para estimativa de vazões mínimas de sete dias de duração e período de retorno de 2, 5 e 10 anos com intervalo anual; vazões mínimas de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos com intervalo sazonal (período seco – abril/setembro e período chuvoso – outubro/março), vazões mínimas com permanência de 50, 75, 85, 90 e 95%, vazões médias de longo período, vazões máximas diárias anuais para os períodos de retorno de 2, 10, 20, 50, 100 e 500 anos, vazões máximas possíveis de serem regularizada por meio de barramentos, vazões máximas possíveis de serem regularizada e disponibilizada para outorga à jusante do barramento, volume de armazenamento necessário à regularização da vazão máxima possível de ser regularizada, volume de armazenamento necessário à regularização da vazão mínima residual (70% da $Q_{7,10}$) e volumes de regularização em reservatórios em função da vazão de interesse a ser regularizada.

Os autores deste atlas basearam sua construção no programa de pesquisa e desenvolvimento denominado Hidrotec (2016). Nele estão embutidas todas as metodologias consideradas por Euclides, Ferreira e Faria Filho (2005).

Os cálculos foram baseados em dados hidrológicos fornecidos pelos inventários das estações fluviométricas e pluviométricas disponibilizados pela Agência Nacional das Águas - ANA, sendo as falhas e as ausências nas séries históricas preenchidas por métodos de regressão linear simples e potencial. Outras informações referentes às características das bacias, tais como cursos de água

principais e seus tributários, cobertura vegetal, relevo geral, formação geológica, hidrogeologia, distribuição climática, principais aproveitamentos da água e interferências de finalidade foram obtidas com base em estudos anteriores.

Para suprir a deficiência de dados e postos de monitoramento da rede hidrométrica das regiões englobadas pelo atlas, os autores fizeram o uso de técnicas de estimativa tais como o método de Thiessen e metodologias de regionalização hidrológica de vazões.

O Hidrotec (2016) conta com dois métodos de regionalização no caso das estimativas de vazões mínimas, máximas e médias de longo período, a saber:

- Métodos que regionalizam a vazão com um determinado risco; (EUCLYDES, 1992 apud HIDROTEC, 2016) baseados nas distribuições de probabilidades de Gumbel, log-normal II, Pearson tipo III e log- Pearson tipo III para eventos máximos, Weibull, log-normal III, log-Gumbel, Pearson tipo III e log- Pearson tipo III, para os mínimos;
- Métodos que regionalizam uma curva de probabilidade adimensional e o fator de adimensionalização (Eletrobrás, 1985 apud HIDROTEC, 2016).

Para a aplicação destes métodos os autores se basearam no conceito de regiões hidrologicamente homogêneas, considerando os critérios da distribuição de frequência das vazões adimensionalizadas de cada estação em papel probabilístico e na análise do ajuste do modelo de regressão múltipla das vazões médias com as características físicas e climáticas das sub-bacias.

Por meio de modelos de regressão múltipla, o sistema Hidrotec correlaciona as vazões estimadas pelos métodos de regionalização com uma série de variáveis independentes que afetam a oscilação da variável dependente, ou seja, são determinadas as equações matemáticas que relacionam vazões máxima, mínima e média na seção fluvial desejada com as variáveis área de drenagem, comprimento total dos cursos de água, densidade de drenagem, densidade hidrográfica e precipitação média.

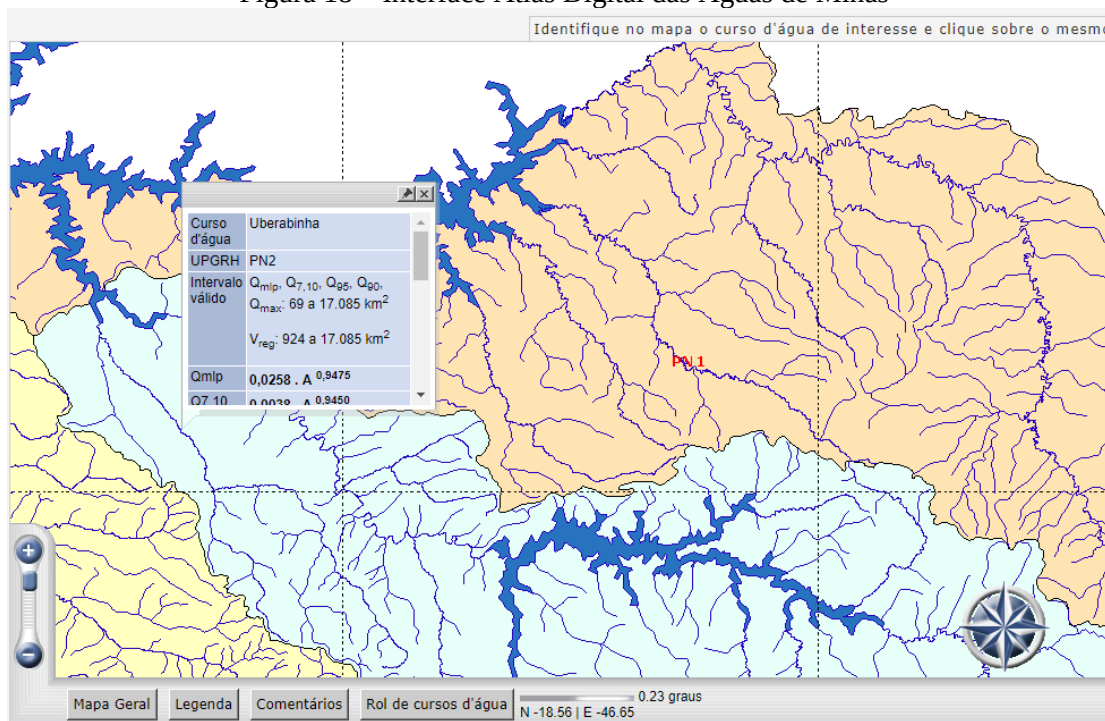
Estudos mais aprofundados e conhecimento das características da região em análise permitiram um equacionamento simplificado em função apenas da área de drenagem da bacia em questão (HIDROTEC, 2016). Com isso, a Equação (15) foi utilizada na estimativa das vazões mínima, máxima e média.

$$Q = a \cdot A^b \quad (15)$$

Na qual: a e b são parâmetros de ajuste para valores mínimas, máximas e médias de longo período; A é a área da bacia hidrográfica de interesse, em km²; Q é a vazão mínima, máxima ou média de longo período, em m³/s.

Assim, foram utilizadas as equações fornecidas pelo Atlas Digital das Águas de Minas na estimativa das vazões mínimas de 7 dias e 10 anos de período de retorno, tanto em base anual como sazonais. A Figura 18 mostra a interface do programa, com as equações características do rio Uberabinha.

Figura 18 – Interface Atlas Digital das Águas de Minas



Fonte: HIDROTEC (2016).

A simplicidade da Equação (15) oferece certa prática para pesquisas com áreas de estudo grandes e com carência de dados de monitoramento. Apesar de considerar toda a hidrografia da bacia do rio Araguari, os coeficientes da equação são praticamente os mesmos para os diferentes cursos de água nela inclusos. Diferenças significativas em seus valores são notadas apenas ao se alterar os critérios de cálculo de vazão mínima, como, por exemplo, entre anual e mensal.

Tucci (2002), Oliveira (2011) e Nascimento (2013) descrevem as limitações de técnicas de regionalização de vazões, relacionadas principalmente à sua capacidade de representar área demasiadamente extensas.

Além disso, Tucci (2002) afirma que a regionalização de vazões não é o método mais adequado para a extrapolação hidrológica, pois, este não consegue abranger toda a variabilidade das escalas dos processos hidrológicos. Assim, tal metodologia pode comprometer processos de tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos, gerando conflitos. Segundo Oliveira (2011), as equações obtidas na regionalização devem ser aplicadas dentro das áreas de drenagem abrangidas pelas estações fluviométricas utilizadas no seu cálculo.

Apesar disso, o principal ponto que justifica sua aplicação está no fato da baixa densidade de estações apresentada por várias regiões do território nacional. Assim, a extrapolação das equações de regionalização para além das áreas de drenagem dos postos de monitoramento fluviométricos se faz necessária.

Considerando que as análises desta pesquisa estão fundamentadas nos valores de vazão de referência, foram feitas algumas considerações:

- Julgou-se necessário estimar a vazão de referência por mais de uma metodologia para efeito comparativo;
- Os questionamentos a respeito de técnicas de regionalização encontrados na literatura também influenciaram nesta análise comparativa, sendo estimados valores observados de $Q_{7,10}$ nas regiões da bacia do rio Araguari com dados monitorados e comparados com os valores obtidos pela Equação (15).

A metodologia comparativa escolhida foi aquela que estima o valor de $Q_{7,10}$ por distribuição estatística. Para isso utilizou-se a ferramental computacional SisCAH 1.0.

3.7.2 SisCAH 1.0 (metodologia comparativa)

A metodologia apresentada neste item forneceu valores de vazões mínimas para análises comparativas. A comparação foi realizada com a metodologia efetivamente utilizada que, como dito anteriormente, refere-se as equações fornecida pelo Atlas Digital das Águas de Minas.

As metodologias para estimativa da $Q_{7,10}$ baseadas em distribuições estatísticas de dados observados estão entre as mais consagradas. Assim, foram considerados os seguintes métodos: log-normal II, log-normal III, Pearson tipo III, log- Pearson tipo III e Weibull. Conforme pode ser observado,

estes métodos já estão inclusos no processo desenvolvido pelo Hidrotec (2016) na construção da Equação (15), porém, o intuito deste “recálculo” foi verificar se esta foi capaz de representar cada uma das regiões da bacia separadamente.

Foi utilizado a ferramenta computacional SisCAH 1.0, Sistema Computacional para Análise Hidrológica (Souza et al. 2009) para a obtenção das vazões mínimas de comparação. Esta ferramenta utiliza os métodos de distribuições de densidade de probabilidade anteriormente propostos (Pearson tipo III, log- Pearson tipo III, log-normal II, log-normal III e Weibull). Foi considerado, para o cálculo, o início do ano hidrológico em janeiro e anos com séries históricas com falhas superiores a 5% foram descartadas. O programa computacional SICAH 1.0 indica, dentre as distribuições de densidade de probabilidade, aquela que melhor representa a série histórica em análise. Tal indicação é feita baseando-se na amplitude do intervalo de confiança dentre as estimativas obtidas por cada distribuição, sendo a menor delas a ideal.

Entretanto, a quantidade de regiões onde foi possível realizar esta comparação teve como limitante a disponibilidade e posição das estações fluviométricas. A aplicação da ferramenta SisCAH 1.0 fornece dados de vazão pontuais referentes ao local onde determinada estação está instalada. Assim, com o intuito de aumentar a amostragem para a análise comparativa foi considerado que as $Q_{7,10}$ dos trechos a montante de uma estação de monitoramento de uma mesma sub-bacia são proporcionais às áreas drenantes das mesmas, conforme Equação (16).

$$Q_{7,10\ i} = \left(\frac{A_i}{A_{total}} \right) \times Q_{7,10\ total} \quad (16)$$

Na qual: $Q_{7,10\ i}$ é a vazão $Q_{7,10}$ estimada em um determinado trecho da sub-bacia i , em m^3/s ; A_i é a área de contribuição da sub-bacia i , em km^2 ; A_{total} é a área total da bacia com dados monitorados, em km^2 ; $Q_{7,10\ total}$ é a vazão $Q_{7,10}$ total na bacia monitorada, em m^3/s

3.8 Otimização do aproveitamento hídrico superficial

A otimização hídrica superficial na bacia do rio Araguari, cujo balanço hídrico foi realizado a partir de séries históricas e sintéticas de vazão afluentes nas dezoito sub-bacias e, a partir das demandas consuntivas e não consuntivas outorgadas, foi obtida com o auxílio do módulo OPTIGES, vinculado à ferramenta computacional AQUATOOL, que funciona como suporte de decisão em recursos hídricos na escala de bacia hidrográfica.

O módulo OPTIGES é uma ferramenta de otimização de bacia hidrográfica que contém elementos superficiais e subterrâneos para gerir os usos múltiplos, aplicados conforme critérios do usuário, onde o modelo pode ser adaptado a qualquer tipo de esquema. Os elementos superficiais e subterrâneos utilizados para a criação da topologia da bacia do rio Araguari são basicamente os mesmos disponibilizados para qualquer módulo do AQUATOOL, entretanto, com mais ferramentas de análise, voltadas consequentemente para a otimização.

Nos tópicos a seguir são descritos os elementos utilizados na construção da topologia representativa da bacia estudada, assim como seu funcionamento e suas possíveis configurações, detalhando as opções de preenchimento, restrições e outras observações pertinentes.

- *Nós ou conexões*

Os nós são elementos pontuais, sendo aplicados em locais de convergência ou bifurcação de cursos de água, e em pontos de demandas e afluências. Eles são caracterizados apenas por um número de identificação e uma opção de nomenclatura, sendo necessário o estabelecimento de um nó no ponto final do sistema analisado (identificado como nó final).

- *“Toma ou captação”*

A “toma ou captação” é um elemento que funciona como uma espécie de condução, fornecendo água para uma determinada demanda e integrando-a à rede de fluxo. A Figura 19 ilustra seu *layout* no módulo OPTIGES.

Figura 19 – *Layout* para configuração do elemento “toma ou captação” para uma demanda de irrigação

Descripción de la toma

Nombre: Toma nº 1

SimGes

Punta mensual

Mes	Hm³
Octubre	10
Noviembre	10
Diciembre	10
Enero	10
Febrero	10
Marzo	10
Abril	10
Mayo	10
Junio	10
Julio	10
Agosto	10
Septiembre	10

Número de prioridad: 4

Dotación anual: 120

Coef. de retorno (entre 0-1): 0

Coeficiente de consumo: 1

Elemento retorno: (Ninguno)

Aceptar

Fonte: AQUATOOL (2016).

Na janela “Punta mensal ou máximo mensal” são inseridos os valores máximos de vazão que podem ser retirados da rede de fluxo. A partir do momento em que este volume é atingido, não se transfere mais água no mês em questão. Esta vazão exerce apenas a função de garantir que a demanda mensal será atendida, ou seja, um valor de segurança. Assim, o valor a ser empregado será superior a demanda mensal a qual a “toma” está ligada.

Em “Número de prioridad ou número de prioridade” são definidas as prioridades que cada uma das demandas tem sobre a outra, ou seja, é possível estabelecer quais serão as outorgas satisfeitas em níveis de preferência durante o processo iterativo. Os valores a serem inseridos não possuem um limite máximo, sendo somente restringido um valor mínimo igual a 1. Quanto menor a numeração recebida por determinada demanda, maior será sua prioridade no processo de otimização, ou seja, demandas com prioridade mais baixa (por exemplo 1) têm preferência sobre aquela com um número maior (por exemplo 2). Em casos de insuficiência de recursos, demandas com números elevados podem não ser atendidas.

O campo “Dotación anual ou quantia anual” se refere ao limite máximo captado no ano, sendo nada mais que a soma dos 12 volumes especificados em “Punta mensal”.

Além disso, a fim de realizar o balanço hídrico da bacia, é necessário definir o volume de água que retorna ao sistema hídrico para cada demanda atendida. Assim, é essencial determinar dois coeficientes: um coeficiente de retorno α e um coeficiente de consumo β . O retorno da água para o sistema é definido pela Equação (17).

$$R = \alpha \cdot S_{sup} \quad (17)$$

Onde: S_{sup} é o volume mensal captado pela demanda, em hm³. A água consumida X (que é perdida pelo sistema) é dada pela Equação (18).

$$X = \beta \cdot S_{sup} \quad (18)$$

O restante é considerado como infiltração I e é dado pela Equação (19).

$$I = (1 - \alpha - \beta) \cdot S_{sup} \quad (19)$$

Os volumes infiltrados são transformados em recarga para os aquíferos. Como dito anteriormente, não foram considerados neste estudo os escoamentos subterrâneos. Assim, para desconsiderar efeitos de infiltração basta que a soma dos coeficientes α e β seja 1. Os valores de coeficientes de retorno foram adotados conforme ANA (2013), sendo, em média, 0,8 para abastecimento urbano, 0,8 para abastecimento rural, 0,8 para abastecimento industrial, 0,2 para irrigação e 0,2 para criação de animais.

A opção “Elemento de retorno” determina o ponto em que o volume de água calculado pela Equação (17) retorna a rede de fluxo. A definição desses pontos é feita pela inserção do elemento “Retorno”.

- Retorno

Corresponde aos pontos onde os retornos são reintegrados ao sistema hídrico, sendo caracterizados apenas por um número de identificação e uma opção de nomenclatura. A definição desses elementos é puramente funcional, e consiste simplesmente em definir o número do nó onde os retornos das diferentes demandas são incorporados.

- Demandas

Correspondem às áreas onde a água é utilizada (abastecimento humano, dessedentação de animal, indústria e irrigação), de modo que parte dela é consumida e não volta a ser incorporada ao sistema, constituindo uma perda para o mesmo. São integradas à rede de fluxo pelos elementos “tomas ou captações”, conforme especificado anteriormente. Os nós de demanda são definidos por valores mensais captados, inseridos na janela “Demanda total (Hm³/mês)” (Figura 20).

Figura 20 – Layout para configuração do elemento “demanda”

Descripción de la demanda

Nombre:

OptiGes

Demanda total (Hm³/mes)

Mes	Hm³
Octubre	0.004212
Noviembre	0.004212
Diciembre	0.004212
Enero	0.004212
Febrero	0.004212
Marzo	0.004212
Abril	0.004212
Mayo	0.004212
Junio	0.004212
Julio	0.004212

Niveles de demanda

1er Nivel - 0% y	100	%
2º Nivel - 100%	100	%
3º Nivel - 100%	100	%
4º Nivel - 100%	100	%

Infiltración

Acuífero al que recarga: Acción elemental recarga:

Bombeo

Acuífero del que bombea: Acción elemental bombeo:

Parámetro control bombeo: Prioridad bombeo:

Caudal máx. bombeo (Hm³/mes): Nivel demanda bombeo:

Valor umbral parámetro control:

Garantía mensual

Fallo mensual (% D.M.):

Garantía Anual

Fallo mensual (% D.M.): Fallo anual (% D.A.):

Criterio tipo UTAH DWR

Fallo anual (% D.A.): Fallo 10 años (% D.A.): Fallo 2 años (% D.A.):

Criterio IPH, 2008 demandas urbanas

Máximo fallo mensual %: Máximo fallo a 10 años %:

Fonte: AQUATOOL (2016).

A opção “Niveles de demanda ou níveis de demanda” permite o fracionamento da captação em quatro níveis. Esta opção estabelece, de certa forma, que o cálculo do balanço hídrico é feito em 4 níveis de análise onde são exigidas que as porcentagens inseridas sejam cumpridas em cada um deles (Figura 20). Sua aplicação é ideal para áreas onde a disponibilidade hídrica é insuficiente para atender 100% das demandas, respeitando sempre a vazão ecológica.

Assim, em caso de conflitos devido à insuficiência de recursos, o modelo irá tentar satisfazer primeiramente o primeiro nível de todas as demandas com preferência na escala de prioridade (menor numeração), em seguida, o primeiro nível das demandas com a prioridade seguinte, e assim por diante. Como dito anteriormente, a escala de prioridade é definida no elemento “toma ou captação”.

Após atender o primeiro nível de todas as demandas, o próximo passo iterativo é atender o 2º nível das demandas prioritárias, seguidamente o 2º nível das demandas no próximo patamar de prioridade, e assim por diante. O processo se repete para os quatro níveis e em todas as escalas de demanda, sendo que, no último nível, não é permitida sua edição, fixo o atendimento total da demanda. Desse modo, é possível atender grande parte dos diferentes tipos de demanda em períodos de escassez, mesmo que não seja satisfeito o volume total requerido em uma primeira análise.

Como exemplo, em determinado curso de água a disponibilidade hídrica é de 8 hm³/mês e a vazão mínima ou ecológica a ser respeitada é de 4 hm³/mês. Nesta região ou ponto existem 3 demandas com a seguinte ordem de prioridade: abastecimento público, 1 hm³/mês (ordem 1); irrigação, 3 hm³/mês (ordem 2) e consumo industrial, 2 hm³/mês (ordem 3). Pelo balanço hídrico, e respeitando a vazão mínima ou ecológica, não é possível atender todas as demandas, ficando um déficit total de 2 hm³/mês. Neste caso, uma distribuição porcentual deve ser feita para que se atenda as demandas indispensáveis e, pelo menos, uma parcela das demais. Aí é que entra a opção de dividir a demanda em níveis. Definindo que, em uma primeira análise, deseja-se que 100% da demanda de abastecimento seja satisfeita, pelo menos 50% da irrigação e 25% do consumo industrial, de acordo com a ordem de prioridade do uso da água estabelecida. Ou seja, estas seriam as porcentagens do 1º nível de demanda.

Assim, nesta primeira análise, todas as exigências do 1º nível seriam satisfeitas, restando 5 hm³/mês. O próximo nível de exigência não existe para abastecimento, já satisfeito totalmente, mas para os demais se estipula que pelo menos 2 hm³/mês estejam atendidos da demanda por irrigação, ou seja, 66,7%, e que 50% do consumo industrial seja satisfeito. No final deste nível não há mais disponibilidade no curso, pois 100% da demanda de abastecimento, 1 hm³/mês, somada de 66,7% da demanda de irrigação, 2 hm³/mês, acrescida de 50% do consumo industrial, 1 hm³/mês, resulta em 4 hm³/mês retirados, atingindo o limite permitido.

Assim, finalizada a distribuição percentual das demandas no 2 nível de demanda, fica em déficit de demanda 1 hm³/mês referente a irrigação e 1 hm³/mês ao consumo industrial. A opção de divisão em nível de demanda permite uma melhor distribuição hídrica. Se fosse levado em consideração apenas a escala de prioridades e não houvesse estes níveis de análise, nesta situação seriam atendidas 100% das demandas de abastecimento e irrigação, mas o consumo industrial não receberia nenhuma porcentagem.

Para enfatizar a importância do nível de demanda no processo de otimização hídrica vale aqui citar informação jornalística sobre este assunto. Segundo Diniz (2015), o Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Araguari define que, em situações de escassez, deve-se realizar cortes nos volumes captados para determinadas atividades para que todos os usos recebam uma parcela de água. Sendo a irrigação a maior consumidora, o CBH – Araguari define uma escala de corte, variando entre 30% a 50% nesta atividade em períodos de estiagem (DINIZ, 2015). Assim, pode se dizer que os gestores dos recursos hídricos nacionais têm políticas para divisão das demandas em certas porcentagens, para que os múltiplos usos recebam pelo menos uma parcela de água em períodos de escassez.

As janelas “Infiltración ou infiltração” e “Bombeo ou bombeamento” são referentes, respectivamente, a infiltração de água não consumida pela demanda e a possibilidade de bombeamento subterrâneo para complementar déficits na captação superficial (Figura 20). Como especificado anteriormente, não foram consideradas outorgas subterrâneas neste estudo, assim nestas opções foram definidas que nenhuma infiltração ocorreu e nenhum bombeamento foi realizado.

O grupo de opções “Garantías ou garantias” funciona como uma espécie de parâmetro de qualidade do processo de otimização. Não representa a função objetivo do processo de otimização, mas sim um “medidor” da eficiência do processo.

Em “Garantía mensual ou garantia mensal” é definido o critério para a identificação de falhas no fornecimento mensal de água para as demandas. Uma falha é contabilizada quando um determinado mês apresenta um déficit maior que determinada porcentagem da demanda mensal. Esta porcentagem é inserida na opção “Fallo mensual ou falha mensal” (Figura 20). Assim, a garantia de eficiência da otimização, no que diz respeito ao atendimento as demandas em períodos mensais, pode ser medida pela Equação (20).

$$G_m = \left[1 - \left(\frac{n^\circ \text{ de falhas}}{n^\circ \text{ total de meses}} \right) \right] \cdot 100 \quad (20)$$

Na qual: G_m é a garantia mensal, em %.

Já na janela “Garantía anual ou garantia anual” é determinado o critério para a identificação de falhas no fornecimento anual de água para as demandas, em bases anual e mensal. Considera-se que uma falha anual ocorre quando, dentro de um ano: a) o déficit em um mês é maior que determinada porcentagem da demanda mensal, sendo que tal porcentagem é estabelecida em “Fallo mensual”; b) o déficit total anual é maior que a porcentagem inserida em “Fallo anual”, sendo referente neste caso a demanda total anual (Figura 20). Assim, a garantia de eficiência da otimização, no que diz respeito ao atendimento as demandas em períodos anuais, pode ser medida pela Equação (21).

$$G_a = \left[1 - \left(\frac{n^\circ \text{ de falhas}}{n^\circ \text{ de anos}} \right) \right] \cdot 100 \quad (21)$$

Na qual: G_a é a garantia anual, em %.

Logo, quanto maior a porcentagem obtida nos parâmetros de garantida, melhor se caracteriza a otimização. As porcentagens utilizadas nos critérios citados foram iguais a 1%, para as duas análises desta pesquisa. Tal restrição, de certa forma exigente, foi adotada, pois, se pretende obter resultados precisos no que se refere ao grau de escassez ao longo da bacia.

Ainda são oferecidos outros dois métodos para medição do cumprimento das demandas solicitadas: o critério de Utah DWR (*Division of Wildlife Resources*) (ESTRADA, 1991 apud ÁLVAREZ et al. 2014) e o critério ITP (*Instrucción de Planificación Hidrológica*) (2008) apud Álvarez et al. (2014) (Figura 20). Estes dois métodos visam o mesmo objetivo dos critérios de garantia mensal e anual. O número de falhas, de acordo com o critério de Utah DWR, é obtido quando três circunstâncias ocorrem:

- O déficit em um ano for superior a 50% da demanda anual;
- O déficit em dois anos consecutivos excede 75% da demanda anual;
- O déficit em dez anos consecutivos excede 100% da demanda anual.

O critério fixado pelo IPH 2008 é satisfeito se o déficit não exceder 10% da demanda em um mês, nem 8% da demanda anual em 10 anos.

Estes são valores padrões de porcentagens destes métodos, sendo também adotados no processo de otimização aqui desenvolvido.

- *Condições*

São elementos que correspondem às seções de rios e canais onde a água flui a partir de um nó para outro, sempre numa direção pré-definida pelo usuário. Portanto, são caracterizados pelo seu nó inicial, nó final, sua capacidade máxima, a vazão mínima permitida e a prioridade deste fluxo mínimo. Tanto a capacidade máxima, como a vazão mínima, podem ser variadas para cada mês do ano (Figura 21).

Na opção “Caudales ou vazões” são definidas a capacidade máxima e a vazão mínima permitida. Este valor mínimo de escoamento é fundamental nas análises a serem realizadas, pois, é neste item que será estabelecida a vazão ecológica a ser respeitada, ou vazão de referência.

Enquanto o fluxo máximo é uma restrição que não se pode superar, o fluxo mínimo é uma restrição que pode ser violada se não há água para satisfazer, como acontece na realidade.

Em “Número de prioridad caudal mínimo” é inserida a prioridade do cumprimento da vazão mínima em relação aos demais objetivos no processo de otimização, como, por exemplo, qual seria a preferência entre respeitar o limite ambiental de escoamento ou atender a uma determinada demanda consuntiva (Figura 21). Neste estudo, a vazão de referência foi sempre a maior prioridade (número de prioridade 1).

Figura 21 – *Layout* para configuração do elemento “conducción ou condução”

Descripción de la conducción (Tipo 1)

Nombre:

OptiGes

Caudales (Hm³/mes)

Mes	Mínimo	Mes	Máximo
Octubre	52.30453	Octubre	10000
Noviembre	52.30453	Noviembre	10000
Diciembre	52.30453	Diciembre	10000
Enero	52.30453	Enero	10000
Febrero	52.30453	Febrero	10000
Marzo	52.30453	Marzo	10000
Abril	52.30453	Abril	10000
Mayo	52.30453	Mayo	10000
Junio	52.30453	Junio	10000
Julio	52.30453	Julio	10000
Agosto	52.30453	Agosto	10000
Septiembre	52.30453	Septiembre	10000

Número de prioridad caudal mínimo:

Nivel de fallo mensual (%):

Niveles Caudal mínimo

Entre 0% y %

Entre 100% y %

Entre 100% y %

Entre 100% y %

Coste del tramo

☒ No Coste

☐ Coste unidad o by pass

☐ Coste elección usuario

Mes	Coste
Octubre	0
Noviembre	0
Diciembre	0
Enero	0
Febrero	0
Marzo	0
Abril	0
Mayo	0
Junio	0

Aceptar

Fonte: AQUATOOL (2016).

Nas conduções onde são definidos os valores de vazão mínima de referência é possível fracionar este fluxo em quatro níveis na opção “Niveles caudal mínimo ou niveles de vazão mínima”. Assim, em caso de conflitos devido à insuficiência de recursos, o modelo tentará satisfazer primeiramente o primeiro nível de todos os fluxos de mínimos, em seguida, o segundo, e assim por diante. Desta forma, evita-se a acumulação de déficit de recursos escassos para a mesma seção com fluxo mínimo. Neste estudo não foi aplicada esta divisão, estipulando que logo no 1º nível 100% da vazão mínima deve ser respeitada. Isto porque, trata-se de um aspecto restritivo para a manutenção e preservação dos ecossistemas aquáticos.

A janela “Nivel de fallo mensual ou nível de falha mensal” é um parâmetro de garantia de atendimento a vazão mínima. Sua lógica funciona de forma similar aos métodos de garantia de atendimento às demandas, sendo aplicada a Equação (20) em seu cálculo. Como dito anteriormente, por se tratar de uma restrição ambiental, não foi admitido falhas no atendimento à vazão mínima.

Em “Coste de tramo ou custo do fluxo” se estabelece a relação entre os volumes de água escoados entre dois cursos originados de uma bifurcação. Esta opção só é relevante no caso de haver, entre as conduções, valores de prioridades diferentes. Como esta situação não se configurara neste estudo, não foram dados maiores detalhes sobre esta opção.

O tipo de condução utilizada foi a do Tipo 1 (ou "Condução simples"). Similar a um canal, este tipo de condução se diferencia dos demais por não levar em consideração perdas por infiltração, nem recargas de aquíferos.

- Vazões de entrada

Correspondem às afluições de água para o sistema a partir da drenagem em uma área de contribuição (seja afluente de sub-bacia ou a própria sub-bacia). São definidas apenas por uma entrada pontual incorporada ao sistema pelo nó. A unidade utilizada é hectômetro cúbico por mês, onde a amplitude da série de vazões mensais fornecidas como dados de entrada irá refletir no período máximo de otimização (Figura 22).

Figura 22 – Layout para configuração do elemento “aportación ou entrada”

Descripción de la aportación

Nombre: Aportación nº 47

SimGes

Tipo datos:

☒ Mensual Histórico ☐ Mensual medio ☐ Archivo datos

	Año	Total	01-Octubre	02-Noviembre	03-Diciembre	04-Enero	05-Febrero	06-Marzo	0
▶	1974-1975	3.8369				0.39008	0.54659	0.76485	0.
	1975-1976	13.744	0.30909	0.6152	1.9083	1.9495	0.78571	1.6731	
	1976-1977	20.433	0.83024	0.85381	3.9722	2.5085	2.869	1.2021	
	1977-1978	27.148	1.0697	2.7989	1.5287	5.9081	1.8868	4.1938	
	1978-1979	32.024	1.3799	1.876	2.2922	6.9762	2.2215	4.4004	
	1979-1980	46.092	1.8363	1.8632	10.225	3.2308	12.195	3.3796	
	1980-1981	33.267	1.8905	1.8302	1.7729	7.8767	3.1697	3.2072	
	1981-1982	49.841	1.8905	2.6391	4	14.171	3.3765	6.1915	
	1982-1983	47.982	2.245	2.175	10.051	3.3127	8.1176	2.8524	
	1983-1984	33.411	2.6317	2.5738	4.4098	2.463	2.4055	2.637	

Editar valores...

Aceptar

Fonte: AQUATOOL (2016).

- Reservatórios

São caracterizados pela sua capacidade de armazenamento, definidos pela diferença entre o volume máximo e o volume mínimo, podendo variar mês a mês, se desejado.

Sua configuração é dividida em 4 abas, sendo necessários diversos dados de entrada em cada aba. Em “Datos físicos ou dados físicos” são informados o volume inicial do reservatório e um número de prioridade (Figura 23).

Figura 23 – Layout para configuração da aba dados físicos do elemento “embalse ou reservatório”

The screenshot shows a software window titled "Descripción del embalse" with a close button (X) in the top right corner. Inside the window, there is a text field labeled "Nombre" containing the text "CH Capim Branco I". Below this is a tabbed interface with four tabs: "Datos físicos" (selected), "Volúmenes", "Sup./Vol.", and "Tasa evaporación". The "Datos físicos" tab contains several input fields and dropdown menus. On the left, under the heading "Infiltraciones", there is a dropdown menu labeled "Acuífero" with the value "(Ninguno)" selected, and another dropdown menu labeled "Acción elemental". To the right of these, there are two input fields: "Nº de prioridad" with the value "3" and "Volumen inicial (Hm³)" with the value "232.683". Below the "Infiltraciones" section, there are three input fields for coefficients: "Coeficiente A" with the value "0", "Coeficiente B" with the value "0", and "Coeficiente C" with the value "1". At the bottom right of the window, there is a button labeled "Aceptar".

Fonte: AQUATOOL (2016).

O volume inicial deve ser igual ou maior do que o volume mínimo declarado para o último mês do ano hidrológico, informado na aba “Volúmenes ou volumes”. O número de prioridade permite definir um nível de preferência que um reservatório teria em relação aos demais para reservar volumes de água em abundância. Os níveis de prioridades seguem o mesmo raciocínio explicado anteriormente, onde reservatórios com prioridade mais baixa (por exemplo, 1) têm preferência sobre aquele com um número maior (por exemplo, 2). Inicialmente, não foi feita qualquer diferenciação entre escalas de prioridade. Entretanto, a ocorrência de situações onde o volume chegue a níveis que prejudiquem a operação de determinado reservatório levarão a uma prioridade maior pelo mesmo. Há a possibilidade de se introduzir perdas por infiltração nos reservatórios, entretanto, dada a magnitude do estudo e o pequeno impacto que estas infiltrações teriam no balanço hídrico do sistema, optou-se por ignorar esta opção.

Na aba “Volúmenes ou volumes” são inseridos a capacidade máxima do reservatório e seu volume mínimo (Figura 24). Os volumes máximos foram obtidos de Salla et al. (2013) e, no caso de empresas privadas, por meio de ofícios. A ferramenta OPTIGES admite a adoção de apenas um volume mínimo no qual sua operação é comprometida.

Figura 24 – *Layout* para configuração da aba volumes do elemento “embalse ou reservatório”

Descripción del embalse

Nombre: CH Capim Branco I

OptiGes

Datos físicos | Volúmenes | Sup./Vol. | Tasa evaporación

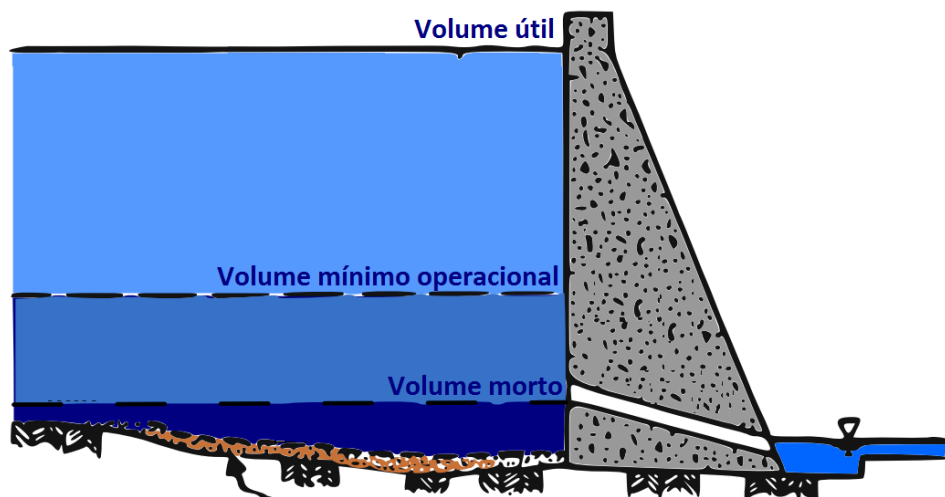
Mes	Máximo	Mínimo
Octubre	241.65	228.27
Noviembre	241.65	228.27
Diciembre	241.65	228.27
Enero	241.65	228.27
Febrero	241.65	228.27
Marzo	241.65	228.27
Abril	241.65	228.27
Mayo	241.65	228.27
Junio	241.65	228.27
Julio	241.65	228.27
Agosto	241.65	228.27
Septiembre	241.65	228.27

Aceptar

Fonte: AQUATOOL (2016).

Na operação de um reservatório pode se dizer que há dois volumes mínimos: o volume morto e o volume mínimo operacional. O volume morto é a parcela do volume total do reservatório inativa ou indisponível para captação. Corresponde ao volume compreendido abaixo do nível de água (N.A.) mínimo operacional, conforme ilustra a Figura 25. O volume mínimo operacional é aquele necessário para a operação adequada do reservatório, localizado entre o limite superior do volume morto e o limite inferior do volume útil do reservatório. O volume mínimo adotado foi o correspondente ao volume morto, uma vez que valores superiores a ele ainda permitem a captação de água para fins consuntivos e a geração de energia, mesmo que esta não seja feita da forma mais eficiente no que se refere à altura de queda de água para o funcionamento das turbinas.

Figura 25 – Volumes operacionais de um reservatório



Fonte: AQUATOOL (2016).

Na aba “Sup./Vol.” são informadas as relações área-volume (Figura 26) e em “Tasa evaporación ou taxa de evaporação” são inseridos os valores médios de evaporação mensal (Figura 27). Tais dados também foram obtidos de Salla et al. (2013) e, no caso de empresas privadas, por meio de ofícios.

Figura 26 – Layout para configuração da aba “Sup./Vol.” do elemento “embalse ou reservatório

Descripción del embalse

Nombre: CH Capim Branco I

OptiGes

Datos físicos Volúmenes Sup./Vol. Tasa evaporación

Sup. (Ha)	Vol. (Hm³)
1820	230.35
1825	231.61
1830	232.86
1835	234.12
1841	235.38
1846	236.63
1851	237.89
1856	239.14
1861	240.4
1869	242.4

Aceptar

Fonte: AQUATOOL (2016).

Figura 27 – *Layout* para configuração da aba taxa de evaporação do elemento “embalse ou reservatório”

Descripción del embalse

Nombre: CH Capim Branco I

OptiGes

Datos físicos | Volúmenes | Sup./Vol. | Tasa evaporación

Mes	mm/mes
Octubre	111.26
Noviembre	129.96
Diciembre	141.63
Enero	136.14
Febrero	110.49
Marzo	99.41
Abril	77.83
Mayo	63.19
Junio	54.26
Julio	59.04
Agosto	72.93
Septiembre	89.5

Aceptar

Fonte: AQUATOOL (2016).

3.8.1 Construção da topologia - AQUATOOL

A topologia construída na ferramenta AQUATOOL buscou representar toda a bacia do rio Araguari, considerando as 18 sub-bacias usuais e subdivisões destas, a fim de um maior detalhamento do comportamento hidráulico da bacia (vazões de entrada e saídas para demandas). A topologia completa da bacia do rio Araguari é ilustrada no Apêndice D.

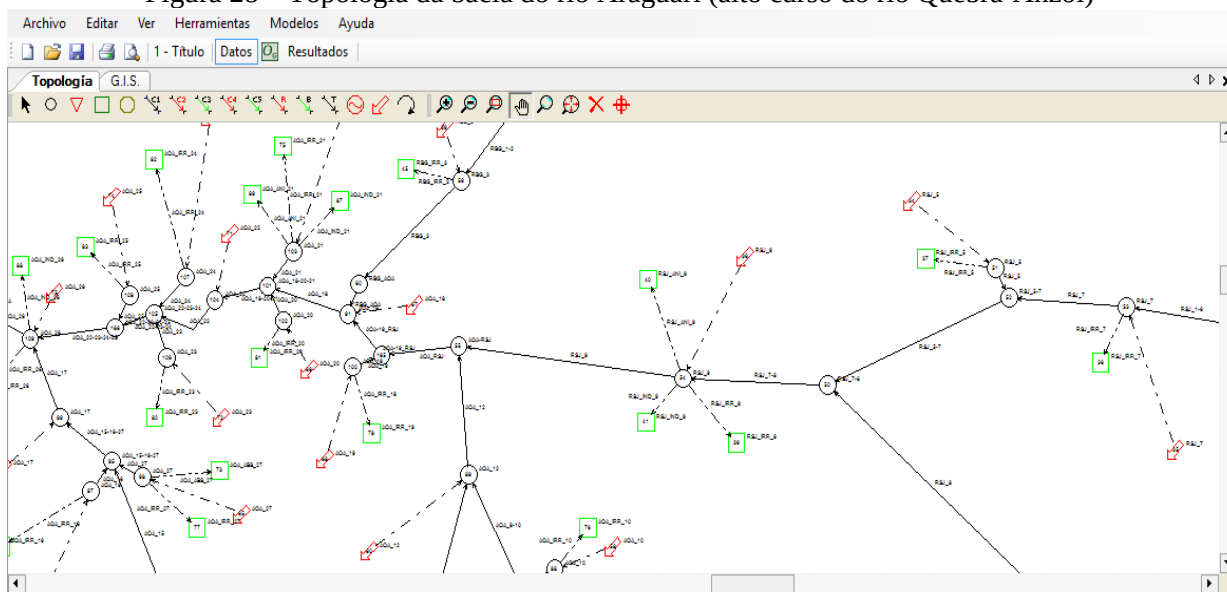
Assim, a bacia do rio Araguari foi dividida em 183 trechos. A subdivisão em trechos foi realizada considerando três fatores principais:

- Número de outorgas da região, ou seja, uma região onde foram levantadas um número significativo de outorgas houve um detalhamento maior, dividindo estas demandas para cada um dos tributários do qual captam água. Regiões onde não houve outorgas levantadas ou com quantidade insignificante foram “simplificadas” em apenas um trecho;

Os demais fatores foram aqueles usualmente empregados no processo de delimitação de uma bacia hidrográfica (VON SPERLING, 2007):

- Curvas de nível do terreno: o limite da área de contribuição de um trecho partiu do seu exutório, sendo delimitado por meio da conexão dos pontos mais elevados, tendo por base as curvas de nível do terreno;
- Hidrografia da região: a delimitação dos trechos buscou circundar o curso de água principal da sua área de contribuição, englobando seus tributários. Assim, cada trecho representa uma área com dimensão distinta. Por exemplo, um tributário pequeno (córrego ou ribeirão) com quantidade elevada de outorgas representa um trecho da mesma forma que a área de todo um conjunto de rios e tributários sem outorgas. A Figura 28 traz apenas uma região de toda a topologia da bacia do rio Araguari, especificamente o alto curso do rio Quebra-Anzol.

Figura 28 – Topologia da bacia do rio Araguari (alto curso do rio Quebra-Anzol)



Fonte: AQUATOOL (2016).

3.8.2 Rede de fluxo e função objetivo

Nesta seção são descritos todo o equacionamento embutido na ferramenta OPTIGES do AQUATOOL necessário para as análises de otimização. Tal informação é fundamental para que o usuário tenha o conhecimento do impacto de cada um dos valores inseridos e parâmetros adotados nos elementos constituintes da topologia na esquematização do comportamento da bacia hidrográfica.

- *Rede de fluxo*

A partir da topologia criada e com base nos dados físicos e prioridades estipuladas, o sistema cria uma rede de fluxo interna complexa, interligando todas as possibilidades de análise. Durante o processo de otimização, o fluxo do algoritmo segue alguns pontos básicos, a saber:

- Por meio do período de tempo de análise estipulado, a rede de fluxo interna realiza o escoamento de água de um mês para o outro por meio de arcos de transferência, contabilizando entradas, saídas e armazenamentos;
- Realiza a manutenção do balanço de massa da equação da continuidade, capacidades máximas de condução, reservatórios, etc, ou seja, considera todas as limitações físicas do sistema;
- Introduz as prioridades entre às várias exigências de volumes e demandas, e entre os diferentes níveis dos mesmos, incluindo exigências de vazões mínimas em seções do rio;
- Encontra a solução de gerenciamento para as exigências mais elevadas, tendo em conta atender o máximo de prioridades estipuladas.

- *Função objetivo*

A otimização da gestão do sistema hídrico, por um período de N anos, é realizada pela minimização da função objetivo descrita pela Equação (22).

$$\sum_{t=1}^{N-12} \left[\sum_{i=1}^{n_c} T_C + \sum_{i=1}^{n_d} T_D + \sum_{i=1}^{n_{ba}} T_{BA} \right] - \sum_{i=1}^{n_e} T_E \quad (22)$$

Na qual: n_c é o número de conduções do esquema; n_d é o número de demandas; n_{ba} é o número pontos de bombeamentos do sistema, sendo igual a zero para a atual análise; n_e é o número de reservatórios; T_C é a contribuição de cada condução, considerando vazões mínimas para a função objetivo; T_D é a retirada de cada demanda para a função objetivo; T_{BA} é a contribuição de cada bombeamento para a função objetivo e T_E é a contribuição de cada reservatório para a função objetivo.

O programa impõe algumas restrições à função objetivo:

- A soma das vazões de entrada em qualquer nó da rede deve ser igual à soma das vazões de saída do mesmo para cada mês;
- Nos reservatórios, para cada mês, a soma dos volumes de entrada e armazenado no início do mês deve ser igual aos volumes de saída, acrescido do total represado no final do mês e do volume de evaporação;
- O fluxo nas conduções deve ser menor que a capacidade máxima para o mês em questão;
- Além disso, todas as variáveis, tais como volumes dos reservatórios, fluxo nas conduções e demandas devem ser positivo ou zero.
- Função objetivo dos reservatórios

O termo da função objetivo T_E (ver Equação 22) é calculado pela Equação (23).

$$T_E = \sum_{t=1}^{N \cdot 12 - 1} K_E \cdot v_{i,t} + \delta_i \cdot v_{i,N \cdot 12} \quad (23)$$

Na qual: N é o horizonte de estudo, em anos; K_E é um valor adotado (padrão $K_E = 0$); $v_{i,t}$ é o volume armazenado no reservatório i no mês t ; δ_i é o fator de ponderação atribuída ao volume armazenado no reservatório i no final do período de otimização $N \cdot 12$, sendo calculado pela Equação (24).

$$\delta_i = K_E + n_e - p_i^e \quad (24)$$

Onde: n_e é o número de reservatórios existentes no regime; p_i^e é a prioridade atribuída ao reservatório i . Assim, reservatórios com um número de prioridade mais alta são menos importantes do que os reservatórios com um número de prioridade mais baixa.

Este termo promove o armazenamento de água em reservatórios ao longo do período de otimização, embora o reservatório onde a armazenagem ocorre no regime é, a priori, indiferente, exceto para o último mês de otimização, onde o armazenamento é recompensado em reservatórios com mais prioridade.

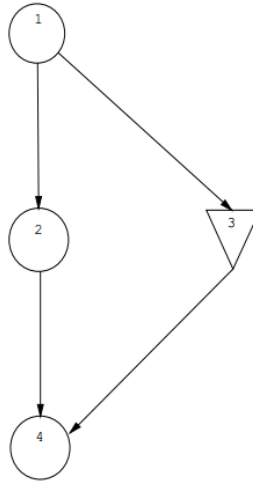
- Função objetivo das conduções

O termo da função objetivo T_C (ver Equação 22) é calculado pela Equação (25).

$$T_C = \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{i,j} \cdot d_{i,j,t} + K_{\sigma t} \cdot q_{i,t} \quad (25)$$

Na qual: n_i é o número de níveis no qual o fluxo mínimo da condução está dividido; $\alpha_{i,j}$ é o fator de ponderação atribuído ao déficit $d_{i,j,t}$ no mês t e nível de fluxo mínimo j da condução i ; $q_{i,t}$ é o fluxo corrente pela condução i no mês t ; $K_{\sigma t}$ é o coeficiente para casos de bifurcação atribuído a uma condução i . A Figura 29 exemplifica uma situação de bifurcação no nó 1, onde se espera que uma parte do volume conduzido siga para o reservatório em 3. Para o valor de $K_{\sigma t}$ igual a 1, o fluxo segue para o elemento com maior prioridade, e valor de $K_{\sigma t}$ igual a 0 são para os casos de não ocorrer esse tipo de derivação.

Figura 29 – Exemplo de uma bifurcação na topologia



Fonte: Álvarez, Solera e Monteagudo (2014).

A Equação (26) define o cálculo do fator de ponderação.

$$\alpha_{i,j} = K_{\alpha} - p_i^c \cdot K1 - j \cdot K2 \quad (26)$$

Na qual: K_{α} é um valor adotado, sendo recomendado igual a 20000, para a situação onde as vazões mínimas nas conduções tenham prioridade absoluta sobre as demandas, ou 10000, para equilibrar as prioridades entre elas; p_i^c é a prioridade atribuída a vazão mínima de uma condução i em relação

as demais, seguindo o mesmo princípio de prioridade explicado para os reservatórios; j é o nível de fluxo mínimo para o qual se calcula $\alpha_{i,j}$; $K1$ e $K2$ são dois valores internos do modelo, sendo atribuídos a eles os valores 5 e 200, respectivamente.

- Função objetivo das demandas consuntivas

O termo da função objetivo T_D (ver Equação 22) é calculado pela Equação (27).

$$T_D = \sum_{j=1}^{n_{i'}} \beta_{i,j} \cdot d'_{i,j,t} + \sum_{k=1}^{n_t} \gamma_{i,j} \cdot d''_{i,k,t} + \varepsilon_i \cdot Q_{i,b,t} \quad (27)$$

Na qual: $n_{i'}$ é o número de níveis em que a demanda está dividida; n_t é o número de “tomas ou retiradas” que suprem a demanda i ; $\beta_{i,j}$ é o fator de ponderação atribuído ao déficit $d'_{i,j,t}$ da demanda i no mês t para o nível de demanda j ; $\gamma_{i,j}$ é o fator de ponderação atribuído ao déficit $d''_{i,k,t}$ da demanda i no mês t por meio da “toma ou retirada” k ; ε_i é o fator de ponderação da vazão captada $Q_{i,b,t}$ de uma demanda i no mês t por meio do bombeamento de alimentação de uma demanda b .

