



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.08.18.40-TDI

## ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA NOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS DA BACIA DO RIO ARAGUAIA

Edson Mauricio Marques Ferrari

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelo Dr. Luiz Eduardo Oliveira e  
Cruz de Aragão, aprovada em 15  
de dezembro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46FMG4S>>

INPE  
São José dos Campos  
2021

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.08.18.40-TDI

## ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA NOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS DA BACIA DO RIO ARAGUAIA

Edson Mauricio Marques Ferrari

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelo Dr. Luiz Eduardo Oliveira e  
Cruz de Aragão, aprovada em 15  
de dezembro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46FMG4S>>

INPE  
São José dos Campos  
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Ferrari, Edson Mauricio Marques.

F412a Análise dos impactos das mudanças de uso e cobertura da terra nos processos hidrológicos da Bacia do Rio Araguaia / Edson Mauricio Marques Ferrari. – São José dos Campos : INPE, 2021. xviii + 125 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.08.18.40-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientador : Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão.

1. Modelagem hidrológica. 2. Mudanças de uso e cobertura da terra. 3. Processos hidrológicos. 4. Sensoriamento remoto. I.Título.

CDU 528.8:556.1(282.28)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE EDSON MAURICIO MARQUES FERRARI,**  
**BANCA Nº 315/2021, REG 225202/19**

No dia 15 de dezembro de 2021, às 09h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador (es).

**Título: “Análise dos impactos das mudanças de uso e cobertura da terra nos processos hidrológicos da Bacia do Rio Araguaia”**

**Membros da Banca:**

Dra. Laura de Simone Borma - Presidente - INPE

Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão - Orientador - INPE

Dr. Anderson Luis Ruhoff - Membro Externo - UFRGS/IPH

Dr. Javier Tomasella - Membro Externo - CEMADEN



Documento assinado eletronicamente por **Laura de Simone Borma, Pesquisador Titular**, em 21/12/2021, às 10:54 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson ruhoff (E), Usuário Externo**, em 21/12/2021, às 10:59 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Javier Tomasella, Tecnologista**, em 21/12/2021, às 14:32 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Oliveira E Cruz de Aragão, Chefe da Divisão de Observação da Terra e Geoinformática**, em 28/12/2021, às 08:13 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **8947755** e o código CRC **85284C62**.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus avôs Silvio Sabino e Dirce Marques (em memória) que sempre estiveram ao meu lado apoiando minhas decisões, por toda a educação e amor que me deram ao longo do meu desenvolvimento. Vocês são tudo na minha vida.

Agradeço ao meu orientador Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão por todo o conhecimento transmitido, paciência e compreensão perante as dificuldades ao longo dessa jornada. Aos membros da banca Dra. Laura de Simone Borma, Dr. Anderson Luis Ruhoff e Dr. Javier Tomasella pela avaliação e contribuições desta pesquisa.

A todos os meus colegas de mestrado pelo apoio, por estar sempre ao meu lado e proporcionar momentos de felicidades. Agradeço em especial às minhas amigas Teule Lemos Branco e Tatiana Dias Tardelli Uehara por todo apoio, cumplicidade e carinho que tiveram por mim, não sei o que seria de mim sem vocês.

Agradeço ao Kenneth Cyrill Brown por toda a paciência e amor durante à minha jornada no mestrado. Aos meus amigos da CMJ por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto pela infraestrutura necessária ao desenvolvimento deste trabalho. E a todos os pesquisadores e funcionários que juntos lutam e contribuem para a ciência brasileira.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Agência Nacional de Água (ANA) pelo apoio financeiro no desenvolvimento desta pesquisa.





## RESUMO

Entender as relações entre as mudanças de uso e cobertura da terra em função do comportamento hidrológico de bacias no Brasil é importante para melhorar a gestão e planejamento dos recursos hídricos frente as demandas atuais. Crises de escassez e eventos de cheias vem acontecendo decorrentes de mudanças dos padrões climáticos e ações antropogênicas tem impactado diretamente os recursos hídricos no país. Atualmente, as principais mudanças ocorrem nos biomas Amazônico e Cerrado, que juntos exercem uma importante influência no ciclo hidrológico. Modelos hidrológicos ajudam a entender essa relação de mudança e produtividade hídrica e, tem sido uma ferramenta muito importante para prever impactos na hidrologia. Nesse contexto, o presente estudo propõe a utilização do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) para entender como as mudanças de uso e cobertura da terra na Bacia do Rio Araguaia afetam a disponibilidade hídrica e o comportamento em termos de geração de vazão e evapotranspiração. Dessa forma, o modelo foi parametrizado por meio de informações contidas na literatura e produtos de sensoriamento remoto, calibrado a partir de informações das estações fluviométricas e validado. A análise dos impactos decorrentes das mudanças de uso e cobertura da terra na área de estudo foi realizado por meio de simulações, considerando os períodos de mudanças entre 1985, 1995, 2005 e 2015 e por meio de cenários de redução e aumento da vegetação nativa. A análise foi realizada a partir dos resultados encontrados no cenário de controle com aqueles referentes a cada mapa de mudanças nos seus respectivos períodos. Com relação aos impactos na geração de vazão e evapotranspiração para os períodos de mudanças adotados neste estudo, os resultados indicam que ocorrem incrementos e/ou reduções dessas variáveis na Bacia do Rio Araguaia e que, está diretamente relacionado com as perdas e/ou aumento da vegetação nativa, por fatores topográficos e da escala analisada. Quando se analisa os valores médios em bacias de grande escala em algumas vezes não é possível observar o real comportamento hidrológico, e essa questão também reflete na Bacia do Rio Araguaia. Os resultados mostram que a escala de análise é um fator que deve ser considerado, uma vez que na área de estudo existem regiões na qual há incrementos e/ou reduções na geração de vazão e evapotranspiração que, acabam influenciando nos resultados médios encontrados. Ao analisar os resultados em relação às minibacias é possível observar comportamentos distintos e sua relação com a escala analisada.

Palavras-chave: Modelagem Hidrológica. Mudanças de uso e cobertura da terra. Processos Hidrológicos. Sensoriamento Remoto.



# **IMPACTS OF LAND USE AND LAND COVER CHANGES ON HYDROLOGICAL PROCESSES IN THE ARAGUAIA RIVER BASIN**

## **ABSTRACT**

Understanding the relationships between in land use and land cover changes as a function of the hydrological behavior of basins in Brazil is important to improve the management and planning of water resources in view of current demands. Scarcity crises and flood events have been happening due to changes in weather patterns and anthropogenic actions have directly impacted water resources in the country. Currently, the main changes are taking place in the Amazon and Cerrado biomes, which together exert an important influence on the hydrological cycle. Hydrological models help to understand this relationship of water change and productivity and have been a very important tool to predict impacts on hydrology. In this context, this study proposes the use of the Large Basin Model (MGB-IPH) to understand how land use and land cover changes in the Araguaia River Basin affect water availability and behavior in terms of flow generation and evapotranspiration. Thus, the model was parameterized using information contained in the literature and remote sensing products, calibrated from information from fluviometric stations and validated. The analysis of impacts arising from land use and land cover changes in the study area was carried out through simulations, considering the periods of change between 1985, 1995, 2005 and 2015 and through scenarios of reduction and increase in native vegetation. The analysis was performed from the results found in the control scenario with those referring to each change map in their respective periods. Regarding the impacts on flow generation and evapotranspiration for the periods of change adopted in this study, the results indicate that increases and/or reductions in these variables occur in the Araguaia River Basin and that it is directly related to the losses and/or increase in native vegetation, by topographical factors and the scale analyzed. When analyzing the average values in large-scale basins, sometimes it is not possible to observe the real hydrological behavior, and this issue also reflects in the Araguaia River Basin. The results show that the scale of analysis is a factor that must be considered, since in the study area there are regions in which there are increases and/or reductions in the generation of flow and evapotranspiration, which end up influencing the average results found. By analyzing the results in relation to the mini basins, it is possible to observe different behaviors and their relationship with the analyzed scale.

**Keywords:** Hydrological Modeling. Land use and land cover changes. Hydrological Processes. Remote Sensing.



## LISTA DE FIGURAS

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Figura 3.1 - Representação de uma minibacia do modelo MGB-IPH dividida em URH (representadas pelas cores).....   | 14          |
| Figura 3.2 - Representação da geração e propagação de escoamentos na minibacia e propagação de vazão na rede de drenagem.....                                      | 15          |
| Figura 3.3 - Representação do balanço vertical do solo do modelo para uma URH. ....  | 17          |
| Figura 4.1 - Precipitação média mensal da bacia do Rio Araguaia. ....  | 20          |
| Figura 4.2 - Precipitação total anual da bacia do Rio Araguaia.....  | 21          |
| Figura 4.3 - Mapa de localização da bacia do Rio Araguaia, unidades de conservação e altimetria. ....  | 22          |
| Figura 4.4 - Mudanças de uso e cobertura da terra por cada período analisado na Bacia do Rio Araguaia e suas sub-bacias.....                                       | 23          |
| Figura 5.1 - Mapa de localização dos pares de pontos amostrais para correção do SRTM de acordo com as classes de Formação Florestal da Amazônia e do Cerrado. .... | 27          |
| Figura 5.2 - Exemplo de resultados da correção do SRTM.....  | 28          |
| Figura 5.3 - Mapa de tipos de solos e mapa final com agrupamento das classes. ....   | 29          |
| Figura 5.4 - Mapa de hidrografia, sub-bacias e minibacias geradas na etapa de discretização da Bacia do Rio Araguaia.....  | 36          |
| Figura 5.5 - Esquema da simulação realizada considerando os mapas de URH de 1985, 1995, 2005 e 2015 e os períodos de variação da precipitação. ....                | 43          |
| Figura 5.6 - Representação da distribuição das URH na Bacia do Rio Araguaia para os períodos analisados e os cenários de mudança de uso e cobertura da terra.....  | 45          |
| Figura 6.1 - Análise de sensibilidade do modelo MGB para a Bacia do Rio Araguaia em relação a vazão média de longo termo. ....                                     | 48          |
| Figura 6.2 - Resultados encontrados dos parâmetros de albedo, IAF e altura de vegetação derivados de produtos de sensoriamento remoto. ....                        | 51          |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.3 - Hidrogramas simulados pelo MGB-IPH e observados por sub-bacia.....  | 54  |
| Figura 6.4 - Mudança percentual por minibacias das mudanças em relação ao período de controle para as vazões médias.....               | 60  |
| Figura 6.5 - Mudança percentual por minibacias dos cenários em relação ao período de controle para as vazões médias.....               | 63  |
| Figura 6.6 - Mudança percentual por minibacias das mudanças em relação ao período de controle para as vazões máximas. ....             | 67  |
| Figura 6.7 - Mudança percentual por minibacias das mudanças em relação ao período de controle para as vazões mínimas.....              | 68  |
| Figura 6.8 - Mudança percentual por minibacias dos cenários em relação ao período de controle para as vazões máximas.....              | 71  |
| Figura 6.9 - Mudança percentual por minibacias dos cenários em relação ao período de controle para as vazões mínimas.....              | 72  |
| Figura 6.10 – Mudança percentual por minibacias dos períodos de mudanças em relação ao de controle para a evapotranspiração média..... | 75  |
| Figura 6.11 – Mudança percentual por minibacias dos cenários de mudanças em relação ao de controle para a evapotranspiração média..... | 77  |
| Figura A.1 - Localização das estações fluviométricas utilizados na modelagem. ....   | 96  |
| Figura B.1 - Localização das estações fluviométricas utilizados na modelagem. ....   | 104 |
| Figura C.1 - Localização das estações climatológicas utilizados na modelagem. ....   | 106 |
| Figura G.1 – Mudança percentual para os períodos de mudança para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 1. ....              | 114 |
| Figura G.2 – Mudança percentual para os períodos de mudança para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 2. ....              | 115 |
| Figura G.3 – Mudança percentual para os períodos de mudança para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 3. ....              | 115 |
| Figura G.4 – Mudança percentual para os períodos de mudança para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 4. ....              | 116 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura G.5 – Mudança percentual para cenário 1 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 1. ....                        | 116 |
| Figura G.6 – Mudança percentual para cenário 1 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 2. ....                        | 117 |
| Figura G.7 – Mudança percentual para cenário 1 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 3. ....                        | 117 |
| Figura G.8 – Mudança percentual para cenário 1 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 4. ....                        | 118 |
| Figura G.9 – Mudança percentual para cenário 2 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 1. ....                        | 118 |
| Figura G.10 – Mudança percentual para cenário 2 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 2. ....                       | 119 |
| Figura G.11 – Mudança percentual para cenário 2 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 3. ....                       | 119 |
| Figura G.12 – Mudança percentual para cenário 2 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 4. ....                       | 120 |
| Figura G.13 – Mudança percentual para cenário 3 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 1. ....                       | 120 |
| Figura G.14 – Mudança percentual para cenário 3 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 2. ....                       | 121 |
| Figura G.15 – Mudança percentual para cenário 3 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 3. ....                       | 121 |
| Figura G.16 – Mudança percentual para cenário 3 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 4. ....                       | 122 |
| Figura H.1 – Mudança percentual para os períodos de mudança para a evapotranspiração médias e em períodos de cheia e estiagem. .... | 123 |
| Figura H.2 – Mudança percentual para o cenário 1 para a evapotranspiração médias e em períodos de cheia e estiagem. ....            | 124 |
| Figura H.3 – Mudança percentual para o cenário 2 para a evapotranspiração médias e em períodos de cheia e estiagem. ....            | 124 |
| Figura H.4 – Mudança percentual para o cenário 3 para a evapotranspiração médias e em períodos de cheia e estiagem. ....            | 125 |





## LISTA DE TABELAS

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Tabela 3.1 - Parâmetros considerados fixos no modelo MGB-IPH. ....   | 18          |
| Tabela 3.2 - Parâmetros considerados calibráveis no modelo MGB-IPH.....  | 19          |
| Tabela 5.1 – Quantificação das áreas das classes de uso e cobertura da terra presentes na Bacia do Rio Araguaia, agrupamentos e transições consideradas na tabulação cruzada. ....   | 31          |
| Tabela 5.2 - Descrição das classes de URH definidas para o estudo.....   | 37          |
| Tabela 5.3 - Valores de referência e premissas adotadas para estimar os parâmetros calibráveis do MGB. ....  | 39          |
| Tabela 5.4 - Funções objetivo para calibração e validação do MGB.....  | 42          |
| Tabela 6.1 - Valores adotados na análise de sensibilidade para os parâmetros calibráveis do modelo e intervalo de variação utilizados como referência para os parâmetros fixos. .... | 47          |
| Tabela 6.2 – Resultados da avaliação do desempenho no MGB-IPH para a Bacia do Rio Araguaia nos períodos de calibração e validação.....   | 53          |
| Tabela 6.3 - Vazões médias simuladas e mudança percentual para os períodos analisados considerando o cenário de controle e as mudanças de uso e cobertura da terra.....              | 58          |
| Tabela 6.4 - Vazões médias simuladas e mudança percentual para os cenários de mudança de uso e cobertura do solo propostos em relação ao cenário de controle. ....                   | 62          |
| Tabela 6.5 - Mudança percentual da diferença entre o cenário de controle e os períodos de mudança para as vazões máximas e mínimas.....  | 65          |
| Tabela 6.6 - Mudança percentual da diferença entre o cenário de controle e os cenários propostos de mudança para as vazões máximas e mínimas. ....                                   | 69          |
| Tabela 6.7 - Evapotranspirações médias simuladas e mudança percentual para os períodos analisados considerando o cenário de controle e as mudanças de uso e cobertura da terra. .... | 73          |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 6.8 - Evapotranspirações médias simuladas e mudança percentual para os cenários analisados considerando o cenário de controle e os cenários de uso e cobertura da terra. .... | 76  |
| Tabela A.1 - Informações das estações pluviométricas utilizadas na modelagem.....  | 97  |
| Tabela B.1 - Informações das estações fluviométricas utilizadas na calibração do MGB-IPH.....  | 103 |
| Tabela C.1 - Informações das estações pluviométricas utilizadas na modelagem.....  | 105 |
| Tabela D.1 - Valores adotados dos parâmetros fixos do modelo. ....   | 107 |
| Tabela D.2 - Valores encontrados na literatura dos parâmetros de albedo, índice de área foliar, resistência superficial e altura para diferentes coberturas do solo.....             | 108 |
| Tabela E.1 - Parâmetros calibráveis estimados inicialmente para as simulações no MGB-IPH antes do processo de calibração.....  | 109 |
| Tabela F.1 - Parâmetros calibráveis estimados para as simulações no MGB-IPH após o processo de calibração da Sub-bacia 1.....  | 110 |
| Tabela F.2 - Parâmetros calibráveis estimados para as simulações no MGB-IPH após o processo de calibração da Sub-bacia 2.....  | 111 |
| Tabela F.3 - Parâmetros calibráveis estimados para as simulações no MGB-IPH após o processo de calibração da Sub-bacia 3.....  | 112 |
| Tabela F.4 - Parâmetros calibráveis estimados para as simulações no MGB-IPH após o processo de calibração da Sub-bacia 4.....  | 113 |

## SUMÁRIO

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO.....   | 1           |
| 2 OBJETIVOS.....  | 5           |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....   | 6           |
| 3.1 Mudanças do uso e da cobertura da terra, suas implicações nas interações superfície-atmosfera e nos processos hidrológicos..... | 6           |
| 3.2 Utilização do sensoriamento remoto na hidrologia .....  | 10          |
| 3.3 Modelagem hidrológica e o modelo MGB-IPH.....   | 12          |
| 3.3.1 O modelo MGB-IPH .....  | 13          |
| 3.3.2 Simulação dos processos hidrológicos .....  | 16          |
| 3.3.3 Parâmetros do modelo .....  | 17          |
| 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....  | 20          |
| 5 MATERIAIS E MÉTODOS .....   | 25          |
| 5.1 Dados e recursos para o processamento derivados de sensoriamento remoto e outras fontes .....                                   | 25          |
| 5.1.1 Modelo digital de elevação.....   | 25          |
| 5.1.2 Mapa de solos.....  | 28          |
| 5.1.3 Mapa de uso e cobertura da terra .....  | 30          |
| 5.1.4 Dados pluviométricos .....  | 31          |
| 5.1.5 Dados fluviométricos .....  | 32          |
| 5.1.6 Dados climáticos .....  | 32          |
| 5.1.7 Índice de Área Foliar, Altura da Vegetação e Albedo.....  | 33          |
| 5.2 Metodologia .....   | 34          |
| 5.2.1 Discretização da Bacia do Rio Araguaia .....  | 34          |
| 5.2.2 Definição das Unidades de Respostas Hidrológicas .....  | 37          |
| 5.2.3 Parametrização do modelo MGB-IPH .....  | 38          |
| 5.2.4 Análise de sensibilidade.....   | 40          |
| 5.2.5 Calibração e validação do modelo .....  | 40          |
| 5.2.6 Simulação, cenários da modelagem e análise dos resultados.....  | 42          |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....  | 46          |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.1   | Análise de sensibilidade do MGB-IPH em relação às mudanças de uso e cobertura da terra.....              | 46  |
| 6.2   | Definição dos parâmetros de entrada.....   | 49  |
| 6.3   | Calibração e validação do MGB-IPH para a Bacia do Rio Araguaia.....                                      | 51  |
| 6.4   | Análise dos impactos nas mudanças de uso e cobertura da terra.....                                       | 56  |
| 6.4.1 | Impacto nas vazões médias.....   | 56  |
| 6.4.2 | Impacto nas vazões em períodos de cheia e estiagem.....  | 65  |
| 6.4.3 | Impactos na evapotranspiração.....   | 73  |
| 7     | CONCLUSÃO.....   | 79  |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 82  |
|       | APÊNDICE A – INFORMAÇÕES DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM.....                        | 96  |
|       | APÊNDICE B – INFORMAÇÕES DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM.....                        | 103 |
|       | APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DAS ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM.....                        | 105 |
|       | APÊNDICE D – PARÂMETROS FIXOS DE ENTRADA UTILIZADOS NO MGB-IPH.....                                      | 107 |
|       | APÊNDICE E – PARÂMETROS CALIBRÁVEIS UTILIZADOS NO MGB-IPH ANTES DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO..... | 109 |
|       | APÊNDICE F – PARÂMETROS CALIBRÁVEIS UTILIZADOS NO MGB-IPH APÓS O PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO.....   | 110 |
|       | APÊNDICE G – GRÁFICOS DE MUDANÇAS PERCENTUAIS DAS VAZÕES SIMULADAS PELO MGB-IPH.....                     | 114 |
|       | APÊNDICE H – GRÁFICOS DE MUDANÇAS PERCENTUAIS DA EVAPOTRANPIRAÇÃO SIMULADA PELO MGB-IPH.....             | 123 |

## 1 INTRODUÇÃO

As ações antropogênicas de modificação de uso e ocupação da terra são preocupantes no país, principalmente nos biomas Amazônico e Cerrado, impulsionados pela expansão agrícola, aumento do processo de urbanização, geração de energia e mineração. Estudos evidenciam que essas alterações podem causar efeitos no comportamento hidrológico em bacias hidrográficas (COLLISCHONN, 2001; TUCCI, 2005; BAYER; COLLISCHONN, 2013). Além disso, a bacia é a principal unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos. A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora uma série de medidas e normas que a adota como meio de suporte à implantação da política (BRASIL, 1997), focando na necessidade de uma melhor gestão e planejamento como garantia de promover os usos múltiplos da água.

De acordo com Coe et al. (2011), as mudanças na vegetação geralmente resultam em alterações dos estados hidrológicos, geomorfológicos e bioquímicos da rede de drenagem. Isso ocorre porque o aumento da área de solo exposto, as mudanças na infiltração, no escoamento superficial devido as práticas inadequadas de manejo ou a utilização de processos de mecanização agrícola podem influenciar em alguns processos. O aumento da descarga da rede de drenagem, erosão superficial do solo, deposição de sedimentos, das planícies de inundação em períodos de cheias ou na redução da vazão em períodos de secas, são alguns exemplos.

Destaca-se também que essas alterações influenciam nos eventos de cheias e estiagem em bacias hidrográficas do país, principalmente aquelas que se encontram grande parte da população e das atividades agrícolas com alta demanda hídrica. Em determinadas condições de aumento de precipitação ou baixa permeabilidade do solo, por exemplo, podem ocorrer situações de inundação. O oposto ocorre em eventos de secas, em que as vazões da rede de drenagem são mantidas pelo escoamento subterrâneo, com sua recarga modificada pelas alterações do uso e cobertura da terra.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2019), os padrões de distribuição das chuvas variam naturalmente e apresentam eventos extremos decorrentes do seu excesso ou da escassez. Estiagens, secas, enxurradas e inundações representam a grande maioria dos desastres naturais ocorridos no Brasil.

O reflexo desses eventos nos últimos anos, além de serem influenciados pela variabilidade climáticas podem ser consequência da modificação do uso e cobertura da terra. Observa-se também que, grande parte ocorre principalmente nas bacias do rio São Francisco, Paraná e Tocantins-Araguaia, em que seus regimes hídricos são fortemente influenciados pelo comportamento hidrológico do bioma Cerrado (LIMA; SILVA, 2007).

Com relação aos biomas, Amazônia e Cerrado juntos exercem um papel importante na manutenção do ciclo hidrológico, e as mudanças do tipo de uso e cobertura da terra tem um grande potencial em afetar diretamente o balanço hídrico em escala regional e global (OLIVEIRA et al., 2014). Isso acontece devido ao fato de 29% e 21% da evapotranspiração terrestre ocorrer em florestas tropicais e em florestas típicas do Cerrado respectivamente (MIRALLES et al., 2011). Por isso, esses biomas podem ser classificados como *hotspots* com relação à redução da evapotranspiração terrestre (STERLING; DUCHARNE; POLCHER, 2013) e associados as mudanças na localização, intensidade e época de eventos chuvosos, o prolongamento das estações secas e mudanças nas vazões da rede de drenagem (WOHL et al., 2012). Ainda, olhando somente para o Cerrado, ele está inserido em 8 das 12 regiões hidrográficas do Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2018), principalmente as regiões que apresentam alta demanda hídrica, o que torna mais preocupante as mudanças ocorridas nesse bioma.

Historicamente, o Cerrado vem sofrendo altas taxas de conversão da vegetação nativa para outros usos e cobertura, como a pastagem e a agricultura (SILVA et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2014; SANO et al., 2019). De acordo com Oliveira e colaboradores (2014) o desmatamento médio anual desse bioma foi de 0,69%, 0,37% e 0,32% em 2002-2008 (85047 km<sup>2</sup>), 2008-

2009 (7637 km<sup>2</sup>) e 2009-2010 (6469 km<sup>2</sup>), superiores às taxas médias encontradas para a Amazônia nos mesmos períodos (0,44%, 0,40% e 0,29%). Os autores alertam que o Cerrado está sob ameaça maior que o bioma Amazônico, uma vez que, em 2010, 48,5% da área do bioma apresentava-se com algum processo de antropização, restando apenas 50,9% da sua vegetação nativa.

Dessa forma, a utilização de modelos hidrológicos tem ajudado a quantificar os impactos causados pelas mudanças de uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas localizadas em diferentes biomas brasileiros. De acordo com Beserra (2016), os modelos são utilizados para fins variados, em escala local, aplicados no planejamento e concepção de práticas de conservação do solo, projetos de drenagem urbana, manejo de água para irrigação, recuperação de áreas degradadas, gestão de reservatórios e gestão do lençol freático; em grande escala são utilizados para projetos de proteção de inundações, reabilitação de represas, gestão de áreas alagáveis, avaliação da qualidade da água e previsão de abastecimento.

Um dos modelos existentes atualmente é o Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidrológicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Classificado como modelo distribuído de base física, ele consegue realizar previsões com relação ao comportamento hidrológico no espaço e tempo, desde que estejam devidamente calibrados e validados (COLLISCHONN et al., 2007). Esse modelo tem sido utilizado para diversos fins, com destaque para análises da modificação do uso e cobertura da terra nos processos hidrológicos (CARAM, 2011; BAYER, 2014).

Neste estudo utilizou-se o modelo MGB para simular a geração de vazão (Q) e evapotranspiração (ET) na Bacia do Rio Araguaia (BRA) e avaliar os seus impactos decorrentes das mudanças de uso e cobertura da terra entre os anos de 1985 e 2018 e por meio de três cenários propostos. Os dados utilizados foram provenientes de medições diretas de estações pluviométricas, fluviométricas e produtos derivados de sensoriamento remoto para a parametrização do modelo. Na análise das vazões considerou-se as mudanças

ocorridas nas vazões médias anuais, mínimas geradas nos períodos de estiagem e, máximas provenientes do período chuvoso na área de estudo.



## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar a modelagem hidrológica da Bacia do Rio Araguaia (BRA) considerando as mudanças de uso e cobertura da terra entre os anos de 1985 e 2018 e por meio de cenários, para analisar os impactos com relação a geração de vazão e evapotranspiração, utilizando o Modelo de Grande Bacias (MGB-IPH).

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar se o modelo consegue representar as mudanças de uso e cobertura na área de estudo;
- b) Entender como as mudanças de uso e cobertura da terra podem afetar a geração de vazão e evapotranspiração na BRA;
- c) Analisar como as mudanças de uso e cobertura afetam a geração de vazão em períodos de cheia e estiagem;
- d) Propor cenários hipotéticos de mudanças de uso e cobertura e avaliar os impactos destes em termos de geração de vazão e evapotranspiração. Os seguintes cenários foram adotados:
  - a. Cenário 1 (Sav): substituição da classe de formação Savânica por agrossilvipastoril.
  - b. Cenário 2 (Agr): o mesmo do cenário 1 e com a substituição da classe formação florestal por agrossilvipastoril.
  - c. Cenário 3 (Reg): processo de regeneração considerando a substituição de toda a área do Cerrado por formações Savânica e na Amazônia por formações florestais.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nessa seção são apresentados os principais conceitos importantes para o desenvolvimento da pesquisa. Ao longo do texto é caracterizado os principais impactos decorrentes da mudança de uso e cobertura da terra nos processos hidrológicos. Em seguida, a utilização do sensoriamento remoto como ferramenta aplicada à hidrologia. Também é apresentado as principais características e aplicações do modelo MGB-IPH.

#### **3.1 Mudanças do uso e da cobertura da terra, suas implicações nas interações superfície-atmosfera e nos processos hidrológicos**

As mudanças de uso e cobertura da terra alteram os processos biofísicos e biogeoquímicos do planeta, as interações superfície-atmosfera, tempo e magnitude dos fluxos de energia, impactam a partição de energia disponível e, portanto, o balanço hídrico. Estudos de casos de diferentes regiões mostram que essas mudanças e a variabilidade climática têm impactos significativos em diversas variáveis ambientais, como a precipitação (P), evapotranspiração (ET) e fluxos de energia (CABALLERO; RUHOFF; BIGGS, 2022).

De acordo com Caballero, Ruhoff e Biggs (2022), as mudanças de uso e cobertura da terra, tanto globalmente quanto no Brasil, podem afetar a biodiversidade local, mas também as emissões de carbono, o clima regional, local e o ciclo hidrológico (DAVIDSON et al., 2012). Essas mudanças afetam os orçamentos da superfície terrestre, alterando a troca de umidade e energia (BONAN, 2008). A conversão de floresta em pastagem tende a reduzir ET localmente e P regionalmente, enfraquecendo tanto a reciclagem da umidade atmosférica (KEYS et al., 2012) quanto a convecção profunda na atmosfera (COSTA; FOLEY, 2000), o que reduz nuvens convectivas e P (SALAZAR et al., 2015). Vergopolan e Fisher (2016) avaliaram uma década de padrões de P e ET sobre áreas desmatadas e florestais usando produtos de sensoriamento remoto, encontrando valores anuais absolutos mais baixos de P e ET sobre áreas desmatadas do que sobre áreas de floresta intacta. As massas de ar que passaram por extensas florestas pantropicais produzem mais chuva do que o

ar que passou por áreas menos vegetadas (SPRACKLEN et al., 2012). Webb et al. (2005) encontraram uma relação positiva significativa entre a cobertura arbórea e o número de dias chuvosos na Mata Atlântica do Brasil. Esses estudos demonstram a importância das florestas intactas, que mantêm a ET e a umidade atmosférica que pode retornar à terra como chuva (CABALLERO; RUHOFF; BIGGS, 2022).

Com relação aos processos hidrológicos em bacias hidrográficas eles acontecem mediante às influências geomorfológicas, climáticas e de acordo com o uso e cobertura da terra. Essas influências regem os processos hidrológicos nessas regiões e possuem duas direções predominantes de fluxos: vertical (precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo) e longitudinal (escoamento superficial e subterrâneo) (TUCCI; CLARKE, 1997).

A principal constituinte do processo hidrológico é a precipitação, considerada toda a porção de água que passa do meio atmosférico e atinge a superfície terrestre nas formas de chuva, granizo, orvalho, geada, neblina e neve. Em termos da hidrologia, ela é responsável por alimentar os reservatórios, principalmente os subterrâneos, gerando escoamento na rede de drenagem mesmo em períodos de estiagem (TUCCI, 2007). Ao atingir a superfície terrestre, parte da precipitação é interceptada pela cobertura vegetal e retorna para a atmosfera pelo processo de evaporação. Seu excedente atinge a superfície do solo que, dependendo de suas propriedades físicas, da declividade, grau de saturação e capacidade de infiltração, geram os escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos.

A precipitação varia no espaço e no tempo e é afetada pela mudança das condições do oceano, composição atmosférica, cobertura da terra e suas interações. Portanto, atribuir tendências em P às mudanças de uso e cobertura é um desafio. Diversos fatores irão interferir nos resultados, como o período analisado, a extensão das mudanças na área e a metodologia aplicada para detectá-las (CABALLERO; RUHOFF; BIGGS, 2022). Esses autores apresentam alguns estudos que mostram ampla gama de tendências observadas de P devido às mudanças de uso e cobertura da terra para os

biomas Amazônicos e do Cerrado. De acordo com Caballero, Ruhoff e Biggs (2022), alguns estudos não encontraram tendências (ARIAS et al., 2018; CAVALCANTE et al., 2019; COSTA; FOLEY, 1999; ESPINOZA et al., 2019; FURLAN, 2009; SILVA JÚNIOR et al., 2018), outros apresentam tendências negativas observadas durante ou no final da estação seca (ALMEIDA et al., 2016; BARKHORARIAN et al., 2019; DUBREUIL et al., 2012; ESPINOZA et al., 2019; SILVA JÚNIOR et al., 2018) e secas mais prolongadas (DEBORTOLI et al, 2016), para a região da Amazônia.

Além disso alguns estudos comparam a influência da cobertura do solo na P. Há relatos que mostram que a P sazonal e anual não estava correlacionada com a cobertura florestal em escala local (DEBORTOLI et al, 2016), outros mostram que desmatamento provoca mudança no regime convectivo resultando em nuvens não precipitantes (KHANNA et al., 2017), ou relaciona-se com as mudanças na dinâmica atmosférica local, especialmente no aumento do fluxo de calor sensível e convecção sobre pequenas áreas desmatadas (OLIVEIRA et al., 2018).

Enquanto para o Cerrado, Caballero, Ruhoff e Biggs (2022) mostram estudo em que as tendências e impactos do desmatamento na P diferem com o local e escala de análise. Há relatos de tendências decrescentes de P anual (ANACHE et al., 2019; SANTOS, 2016), não tendências para o bioma todo (OLIVEIRA et al., 2014, SILVA et al., 2020), tendências de queda significativa no P médio em dias úmidos e no número médio de dias secos consecutivos (BEZERRA et al., 2019) e outros com tendências negativas de P na estação chuvosa e seca (SILVA et al., 2020, DA SILVA, 2020; SALAZAR et al., 2016).

Outro componente importante no balanço hídrico é a evapotranspiração (ET), com principal função em alimentar o ciclo da água ao retorná-la em forma de vapor para a atmosfera. Consiste em dois processos: 1) evaporação da água no solo, interceptada pela vegetação e em reservatórios abertos como rios e oceanos; 2) transpiração das plantas resultante da abertura dos estômatos (ALLEN et al., 1998). A taxa de ET é influenciada pelo conteúdo de água no solo, pelo tipo de vegetação, pelos aspectos ambientais, pelas práticas de manejo

do solo e, principalmente, por fatores climáticos como: radiação solar, temperatura do ar, umidade do solo e velocidade dos ventos (PENMAN, 1948).

A substituição da vegetação natural por outras coberturas de terra pode afetar o balanço de energia da superfície: o albedo normalmente aumenta e a radiação líquida diminui. A partição da energia de superfície em calor latente e sensível também pode mudar, devido as mudanças na rugosidade superficial e aerodinâmica, no índice de área foliar e na capacidade da vegetação de acessar a água do solo (profundidade da raiz). A magnitude dos impactos na ET dependerá dos tipos de cobertura da terra original e de substituição, e da disponibilidade de água, que é determinada principalmente pelo tipo de solo e precipitação (CABALLERO; RUHOFF; BIGGS, 2022).