Os três fatores de ponderação são calculados pelas Equações (28), (29) e (30).

$$\beta_{i,j} = K_\beta - j \cdot K4 \quad (28)$$

$$\gamma_{i,k} = -p_{i,k}^t \cdot K3 \quad (29)$$

$$\varepsilon_i = K_\beta - p_{i,B} \cdot K3 - (n_{i',B} - 1) \cdot K4 - 2 \quad (30)$$

Nas quais: K_β é um valor adotado, sendo recomendado que seja igual a 10000; $p_{i,k}^t$ é a prioridade dada à “toma” k da demanda i , seguindo o mesmo princípio da prioridade comentado para os reservatórios; $p_{i,B}$ é a prioridade atribuída para bombeamento i ; $n_{i',B}$ é o nível de prioridade da demanda i para receber o bombeamento; $K3$ e $K4$ são valores internos do modelo e iguais a 5 e 200, respectivamente.

Como esta pesquisa visa uma otimização apenas dos recursos superficiais, não foram implantados na topologia do problema quaisquer atividades relacionadas às águas subterrâneas, logo os bombeamentos citados anteriormente não fazem parte dos cálculos, assim como a parcela T_{BA} da Equação (22).

Processamento da otimização

Conforme demonstrado, a função objetivo possui características lineares e, basicamente, procura minimizar a soma ponderada dos déficits dos volumes outorgados, e maximizar o volume armazenado em reservatórios após satisfeitas as condições exigidas a jusante (vazões mínimas residuais, prioridades entre demandas consuntivas e não consuntivas).

A partir das restrições estipuladas para o problema, também lineares, o esquema construído se torna uma rede de fluxo otimizada resolvida por algoritmos escolhido pelo usuário, sendo eles: *out-of-Kilter* (BAZARAA E JARVIS, 1977 apud ÁLVAREZ, SOLERA & MONTEAGUDO, 2014), *Relax-IV* (BERSETKAS, 1994 apud ÁLVAREZ et al. 2014) ou *Netflo* (KENNINGTON & HELGASON, 1980 apud ÁLVAREZ et al. 2014). Estes algoritmos fazem parte da programação da ferramenta OPTIGES, cabendo ao usuário apenas a escolha daquele que melhor se ajusta a seus objetivos.

Existem várias referências comparando o desempenho de três algoritmos. A maioria dos autores concorda com a eficácia superior dos algoritmos baseados no modelo *Relax-IV* e implementações anteriores (BERSETKAS, 1985 apud ÁLVAREZ, SOLERA & MONTEAGUDO, 2014; BERSETKAS & TSENG, 1988 apud ÁLVAREZ et al. 2014; BERSETKAS & TSENG, 1994 apud ÁLVAREZ et al. 2014; KUCZERA, 1993 apud ÁLVAREZ et al. 2014). Estes algoritmos normalmente têm tempo de computação de cerca de uma ordem de magnitude mais baixa do que outros algoritmos de otimização de redes de fluxo.

Assim, foi selecionado o algoritmo *Relax-IV* no processo de otimização.

Horizonte de estudo e período de otimização

O horizonte de estudo corresponde ao tempo total, em anos, a ser considerado no processo de otimização. O horizonte pode ser simulado em diversas escalas, como décadas ou apenas um ano, por exemplo. Os cálculos iterativos da otimização são realizados para uma análise primordial, onde os

valores do estado final otimizado do primeiro período são usadas como valores de entrada para a otimização do período seguinte, e assim por diante (ÁLVAREZ, SOLERA & MONTEAGUDO, 2014).

O OPTIGES utiliza como horizonte de estudo o número de anos de dados de entrada. Assim, nesta pesquisa, as séries históricas levantadas e utilizadas consistem em períodos de monitoramento das últimas 4 décadas. Logo, o horizonte máximo de estudo foi de 40 anos, sendo que o OPTIGES permite análises em períodos menores, sendo o mínimo de 1 ano.

Não-linearidades e os efeitos sobre a função objetivo

Como discutido ao longo dos capítulos anteriores, o módulo OPTIGES possui a capacidade de modelar certos aspectos que afetam o sistema de gerenciamento de uma bacia e permite a modelagem mais ajustada à realidade por meio de funções lineares. No entanto, processos naturais possuem, em maior ou menor grau, um comportamento não-linear, que não pode ser representado diretamente no fluxo de rede de otimização.

Assim, para considerar estas não linearidades e incorporá-las em um processo de otimização linear, Frederikcs et al. (1998) apud Álvarez, Solera e Monteagudo (2014) e Haro et al. (2012) apud Álvarez et al. (2014) discutiram um método eficaz para explorar ainda mais a versatilidade do fluxo da rede, que é a de resolver esta de forma iterativa, de modo que a solução de uma iteração serve para cálculo dos fluxos que representam as não-linearidades associadas.

As iterações terminam quando uma certa convergência dos resultados é atingida, sendo estabelecido inicialmente como 0,04 hm³, sendo este valor passível de ser modificado pelo usuário. Este valor de convergência também foi adotado pelo estudo descrito nesta dissertação.

3.9 Análises para otimização do aproveitamento hídrico

Neste item são detalhadas a forma como as duas análises foram desenvolvidas e como estas foram representadas nos elementos componentes da topologia citados na seção 3.7.

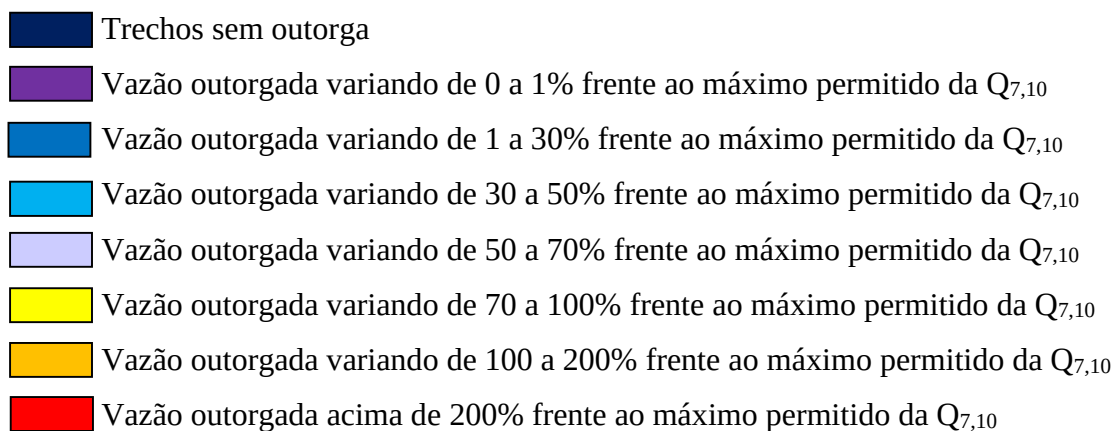
3.9.1 Primeira análise

Como especificado no Capítulo 1, a otimização da disponibilidade hídrica superficial na bacia do rio Araguari foi dividida em duas etapas. A primeira etapa visou avaliar as variações na quantidade

de água disponível ao alterar o percentual da vazão de referência no Estado de Minas Gerais, sendo analisados 60% da $Q_{7,10}$, 70% da $Q_{7,10}$, 80% da $Q_{7,10}$, 90% da $Q_{7,10}$ e a própria $Q_{7,10}$, isto baseado em uma base anual. Posteriormente, mantendo a porcentagem de 50% da $Q_{7,10}$ vigente atualmente no Estado de Minas Gerais, foram analisadas as variações da disponibilidade hídrica utilizando a base sazonal.

Quanto aos elementos constituintes da topologia construída no AQUATOOL, foram mantidas as configurações especificadas no item 3.8, exceto no que se refere às prioridades. Foi especificado como principal prioridade o atendimento da vazão de referência em análise (ou vazão ecológica). As demais demandas receberam prioridade 2 no processo, ou seja, o mesmo “peso” para cada uma das atividades consuntivas (abastecimento, irrigação, geração de energia, etc.), e logo no primeiro nível de demanda será exigido que 100% de seus volumes sejam atendidos. Esta configuração visou contabilizar um volume único de retirada. Assim, foi permitido o cálculo do balanço hídrico pelo OPTIGES e a análise das alterações na disponibilidade hídrica ao longo do ano hidrológico a partir de variações na vazão máxima outorgável (aqui estão inseridas as duas etapas descritas anteriormente).

Os resultados foram avaliados em toda a hidrografia por meio de mapas, onde os trechos receberam coloração específica de acordo com a proporção de utilização da parcela permissível para outorga (de acordo com cada critério estabelecido) da vazão $Q_{7,10}$. Para fins de caracterização dos segmentos da hidrografia, foi utilizada a escala de cores a seguir:



3.9.2 Segunda análise

Foram avaliadas as áreas críticas na bacia, focando-se nas regiões com maior número de outorgas significativas (que independe do tamanho da sub-bacia ou trecho) e nos reservatórios de acumulação.

No que se refere às áreas críticas, a primeira análise forneceu as regiões da bacia onde o volume captado ultrapassa o máximo permitido (50% da $Q_{7,10}$ anual). Assim, foi feita uma análise dos cortes necessários nestas demandas para sua adequação à legislação.

Entretanto, o critério no qual as outorgas tiveram de se adequar nessa análise se refere a 50% da $Q_{7,10}$, mas não como máximo outorgável e sim como valor mínimo residual que deve permanecer no rio a jusante do ponto de outorga. Esse critério foi utilizado por meio de duas considerações feitas:

Primeiramente, o próprio fato do IGAM adotar como máximo outorgável 50% da $Q_{7,10}$ tem como objetivo último garantir que, em situações extremas, a vazão mínima no rio não seja inferior a 50% da $Q_{7,10}$. Em segundo lugar, a ferramenta OPTIGES não oferece a opção de um valor máximo outorgável, mas sim o valor mínimo que se deve manter nos cursos superficiais. Assim o segundo motivo foi uma limitação, de certa forma, da ferramenta utilizada.

Ou seja, os resultados obtidos não necessariamente indicam que o máximo captado se adequou a 50% da $Q_{7,10}$, (o que na maioria dos casos não ocorreu), mas sim que será garantido 50% da $Q_{7,10}$ no rio.

Assim, a adequação das regiões da bacia onde o volume captado ultrapassa o máximo permitido (50% da $Q_{7,10}$ anual) foi realizada por meio da estimativa de cortes (racionamentos) necessários em cada tipo de outorga para que a vazão mínima fosse respeitada. Como dito, a vazão de referência (ou vazão ecológica) utilizada nesta análise foi a vazão atualmente em vigor na bacia, ou seja, 50% da $Q_{7,10}$.

Para a estimativa destes cortes, foram considerados diferentes níveis de prioridade entre as várias demandas na bacia. Foi instituído pela PNRH na Lei nº 9.433, de janeiro de 1997, que em situações de escassez o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais. A Política Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais, conforme Lei nº 13.199, de 29 de

janeiro de 1999, estabelece a prioridade para o abastecimento público e a manutenção dos ecossistemas. Já o Comitê da bacia do rio Araguari se limita a priorizar o consumo humano acima dos demais usos, não citando a escala de prioridades das demandas restantes. Assim, os níveis de prioridade desta análise seguiram a seguinte ordem: 1º - vazão ecológica ou de referência, 2º - abastecimento público, 3º - geração de energia, 4º - irrigação, 5º - consumo industrial, e 6º - outros (dessedentação animal, lazer, lavagem e paisagismo).

Estas prioridades foram estipuladas no elemento “toma ou retirada”, exceto no que se refere à vazão mínima de referencia (50% da $Q_{7,10}$), definida no elemento condução (seção 3.7).

No elemento “demanda” foram especificados os níveis de exigência (Figura 20). Por meio da opção foram atribuídas porcentagens mínimas a serem atendidas em cada um dos 4 níveis de exigência, para cada um dos 5 tipos de demandas consideradas. Este procedimento é descrito nos tópicos a seguir:

Nível de exigência 1:

- 100% da demanda de abastecimento humano;
- 95% da demanda para geração de energia;
- 90% da demanda por irrigação (devido a esta possuir o maior volume demandado entre todos os usos e também por ser bem distribuída, ou seja, há uma quantidade grande de usuários diferentes);
- 50% da demanda por consumo industrial (mesmo sendo grande em algumas regiões, é significativamente mais concentrada que as demais);
- 5% da demanda de usos diversos (consideravelmente menos importante, sendo constituída por usos para dessedentação animal, lazer, lavagem e paisagismo).

Nível de exigência 2:

- 100% da demanda para geração de energia;
- 100% da demanda por irrigação;
- 75% da demanda por consumo industrial;

- 10% da demanda de usos diversos.

Nível de exigência 3:

- 100% da demanda por consumo industrial;
- 50% da demanda de usos diversos.

Nível de exigência 4:

Sendo o último nível, o OPTIGES já define que se deve atender 100% do volume requerido.

Os resultados apresentados pela ferramenta indicam em qual nível não foi mais possível atender à exigência determinada, e com isso o percentual impossível de ser atendido para aquela demanda. Este percentual foi o critério para a estimativa dos cortes necessários.

Por exemplo, uma determinada demanda para consumo industrial apresenta déficits no volume outorgado em alguns meses, pois, o curso de água na qual a captação ocorre atingiu a vazão mínima residual (50% da $Q_{7,10}$). Assim, seriam estimadas porcentagens mínimas a serem atendidas em cada um dos 4 níveis de exigência desta demanda, uma vez que 100% não é possível. Seguindo o procedimento para a definição dos percentuais de exigência descritos anteriormente, seria estimado que pelo menos 50% desta demanda deveria ser atendida no primeiro nível, 75% no segundo nível e, por fim, 100% no terceiro nível (Figura 20). Finalizado o processo de otimização pelo OPTIGES, seria feita a análise dos resultados, especificamente aqueles referentes a “Garantia mensal ou garantia mensal” (Equação 20). O resultado desta garantia permite verificar qual a quantidade de meses em déficit e em qual nível de exigência não foi mais possível atender a demanda.

Seguindo o exemplo, logo no primeiro nível de exigência foi indicado que em 24 meses de um período de 40 anos analisados houve déficits. O próximo passo seria diminuir esta porcentagem de exigência no primeiro nível e verificar novamente o número de meses em déficit.

A nova exigência seria que pelo menos 40% do volume outorgado deveria ser atendido. Ao se verificar os resultados, a garantia mensal obtida foi de 100%, ou seja, se o volume outorgado fosse de 40% do valor original da demanda, não haveria déficits e a vazão residual mínima (50% da $Q_{7,10}$) seria garantida. Este seria o objetivo, ou seja, obter o percentual onde não ocorrem déficits.

Assim, cortes (racionamentos) de até 60% (100% - 40%) nesta demanda seriam necessários em 24 meses do período analisado. Estes são os resultados esperados na análise descrita neste item.

Neste exemplo, o intervalo de oscilação das porcentagens do 1º nível de exigência em cada uma das situações analisadas (50% no 1º nível inicialmente, e depois diminuída para 40%) foi de 10%. Este intervalo é grande, podendo excluir porcentagens mais “otimizadas”, como, por exemplo, o percentual de 45%, que poderia também ser uma solução viável. Os passos seguintes seriam repetir o procedimento descrito até que este intervalo atinja 1%. Esta foi a precisão adotada.

No caso do problema exemplificado, seria estimada a maior porcentagem entre 40% e 50% na qual nenhum mês apresentaria déficit, considerando a análise de cada situação onde é acrescido 1%.

Esta análise também permitiu uma quantificação dos volumes em déficits em determinadas regiões ou sub-bacias em períodos secos do ano, possibilitando um dimensionamento mais exato de possíveis reservatórios de acumulação implementados nestas sub-bacias.

No que se refere aos reservatórios (CH Nova ponte, CH Miranda, CHs Capim branco 1 e 2), a primeira análise forneceu, para o critério atual (50% da $Q_{7,10}$ anual), a situação destes quanto as demandas atendidas (junto à barragem e trechos a montante), a limitação da vazão mínima a jusante, e as cotas mínimas e volumes mínimos turbinados para a operação das respectivas hidroelétricas. Para os reservatórios onde as exigências citadas anteriormente foram respeitadas, realizou-se a estimativa de vazões mensais máximas que ainda poderiam ser captadas, respeitando obviamente as mesmas exigências.

Esta estimativa foi feita simplesmente inserindo uma nova demanda junto aos reservatórios e atribuindo a ela valores arbitrários de vazões mensais até que se atingisse um valor máximo outorgado, onde pelo menos 99% dos meses do período de 40 anos analisado tivessem este volume atendido. O processo consistiu em “tentativas e erro”, onde os resultados ótimos foram encontrados usando como parâmetro o número de meses em déficit nos níveis de exigência do elemento “demanda” apresentados nos relatórios do OPTIGES. Ou seja, foi estipulado para estas demandas fictícias que logo no primeiro nível de exigência (Figura 20), 100% do valor demandado deveria ser atendido. Assim, após o processo de otimização os relatórios gerados permitiram verificar se neste 1º nível

algum mês apresentou déficit. O volume ótimo foi o valor máximo mensal de demanda onde nenhum mês apresentou déficit (ou no máximo 99%), de acordo com as exigências estipuladas para a operação dos reservatórios.

3.10 Interpretação quantitativa das análises de otimização do aproveitamento hídrico

A avaliação do impacto das análises propostas no item 3.9.1 ao longo da hidrografia foi realizada calculando-se o percentual retirado em cada trecho, frente ao máximo permitido, para cada um dos novos critérios testados. Esta estimativa foi feita pela Equação (31).

$$\%_{\text{retirada}} = \left(\frac{Q_m - Q_j}{\%Q_{7,10}} \right) \times 100 \quad (31)$$

Na qual: $\%_{\text{retirada}}$ é a porcentagem captada frente ao máximo outorgável; Q_m é a vazão a montante do trecho, em $\text{hm}^3/\text{mês}$; Q_j é a vazão a jusante do trecho, em $\text{hm}^3/\text{mês}$; $\%Q_{7,10}$ é a vazão máxima outorgável do trecho para um determinado critério analisado, em $\text{hm}^3/\text{mês}$.

Outra forma utilizada para quantificar o impacto da substituição dos critérios propostos foi o método das diferenças relativas ($DR\%$), representado pela Equação (32).

$$DR\% = \left(\frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} \right) \times 100 \quad (32)$$

Na qual: $DR\%$ é a diferença relativa entre a situação atual e a situação em análise, em %; Q_1 representa a situação atual ($Q_{7,10}$ anual), em $\text{hm}^3/\text{mês}$; Q_2 a situação em comparação, ou com potencial de otimização, em $\text{hm}^3/\text{mês}$.

Esta equação de diferença relativa também foi utilizada na comparação entre os métodos de cálculo da $Q_{7,10}$, adquirindo a forma da Equação (33).

$$DR\% = \left(\frac{Q_{7,10 \text{ SISCAH}} - Q_{7,10 \text{ UFV}}}{Q_{UFV}} \right) \times 100 \quad (33)$$

Na qual: $DR\%$ é a diferença relativa entre a situação atual e a situação em análise, em %; $Q_{7,10 \text{ SISCAH}}$ representa a $Q_{7,10}$ calculada pelo método de Weibull via SisCAH 1.0, em $\text{hm}^3/\text{mês}$; $Q_{7,10 \text{ UFV}}$ a $Q_{7,10}$ calculada pela Equação (15), em $\text{hm}^3/\text{mês}$.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo são abordados, primeiramente, os resultados provenientes das etapas precedentes às análises propostas. São apresentadas as séries de dados históricos das estações pluviométricas e de evapotranspiração após o preenchimento de falhas pelos métodos propostos, assim como as modelagens quantitativas referentes às simulações das séries sintéticas de vazão por meio do modelo hidrológico chuva-vazão HBV, a calibração dos seus parâmetros e finalmente a topologia para o balanço hídrico realizado por meio da ferramenta AQUATOOL. Também são apresentados os resultados referentes aos novos postos de monitoramento fluviométricos instalados, conforme item 3.5. Em seguida são apresentados os resultados das análises principais, onde para a 1ª análise são demonstrados os efeitos das mudanças dos critérios de outorgas propostos na disponibilidade hídrica ao longo da bacia do rio Araguari. Os resultados da segunda análise mostram possíveis racionamentos de água para a adequação de outorgas em regiões críticas, além da análise de máxima disponibilidade hídrica a montante dos grandes reservatórios da bacia (CH Nova Ponte, CH Miranda, CHs Capim Branco 1 e 2), considerando como prioridade principal a vazão mínima residual a jusante e a outorga já existente de acumulação de água nos reservatórios para geração de energia elétrica.

4.1 Preenchimento de falhas nos dados pluviométricos e de evapotranspiração

As falhas nos dados mensais de precipitação foram preenchidas utilizando o método do Inverso Ponderado das Distâncias. As Figuras 93 a 107 presentes no Apêndice A mostram as estações onde foram necessárias a aplicação deste método, onde são apresentados os dados históricos fornecidos pela ANA e as séries completas com o preenchimento dos dados faltantes. As falhas nas estações

foram, de uma forma geral, pontuais e de certa forma insignificantes, dados os períodos monitorados. Julgou-se não necessário apresentar estações com falhas com um limite máximo de 2 meses ou com séries completas.

O preenchimento das falhas dos dados de evapotranspiração foi realizado via equação tendencial do tipo potência (Equação 1), obtida por planilha eletrônica. Seu equacionamento teve como base relacionar os dados de temperatura ambiente com os dados de evapotranspiração. As regressões não-lineares obtidas para cada uma das estações do INMET utilizadas são apresentadas nas Figuras 108 a 117, no Apêndice B. Os coeficientes de determinação obtidos foram satisfatórios, sendo próximos ao valor ideal (igual a 1), e superiores a 0,77 em todas as estações, com exceção da estação 83523, para a qual este coeficiente foi igual a 0,69755. Esta diferença pode ser justificada pela quantidade de dados monitorados ser significadamente menor quando comparado as demais estações, sendo igual a 81 (estação 83523) contraposto a um valor médio próximo a 135.

4.2 Calibração e validação dos parâmetros do modelo chuva-vazão HBV

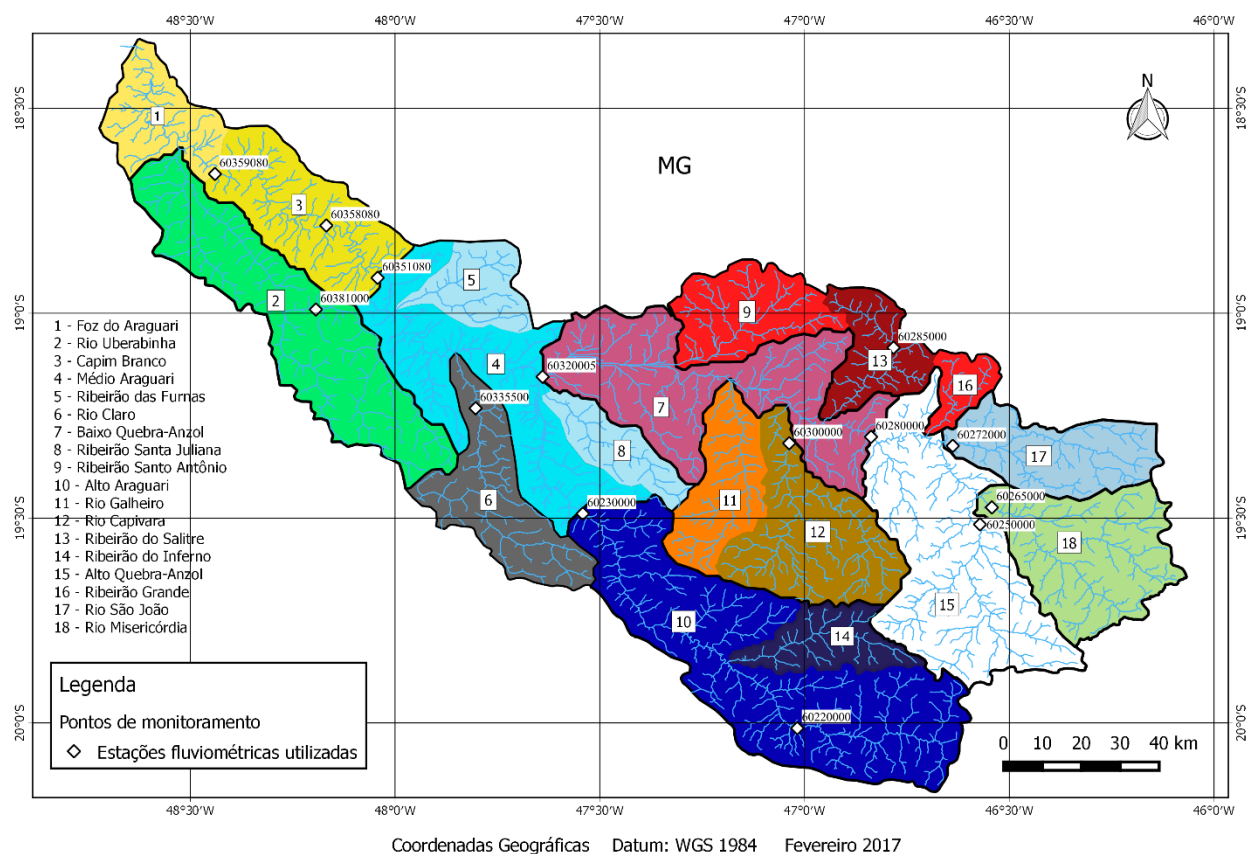
O estudo de otimização hídrica superficial na bacia do rio Araguari apenas foi realizado após conhecidas as séries de vazão em todos os seus tributários e rios principais. De acordo com a Figura 30, poucos tributários e trechos dos rios principais possuem estações de monitoramento fluviométrico com uma série histórica de vazão consistente. Para os tributários sem estação de monitoramento, as séries sintéticas de vazão foram estimadas a partir de regionalização de vazão, cuja metodologia já foi descrita anteriormente. De uma forma geral, os oito parâmetros integrantes do modelo HBV (k_0 , k_1 , k_2 , k_{perc} , $L_{máx}$, PWP , FC e β) calibrados nas sub-bacias vizinhas com estação de monitoramento foram utilizados como dados de entrada para as sub-bacias sem monitoramento hidrológico. O critério de regiões hidrologicamente homogêneas baseada na similaridade geomorfológica foi utilizado para transferir os parâmetros calibrados para as sub-bacias e regiões onde este ajuste não foi possível pela ausência de dados (item 3.3.2). A partir daí foi possível estimar a série sintética de vazão nas sub-bacias sem monitoramento hidrológico.

As Figuras 118 a 131 do Apêndice C ilustram as estações fluviométricas onde foi possível realizar a calibração dos parâmetros integrantes do modelo HBV. As demais estações com dados disponíveis não forneceram séries com valores suficientes para uma boa calibração. As Tabelas 9 a 22

apresentam os parâmetros calibrados, assim como o valor de $F_{\text{média}}$, utilizado como medidor da eficiência do ajuste realizado pelo algoritmo SCE-UA.

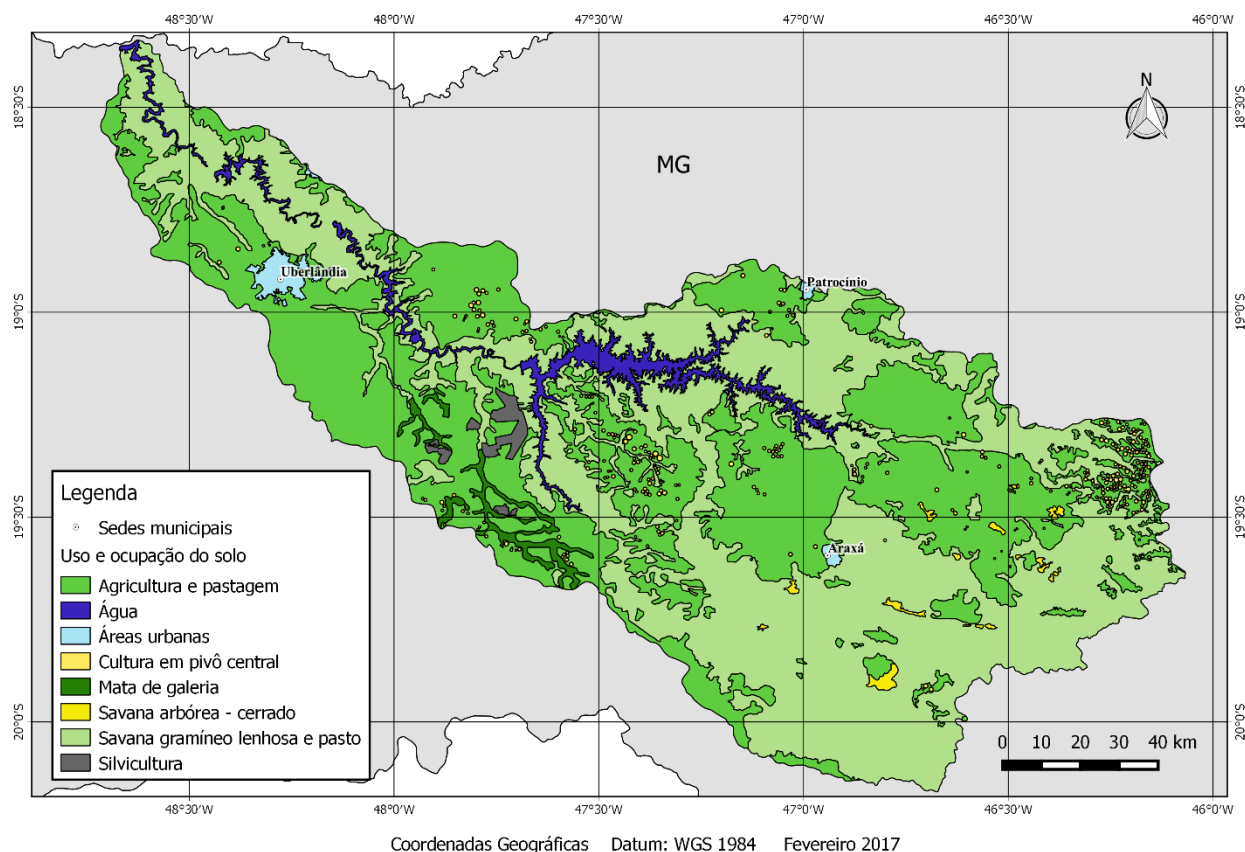
A Figura 30 traz as estações fluviométricas utilizadas nas calibrações dos parâmetros do modelo HBV, além das sub-bacias nas quais foram aplicados os parâmetros calibrados. Nesta figura, o mapa foi construído considerando que as áreas delimitadas com a mesma cor possuem os mesmos parâmetros do modelo HBV, sendo aquelas com tonalidades claras as que foram adotados os parâmetros e aquelas com tonalidade escura as que foram possíveis de realizar a calibração dos parâmetros e fornecê-los às demais. Conforme dito anteriormente (item 3.3.2), as distribuições percentuais das classes de uso e ocupação do solo foram determinantes para a adoção citada, tendo como base o mapa da Figura 15, mostrado novamente na Figura 31.

Figura 30 – Estações fluviométricas utilizadas na calibração dos parâmetros do modelo HBV, e respectivas sub-bacias onde estes foram aplicados



Fonte: Autor (2017).

Figura 31 – Classificação do uso e ocupação do solo na bacia do rio Araguari



Fonte: Autor (2017).

Na sub-bacia do Alto Araguari foram utilizados os parâmetros calibrados a partir de duas estações nela presentes. A estação 60220000 foi utilizada para a calibração dos parâmetros referentes à área de contribuição da nascente do rio Araguari até o ponto de localização da estação. A estação 60230000 forneceu os dados para a calibração dos parâmetros referentes ao restante da sub-bacia, sendo contabilizado também na área de contribuição a sub-bacia do Ribeirão do Inferno. Logo, os parâmetros calibrados pela estação 60220000 também foram adotados para a sub-bacia do Ribeirão do Inferno.

As sub-bacias do rio Uberabinha, Rio Claro, Rio Misericórdia e Rio São João foram calibradas pelas estações fluviométricas 60381000, 60272000, 60265000, respectivamente.

A sub-bacia do Ribeirão do Salitre foi calibrada pela estação 60285000, na junção do rio Bebedouro com o rio Salitre. Para o restante de sua área de contribuição, além das sub-bacias do Ribeirão Santo Antônio e Ribeirão Grande, foram adotados os parâmetros ajustados juntos a esta estação.

A sub-bacia do Alto Quebra Anzol teve seus parâmetros calibrados com base em duas estações nela presentes. A estação 60250000 foi utilizada para a calibração dos parâmetros utilizados nos trechos da nascente do rio Quebra Anzol até o ponto de localização da respectiva estação. A estação 60280000 forneceu os dados para a calibração dos parâmetros do restante da sub-bacia. Neste caso foi necessário subtrair as vazões referentes as sub-bacias Rio Misericórdia, Rio São João e Ribeirão Grande, assim como aquelas medidas pela estação 60250000. Por meio deste balanceamento foi obtido os valores de vazões correspondentes a área da sub-bacia do Alto Quebra Anzol compreendida entre estas duas estações.

Na sub-bacia do rio Capivara foram utilizados os parâmetros calibrados pela estação 60300000, próxima a seu exutório. Estes foram aplicados também a sub-bacia do rio Galheiro, considerando sua proximidade e similaridade geomorfológica.

A sub-bacia do Baixo Quebra Anzol teve seus parâmetros calibrados com base na estação que monitora a represa de Nova Ponte (60320005). Foram utilizados os dados de vazão afluente junto ao reservatório e subtraídas as vazões das seguintes sub-bacias: Santo Antônio, Ribeirão do Salitre, Alto Quebra Anzol, Rio Capivara e Rio Galheiro. Assim obteve-se a vazão referente apenas a área da bacia do Baixo Quebra Anzol, permitindo a calibração de seus respectivos parâmetros do modelo HBV.

Processo similar foi realizado para a sub-bacia do Médio Araguari. Foram obtidos os valores de vazão afluente ao reservatório de Miranda (estação 60351080) e subtraídas as vazões defluentes do reservatório de Nova Ponte, das sub-bacias do Alto Araguari e Rio Claro. A área de contribuição para as vazões utilizadas na calibração foi referente a sub-bacia do Médio Araguari, além das sub-bacias do Ribeirão Santa Juliana e Ribeirão do Salitre, já que estas últimas não dispunham de dados monitorados. Assim os parâmetros foram calibrados e adotadas para estas sub-bacias.

Na sub-bacia do Capim Branco, que conta com dois reservatórios, foi novamente necessário estimar as vazões afluentes e defluentes entre as barragens. A estação 60358080 forneceu as vazões afluentes do reservatório Capim Branco 1, e subtraídas as vazões defluentes do reservatório de Miranda, foi possível realizar a calibração dos parâmetros para a área de contribuição entre estes reservatórios. Da mesma forma foi realizada a calibração referente a região entre Capim Branco 2

e Capim Branco 1. Os parâmetros calibrados por esta última foram adotados também para a sub-bacia Foz do Araguari.

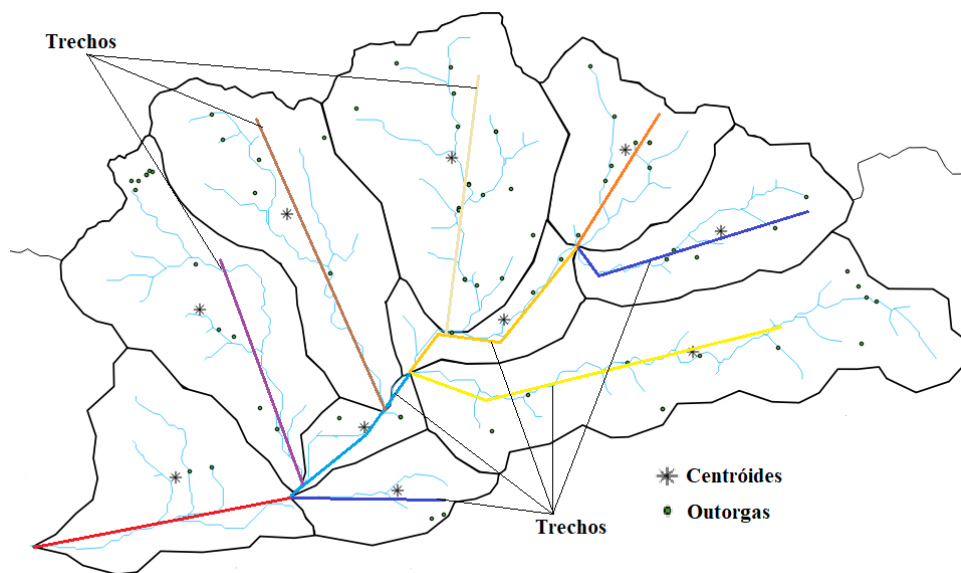
Obtidos os parâmetros para cada sub-bacia, a próxima etapa realizada foi estimar as vazões ao longo dos trechos da topologia esquematizada.

4.2.1 Estimativa das vazões

Conforme dito anteriormente, a estimativa das séries sintéticas de vazões foi realizada via modelo chuva-vazão HBV da ferramenta computacional EvalHid.

Este processo de simulação via EvalHid foi realizado seguindo os seguintes procedimentos. Para ilustrar estes procedimentos, foi utilizado como exemplo a sub-bacia do Ribeirão Santo Anto (Figura 32), sendo este também aplicado às demais.

Figura 32 – Subdivisões da bacia do Ribeirão Santo Antônio



Fonte: Autor (2017).

- I. Para cada um dos 183 trechos considerados foi delimitada a área de contribuição a eles correspondente, por meio da ferramenta Quantum GIS. A Figura 32 exemplifica estas divisões, sendo apresentada a sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio;
- II. Foram localizados os centróides destas áreas para cada um dos trechos;

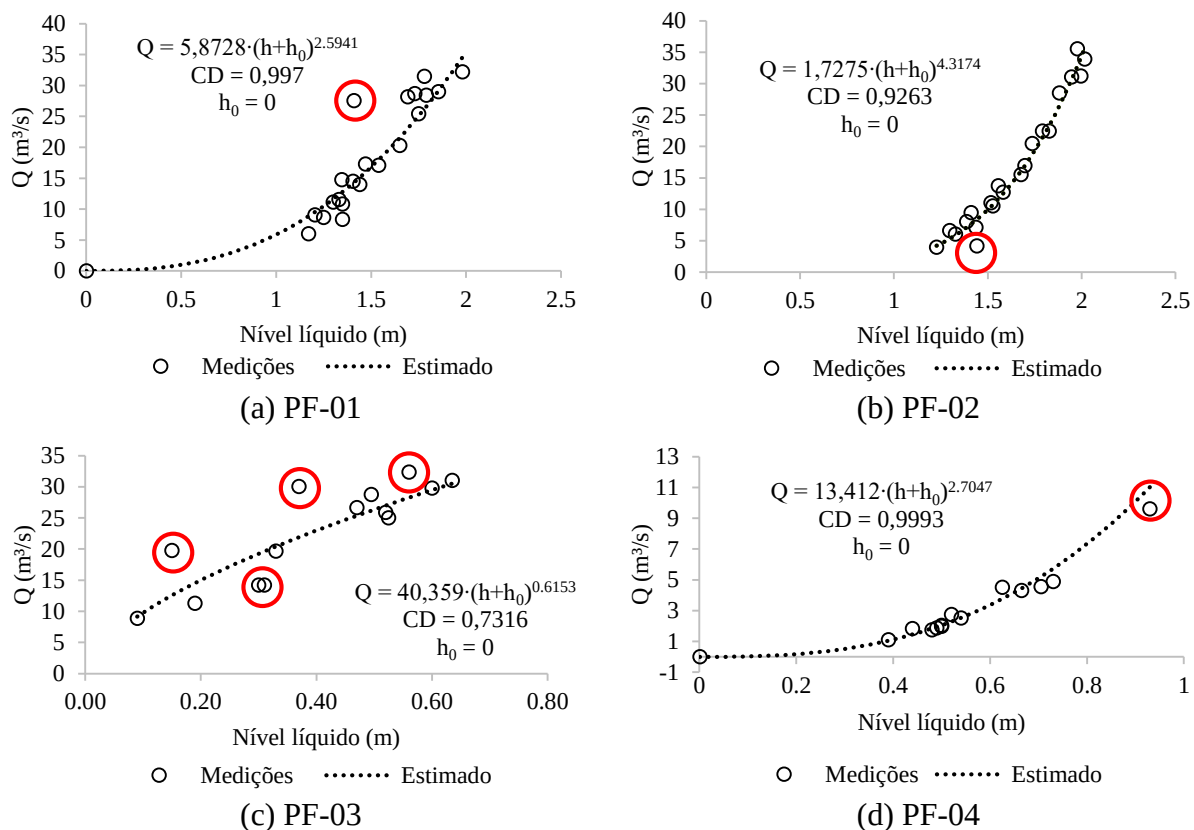
- III. Por meio do Método do Inverso Ponderado das Distâncias foram obtidas as séries de dados fluviométricos e de evapotranspiração nestes centróides;
- IV. Tendo como dados de entrada os valores de precipitação e evapotranspiração médios mensais e os parâmetros calibrados (na própria sub-bacia ou adotados), foram simuladas as séries sintéticas de vazões para cada um dos trechos. O número de anos simulados, em função do período dos dados de entrada, foi de 40 anos, com o ano inicial em 1975.

Estes valores de vazão foram um dos dados de entrada na ferramenta OPTIGES do AQUATOOL.

4.3 Dados de monitoramento fluviométrico implantados

Conforme especificado na seção 3.4, no início desta pesquisa foi iniciado o monitoramento de 4 estações fluviométricas, cujas localizações estão ilustradas na Figura 16. Os dados monitorados foram utilizados para comparar com as séries sintéticas estimadas, além do que para ampliar o banco de dados fluviométricos monitorados na bacia, com consequente construção de curvas-chave, conforme ilustra a Figura 33.

Figura 33 – Curvas-chave nas estações fluviométricas PF



Fonte: Autor (2017).

O período de monitoramento se iniciou em fevereiro de 2016, e foi finalizado em junho de 2017. Com exceção do ponto 4, as demais estações dispunham de dados monitorados anteriores a esta pesquisa, sendo estes também inclusos nas análises descritas a seguir.

Conforme pode ser observado, para os quatro pontos monitorados, os pares de valores de vazão e níveis líquidos medidos seguiram uma certa tendência, confirmada pelos ajustes satisfatórios das equações representativas.

Os melhores coeficientes de determinação obtidos foram aqueles referentes ao ponto PF-04, localizado no exutório da sub-bacia Ribeirão das Furnas, e ao ponto PF-01, o primeiro posto a montante no rio Uberabinha, sendo para estes o CD igual a 0,99 (Figura 33a e 33d). A proximidade do valor ideal (CD igual a 1) evidencia que a equação da linha de tendência potencial representa com fidelidade a correlação entre as vazões e níveis líquidos medidos, onde grande parte destes valores se encontram sobre a curva. As oscilações mais bruscas (detalhadas com círculo vermelho na Figura 33) são minoria, e consequência de medições em seções transversais distintas (pequenas alterações

no posicionamento devido a situação de alagamento e erosão das margens) ou da própria irregularidade do regime de vazões.

O ponto PF-02 (Figura 33b), com CD igual a 0,92, também obteve um bom ajuste para a linha de tendência, enquadrando-se no que foi citado anteriormente.

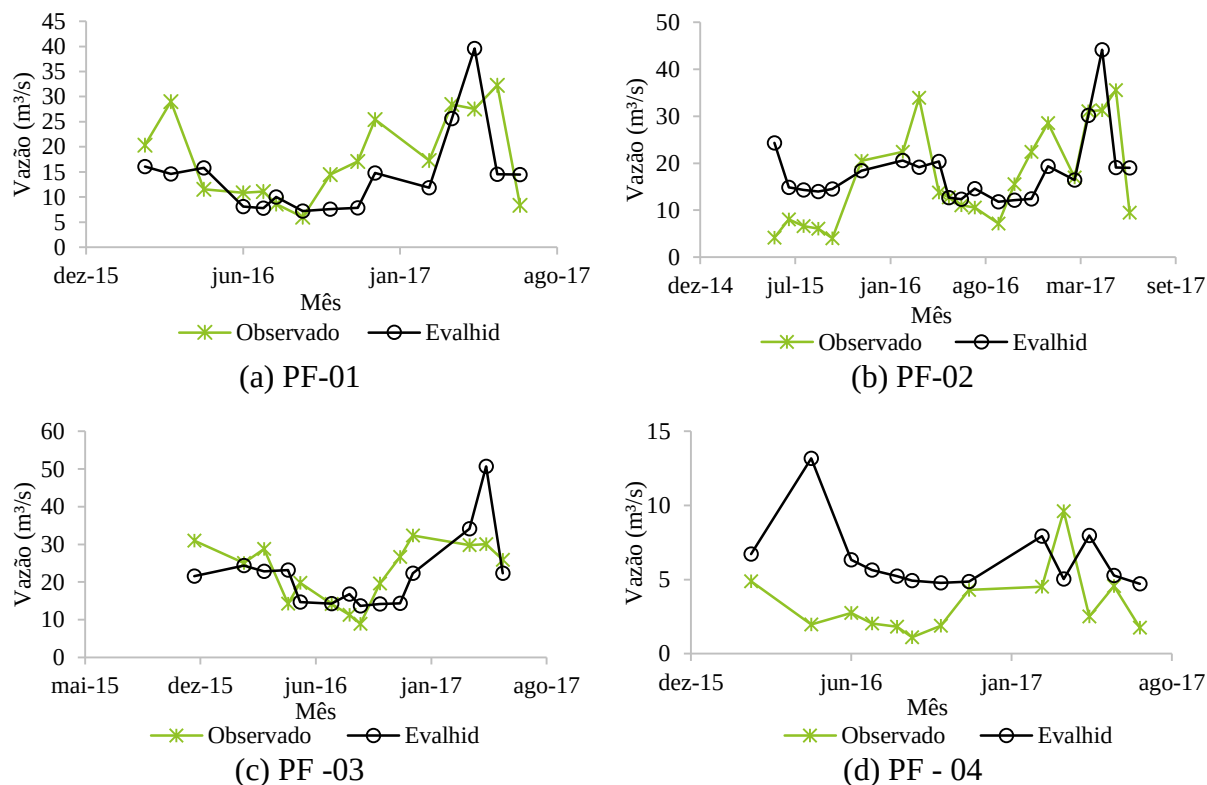
O pior ajuste foi aquele referente ao ponto mais a jusante no rio Uberabinha PF-03 (Figura 33c). Com um coeficiente de determinação igual a 0,73, juntamente com a dispersão dos valores medidos no gráfico, fatores que apontam certa limitação na representatividade da equação tendencial fornecida.

De uma forma geral, houve uma relação entre o valor do coeficiente de determinação e o número de medições discrepantes com as características físicas das seções monitoradas. Os melhores ajustes foram obtidos em pontos onde o acesso às margens apresentavam maior facilidade, permitindo que a medição ocorresse praticamente na mesma seção transversal e que a travessia do equipamento ADCP sucedesse da melhor maneira possível.

Assim, considerando o ponto PF-03, aquele com pior ajuste, houve maior quantidade de reposicionamento da seção transversal ao longo do período monitorado. Isto porque as margens do curso da água (rio Uberabinha) apresentaram grande erodização. Este fator também influenciou na travessia do equipamento ADCP, processo manual que depende de um posicionamento seguro junto às margens.

Foi realizada uma breve comparação entre os dados monitorados em cada uma destas estações com os valores simulados por meio do modelo chuva-vazão HBV, representada na Figuras 34.

Figura 34 – Comparação entre dados monitorados e dados simulados de vazão



Fonte: Autor (2017).

De uma forma geral, existe uma mesma tendência na variação de vazão mensal para as quatro estações fluviométricas monitoradas. Focando-se mês a mês, observam-se variações elevadas entre as vazões estimadas e as medidas.

A Figura 34a mostra que para o ponto PF-01, os valores medidos foram, em grande parte, superiores aos estimados. A diferença entre as duas séries de valores foi, em média, igual a 35%, chegando a um máximo de 121% (fevereiro/17), onde a vazão medida em campo foi igual a 17,29 m³/s e a estimada igual a 11,86 m³/s.

Já para o ponto PF-02 (Figura 34b), as vazões medidas apresentam, em média, valores 7,4% menores do que aquelas estimadas. As maiores diferenças ocorreram no período considerado de estiagem (abril a setembro), com variações extremas de $\pm 85\%$ (junho de 2015 e abril de 2017, onde, para junho/15 a vazão medida em campo foi igual a 4,17 m³/s e a estimada igual a 24,35 m³/s, e, para abril/17 os valores medido e estimado obtidos foram iguais a 35,55 e 19,11 m³/s, respectivamente.

Para o ponto PF-03 (Figura 34c) os valores medidos foram, em média, 9,4% maiores que os estimados. A maior diferença obtida é igual a 85% (novembro/16), onde a vazão medida em campo foi igual a 26,64 m³/s e a estimada igual a 14,35 m³/s.

O ponto PF-04 (Figura 34d) foi aquele no qual as vazões medidas apresentam, em média, as maiores diferenças dos valores estimados, sendo em média 38% menores. O máximo encontrado, neste caso, chegou a 85% (maio/2016), onde a vazão medida em campo foi igual a 1,97m³/s e a vazão estimada igual a 13,18 m³/s. Apenas em uma medição o valor monitorado foi superior, chegando a uma diferença de 90% (março/17), com valores medido e estimado iguais a 9,60 e 5,04 m³/s, respectivamente.