Estudos apontados por Caballero, Ruhoff e Biggs (2022) no bioma Amazônico revelam que a conversão de floresta em pastagem ou lavouras reduziu a ET (BAKER; SPRACKLEN, 2019; DE OLIVEIRA et al., 2018; DIAS et al., 2015; FURLAN, 2013; LATHUILLIÈRE et al., 2012; SILVÉRIO et al., 2015; VERGOPOLAN; FISHER, 2016) e casos de aumentos de ET na estação seca em diferentes regiões da Amazônia. Para o Cerrado, os autores mostram que estudos apontam uma maior ET em áreas de vegetação natural quando comparadas às coberturas antrópicas (ANACHE et al., 2019; ARANTES et al., 2016; DA SILVA et al., 2015; GEORGESCU et al., 2013; LOARIE et al., 2011; NÓBREGA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2014; SPERA et al., 2016), diminuição da ET na estação seca (ANDRADE et al., 2014; NÓBREGA et al., 2017; SALAZAR et al., 2016), aumento na estação chuvosa (SALAZAR et al., 2016) e tendências crescentes e decrescentes da ET anual associadas à três hipóteses: 1) atividades antrópicas que reduzem a ET podem ser compensadas por outras atividades antrópicas, como construção de reservatórios e irrigação, que aumentam a ET; 2) as mudanças de uso e cobertura no bioma (pastagem para agricultura) podem aumentar a ET; e 3) aumento da demanda evaporativa pelo aumento da força radiativa dos gases de efeito estufa das temperaturas (OLIVEIRA et al., 2014).

É importante destacar que, apesar do ciclo hidrológico ser um sistema fechado globalmente, em escala de bacia hidrográfica os processos são abertos e conectados com as áreas adjacentes, porém nem sempre eles acontecem na mesma escala temporal e espacial. De acordo com Tucci (2005) um evento chuvoso, de escala temporal na ordem de minutos, pode contribuir para a geração do escoamento superficial e assim alimentar a rede de drenagem da bacia hidrográfica em escala espacial maior, além da recarga dos aquíferos que também atuarão na geração de vazão, porém numa escala temporal maior. Outro exemplo que pode ser citado, são as mudanças climáticas que ocorrem em níveis globais e numa escala temporal maior, podem influenciar em escalas menores ao se referir, por exemplo, a geração de vazão da rede de drenagem, tanto em bacias de pequena ou grande escalas.

### **3.2 Utilização do sensoriamento remoto na hidrologia**

O sensoriamento remoto (SR) na hidrologia tem sido amplamente utilizado como suporte na modelagem. De acordo com Lettenmaier et al. (2015), o SR representa um importante avanço na compreensão científica de processos e variáveis hidrológicas, permitindo que as abordagens dos estudos passaram a ser de escala experimental para uma escala regional e global. Os autores destacam também, que os dados coletados por sensores orbitais e aéreos com resoluções mais finas possibilitaram o estudo detalhado de variáveis importantes como: qualidade da água, umidade da superfície e padrões dos escoamentos em paisagens alteradas.

As informações oriundas de SR podem ser utilizadas para a caracterização de hidrossistemas, desenvolvimento de novas bases teóricas baseadas em observações, validação de modelos de simulação ou serem utilizadas integradas a modelos buscando a melhor representação dos processos físicos (PAIVA et al., 2017). Oliveira, Fleischmann e Paiva (2020) destacam que além do uso de conjuntos de dados de SR para calibração e validação, podem ser utilizados para reduzir as incertezas e fazer previsões em locais com escassez de dados ou com baixa representatividade espacial e temporal. Com relação a

falta de disponibilidade de dados, Collischonn et al (2007) afirmam ser uma limitação para modelos distribuídos, uma vez que existem tantos parâmetros quanto os elementos de discretização da bacia e alguns deles são difíceis de serem estimados devendo ser calibrados.

Alguns produtos de SR podem ser utilizados como dados de entrada, nas fases de calibração e validação dos modelos. Destaca-se os produtos de altimetria do SRTM, TOPEX/Poseidon, Envisat, SARAL/Altika, Jason-2, Sentinel-3 para estimativa de séries históricas de níveis de água em locais poucos monitorados (BIANCAMARIA; HOSSAIN; LETTENMAIER, 2011; PAIVA; DURAND; HOSSAIN, 2015), volume em reservatórios (GAO; BIRKETT; LETTENMAIER, 2012; DE C. ABREU; MAILLARD, 2014), validação e calibração de modelos hidrológicos (LEON et al., 2006; GETIRANA et al., 2010; PAIVA et al., 2013). Produtos de precipitação do TRMM, GPM, PERSIANN, CMORPH, IMERG e MSWEP para análise de integração com modelos numéricos (XIE; JOYCE, 2014), comparar a performance de diversos produtos (ROZANTE et al., 2010; BUARQUE et al., 2011), estudar o fenômeno da precipitação (YANG; SMITH, 2008; BUARQUE et al., 2011) e como dado de entrada em modelos (COLLISCHONN; COLLISCHONN; TUCCI, 2008; JIMÉNEZ, 2011). Produtos de umidade de solos do SMOS e SMAP fornecendo dados para calibração e validação (HIRPA et al., 2014; WANDERS et al., 2014; COLOSSI et al., 2017). Produtos de evapotranspiração do MOD16 e GLEAM como validação (CHEN et al., 2005; RUHOFF et al., 2012; OLIVEIRA; FLEISCHMANN; PAIVA, 2020). E produtos que permitem analisar as anomalias no armazenamento de água no solo como da missão GRACE para utilizar como método de calibração e validação de modelos hidrológicos (PAIVA, 2012; OLIVEIRA; FLEISCHMANN; PAIVA, 2020).

Nesse sentido, é evidente a aplicabilidade do SR na hidrologia e ainda mais em modelos hidrológicos, melhorando suas estimativas. Oliveira, Fleischmann e Paiva (2020) utilizaram os produtos derivados das missões Jason-2, ALOS-PALSAR, GRACE, SMOS e do produto MOD16 para calibrar e validar as estimativas do MGB-IPH. Eles concluíram que a calibração com as

observações atuais de SR foi capaz de melhorar as vazões simuladas pelo modelo e suas representações no balanço hídrico da bacia.

### **3.3 Modelagem hidrológica e o modelo MGB-IPH**

A modelagem hidrológica é um instrumento importante para o entendimento dos processos hidrológicos e sua dinâmica em bacias hidrográficas. As ações antrópicas são responsáveis pela modificação do ambiente, tendo em vista sua influência quantitativa e qualitativa direta sobre os recursos hídricos (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013).

Modelos hidrológicos são representações matemáticas de um processo ou sistema que tem como objetivos entender e buscar respostas às alterações físicas da bacia (TUCCI, 2005). São ferramentas importantes na avaliação e simulação de eventos, associando componentes de entrada e saída do ciclo hidrológico e sua utilização permite analisar os possíveis impactos das mudanças antrópicas no regime hídrico da bacia hidrográfica, além de serem utilizados na análise de consistência, preenchimento de falhas, previsão de vazão em tempo real, dimensionamento e previsão de cenários de planejamento (TUCCI, 2005; BAYER; COLLISCHONN, 2013).

De acordo com (TUCCI, 2005), os modelos possuem limitações decorrentes à heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos. Ainda segundo o autor, muitos modelos têm sido desenvolvidos e sua escolha depende dos objetivos a serem alcançados, das características da bacia, da rede de drenagem e da disponibilidade de dados. Esses modelos se diferem em função do tipo de variáveis utilizadas na modelagem, do tipo de relações entre as variáveis, a forma de representação dos dados e a existência ou não de relações espaciais.

O avanço dos modelos possibilitou a integração de diferentes componentes dos processos hidrológicos e a utilização de *softwares* de SIG para o pré e pós-processamento dos dados, permitiu incluir ferramentas de análise de sensibilidade e incertezas relacionadas à modelagem hidrológica (FAN; COLLISCHONN, 2014a; PONTES et al., 2017).



Segundo Collischonn (2001), para analisar impactos decorrentes da mudança de cobertura da terra em bacias de grande escala, geralmente são utilizados modelos hidrológicos distribuídos de base física. Esses modelos consistem na representação de muitos parâmetros físicos que envolve a bacia, tais como clima, propriedades físicas do solo e do uso e da cobertura com representações no tempo e espaço. Tucci (2005) ressalta que, os modelos distribuídos, agregados a modelos digitais do terreno e ao geoprocessamento, têm buscado melhorar a representatividade espacial e temporal do comportamento das diferentes partes da bacia, sujeitas a diferentes ações antrópicas.

Atualmente existem vários modelos hidrológicos distribuídos que vêm sendo utilizados em todo o mundo para simulação de bacias de grande porte, como exemplo os modelos SHE (ANDERSEN; REFSGAARD; JENSEN, 2001), ARNO (TODINI, 1996), VIC-2L (LIANG et al., 1994), LASCAM (VINEY; SIVAPALAN, 2001); TOPKAPI (LIU; TODINI, 2002), LISFLOOD (VAN DER KNIJFF; YOUNIS; DE ROO, 2010) e MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001).

### **3.3.1 O modelo MGB-IPH**

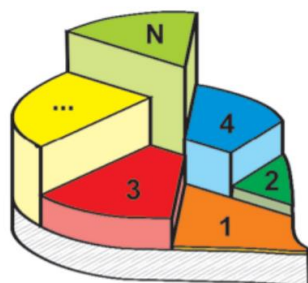
O Modelo de Grandes Bacias (MGB) desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS é um modelo distribuído de base física e conceitual que simula o processo de transformação precipitação-vazão em bacias com áreas maiores de 1000 km<sup>2</sup>. Incorpora informações de características físicas para simular processos hidrológicos, em passos diários ou horários, como: balanço de água no solo, balanço de energia e evapotranspiração, interceptação, geração e propagação tanto dos escoamentos superficial, quanto subsuperficial e subterrâneo da bacia, e propagação do escoamento na rede de drenagem (COLLISCHONN, 2001).

O MGB-IPH é baseado nos modelos LARSIM e VIC-2L com algumas alterações nos módulos de evapotranspiração, do balanço de água no solo e de escoamento da rede de drenagem. A bacia hidrográfica é dividida em pequenas unidades denominadas minibacias, que leva em consideração a área

de contribuição para cada trecho de drenagem pré-definido pelo usuário do modelo. Cada minibacia é dividida em Unidades de Resposta Hidrológica (URH) (Figura 3.3), que correspondem à combinação dos mapas de solo com de cobertura e/ou uso da terra. Essas URH são caracterizadas por apresentarem o mesmo comportamento hidrológico independentemente da localização na minibacia (COLLISCHONN et al., 2007).

Dados fluviométricos, pluviométricos e climáticos - vazão, precipitação, temperatura, pressão atmosférica, insolação, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos – são necessários para a realização do balanço de água e energia, bem como a comparação das vazões simuladas e observadas. Dessa forma, é necessário a utilização de arquivos que contenham essas informações, em que, os dados pluviométricos e climáticos das estações mais próximas são interpolados pelo método Inverso da Distância ao Quadrado, e associados aos centroides de cada minibacia (COLLISCHONN et al., 2007).

Figura 3.1 - Representação de uma minibacia do modelo MGB-IPH dividida em URH (representadas pelas cores).



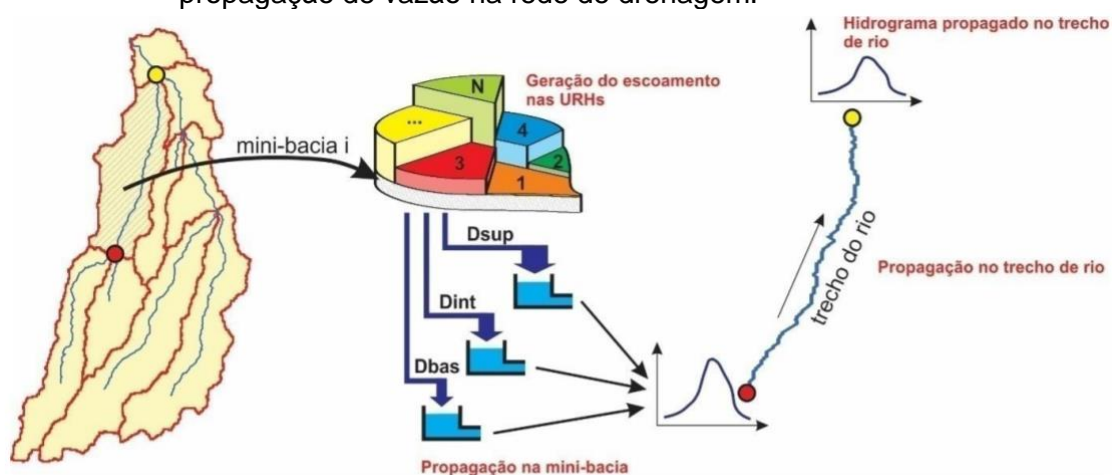
Fonte: Buarque (2015).

De acordo com Collischonn et al. (2007), os balanços verticais e os de energia são calculados individualmente para cada URH das minibacias. A água interceptada pela cobertura vegetal é representada por um reservatório, com capacidade máxima definida pelo Índice de Área Foliar (IAF) da vegetação. Além disso, o balanço de água no solo é calculado considerando o solo como um reservatório único, e o conceito de área de contribuição variável do modelo ARNO (TODINI, 1996) é utilizado para calcular a infiltração da água no solo e a geração de escoamento superficial. A determinação do escoamento

subsuperficial é obtido pela equação semelhante a equação de condutividade hidráulica não-saturada de Brooks e Corey (RAWLS et al., 1993), enquanto o volume percolado no solo até o nível subterrâneo é estimado por uma relação linear simples entre o armazenamento atual e o máximo armazenamento da água no solo (BUARQUE, 2015). O balanço de energia é estimado de acordo com as variáveis meteorológicas da área estudada, em que a evaporação da água do solo, da vegetação e da interceptação é obtida pela equação de Penman-Monteith (SHUTTLEWORTH, 1993).

Os volumes drenados em cada URH são somados em três reservatórios de acordo com o seu tipo: subterrâneo ( $D_{bas}$ ), subsuperficial ( $D_{int}$ ) e superficial ( $D_{sup}$ ). A geração dos escoamentos em cada reservatório é somada e propagada até a rede de drenagem, e a propagação da vazão ocorre devido as características dos rios e das confluências, somando-a para cada trecho de rio até o exutório da bacia (COLLISCHONN, 2001). A Figura 3.4 representa o processo descrito anteriormente.

Figura 3.2 - Representação da geração e propagação de escoamentos na minibacia e propagação de vazão na rede de drenagem.



Fonte: Buarque (2015).

Inicialmente, o modelo foi desenvolvido para realizar propagação do escoamento na rede de drenagem utilizando o método de Muskingum-Cunge (TUCCI; COLLISCHONN, 2001). Uma versão mais recente, o modelo inercial de propagação de vazão, foi incluído no MGB-IPH, com capacidade de representar planícies de inundações, efeitos de remanso, entre outras

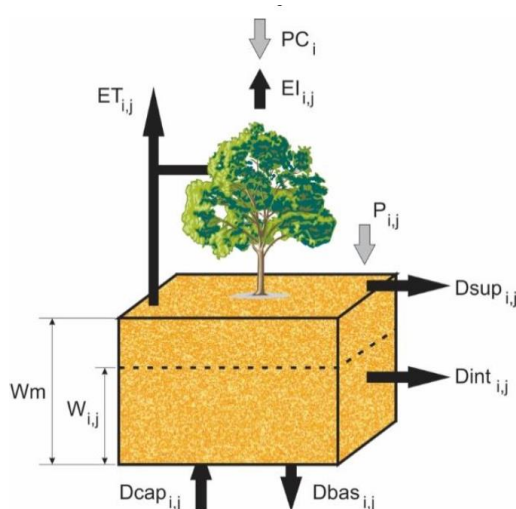
características hidrodinâmicas (PONTES et al., 2015). Além disso, o modelo ganhou uma interface que utiliza dados em SIG, que permite etapas de pré-processamento integrado e testado a um *software* livre de SIG, facilitando a interpretação de resultados e as etapas de pós-processamento (FAN; COLLISCHONN, 2014).

### 3.3.2 Simulação dos processos hidrológicos

No MGB-IPH em sua versão mais recente 4.6 a simulação dos processos hidrológicos é dividida em duas etapas: 1) verticais: representados pela transformação da chuva em escoamento, constituídos pela interceptação da água pela vegetação, balanço de água no solo, evapotranspiração, percolação da água para o aquífero, fluxo ascendente e geração dos escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos; 2) horizontais: representados matematicamente pela propagação dos escoamentos nas minibacias e a propagação de vazões na rede de drenagem.

Os processos verticais podem ser observados na Figura 3.5, que representa o balanço de água no solo para uma URH. Na figura,  $PC_i$  é a precipitação total,  $E_{i,j}$  é a parcela da precipitação que é interceptada pela vegetação e disponível para evaporação,  $ET_{i,j}$  é a evapotranspiração,  $P_{i,j}$  é a precipitação que atinge a camada do solo,  $W_m$  é a capacidade de armazenamento total do solo,  $W_{i,j}$  é o armazenamento inicial do solo,  $D_{sup,i,j}$  é o escoamento superficial,  $D_{int,i,j}$  é o escoamento subsuperficial,  $D_{bas,i,j}$  é o escoamento subterrâneo e  $D_{cap,i,j}$  é o fluxo ascendente. Os termos  $i$  e  $j$  representam a identificação da minibacia e URH respectivamente.