Estas variações podem ser justificadas pela frequência nos trabalhos de campo. As análises de campo foram realizadas apenas uma vez ao mês. Já as vazões sintéticas simuladas correspondem ao valor médio mensal. Apesar disso, as simulações das séries sintéticas de vazão forneceram resultados satisfatórios que serviram de base para os estudos de otimização hídrica na bacia do rio Araguari.

4.4 Topologia do sistema hídrico

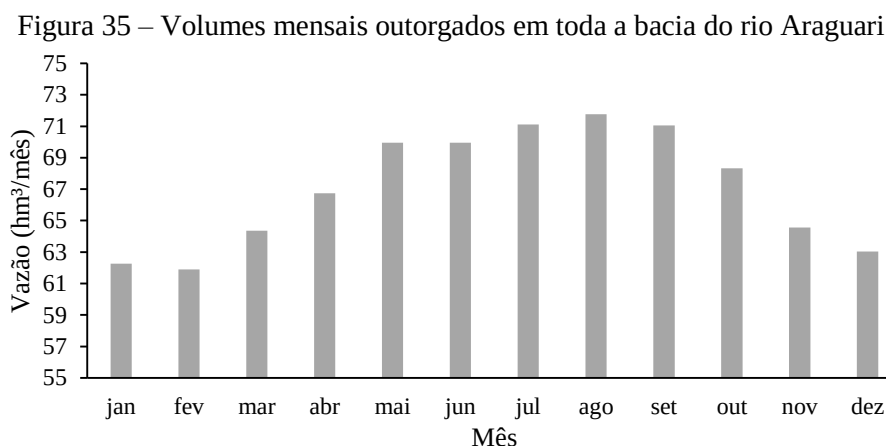
A topologia que esquematiza o sistema hídrico da bacia do rio Araguari foi traçada diretamente na interface da ferramenta computacional AQUATOOL, de acordo com o item 3.8.1. Sua estrutura tem como dados de entrada pontuais, as demandas mensais outorgadas e as vazões afluentes (corresponde à vazão resultante no exutório de cada subdivisão das sub-bacias). Além disso, dados físicos que caracterizam o volume e a área dos reservatórios também foram necessários.

A configuração de cada um dos parâmetros referentes aos elementos constituintes da topologia, descritos no item 3.8, foi realizada de acordo com as análises desenvolvidas, citadas no item 3.9. A topologia finalizada é apresentada no Apêndice D.

4.5 Análises de otimização do aproveitamento hídrico – períodos críticos

Visto o tamanho da área de estudo e o horizonte de dados analisados (período de 40 anos com intervalos mensais), optou-se por apresentar os resultados das análises apenas para os períodos e regiões críticas.

No que se refere aos períodos críticos, foi considerada a variação do regime pluviométrico ao longo do ano, sendo adotados dois períodos característicos, o chuvoso e o de estiagem. Em cada um deles foi estimado o mês mais crítico, sendo utilizado como critério o volume outorgado em determinado mês. Assim, quanto maior o volume outorgado, mais crítica é a situação quanto à disponibilidade de água. Os volumes totais demandados em cada mês em toda a bacia do rio Araguari são apresentados na Figura 35.



Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Figura 35, o mês com o maior volume outorgado no período de estiagem foi agosto, e para o período chuvoso foi o mês de outubro. Assim, estes meses foram adotados como os mais críticos e representativos de suas respectivas estações.

4.6 Análises de otimização do aproveitamento hídrico – 1ª análise

Inicialmente são apresentados os resultados da comparação entre as duas metodologias de cálculo da $Q_{7,10}$ propostas no item 3.7.

Em seguida são apresentados os resultados da primeira análise proposta (item 3.9.1). A primeira análise visou avaliar as variações na quantidade de água disponível ao se alterar o período base para a estimativa da $Q_{7,10}$ de anual para sazonal, mantendo a porcentagem de 50% da $Q_{7,10}$ vigente atualmente no Estado de Minas. Posteriormente, foram avaliados os impactos na disponibilidade hídrica ao se alterar o percentual da vazão de referência, sendo analisados 60% da $Q_{7,10}$, 70% da $Q_{7,10}$, 80% da $Q_{7,10}$, 90% da $Q_{7,10}$ e a própria $Q_{7,10}$, para uma base anual.

4.6.1 Determinação da vazão $Q_{7,10}$

Conforme proposto no item 3.7, o cálculo da vazão $Q_{7,10}$, diferente para cada região, foi inicialmente realizado via Atlas Digital das Águas de Minas (2016), desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela Equação (15). Para efeitos comparativos, foi realizada a estimativa destas vazões de referência nas regiões com estações fluviométricas disponíveis por métodos estatísticos alternativos.

-Comparação entre metodologias de cálculo da $Q_{7,10}$

A aplicação da Equação (15) para o cálculo da $Q_{7,10}$ depende apenas do conhecimento da área de contribuição a montante do curso de água em que se deseja seu valor. Os valores obtidos por este método serão referenciados como $Q_{7,10 \text{ UFV}}$.

Já para a análise comparativa foi utilizado o programa SisCAH 1.0. Conforme o item 3.7.2, esta ferramenta é baseada em modelos estatísticos, sendo sua estimativa dependente de séries históricas com o maior número de dados possíveis.

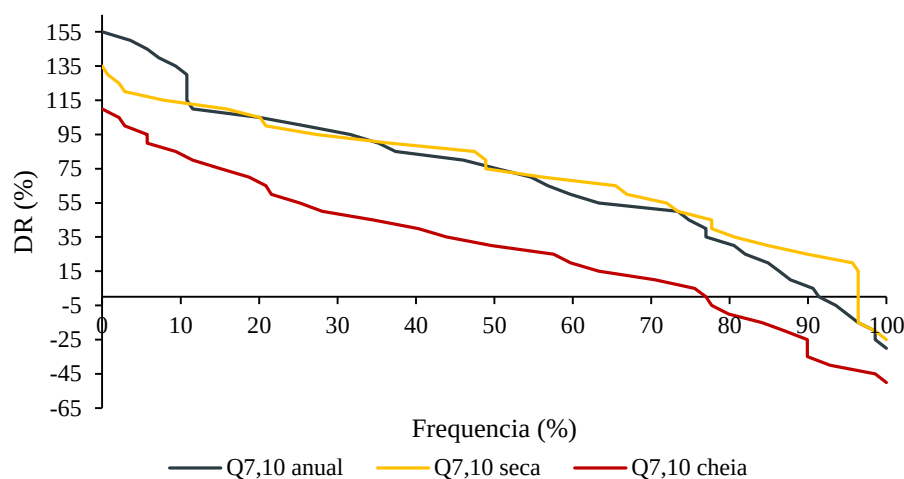
No que se refere aos cálculos desenvolvidos pelo programa SisCAH 1.0, o método de Weibull foi aquele que apresentou, em média, a menor amplitude no intervalo de confiança dentre as estimativas obtidas por cada distribuição, sendo assim este o representado nos resultados. As vazões estimadas por este método foram referenciadas com $Q_{7,10 \text{ SISCAH}}$.

A seguir são apresentados os valores obtidos pelos métodos citados. As análises foram realizadas comparando as diferenças encontradas entre a $Q_{7,10 \text{ UFV}}$ e a $Q_{7,10 \text{ SISCAH}}$ para um mesmo período base. Os períodos analisados foram: anual, sazonal considerando o período de cheia (outubro a março) e sazonal considerando o período de estiagem (abril a setembro).

A Figura 36 mostra as curvas que relacionam as diferenças relativas (DR%) entre os valores de $Q_{7,10}$ com a frequência de ocorrência ao longo dos trechos da hidrografia considerada. A DR% foi calculada de acordo com a Equação (33). As comparações foram feitas entre $Q_{7,10}$ pertencentes a um mesmo período base analisado.

A série “ $Q_{7,10}$ anual” refere-se à comparação entre os métodos de cálculo da $Q_{7,10}$ para períodos anuais, e as séries “ $Q_{7,10}$ seca” e “ $Q_{7,10}$ cheia” para os períodos sazonais de seca e cheia, respectivamente.

Figura 36 – Diferenças relativas (DR%) entre os valores de $Q_{7,10}$ com a frequência de ocorrência



Fonte: Autor (2017).

O número de trechos considerados dependeu do relevo e hidrografia, além da quantidade de outorgas do mesmo. Entretanto, para este estudo comparativo, o número de trechos foi limitado pela disponibilidade e posição das estações fluviométricas. A aplicação da ferramenta SisCAH 1.0 fornece dados de vazão pontuais referentes ao local onde determinada estação está instalada. Assim, com o intuito de aumentar a amostragem para a análise comparativa considerou-se que as $Q_{7,10}$ dos trechos a montante de uma estação de monitoramento de uma mesma sub-bacia são proporcionais às áreas drenantes das mesmas, conforme Equação (16). Assim, foram considerados 139 trechos ao longo da bacia do Araguari.

As três comparações realizadas mostraram uma diferença significativa nos valores de $Q_{7,10}$ calculados, com uma DR% positiva em grande parte dos trechos. Tal parcela demonstra que a aplicação da Equação (15) fornece valores de $Q_{7,10}$, em sua maioria, abaixo dos estimados por meio de valores históricos.

Esta diferença fica clara ao se observar que aproximadamente 75% dos trechos analisados apresentam uma DR% superior a 10%, para as três situações comparadas. Além disso, considerando o critério atual (50% da $Q_{7,10}$ anual), praticamente metade das $Q_{7,10}$ calculadas possuem uma diferença

de valores próxima a 85%. Porcentagem próxima também é encontrada para séries com base nos meses de seca. Já para o período chuvoso do ano essa diferença cai para 35%, mas ainda é significativa.

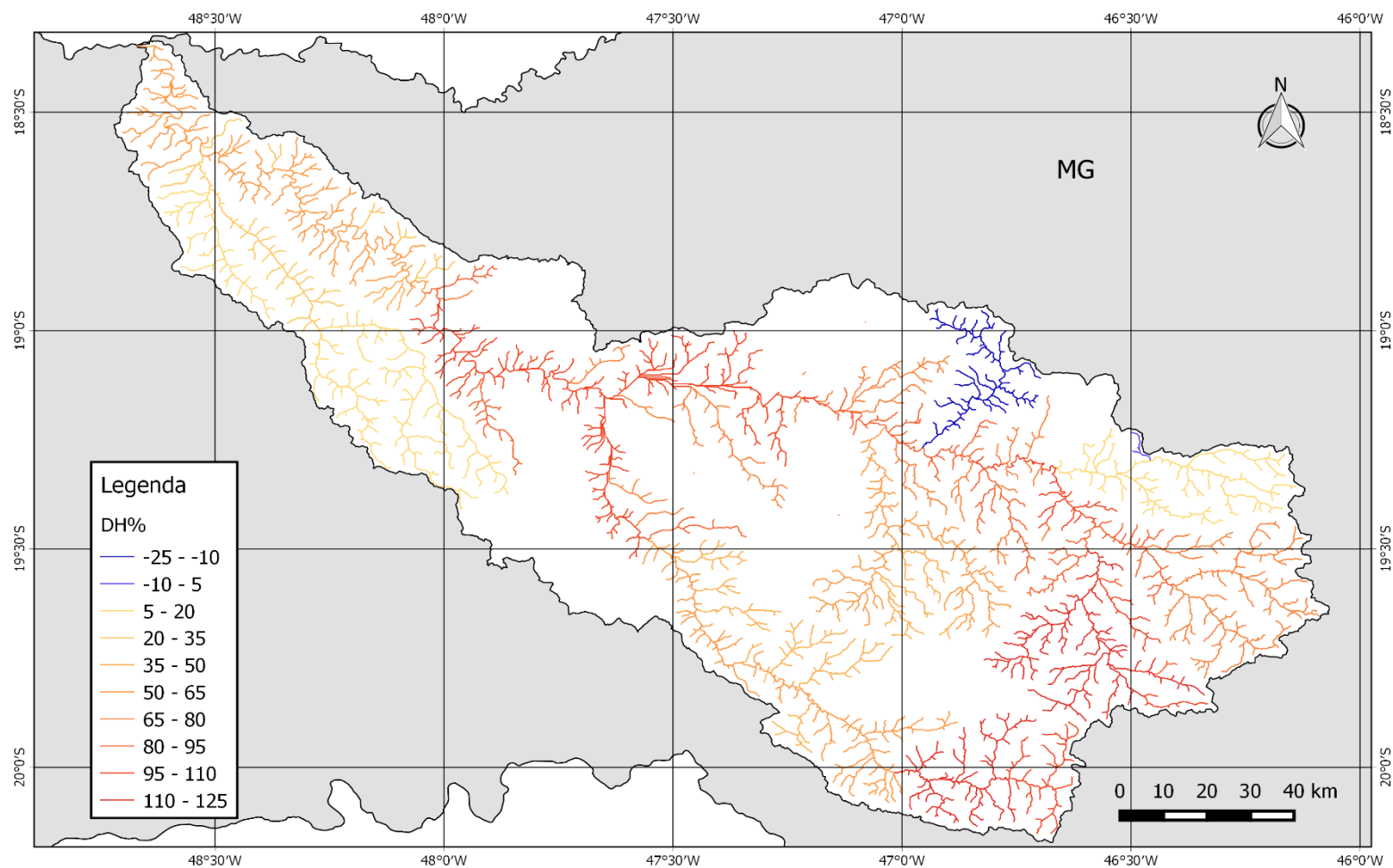
As curvas representadas na Figura 36 são caracterizadas por uma amplitude grande, chegando a um máximo de 179,4% (161% - (-18,4%)) para a série “ $Q_{7,10}$ anual”, mas com uma distribuição contínua ao longo da frequência dos eventos. Também pode-se notar um declínio constante das curvas, sendo aproximadamente linear, com pequenas quedas acentuadas em pontos específicos.

A comparação entre os métodos, tendo como base o período anual, foi a que apresentou os valores mais elevados de DR%, sendo aproximadamente 10% dos trechos com uma diferença superior a 135%, atingindo um máximo de 161%. Entretanto, a série referente a $Q_{7,10}$ com base sazonal seca tem cerca de 60% de seus valores igualando ou superando em pelo menos 5% as demais séries. O valor médio para cada uma das curvas reafirma isto, onde para série “ $Q_{7,10}$ anual” a diferença relativa média foi de 53,15%, sendo para as demais, “ $Q_{7,10}$ seca” e “ $Q_{7,10}$ cheia”, 55,07% e 21,82%, respectivamente.

Os valores de DR% que se aproximam de uma situação ideal, ou seja, igual ou próximos a 0%, ocupam uma faixa pequena na distribuição dos resultados. Tal situação é representada por apenas 5% dos trechos analisados para as séries “ $Q_{7,10}$ anual” e “ $Q_{7,10}$ cheia”. Já série “ $Q_{7,10}$ seca” apresenta uma queda acentuada neste ponto, sendo a menor diferença igual a 15%.

Os trechos de inversão de tendência ocorrem em pontos diferentes ao longo da distribuição de frequência, representada por uma parcela próxima a 25% dos trechos analisados para a série “ $Q_{7,10}$ cheia” e valores próximos para as demais curvas de distribuição, entre 10% e 5%. Os valores negativos de DR% possuem comportamento similar, atingido 45% para os períodos de cheia e entre 20% a 25% para as demais comparações.

O mapa apresentado na Figura 37 representa a hidrografia utilizada na análise comparativa identificando os intervalos de DR%. Optou-se por apresentar apenas a comparação com os resultados mais críticos, já que o comportamento das curvas para cada uma das séries foi similar, sendo este referente à vazão $Q_{7,10}$ baseado no período de seca. De uma forma geral, os maiores valores de DR% ocorreram nos cursos de água principais e próximos aos pontos de monitoramento fluviométricos. As regiões junto às cabeceiras dos rios são as que apresentam as menores diferenças.

Figura 37 – Diferenças relativas entre métodos de cálculo da $Q_{7,10}$ para o período de estiagem

Coordenadas Geográficas Datum: WGS 1984 Fevereiro 2017

Fonte: Autor (2017).

A distribuição dos valores de DR% ao longo da hidrografia apresentados na Figura 37, com diferenças maiores nos cursos de água principais e próximos aos pontos de monitoramento, e menores nas regiões de cabeceira, pode estar relacionada a dois fatores principais. Primeira-mente, a previsão de valores de vazões pelas metodologias apresentadas podem não ser eficientes para grandes áreas de contribuição, pois resulta em um acúmulo de valores estimados. Ou seja, os cursos de água das regiões de cabeceira tem seus valores de vazão calculados pelos métodos propostos, e em seguida são utilizados como valores de entrada nos rios principais, onde são somadas ainda as contribuições estimadas dos afluentes das sub-bacias nas quais estes estão inclusos. O outro fator pode estar relacionado a forma como estas vazões foram estimadas. O método do SisCAH depende, basicamente, dos dados monitorados, e partir deste, são calculadas as $Q_{7,10}$. Assim, os volumes captados por demandas e a regularização de vazões por reservatórios já estão inclusos nos valores monitorados. Comparando com o método da UFV (Equação 15), estas retiradas e regularizações ainda devem ser contabilizadas, o que pode levar a diferenças dada a quantidade e qualidade dos dados disponíveis para este cálculo.

As análises comparam apenas duas das várias metodologias disponíveis para o cálculo da $Q_{7,10}$. Outros estudos avaliaram o impacto de outros métodos utilizados na estimativa do cálculo da vazão de referência $Q_{7,10}$, encontrando valores de DR% da ordem de grandeza entre 1% a 100,67% (MOREIRA & SILVA, 2014; SILVA et al. 2006; LEME & CHAUDHRY, 2005; PINTO et al. 2010; SILVA, MARQUES & LEMOS, 2009; SILVEIRA, MOURA & ANDRADE, 2006).

Além da $Q_{7,10}$, existe uma série de outras formas de cálculo da vazão de referência, tendo como exemplo a variedade utilizada pelos Estados brasileiros em critérios para outorgas de água. Vazões como a Q_{90} e Q_{95} são usuais e adotadas por vários estados, como, por exemplo, Bahia e Paraná respectivamente.

Conforme citado anteriormente, a COPASA (2007) estimou valores de Q_{95} no exutório de cada uma das sub-bacias do rio Araguari (Tabela 2). Assim, a título de curiosidade foi feita uma comparação dos valores Q_{95} obtidos pela COPASA (2007), e das $Q_{7,10}$ pelos métodos analisados nesta pesquisa e discutidos neste item. A Tabela 4 apresenta estes valores. As sub-bacias sem dados na coluna referente a $Q_{7,10}$ calculada por Weibull (SisCAH 1.0) não dispunham de dados monitorados.

As diferenças chegaram a valores extremamente grandes. Os valores de Q_{95} foram, em média, 170% maiores que aqueles estimados pela Equação (15). Esta porcentagem atinge 47% para a comparação com as $Q_{7,10}$ calculadas por Weibull.

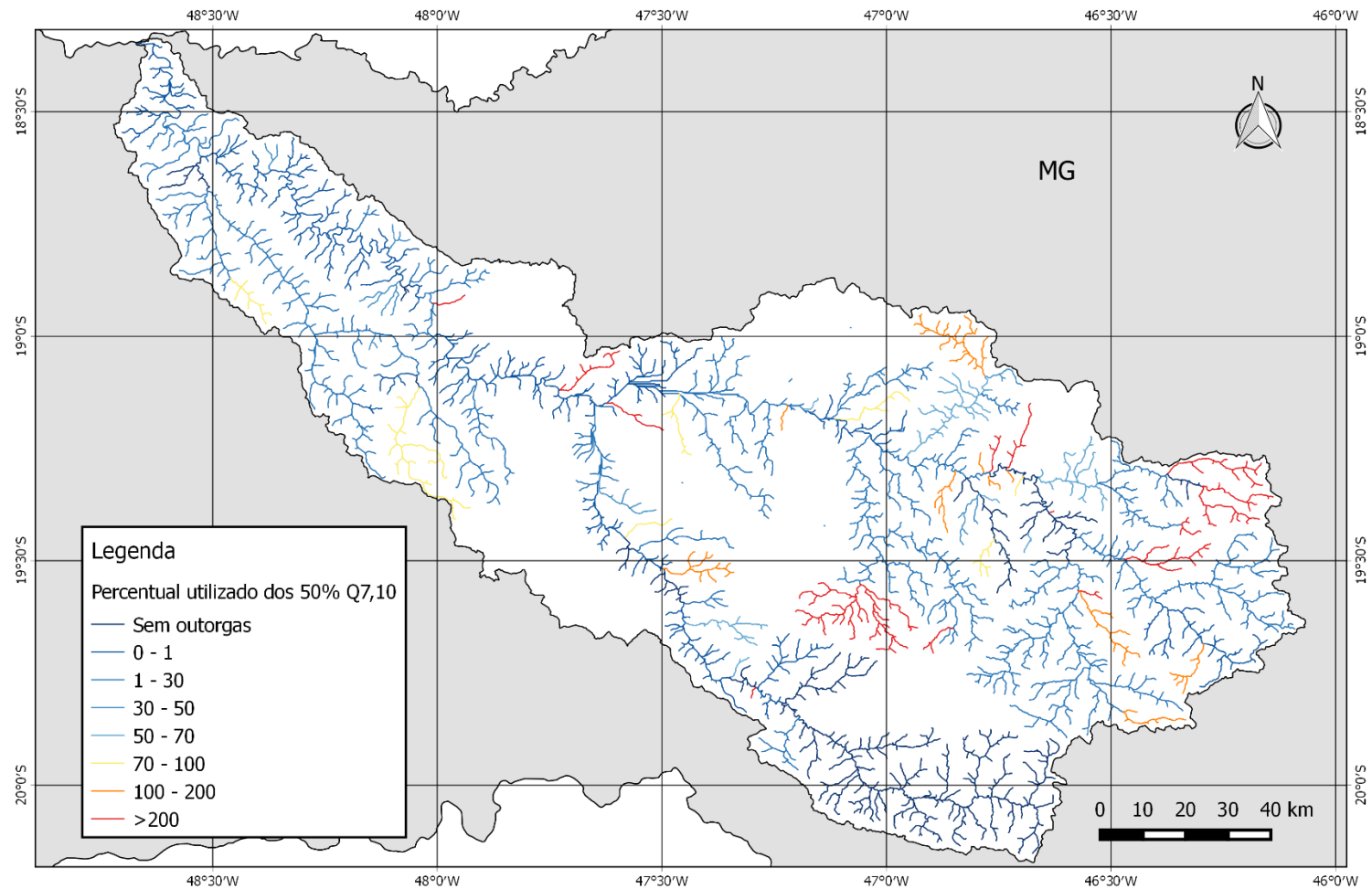
Tabela 4 – Disponibilidades previstas para as sub-bacias do rio Araguari

Sub-bacia	Vazões estimadas pela COPASA	Vazões estimadas neste estudo	
	Modelo de Simulação (COPASA) Q_{95} (L/s)	$Q_{7,10}$ (L/s) Equação (15)	$Q_{7,10}$ (L/s) Weibull (SisCAH 1.0)
Foz do Araguari	121.240,00	46.837,98	94.340,00
Rio Uberabinha	13.600,00	5.426,79	7.276,19
Capim Branco 1 e 2	105.110,00	41.313,00	86.636,87
Médio Araguari	100.750,00	38.237,32	96.694,30
Ribeirão das Furnas	3.000,00	315,25	-
Rio Claro	3.270,00	2.837,63	-
Baixo Quebra-Anzol	61.720,00	22.926,69	55.564,82
Ribeirão Santa Juliana	1.420,00	1.332,97	-
Ribeirão Santo Antônio	5.260,00	2.169,26	-
Alto Araguari	24.870,00	8.678,67	15.810,00
Rio Galheiro	5.190,00	1.958,65	-
Rio Capivara	9.120,00	3.474,34	6.040,00
Ribeirão do Salitre	3.830,00	1.626,79	1.378,27
Ribeirão do Inferno	3.890,00	1.513,40	-
Alto Quebra-Anzol	30.490,00	11.419,37	23.920,00
Ribeirão Grande	1.560,00	692,45	-
Rio São João	4.390,00	2.503,29	2.650,00
Rio Misericórdia	6.390,00	3.598,76	7.310,00

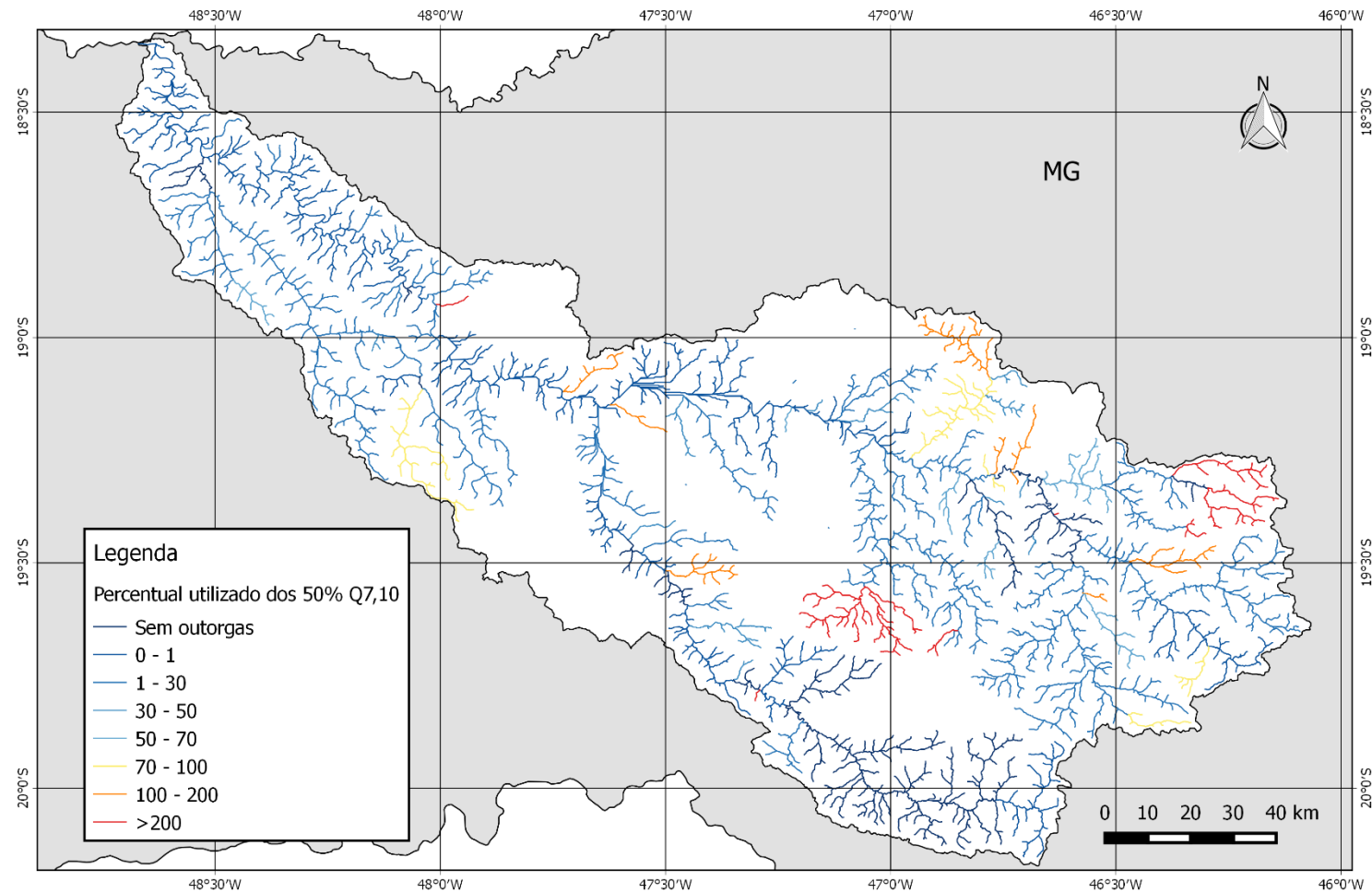
Fonte: Autor (2017).

-Impacto da metodologia de cálculo da $Q_{7,10}$ na disponibilidade hídrica

Uma maneira de demonstrar a importância das diferenças descritas anteriormente foi avaliar o impacto da forma de cálculo da $Q_{7,10}$ na disponibilidade hídrica da bacia. As Figuras 38 e 39 são exemplos desta situação, sendo na primeira apresentados os valores a partir da $Q_{7,10}$ UFV, já a segunda referente a $Q_{7,10}$ SISCAH. A hidrografia apresentada nas Figuras 38 e 39 abrange grande parte da bacia do rio Araguari, mas não toda ela. As áreas não representadas são justificadas pela falta de estações fluviométricas com dados monitorados na região. As situações demonstradas referem-se ao critério de outorga atualmente em vigor para o estado de Minas Gerais, ou seja, 50% da $Q_{7,10}$ com base de cálculo anual.

Figura 38 – Percentual hídrico utilizado baseado na $Q_{7,10}$ calculada pela Equação (15) ($Q_{7,10}$ UFV)

Fonte: Autor (2017).

Figura 39 – Percentual hídrico utilizado baseado na $Q_{7,10}$ calculada pelo método de distribuição de Weibull ($Q_{7,10}$ SISCAH)

Coordenadas Geográficas Datum: WGS 1984 Fevereiro 2017

Fonte: Autor (2017).

Como o regime de vazões e os volumes captados variam no decorrer do ano, optou-se por representar a disponibilidade hídrica no período de seca, voltada especificamente para a situação mensal crítica (mês de Agosto). Nas Figuras 38 e 39, a porcentagem captada frente ao máximo outorgável foi calculada pela Equação (29) e representada segundo a escala de cores descrita no item 3.9.1.

Assim, considerando a $Q_{7,10}$ SISCAH, cerca de aproximadamente 9,7% dos 139 trechos comparados apresentam retiradas acima do máximo permitido. Essa situação se agrava ao se considerar como base de cálculo a $Q_{7,10}$ UFV, onde essa porcentagem sobe para 12,1%, representando um aumento de aproximadamente 25% no número de trechos em situação crítica.

Para as análises nos itens a seguir foi utilizado a Equação (15) no cálculo da $Q_{7,10}$, por causa de dois motivos principais. Primeiramente, em grande parte dos trechos comparados os valores calculados foram os menores encontrados, ou seja, representaria uma situação mais crítica. Em segundo, há regiões onde não é possível aplicar o método de Weibull ou outro método presente na ferramenta SisCAH 1.0 por conta da falta de estações. Sendo assim, optou-se pela utilização de uma metodologia única ao longo da bacia.

4.6.2 Impacto da substituição da $Q_{7,10}$ anual pelas $Q_{7,10}$ sazonais na disponibilidade hídrica na bacia do rio Araguari

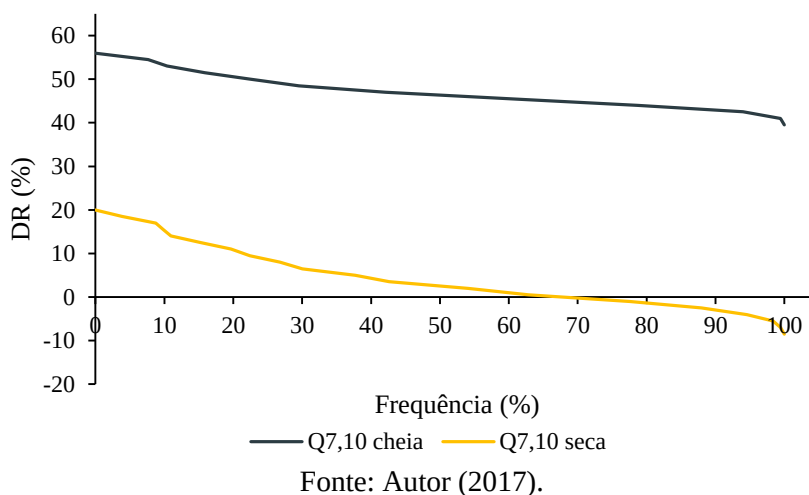
Os resultados apresentados anteriormente mostram a comparação entre métodos de cálculo da $Q_{7,10}$ em si. Neste item será feita uma comparação dos valores encontrados mantendo o método de cálculo da $Q_{7,10}$ e realizando a comparação entre os períodos bases, sendo comparados o anual com os sazonais de cada estação (seca e chuvosa). Como dito anteriormente, foi utilizada a Equação (15) no cálculo da $Q_{7,10}$.

O impacto da substituição da $Q_{7,10}$ anual pelas sazonais foi avaliado por meio de gráficos de diferença relativa entre ambas, além de mapas de disponibilidade hídrica ao longo de toda a hidrografia da bacia do rio Araguari.

Conforme o item 4.5, os resultados foram analisados considerando duas estações pluviométricas (estiagem e chuvosa), e especificamente os meses críticos de cada uma delas, Agosto e Outubro, respectivamente.

A Figura 40 mostra as curvas que relacionam as diferenças relativas (DR%) entre as $Q_{7,10}$ sazonais e a $Q_{7,10}$ anual com a frequência que ocorrem na hidrografia analisada. A série “ $Q_{7,10}$ cheia” refere-se a DR% entre as vazões mínimas calculadas para períodos anuais frente aquelas considerando o período sazonal de cheias, e a série “ $Q_{7,10}$ seca” a DR% entre as $Q_{7,10}$ anuais e aquelas referente as meses mais secos.

Figura 40 – Diferenças relativas (DR%) entre os valores de $Q_{7,10}$ com a frequência de ocorrência

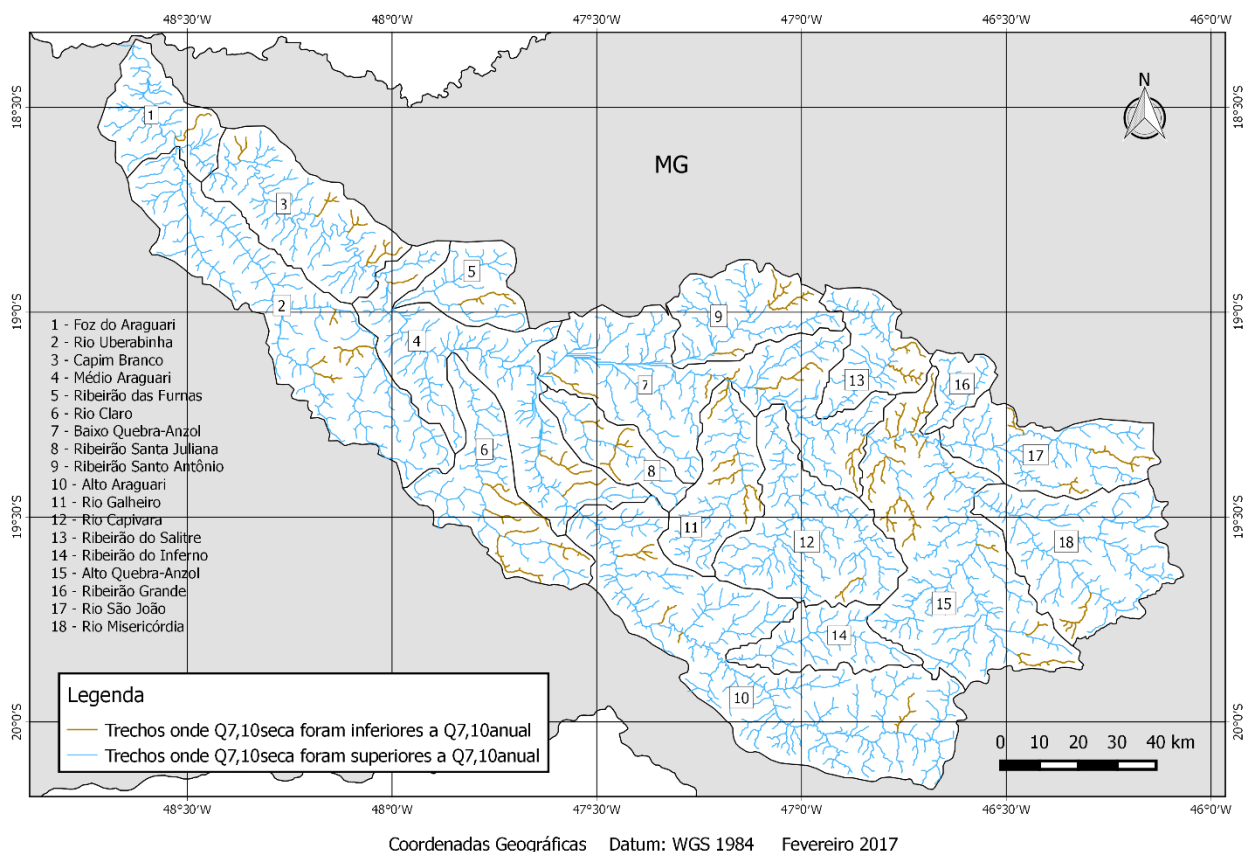


Conforme pode ser observado na Figura 40, as séries apresentam variações consideráveis ao longo dos trechos. Para a série “ $Q_{7,10}$ cheia” observa-se uma tendência progressiva de queda das diferenças entre os métodos comparados conforme o número de trechos analisados aumenta, com uma amplitude próxima a 15%. Além disso, seus valores são mantidos positivos em 100% da hidrografia, sendo sempre superiores a 40% e chegando a um máximo em torno de 55%, com uma média de 47%. Tais resultados revelam o potencial de aumento do aproveitamento hídrico nos períodos de cheia ao se substituir a base de cálculo da vazão de referência de anual para sazonal.

Entretanto, para os demais meses a situação não se mostra tão promissora. A série “ $Q_{7,10}$ seca” também apresenta uma queda progressiva das DR%, sendo aproximadamente 70% dos trechos compostos por valores positivos. Acima deste valor na escala de frequência há um ponto de inversão, mostrando que em quase 30% dos trechos a substituição da $Q_{7,10}$ anual pela $Q_{7,10}$ seca não seria justificável, pois, não proporcionaria aumento na disponibilidade hídrica para captação. Por outro lado, esta parcela aponta para possíveis valores de $Q_{7,10}$ superestimados pelo critério atual (50% da $Q_{7,10}$ anual), colocando em risco os ecossistemas da região.

Nas sub-bacias onde essa situação ocorre, vale destacar as seguintes: sub-bacia do Alto Quebra Anzol, sub-bacia do Rio Claro, além das sub-bacias do Rio Galheiro e Ribeirão Santa Juliana. Nelas os valores das $Q_{7,10}$ sazonal seca dos seus trechos são, em média, 25% menores do que os calculados pelo critério anual (Figura 41).

Figura 41 – Diferença relativa entre $Q_{7,10}$ seca e $Q_{7,10}$ anual



Fonte: Autor (2017).

Apesar disso, o fato da DR% positiva chegar a 20% e não apresentar queda acentuada ao longo de 70% dos trechos analisados demonstra um potencial significativo a ser explorado.

Outros estudos revelaram o aumento do potencial de aproveitamento hídrico após a mudança de critério de cálculo de anual para sazonal, principalmente no período chuvoso (EUCLYDES, FERREIRA & FARIA FILHO, 2006; SILVA, MARQUES & LEMOS, 2011; BOF, 2010), onde o acréscimo variou entre 10% a 379%, e em casos específicos a 2.488% (COSTA, 2015). Além deste grande potencial nos meses de cheias, outros autores também encontraram situações onde a troca de critério não é justificável (FLUMIGNAN et al. 2016; CORDEIRO & MARQUES, 2012;

PRUSKI et al. 2014), onde em meses de estiagem, a base sazonal resultou em vazões com valores até 37% menores, o que gera o questionamento sobre os riscos aos ecossistemas aquáticos causados pelo critério anual.

Vale ressaltar um aspecto referente aos resultados da comparação entre as $Q_{7,10}$ seca e as $Q_{7,10}$ anuais. Considerando que os menores valores de vazão em um determinado ano são encontrados no período de estiagem, seria esperado que as $Q_{7,10}$ para o período sazonal seco resultassem nos mesmo valores estimados considerando um período anual. Entretanto, os resultados apresentados neste estudo e em outros, conforme citado anteriormente, mostram uma situação contrária, com grandes diferenças. Estes resultados podem ser justificados pela metodologia utilizada na estimativa destas vazões. No caso deste trabalho, para o cálculo dos coeficientes da Equação (15) para os meses secos, o método utilizado pela UFV exclui os meses referentes ao período chuvoso (outubro a março), considerando apenas os demais (estiagem), ou seja, de abril a setembro. Entretanto, a estimativa da $Q_{7,10}$ exige um período de análise anual, levando a substituição dos meses excluídos (outubro a março) pelos meses referentes a estiagem (abril a setembro) do próximo ano com dados disponíveis. Assim, a estimativa é feita considerando 12 meses “secos”. Isto pode ser a causa das diferenças encontradas.

Os mapas de disponibilidade para as situações comparadas tiveram como objetivo propiciar uma visão geral das suas condições e a identificação das regiões críticas e promissoras da bacia.

As substituições analisadas, período anual pelos sazonais, na estimativa das $Q_{7,10}$ buscaram propiciar um aumento na disponibilidade visando atender atividades humanas, em grande parte referentes, de certa forma, a aspectos econômicos (consumo industrial e para irrigação). Assim, os resultados positivos foram aqueles que permitiram uma utilização maior da água na bacia do rio Araguaçu para satisfazer estas demandas (irrigação, consumo industrial, abastecimento público). Aspectos ambientais estão inclusos apenas na estimativa da vazão mínima residual, não havendo nenhum estudo aprofundado. Assim, as substituições que favorecem a utilização para atividades humanas não são, necessariamente, favoráveis a preservação ambiental.

Considerando o critério de outorga atual (50% da $Q_{7,10}$ anual), a situação na bacia é, em grande parte confortável. As Figura 42 e 43 mostram, respectivamente, a disponibilidade hídrica para os meses críticos das estações chuvosa e seca, conforme o item 4.5. A disponibilidade foi calculada

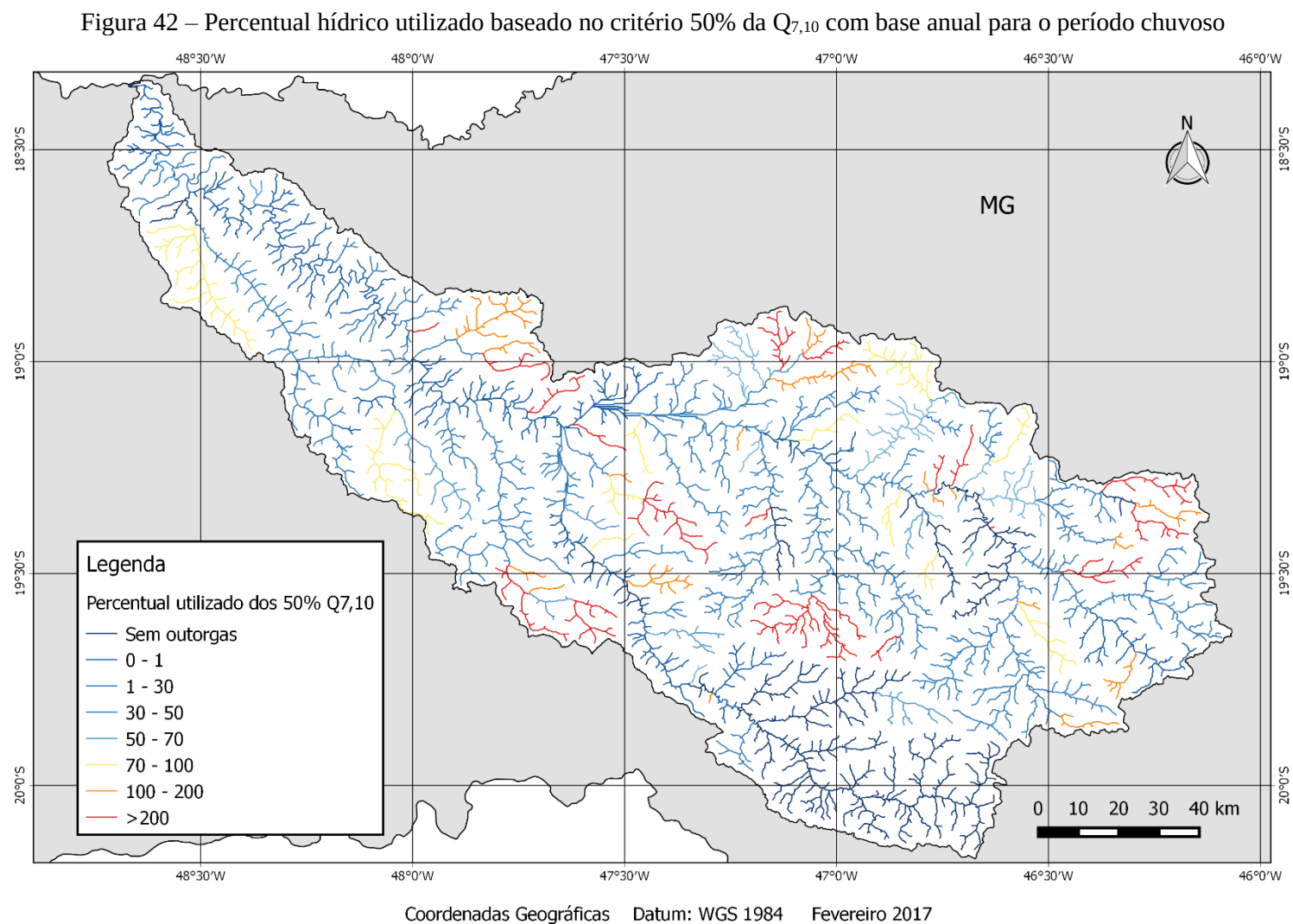
de acordo com a Equação (31) e classificada de acordo com a escala de cores proposta no item 3.9.1.

As áreas com outorgas que captam até 50% do permitido ocupam grande parte da área da bacia, cerca de aproximadamente 60% para ambos os períodos do ano. Estas regiões são aquelas próximas aos rios principais, rio Araguari e Quebra-Anzol, já que estes drenam o maior volume da bacia. Em torno de 10% da hidrografia permanece com captações entre 50% e o máximo outorgável.

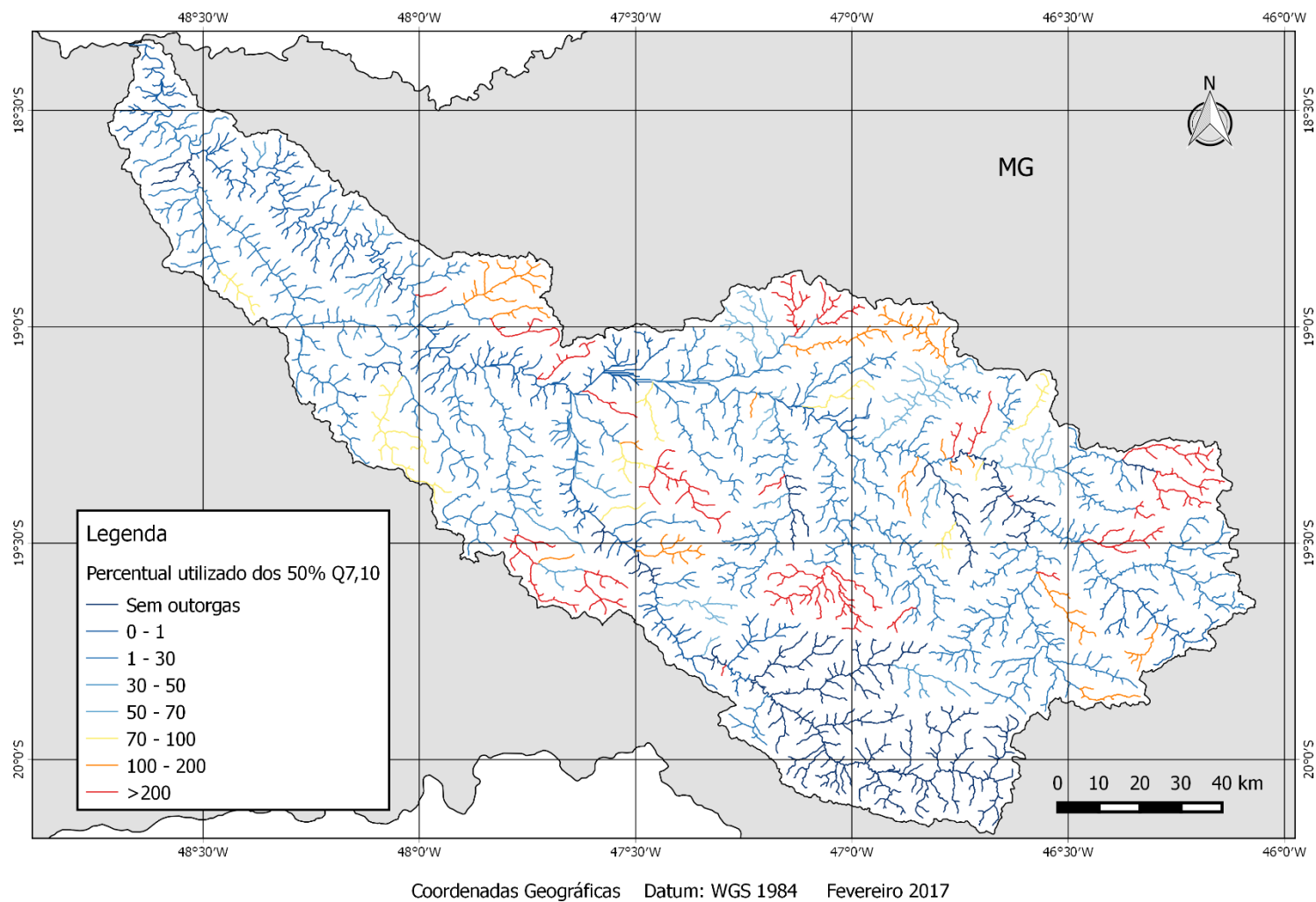
As regiões de cabeceiras são onde ocorrem as situações mais críticas, onde chegam a mais de 200% do permitido. Cerca de 14% da área da bacia apresenta cursos de água com captações acima de 50% da $Q_{7,10}$ nos meses chuvosos. Esta porcentagem sobe para 16% no período de estiagem. Se comparada com as demais situações pode ser considerada uma parcela pequena da bacia, mas equivale a uma área de aproximadamente 3700 km².