Figura 3.3 - Representação do balanço vertical do solo do modelo para uma URH.



Fonte: Buarque (2015).

As equações relacionadas ao balanço vertical do solo utilizadas no modelo, e aquelas referente à geração de escoamento podem ser obtidas a partir de trabalhos disponíveis na literatura (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007; PAIVA, 2009; PAIVA; COLLISCHONN; TUCCI, 2011; BUARQUE, 2015).

### 3.3.3 Parâmetros do modelo

Os parâmetros do MGB-IPH estão associados às variáveis conhecidas que se relacionam com as características da cobertura e uso, bem como do tipo do solo (COLLISCHONN, 2001). Segundo Tucci e Collischonn (2001), existem dois tipos de parâmetros no modelo:

- 1) Fixos: aqueles que podem ser mensuráveis ou estimados a partir de informações na literatura. Esses parâmetros estão relacionados ao tipo de cobertura e uso da terra (Tabela 3.1).
- 2) Calibráveis: aqueles que podem apresentar variações de valores, necessitando a calibração do parâmetro a cada aplicação do modelo para obter bons resultados, comparando os hidrogramas simulados com os

observados. Esses parâmetros podem ser calibrados por URH ou por sub-bacia e estão relacionadas as características do tipo de solo (Tabela 3.2).

Tabela 3.1 - Parâmetros considerados fixos no modelo MGB-IPH.

| <b>Parâmetro</b>                  | <b>Unidade</b>    | <b>Descrição</b>   |
|-----------------------------------|-------------------|--|
| Índice de Área Foliar (IAF)       | -                 | Relação entre a área das folhas da vegetação e da área de parcela de solo.   |
| Albedo ( $\alpha$ )               | -                 | Parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura e uso.   |
| Resistência Superficial ( $r_s$ ) | s.m <sup>-1</sup> | Representa a resistência estomática das folhas, ou seja, o fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. É diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais, como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta. |
| Altura do Dossel (z)              | m                 | A altura média da vegetação é utilizada no modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle da evapotranspiração.  |

Fonte: Adaptado de Buarque (2015).

Tabela 3.2 - Parâmetros considerados calibráveis no modelo MGB-IPH.

| <b>Parâmetro</b>                                     | <b>Unidade</b>                                    | <b>Descrição</b>  |
|--|---|---|
| Capacidade de Armazenamento do Solo (Wm)             | mm  | Capacidade máxima de armazenamento de água no solo sem que ocorra escoamento superficial.   |
| Forma da relação entre armazenamento e saturação (b) | -   | Parâmetro que controla a separação entre a saturação da capacidade de armazenamento do solo e o escoamento superficial. Valores altos implica em maior volume de escoamento superficial e menor percolação no solo.                     |
| Drenagem subterrânea (Kbas)                          | mm.dia <sup>-1</sup>                              | Parâmetro que controla a taxa de percolação de água no solo durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo. É análogo à condutividade hidráulica saturada e proporcional ao grau de saturação do solo. |
| Drenagem subsuperficial (Kint)                       | mm.dia <sup>-1</sup>                              | Parâmetro que controla a quantidade de água da camada de solo que escoam subsuperficialmente.   |
| Forma da curva de redução (XL)                       | -   | Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo.   |
| Fluxo ascendente (CAP)                               | mm.dia <sup>-1</sup>                              | Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.  |
| Armazenamento Residual (Wc)                          | mm.dia <sup>-1</sup>                              | Limita o armazenamento residual e subterrâneo.  |
| Retardo do reservatório superficial (CS)             | -   | Parâmetro para calibração da propagação superficial nas minibacias.   |
| Retardo do reservatório subsuperficial (CI)          | -   | Parâmetro para calibração da propagação subterrânea nas minibacias.   |
| Retardo do reservatório subterrâneo (CB)             | horas   | Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.   |
| Vazão de Base (QB)                                   | m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup> | Parâmetro que representa o fluxo de base da minibacia.  |

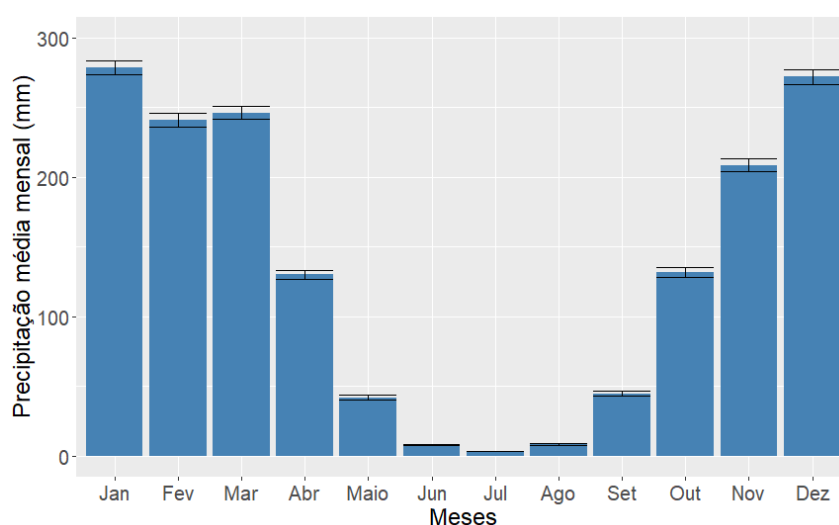
Fonte: Adaptado de Buarque (2015).

#### 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Tocantins-Araguaia é a quarta maior bacia de drenagem da América do Sul, estendendo-se por aproximadamente 800.000 km<sup>2</sup> e englobando uma parte de dois grandes biomas sul-americanos: floresta amazônica ao norte e savana brasileira (Cerrado) ao sul. É formado principalmente por dois grandes sistemas fluviais: Tocantins e Araguaia (ROSARIO KLAUTAU DE ARAUJO GOMES; LIMA FERNANDES, 2017). Para este estudo, a área de interesse das análises correspondeu a bacia do Rio Araguaia (BRA).

De acordo com os autores, o rio Araguaia é um rio plano que nasce na Serra dos Caiapós a 850 m, viajando quase paralelo ao Tocantins por cerca de 2.600 km. As condições climáticas que predominam na bacia do rio Araguaia são de natureza tropical continental, devido a sua posição continental que não sofre o efeito direto da confluência intertropical. Segundo Koppen, essa região é classificada em tipo Aw, de clima quente e úmido, com precipitações anuais da ordem de 1700 mm, temperaturas médias mensais oscilando entre 24 e 26 ° C (AQUINO; LATRUBESSE; SOUZA FILHO, 2009). Nas Figuras 4.1 e 4.2 é possível observar as médias mensais e anuais da precipitação da área de estudo, onde fica evidente que a estação chuvosa ocorre entre os meses de outubro a março, enquanto a estação seca nos meses de maio a agosto.

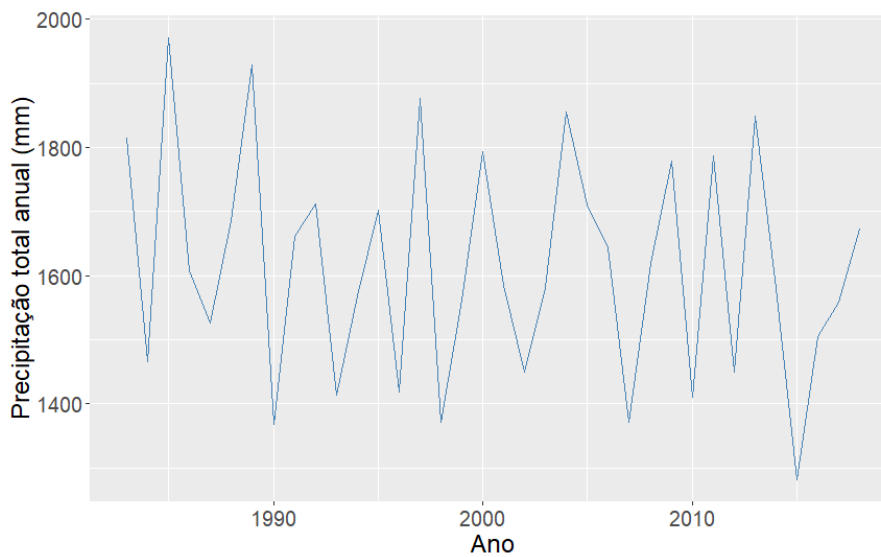
Figura 4.1 - Precipitação média mensal da bacia do Rio Araguaia.



Fonte: Produção do autor.



Figura 4.2 - Precipitação total anual da bacia do Rio Araguaia.

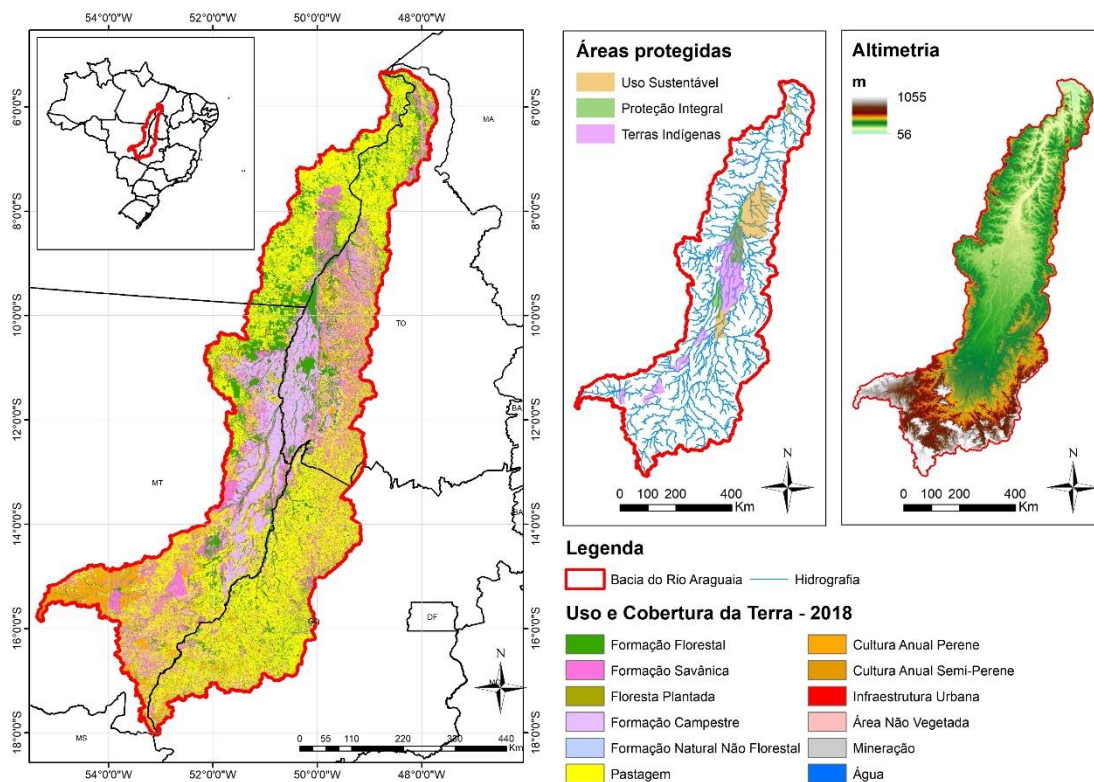


Fonte: Produção do autor.

A BRA está localizada entre quatro estados dentro do território brasileiro, Goiás, Mato Grosso, Pará e Tocantins (Figura 4.3). As altitudes na área variam entre 56 m e 1055 m e 23% do seu território está localizado dentro dos limites do bioma Amazônico enquanto 77% do Cerrado, sua área aproximada é de 384.000 km<sup>2</sup> (AQUINO; LATRUBESSE; SOUZA FILHO, 2009).

O rio Araguaia é subdividido em três unidades: Alto Araguaia com extensão de 450 km de canal, drena áreas de rochas cristalinas pré-cambrianas, rochas paleozóicas e mesozóicas da Bacia Sedimentar do Paraná, das nascentes em Mineiros (GO) até a cidade de Registro do Araguaia (GO). O Médio Araguaia com 1.160 km de extensão caracteriza-se pelo desenvolvimento de sua planície aluvial formada por sedimentos Cenozóicos terciários e quaternários, desde Registro do Araguaia (GO) até Conceição do Araguaia (PA). O Baixo Araguaia com 500 km de extensão, não desenvolve planície aluvial, drenando rochas cristalinas pré-cambrianas do Escudo Brasileiro, inicia-se a partir de Conceição do Araguaia (PA) até a confluência com o rio Tocantins (LATRUBESSE et al., 2009).

Figura 4.3 - Mapa de localização da bacia do Rio Araguaia, unidades de conservação e altimetria.



O mapa de uso e cobertura da terra foi derivado do projeto MAPBIOMAS (2019), o de unidade de conservação do IBGE (2020) e altimetria pelo SRTM (2001).

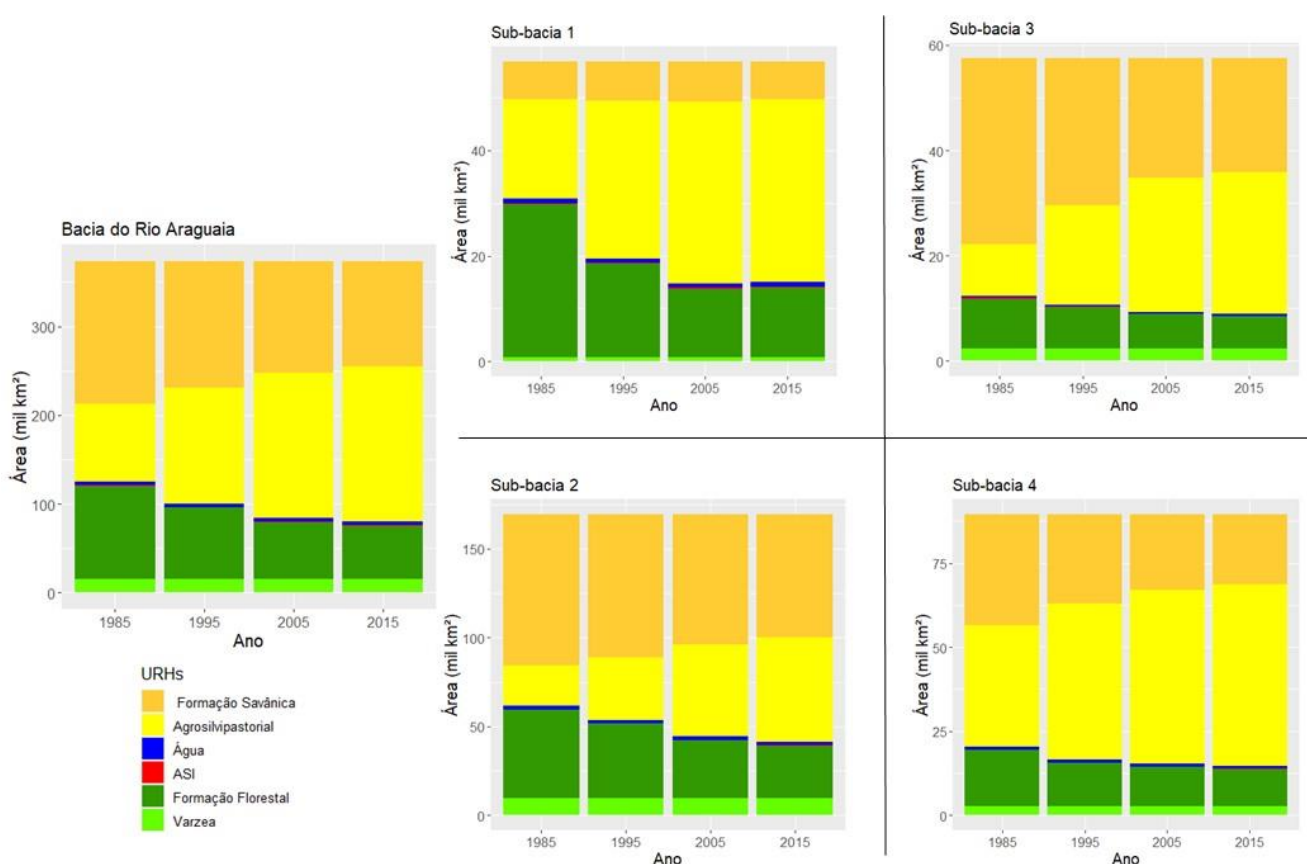
Fonte: Produção do autor.

A BRA atualmente é considerada uma área primordial para o desenvolvimento econômico para o país, em função das demandas nacionais e internacionais para produção de *commodities*. Nas últimas quatro décadas, grandes extensões da bacia vêm sendo objeto de um intenso processo de transformação, associado ao avanço da fronteira agrícola e as mudanças na forma de ocupação, cujas consequências sobre os recursos hídricos da bacia começam a ser motivo de preocupação para a sociedade. Ressalta-se a preocupação com a degradação dos recursos hídricos, em vários setores da BRA, atribuída, principalmente, ao desmatamento e ocupação das áreas de Cerrado, por empreendimento agrícolas, particularmente na forma de grandes

extensões contínuas ocupadas por monoculturas, principalmente cana-de-  
açúcar e soja (BAYER et al., 2020).