As sub-bacias mais afetadas são: Ribeirão Santo Antônio, Ribeirão Santa Juliana e Ribeirão Furnas, onde, respectivamente, 50%, 60% e 84% das suas áreas captam volumes acima do determinado pelo IGAM. Nestas regiões as principais demandas são basicamente com irrigação, sendo, em média 5.83 hm³/mês na sub-bacia do Ribeirão Santa Juliana, 4.42hm³/mês na sub-bacia do Ribeirão Furnas e 3.58hm³/mês na sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio.

A transição entre as estações consideradas, do período chuvoso para o de estiagem, leva a um aumento de 14% nos trechos em que o volume outorgado ultrapassa o máximo permitido. Uma vez que a $Q_{7,10}$ é a mesma durante todo o ano, tal situação é previsível, já que durante a seca os volumes destinados a irrigação aumentam.



Fonte: Autor (2017).

Figura 43 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 50% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco

Fonte: Autor (2017).

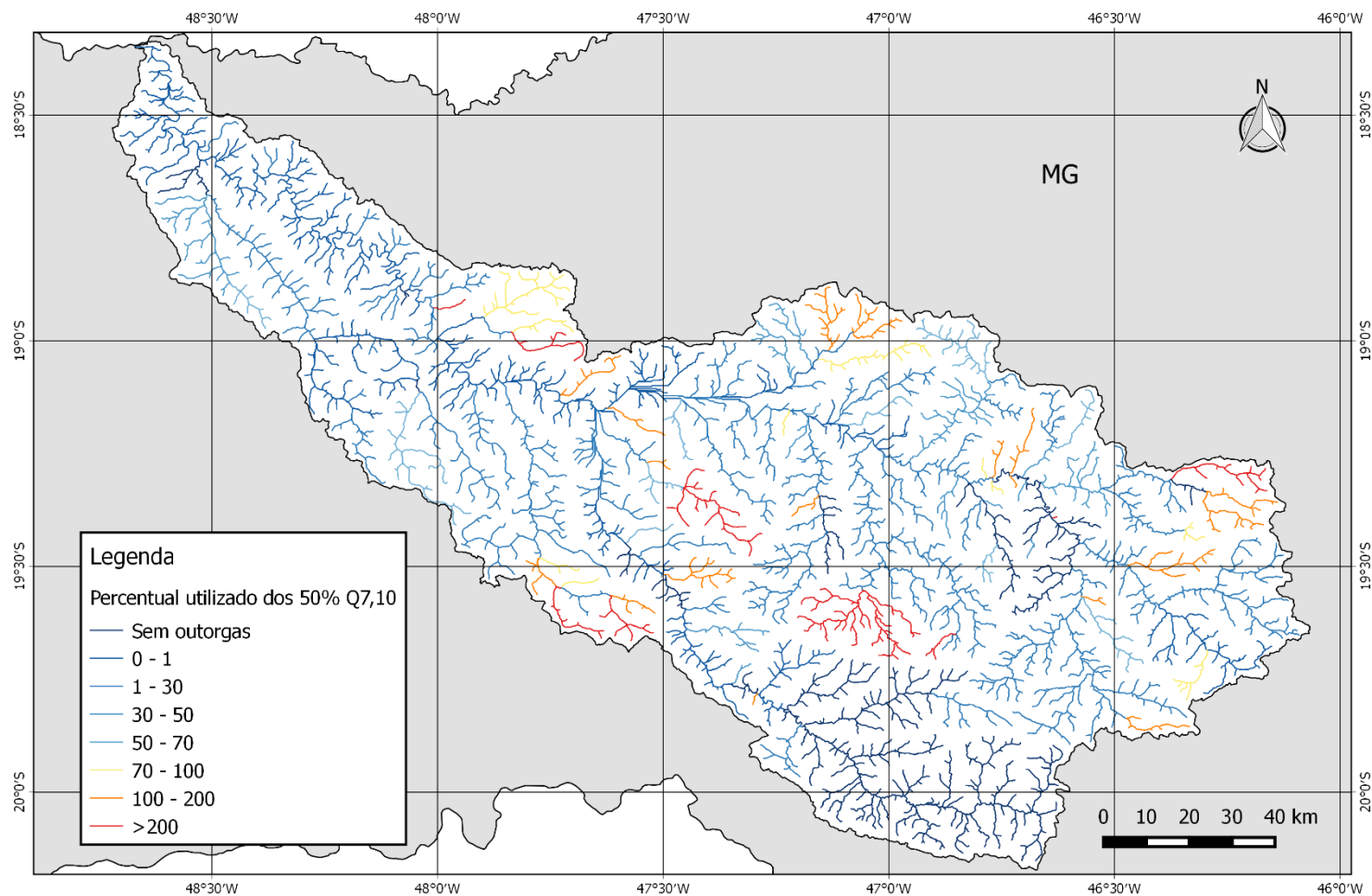
As Figuras 44 e 45 referem-se à disponibilidade hídrica para os meses críticos das estações chuvosa e seca, considerando a $Q_{7,10}$ baseada nos seus respectivos períodos sazonais, para os meses com maior retirada. Há um aumento nas regiões, em acordo com a legislação, onde pelo menos 73% da bacia apresenta outorgas que somam volumes menores que 50% da $Q_{7,10}$ nos meses de outubro a março. Para os demais meses do ano esta parcela diminui, mas permanece sendo a maioria, chegando a 68%.

No que diz respeito à disponibilidade e potencial de aproveitamento hídrico dos trechos considerados, os resultados mostram que cerca de 90% deles não chegam a captar metade do máximo permitido, um aumento de 20% aproximadamente em relação ao critério atual (50% da $Q_{7,10}$ anual). Novamente estes percentuais ocorrem principalmente em torno dos rios principais, levando as regiões de cabeceira a apresentarem as situações mais críticas. Entretanto, há uma diminuição das áreas acima de 100% da vazão de referência (ver Figuras 44 e 45).

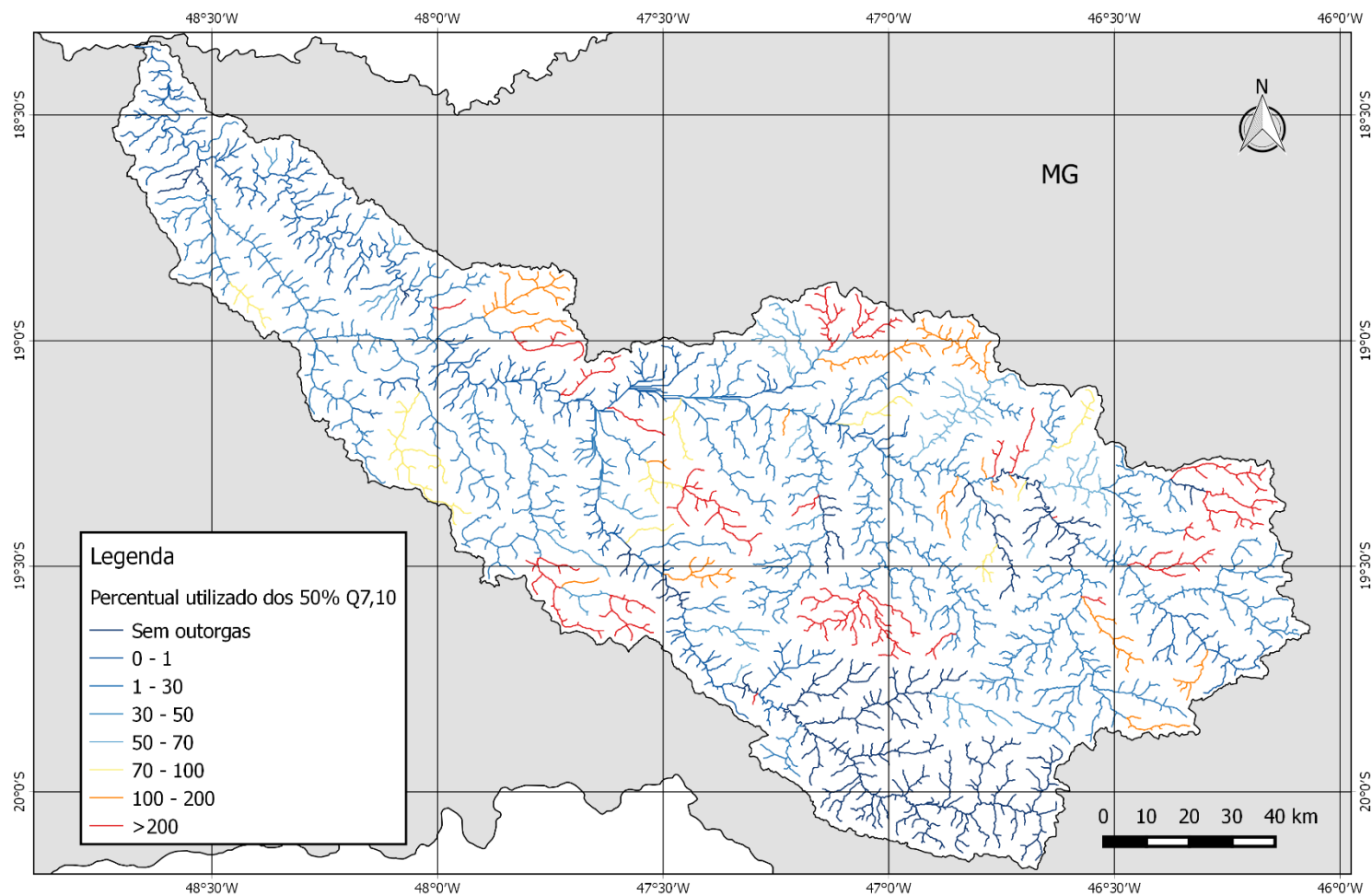
A substituição da $Q_{7,10}$ anual pela $Q_{7,10}$ cheia gerou resultados significativos. Para as situações extremamente críticas, onde as demandas superam o dobro do permitido, o número de trechos apresentou uma diminuição de 42%. Esta mudança ainda permitiu adequar a porcentagem exigida pelo IGAM em aproximadamente 36% da hidrografia analisada. Como consequência houve um aumento do número de trechos enquadrados nos primeiros níveis dos intervalos de classificação. A transição mais significativa foi referente a situação onde volume retirado está entre 30 e 50%, sendo um crescimento de 58% nos cursos nela inseridos. Também vale citar que aproximadamente 15% da hidrografia da bacia apresentava um grande potencial de exploração do uso da água, ficando abaixo de 1% do permitido. Com a mudança de critério esta porcentagem passou a ser 19%, representando um aumento de 21%.

Estes resultados mostram que a mudança de base de cálculo anual para sazonal é pertinente e representa aumentos significativos na disponibilidade, evidenciando o potencial que pode ser aproveitado durante o período chuvoso.

Vale ressaltar que a proposta de utilização da $Q_{7,10}$ cheia nos meses de outubro a abril busca, principalmente, ampliar a captação visando o armazenamento de água para o período de estiagem, uma vez que maiores demandas são com irrigação.

Figura 44 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 50% da $Q_{7,10}$ com base sazonal para o período chuvoso

Fonte: Autor (2017).

Figura 45 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 50% da $Q_{7,10}$ com base sazonal para o período seco

Fonte: Autor (2017).

Já para a estação de estiagem a situação não é tão promissora. Pela Figura 45, referente à hidrografia para o mês crítico (Agosto), segundo o critério $Q_{7,10}$ seca, nota-se que não existem diferenças significativas em relação à Figura 43. Este fato pode ser justificado considerando dois fatores.

Primeiramente, conforme a série “ $Q_{7,10}$ seca” da Figura 40, nem todos os trechos apresentam um aumento no potencial, sugerindo que 30% dos cursos (representado pelo intervalo de 70% a 100% na abscissa – Figura 40) podem estar com a vazão de referência subestimada. Em segundo lugar, estes trechos com vazões subestimadas apresentam uma amplitude baixa (em torno de 10%), o que caracteriza valores de vazões próximas obtidas pelos critérios anual e sazonal seco. Da mesma forma, parte dos 70% dos trechos onde a vazão sazonal seca é maior que a anual (representado pelo intervalo de 20% a 70% na abscissa – Figura 40) também apresentam uma amplitude baixa (igual a 10%).

Os dois fatores citados anteriormente podem justificar o fato de grande parte da hidrografia apresentada em cada uma das figuras 43 e 45 terem classificações iguais (item 3.9.1). Assim, não houve impacto significativo na disponibilidade hídrica após a mudança de critério de anual para sazonal no período seco, pois 30% dos trechos tiveram valores menores de vazões e em 80% dos trechos a diferença relativa máxima foi de 10%.

Entretanto, a série “ $Q_{7,10}$ seca” mostra que em 20% dos trechos há a possibilidade de aumentar significativamente o aproveitamento hídrico.

Estas diferenças refletem, principalmente, na parcela de cursos de água com demandas que consomem entre 50% e 100% da vazão de referência. Com a mudança da $Q_{7,10}$ anual para a $Q_{7,10}$ sazonal seca, a área da bacia se encontra nesta situação passa a ser apenas 7%, cerca de 1540 km². Isto representa uma diminuição de 13% nas áreas com outorgas entre 50% e 100% do permitido. Estas passam a ter volumes captados com valores máximos a 50% do permitido.

As análises mostram que a mudança do critério anual para sazonal representaria um grande aumento no potencial de aproveitamento hídrico, principalmente no período chuvoso. Juntamente, as comparações feitas apontaram regiões críticas que devem ser estudadas mais profundamente, focando naquelas onde a $Q_{7,10}$ sazonal apresenta valores menores que a anual.

4.6.3 Impacto da mudança do percentual máximo outorgável da $Q_{7,10}$ anual na disponibilidade hídrica na bacia do rio Araguari

De acordo com as Figura 42 e 43, a situação atual apresenta uma série de regiões com vazões outorgadas acima do permitido, levando teoricamente a conflitos e falta de água em períodos críticos. Tal fato incentivou a análise de critérios mais permissivos.

Assim como avaliou-se mudança no critério anual para sazonal, agora são mostrados os impactos na mudança do percentual máximo da $Q_{7,10}$ permitido para captação. São apresentadas as alterações na disponibilidade hídrica ao longo da bacia em função dos percentuais de 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da $Q_{7,10}$ com base anual.

Os resultados são mostrados para o mês crítico das duas estações principais que regem o regime fluviométrico, ou seja, chuvoso e estiagem. Conforme dito anteriormente, tal adoção é feita considerando as demandas nestes períodos, sendo maiores na estiagem por conta de consumos com irrigação. Os mapas dos volumes captados frente ao máximo permitidos são mostrados na Figura 46 a 55. São apresentados os meses críticos sazonais para cada uma das porcentagens testadas, ou seja, agosto para o período de estiagem e outubro para o período chuvoso, conforme item 4.5. A escala de cores utilizada na classificação refere-se a proposta no item 3.9.1.

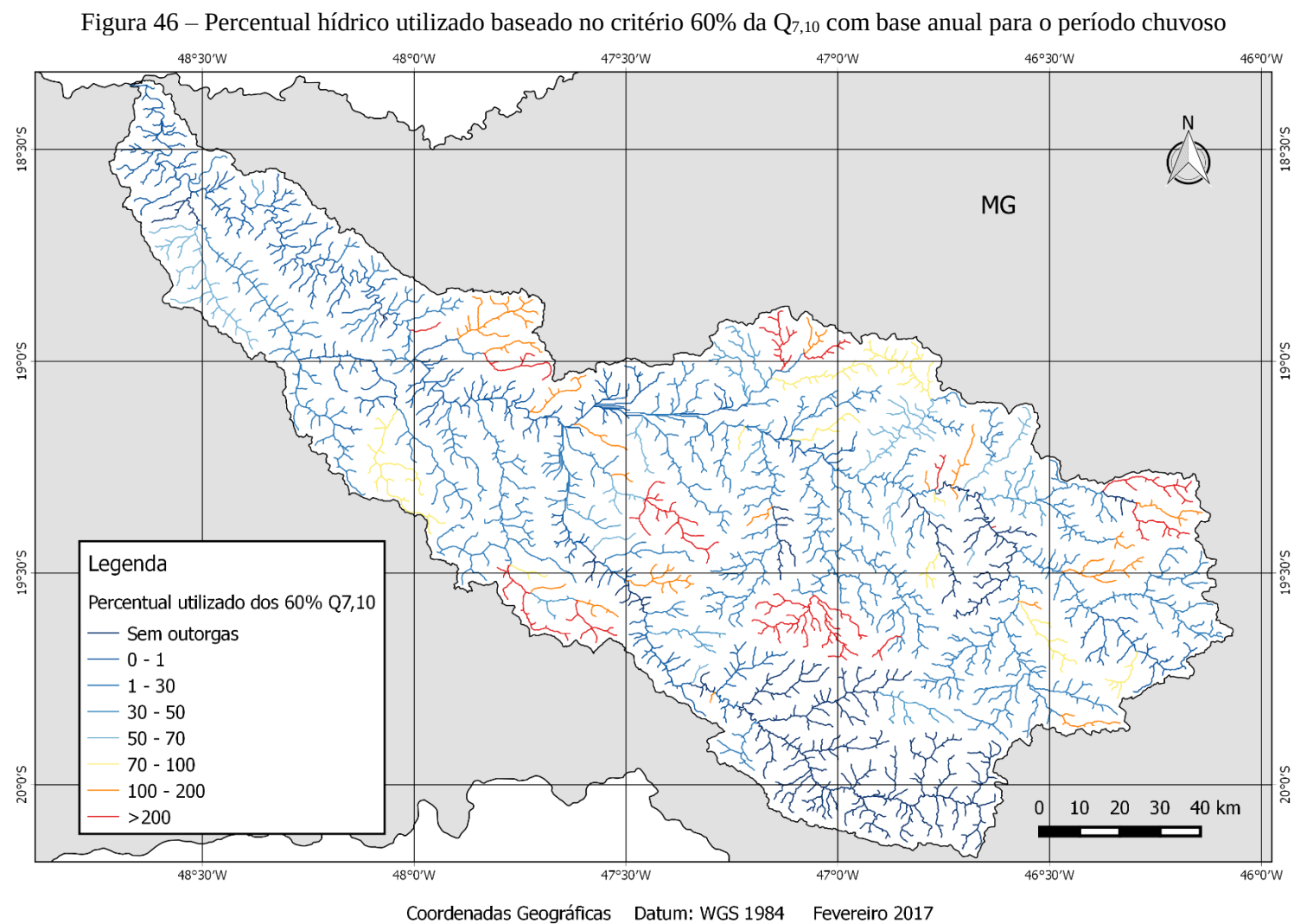
Para a primeira mudança, de 50% para 60% da $Q_{7,10}$, o percentual da bacia hidrográfica que respeita a legislação vigente é de 86,8% para os meses de cheia e 85,6% para seca, ou seja, para a pior das situações, grande parte da hidrografia está em acordo com a vazão de referência (Figuras 46 e 47). Entretanto, o mais importante é o impacto desta mudança naqueles cursos de água que excedem o máximo outorgável. Na pior das situações esta parcela equivale a 14,4 % da hidrografia da bacia, uma diminuição de 13% em relação ao critério atualmente em vigor (50% da $Q_{7,10}$ anual). Para os meses chuvosos esta diminuição é menor, cerca de 10%, mas representa um pouco mais de 2200 km² da bacia do Araguari. Os demais critérios analisados apresentaram percentuais próximos aos descritos anteriormente. A Tabela 5 mostra as porcentagens da área da bacia do rio Araguari onde o volume captado é menor que o limite permitido, e aquelas onde este limite é ultrapassado, considerando cada um dos critérios analisados.

Tabela 5– Porcentagens da área da bacia do rio Araguari de acordo com o volume captado para cada um dos critérios analisados

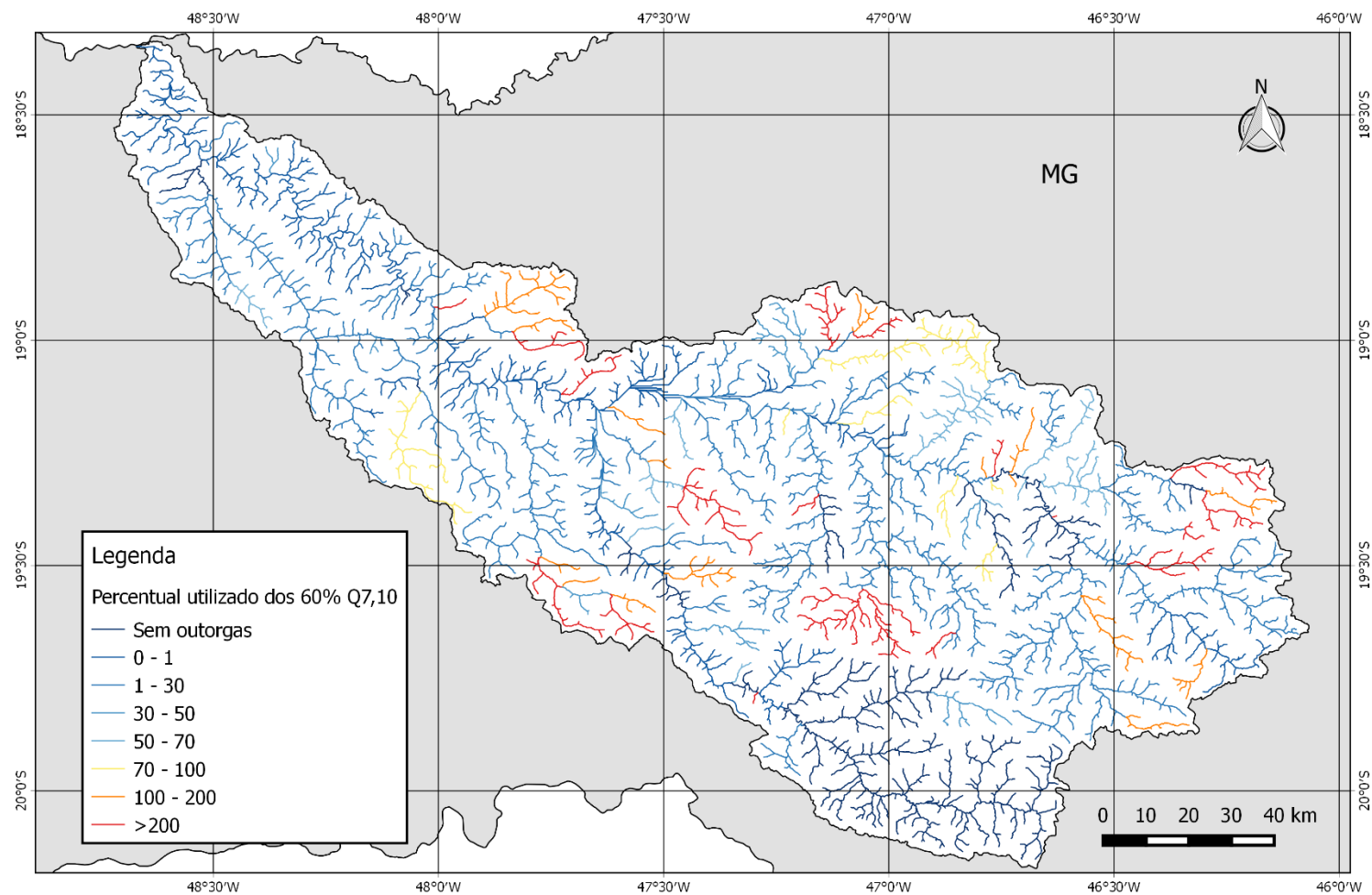
Máximo permitido	50% da $Q_{7,10}$		60% da $Q_{7,10}$		70% da $Q_{7,10}$		80% da $Q_{7,10}$		90% da $Q_{7,10}$		100% da $Q_{7,10}$	
Estações	Seca	Chuvosa	Seca	Chuvosa	Seca	Chuvosa	Seca	Chuvosa	Seca	Chuvosa	Seca	Chuvosa
De 0 a 100% do máximo permitido	85,3%	83,4%	86,8%	85,6%	88,5%	87,5%	88,7%	88,0%	89,6%	88,8%	90,6%	89,5%
Superior a 100% do máximo permitido	14,6%	16,5%	13,2%	14,4%	11,5%	12,6%	11,3%	12,0%	10,4%	11,2%	9,4%	10,5%

Fonte: Autor (2017).

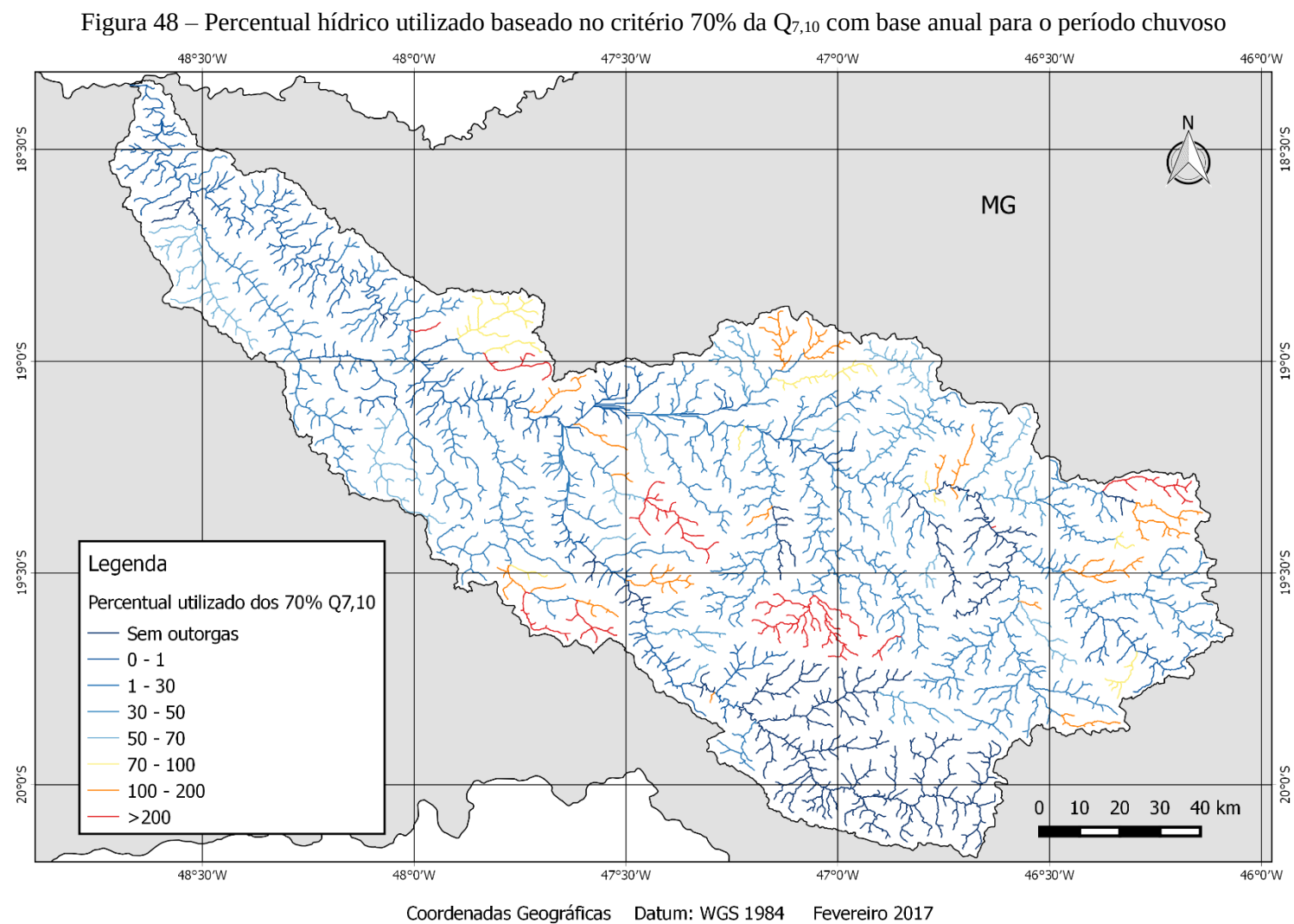
O fato de se aumentar a porcentagem outorgável da $Q_{7,10}$ leva à previsão de certa diminuição dos pontos críticos e aumento da disponibilidade hídrica de uma forma geral na bacia. As Figuras 48 a 55 mostram a disponibilidade hídrica para as porcentagens de 70%, 80%, 90% e 100% da $Q_{7,10}$ nos períodos chuvosos e secos.



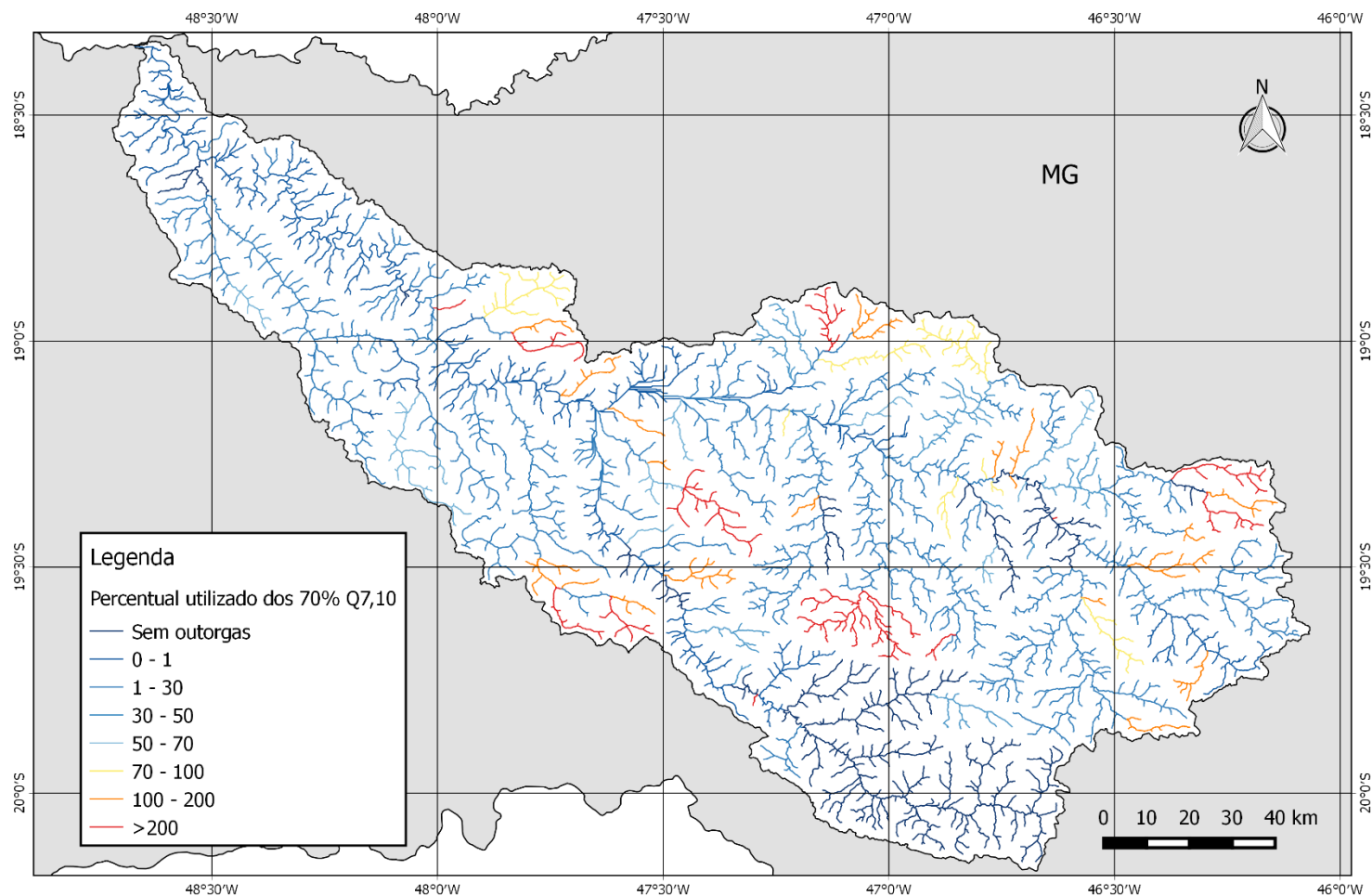
Fonte: Autor (2017).

Figura 47 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 60% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco

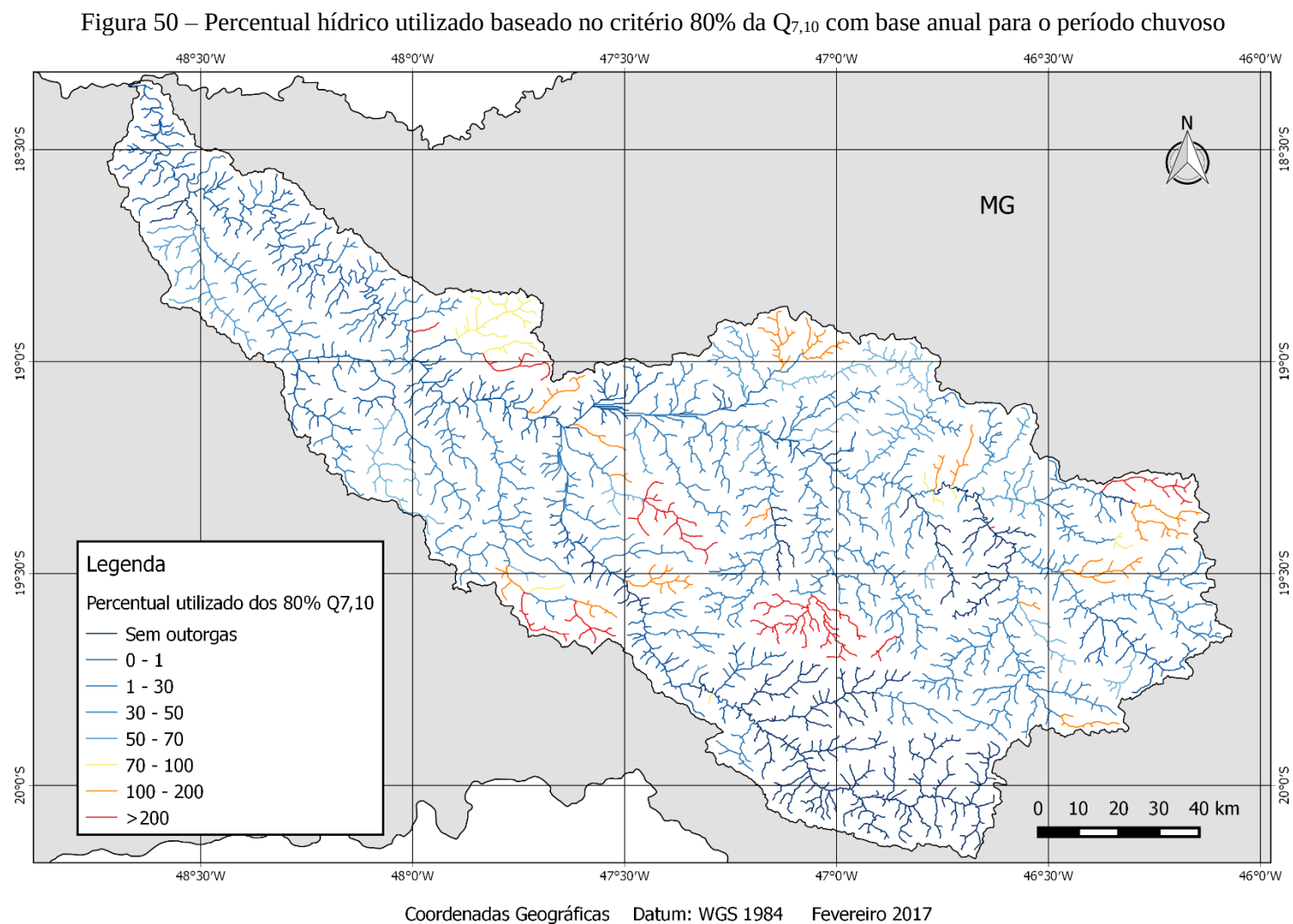
Fonte: Autor (2017).



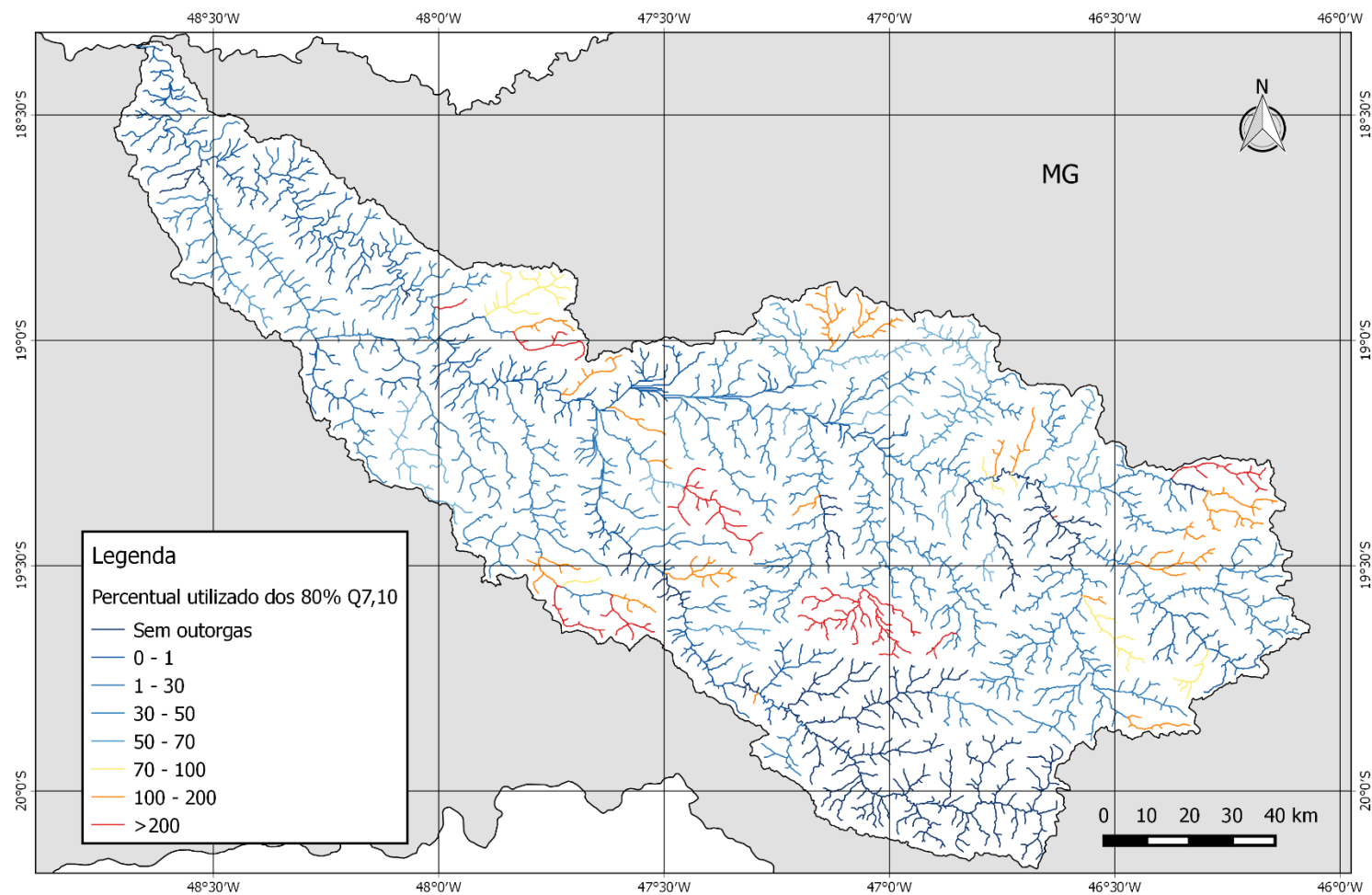
Fonte: Autor (2017).

Figura 49 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 70% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco

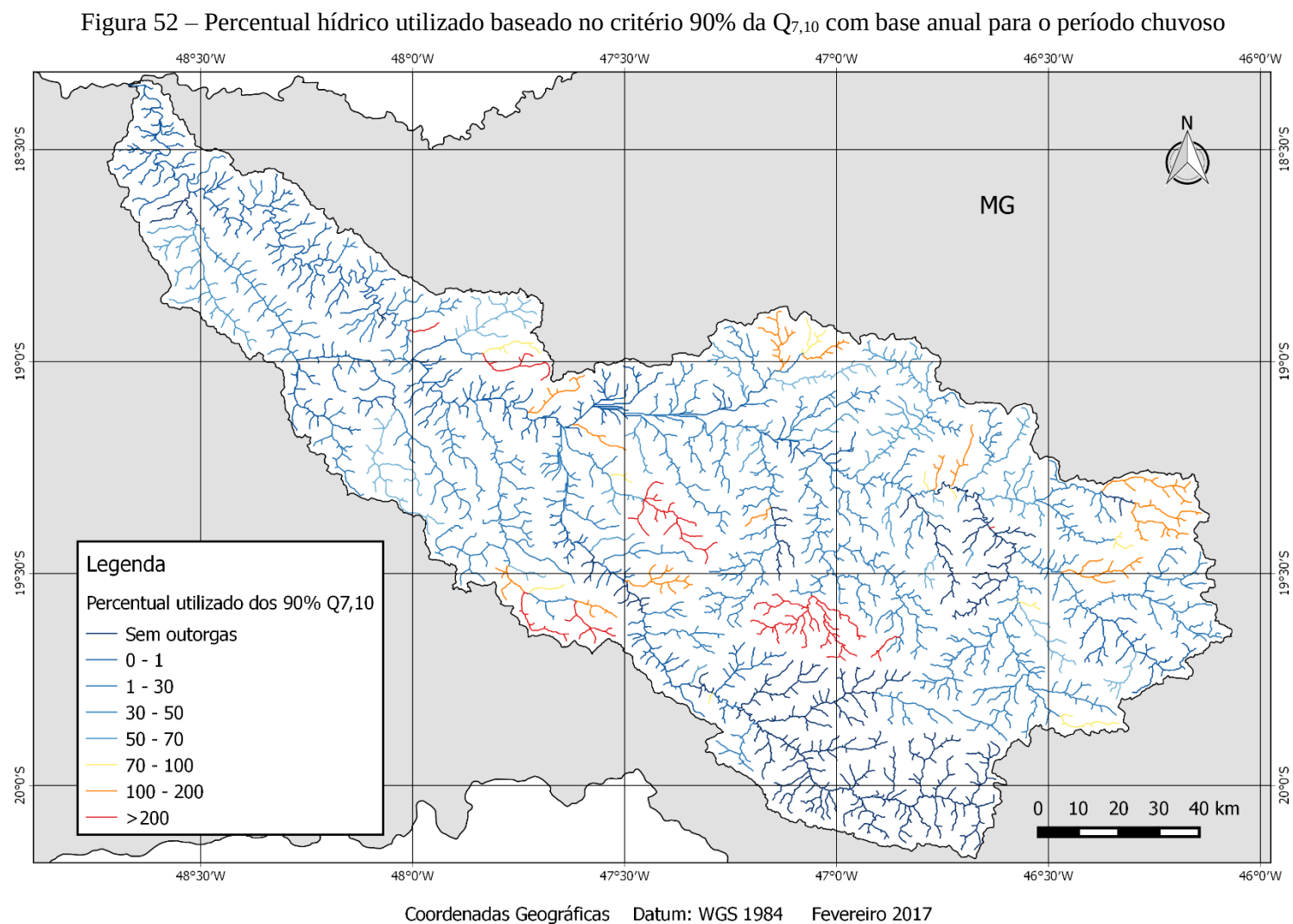
Fonte: Autor (2017).



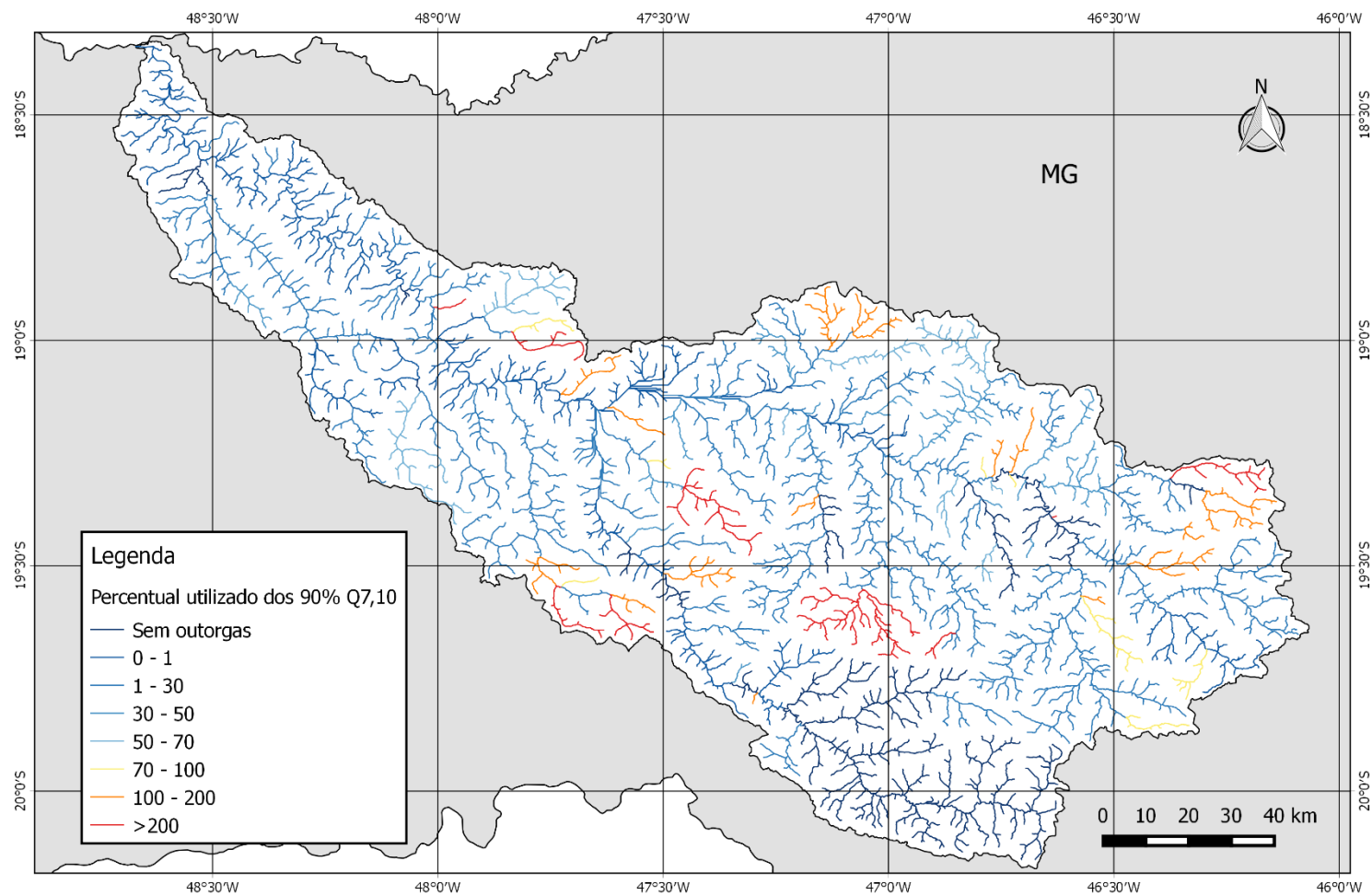
Fonte: Autor (2017).

Figura 51 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 80% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco

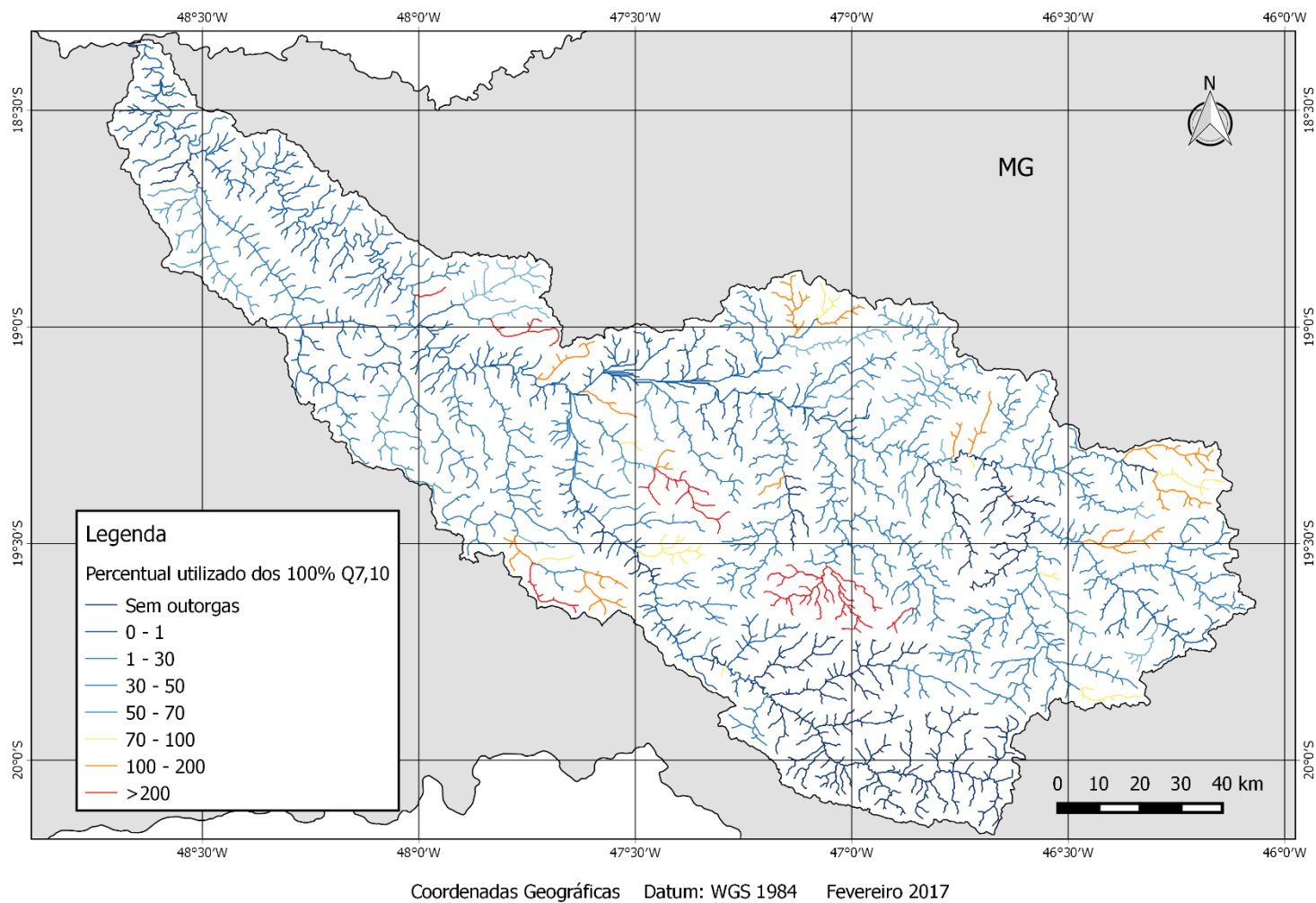
Fonte: Autor (2017).



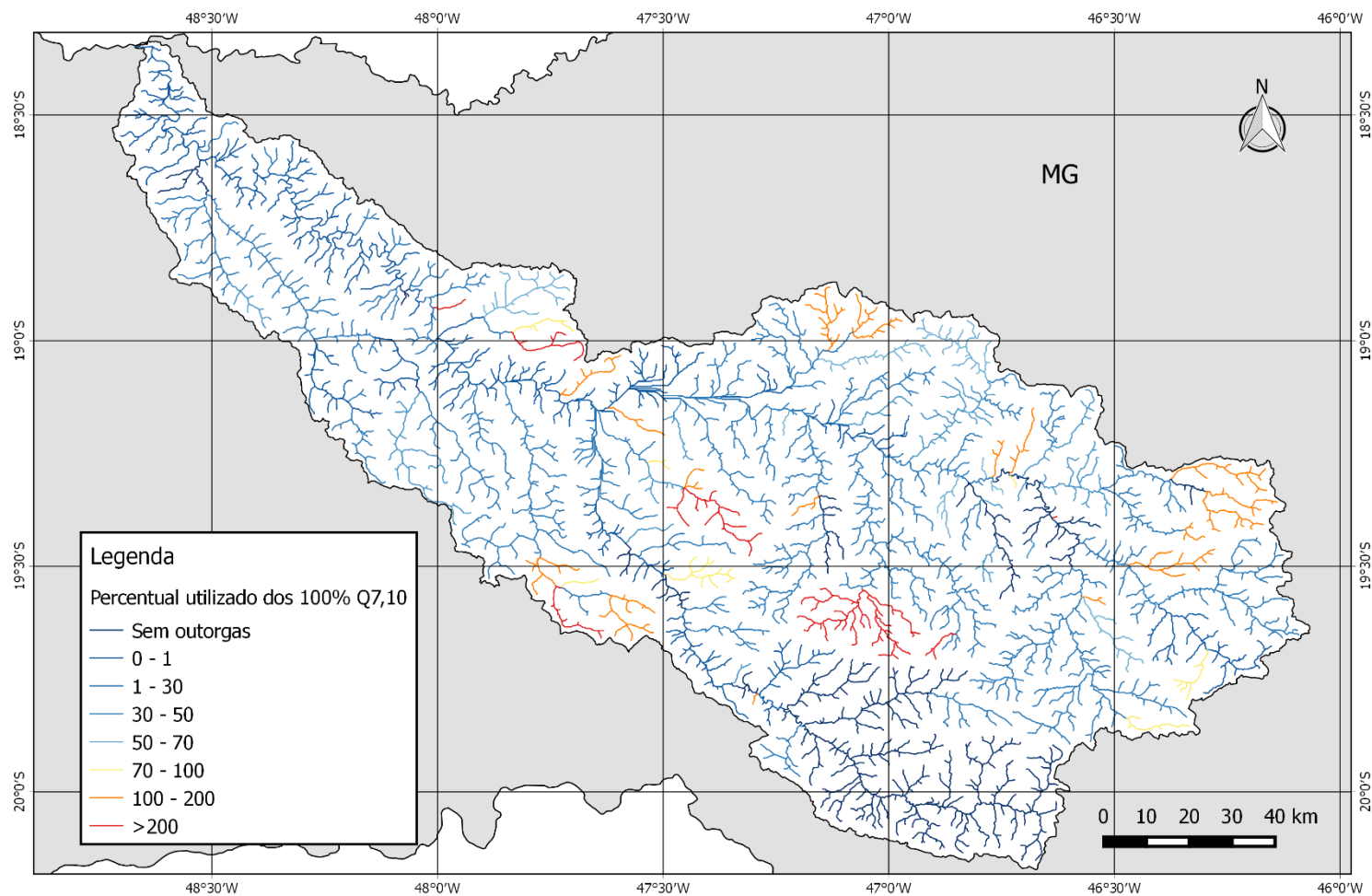
Fonte: Autor (2017).

Figura 53 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 90% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco

Fonte: Autor (2017).

Figura 54 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 100% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período chuvoso

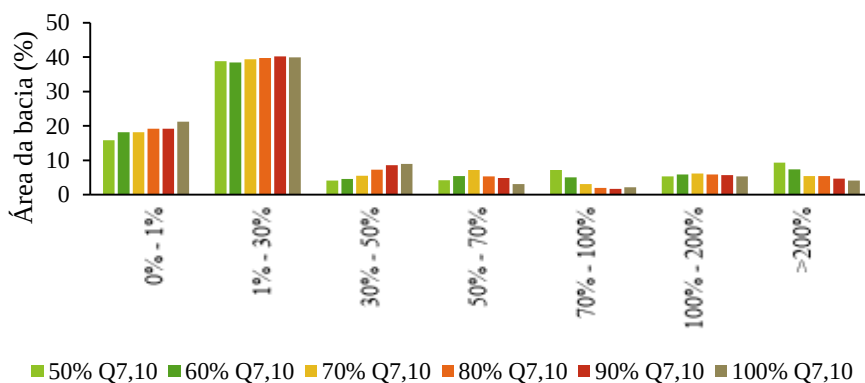
Fonte: Autor (2017).

Figura 55 – Percentual hídrico utilizado baseado no critério 100% da $Q_{7,10}$ com base anual para o período seco

Fonte: Autor (2017).

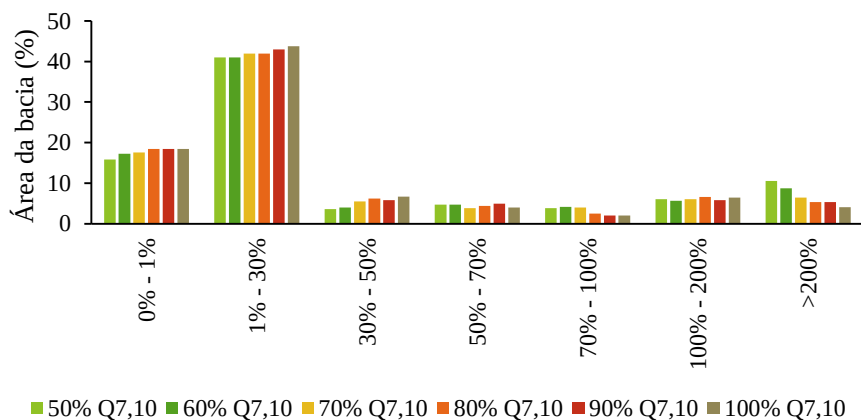
As Figuras 56 e 57 demonstram as porcentagens da área da bacia referentes a cada um dos intervalos da classificação de cores proposta, respectivamente para o período chuvoso e seco. As distribuições para ambos os períodos apresentam comportamento similar, com 40% em média da área hidrográfica da bacia com volumes outorgados entre 1% e 30%, conforme os mapas apresentados e evidenciando a situação da disponibilidade hídrica como satisfatória em grande parte da hidrografia.

Figura 56 – Porcentagem da área da bacia referente a cada intervalo da classificação no período chuvoso



Fonte: Autor (2017).

Figura 57 – Porcentagem da área da bacia referente a cada intervalo da classificação no período seco



Fonte: Autor (2017).

Como previsto, os 3 primeiros intervalos de classificação (0% a 1%, 1% a 30% e 30% a 50%) incorporam uma quantidade maior de área ao se alterar o critério vigente, caracterizado pelo crescimento no tamanho das respectivas colunas nos gráficos. A adoção das porcentagens de Q7,10 leva a um aumento de 4,5% em média na área da bacia para os três primeiros intervalos de classificação.

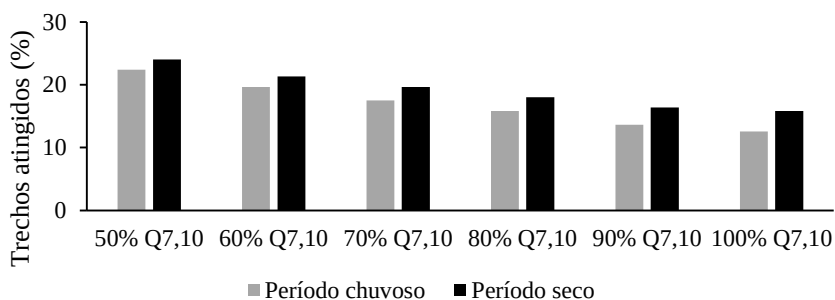
Os demais intervalos de classificação utilizados apresentam comportamentos irregulares por conta da transição no enquadramento dos trechos que fariam parte do intervalo do “nível” acima. Entretanto, a tendência geral é de diminuição das áreas compreendidas entre as parcelas de 50% a 70% e entre 70% e 100%, justificando o aumento nos intervalos inferiores e evidenciando o potencial hídrico a ser explorado.

Sendo o principal objetivo desta pesquisa avaliar critérios que solucionariam os conflitos pelo uso da água, foi dada uma atenção maior à parcela da bacia hidrográfica com demandas acima do máximo permitido.

Sua distribuição depende dos trechos que deixaram a situação mais crítica, acima de 200%. Neste último intervalo os valores apresentam uma queda acentuada no início da mudança de critérios e mais constantes para percentuais maiores (ver as Figuras 56 e 57). Isto justifica o fato das áreas com volumes outorgados entre 100% e 200% oscilarem, não apresentando uma tendência à medida que os percentuais da $Q_{7,10}$ são aumentados (50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da $Q_{7,10}$).

Entretanto, de uma forma geral, há uma redução no percentual de trechos com outorgas acima do máximo permitido. A Figura 58 evidencia isto, onde são apresentados os percentuais dos trechos acima do volume máximo permitido de captação (100% - 200% e > 200%), para cada um dos cenários nos dois períodos sazonais. Para a situação atual, nos meses críticos de cheia, 22% dos trechos analisados apresentam esta inadequação, reduzindo para 12% para outorgas máximas iguais a $Q_{7,10}$.

Figura 58 – Porcentagem dos trechos da topologia da bacia acima da volume máximo permitido de captação para cada cenário



Fonte: Autor (2017).

Em média, há uma redução de aproximadamente 9,5% na mudança de uma porcentagem da $Q_{7,10}$ para outra. Por exemplo, ao se adotar o percentual máximo de retirada da vazão de referência de 50% para 60%, ocorre uma redução próxima de 9,5% dos trechos atingidos.

As regiões acima do valor máximo outorgável continuam sendo aquelas localizadas nas cabeceiras, mas com esperadas melhoras (Figuras 46 a 55). Assim, vale destacar as sub-bacias do Ribeirão Santo Antônio, Ribeirão Santa Juliana e Ribeirão Furnas, onde houve a possibilidade de se aumentar a disponibilidade e adequar as outorgas à legislação vigente (Figura 41).

Com o percentual de 60% da $Q_{7,10}$, a sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio tem 36% de sua área ajustada ao máximo outorgável permitido no período seco e chuvoso. As demais alterações não mudaram a classificação do restante da hidrografia, permanecendo ainda com 32% de sua hidrografia com demandas acima de 100%.

A sub-bacia do Ribeirão Furnas não apresentou alterações para o critério de 60%, para a classificação proposta no item 3.9.1 (0% a 1%, 1% a 30%, 30% a 50%, 50% a 70%, 70% a 100%, 100% a 200% e >200%). No período de cheia, 74% da hidrografia com demandas acima de 100% do permitido passam a se adequar adotando 70% da $Q_{7,10}$ como máximo captável. Os demais percentuais não alteram a situação do restante da bacia, sendo 21% desta ainda em estado crítico. Para o período de estiagem as alterações são menores, sendo uma diminuição de 59% considerando como critério 70% da vazão de referência. A melhor adequação é obtida apenas adotando 100% da $Q_{7,10}$, chegando a uma redução de 74%.

Para a sub-bacia do Ribeirão Santa Juliana, os avanços são significativamente menores. Apenas ao se considerar o critério de 90% da $Q_{7,10}$ é que ocorrem alterações de disponibilidade, sendo uma redução máxima igual a 7% nos trechos com outorgas acima de 50% da $Q_{7,10}$.

A partir da série de resultados apresentados pode-se perceber, obviamente, que ao se aumentar a porcentagem máxima da $Q_{7,10}$ a ser outorgada são obtidas melhoras tanto de disponibilidade quanto na adequação de trechos em conflito com a legislação vigente.

Entretanto, como pode-se observar na Tabela 5, as porcentagens da área da bacia referentes aos volumes captados abaixo do limite máximo permitido apresentam um crescimento mais significativo para os primeiros critérios (60% e 70% da $Q_{7,10}$). Consequentemente, as porcentagens da área

da bacia referentes aos volumes captados acima do limite máximo permitido também apresentam o mesmo comportamento, mas invertido, com uma tendência decrescente mais significativa para os primeiros critérios (60% e 70% da $Q_{7,10}$). As Figura 59 e 60 evidenciam isto, sendo nelas apresentados os valores da Tabela 5.

Figura 59 – Porcentagens da área da bacia do rio Araguari com o volume captado abaixo do máximo permitido para os critérios analisados

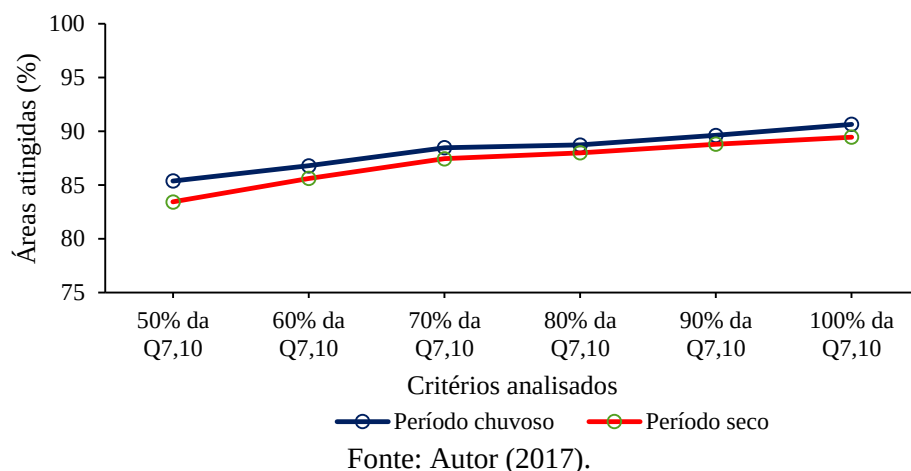
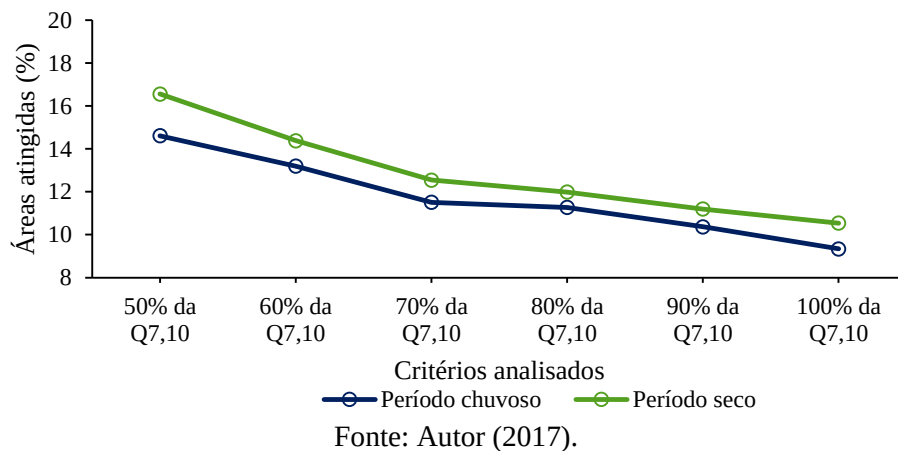


Figura 60 – Porcentagens da área da bacia do rio Araguari com o volume captado acima do máximo permitido para os critérios analisados



A Figura 61 mostra o aumento das porcentagem das áreas da bacia referentes a volumes captados abaixo do limite máximo após mudança sequencial de critério (50% para 60%, 60% para 70%, 70% para 80%, 80% para 90% e 90% para 100% da $Q_{7,10}$). Os valores apresentados na Figura 62 representam da mesma forma a diminuição das porcentagens da área da bacia referentes aos volumes captados acima do limite máximo após mudança sequencial de critério, sendo estas proporcionais e iguais em módulo às apresentadas na Figura 61.

Figura 61 – Diferenças entre as áreas com volume captado abaixo do máximo outorgável na mudança para cada critério proposto

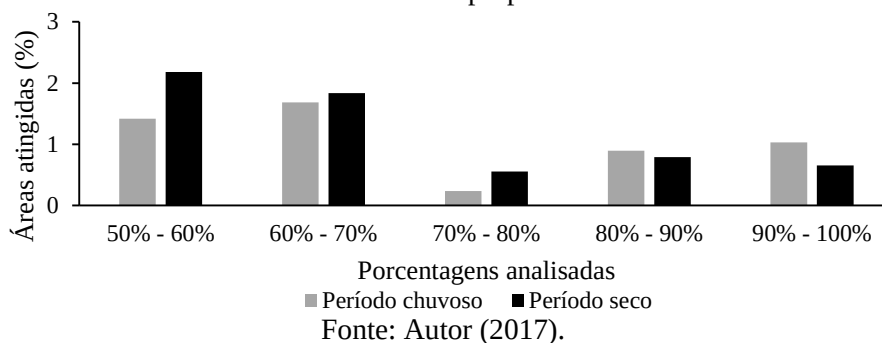
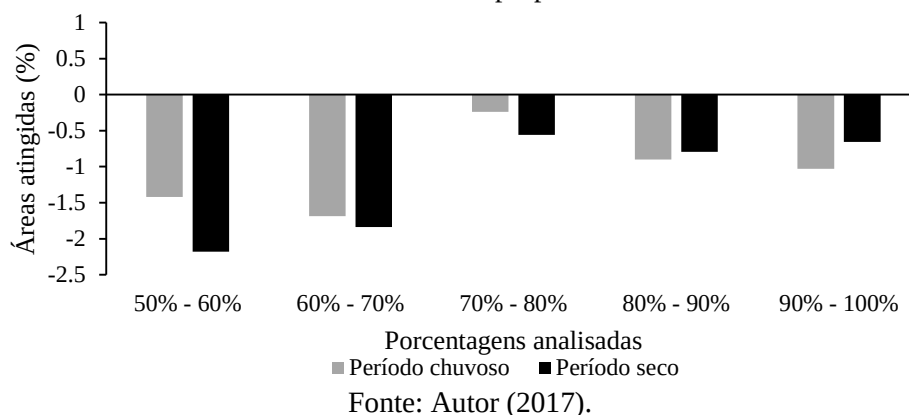


Figura 62 – Diferenças entre as áreas com volume captado acima do máximo outorgável na mudança para cada critério proposto



Focando-se no período chuvoso, foi observado que, a mudança de critério de 50% para 60% da $Q_{7,10}$ resultou em um crescimento de 1,41% das áreas com outorgas abaixo do máximo permitido. Na mudança de 60% para 70% esta diferença foi de 1,68%. Considerando uma alteração de 70% para 80% houve uma diferença de apenas 0,23%. Para os demais critérios, a diferença nas áreas volta a crescer, sendo de 0,89% para a transição de 80% para 90% e de 1,03% para a mudança de critério de 90% para 100%.

Já no período seco, as mudanças de 50% para 60% da $Q_{7,10}$ e de 60% para 70% da $Q_{7,10}$ propiciaram os maiores aumentos, sendo, respectivamente, iguais a 2,17% e 1,83%. As demais transições entre critérios não geram grandes diferenças, sendo de 0,55% na mudança de 70% para 80% da $Q_{7,10}$, 0,79% na mudança de 80% para 90% da $Q_{7,10}$ e 0,65% na mudança de 90% para 100% da $Q_{7,10}$.

As diferenças nas áreas, ao se variar o critério analisado, exercem o mesmo efeito naquelas onde o volume captado está acima do permitido, pois, são proporcionais. Ou seja, se no período chuvoso a mudança de critério de 50% para 60% da $Q_{7,10}$ resultou em um crescimento de 1,41% das áreas

com outorgas abaixo do máximo permitido, a diminuição das áreas com outorgas acima do máximo permitido será, consequentemente, de 1,41%.

Assim, pode-se observar que, para percentuais outorgáveis da $Q_{7,10}$ iguais ou superiores a 80%, a disponibilidade hídrica aumenta, mas os impactos causados são menores que aqueles encontrados para porcentagens de até 70%.

4.7 Análises de otimização do aproveitamento hídrico – 2ª análise

Neste item são apresentados os resultados das análises referentes às áreas críticas na bacia, focando-se nos trechos com maior número de outorgas significativas e nos reservatórios de acumulação, conforme proposto no item 3.9.2.

4.7.1 Áreas críticas

Os resultados da primeira análise referentes ao critério atual, 50% da $Q_{7,10}$ anual (Figuras 42 e 43), mostraram que as regiões de cabeceira são aquelas onde, predominantemente, o volume outorgado é maior que o permitido. Assim, esta etapa da segunda análise consequentemente teve como foco os trechos críticos destas regiões.

Entretanto, a criticidade analisada neste item não se refere ao percentual captado acima de 50% da $Q_{7,10}$, mas sim as outorgas que, em períodos de estiagem, demandam volumes que não garantem a vazão mínima residual nos rios (50% da $Q_{7,10}$). A Figura 63 ilustra estas regiões, a localização e o tipo das outorgas. Estas regiões críticas estão inseridas nas sub-bacias dos rios Uberabinha, São João, Capivara, Santo Antônio, Furnas, Médio Araguari e Alto Quebra Anzol.

A Tabela 6 traz as principais informações de criticidade obtidas nesta análise. Nela são apresentadas as sub-bacias críticas, com as regiões mais atingidas e os respectivos cursos de água, o percentual de meses em déficit frente ao período analisado, com os volumes permitidos para outorga, vazão mínima a ser respeitada e os valores mensais em déficit. Além disso, são apresentadas as porcentagens máximas de corte nas vazões demandadas para garantir a vazão mínima residual, assim como o corte médio estimado para todos os meses em déficit.

Tabela 6 – Sub-bacias com áreas críticas e informações

Sub-bacia	Região afetada (Figura 63)	Curso de água afetado	% de meses em déficit (período analisado de 40 anos)	Atividades em conflito	Volume outorgado da atividade conflitante (hm³/mês)	50% da Q _{7,10} (hm³/mês)	Máx. déficit durante o período analisado (hm³)	Máx. corte na vazão outorgada (%)	Déficit médio durante o período analisado (hm³)	Corte médio na vazão outorgada (%)
Rio Uberabinha	Região 2	Rio Uberabinha (imediatamente a jusante do reservatório de sucupira)	2,7%	Abastecimento público	9,59	2,85	7,5	50%	0,12	1,3%
	Região 1	Ribeirão Bom jardim (imediatamente a jusante do reservatório Bom Jardim)	2,5%	Abastecimento público	5,18	1,40	3,9	48%	0,06	1,2%
Rio São João	Região 3	Montante da junção entre os rios São João e Ferreiros	2,7%	Irrigação	0,97	0,56	1,0	62%	0,11	1,2%
Rio Capivara	Região 5	Montante da junção entre os rios Capivara e Marmelo	10%	Consumo industrial	4,98	0,65	2,6	55%	0,12	2,6%
	Região 4	Trecho final do rio Marmelo	7,9%	Consumo industrial	4,75	0,86	2,6	55%	0,12	2,6%
	Região 6	Rio Tamanduá	53%	Consumo industrial	1,7	0,16	1,7	99%	0,785	46,85%
Ribeirão Santo Antônio	Região 7	Não identificado	4,2%	Irrigação	0,67	0,26	0,60	83%	0,02	2,4%
	Região 8	Trecho imediatamente a jusante da junção entre os rios Congonhas e Pavões	2,1%	Irrigação	0,42	0,26	0,40	83%	0,01	2%

Fonte: Autor (2017).

Continuação Tabela 6 – Sub-bacias com áreas críticas

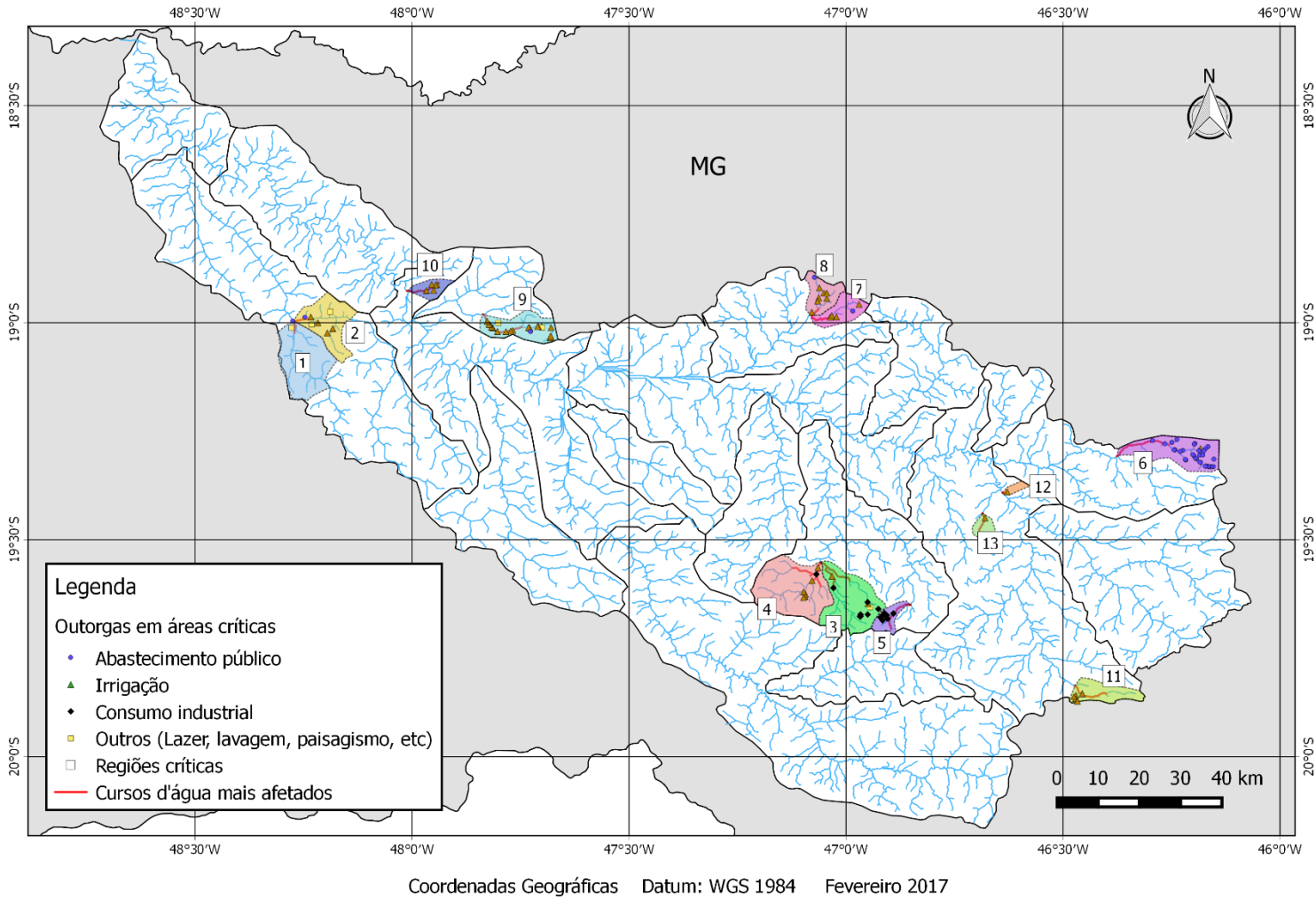
Sub-bacia	Região afetada (Figura 63)	Curso de água afetado	% de meses em déficit (período analisado de 40 anos)	Atividades em conflito	Volume outorgado da atividade conflitante (hm³/mês)	50% da Q _{7,10} (hm³/mês)	Máx. déficit durante o período analisado (hm³)	Máx. corte na vazão outorgada (%)	Déficit médio durante o período analisado (hm³)	Corte médio na vazão outorgada (%)
Ribeirão das Furnas	Região 9	Trecho final do rio Mandaguari	7,1%	Irrigação	3,26	0,41	2,1	71%	0,06	2%
	Região 9	Trecho final do rio Mandaguari	7,3%	Dessedentação animal, lazer, lavagem e paisagismo	0,60	0,41	0,60	99%	-	-
Médio Araguari	Região 10	Rio Posses	5%	Irrigação	0,97	0,14	0,6	65%	0,02	2%
Alto Quebra Anzol	Região 11	Próximo a nascente do Alto Quebra Anzol	37,3%	Irrigação	0,5	0,29	0,5	99%	0,33	70%
	Região 12	Não identificado	4,4%	Irrigação	0,21	0,86	0,1	35%	0,10	4,76%
	Região 13	Nascente do rio Grande	85,4%	Irrigação	0,06	0,10	0,06	88%	0,05	84,7%

Fonte: Autor (2017).

De uma forma geral, os resultados mostraram eventos máximos alarmantes, mas quando considerada sua ocorrência média, os déficits encontrados são significativamente menores (Tabela 6).

Para a sub-bacia do rio Uberabinha, os pontos críticos foram as regiões 1 e 2 (Figura 63). Estes trechos correspondem aos cursos de água imediatamente a jusante dos reservatórios Sucupira e Bom Jardim, responsáveis pelo abastecimento da cidade de Uberlândia. O relatório com o resumo da análise destas demandas pela ferramenta OPTIGES são apresentadas nas Figura 64 e 65, onde as indicações destacadas (Figura 64) mostram: 1. Valor médio mensal demandado, em hm^3 ; 2. Valor médio mensal captado superficialmente pela demanda, considerando déficit, em hm^3 ; 3. Valor médio mensal captado subterraneamente pela demanda, considerando déficit, em hm^3 ; 4. Déficit médio mensal do volume demandado, em $\text{hm}^3/\text{mês}$, causado por vazões baixas ou limitações impostas, tais como vazão mínima residual e prioridades entre demandas; 5. Infiltração do volume captado, em hm^3 , sendo no caso não considerado nas análises desta pesquisa; 6. Valor médio mensal captado superficialmente pelo elemento “toma” ao qual a demanda está ligada, considerando o déficit, em hm^3 ; 7. Percentual de meses do período analisado (40 anos) onde o volume demandado foi atendido, conforme a garantia mensal definida pela Equação (20); 8. Percentual de volume total demandado atendido; 9. Déficit máximo atingido nos meses do período analisado, em $\text{hm}^3/\text{mês}$; 10. Déficit máximo atingido em dois meses consecutivos durante o período analisado, em $\text{hm}^3/\text{mês}$; 11. Percentual de anos do período analisado que apresentaram meses em que ocorreram déficits, conforme a garantia anual definida pela Equação (21); 12. Falhas apresentadas durante o período analisado segundo o critério UTAH DWR; 13. Falhas apresentadas durante o período analisado segundo o critério IPH2008; 14. Número de meses com déficit; 15. Número de meses com déficit em cada nível de exigência estipulado. Os níveis de exigência são especificados pela expressão “MAG”.

Figura 63 – Regiões críticas na bacia do rio Araguari, com a localização e o tipo das outorgas



Fonte: Autor (2017).

Figura 64 – Relatório de análise da região 2 da sub-bacia do rio Uberabinha referente à demanda de abastecimento público

18-Res_Sucupira		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	115.08
2	SUM.SUPERF	9.36	9.47	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.56	9.54	9.46	9.44	9.45	114.23
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.23	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.13	0.15	0.14	0.85
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS Toma nº 18	9.36	9.47	9.59	9.59	9.59	9.59	9.59	9.56	9.54	9.46	9.44	9.45	114.23
7	GAR.MENS.: 97.3% (13 FALLOS)													
8	GAR.VOLUM.: 99.3%													
9	MAX.DEFIC.MENS.: 7.5													
10	MAX.DEF.2 MES.CONDS: 12.3													
11	GAR.ANUAL: 95.0% (2 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 10 POR 1 MES, 1 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 13 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 3 DE MAG.2, 2 DE MAG.3, 8 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

Figura 65 – Relatório de análise da região 1 da sub-bacia do rio Uberabinha referente à demanda de abastecimento público

10-Res_Bom Jardim		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	62.21
2	SUM.SUPERF	5.05	5.12	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.17	5.15	5.11	5.10	5.10	61.71
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.13	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.07	0.08	0.08	0.45
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS Toma nº 10	5.05	5.12	5.18	5.18	5.18	5.18	5.18	5.17	5.15	5.11	5.10	5.10	61.71
7	GAR.MENS.: 97.5% (12 FALLOS)													
8	GAR.VOLUM.: 99.2%													
9	MAX.DEFIC.MENS.: 3.9													
10	MAX.DEF.2 MES.CONDS: 6.5													
11	GAR.ANUAL: 95.0% (2 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 9 POR 1 MES, 1 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 12 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 2 DE MAG.2, 2 DE MAG.3, 8 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

Ainda nas Figuras 64 e 65, os resultados mostram situações similares para as demandas nesta sub-bacia. No reservatório de Sucupira foram estimados períodos de estiagem onde não seria possível atender totalmente a demanda de abastecimento sem comprometer a vazão mínima residual (50% da $Q_{7,10}$). Esta parcela ocorre em 2,7% dos meses, uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 97,3% (Figura 64, conforme indicação 7). Assim, neste período seria necessário um corte de até 50% na vazão captada, cerca de 4,8 hm^3 mensais. Esta foi a porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 64. Para o segundo nível foi estipulado uma porcentagem de 51% de demanda atendida, mas o valor obtido revela que 3 meses apresentaram déficit. Ou seja, a análise, de uma forma geral, consistiu em encontrar a maior porcentagem exigida nos níveis de exigência onde o número de meses em déficit foi 0, resultando na estimativa de corte necessário para que a vazão mínima residual de 50% da $Q_{7,10}$ não fosse infringida.

O valor médio mensal de déficit de 0,12 hm^3 (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 64, mostrado também na Tabela 6) aponta que a porcentagem de corte de 50% seria para um mês extremo, sendo o corte médio na vazão outorgada para os períodos críticos bem abaixo

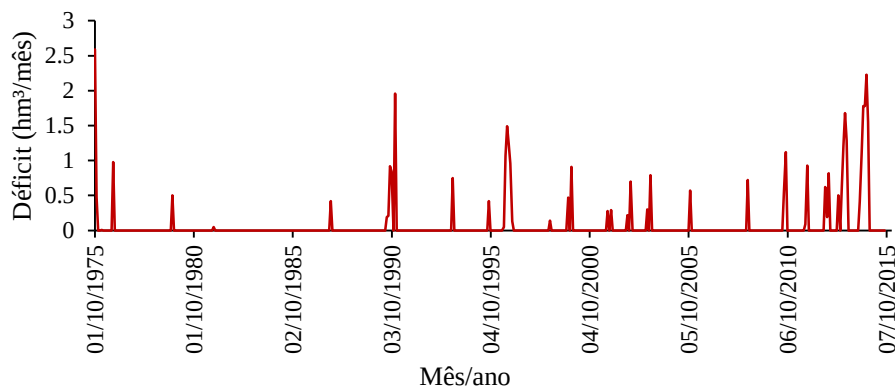
deste valor, em torno de 1,3% (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 64 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6).

Para a demanda de abastecimento junto ao reservatório de Bom Jardim (região 1 da Figura 63) foi estimado cortes máximos na faixa de 48% da demanda atual, cerca de 2,48 hm³/mês. Ou seja, a porcentagem exigida e atendida no primeiro nível de exigência foi de 52% (Figura 20). Esta parcela ocorre em 2,5% dos meses, uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 97,5% (indicação 7 - Figura 65). O valor médio mensal de déficit de 0,06 hm³ (média dos déficits médios de cada mês, indicação 4 - Figura 65, mostrado também na Tabela 6) novamente indica que a porcentagem de corte de 52% seria para um mês extremo, sendo uma estimativa média para os períodos críticos em torno de 1,2% (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 65 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6).

Apesar da estimativa de cortes máximos significativos nas demandas desta bacia, a quantidades de meses em déficit foi insignificante frente ao período analisado, mostrando a necessidade de eventos raros de estiagem para que possíveis ações como estas sejam tomadas. Estes eventos seriam caracterizados por vazões médias mensais próximas a $Q_{7,10}$, sendo em torno de 2,81 hm³/mês para o curso do Bom Jardim e 5,70 hm³/mês no rio Uberabinha a jusante do reservatório de Sucupira.

A sub-bacia do Rio Capivara apresentou os pontos críticos nas regiões 3, 4 e 5 (Figura 63), referentes às demandas por consumo industrial. Esta sub-bacia apresentou as regiões mais críticas, devido à quantidade de meses atingidos e dos volumes em déficit. Para região 4, 10% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 90,0% - indicação 7, Figura 67), chegando a um valor máximo de 2,6 hm³/mês (Figura 66). O relatório com o resumo da análise destas demandas é apresentado na Figura 67.

Figura 66 – Déficit para as demandas com consumo industrial na região 4



Fonte: Autor (2017).

Figura 67 – Relatório de análise da região 4 da sub-bacia do rio Capivara referente à demanda por consumo industrial

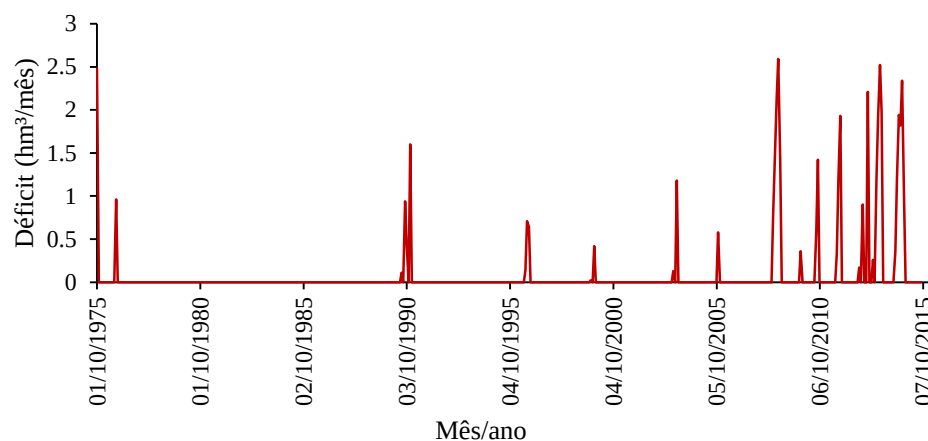
7-IND_1		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	4.48	4.41	4.48	4.48	4.27	4.48	4.41	4.48	4.41	4.48	4.48	4.41	53.30
2	SUM.SUPERF	4.24	4.24	4.44	4.49	4.27	4.49	4.41	4.48	4.40	4.42	4.36	4.13	52.36
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.25	0.17	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.08	0.13	0.28	0.98
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 7	4.24	4.24	4.44	4.49	4.27	4.49	4.41	4.48	4.40	4.42	4.36	4.13	52.36
7	GAR.MENS.: 90.0% (48 FALLOS)													
8	GAR.VOLUM.: 98.2%													
9	MAX.DEFIC.MENS.: 2.6													
10	MAX.DEF.2 MES.CONTS: 4.0													
11	GAR.ANUAL: 62.5% (15 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 33 POR 1 MES, 26 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 49 15 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 19 DE MAG.2, 14 DE MAG.3, 16 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

Foram estimados cortes máximos na faixa de 55% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 67), cerca de 2,46 hm³/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,12 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 67, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 2,6% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 67 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Tais ações seriam necessárias para vazões próximas a 1,3 hm³/mês ($Q_{7,10}$) no trecho imediatamente a montante da junção entre o rio Capivara com rio Marmelo.

Para região 3 (Figura 63), 7,9% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 92,1% - indicação 7, Figura 69), chegando a um valor máximo de 2,6 hm³/mês. A Figura 68 mostra os déficits mensais ao longo dos 40 anos analisados. O relatório com o resumo da análise destas demandas é apresentado na Figura 69.

Figura 68 – Déficit apresentado para as demandas com consumo industrial na região 3



Fonte: Autor (2017).

Figura 69 – Relatório de análise da região 3 da sub-bacia do rio Capivara referente à demanda por consumo industrial

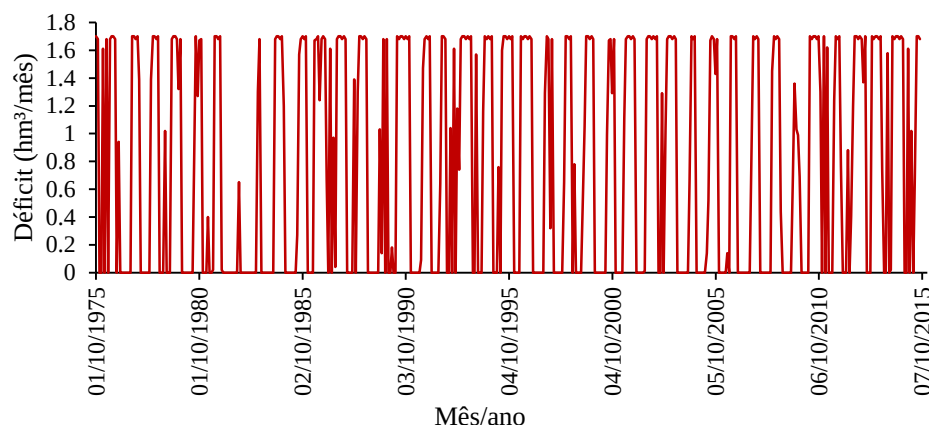
8-IND_2		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	57.02
2	SUM.SUPERF	4.47	4.61	4.72	4.76	4.70	4.76	4.76	4.75	4.75	4.67	4.59	4.46	56.01
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.29	0.15	0.04	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.01	0.09	0.17	0.30	1.11
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 8	4.47	4.61	4.72	4.76	4.70	4.76	4.76	4.75	4.75	4.67	4.59	4.46	56.01
7	GAR.MENS.: 92.1% (38 FALLOS)													
8	GAR.VOLUM.: 98.2%													
9	MAX.DEFIC.MENS.: 2.6													
10	MAX.DEF.2 MES.CONTS: 4.7													
11	GAR.ANUAL: 70.0% (12 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AVO, 0 POR 2 AVOS, 0 POR 10 AVOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 28 POR 1 MES, 12 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 39													
15	POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 20 DE MAG.2, 8 DE MAG.3, 11 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

Foram estimados cortes máximos na faixa de 55% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 69), cerca de 2,61 $\text{hm}^3/\text{mês}$. O valor médio mensal de déficit foi calculado em 0,12 hm^3 (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 69, mostrado também na Tabela 6), sendo estimados cortes mensais para os períodos críticos de 2,6% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 69 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Tais ações seriam necessárias para vazões próximas a 1,72 $\text{hm}^3/\text{mês}$ ($Q_{7,10}$) no trecho final do rio Marmelo.

Já para a região 5 (Figura 63), a situação encontrada foi alarmante. Em 53,3% dos meses houve déficit no atendimento das demandas (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 46,7% - indicação 7, Figura 71), chegando a um valor máximo de 1,7 $\text{hm}^3/\text{mês}$. A Figura 70 evidencia estes meses e os valores de vazões não atendidas. O relatório com o resumo da análise destas demandas é apresentado nas Figura 71.

Figura 70 – Déficit apresentado para as demandas com consumo industrial na região 5



Fonte: Autor (2017).

Figura 71 – Relatório de análise da região 5 da sub-bacia do rio Capivara referente à demanda por consumo industrial

12-IND_7		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	1.69	1.66	1.69	1.69	1.61	1.69	1.66	1.69	1.66	1.69	1.69	1.66	20.11
2	SUM.SUPERF	0.29	0.45	1.30	1.62	1.38	1.56	1.50	1.34	0.87	0.33	0.12	0.05	10.81
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	1.41	1.23	0.40	0.08	0.23	0.14	0.18	0.36	0.81	1.37	1.58	1.63	9.42
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 12	0.29	0.45	1.30	1.62	1.38	1.56	1.50	1.34	0.87	0.33	0.12	0.05	10.81
7	GAR.MENS.: 46.7% (256 FALLOS) 8 GAR.VOLUM.: 53.8% 9 MAX.DEFIC.MENS.: 1.7 10 MAX.DEF.2 MES.CONIS: 3.4													
11	GAR.ANUAL: 0.0% (40 FALLOS) 12 FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 18 POR 1 AYO, 32 POR 2 AXOS, 31 POR 10 AXOS***													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS:248 POR 1 MES, 31 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT:257 15 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 181 DE MAG.1, 64 DE MAG.2, 3 DE MAG.3, 9 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

Foram estimados cortes de até 99% nas demandas mensais (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, Figura 20), sendo ainda encontrado 33% dos meses em déficit frente ao volume outorgado (caracterizado pelo valor 181 na indicação 15 da Figura 71). A vazão mínima de 50% da $Q_{7,10}$ neste trecho foi estimada em 0,16 $\text{hm}^3/\text{mês}$, entretanto, são captados volumes mensais de 1,7 hm^3 .

O valor médio mensal de déficit de 0,785 hm^3 (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 71, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 46,85% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 71 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Estes resultados apontam uma necessidade de um estudo aprofundado acerca das outorgas desta região, referentes a nascente do rio Tamanduá.

Os relatórios das análises para as demais sub-bacias são apresentados nas Figuras 72 a 83. Naquelas onde o número de meses afetados se julgou significativo (próximos a 5%) foram apresentados a correlação entre o déficit atingido e os meses de ocorrência.

A Figura 72 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do rio São João, referente região 6 da Figura 63. Para esta região, 2,7% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 97,3% - indicação 7, Figura 72), chegando a um valor máximo de 1,0 hm³/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 62% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 72), cerca de 0,6 hm³/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,11 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 72, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 1,2% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 72 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Tais ações seriam necessárias para vazões próximas a 1,13 hm³/mês (Q_{7,10}) no trecho imediatamente a montante da junção entre o rio São João com rio Ferreiros.

Figura 72 – Relatório de análise da região 6 da sub-bacia do rio São João referente à demanda com irrigação

5-IRR_1														
		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	11.63
2	SUM.SUPERF	0.94	0.95	0.97	0.97	0.95	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	11.53
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.11
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 5	0.94	0.95	0.97	0.97	0.95	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	11.53
7	GAR.MENS.: 97.3% (13 FALLOS)													
8	GAR.VOLUM.: 99.1%													
9	MAX.DEFIC.MENS.: 1.0													
10	MAX.DEF.2 MES.CONC.: 1.5													
11	GAR.ANUAL: 92.5% (3 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 11 POR 1 MES, 2 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 13 15 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 3 DE MAG.2, 8 DE MAG.3, 2 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

A Figura 73 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio, referente região 7 da Figura 63. Para esta região, 4,2% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 95,8% - indicação 7, Figura 73), chegando a um valor máximo de 0,6 hm³/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 83% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 73), cerca de 0,55 hm³/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,02 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 73, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos

críticos de 2,4% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 73 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6).

Figura 73 – Relatório de análise da região 7 da sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio referente à demanda com irrigação

3-IRR_1		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	0.67	0.67	0.64	0.64	0.64	0.64	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	7.91
2	SUM.SUPERF	0.64	0.65	0.64	0.65	0.65	0.65	0.66	0.65	0.66	0.66	0.65	0.64	7.80
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.13
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 3	0.64	0.65	0.64	0.65	0.65	0.65	0.66	0.65	0.66	0.66	0.65	0.64	7.80
7	GAR.MENS.: 95.8% (20 FALLOS) 8 GAR.VOLUM.: 98.5% 9 MAX.DEFIC.MENS.: 0.6 10 MAX.DEF.2 MES.CONTS: 1.1													
11	GAR.ANUAL: 85.0% (6 FALLOS) 12 FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AYO, 0 POR 2 AYO, 0 POR 10 AYO													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 17 POR 1 MES, 15 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 20 15 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 2 DE MAG.2, 12 DE MAG.3, 6 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

A Figura 74 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio, referente região 8 da Figura 63. Para esta região, 2,1% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 97,9% - indicação 7, Figura 74), chegando a um valor máximo de 0,4 hm³/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 83% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 74), cerca de 0,35 hm³/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,01 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 74, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 2% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 74 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Tais ações seriam necessárias para vazões próximas a 0,52 hm³/mês (Q_{7,10}) no trecho imediatamente a montante da junção entre o rio Congonhas com rio Pavões.