Analisando a Figura 4.4 é possível perceber a redução das classes de  
formação florestal e Savânica com o aumento da classe agrossilvipastoril. Em  
1985, cerca de 71% (275.179 km<sup>2</sup>) da área era composta pelas classes de  
formação florestal (28%) e Savânica (43%) enquanto a classe agrossilvipastoril  
representavam cerca de 24% (91.565 km<sup>2</sup>). Uma tendência de redução das  
áreas de vegetação nativa (florestal e Savânica) é observada nos períodos  
seguintes, alcançando em 2015 uma redução de 23% (90.106 km<sup>2</sup>), ou seja,  
uma redução de 12% da classe de formação florestal e 11% da formação  
Savânica e, conseqüentemente, um aumento da classe agrossilvipastoril.

Figura 4.4 - Mudanças de uso e cobertura da terra por cada período analisado na  
Bacia do Rio Araguaia e suas sub-bacias.



Fonte: Produção do autor.

Para este estudo a BRA foi subdivida em 4 sub-bacias conforme apresentado na Seção 5.2.1. Essas mudanças também são observadas em toda as sub-bacias analisadas. Em geral, na sub-bacia 1, as reduções da classe de formação florestal foram maiores, cerca de 28% (16.100 km<sup>2</sup>), enquanto da formação Savânica foram de apenas 1% (426 km<sup>2</sup>), entre os períodos de 1985 e 2015. Esse mesmo comportamento também é observado na sub-bacia 2, com uma redução de 12% (21.154 km<sup>2</sup>) e 9% (16.822 km<sup>2</sup>), respectivamente. Nas sub-bacias 3 e 4 as mudanças foram maiores na formação Savânica, com redução de 24% (14.054 km<sup>2</sup>) e 14% (12.403 km<sup>2</sup>), respectivamente. Enquanto as reduções nas formações florestais foram de 6%, tanto para a sub-bacia 3 (3.375 km<sup>2</sup>), quanto a sub-bacia 4 (5.770 km<sup>2</sup>).

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

Nessa seção serão apresentados os principais recursos e metodologias utilizadas no desenvolvimento da pesquisa e o cumprimento dos objetivos definidos. A avaliação dos impactos decorrentes das mudanças de uso e cobertura da terra ocorreu por meio de simulação. Para isso utilizou-se um modelo hidrológico distribuído de grande escala para a representação dos processos hidrológicos da área de estudo.

De maneira geral, estão descritos os principais dados e recursos de entrada para o processamento derivados do sensoriamento remoto e outras fontes e as metodologias envolvidas na pesquisa como: o processamento do modelo, análise de sensibilidade, calibração e validação, geração dos cenários de mudanças de uso e cobertura da terra e a avaliação dos impactos dessas mudanças no balanço hídrico da Bacia do Rio Araguaia (BRA).

### **5.1 Dados e recursos para o processamento derivados de sensoriamento remoto e outras fontes**

Os principais dados utilizados no estudo e no processo de modelagem são o Modelo Digital de Elevação (MDE), mapas de tipo de solo, uso e cobertura da terra, bem como informações hidrometeorológicas e aqueles derivados de sensoriamento remoto para a parametrização do modelo. A seguir são apresentadas as principais características destes dados e o pré-processamento realizado antes de serem utilizados no modelo.

#### **5.1.1 Modelo digital de elevação**

O processo de discretização de uma bacia hidrográfica, como a extração da rede de drenagem e outro atributos, dependem principalmente de fatores topográficos. Geralmente, este processo ocorre com o auxílio de dados de elevação, considerado uma etapa importante em diversos estudos ambientais que utiliza a rede de drenagem como unidade de análise (PEREIRA et al., 2018).

De acordo com Pereira et al. (2018), em áreas extensas, o topo das árvores pode ser uma representação aceitável do relevo. No entanto, os desflorestamentos, a presença de muitas árvores emergentes, de estradas, bem como mudanças súbitas no tipo de vegetação introduzem artefatos nos dados de elevação, levando a uma extração incorreta da rede de drenagem. Além disso os autores afirmam, que a utilização de imagens classificadas com a identificação de desmatamento e de regiões florestais melhora este processo (OLIVEIRA; ORTIZ; ROSIM, 2014).

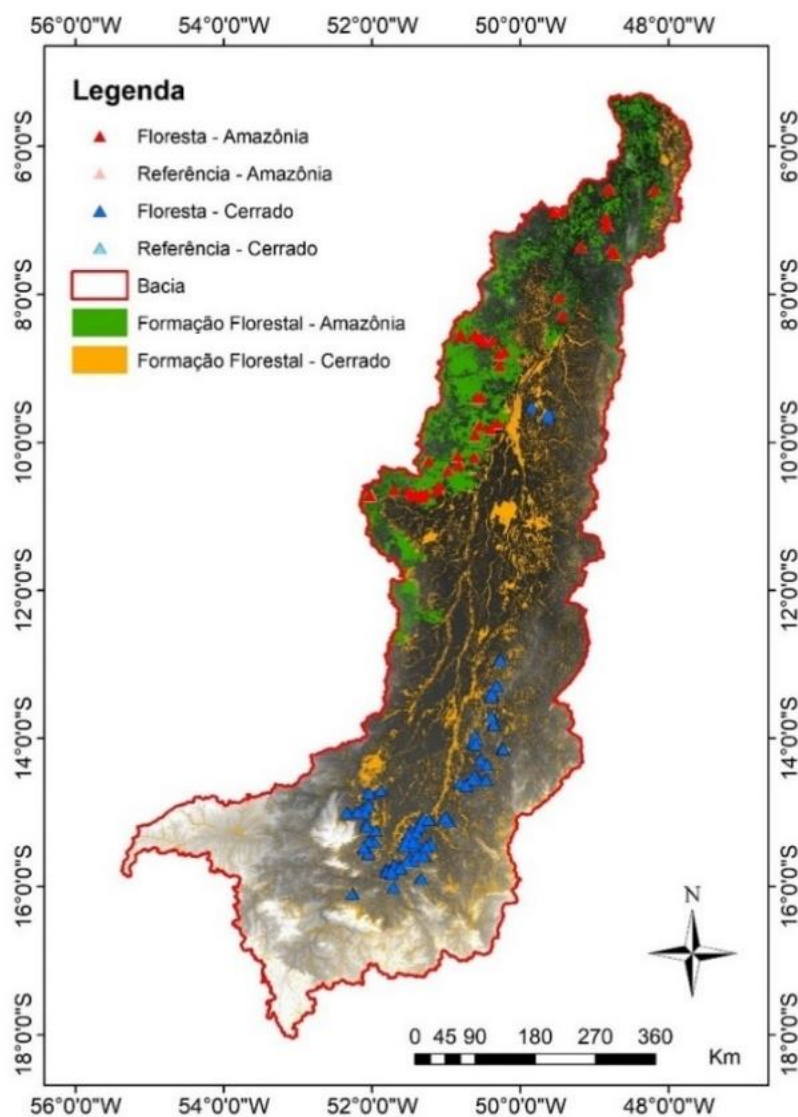
Neste estudo, o dado de elevação utilizado foi derivado do produto de altimetria do SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) disponibilizado pela USGS (*United States Geological Service*) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Esse produto apresenta resolução espacial de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 metros), com cobertura de quase toda a superfície terrestre, entre as latitudes de 60°N a 56°S (FARR et al., 2007).

Para minimizar os efeitos do desflorestamento na discretização da bacia do Rio Araguaia, a correção do MDE foi baseada nos trabalhos de Pereira et al. (2018) e Renno (2009). Os autores apresentam uma metodologia que permite minimizar estes efeitos em dados de altimetria do SRTM. Para isso, foram selecionados pares de pontos aleatórios (n=120) que correspondem a amostragem dos valores de altimetria das classes de correção e de referência do nível do solo (Figura 5.1). Devido a extensão da área que apresentam formações florestais da Amazônia e Cerrado, as classes de correção foram divididas entre essas duas categorias, e como de referência utilizou-se a classe de pastagem. O mapa de uso e cobertura da terra utilizado como referência de correção foi derivado do Projeto MapBiomas para o ano de 2000, mesmo ano de aquisição dos dados SRTM (FARR et al., 2007).

O valor de correção para cada classe foi definido a partir da mediana da diferença dos pares de amostra, correção e referência, que resultou nos valores de 19 m para a classe de Formação Florestal Amazônica e de 8 m para a classe de Formação Florestal Savânica. Esses valores foram subtraídos do raster original para as respectivas classes, e para minimizar os efeitos abruptos

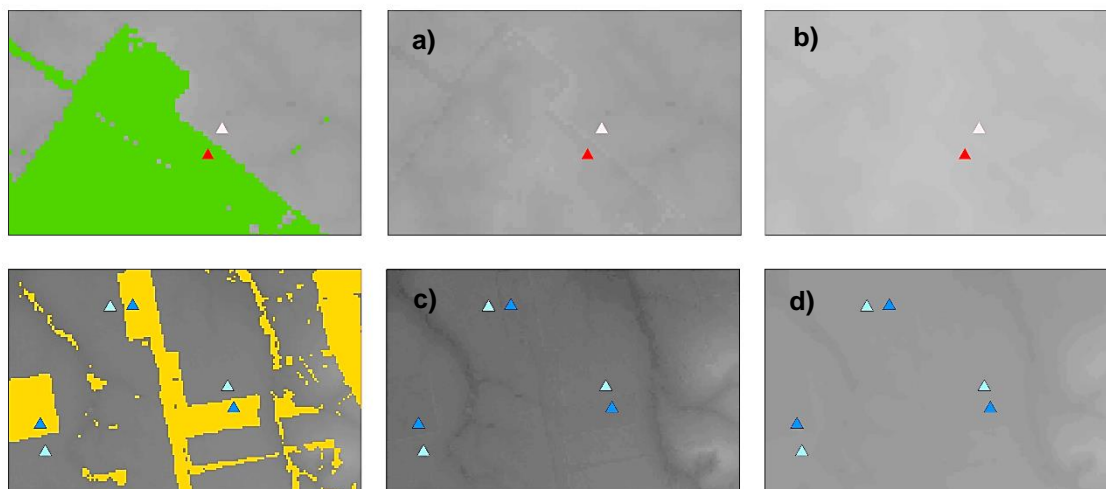
da correção foi utilizado um filtro de mediana de 3x3 aplicado no raster corrigido (Figura 5.2). Destaca-se que o valor encontrado de 19 m foi o mesmo encontrado pelos autores Pereira et al. (2018) e Rennó (2009) ao estudar regiões do bioma amazônico.

Figura 5.1 - Mapa de localização dos pares de pontos amostrais para correção do SRTM de acordo com as classes de Formação Florestal da Amazônia e do Cerrado.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.2 - Exemplo de resultados da correção do SRTM.



a) e c) SRTM sem correção para as classes de Formação Florestal da Amazônia e do Cerrado respectivamente. b) e d) SRTM com correção e filtro.

Fonte: Produção do autor.

### 5.1.2 Mapa de solos

O mapa de tipos de solos utilizado na pesquisa foi derivado do projeto RADAMBRASIL com escala de 1:250.000, aperfeiçoado e disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2018), com cobertura para todo o território nacional. Os dados foram recortados para a área da bacia (Figura 5.3).

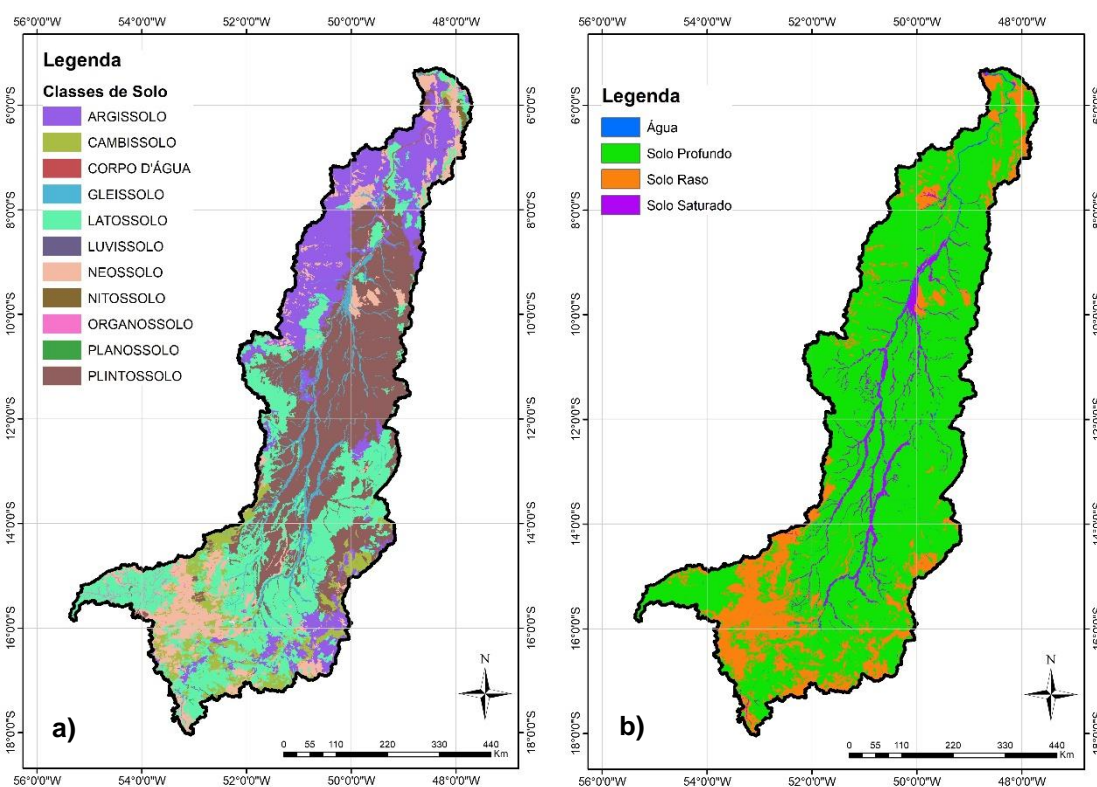
Um processo de agrupamento das classes foi realizado de acordo com o trabalho desenvolvido por Fan et al. (2015), que apresenta um mapa de URH para a América do Sul. Esta etapa é importante para a definição das classes de URH, utilizadas pelo modelo para o cálculo do balanço hídrico do solo.

De acordo com o trabalho desenvolvido pelos autores, as classes de tipo de solo passaram por um processo de agrupamento de acordo com o potencial de geração de escoamento superficial. Dessa forma, definiu-se quatro classes subjetivas: 1) baixo potencial, ou solos profundos; 2) alto potencial, ou solos rasos; 3) solos saturados e de várzea, com elevado teor de umidade e saturação; e 4) água.



Assim como Fan et al. (2015), a primeira classe, de solos com baixo e médio potencial de geração de escoamento e alto potencial de armazenamento de água, foi composta das classes "latossolos", "nitossolos", "plintossolos", "organossolos" e "argissolos". A segunda classe de solos com mais capacidade de geração de escoamentos e menos capacidade de armazenamento de água, agrupou as classes "neossolos", "luvisolos" e "cambissolos". Na terceira classe, composta por solos de várzea e de elevada saturação, foram colocados os solos do tipo "gleissolo" e "planossolo". O mapa final com o agrupamento das classes está apresentado na Figura 5.3, observa-se a predominância da classe de solo profundo em relação a de solo raso, representando cerca de 77% e 17%, respectivamente, da área.

Figura 5.3 - Mapa de tipos de solos e mapa final com agrupamento das classes.



a) Mapa de tipos de solos da bacia b) Mapa de solos final com agrupamentos das classes.

Fonte: Produção do autor.

### 5.1.3 Mapa de uso e cobertura da terra

O mapa de uso e cobertura da terra foi derivado do Projeto MapBiomias – coleção 4.1, com resolução espacial de 30 metros. O MapBiomias é uma iniciativa entre instituições de ensino, organizações não-governamentais e privadas que desenvolveram uma série temporal, entre 1985 a 2018, de uso e cobertura da terra para todo o Brasil, por meio de algoritmos de classificação das imagens dos Landsat 5, 7 e 8, coletadas a partir dos sensores Landsat *Thematic Mapper (TM)*, *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)*, *Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor (OLI-TIRS)*; mais informações podem ser acessadas no site do projeto (<http://mapbiomas.org>).

Para a simulação foram selecionados os anos de 1985, 1995, 2005 e 2015, representando um período de variação de 10 anos de mudanças a partir do primeiro ano (1985) da série temporal do MapBiomias. Os mapas foram tratados por duas maneiras sequenciais: 1) agrupamento das classes e 2) tabulação cruzada entre os anos.

Da mesma forma que no mapa de solos, as classes de uso e cobertura da terra foram agrupadas levando em consideração a similaridade do papel que cada uma delas exercem no ciclo hidrológico. Assim, definiu-se 5 classes de uso e cobertura: Formação Florestal, Formação Savânica, Agrossilvipastoril, Área Semipermeável (ASI) e Água.

Em seguida, para produzir um dado mais consistente, essas classes passaram por um processo de tabulação cruzada com o objetivo de eliminar transições equivocadas decorrentes do processo de classificação que, na escala temporal analisada, é pouco provável de acontecer. Um exemplo disso é a transição da classe Formação Florestal para Formação Savânica, sabe-se que são estruturas fitofisiológicas diferentes. Além disso, as formações florestais mais predominantes na Bacia do Rio Araguaia encontram-se no bioma amazônico e em regiões de zonas ripárias, diferente da distribuição espacial das formações Savânica na região.