Figura 74 – Relatório de análise da região 8 da sub-bacia do Ribeirão Santo Antônio referente à demanda com irrigação

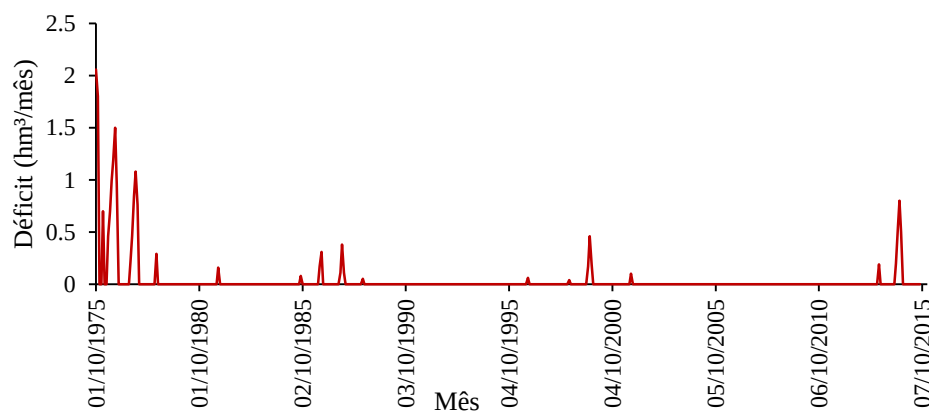
4-IRR_2		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	5.83
2	SUM.SUPERF	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.54	0.55	0.55	0.55	0.54	0.53	5.76
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 4	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.54	0.55	0.55	0.55	0.54	0.53	5.76
7	GAR.MENS.: 97.9% (10 FALLOS) 8 GAR.VOLUM.: 98.8% 9 MAX.DEFIC.MENS.: 0.4 10 MAX.DEF.2 MES.CONTS: 0.7													
11	GAR.ANUAL: 92.5% (3 FALLOS) 12 FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AYO, 0 POR 2 AYO, 0 POR 10 AYO													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 7 POR 1 MES, 11 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 10 15 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 0 DE MAG.2, 6 DE MAG.3, 4 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

A Figura 76 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Ribeirão das Furnas, referente região 9 da Figura 63 para demandas com irrigação. Para esta região, 7,1% dos meses apresentaram

déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 92,9% - indicação 7, Figura 75), chegando a um valor máximo de 2,1 hm³/mês. A Figura 75 mostra os déficits mensais ao longo dos 40 anos analisados. Foram estimados cortes máximos na faixa de 71% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 76), cerca de 2,1 hm³/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,06 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 76, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 2% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 76 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Tais ações seriam necessárias para vazões próximas a 0,82 hm³/mês (Q_{7,10}) no trecho final do rio Mandaguari.

Figura 75 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 9



Fonte: Autor (2017).

Figura 76 – Relatório de análise da região 9 da sub-bacia do Ribeirão das Furnas referente à demanda com irrigação

7-IRR_1		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	2.89	2.59	2.39	2.37	2.58	2.72	2.96	2.67	2.78	2.98	3.13	3.26	33.33
2	SUM.SUPERF	2.79	2.55	2.39	2.37	2.56	2.73	2.97	2.66	2.76	2.94	3.05	3.13	32.90
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.11	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.08	0.14	0.47
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 7	2.79	2.55	2.39	2.37	2.56	2.73	2.97	2.66	2.76	2.94	3.05	3.13	32.90
7	GAR.MENS.: 92.9% (34 FALLOS)													
8	GAR.VOLUM.: 98.7%													
9	MAX.DEFIC.MENS.: 2.1													
10	MAX.DEF.2 MES.CONST: 3.9													
11	GAR.ANUAL: 87.5% (5 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 18 POR 1 MES, 2 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 34													
15	POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 1 DE MAG.2, 2 DE MAG.3, 31 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

A Figura 78 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Ribeirão das Furnas, referente região 9 da Figura 63, mas para demandas com dessedentação animal, lazer, lavagem e paisagismo. Estas demandas estão no mesmo trecho daquelas citadas anteriormente (Figura 76), mas possuem uma prioridade menor (item 3.9.2). Assim, consequentemente, os períodos com déficits serão

iguais ou maiores que aqueles encontrados na demanda com prioridade maior. Da mesma forma, a água somente será destinada à demanda da Figura 78 (indicação 1) após satisfeitos os volumes outorgados pela demanda da Figura 76 (indicação 1). Logo, para esta região, 7,3% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 92,7% - indicação 7, Figura 78), chegando a um valor máximo de 0,03 hm³/mês. A Figura 77 mostra os déficits mensais ao longo dos 40 anos analisados. Foram estimados cortes de até 99% nas demandas mensais (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, Figura 20), sendo ainda encontrado 7,3% dos meses em déficit frente ao volume outorgado (caracterizado pelo valor 35 na indicação 15 da Figura 78). Ou seja, o fato da demanda da Figura 76 apresentar déficits ao longo do período analisado impediu que a demanda com dessedentação animal, lazer, lavagem e paisagismo fosse atendida, para o mesmo período em questão.

Figura 77 – Déficit apresentado para as demandas com dessedentação animal, lazer, lavagem e paisagismo na região 9

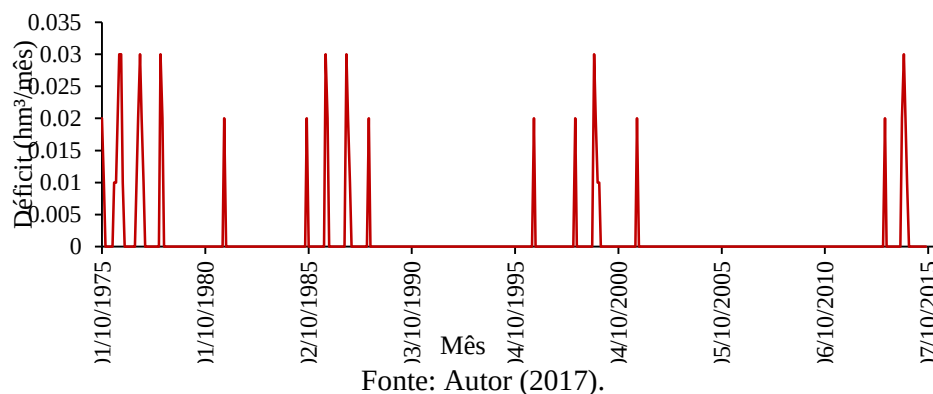


Figura 78 – Relatório de análise da região 9 da sub-bacia do Ribeirão das Furnas referente à demanda com dessedentação animal, lazer, lavagem, paisagismo, etc. (outros)

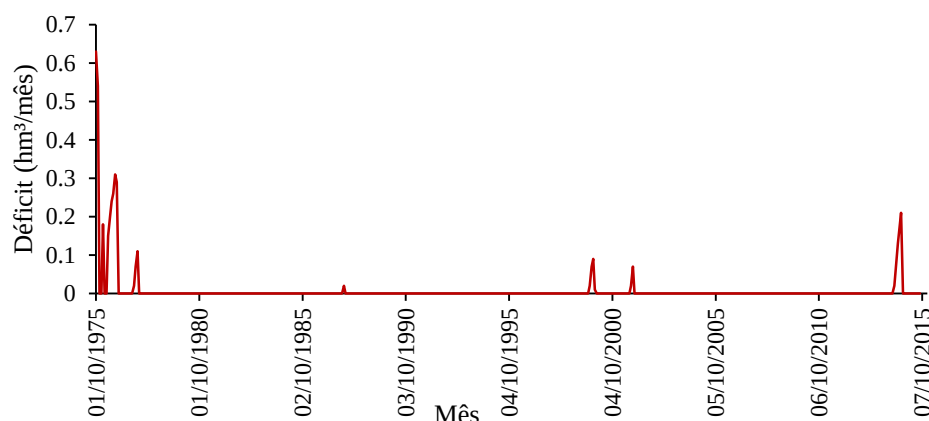
8-OUT_1		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.07	0.04	0.04	0.06	0.10	0.06	0.50
2	SUM. SUPERF	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.07	0.04	0.04	0.06	0.09	0.06	0.47
3	SUM. SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 8	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.07	0.04	0.04	0.06	0.09	0.06	0.47
7	GAR.MENS.: 92.7% (35 FALLOS) 8 GAR.VOLUM.: 94.7% 9 MAX.DEFIC.MENS.: 0.1 10 MAX.DEF.2 MES.CONTS: 0.1													
11	GAR.ANUAL: 60.0% (16 FALLOS) 12 FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AVO, 0 POR 2 AVOS, 0 POR 10 AVOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 35 POR 1 MES, 27 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 35 15 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 35 DE MAG.1, 0 DE MAG.2, 0 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

A Figura 80 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Médio Araguari, referente região 10 da Figura 63. Para esta região, 5% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 95,0% - indicação 7, Figura 80), chegando a um valor máximo de 0,6

hm³/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 65% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 80), cerca de 0,64 hm³/mês. A Figura 79 mostra os déficits mensais ao longo dos 40 anos analisados. O valor médio mensal de déficit de 0,02 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 80, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 2% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 80 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Tais ações seriam necessárias para vazões próximas a 0,28 hm³/mês (Q_{7,10}) no rio Posses.

Figura 79 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 10



Fonte: Autor (2017).

Figura 80 – Relatório de análise da região 10 da sub-bacia do Médio Araguaari referente à demanda com irrigação

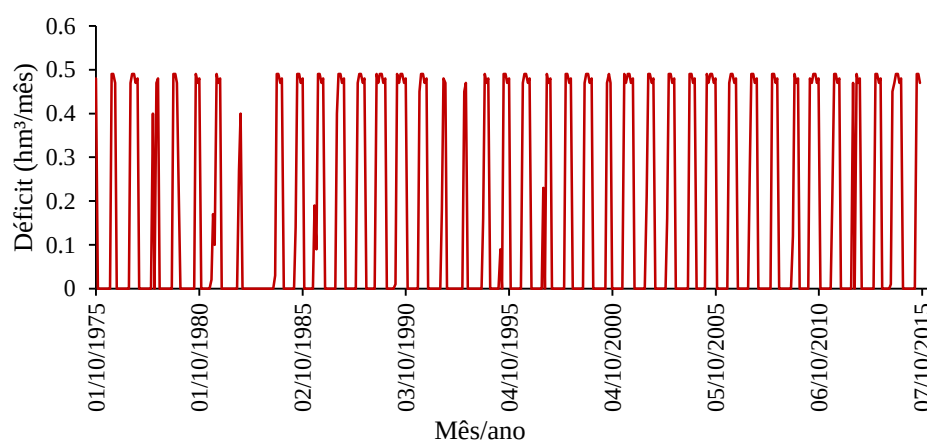
39-MA_IRR_15		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T. ANUAL
1	DEMANDA	0.98	0.98	0.97	0.97	0.91	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	11.63
2	SUM. SUPERF	0.94	0.96	0.97	0.97	0.91	0.97	0.97	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	11.56
3	SUM. SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.10
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST. SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 39	0.94	0.96	0.97	0.97	0.91	0.97	0.97	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	11.56
7	GAR. MENS.: 95.0% (24 FALLOS)													
8	GAR. VOLUM.: 99.4%													
9	MAX. DEFIC. MENS.: 0.6													
10	MAX. DEF. 2 MES. CONS: 1.2													
11	GAR. ANUAL: 90.0% (4 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT. TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 13 POR 1 MES, 1 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 24													
15	POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 1 DE MAG.2, 0 DE MAG.3, 23 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

A Figura 82 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Alto Quebra-Anzol, referente região 11 da Figura 63. Para esta região, 37,3% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 62,7% - indicação 7, Figura 82), chegando a um valor máximo de 0,5 hm³/mês. A Figura 81 mostra os déficits mensais ao longo dos 40 anos analisados. Foram

estimados cortes de até 99% nas demandas mensais (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, Figura 20), sendo ainda encontrado 31,3% dos meses em déficit frente ao volume outorgado (caracterizado pelo valor 150 na indicação 15 da Figura 82). O valor médio mensal de déficit de 0,33 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 82, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 70% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 82– que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Tais ações seriam necessárias para vazões próximas a 0,6 hm³/mês (Q_{7,10}) no trecho próximo à nascente do rio Alto Quebra Anzol.

Figura 81 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 11



Fonte: Autor (2017).

Figura 82 – Relatório de análise da região 11 da sub-bacia do Alto Quebra-Anzol referente à demanda com irrigação

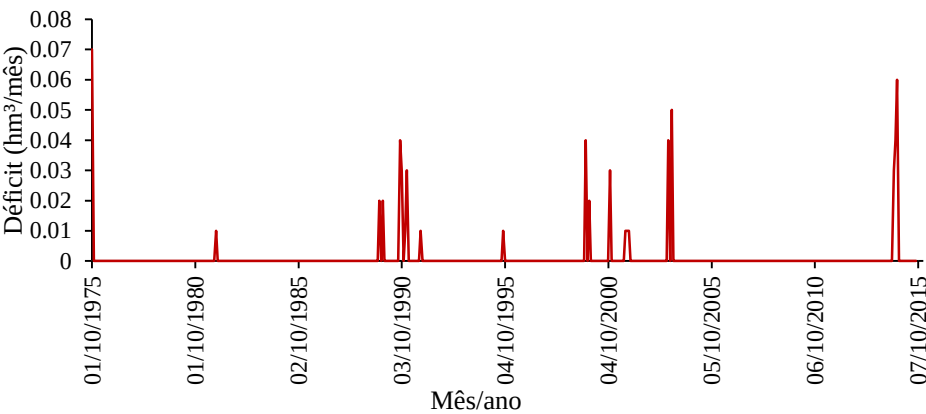
8-IRR_1		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.48	0.47	0.48	0.48	0.46	2.86
2	SUM.SUPERF	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.41	0.27	0.11	0.04	0.02	0.92
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.20	0.38	0.45	0.45	1.98
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 8	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.41	0.27	0.11	0.04	0.02	0.92
7	GAR.MENS.: 62.7% (179 FALLOS)													
8	GAR.VOLUM.: 32.3%													
9	MAX.DEFIC.MENS.: 0.5													
10	MAX.DEF.2 MES.CONTS: 1.0													
11	GAR.ANUAL: 0.0% (40 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 34 POR 1 AÑO, 36 POR 2 AÑOS, 31 POR 10 AÑOS***													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS:177 POR 1 MES, 31 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT:179													
15	POR MAGNITUDES (1-MAX 4-MIN): 150 DE MAG.1, 6 DE MAG.2, 21 DE MAG.3, 2 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

A Figura 84 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Alto Quebra-Anzol, referente região 12 da Figura 63. Para esta região, 4,4% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 95,6% - indicação 7, Figura 84), chegando a um valor máximo de 0,07 hm³/mês. A Figura 83 mostra os déficits mensais ao longo dos 40 anos analisados. Foram

estimados cortes máximos na faixa de 35% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 84), cerca de 0,07 hm³/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,1 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 84, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 4,76% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 84 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6).

Figura 83 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 12



Fonte: Autor (2017).

Figura 84 – Relatório de análise da região 12 da sub-bacia do Alto Quebra-Anzol referente à demanda com irrigação

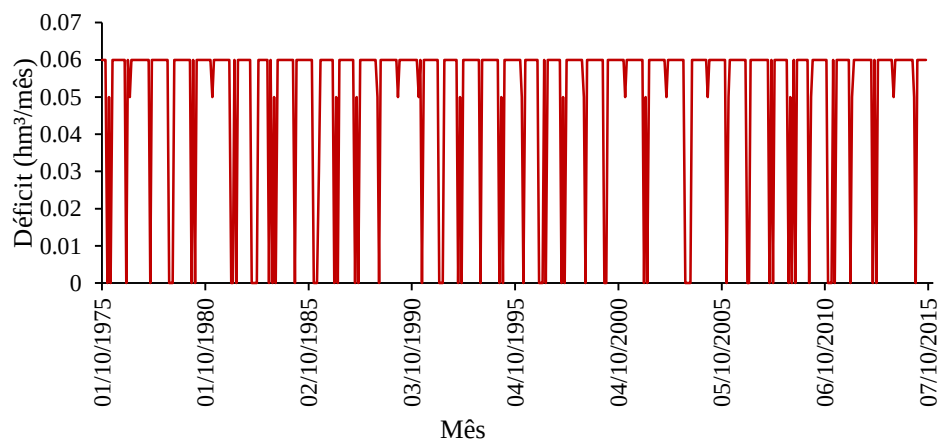
13-IRR_10		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	2.49
2	SUM.SUPERF	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	2.39
3	SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 13	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	2.39
7	GAR.MENS.: 95.6% (21 FALLOS)													
8	GAR.VOLUM.: 95.9%													
9	MAX.DEFIC.MENS.: 0.1													
10	MAX.DEF.2 MES.CONC: 0.1													
11	GAR.ANUAL: 82.5% (7 FALLOS)													
12	FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS													
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 11 POR 1 MES, 5 POR 10 AÑOS													
14	MESES CON DEFICIT: 21 15 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 3 DE MAG.2, 8 DE MAG.3, 10 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

A Figura 85 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Alto Quebra-Anzol, referente região 13 da Figura 63. Para esta região, 85,4% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de apenas 14,6% - indicação 7, Figura 86), chegando a um valor máximo de 0,06 hm³/mês. A Figura 85 mostra os déficits mensais ao longo dos 40 anos analisados. Foram estimados cortes máximos na faixa de 62% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido,

caracterizado pelo valor 0 na indicação 15 da Figura 86), cerca de 0,6 hm³/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,05 hm³ (média dos déficits médios de cada mês – indicação 4, Figura 83, mostrado também na Tabela 6) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 84,7% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação 1, Figura 86 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 6). Tais ações seriam necessárias para vazões próximas a 0,2 hm³/mês ($Q_{7,10}$) no trecho próximo a nascente do rio Grande.

Figura 85 – Déficit apresentado para as demandas com irrigação na região 13



Fonte: Autor (2017).

Figura 86 – Relatório de análise da região 13 da sub-bacia do Alto Quebra-Anzol referente à demanda com irrigação

22-IRR_11		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
1	DEMANDA	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.76
2	SUM. SUPERF	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
3	SUM. SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	DEFICIT	0.06	0.06	0.06	0.03	0.04	0.03	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.61
5	FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	Toma nº 23	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
7	GAR.MENS.: 14.6% (410 FALLOS)													8 GAR.VOLUM.: 13.8%
11	GAR.ANUAL: 0.0% (40 FALLOS)													9 MAX.DEFIC.MENS.: 0.1
13	FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS:410 POR 1 MES, 31 POR 10 AÑOS													10 MAX.DEF.2 MES.CONTS: 0.1
14	MESES CON DEFICIT:410													12 FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 40 POR 1 AYO, 39 POR 2 AYOS, 31 POR 10 AYOS***
	15 POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 0 DE MAG.2, 410 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2017).

4.7.2 Reservatórios

A etapa referente à análise dos 4 grandes reservatórios presentes no rio Araguari (CH Nova Ponte, CH Miranda, CHs Capim Branco 1 e 2) teve como base os resultados de disponibilidade da 1ª análise para a critério de outorga atual (50% da $Q_{7,10}$) em trechos imediatamente a montante dos reservatórios. Como dito anteriormente, a situação é confortável com vazões captadas em até 30% frente ao máximo permitido.

Assim, foram estimados volumes máximos mensais que ainda podem ser outorgados nas barragens destes reservatórios, sem que se comprometam as exigências mínimas para sua operação. Tais exigências mínimas consideradas foram: respeitar vazão mínima residual nos cursos a jusante do reservatório (50% da $Q_{7,10}$); atender as demandas atualmente existentes a montante e nos próprios reservatórios, conforme ordem de prioridade indicada no item 3.9.2; respeitar a cota mínima operacional da hidroelétrica em cada barragem, assim como os volumes mínimos turbinados para geração de energia.

A Tabela 7 traz, de forma resumida, as características e exigências operacionais dos principais reservatórios na bacia do rio Araguari utilizadas no processo de otimização do aproveitamento hídrico.

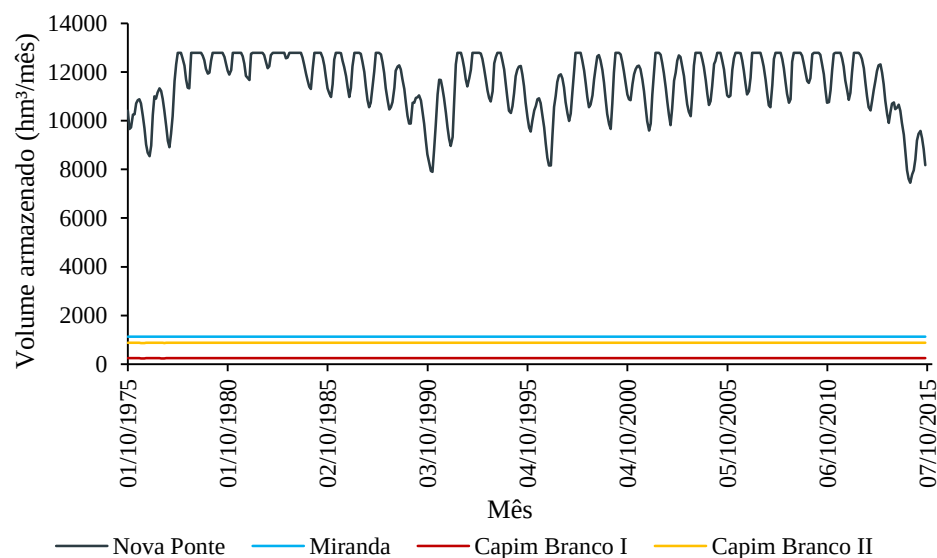
Tabela 7– Características e exigências operacionais dos principais reservatórios na bacia do rio Araguari

	Nova Ponte	Miranda	Capim Branco I	Capim Branco II
Volume máx. - hm^3	12.792,00	1.120,00	241,65	870,14
Volume mín. operacional (hidroelétrica) - hm^3	2.412,00	974,40	228,27	859,63
Cota mín. operacional (hidroelétrica) - m	775,57	693,00	623,30	564,7
Vazão mín. turbinada - $\text{hm}^3/\text{mês}$	398,50	-	-	-
Vazão mín. residual a jusante (50% da $Q_{7,10}$) - $\text{hm}^3/\text{mês}$	42,77	49,56	52,31	53,87

Fonte: Salla et al. (2013).

A Figura 87 mostra os volumes acumulados em cada reservatório ao longo do período analisado, sendo os valores estimados a partir do balanço hídrico realizado na ferramenta computacional AQUATOOL.

Figura 87 – Distribuição dos volumes armazenados nos 4 grandes reservatórios do rio Araguari – situação atual



Fonte: Autor (2017).

De acordo com a Figura 87, os volumes apresentados mostram comportamentos diferentes entre os reservatórios. O primeiro reservatório situado no alto rio Araguari é de regularização, com uma capacidade de armazenamento de 12.792 hm³ (CH Nova Ponte). Os outros três reservatórios, situados no baixo rio Araguari, são de fio de água com capacidade de armazenamento de 1120 hm³ na CH Miranda, 241,13 hm³ na CH Capim Branco 1 e 872,83 hm³ na CH Capim Branco 2, sendo os volumes estimados praticamente constantes ao longo do período analisado.

A barragem de Nova Ponte é significativamente maior que as demais, além de ser a primeira a montante ao longo do curso do rio Araguari. Assim, a curva referente a distribuição de seus volumes apresenta uma grande variação de valores ao longo do período analisado, com volumes praticamente 10 vezes maiores. Ainda na Figura 87, é possível identificar períodos de estiagem, observados nos meses de agosto/76 a dezembro/76, agosto/90 a março/91, outubro/91, a janeiro/92, agosto/96 a janeiro/97 e julho/14 a setembro/15.

Os demais reservatórios se encontram a jusante deste, tendo seus volumes apresentados como constantes e iguais a sua capacidade máxima de armazenamento. Este fato pode ser justificado pelo efeito de regularização das vazões causada pelo reservatório de Nova Ponte, e também devido à sua estrutura ser substancialmente maior, onde o nível mínimo operacional de sua central hidroeétrica é pelo menos duas vezes maior que a capacidade máxima de reserva dos demais.

A estimativa do potencial de aproveitamento hídrico ainda existente nestes reservatórios foi realizada inserindo uma nova demanda junto a cada reservatório. Como critério mínimo foi estipulado que pelo menos 99% dos meses deveriam atender as demandas fictícias. Este percentual visa excluir dados de entrada discrepantes dos demais simulados. Assim, a Tabela 8 apresenta os volumes máximos mensais, em hm^3 , que ainda podem ser outorgados nas barragens dos reservatórios de Nova Ponte, Miranda, Capim Branco I e II, sem que se comprometam as exigências mínimas para sua operação (citadas anteriormente).

Tabela 8– Volumes máximos mensais, em hm^3 , que ainda podem ser outorgados nas barragens dos reservatórios de Nova Ponte, Miranda, Capim Branco I e II

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Nova Ponte	90	100	100	100	100	100	100	100	85	90	90	85
Miranda	4	6	6	6	6	6	6	6	3	3	3	3
Capim Branco I	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Capim Branco II	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Fonte: Autor (2017).

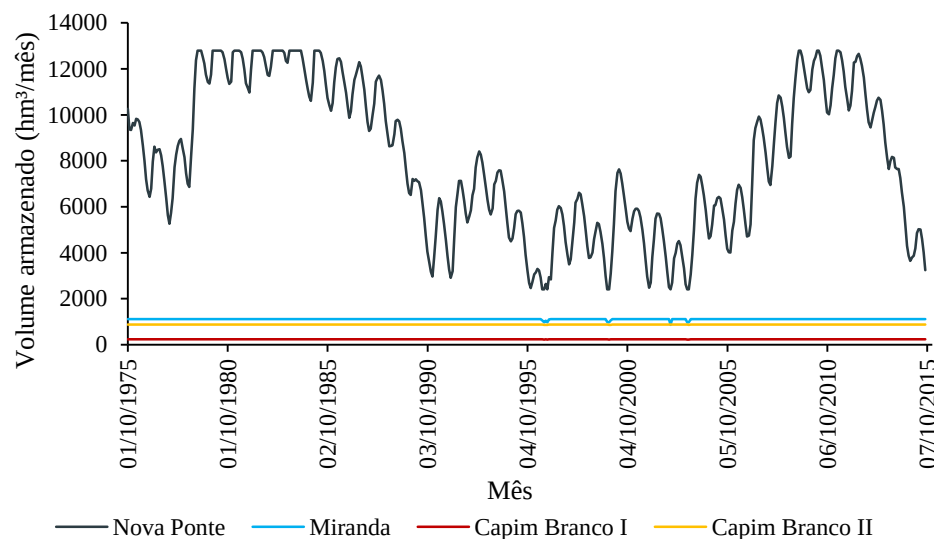
No caso do reservatório de Capim Branco I, foram consideradas demandas futuras para o novo sistema de abastecimento de Uberlândia, sendo este ainda em processo de construção. Este novo sistema de captação de água será implantado em três etapas e ampliará em 150% a produção de água tratada para a área urbana de Uberlândia. Segundo o DMAE (2016), pretende-se atender a demanda futura de 2,5 milhões de habitantes a partir da captação e tratamento de uma vazão de $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Assim, o valor da demanda estimada na Tabela 8 para este reservatório já prevê como atendido este volume outorgado de $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os volumes apresentados na Tabela 7 mostram um grande potencial a ser explorado nestes reservatórios. O maior potencial mostrado refere-se ao reservatório de Nova Ponte, devido a sua capacidade de armazenamento ser pelo menos 10 vezes maior que a dos demais reservatórios. Nele os volumes máximos que ainda podem ser captados são de $100 \text{ hm}^3/\text{mês}$, nos meses de fevereiro a agosto. Para os meses de janeiro, outubro e dezembro estes valores caem para $90 \text{ hm}^3/\text{mês}$, e para os demais períodos do ano foram estimados os menores volumes, iguais a $85 \text{ hm}^3/\text{mês}$. Esta variação de valores encontrados, especificamente de setembro a janeiro, pode estar relacionada aos períodos onde os volumes armazenados na CH de Nova Ponte atingem os menores níveis (Figura 87 - meses de agosto a janeiro, conforme citado anteriormente).

A Tabela 8 também mostra que, para o reservatório de Miranda, a variação dos volumes estimados segue a mesma distribuição, com os maiores valores nos meses de fevereiro a agosto, iguais a $6 \text{ hm}^3/\text{mês}$, e valores menores para o restante dos meses, sendo de setembro a dezembro iguais a $3 \text{ hm}^3/\text{mês}$, e em janeiro igual a $4 \text{ hm}^3/\text{mês}$. Esta semelhança na distribuição de valores pode estar relacionada ao fato da CH de Miranda estar a jusante do reservatório de Nova Ponte e, assim, sofrer os maiores efeitos das variações de seus volumes. Os demais reservatórios (Capim Branco I e II) não apresentam esta variação nos volumes máximos que ainda podem ser captados, provavelmente pelo fato de estarem mais a jusante na sequência em cascata dos reservatórios. Neles, os valores encontrados foram constantes ao longo do ano, sendo iguais a $7,8 \text{ hm}^3/\text{mês}$ para o reservatório de Capim Branco I, e iguais a $10 \text{ hm}^3/\text{mês}$ para o reservatório de Capim Branco II.

A Figura 88 mostra a distribuição dos volumes armazenados após a inserção das novas demandas fictícias estimadas (Tabela 7).

Figura 88 – Distribuição dos volumes armazenados nos 4 grandes reservatórios do rio Araguari, para o período simulado após o processo de otimização



Fonte: Autor (2017).

Ainda na Figura 88, a CH Nova Ponte teve variações significativas de seu volume armazenado quando comparada com a Figura 87. O fato de, em certo período, seus volumes atingirem níveis próximos ao mínimo operacional da central hidroelétrica, podem ter limitado o volume ainda a ser outorgado nas barragens dos reservatórios a jusante. Possivelmente esta foi a razão do reservatório de Miranda (localizado imediatamente a jusante do reservatório de Nova Ponte) não permitir captações maiores, proporcionais a sua capacidade de armazenamento. Como dito anteriormente, o

nível mínimo operacional da CH Nova Ponte é pelo menos duas vezes maior que a capacidade máxima de reservação dos demais. Isto pode também ser uma justificativa para a situação encontrada em Miranda, e também para o fato de, novamente, o volume deste e dos demais ser praticamente constante e próximo ao máximo, ao longo do período analisado, mesmo com o acréscimo de volumes outorgados. Além disso, o fato do reservatório de Nova Ponte ser de regularização e os demais (CH Miranda, Capim Branco I e II) operarem a fio da água contribuem para a forma como as séries de volumes se distribuem na Figura 88. Pequenas oscilações em CH Miranda e Capim Branco 1 foram observadas no período de julho/96 a novembro/96, de outubro/99 a dezembro/99, assim como de outubro/03 a dezembro/03, o que não refletiu em CH Capim Branco 2. A sequência da disposição destes reservatórios no sistema em cascata pode ter influenciado nestas oscilações, com CH Miranda e Capim Branco 1 mais a jusante da CH Nova Ponte, sofrendo os maiores efeitos das variações de volumes de Nova Ponte, e a CH Capim Branco 2, onde os valores armazenados foram constantes (Figura 85), não afetada por estar localizada em último na sequência em cascata dos reservatórios.

As Figuras 89 a 92 mostram os relatórios das demandas inseridas para a estimativa dos volumes máximos mensais, em hm^3 , que ainda podem ser outorgados nas barragens dos reservatórios de Nova Ponte, Miranda, Capim Branco I e II, respectivamente. Nestas Figuras vale ressaltar dois pontos principais dos resultados apresentados: os volumes máximos mensais captados (referentes à Tabela 7), conforme indicação 1 e a garantia mensal obtida (Equação 20), conforme indicação 2. A garantia mensal revela o percentual de meses no qual foi possível atender totalmente uma determinada demanda, assim este valor pode ser usado como “parâmetro” para estimar os volumes máximos mensais que ainda podem ser outorgados nas barragens. Foi adotado que esta garantia deve ser no mínimo igual a 99%.

Tomando, como exemplo, a Figura 89 referente ao reservatório de Nova Ponte, são apresentados os volumes máximos mensais captados (referentes a Tabela 7), conforme indicação 1, e a garantia mensal obtida de 99%, conforme indicação 2. Com isso, pode se concluir que, qualquer acréscimo nos valores indicados em 1 (Figura 89) resultariam em uma diminuição da garantia mensal, pois, esta já indica que existe déficit em pelo menos um mês do período analisado. Assim os valores de demandas (Figura 89 – indicação 1) obtidos para garantia de 99% (Figura 86 – indicação 2) são os

volumes máximos mensais, em hm³, que ainda podem ser outorgados nas barragens dos reservatórios de Nova Ponte. Este procedimento de análise também foi realizado nos demais reservatórios, sendo seus relatórios indicados nas Figuras 90, 91 e 92, onde as garantias mensais obtidas foram de 99% para Miranda e Capim Branco I e de 99,2% para Capim Branco II.

Figura 89 – Relatório da demanda fictícia inserida junto ao reservatório de Nova Ponte

* Nova Ponte		O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	TOTAL
1	DOTACION	90.000	85.000	85.000	90.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	85.000	1135.000
	SUM. SUPERF	85.500	80.750	82.875	90.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	97.500	85.000	1121.625
	SUM. SUBT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	DEFICIT	4.500	4.250	2.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.500	0.000	13.375
PROC. SUM. SUP. POR TOMAS:														
1-Toma nº 49		85.500	80.750	82.875	90.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	97.500	85.000	1121.625
NO. FALLOS: 6. 2		GARANTIA: 99.0%		GAR . VOLUMETRICA: 98.8%		MAX. DEF. MENS.: 100.000		MAX. DEF. 2 MES: 175.000						
CRITERIO ANUAL: NO.FALLOS: 5.		GARANTIA: 87.5%												
CRITERIO IPH08(AGRICOLAS): CUMPLE		(1: 15.4%, 2: 22.9%, 10: 47.1%)												
CRITERIO IPH08(URBANAS): NO CUMPLE		(MENSUAL: 6; 10AÑOS: 18 FALLOS)												

Fonte: Autor (2017).

Figura 90 – Relatório da demanda fictícia inserida junto ao reservatório de Miranda

* Miranda		O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	TOTAL
1	DOTACION	3.000	3.000	3.000	4.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	3.000	58.000
	SUM. SUPERF	2.850	2.850	2.925	4.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	5.850	3.000	57.475
	SUM. SUBT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	DEFICIT	0.150	0.150	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.150	0.000	0.525
PROC. SUM. SUP. POR TOMAS:														
1-Toma nº 50		2.850	2.850	2.925	4.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	5.850	3.000	57.475
NO. FALLOS: 6. 2		GARANTIA: 99.0%		GAR . VOLUMETRICA: 99.1%		MAX. DEF. MENS.: 6.000		MAX. DEF. 2 MES: 6.000						
CRITERIO ANUAL: NO.FALLOS: 5.		GARANTIA: 87.5%												
CRITERIO IPH08(AGRICOLAS): CUMPLE		(1: 10.3%, 2: 15.5%, 10: 36.2%)												
CRITERIO IPH08(URBANAS): NO CUMPLE		(MENSUAL: 6; 10AÑOS: 18 FALLOS)												

Fonte: Autor (2017).

Figura 91 – Relatório da demanda fictícia inserida junto ao reservatório de Capim Branco I

* Capim Branco I		O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	TOTAL																				
1	DOTACION	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	93.312																				
	SUM. SUPERF	7.387	7.387	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.582	7.776	92.340																				
	SUM. SUBT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000																				
	DEFICIT	0.389	0.389	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.194	0.000	0.972																				
PROC. SUM. SUP. POR TOMAS:																																		
1-Toma nº 58		7.387	7.387	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.776	7.582	7.776	92.340																				
NO. FALLOS: 5. 2		GARANTIA: 99.0%		GAR . VOLUMETRICA: 99.0%		MAX. DEF. MENS.: 7.776		MAX. DEF. 2 MES: 15.552																										
CRITERIO ANUAL: NO.FALLOS: 4.		GARANTIA: 90.0%																																
CRITERIO IPH08(AGRICOLAS): CUMPLE		(1: 16.7%, 2: 16.7%, 10: 41.7%)																																
CRITERIO IPH08(URBANAS): NO CUMPLE		(MENSUAL: 5; 10AÑOS: 18 FALLOS)																																

Fonte: Autor (2017).

Figura 92 – Relatório da demanda fictícia inserida junto ao reservatório de Capim Branco II

* Capim Branco II														
		O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	TOTAL
1	DOTACION	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	120.000
	SUM. SUPERF	9.750	9.500	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	9.750	10.000	119.000
	SUM. SUBT	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	DEFICIT	0.250	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.000	1.000
PROC. SUM. SUP. POR TOMAS:														
1-Toma nº 59		9.750	9.500	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	9.750	10.000	119.000
NO. FALLOS: 4. 2		GARANTIA: 99.2%		GAR . VOLUMETRICA: 99.2%		MAX. DEF. MENS.: 10.000		MAX. DEF. 2 MES: 10.000						
CRITERIO ANUAL: NO.FALLOS: 4.		GARANTIA: 90.0%												
CRITERIO IPH08(AGRICOLAS): CUMPLE		(1: 8.3%, 2: 16.7%, 10: 33.3%)												
CRITERIO IPH08(URBANAS): NO CUMPLE		(MENSUAL: 4; 10AÑOS: 18 FALLOS)												

Fonte: Autor (2017).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Estudos de otimização do aproveitamento hídrico são fundamentais para a gestão de bacias hidrográficas, principalmente em tempos de escassez. A análise da disponibilidade hídrica por meio de critérios alternativos aos atuais pode levar a cenários onde o potencial ainda a ser explorado se mostra significativo, assim como na solução de conflitos pelo uso da água.

Diante do exposto, as análises geraram resultados satisfatórios e permitiram algumas conclusões:

- O potencial de aproveitamento hídrico pode ser limitado em função da discrepância de valores obtidos de $Q_{7,10}$ a partir de diferentes metodologias. Podem-se obter valores de vazão mínima residual de 50% da $Q_{7,10}$ maiores que aqueles encontrados na realidade, representando riscos para os ecossistemas de determinada região, principalmente aquáticos. A situação ideal seria a utilização de séries históricas de vazão como base para as análises probabilísticas na determinação de $Q_{7,10}$. Entretanto, a falta de estações de monitoramento e sua má distribuição espacial, assim como lacunas e falhas nas séries históricas, leva à utilização de métodos de regionalização, com consequente estimativa aproximada e divergente de vazão. Assim, o impacto do método adotado na estimativa da vazão de referência se apresenta como um tópico importante na análise da disponibilidade hídrica e sua otimização, justificando o desenvolvimento de estudos visando a melhor aplicabilidade de cada uma das metodologias disponíveis;
- No que se refere à análise de critérios visando à otimização do aproveitamento hídrico, os resultados mostraram que a mudança de critério é viável, principalmente no período chuvoso, representando um potencial significativo na disponibilidade de água em toda a bacia. Já para o período seco, existe a necessidade de estudos aprofundados acerca da vazão de referência atualmente utili-

zada. O aproveitamento do aumento da vazão outorgável, a partir da utilização de um critério sazonal para os meses chuvosos, justifica o desenvolvimento de estudos referentes ao armazenamento de tais volumes para utilização posterior em períodos de estiagem;

- A análise do percentual máximo da $Q_{7,10}$ em base anual alertou sobre regiões de cabeceira na bacia do rio Araguari com demandas outorgadas bem acima da máxima permitida, até mesmo considerando 100% da $Q_{7,10}$;
- No que se refere à segunda análise, apenas em 6% da área superficial da bacia do rio Araguari a vazão mínima residual de 50% da $Q_{7,10}$ foi infligida. Contudo, atenção especial quanto à limitação de outorga deve ser dada nestas áreas;
- A análise de disponibilidade hídrica nos quatro reservatórios em cascata no rio Araguari mostrou uma situação confortável, com disponibilidade suficiente para outorgas significativas, com vazões suficientes para abastecer cidades do porte de Uberlândia.

De uma forma geral, a situação atual na bacia do rio Araguari é confortável no que diz respeito aos volumes captados até o mês de agosto de 2017, com grande potencial para se aumentar seu aproveitamento hídrico. Entretanto, em regiões de cabeceira, estudos mais aprofundados são necessários quanto ao critério de outorga atual e aos volumes captados nestas regiões.

No que se refere às ferramentas utilizadas:

- O algoritmo evolutivo SCE-UA foi capaz de fornecer calibrações satisfatórias dos parâmetros do modelo chuva-vazão HBV;
- A ferramenta computacional EvalHID auxiliou positivamente nas modelagens HBV;
- O módulo de otimização OPTIGES, vinculado ao sistema suporte à decisão AQUATOOL, foi capaz de otimizar o aproveitamento hídrico ao longo da bacia do rio Araguari, tanto no que se refere ao aumento do potencial de outorgas, quanto na resolução de conflitos pelo uso da água.

REFERÊNCIAS

ACQUANET. *Manual do AcquaNet 2013 Versão 1*. 2015. Disponível em: <www.labsid.eng.br>. Acesso em: 14 março 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Cadernos de Recursos Hídricos*: Brasília, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Demandas e usos múltiplos. Cadernos de Recursos Hídricos*: Brasília, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Encarte Especial sobre a Crise Hídrica. Informe 2014. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*: Brasília, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Informe 2016*: Brasília, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. 2016. Disponível em: < www.ana.gov.br/>. Acesso em: 10 maio. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Banco de Informações de Geração: BIG*. 2016. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 31 maio 2016.

AGUIAR, V. L. B. *Estimativa de vazão dos cursos d'água que compõem a bacia hidrográfica do rio Todos os Santos: Uma abordagem utilizando Sistemas de Informações Geográficas*. 2014. Monografia (Bacharelado) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, MG, 2014.

ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F.; DANIEL, L. A. Uso de Simulação para Planejamento de um Sistema Hídrico: Estudo de Caso Qualitativo e Quantitativo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 4, p. 209-219, 2006. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v11n4.p209-219>

ALMEIDA, D. L.; BENASSI, R. F. Crise hídrica e de energia elétrica entre 2014-2015 na região sudeste. *Revista Hipótese*, v. 1, n.2, p. 65-76, 2015.

ÁLVAREZ, J. A.; HERNÁNDEZ, J. J. G.; SEGURA, J. M. Un modelo de optimización para el sistema de recursos hidráulicos superficiales Jucar-Turia. *Revista de Obras Públicas*, v. 133, n. 3244, p. 123-132, 1986.

ÁLVAREZ, J. A.; SOLERA, A.; MONTEAGUDO, D. H. 2009. *Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos*. Manual del usuario. Versión 3.0. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2014. 74 p.

ANDREU, J.; CAPILLA, J.; SANCHIS, E. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, n. 177, p. 269-291, 1996. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)

AQUATOOL. *Manual de Usuario Versión 1.0*. 2015. Disponível em: <www.upv.es/aquatool/>. Acesso em: 20 março 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES. *Abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate*. 2013. Disponível em: <www.abes-sp.org.br/arquivos/perdas.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2016.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. 2016. Disponível em: <www.atlasdasaguas.ufv.br>. Acesso em: 16 set. 2016.

AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; PORTO, M. Sistema de Apoio à Decisão para o Gerenciamento Integrado de Quantidade e Qualidade da água: Metodologia e Estudo de Caso. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 3, n. 1, p. 21-51, 1998. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v3n1.p21-51>

BARBOSA, S. E. da S.; BARBOSA JÚNIOR, A. R.; SILVA, G. Q.; CAMPOS, E. N. B.; RODRIGUES, V. C. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do rio do Carmo, Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 01, p. 64-71, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000100008>

BLAINSKI, É.; SILVEIRA, F. A.; CONCEIÇÃO, G.; GARBOSSA, L. H. P.; VIANNA, L. F. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. *Agropecuária Catarinense*, v. 24, n. 1, p. 65-70, 2011.

BRASIL. *Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997*. Disponível: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 30 ago. 2016.

BOF, L. H. N. Análise de critérios de outorga de direito de uso de recursos hídricos. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

BORGES, M. V. S.; ROSA, B. P. Gestão de recursos hídricos no Brasil. *Revista de Direito, Economia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 1, n. 2, p. 124 – 138, 2015.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. *A integração das águas: revelando o verdadeiro aquífero Guarani*. Curitiba: Ed. da Autora, 2011.

CALEGARIO, A. T. Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e comportamento das vazões média e mínima regionalizadas. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2014.

- CELESTE, A. B.; SANTANA, R. F.; SANTOS, W. M. Otimização Estocástica Dinâmica e Implícita para Operação de Reservatório: Estudo de Caso em Sergipe. *Ciência e Natura*, v. 38, n. 1, p. 273–280, 2016. <https://doi.org/10.5902/2179460X17169>
- CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 3, p. 43-51, 2002. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v7n3.p43-51>
- CHÁVEZ-JIMÉNEZA, A.; GONZÁLEZ-ZEAS, D. El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *Revista Iberoamericana del Agua*, v. 2, p 3-13, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>
- CIRILO, J. A. Programação não linear aplicada a recursos hídricos. In: *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recurso Hídricos*. 1. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, v.1, p. 305-359, 1997.
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in Sao Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 1, p. 1-16, 2015a.
- COELHO, C. A. S.; DE OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, A. S.; DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Climate Dynamics*, v. 1, p. 1-16, 2015b.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ARAGUARI – CBH Araguari. *A Bacia do Rio Araguari*. 2016. Disponível em <www.cbharaguari.org.br>. Acesso em: 13 abril 2016.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP. 2016. Disponível em: <www.sabesp.com.br>. Acesso em: 3 jun. 2016.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS – COPASA. 2016. Disponível em: <www.copasa.com.br>. Acesso em: 10 jun. 2016.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. 2016. Disponível em: <www.cemig.com.br>. Acesso em: 14 maio. 2016.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. *Resolução nº 357/05. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional*. Brasília, SEMA, 2005.
- CORDEIRO, R. S.; MARQUES, F. A. Sistematização da sazonalidade das vazões características para flexibilização da outorga de direito de uso dos recursos hídricos. In: *Seminário de Iniciação Científica UFT*. 11 a 14 de Dezembro de 2012, Palmas – Tocantins, Brasil.

COSTA, E. S. *Estudo de otimização do aproveitamento hídrico superficial no alto curso do rio Uberaba, UPGRH-GD8*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2015.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Otimização e Simulação Comparativa de Cenários de Outorga. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 3, p. 75-91, 2005. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n3.p75-91>

CRUZ, M. A. S. Aplicação de geotecnologias a dados SRTM como contribuição à análise morfométrica do rio Japarutuba em Sergipe. In: *III Encontro de Recursos Hídricos de Sergipe*. 24 a 26 de março de 2010, Aracaju – Sergipe, 2010.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. 2016. Disponível em: <www.daee.sp.gov.br/>. Acesso em: 10 jan. 2016.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – DEA. *HIDROTEC*. 2016. Disponível em: <www.dea.ufv.br/>. Acesso em: 17 set. 2016.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO DE UBERLÂNDIA – DMAE. 2016. Disponível em: <www.dmae.mg.gov.br/>. Acesso em: 25 maio. 2016.

DINIZ, A. E. Não há culpado ou inocente. 2015. *Revista Viver Minas*. Disponível: <viverminas.com.br/>. Acesso em: 23 jan. 2016.

ECOPLAN – LUME. 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: Relatório final. Contrato nº 043/2008 – IGAM, 2010.

ELESBON, A. A. A. Utilização de Sistemas de Informação Geográfica na Regionalização de Vazões – Estudo de Caso: Bacias dos Rios Mucuri, Itaúnas e São Mateus. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo. 2004.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. R. Atlas digital das águas de Minas. Viçosa: UFV/RURALMINAS/IGAM, 2005. 78 p.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. Critério de outorga sazonal para a agricultura irrigada no estado de Minas Gerais - Estudo de Caso. *Revista Item - Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília, n. 71/72, p. 42-50, 2006.

EUCLYDES, H. P.; SOUSA, E.F.; FERREIRA, P.A. RH 3.0 – Regionalização hidrológica. (Manual do programa). Viçosa, MG: UFV, DEA; Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS, 1999. 149 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. 2016. Disponível em: <www.embrapa.br/>. Acesso em: 14 ago. 2016.

ESTEVEES, F. A. Fundamentos de limnologia. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FELDMAN, A.D. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000. 158 p.

FERREIRA, A. M. *Capacidade de autodepuração nos cursos médio e baixo do rio Uberaba, UPGRH-GD8*. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.

FIRMINO, M. B. M. *META-F: um modelo de otimização quali-quantitativo para operação de sistemas de recursos hídricos e poluição fluvial*. 2007. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. 2007.

FLUMIGNAN, D. L.; PASTORELLI JÚNIOR, J. H.; MINGOTI, R.; ZOLIN, C. A. Proposta de uso da vazão de referência mensal em substituição à anual no Rio Dourados. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2016.

GIRARDI, R. V.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L.; DORNELLES, F. Proposta de um Método Alternativo para Determinação da Precipitação Média Sobre uma Área Utilizando Distâncias Invertidas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 1, p. 19-31, 2013. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n1.p19-31>

HEINZ, I.; PULIDO-VELAZQUEZ, M.; LUND, J. R.; ANDREU, J. Hydro-economic Modeling in River Basin Management: Implications and Applications for the European Water Framework Directive. *Journal Water Resources Management*, vol. 21, p. 1103- 1125, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9101-8>

HELLER, L.; PADUA, V. L. *Abastecimento de Água para Consumo Humano*. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

HICKEY, J. T.; P. E.; MARCHIA, V. B.; THOMAS, K. P.; KEVIN, A. R.; PAUL, E.; PUGNER, P. E. Reservoir Simulations of Synthetic Rain Floods for the Sacramento and San Joaquin River Basins. *Journal Water Resources Planning and Management*, v. 129, n. 6, p. 443-457, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:6\(443\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:6(443))

HIDROTEC. 2016. Disponível em: <www.hidrotec.ufv.br/>. Acesso em: 17 set. 2016.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER – HEC. 2016. Disponível em: <www.hec.usace.army.mil/>. Acesso em: 25 jun. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. 2016. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 4 maio. 2016.

JARDIM, C. H. A "Crise Hídrica" no Sudeste do Brasil: Aspectos Climáticos e Repercussões Ambientais. *Tamoios*, v. 11, n. 2, p. 67-83, 2015. <https://doi.org/10.12957/tamoios.2015.16517>

JÚNIOR, L. C. P.; NICÁCIO, P. P. S. Demanda hídrica para irrigação por pivôs centrais no estado de Goiás. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 34, n. 3, p. 443-463, 2014.

JÚNIOR, F. J. G. A atuação do poder público municipal na gestão de recursos hídricos. Estudo de caso: Volta Redonda/RJ. *Acta Scientiae et Technicae*, v. 4, n. 1, p. 9-16, 2016.

LABADIE, J.W.; PINELA, A. M.; BODE, D. A. *A network analysis of raw water supplies under complex water rights and exchanges: Documentation for Program MODSIM3*, Colo. Water Resour. Fort Collins: Colorado State University, 1984.

LABADIE, J.W.; HUTCHISON, I. P. G.; FERGUSON, K. A. Allocation of augmented water supply under a priority water rights system. *Water Resources Research*, v. 22, n. 7, p. 1083-1094, 1986. <https://doi.org/10.1029/WR022i007p01083>

LABADIE, J. W., Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 130, n.2, p. 93-111, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(93))

LANDIM, P. M. B. *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. UNESP/Campus de Rio Claro/Departamento de Geologia Aplicada - IGCE — Laboratório de Geomatemática — Texto Didático 02, 2000.

LEME, E. J. A.; CHAUDHRY, F. H. Vazão Mínima do Vale Médio do Rio Jaguari Mirim. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 127-136, 2005. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p127-136>

LIMA, G. *Aplicação de simulação computacional na análise dos conflitos entre os usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia no estado de São Paulo*. 2002. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2002.

LIMA, C. A. G. *Análise e sugestões para diretrizes de uso das disponibilidades hídricas superficiais da bacia hidrográfica do rio Piancó, situada no estado da Paraíba*. 2004. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. 2004.

LIMA, J. A.; DAMBROS, M. V. R.; ANTONIO, M. A. P. M.; JANZEN, J. G.; MARCHETTO, M. Potencial da economia de água potável pelo uso de água pluvial: análise de 40 cidades da Amazônia. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 16, n. 3, p. 291-298, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000300012>

LONGHI, E. H.; FORMIGA, K. T. M. Metodologias para determinar vazão ecológica em rios. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 20, p. 33-48, 2011.

MAIA, J. L. *Técnicas para o gerenciamento quanti-qualitativo de reservatórios com usos múltiplos da água: estudo de caso do reservatório de Barra Bonita-SP*. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2009.

MAS, A.G.C. Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía. Proyecto Final de Carrera. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 147 p., 2013.

MAUAD, F. F.; *Planejamento Integrado de Recursos Hidroenergéticos: O Confronto de Usos Múltiplos da Água no Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva em Portugal*. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2000.

MEDEIROS, P. C.; SOUZA, F. A. S.; RIBEIRO, M. M. R. Aspectos conceituais sobre o regime hidrológico para a definição do hidrograma ambiental. *Ambi-Agua*, v. 6, n. 1, p. 131-147, 2011. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.179>

MINAS GERAIS. *Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1.548*, de 29 de março 2012.

MINAS GERAIS. *Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999*. Disponível: <www.siam.mg.gov.br>. Acesso em: 20 agos. 2016.

MITAS, L.; MITASOVA, H. Spatial Interpolation. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. (Eds.). *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Wiley, 1999. p. 481-492.

MODSIM-DSS. *User Manual*. 2011. Disponível em: <modsim.engr.colostate.edu>. Acesso em: 25 março 2016.

MORAES, M. M. G. A.; SAMPAIO, Y.; CIRILO, J. A.; CAI, X. Modelo Econômico Hidrológico Integrado para Gestão de Bacias Hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n. 1, p. 43-55, 2008. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p43-55>

MOREIRA, M. C. *Gestão e planejamento dos recursos hídricos: regionalização de vazões e proposição de índices para identificação de conflitos pelo uso da água*. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2010.

MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. Análise de Métodos para Estimativa das Vazões da Bacia do Rio Paraopeba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p. 313-324, 2014. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n2.p313-324>

NASCIMENTO, L. P. *Análise morfométrica e determinação de regiões fisicamente homogêneas na bacia do rio Doce (MG/ES)*. 2013. Monografia (Graduação em Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Minas Gerais, Governador Valadares, Minas Gerais. 2013.

OLIVEIRA, J. R. S. *Otimização do aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na bacia do ribeirão Entre Ribeiros*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

OLIVEIRA, J. R. de; PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A. Otimização do aproveitamento da disponibilidade de Águas Superficiais na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 4, 157-172, 2013. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n4.p157-172>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. *The United Nations World Water Development Report 2016*. 2016. Disponível em <www.unwater.org>. Acesso em 18 jun. 2016.

OTTO, F.E.L.; COELHO, C.A.S.; KING, A.; COUGHLAN DE PEREZ, E.; WADA, Y.; VAN OLDENBORGH, G.J.; HAARSMA, R.; HAUSTEIN, K.; UHE, P.; VAN AALST, M.; ARAVEQUIA, J.A.; ALMEIDA, W.; CULLEN, H. Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in Southeast Brazil. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, n. 12, p. 35-40, 2015. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00120.1>

PAREDES-ARQUIOLA, J.; SOLERA, A.; MARTINEZ-CAPEL, F.; MOMBLANCH, A.; ANDREU, J. Integrating water management, habitat modelling and water quality at the basin scale and environmental flow assessment: case study of the Tormes River, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, v. 59, n. 3-4, p. 878-889, 2014a. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.821573>

PAREDES-ARQUIOLA J.; SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J. A.; ELVIRA, N. L. *Herramienta EvaluHid para la evaluación de recursos hídricos*. Versión 1.1. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2014b. 52 p.

PAREDES-ARQUIOLA, J.; ÁLVAREZ, J. A.; SOLERA, A. 2009. *AQUATOOL +: Entorno de desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión en materia de planificación de la gestión de cuencas hidrográficas incluyendo utilización conjunta y criterios de calidad de aguas. Manual del usuario*. Versión 1.0. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2015. 81 p.

PELLICER-MARTÍNEZ, F.; MARTÍNEZ-PAZ, F. J. M. Grey water footprint assessment at the river basin level: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain. *Ecological Indicators*, v. 60, p. 1173-1183, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.032>

PINTO, L. C.; MACHADO, E. F. P.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Análise de distribuições de probabilidades e estimativa da $Q_{7,10}$ para a região do rio Itabapoana, Espírito Santo/Rio de Janeiro. In: *XIX Congresso de pós-graduação da UFLA*. 27 de Setembro a 01 de Outubro de 2010, Lavras – Minas Gerais, Brasil.

PINTO, V. G.; RIBEIRO, C. B. M.; SILVA, D. D. Vazão ecológica e o arcabouço legal brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 1, p. 091-109, 2016.

PIZA, M. W. T.; BUENO, O. C.; PIZA, F. J. B. T. A crise hídrica de 2014 e seus reflexos. In: *5ª Jornada Científica e Tecnológica da FATEC de Botucatu*. 24 a 27 de Outubro de 2016, Botucatu – São Paulo, Brasil.

PONNAMBALAM, K.; ADAMS, B. J. Stochastic optimization of multireservoir systems using a heuristic algorithms: Case study from India. *Water Resources Research*, v. 32, n. 3, p. 733-741, 1996. <https://doi.org/10.1029/95WR03484>

PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; DA SILVA, L. M. C.; DA SILVA, J. M. A.; REGO, F. S.; JUSTINO, F. B. Impact of the substitution of reference annual streamflow by monthly streamflow on the potential use of water resources. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 3, p. 496-509, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000300013>

QUEIROZ, M. M. F.; SAMPAIO, S. C.; LEMOS, GOMES, B. M.; IOST, C. Estudo de vazões mínimas $Q_{1,10}$ e $Q_{7,10}$ de rios do Paraná segundo distribuição generalizada. *Revista Verde*, Mossoró,

v. 5, n. 3, p. 32-46, 2010.

RIGHETTO, A. M., FILHO, J. A. G., Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 8, n. 2, p. 19-29, 2003. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n2.p19-29>

RODRIGUES, R. B. *SSD RB - Sistema de suporte a decisão proposto para a gestão quali-quantitativa dos processos de outorga e cobrança pelo uso da água*. 2005. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA, J.; SOLERA, A.; ALVARÉZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. de. Variabilidade em produção de energia hidrelétrica na bacia hidrográfica do rio Araguari, Minas Gerais. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 17 a 22 de Novembro de 2013, Bento Gonçalves – Rio Grande do Sul, Brasil.

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA J.; SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. Integrated modeling of water quantity and quality in the Araguari River basin, Brazil. *Latin American Journal of Aquatic Research*, Valparaíso, v. 42, n. 1, p. 224-244, 2014a. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue1-fulltext-19>

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA J.; SOLERA, A.; ALVARÉZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. de. Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 189-204, 2014b. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p189-204>

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA J.; ELVIRA, N. L.; ALAMY FILHO, J. E.; COSTA, E. S. Aplicação da ferramenta EvalHid para calibração de parâmetros e simulação de vazões no alto curso do rio Araguari, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 19, n.1. p. 189-204, 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p189-204>

SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C.; VIEIRA, A. S. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 4, p. 49-60, 2011. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p49-60>

SCHARDONG, A.; JÚNIOR, A. V. M.; ROBERTO, A. N.; PORTO, R. L. L. Desempenho do modelo AcquaNetXL na alocação de água em sistemas de recursos hídricos complexos. *Engenharia Agrícola*, v. 29, n. 4, p. 705-715, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000400021>

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – SEMAD. 2016. Disponível em: <www.semاد.mg.gov.br>. Acesso em: 14 fev. 2016.

SILVA, A. M.; OLIVEIRA, P. M.; MELLO, C. R.; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 374-380, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200019>

SILVA, D. D.; MARQUES, F. A.; LEMOS, A. F. Avaliação de metodologias de regionalização

de vazões mínimas de referência para bacia do rio São Francisco. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v. 17, n. 5, p. 392-403, 2009. <https://doi.org/10.13083/1414-3984.v17n05a07>

SILVA, D. D.; MARQUES, F. A.; LEMOS, A. F. Flexibilidade das vazões mínimas de referência com a adoção do período trimestral. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 244-254, 2011.

SILVA, F. C. Análise Integrada de Usos de Água Superficial e Subterrânea em Macro-escala numa Bacia Hidrográfica: o caso do Alto Rio Paranaíba. 2007. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.

SILVA, V. S. V. *Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo concentrado chuva-vazão*. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

SILVEIRA, A.; MOURA, R. M. P.; ANDRADE, N. L. R. Determinação da $Q_{7,10}$ para o rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil e comparação com a vazão regularizada após a implantação do reservatório de aproveitamento múltiplo de Manso. In: *XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 26 a 30 de Novembro de 2006, Punta del Este – Uruguai.

SIMÕES, J.; OLIVEIRA, R. P. Modelos de gestão de bacias hidrográficas: aplicação do IRAS-2010 e do AQUATOOL ao aproveitamento hidroagrícola do Vale do Sorraia. *Recursos Hídricos*, v. 35, n. 2, p. 29-39, 2014. <https://doi.org/10.5894/rh35n2-3>

SOARES, A. *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2000.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surfasse water: the state of the Science. *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 52-67, 2002. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>

SOSINSKI, L.W. *A gestão dos usos múltiplos da água*. 2010. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <www.infobibos.com/Artigos/2010_1/agua/index.htm>. Acesso em: 17 nov. 2016.

SOUZA, J. R.; MORAES, M. E. B.; SONODA, S. L.; SANTOS, H. C. R. G. A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. *Revista Eletrônica do Prodepa*, v. 8, n. 1, p. 26-45, 2014.

SOUZA, H. T.; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; CECON, P. R.; SOUZA, J. R. C. SisCAH 1.0 Sistema Computacional para Análises Hidrológicas. Viçosa: Ed. Universidade Federal de Viçosa, 2009.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, 2002.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. *Usos e impactos dos recursos hídricos*. São Paulo: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

VESTENA, L. R.; OLIVEIRA, E. D.; CUNHA, M. C.; THOMAZ, E. L. Vazão ecológica e disponibilidade hídrica na bacia das Pedras, Guarapuava-PR. *Ambi-Agua*, v. 7, n. 3, p. 212-227, 2012. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.840>

VIEIRA, A. S. *Um modelo de simulação, via programação linear sequencial, para sistema de recursos hídricos*. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007.

VIEIRA, A. S.; SANTOS, V. S; CURI, W. F. Escolhas das regras de operação racional para subsistema de reservatórios no semiárido nordestino. *Engenharia Ambiental: pesquisa e tecnologia*, v. 7, n. 1, p. 037-050, 2010.

VIEIRA, A. S. *Modelo de simulação quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento integrado dos sistemas de recursos hídricos*. 2011. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. 2011.

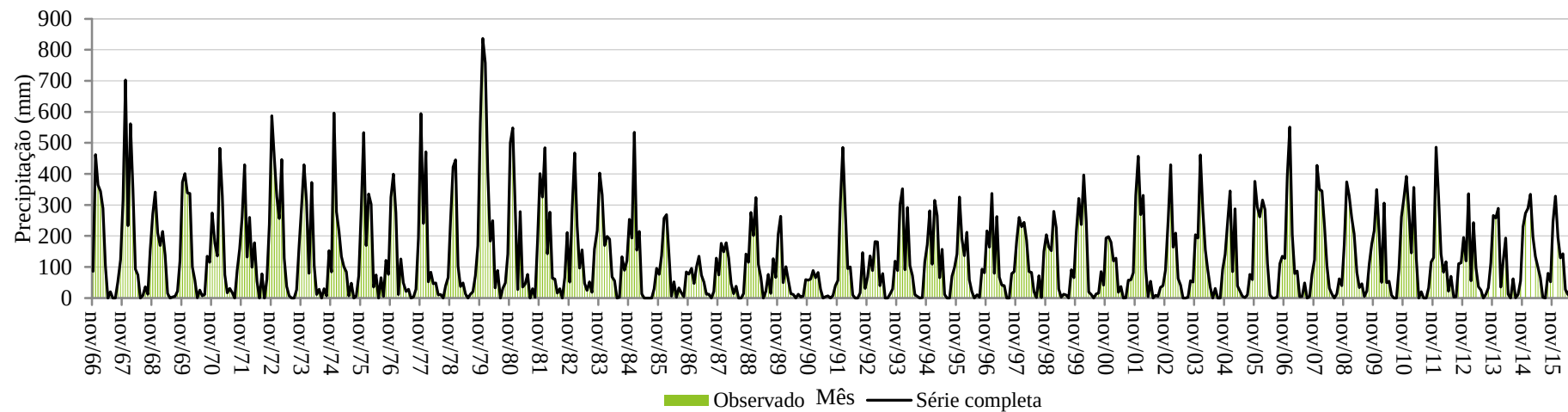
VIEIRA, A. S.; CURI, W. F. Evidenciação dos modelos de simulação e técnicas para o planejamento integrado dos sistemas hídricos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 5, n. 1, p. 233-266, 2016. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v5e12016233-266>

VON SPERLING, M. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2007.

YANCHEVA, S.; TEMELKOVA, M. Application of MODSIM Software to the Operation of a Real Bulgarian Water Resources System. Institute of Water Problems at Bulgarian Academy of Sciences Sofia, BULGARIA. (2006).

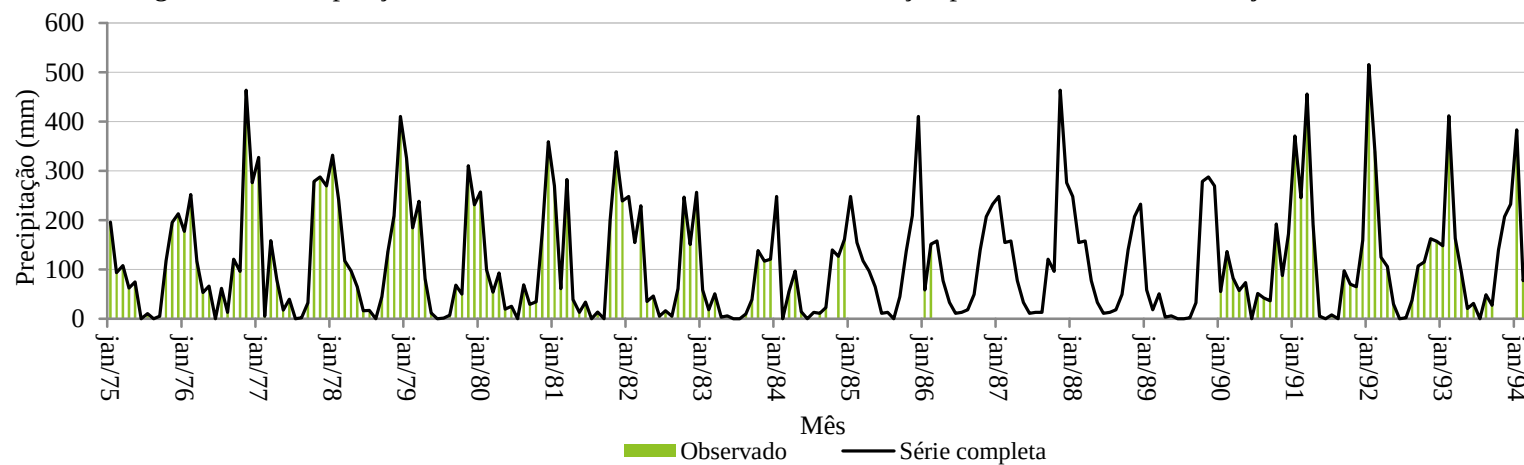
Apêndice A

Figura 93 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1846002 – nov/66 a set/16



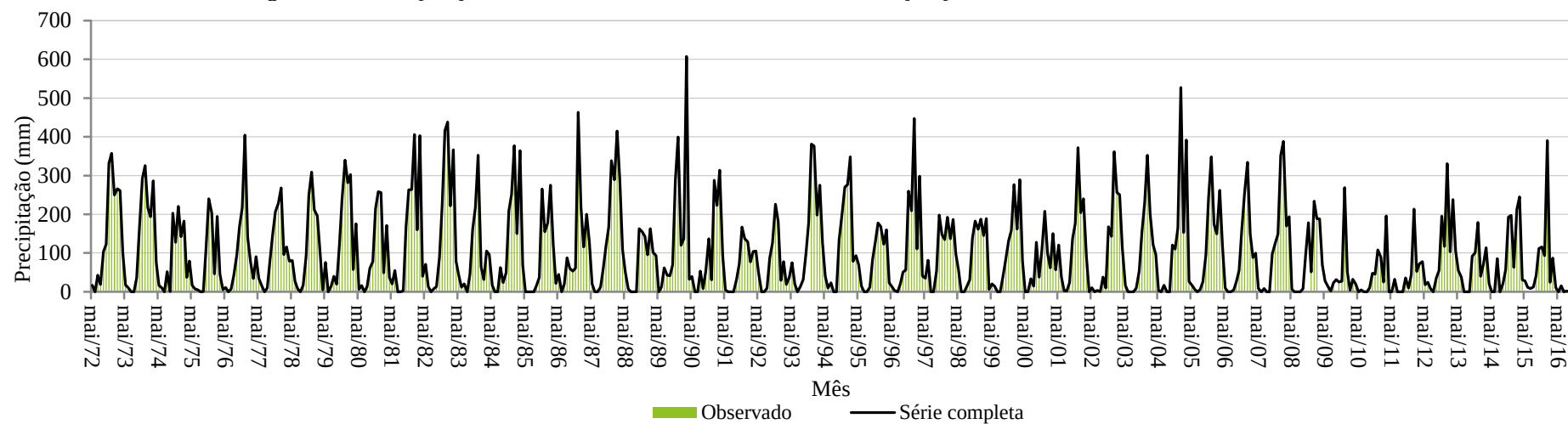
Fonte: Autor (2017).

Figura 94 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1847018 – jan/75 a mar/94



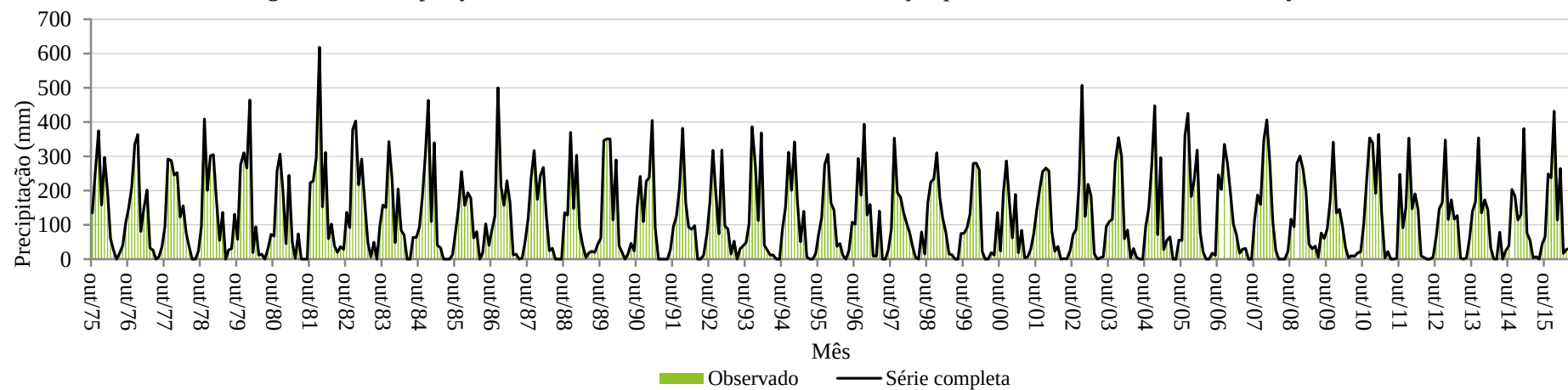
Fonte: Autor (2017).

Figura 95 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1848007 – mai/72 a set/16



Fonte: Autor (2017).

Figura 96 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1848009 – out/75 a jun/16



Fonte: Autor (2017).

Figura 97 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1848010 – dez/74 a jun/16

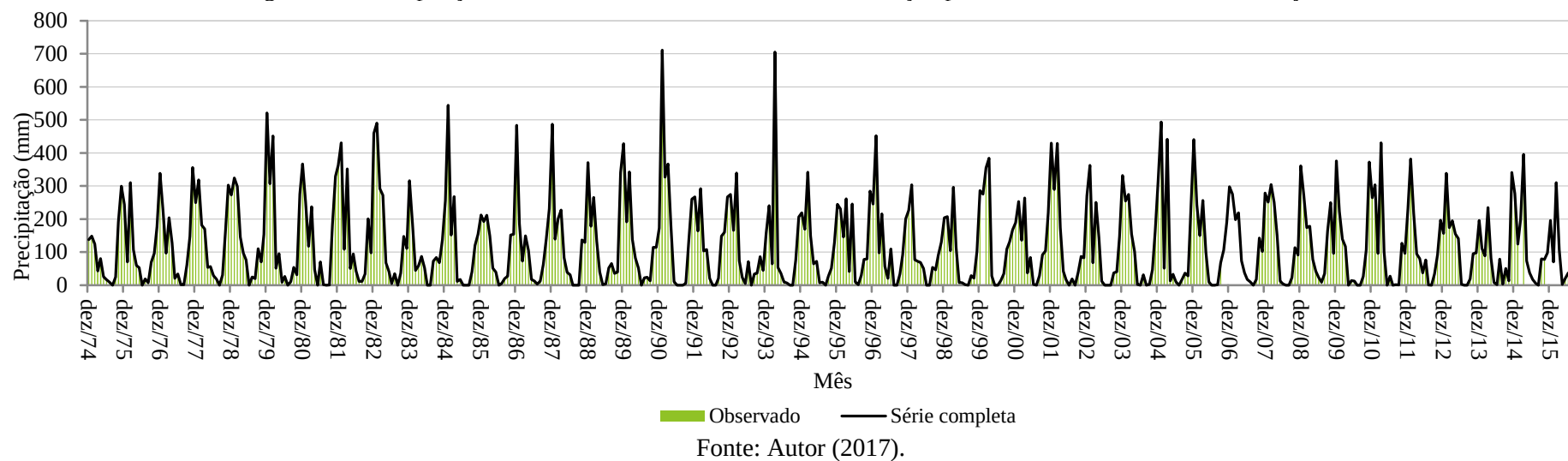


Figura 98 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1848049 – dez/80 a dez/98

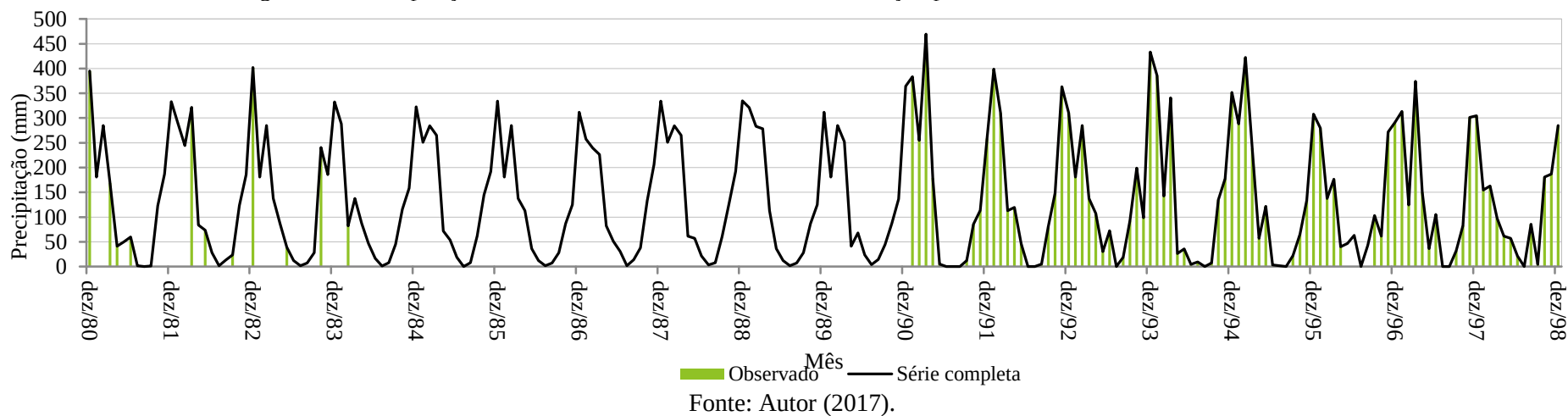


Figura 99 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946008 – jan/75 a set/16

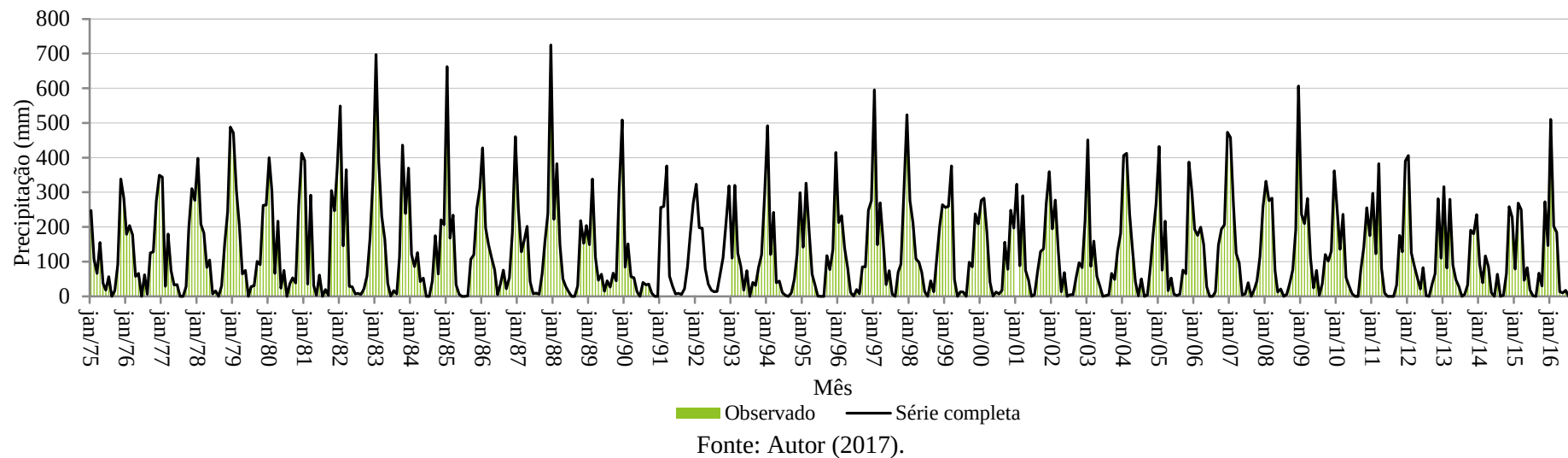


Figura 100 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946009 – jan/75 a jan/16

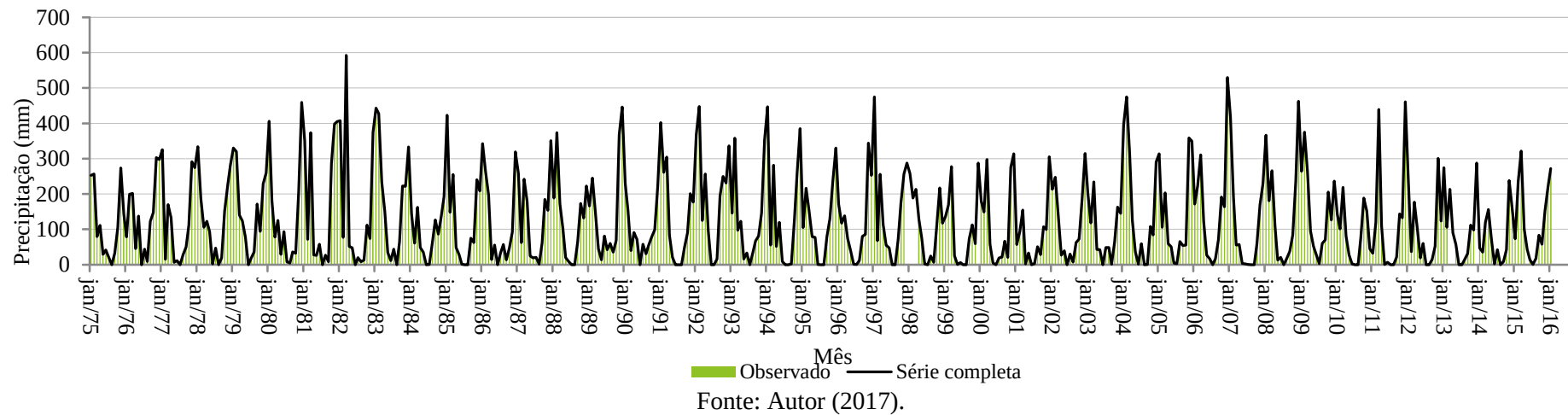


Figura 101 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1948006 –abr/74 a jun/16

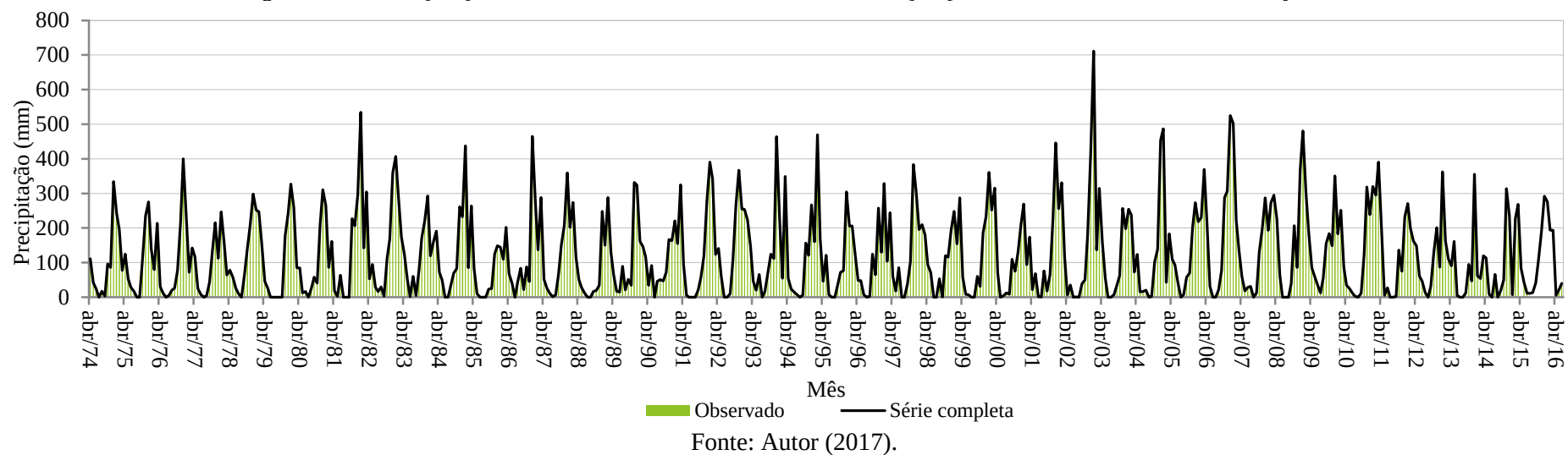


Figura 102 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946010 – jan/75 a jun/16

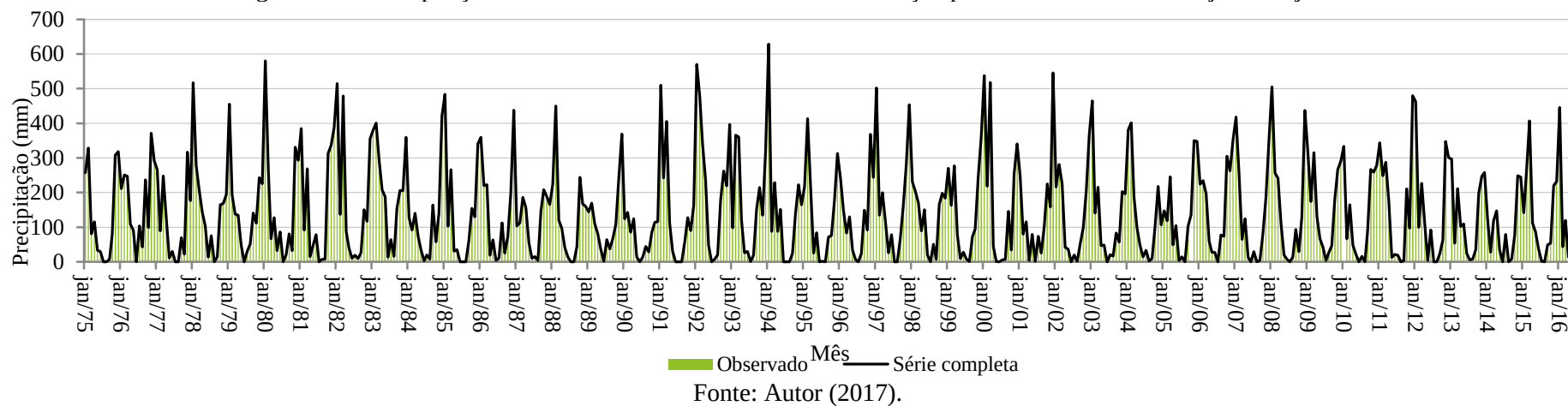


Figura 103 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946015 – jan/75 a dez/98

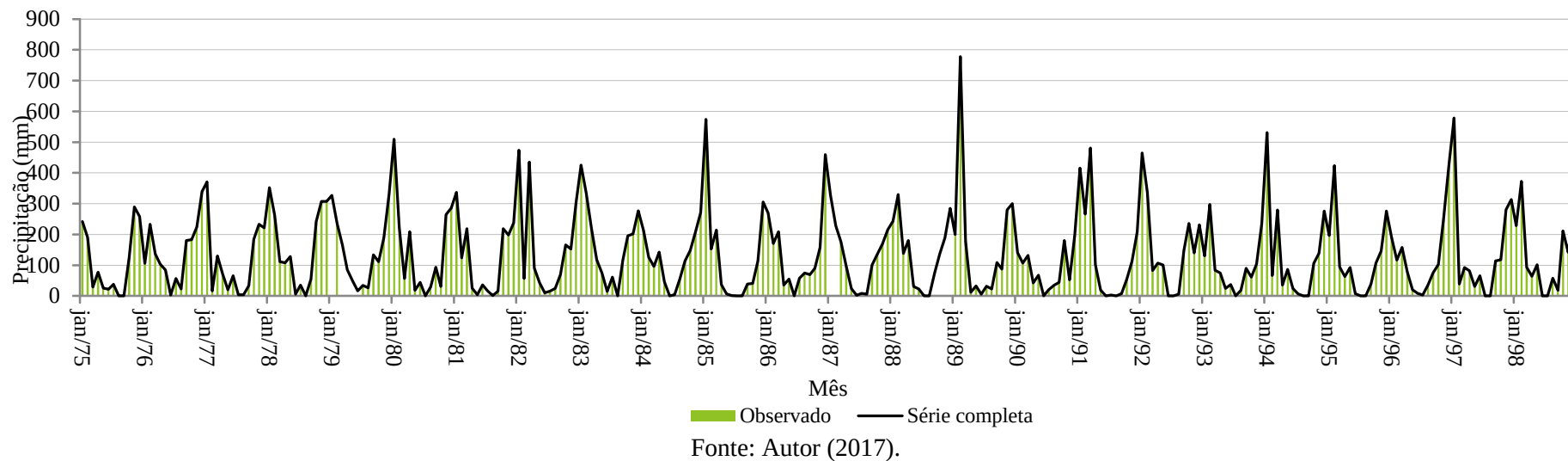


Figura 104 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1946018 – jan/00 a ago/16

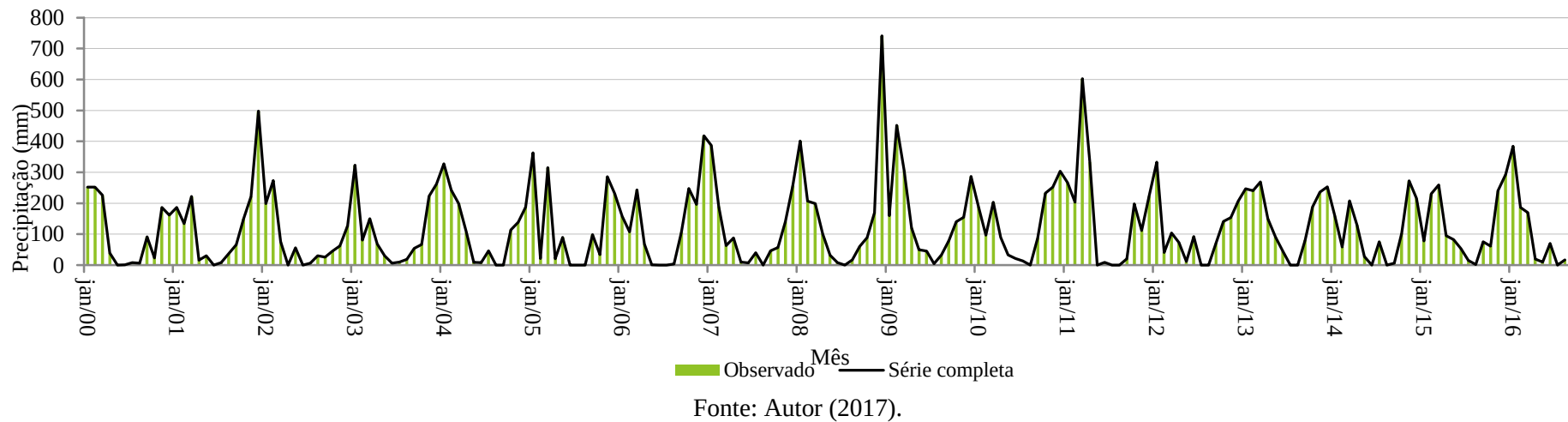


Figura 105 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1947006 – nov/77 a jul/16

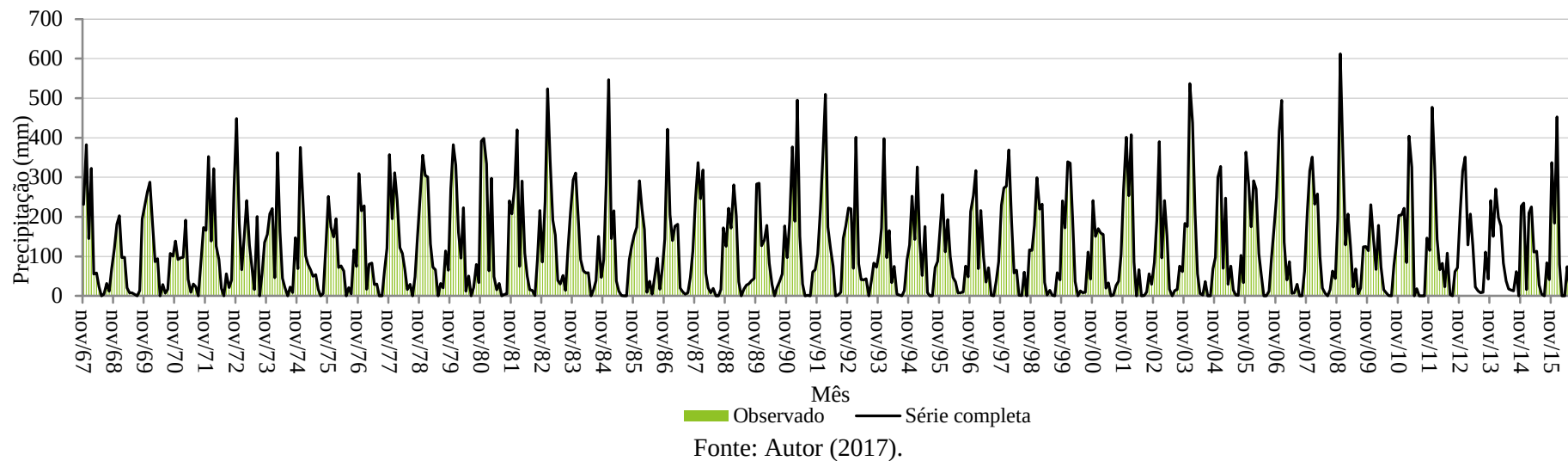


Figura 106 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1947026 – ago/00 a set/16

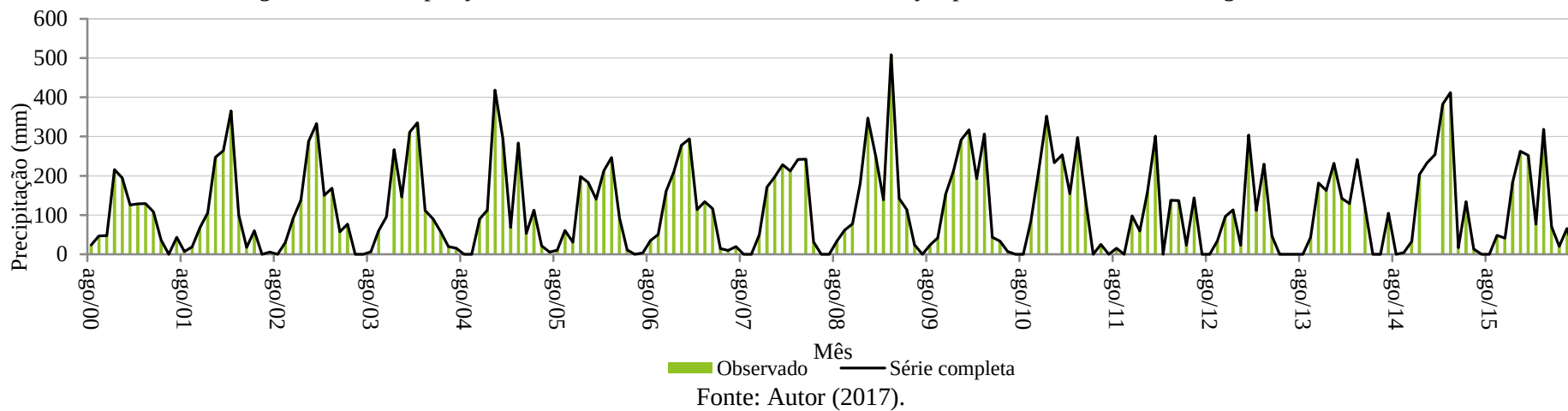
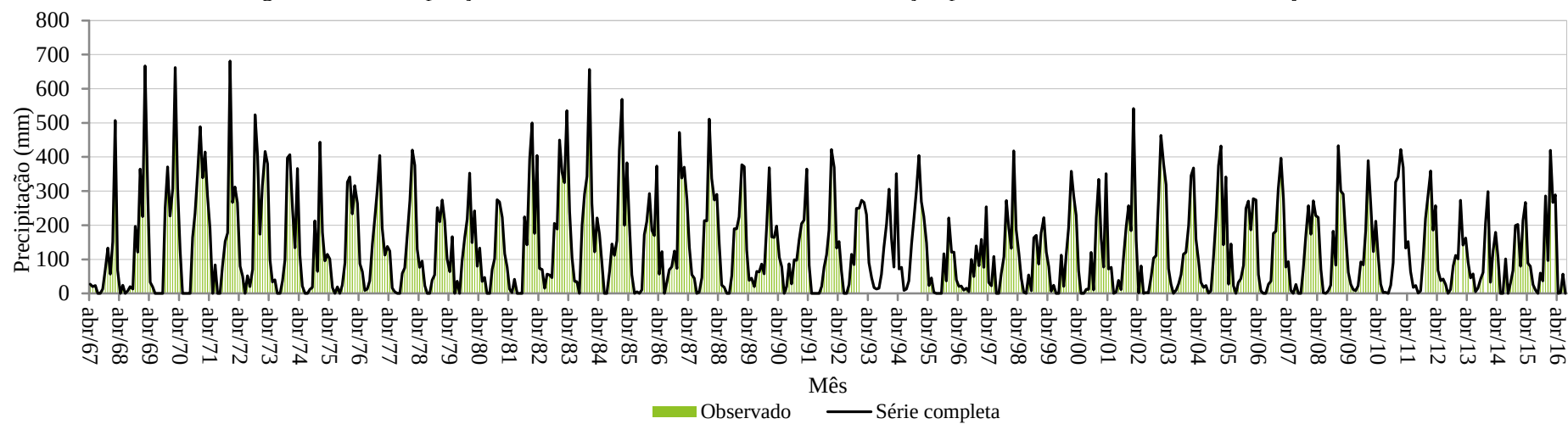


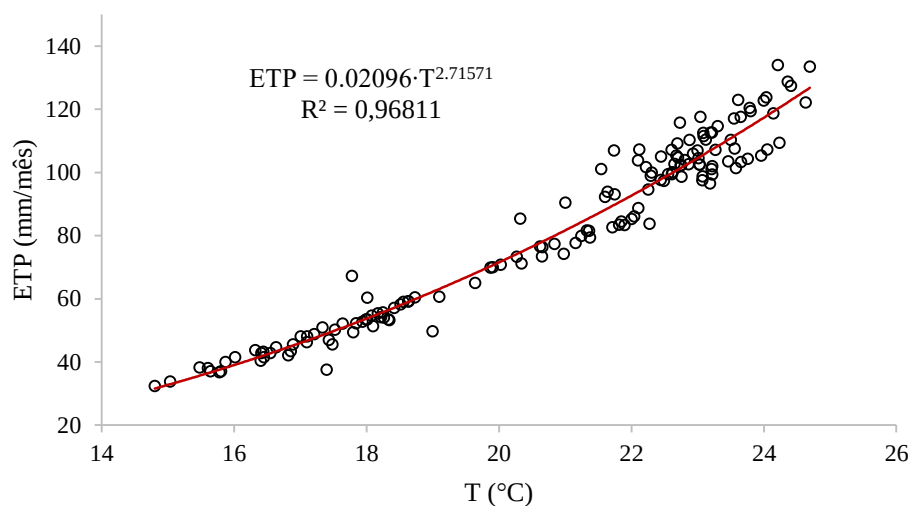
Figura 107 – Precipitações mensais observadas e simuladas na estação pluviométrica 1948005 – abr/67 a jul/16



Fonte: Autor (2017).

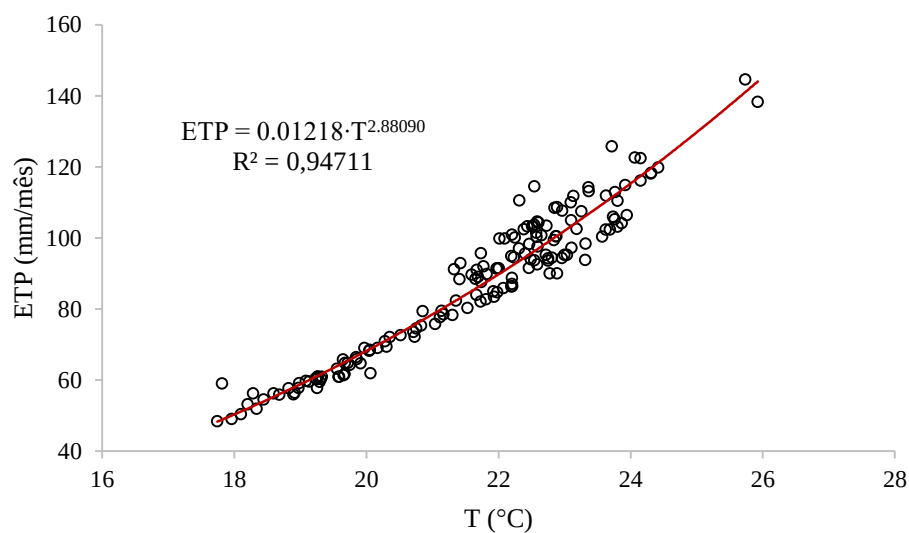
APÊNDICE B

Figura 108 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83582



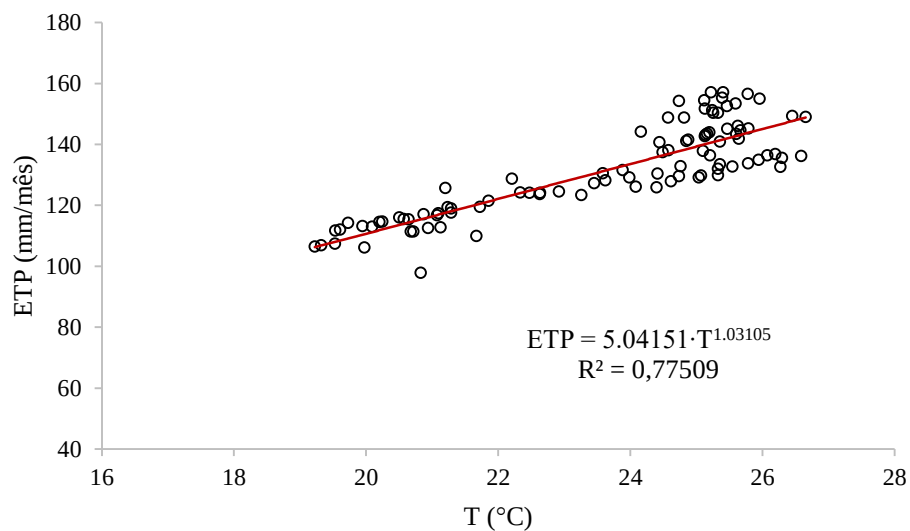
Fonte: Autor (2017).