Outro exemplo disso, seriam as transições das classes ASI e Água para outras classes, uma vez que se entende que são áreas consolidadas e muitas vezes

introduzem artefatos na paisagem, no caso das ASI, que são inalterados. A Tabela 5.1 apresenta as classes mapeadas pelo Mapbiomas para a Bacia do Rio Araguaia, os percentuais em relação a área total da bacia, para qual classe definida no estudo ela foi agrupada e as transições consideradas na tabulação cruzada.

Tabela 5.1 – Quantificação das áreas das classes de uso e cobertura da terra presentes na Bacia do Rio Araguaia, agrupamentos e transições consideradas na tabulação cruzada.

| Classes – MapBiomas 4.1        | Área (%) |      |      |      | ID | Classes definidas         | Transição |             |
|--------------------------------|----------|------|------|------|----|---------------------------|-----------|-------------|
|                                | 1985     | 1995 | 2005 | 2015 |    |                           | De        | Para        |
| Formação Florestal             | 30,9     | 24,3 | 19,7 | 18,5 | 1  | Formação Florestal        | 1         | 1<br>3<br>4 |
| Formação Savânica              | 32,3     | 28,0 | 23,4 | 22,1 | 2  | Formação Savânica         | 2         | 2<br>3<br>4 |
| Formação Campestre             | 11,9     | 11,4 | 11,6 | 11,1 |    |                           |           |             |
| Formação Natural Não Florestal | *        | *    | *    | *    |    |                           |           |             |
| Floresta Plantada              | *        | *    | *    | 0,1  | 3  | Agrossilvipastoril        | 3         | 3<br>4      |
| Pastagem                       | 22,7     | 33,5 | 41,2 | 42,8 |    |                           |           |             |
| Cultura Anual Perene           | 1,1      | 1,7  | 3,1  | 4,3  |    |                           |           |             |
| Cultura Semi-Perene            | *        | *    | *    | 0,1  |    |                           |           |             |
| Infraestrutura Urbana          | *        | *    | 0,1  | 0,1  | 4  | Superfícies Semipermeável | 4         | 4           |
| Mineração                      | *        | *    | *    | *    |    |                           |           |             |
| Outra Área Não Vegetada        | 0,3      | 0,1  | 0,1  | 0,1  |    |                           |           |             |
| Água                           | 0,8      | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 5  | Água                      | 5         | 5           |

\* valores percentuais abaixo de 0,1%.

Fonte: Produção do autor.

#### 5.1.4 Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos foram extraídos por meio da série histórica das estações localizadas na área de estudo e sua proximidade, provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA) e disponibilizadas na plataforma Hidroweb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>). A escolha das estações consistiu por meio da análise de disponibilidade dos dados, utilizando o *software* Super Manejo de Dados 2.1, desenvolvido pelo grupo de pesquisa do IPH para aplicações no MGB.

Para isso, foram selecionadas as estações que apresentaram pelo menos 80% dos dados para a série histórica entre 01 de janeiro de 1983 a 31 de dezembro de 2018, totalizando 311 estações. A localização das estações selecionadas pode ser observada no Apêndice A (Figura A.1) e as suas informações na Tabela A.1

#### **5.1.5 Dados fluviométricos**

Da mesma maneira que os dados pluviométricos, as informações fluviométricas foram extraídas por meio da série histórica das estações localizadas na área de estudo, provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA) e disponibilizadas na plataforma Hidroweb.

Para isso, foram selecionadas as estações que apresentaram pelo menos 80% dos dados para a série histórica entre 01 de janeiro de 1983 a 31 de dezembro de 2018. Além disso, uma análise de sua localização permitiu identificar aquelas que pudessem representar melhor a configuração das sub-bacias da área de estudo, com relação ao padrão topográfico. Neste sentido, selecionou-se 4 estações fluviométricas conforme apresentado no Apêndice B (Figura B.1) que foram utilizadas na calibração do modelo e suas informações também podem ser observadas na Tabela B.2.

#### **5.1.6 Dados climáticos**

Os dados climáticos (temperatura, pressão atmosférica, insolação, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos) foram extraídos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), baseados nas normais climatológicas entre 1981 e 2010 e disponibilizados em sua plataforma (<https://portal.inmet.gov.br/normais>). Foram selecionadas as estações localizadas dentro e no entorno da área de estudo, totalizando 26 estações. No Apêndice C (Figura C.1) apresenta a localização das estações e na Tabela B.1 as suas informações.

### **5.1.7 Índice de Área Foliar, Altura da Vegetação e Albedo**

Conforme descrito anteriormente, os parâmetros fixos do modelo estão relacionados com o tipo de uso e cobertura da terra, sendo eles: Índice de Área Foliar, Altura da Vegetação, Albedo e Resistência Superficial. Esses parâmetros podem ser obtidos a partir de medições diretas, que demanda recursos e tempo para a medição, ou podem ser adotados valores de referências obtidos na literatura (BAYER; COLLISCHONN, 2013; OLIVEIRA; FLEISCHMANN; PAIVA, 2020).

Uma outra maneira é realizar as estimativas a partir de dados de sensoriamento remoto, que permitem obter informações com maior variabilidade espacial e temporal. Dessa forma, foram utilizados produtos disponíveis para realizar a parametrização do modelo para os seguintes parâmetros:

#### **a) Índice de Área Foliar**

Para a estimativa deste parâmetro foi utilizado o produto do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imagins Spectroradiometer*), MCD15A3H (v006) que apresenta dados composto em resolução temporal de 4 dias, que seleciona os melhores valores no período para ambos os satélites Aqua e Terra. Este produto apresenta uma resolução espacial de 500 metros e uma série temporal desde 2002 até o presente (MYNENI; KNYAZIKHIN; PARK, 2015).

#### **b) Altura da Vegetação**

Para a estimativa deste parâmetro foi utilizado o produto elaborado por Simard et al. (2011), que apresenta um mapa global da altura do dossel com resolução espacial de 1 km. Os autores elaboraram o produto a partir dos dados de 2005 do Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) a bordo do satélite ICESat (Ice, Cloud and land Elevation Satellite). Os valores de altura do dossel derivados de GLAS foram altamente correlacionados com outras variáveis auxiliares espacialmente mais

densas disponíveis globalmente, o que permitiu realizar a modelagem a partir de mapas de tipo de floresta, cobertura de árvore, elevação e climatologia (SIMARD et al., 2011).

### **c) Albedo**

Para a estimativa deste parâmetro foi utilizado o produto do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imagins Spectroradiometer*), MCD43A1 (v006) e Parâmetros do Modelo de Albedo (BRDF/Albedo) que apresenta dados composto em resolução temporal de 16 dias e seleciona os melhores pixels representativos que inclui os valores no período para ambos os satélites, Aqua e Terra. Este produto apresenta uma resolução espacial de 500 metros e uma série temporal desde 2000 até o presente (SCHAAF; WANG, 2015). Além disso, para a estimativa do valor do albedo total para área de estudo, foi utilizado a equação proposta por Liang (2001) que apresenta formulações de conversão dos albedos derivados de cada banda e para diversos sensores, incluindo o MODIS.

## **5.2 Metodologia**

A seguir são apresentadas as principais metodologias de processamento, calibração e validação, bem como a análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo e a análise dos impactos no balanço hídrico decorrentes das mudanças históricas que aconteceram na BRA e por meio de cenários hipotéticos de mudança.

### **5.2.1 Discretização da Bacia do Rio Araguaia**

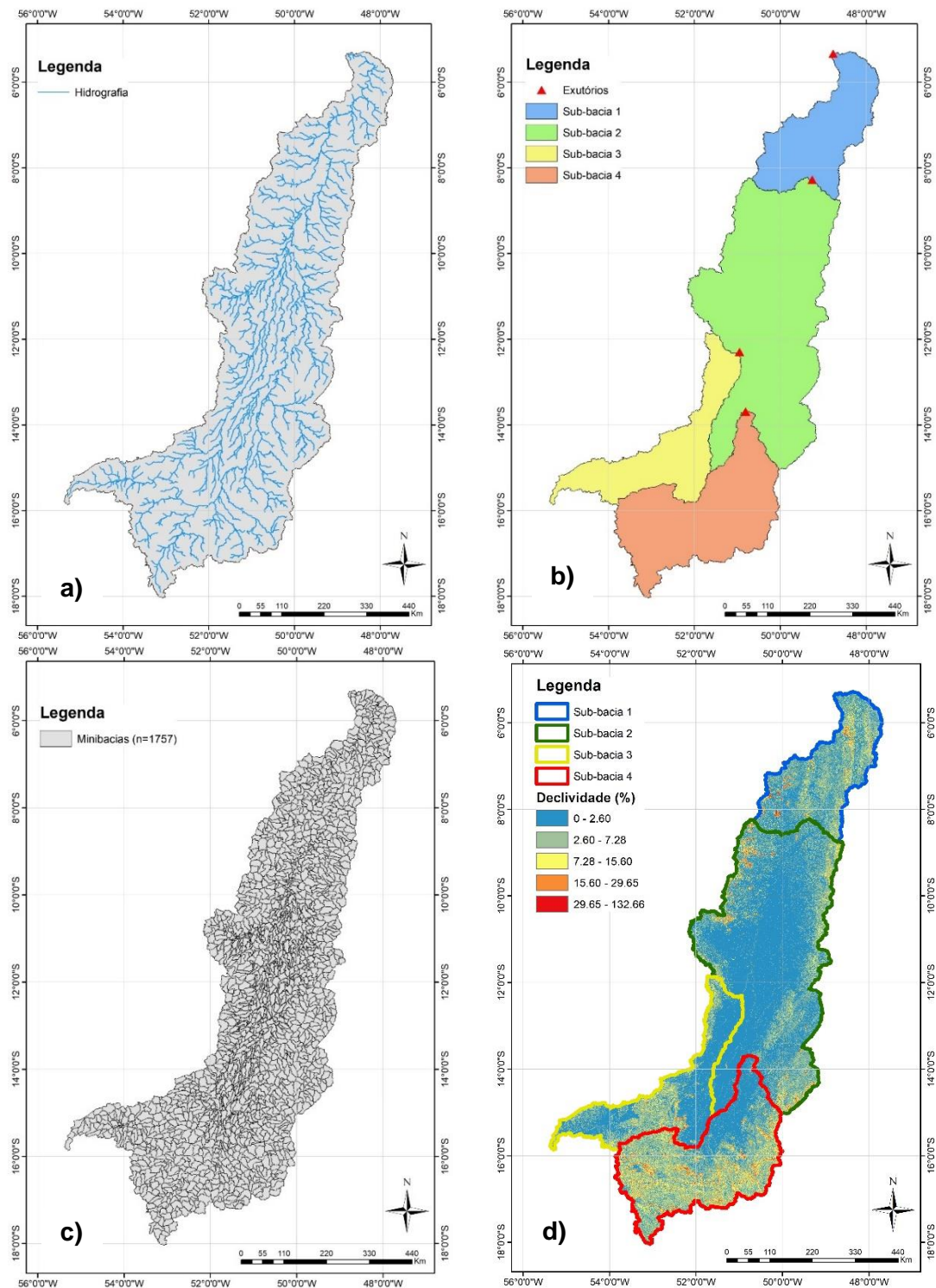
A primeira etapa realizada para o processamento do modelo foi a construção do banco de dados espaciais. Nessa fase foi utilizado o plugin *IPH-Hydro Tools*, para discretização da bacia e obtenção dos dados necessários para a simulação como: MDE Hidrologicamente Consistente (MDEHC), mapas de

fluxo acumulado, direção de fluxo, delimitação das sub-bacias, minibacias e das URH (SIQUEIRA, et al., 2016).

A geração do MDEHC busca eliminar as depressões do MDE original, definidas como uma ou mais células com elevação menor que as vizinhas, resultando em regiões sem exutório definido (ZANDBERGEN, 2006; PAZ; COLLISCHONN; FAN, 2009). Para esta etapa foi utilizado a técnica de remoção MHS (*Modified Heuristic Search*), que consiste na busca por caminhos de mínimo custo atrelado as técnicas de preenchimento e rompimento para a definição final das direções de fluxo (JARDIM et al., 2015).

A geração da rede de drenagem foi realizada por meio do mapa de fluxo acumulado, com base em um limiar de 200 km<sup>2</sup> de área de drenagem na qual foi definida. Para a delimitação das sub-bacias foi considerado como exutório as estações fluviométricas selecionadas e descritas anteriormente. E as minibacias geradas com base na segmentação da rede de drenagem em trechos iguais de 20 km, que visa manter a estabilidade dos modelos de propagação (PONTES et al., 2015). Dessa forma, definiu-se 4 sub-bacias e 1757 minibacias, como pode ser observado na Figura 5.5.

Figura 5.4 - Mapa de hidrografia, sub-bacias e minibacias geradas na etapa de discretização da Bacia do Rio Araguaia.



a) Mapa de hidrografia b) Mapa de sub-bacias c) Mapa de minibacias e d) Mapa de declividade.

Fonte: Produção do autor.



### 5.2.2 Definição das Unidades de Respostas Hidrológicas

Os mapas de Unidades de Respostas Hidrológicas (URH) foram elaborados por meio de álgebra de mapa, combinando os mapas de tipo do solo com o de uso e cobertura, levando em consideração as classes já agrupadas. Esse agrupamento possibilita trabalhar em unidades que apresentam respostas hidrológicas semelhantes e para garantir o limite de 9 classes de URH para aplicação do modelo (MEDEIROS et al., 2019). Na Tabela 5.3 é apresentado um descritivo com as classes da URH definidas para o estudo

Tabela 5.2 - Descrição das classes de URH definidas para o estudo.

| URH                                 | Abreviação | Descrição   |
|-------------------------------------|------------|---|
| Formação Florestal em solo profundo | FlorProf   | Classe que representa toda a formação florestal que se encontram sobre solos profundos.             |
| Formação Florestal em solo raso     | FlorRaso   | Classe que representa toda a formação florestal que se encontram sobre solos rasos.                 |
| Formação Savânica em solo profundo  | SavProf    | Classe que representa toda a formação Savânica que se encontram sobre solos profundos.              |
| Formação Savânica em solo raso      | SavRaso    | Classe que representa toda a formação Savânica que se encontram sobre solos rasos.                  |
| Agrossilvipastoril em solo profundo | AgrProf    | Classe que representa toda a formação agrossilvipastoril que se encontram sobre solos profundos.    |
| Agrossilvipastoril em solo raso     | AgrRaso    | Classe que representa toda a formação agrossilvipastoril que se encontram sobre solos rasos.        |
| Várzea e Floresta Inundável         | Várzea     | Todas as classes, incluindo a de formação florestal que se encontram em solos saturados             |
| Áreas Semipermeáveis                | ASI        | Classe de superfícies semipermeáveis que se encontram tanto em solos rasos como em solos profundos. |
| Água                                | Água       | Todas as classes de água.   |

Fonte: Produção do autor.

### **5.2.3 Parametrização do modelo MGB-IPH**

O processo de parametrização é uma etapa importante na modelagem hidrológica, uma vez que, são inseridos no modelo os principais parâmetros que controlam as equações que realizam o balanço hídrico da bacia hidrográfica. Conforme descrito na Seção 3.3.2, no MGB existem dois tipos de parâmetros: calibráveis e fixos. Dessa forma, esta etapa foi realizada de duas maneiras e levando em consideração as classes de URH definidas para este estudo.

Para os parâmetros calibráveis, aqueles relacionados às características do tipo de solo, as estimativas respeitaram as variações recomendadas e pré-definidas no modelo (TUCCI; COLLISCHONN, 2001; BAYER; COLLISCHONN, 2013; BAYER, 2014). Os principais fatores que foram levados em consideração para estimar estes parâmetros foram: a profundidade do solo (raso ou profundo), a declividade da sub-bacia e a existência ou não de processos que podem ter modificado as estruturas físicas do solo, como por exemplo a conversão da vegetação nativa em sistemas agrossilvipastoril que diminuem a percolação da água no solo e aumentam o escoamento superficial. Assim, para cada URH seguiu-se as premissas descritas na Tabela 5.3 e os parâmetros iniciais foram estimados e posteriormente passaram pelo processo de calibração.

Para os parâmetros fixos, aqueles relacionados ao tipo de uso e cobertura da terra, o IAF, a altura da vegetação e o albedo foram estimados a partir da série histórica de produtos de sensoriamento remoto conforme descritos na Seção 5.1.7, enquanto a resistência superficial foi por meio de valores de referências (BAYER, 2014).

A disponibilidade dos dados difere entre os produtos disponíveis. Dessa forma, para o IAF e albedo foi definido um período equivalente para ambos, entre 2005 e 2015 (10 anos). Para garantir que a parametrização fosse realizada em áreas que realmente pertencessem a cada classe de URH, foi identificado regiões que não apresentaram mudanças entre os dois anos. Enquanto para o produto de altura de vegetação o ano base das classes de URH foi o mesmo quando os dados foram processados (2005).

Tabela 5.3 - Valores de referência e premissas adotadas para estimar os parâmetros calibráveis do MGB.

| Parâmetro  | Limiar     | Premissa  |
|--|------------|---|
| Wm<br>(mm)   | 50 – 1500  | Solos profundos apresentam maiores valores do que rasos. Da mesma maneira, solos com cobertura modificada, como por exemplo a classe agrossilvipastoril, apresentam menores valores daqueles com cobertura natural. |
| b<br>(adimensional)  | 0,12 – 1,6 | Solos rasos apresentam maiores escoamentos superficiais, assim como solos alterados.  |
| Kbas<br>(mm.dia <sup>-1</sup> )                            | 0,05 – 5   | Regiões com solos modificados apresentam menores taxas de percolação de água no solo durante a estiagem. Portanto, menores são as taxas de escoamento subsuperficial e subterrâneo.                                 |
| Kint<br>(mm.dia <sup>-1</sup> )                            | 4 - 40     |   |
| XL<br>(adimensional)                                       | 0,67       | Parâmetros considerados fixos por recomendações dos autores e por exercer baixa influência nos resultados.  |
| CAP<br>(mm)  | 0 - 4      | XL = 0,67   |
| Wc<br>(mm)   | 0,1 – 0,9  | CAP = 0 mm<br>Wc = 0,1 mm   |
| CS<br>(adimensional)                                       | 1 - 20     |   |
| CI<br>(adimensional)                                       | 50 – 200   | Os atrasos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos são menores em regiões com altas declividades.  |
| CB<br>(horas)  | 200 - 8000 |   |
| QB<br>(m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>-2</sup> ) | 0,010      | Parâmetro estimado por (PONTES et al., 2015).   |

Wm – capacidade de armazenamento do solo; b - Forma da relação entre armazenamento e saturação; Kbas - Drenagem subterrânea; Kint - Drenagem subsuperficial; XL - Forma da curva de redução; CAP - Fluxo ascendente; Wc - Armazenamento Residual; CS - Retardo do reservatório superficial; CI - Retardo do reservatório subsuperficial; CB - Retardo do reservatório subterrâneo; QB - Vazão de Base.

Fonte: Produção do autor.

Por fim, a parametrização foi realizada por meio de amostragem. Considerou-se a distribuição de pontos aleatórios ( $n > 120$ ) para cada classe de URH e para cada ponto extraídos os valores medianos da série histórica, com exceção da altura da vegetação por ter um único dado de 2005. Ressalta-se que foi realizada uma análise visual da distribuição espacial destes pontos, com o

objetivo de eliminar pontos que estavam próximo às bordas entre duas classes distintas e garantir maior representatividade do dado.

#### **5.2.4 Análise de sensibilidade**

Na modelagem hidrológica, uma etapa importante é a análise da sensibilidade dos parâmetros do modelo. Possui como objetivo avaliar as variações das saídas do modelo de acordo com mudanças dos parâmetros de entrada, encontrando um grupo de parâmetros dominantes que influenciam na geração de vazão, identificando a sensibilidade e promovendo uma calibração eficiente do modelo (WANG et al., 2013; SONG et al., 2015).

Collischonn (2001) e Bayer e Collischonn (2013) analisaram a sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo e concluíram que os mais sensíveis estão relacionados aos parâmetros calibráveis, podendo os parâmetros fixos exercer uma certa influência na modelagem. Eles definiram que os parâmetros de armazenamento máximo de água no solo ( $Wm$ ), de retardo do reservatório superficial ( $CS$ ) e subsuperficial ( $CI$ ), forma da relação entre armazenamento e saturação ( $b$ ), e de drenagem subsuperficial ( $Kint$ ) e de subterrânea ( $Kbas$ ), são os mais sensíveis, e que, o índice de área foliar ( $IAF$ ) e a resistência superficial ( $r_s$ ) também podem influenciar na geração da vazão.

Para o estudo em questão a análise de sensibilidade foi realizada apenas para os parâmetros fixos, que diretamente relacionam-se com as características das classes de uso e cobertura. Desse modo, após a parametrização foi realizado uma simulação do modelo sem calibração. Os parâmetros foram variados separadamente, enquanto os outros mantidos inalterados e a cada variação foi realizada uma nova simulação.

#### **5.2.5 Calibração e validação do modelo**

Os modelos hidrológicos são baseados em equações matemáticas que possuem parâmetros que caracterizam o comportamento hidrológico de uma bacia, porém alguns desses parâmetros são difíceis de serem medidos, sendo

necessário o processo de calibração para seus ajustes (TUCCI; BRAVO; COLLISCHONN, 2009). Dessa forma, o principal objetivo da calibração é apresentar concordância entre os dados observados e os simulados e ocorre, principalmente, pela análise dos hidrogramas em relação as estações fluviométricas.

A calibração do MGB pode ser realizada de duas maneiras: manual e automática (TUCCI; COLLISCHONN, 2003). Para o estudo foi realizada uma calibração manual, de tentativa e erro, a partir dos valores definidos na parametrização. Esta etapa ocorreu de montante a jusante, ou seja, em ordem foram calibradas as sub-bacias 4, 3, 2 e 1. Em sequência, efetuou-se a validação do modelo, porém para um período diferente ao da calibração. Esse processo tem como objetivo de verificar se o modelo consegue representar adequadamente um período que não seja o de calibração, permitindo a confirmação da precisão dos parâmetros calibrados (OLIVEIRA et al., 2019).

O período de análise definido neste estudo foi entre 1985 e 2018, totalizando 33 anos de análise. Os primeiros 23 anos da série foram utilizados para a calibração (01/01/1985 a 31/12/2007) e os restante para a validação (01/01/2008 a 31/12/2018). É importante salientar que, para as simulações assumiu um período de 2 anos para aquecimento do modelo, dada a incerteza do armazenamento inicial da bacia. Dessa forma, os dados pluviométricos e fluviométricos foram adquiridos no período de 1983 a 2018.

A verificação da qualidade da calibração e validação baseou-se na avaliação visual dos hidrogramas, simulados e observados, e por meio de três funções objetivo, o Nash-Sutcliffe (*NS*), Nash-Sutcliffe versão logaritmo (*NSlog*) e Erro no volume ( $\Delta V$ ), conforme proposto por Collischonn et al. (2007) e Bayer e Collischonn (2013) e apresentado na Tabela 5.4. Essas funções objetivo busca avaliar a representatividade do modelo em simular os dados em relação aos de vazão das estações fluviométricas adotadas, devendo o processo de calibração ser repetido até que a qualidade seja aceitável para o objetivo do trabalho.

Tabela 5.4 - Funções objetivo para calibração e validação do MGB.

| Função Objetivo   | Descrição   |
|---|---|
| $NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2}{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2}$   | <p>Possui valores que variam entre <math>-\infty</math> a 1, com NS = 1 indicando um ajuste perfeito do modelo aos dados observados. O NS é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas e, o modelo é considerável bom quando os valores são superiores à 0,75 e aceitável quando se encontram entre 0,36 a 0,75.</p>  |
| <p><b>NSlog</b></p> $= 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{\log[Q_{obs}(t)] - \log[Q_{sim}(t)]\}^2}{\sum_{i=1}^N \{\log[Q_{obs}(t)] - \overline{\log(Q_{obs})}\}^2}$ | <p>Apresenta os mesmos princípios do anterior, sofrendo grandes influências em vazões máximas, porém mais sensível em vazões mínimas. Geralmente, valores próximos a 1 significam que o modelo está simulando adequadamente os períodos de recessão do hidrograma e as estiagens.</p>   |
| $\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N [Q_{sim}(t)] - \sum_{i=1}^N [Q_{obs}(t)]}{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(t)]} \cdot 100$  | <p>Indica a tendência média do modelo em superestimar ou subestimar os valores simulados, podendo possuir valores negativos (subestimação) ou positivos (superestimação). Esse parâmetro não é influenciado de forma diferente em períodos de cheias ou de estiagens, é útil para observar se as perdas de água por evapotranspiração estão sendo corretamente calculadas</p> |

Em que,  $t$  é o passo de tempo,  $n$  é o número total de passas de tempo considerado,  $Q_{obs}$  são as vazões observadas e  $Q_{sim}$  são as vazões simuladas.

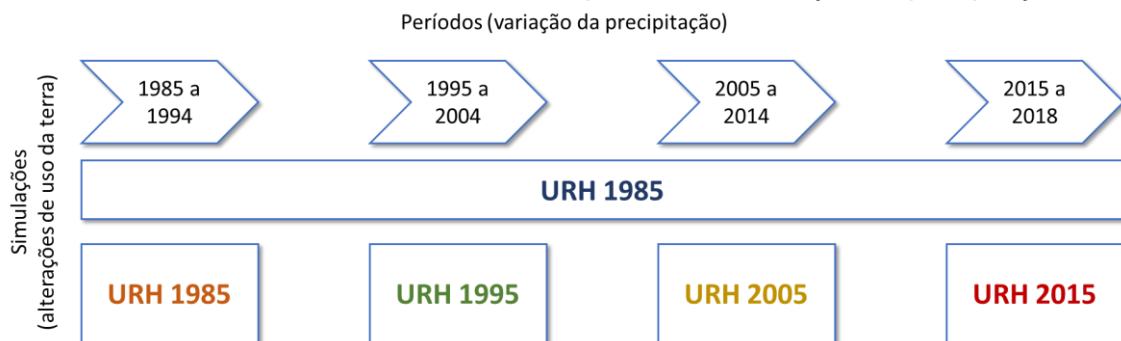
Fonte: Adaptado de Collischonn et al. (2007) e Bayer e Collischonn (2013).

### 5.2.6 Simulação, cenários da modelagem e análise dos resultados

A análise dos impactos decorrentes das mudanças de uso e cobertura da terra na BRA foi realizado por meio de simulações a partir do MGB-IPH. Para isso foram considerados os mapas de URH para os anos de 1985, 1995, 2005 e 2015.

Conforme metodologia apresentada por Bayer (2014), primeiramente o modelo foi calibrado com o mapa de URH de 1985 considerando o período de variação da precipitação entre 1985 e 2018. Neste estudo essa modelagem é considerado como cenário de controle e foi utilizado como referência para eliminar os efeitos da precipitação ao longo do tempo. Em seguida, para cada mapa de URH foi realizado uma simulação separadamente, com um intervalo temporal de 10 anos, ou seja, a URH de 1985 foi utilizado na simulação da vazão correspondendo ao período de variação da precipitação entre janeiro de 1985 a dezembro de 1994, assim como os outros mapas com seus respectivos períodos de variação conforme a Figura 5.5.

Figura 5.5 - Esquema da simulação realizada considerando os mapas de URH de 1985, 1995, 2005 e 2015 e os períodos de variação da precipitação.



Fonte: Produção do autor.

A análise da influência da mudança de uso e cobertura da terra foi realizada a partir dos resultados encontrados no cenário de controle (URH 1985) com aqueles referentes a cada mapa de URH nos seus respectivos períodos. Para a análise foi considerado o valor do Mudança Percentual (MP)[%] conforme Equação 5.1, que representa a diferença percentual de:  $x_i$  representada pela variável simulada na série de controle e  $y_i$  a variável simulada considerando a mudança de uso da terra, com  $n$  que é o tamanho da série.

$$MP = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{x_i} \quad (5.1)$$

Resultados de MP positivos representam que os valores simulados quando considera os períodos de mudança foram menores aos encontrados no cenário de controle e, valores negativos o oposto acontece. Dessa forma é possível observar se as saídas do modelo representam um incremento ou redução por exemplo da vazão ou evapotranspiração.

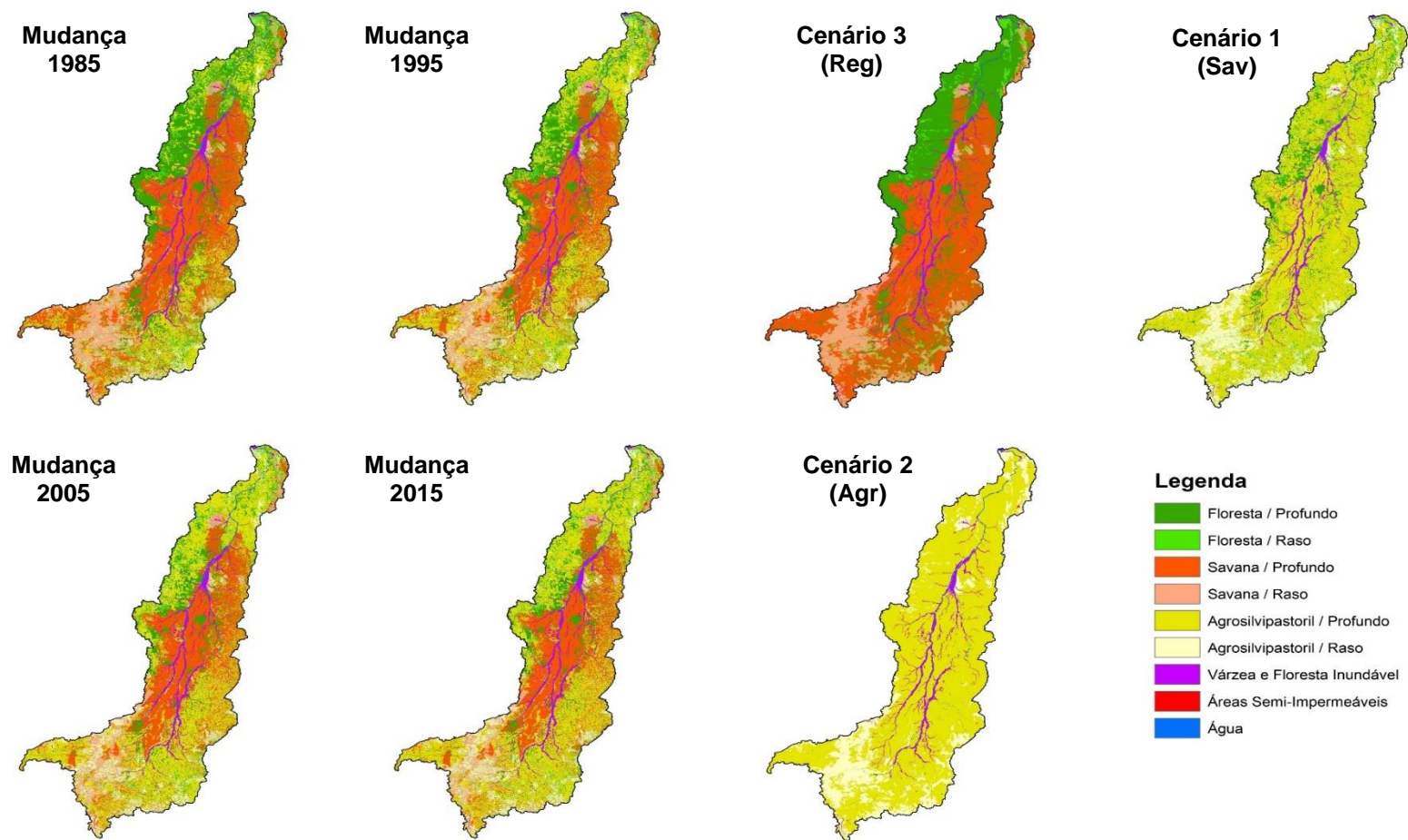
Neste estudo também foi proposto três diferentes cenários hipotéticos de uso e cobertura que a partir do mapa de URH de 2018, portanto as seguintes situações foram consideradas:

- 1) **Cenário 1 (Sav):** ocorre a substituição da classe de formação Savânica pela de agrossilvipastoril;
- 2) **Cenário 2 (Agr):** além da situação do cenário 1, a classe de formação florestal também foi substituída pela agrossilvipastoril;
- 3) **Cenário 3 (Reg):** as áreas que estão contidas dentro dos limites do Cerrado foram substituídas pela classe de formação Savânica enquanto as contidas dentro do bioma Amazônico pela classe de formação florestal. Este cenário pode ser considerado como aquele que ocorre regeneração completa da vegetação nativa.

É importante ressaltar que as classes de várzea, ASI e água foram mantidas inalteradas em todos os cenários. Para cada cenário com seus respectivos mapas foram simulados considerando o período da série histórica de precipitação entre 1985 e 2018, e os resultados também comparados com os valores simulados no cenário de controle. Na Figura 5.6 é possível observar a distribuição de cada URH cada período considerado de mudança e dos cenários propostos neste estudo para a BRA.



Figura 5.6 - Representação da distribuição das URH na Bacia do Rio Araguaia para os períodos analisados e os cenários de mudança de uso e cobertura da terra.



Fonte: Produção do autor.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados os principais resultados encontrados no desenvolvimento deste estudo. Primeiramente foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo em representar as mudanças de uso e cobertura da terra na área de estudo. Em seguida um processo de parametrização, calibração e validação possibilitou os ajustes dos parâmetros com relação à geração de vazão e o desempenho analisado por meio de funções objetivas.

Após o modelo calibrado e validado, simulações foram realizadas considerando as alterações de uso e cobertura da terra ao longo do tempo (1985 a 2018) e cenários de mudanças também foram analisados. A análise dos impactos levou em consideração um cenário de controle, e os resultados das simulações comparados, tanto para as mudanças ao longo do tempo como para os cenários propostos neste estudo.

### **6.1 Análise de sensibilidade do MGB-IPH em relação às mudanças de uso e cobertura da terra**

Para analisar a sensibilidade do modelo com relação às mudanças de uso e cobertura da terra, os parâmetros calibráveis (relacionados ao tipo de solo) foram mantidos inalterados a partir das estimativas iniciais apresentadas na Tabela 6.1. Enquanto aqueles referentes ao tipo de cobertura da terra passaram por variações em acordo à um conjunto de referência apresentado por Bayer (2014) e respeitando os valores encontrados na literatura (Tabela 6.1).

Semelhante ao método adotado pela autora, foi considerado para a área de estudo uma única classe de URH, em que cada parâmetro foi alterado individualmente e os resultados comparados em relação a vazão média de longo termo para o período de 1985 a 2018. Ressalta-se que nesta etapa, o modelo não foi calibrado, com o objetivo apenas de analisar se consegue de fato representar as mudanças de uso e cobertura da terra ao longo do tempo, e como essas alterações afetam a geração de vazão.