Figura 109 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83531



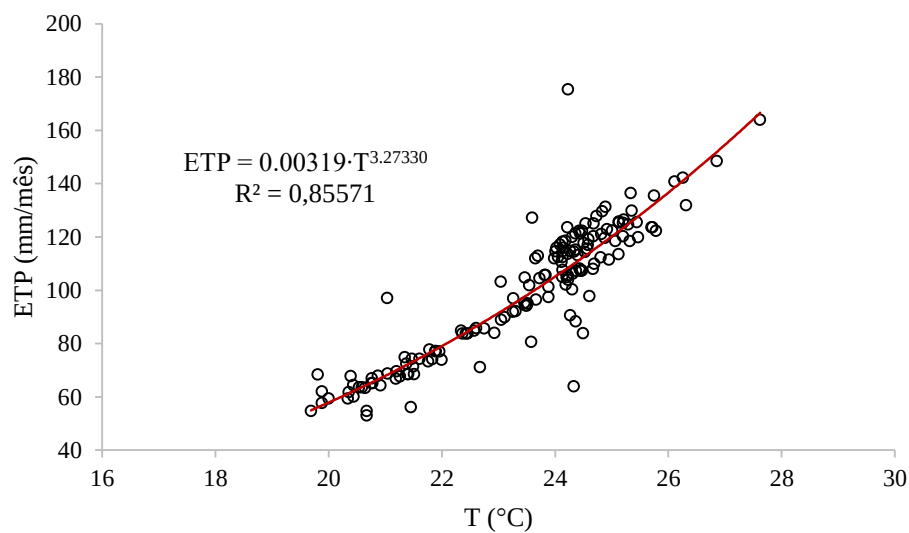
Fonte: Autor (2017).

Figura 110 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83521



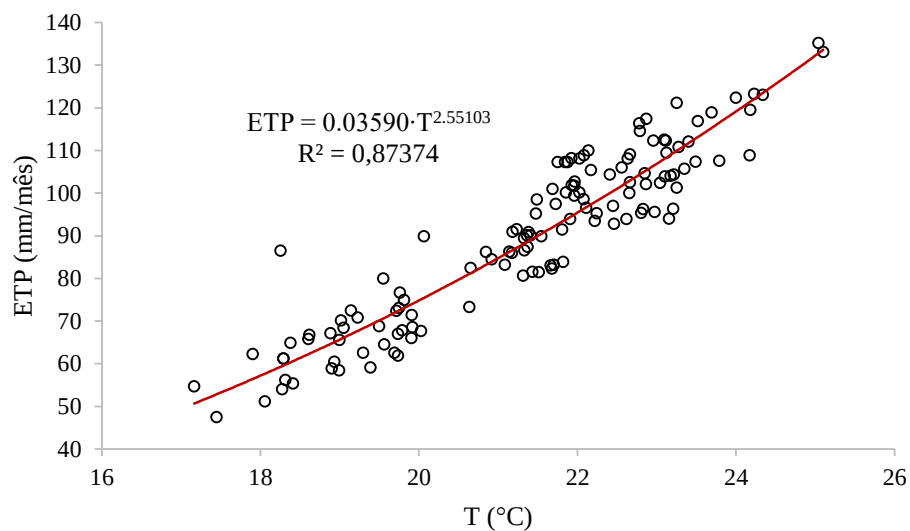
Fonte: Autor (2017).

Figura 111 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83514



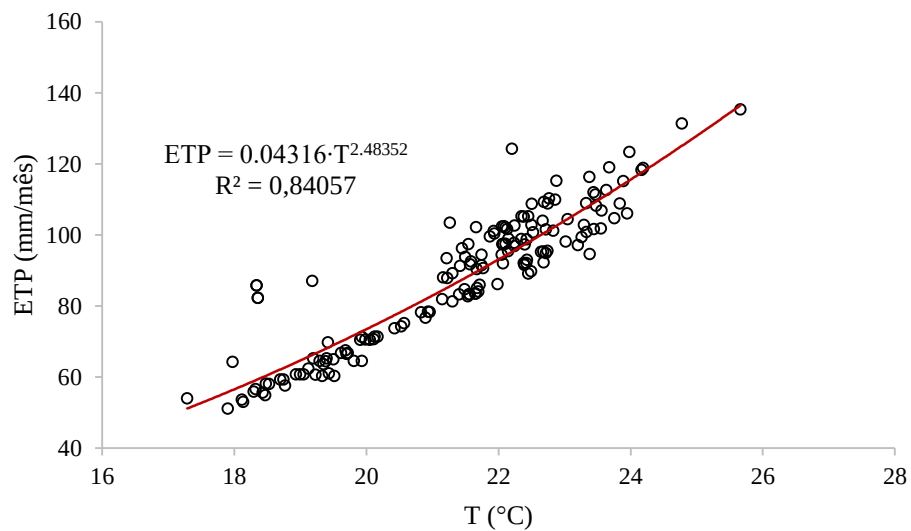
Fonte: Autor (2017).

Figura 112 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83630



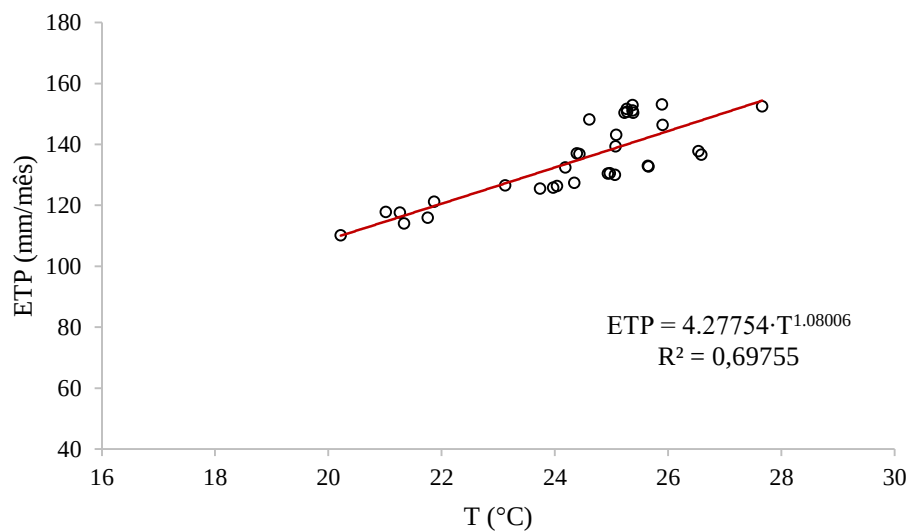
Fonte: Autor (2017).

Figura 113 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83579



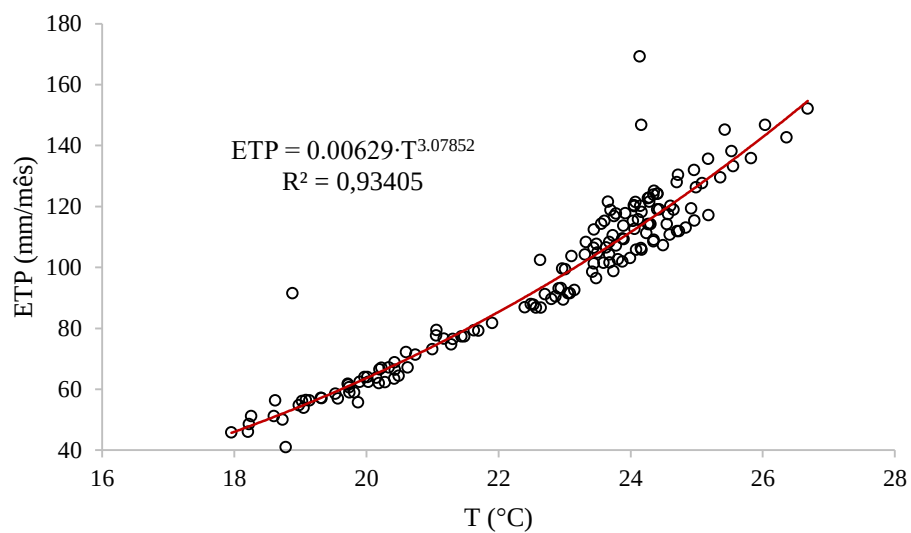
Fonte: Autor (2017).

Figura 114 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83523



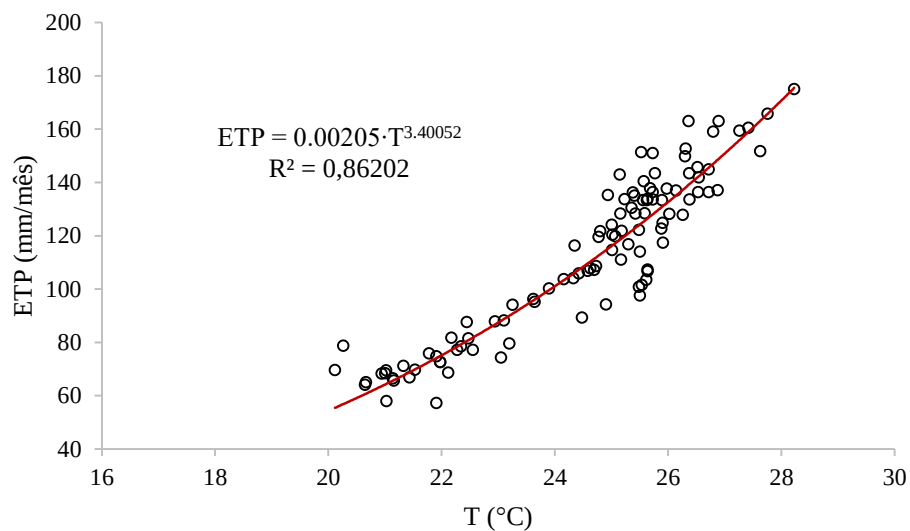
Fonte: Autor (2017).

Figura 115 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83577



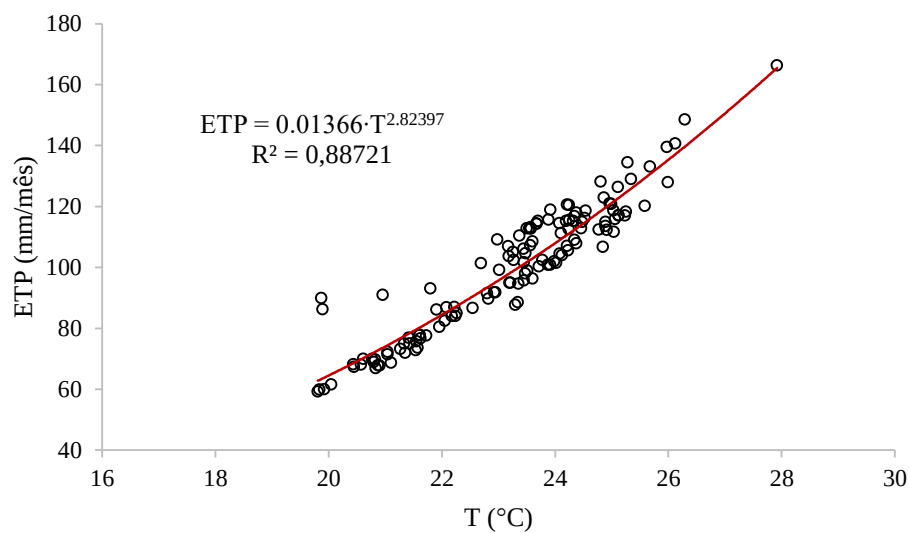
Fonte: Autor (2017).

Figura 116 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83574



Fonte: Autor (2017).

Figura 117 – Função potencial obtida para preenchimento dos períodos falhos de evapotranspiração da estação 83526



Fonte: Autor (2017).

APÊNDICE C

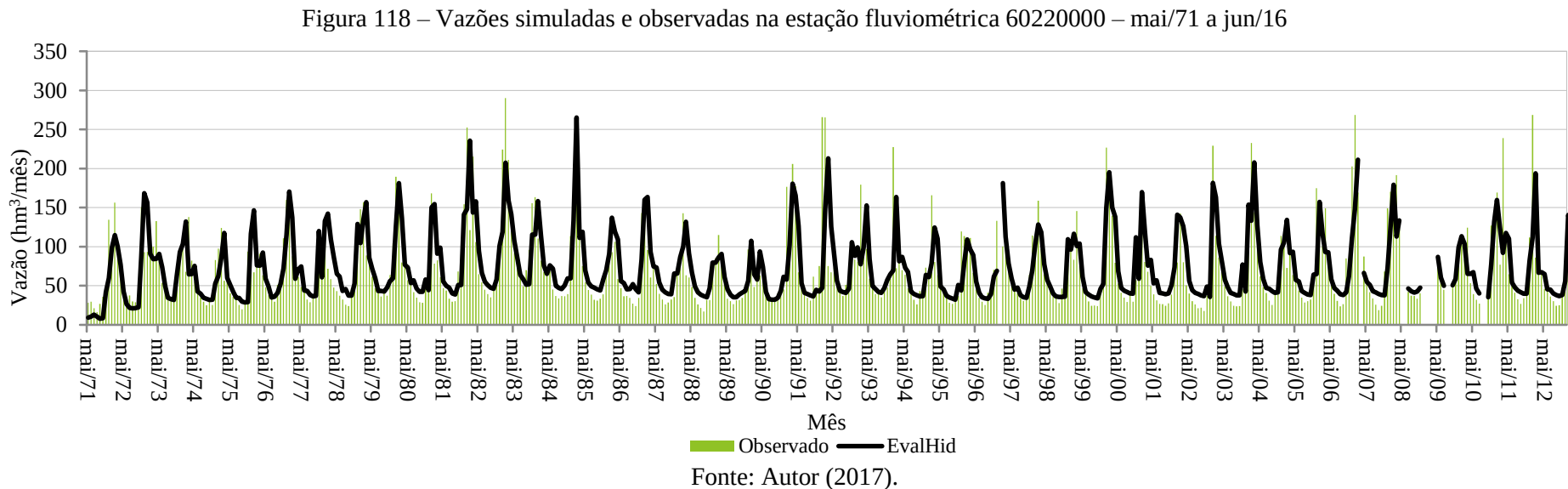
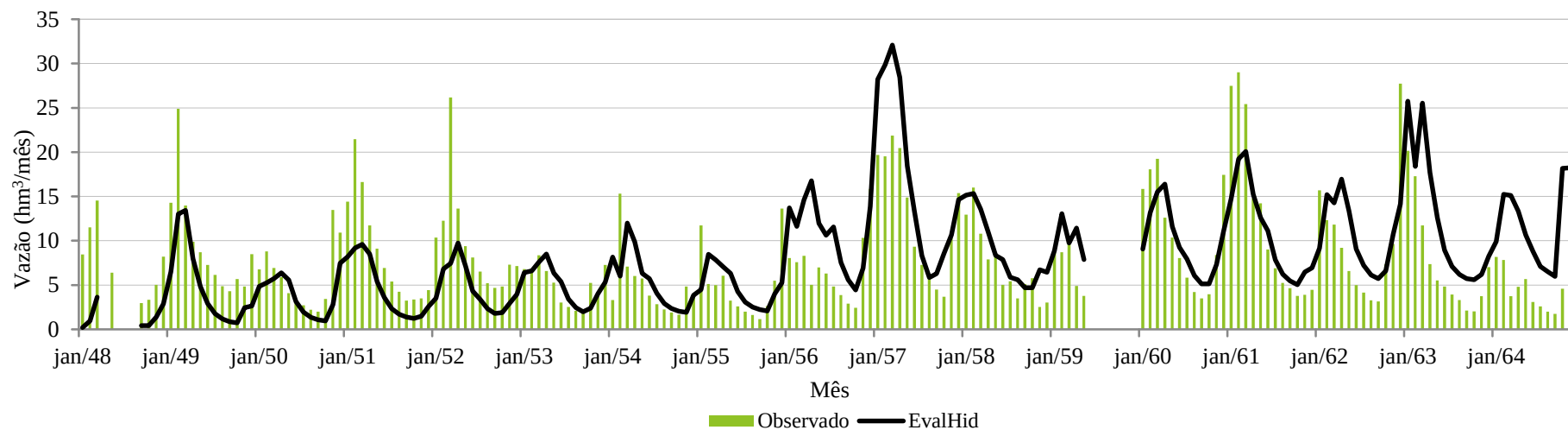


Tabela 9– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.000197562
FC (mm)	219.41129
PWP (mm)	81.25502252
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	0.022980162
K_0 (dia ⁻¹)	0.123848501
K_1 (dia ⁻¹)	0.335031324
K_2 (dia ⁻¹)	0.038831651
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.515354214
$F_{\text{média}}$	0.693874280

Fonte: Autor (2017).

Figura 119 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60285000 – jan/48 a dez/64



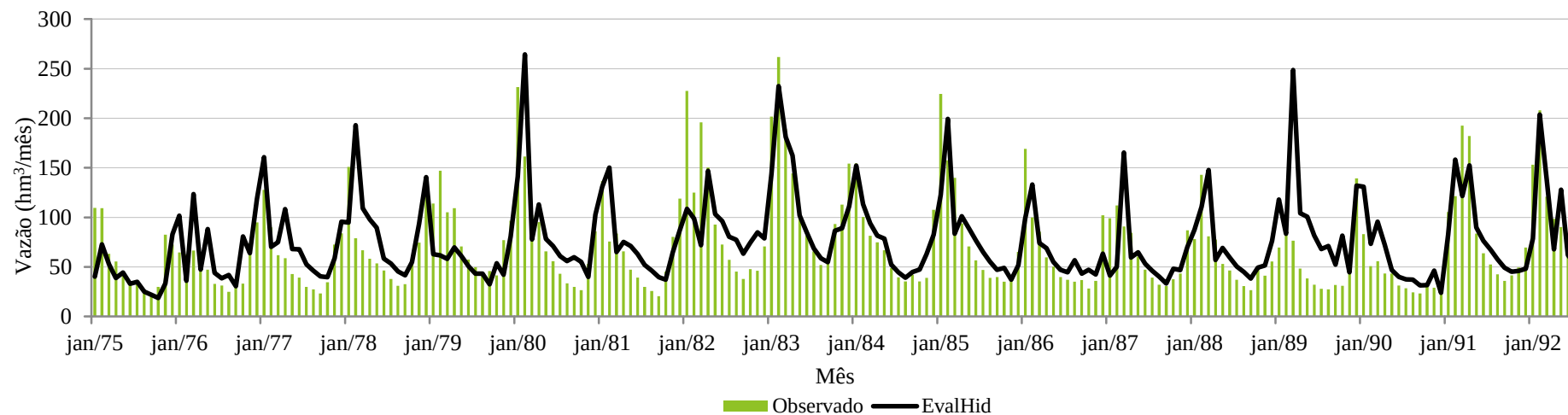
Fonte: Autor (2017).

Tabela 10– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.00000999
FC (mm)	649.3421086
PWP (mm)	590.0150592
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	0.000452649
K_0 (dia ⁻¹)	0.126427476
K_1 (dia ⁻¹)	0.035527345
K_2 (dia ⁻¹)	0.003172529
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.344052107
$F_{\text{média}}$	0.429304105

Fonte: Autor (2017).

Figura 120 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60300000 – jan/75 a jul/92



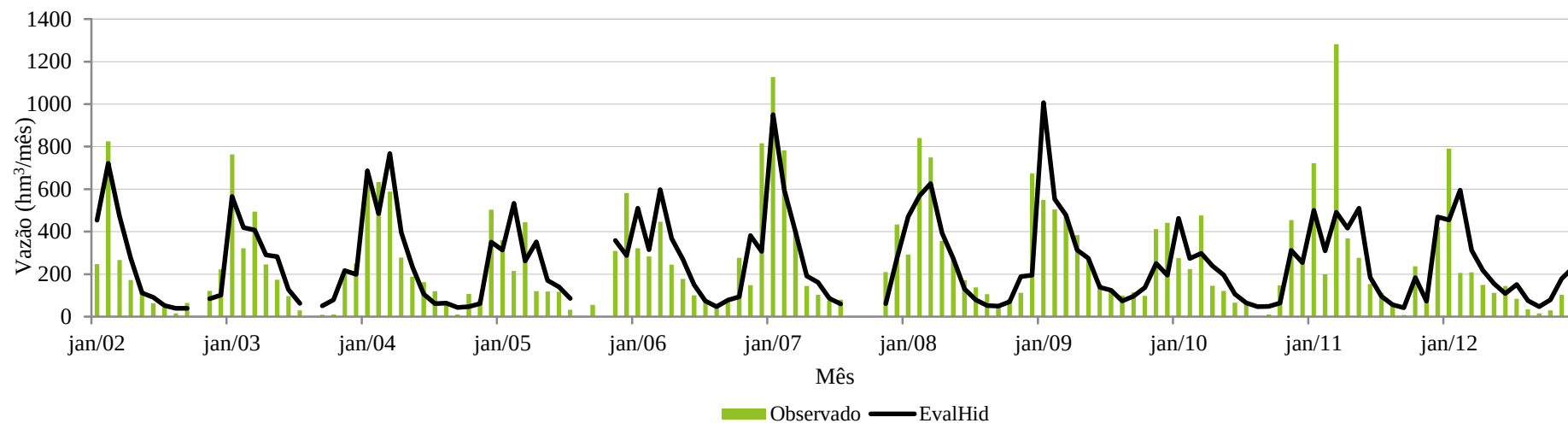
Fonte: Autor (2017).

Tabela 11– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.000404332
FC (mm)	648.4918681
PWP (mm)	261.5066706
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	0.069653154
K_0 (dia ⁻¹)	0.49052044
K_1 (dia ⁻¹)	0.399581541
K_2 (dia ⁻¹)	0.149004299
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.99959151
$F_{\text{média}}$	0.656900097

Fonte: Autor (2017).

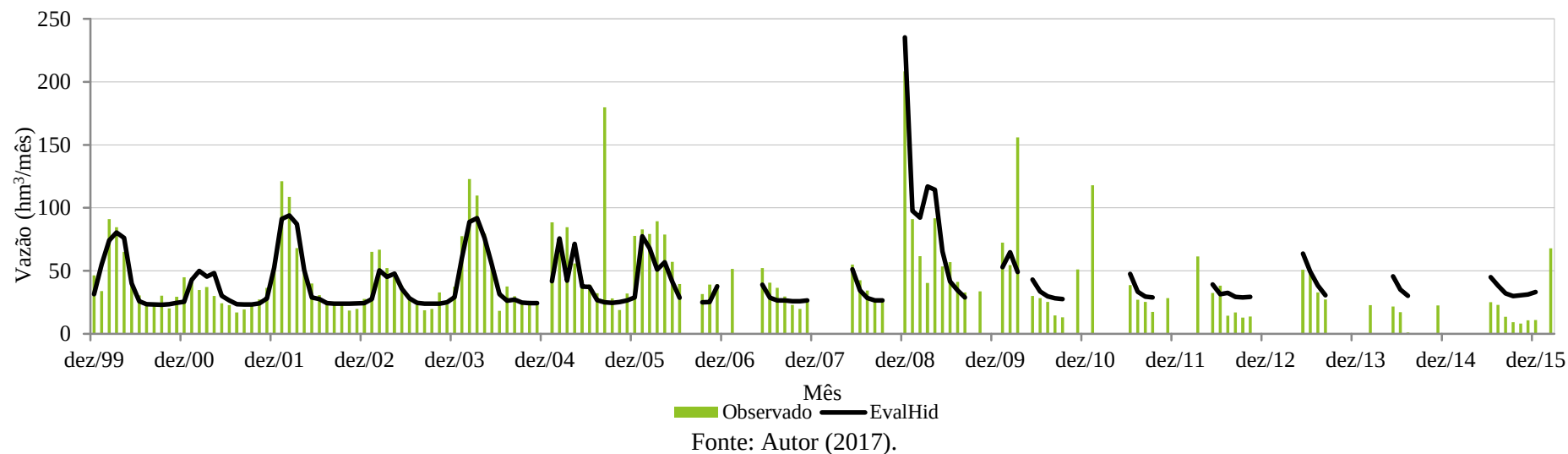
Figura 121 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60320005 – jan/02 a nov/15

Tabela 12– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.847970455
FC (mm)	81.01164597
PWP (mm)	473.1677937
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	8.717287679
K_0 (dia ⁻¹)	0.34629868
K_1 (dia ⁻¹)	0.231035566
K_2 (dia ⁻¹)	0.0478669
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.118887967
$F_{\text{média}}$	0.725562874

Fonte: Autor (2017).

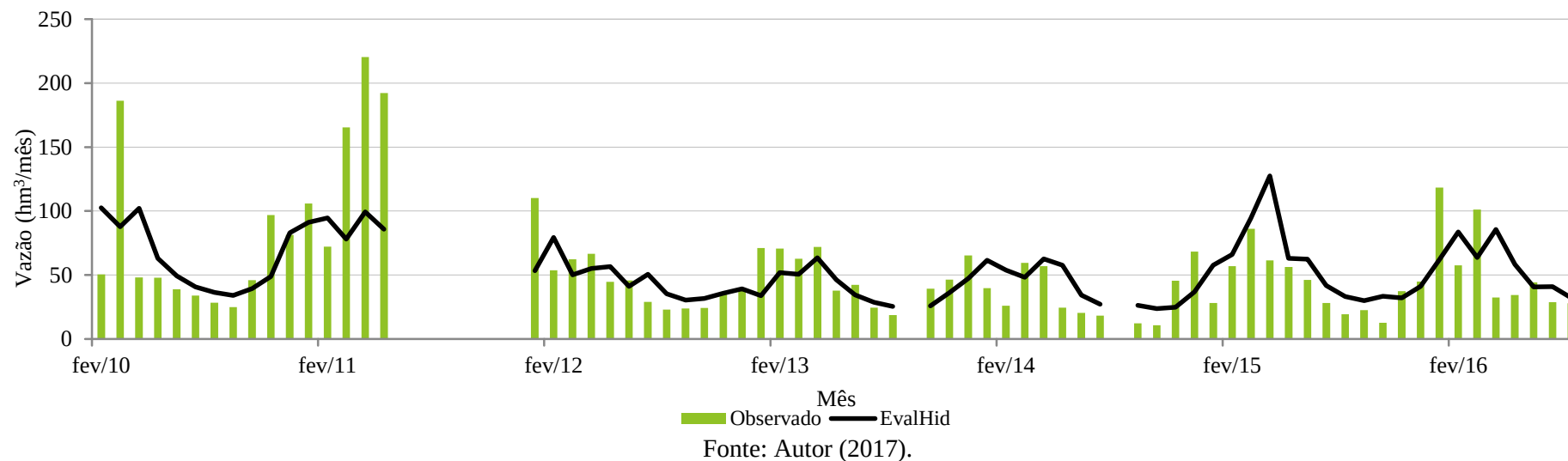
Figura 122 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60230000 – dez/99 a fev/16

Tabela 13– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.43905451
FC (mm)	383.5143855
PWP (mm)	134.0694853
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	2.295976218
K_0 (dia ⁻¹)	0.081260757
K_1 (dia ⁻¹)	0.160426801
K_2 (dia ⁻¹)	0.001845133
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.587639502
$F_{\text{média}}$	0.663595264

Fonte: Autor (2017).

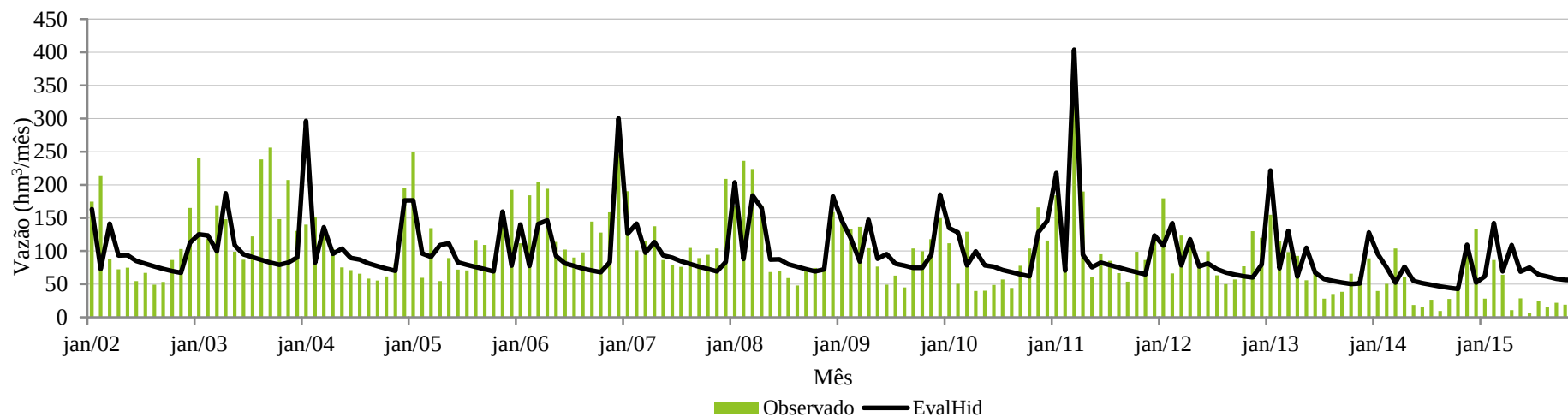
Figura 123 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60335500 – fev/10 a ago/16

Tabela 14– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.000313181
FC (mm)	649.9999707
PWP (mm)	375.4281702
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	0.412350212
K_0 (dia ⁻¹)	0.083919954
K_1 (dia ⁻¹)	0.253610945
K_2 (dia ⁻¹)	0.044253296
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.40892651
$F_{\text{média}}$	0.597536275

Fonte: Autor (2017).

Figura 124 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60351080 – jan/02 a nov/15



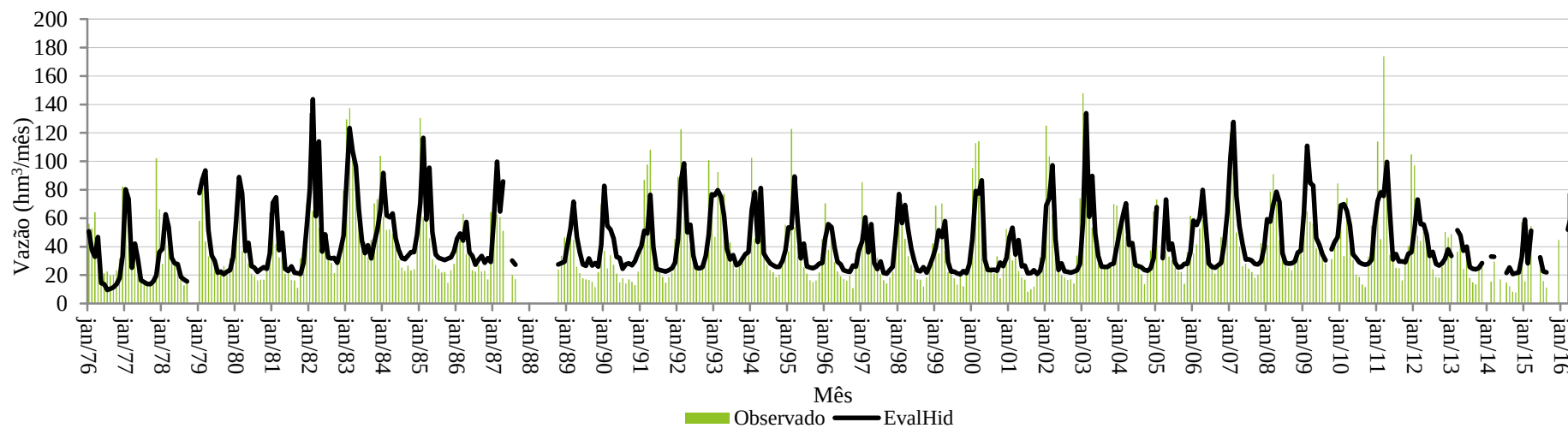
Fonte: Autor (2017).

Tabela 15– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	2.200072369
FC (mm)	234.3723584
PWP (mm)	179.3548299
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	3.64924E-05
K_0 (dia ⁻¹)	0.316551336
K_1 (dia ⁻¹)	0.197624703
K_2 (dia ⁻¹)	0.048614431
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.99972236
$F_{\text{média}}$	0.551618604

Fonte: Autor (2017).

Figura 125 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60381000 – jan/76 a jun/16

Tabela 16– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.000133975
FC (mm)	649.9795572
PWP (mm)	247.5080275
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	0.007171304
K_0 (dia ⁻¹)	0.262132458
K_1 (dia ⁻¹)	0.206015397
K_2 (dia ⁻¹)	0.024406045
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.640587513
$F_{\text{média}}$	0.662492889

Fonte: Autor (2017).

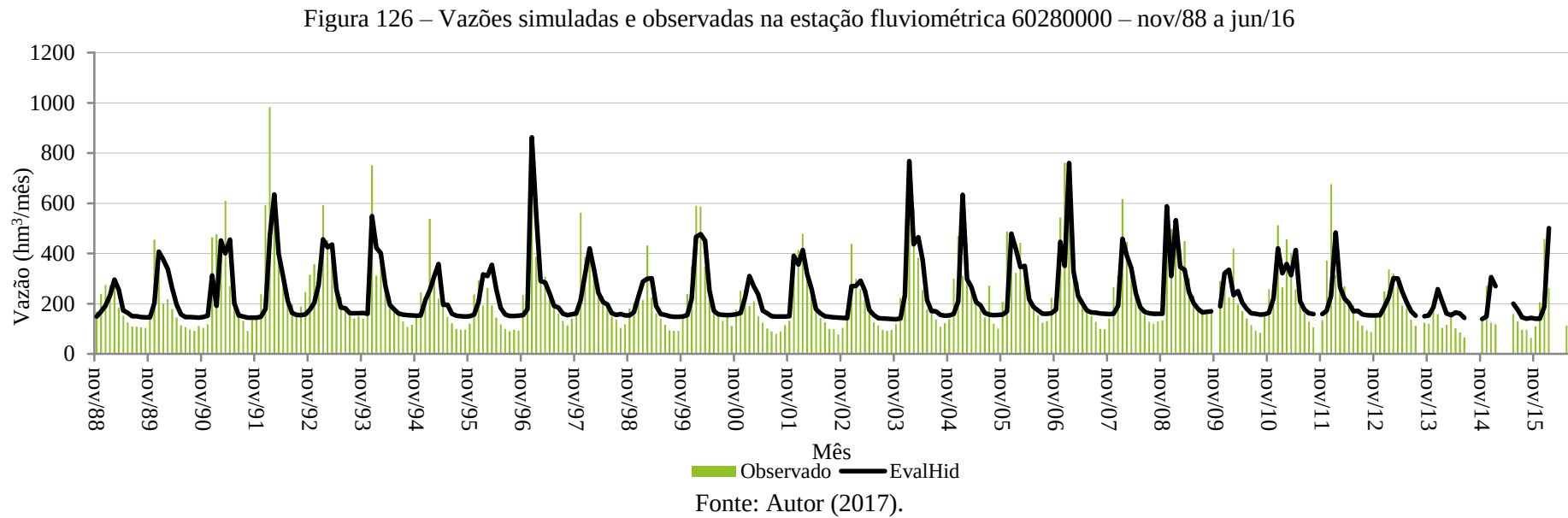
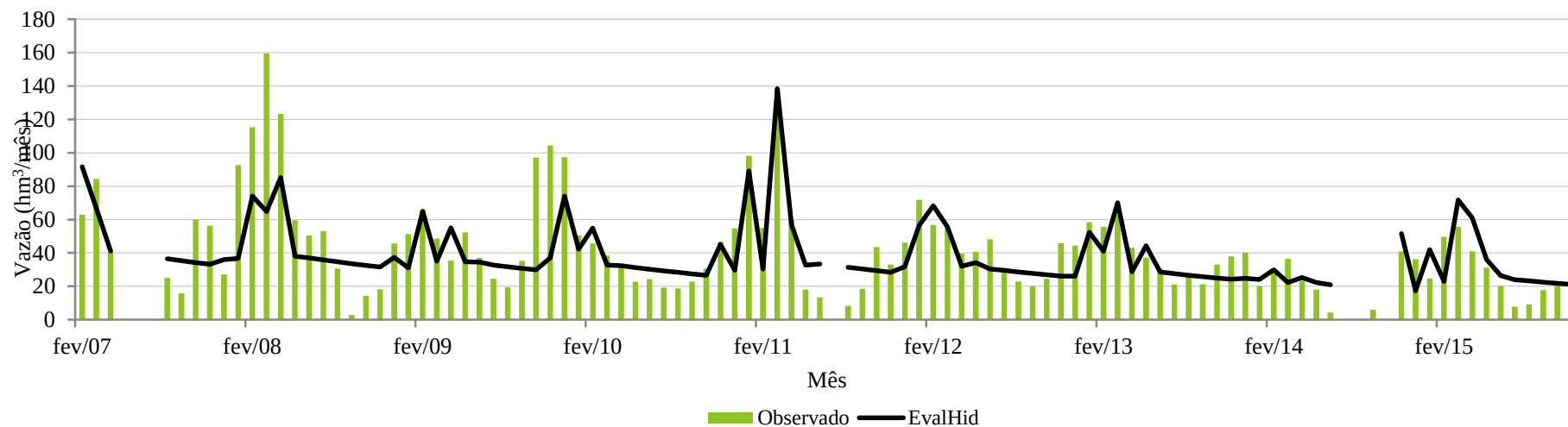


Tabela 17– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	4.153297395
FC (mm)	541.844054
PWP (mm)	367.3019734
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	0.067529629
K_0 (dia ⁻¹)	0.240264397
K_1 (dia ⁻¹)	0.047212582
K_2 (dia ⁻¹)	0.00887147
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.585997657
$F_{\text{média}}$	0.721736222

Fonte: Autor (2017).

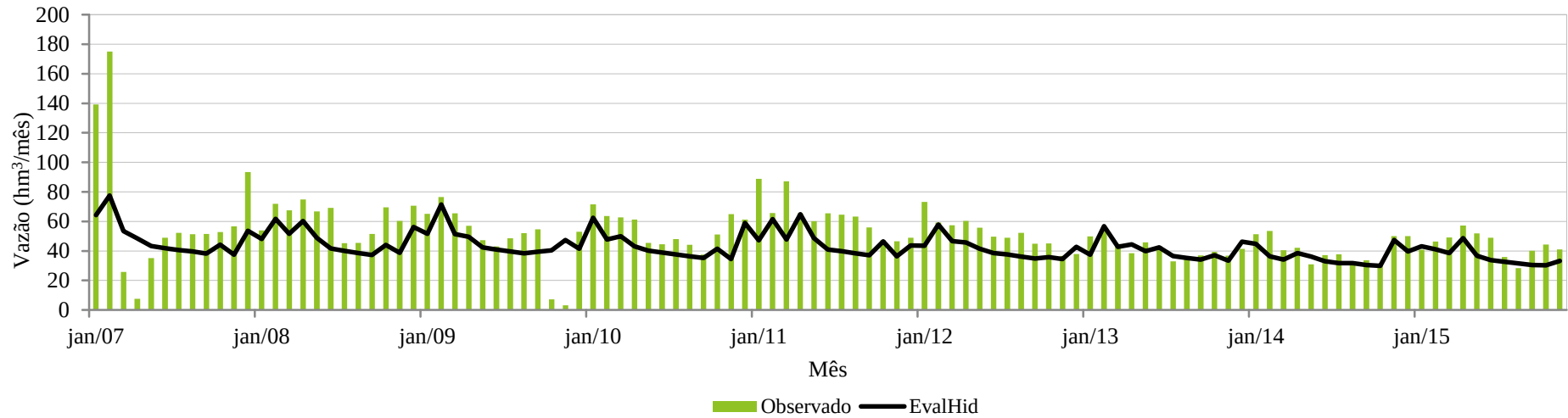
Figura 127 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60359080 –fev/07 a nov/15

Tabela 18– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	2.53805646
FC (mm)	291.306323
PWP (mm)	66.22163562
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	0.001564217
K_0 (dia ⁻¹)	0.10932934
K_1 (dia ⁻¹)	0.28204802
K_2 (dia ⁻¹)	0.031676415
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.999951104
$F_{\text{média}}$	0.64846154

Fonte: Autor (2017).

Figura 128 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60358080 – jan/07 a nov/15



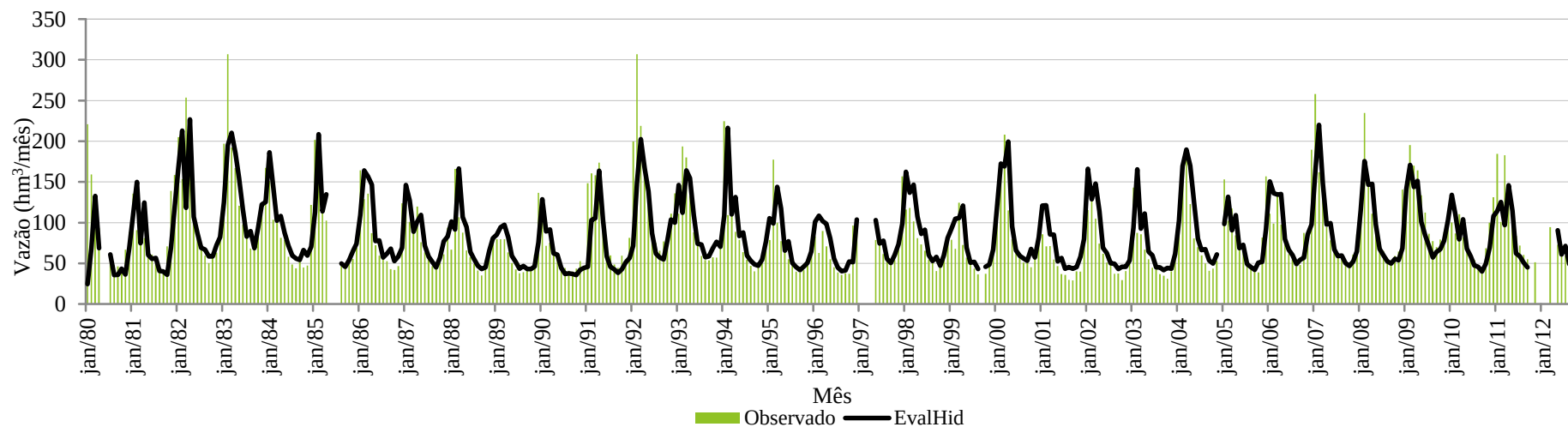
Fonte: Autor (2017).

Tabela 19– Parâmetros calibrados e valor da $F_{média}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.004967886
FC (mm)	56.73020492
PWP (mm)	649.6845564
$L_{máx.}$ (mm)	99.65507457
K_0 (dia ⁻¹)	0.127695305
K_1 (dia ⁻¹)	0.053536857
K_2 (dia ⁻¹)	0.031408974
$K_{perc.}$ (dia ⁻¹)	0.684168566
$F_{média}$	0.457397257

Fonte: Autor (2017).

Figura 129 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60265000 – jan/80 a out/12



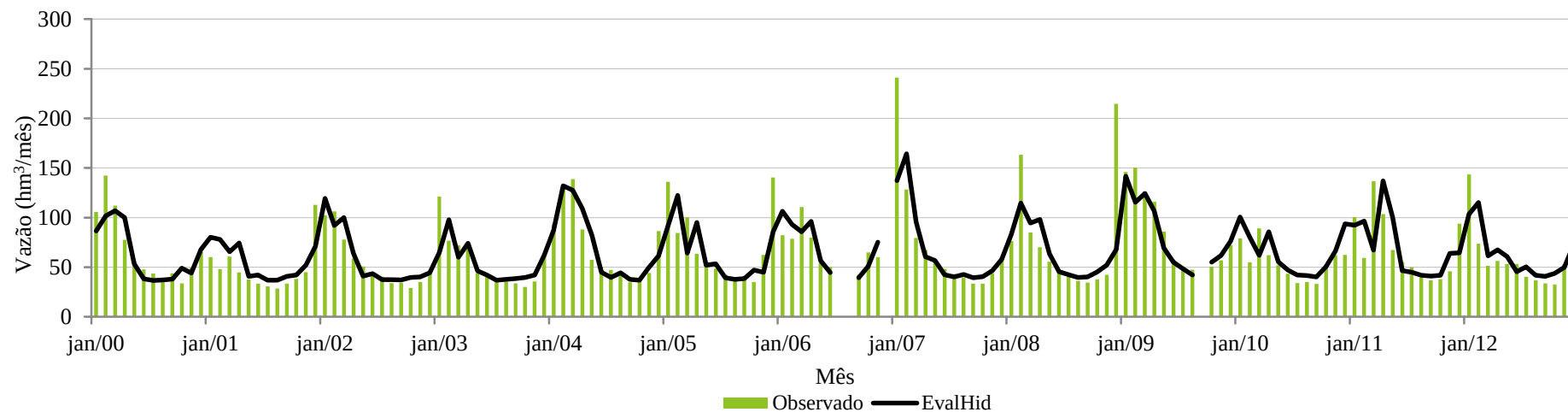
Fonte: Autor (2017).

Tabela 20– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.000063924
FC (mm)	649.8137959
PWP (mm)	357.070264
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	0.030932766
K_0 (dia ⁻¹)	0.124581476
K_1 (dia ⁻¹)	0.313858322
K_2 (dia ⁻¹)	0.082288668
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.538142924
$F_{\text{média}}$	0.717580347

Fonte: Autor (2017).

Figura 130 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60272000 – jan/00 a dez/12



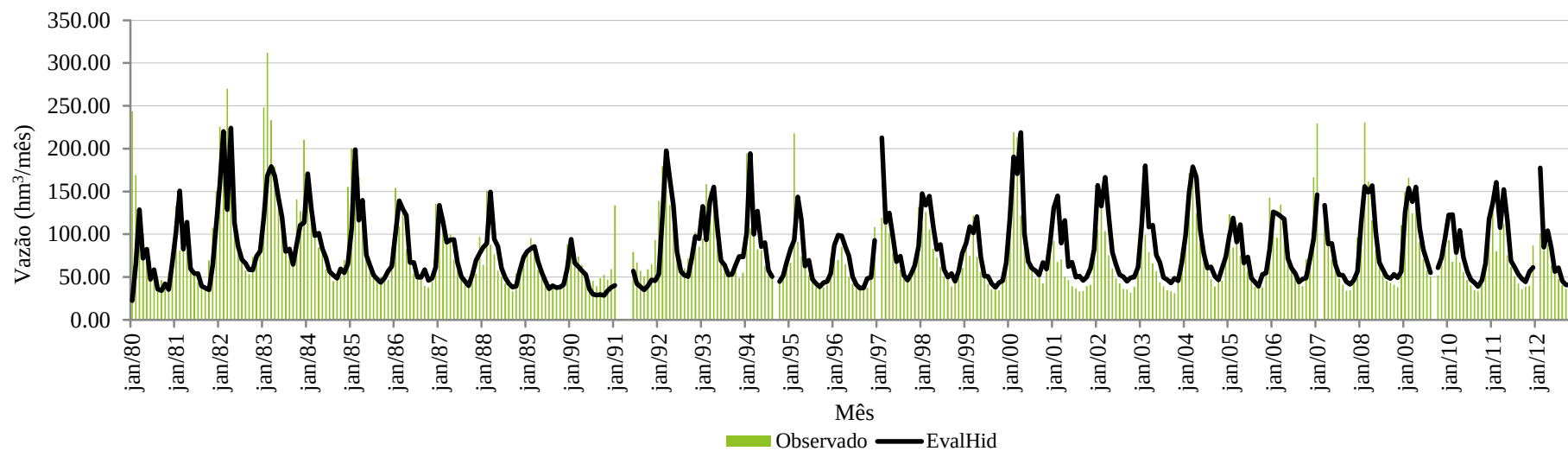
Fonte: Autor (2017).

Tabela 21– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	1.00026582
FC (mm)	649.5905377
PWP (mm)	633.5747185
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	22.40791038
K_0 (dia ⁻¹)	0.131239426
K_1 (dia ⁻¹)	0.251857411
K_2 (dia ⁻¹)	0.007163143
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.556134333
$F_{\text{média}}$	0.767689091

Fonte: Autor (2017).

Figura 131 – Vazões simuladas e observadas na estação fluviométrica 60250000 – jan/00 a dez/12

Tabela 22– Parâmetros calibrados e valor da $F_{\text{média}}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA

Parâmetro	Valor calibrado
Beta (---)	3.108969868
FC (mm)	362.6762658
PWP (mm)	232.5604017
$L_{\text{máx.}}$ (mm)	63.41150783
K_0 (dia ⁻¹)	0.216025429
K_1 (dia ⁻¹)	0.151682303
K_2 (dia ⁻¹)	0.040939751
$K_{\text{perc.}}$ (dia ⁻¹)	0.68475331
$F_{\text{média}}$	0.696891782

Fonte: Autor (2017).

APÊNDICE D