Tabela 6.1 - Valores adotados na análise de sensibilidade para os parâmetros calibráveis do modelo e intervalo de variação utilizados como referência para os parâmetros fixos.

| Parâmetros Calibráveis <sup>1</sup> |              |                                 |                                 |           |              |            |           |           |               |
|-------------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|--------------|------------|-----------|-----------|---------------|
| Wm<br>(mm)                          | B<br>(-)     | Kbas<br>(mm.dia <sup>-1</sup> ) | Kint<br>(mm.dia <sup>-1</sup> ) | XL<br>(-) | CAP<br>(mm)  | Wc<br>(mm) | CS<br>(-) | CI<br>(-) | CB<br>(horas) |
| 1000                                | 1,00         | 3,00                            | 20                              | 0,67      | 0            | 0,10       | 20        | 2000      | 8000          |
| Parâmetros Fixos <sup>2</sup>       |              |                                 |                                 |           |              |            |           |           |               |
|                                     | Valor mínimo |                                 |                                 |           | Valor Máximo |            |           |           |               |
| $\alpha$                            | 0,10         |                                 |                                 |           | 0,30         |            |           |           |               |
| IAF                                 | 0,10         |                                 |                                 |           | 10           |            |           |           |               |
| $r_s$                               | 0            |                                 |                                 |           | 250          |            |           |           |               |
| h                                   | 0,5          |                                 |                                 |           | 30           |            |           |           |               |

$\alpha$  – albedo (-); IAF – Índice de área foliar (-);  $r_s$  – resistência superficial (s.m<sup>-1</sup>); h – altura da vegetação (m).

Fonte: <sup>1</sup> Produção do autor; <sup>2</sup> Adaptado de Bayer (2014).

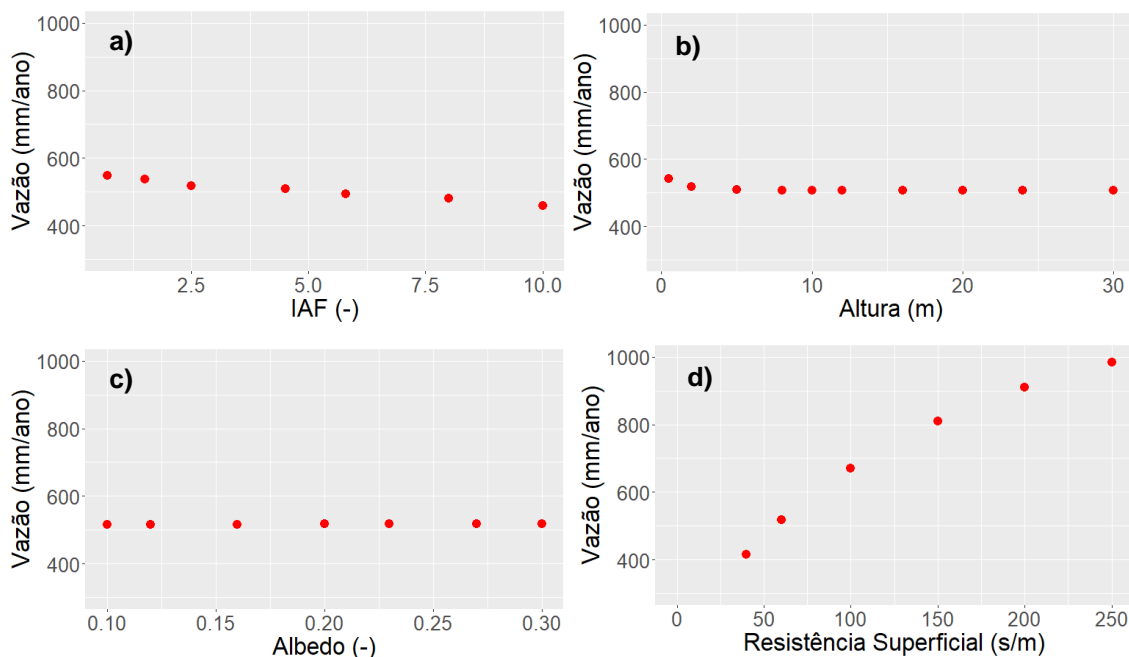
É possível notar na Figura 6.1 que os IAF (a) e altura da vegetação (b) são inversamente proporcionais à geração de vazão. Os resultados mostram que há uma redução de aproximadamente 16% (89 mm.ano<sup>-1</sup>) na geração de vazão quando varia o IAF entre 0,1 (548 mm.ano<sup>-1</sup>) e 10 (459 mm.ano<sup>-1</sup>). Dessa mesma forma acontece com o aumento da altura da vegetação, observa-se uma redução de até 7% (35 mm.ano<sup>-1</sup>) na variação entre 0,5 m (541 mm.ano<sup>-1</sup>) à 30 m (506 mm.ano<sup>-1</sup>). Além disso, percebe-se que valores maiores que 15 m para a altura resultaram em uma geração de vazão constante (506 mm.ano<sup>-1</sup>).

Essas reduções revelam um aumento nos processos de evapotranspiração da bacia. O aumento do IAF e da altura da vegetação, proporcionam uma maior quantidade de água interceptada e maiores trocas aerodinâmicas respectivamente, resultando em menores quantidades de água disponível para a geração de escoamento.

Com relação aos parâmetros de albedo (c) e resistência superficial (d), estes comportam-se de maneira proporcional à geração de vazão. Os resultados mostram que, aumentando os valores do albedo produzem vazões maiores, porém em magnitudes diferentes da resistência superficial. Um aumento de aproximadamente 1% (4 mm.ano<sup>-1</sup>) é observado quando os valores do albedo variam entre 0,1 (515 mm.ano<sup>-1</sup>) e 0,3 (519 mm.ano<sup>-1</sup>). Em contrapartida, há um

aumento de aproximadamente 137% ( $570 \text{ mm.ano}^{-1}$ ) na vazão quando a resistência superficial passa de  $40 \text{ s.m}^{-1}$  ( $415 \text{ mm.ano}^{-1}$ ) para  $250 \text{ s.m}^{-1}$  ( $985 \text{ mm.ano}^{-1}$ ).

Figura 6.1 - Análise de sensibilidade do modelo MGB para a Bacia do Rio Araguaia em relação a vazão média de longo termo.



Os parâmetros analisados são: A) Índice de Área Foliar, B) Altura da vegetação, C) Albedo e D) Resistência Superficial.

Fonte: Produção do autor.

Um valor maior de albedo influencia em maior quantidade de energia refletida e, conseqüentemente, menos energia estará disponível para realizar os processos de evapotranspiração. Assim como, valores elevados de resistência superficial implicam em menores perdas por transpiração da planta. Logo, o aumento desses dois parâmetros diminui as taxas de evapotranspiração da bacia e eleva a quantidade de água disponível para a geração de escoamento.

Esses comportamentos também são observados por Bayer (2014), ao realizar a análise de sensibilidade para a Bacia do Rio das Almas ( $18.800 \text{ km}^2$ ), localizada na cabeceira do rio Tocantins, Estado de Goiás. Segunda a autora,

ao considerar o intervalo de variação individual nos valores dos parâmetros do modelo em 50%, a sensibilidade nas simulações diminui na seguinte ordem: resistência superficial, albedo, altura da vegetação e IAF. E para variações acima de 50% a sensibilidade mantém um comportamento semelhante, mostrando que as vazões médias geradas pelo modelo dependem desses parâmetros, uma vez que as suas alterações produzem impactos de aumentos e diminuições nas vazões.

## **6.2 Definição dos parâmetros de entrada**

A definição dos parâmetros de entrada do modelo para a área de estudo foi realizada por meio de estimativas de fontes da literatura e de produtos de sensoriamento remoto. Conforme apresentado nas Seções 3.3.2 e 5.2.3 a parametrização ocorreu por URH e considerando os dois grupos de parâmetros do MGB-IPH (calibráveis e fixos).

Os resultados dessa parametrização inicial podem ser observados nos Apêndices D e E. É importante destacar que os parâmetros calibráveis foram estimados respeitando as variações recomendadas e pré-definidas no modelo, e seguindo as premissas definidas na Tabela 5.3. Posteriormente esses parâmetros foram calibrados com o objetivo de ajustar a vazões simuladas com as observadas das estações fluviométricas de cada sub-bacia.

Com relação aos parâmetros fixos, estudos que utilizam modelos hidrológicos estimam estes parâmetros por meio de valores de referência encontrados na literatura. Neste estudo, o objetivo foi realizar a parametrização do albedo, IAF e altura de vegetação por meio de produtos de sensoriamento remoto (Seção 5.2.3), enquanto a resistência superficial foi adotada de acordo com os valores encontrados na literatura, conforme o Apêndice D.

Os resultados desta etapa podem ser observados na Figura 6.2. Os dados diários do albedo e IAF foram analisados e considerou-se o mesmo período para aquisição da série histórica de 2005 a 2015 (10 anos). Um processo de amostragem foi realizado para extrair as informações medianas deste período para cada parâmetro e URH.

Os dados mostram uma relação com os valores encontrados na literatura (Tabela D.2). Estudos mostram que áreas com coberturas de vegetação nativa apresentam valores menores de albedo do que em regiões agrícolas, de pastagem, em superfícies semipermeáveis e solos expostos (COLLISCHONN, 2001; BAYER; COLLISCHONN, 2013; OLIVEIRA et al., 2014) . As classes de URH de formações florestais e Savânica, em solos rasos e profundos, apresentaram valores de albedo entre 0,12 e 0,11 respectivamente. Nota-se que a classe de várzea apresentou o mesmo valor (0,12), uma vez que, sua cobertura é formada em grande parte por matas ciliares em solos alagáveis. Também não houve diferenciação entre os valores encontrados para a classe de agrossilvipastoril, em solo raso e profundo, e áreas com superfícies semipermeáveis, apresentando um valor de 0,16. O albedo estimado para a classe de água foi de 0,08.

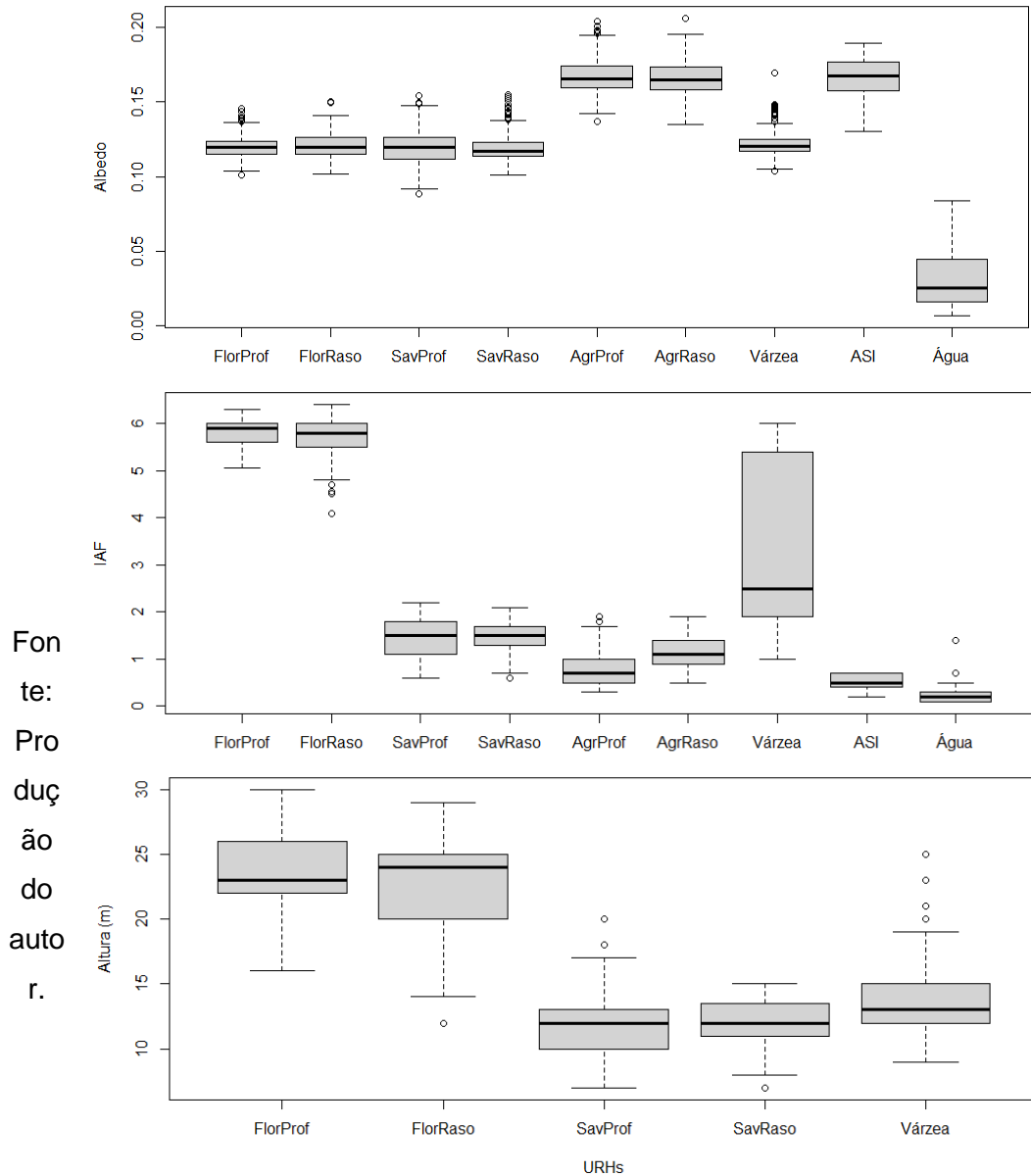
Os valores estimados do IAF para a classes de formação florestal em solo raso e profundo apresentaram valores entre 5,6 e 5,8 respectivamente. Para a classe de Savânica não houve diferenciação entre o tipo de solo, resultando em valores de aproximadamente 1,5. A maior diferenciação encontra-se entre a classe agrossilvipastoril para o solo profundo e raso, variando entre 1,1 e 0,7 respectivamente. Para as classes de várzea, áreas semipermeáveis e água apresentaram valores de 2,5, 0,5 e 0.

Com relação à altura da vegetação os dados foram estimados com base no ano de 2005 (Seção 4.3.3) e os resultados mostram uma relação com os valores encontrados na literatura (Tabela D.2). Observa-se pela Figura 6.2 que, esse parâmetro foi estimado apenas para as classes de formações florestais, Savânica e áreas de várzea. Para as regiões de agrossilvipastoril e áreas semipermeáveis o produto utilizado não apresentava informação. Portanto, para estas classes foram adotados valores de referência (Tabela D.2).

Dessa forma, a altura da vegetação para as classes de formação florestal em solos rasos e profundos apresentaram valores de 24 metros, enquanto para as formações Savânica em solos rasos e profundos, e para áreas de várzea esses valores foram de, respectivamente, 12, 11 e 14 metros. Com base na literatura,

a altura da classe agrossilvipastoril foi estimado em 2 metros para os solos profundos e 0,5 metros para solo raso.

Figura 6.2 - Resultados encontrados dos parâmetros de albedo, IAF e altura de vegetação derivados de produtos de sensoriamento remoto.



### 6.3 Calibração e validação do MGB-IPH para a Bacia do Rio Araguaia

A calibração do modelo tomou como base o mapa de URH para o primeiro ano da série histórica analisada (1985). A partir disso, o processo aconteceu de maneira manual, variando os parâmetros calibráveis a fim de ajustar os

hidrogramas das vazões simuladas com as observadas nos postos fluviométricos de cada sub-bacia.

No Apêndice F é possível observar os valores finais calibrados por sub-bacia. Aqueles relacionados à capacidade de armazenamento de umidade do solo ( $W_m$ ) foram diferentes para cada sub-bacia e o tipo de uso e cobertura de solo. Considerou-se na variação dos parâmetros que solos alterados apresentam menores valores de  $W_m$ , enquanto aqueles com cobertura natural apresentaram maiores valores do parâmetro. Da mesma forma, a profundidade do solo também foi um fator ponderador no processo de calibragem, solos profundos apresentaram maiores capacidade de armazenamento do que rasos. De acordo com (RÁPALO et al., 2021), geralmente, a espessura do solo profundo e a alta densidade da vegetação aumentam a capacidade do solo de reter maiores volumes de água, mantendo-os úmidos, evitando o fluxo livre e favorecendo a infiltração de água no solo.

As estimativas do parâmetro que controla o escoamento superficial ( $b$ ) para cada URH também se comportou de maneira distinta. Para solos profundos a geração de escoamento superficial foi um fator limitador, ou seja, considerou-se que o escoamento superficial é menor em comparação com solos rasos. E maiores quando ocorre processos de conversão de vegetação nativa em outros usos, ou seja, as transformações da cobertura da terra podem modificar as propriedades físicas do solo, aumentando a sua compactação e favorecendo o escoamento superficial.

Além disso, é possível observar que declividades mais acentuadas também favorecem na geração desse tipo de escoamento. As sub-bacias com maiores declividades a montante da Bacia do Rio Araguaia (4 e 3) apresentaram valores maiores do que nas sub-bacias localizadas mais a jusante, onde predominam regiões planas (Figura 5.4).

Os parâmetros que controlam as taxas de escoamento subterrâneo e subsuperficial ( $K_{bas}$  e  $K_{int}$ ) apresentaram valores menores em solos modificados devido às alterações físicas mencionadas anteriormente. Também se observa maiores valores nas sub-bacias 4 e 3, por se tratar de regiões com



declividades mais acentuadas do que as demais sub-bacias. Além disso, observa-se uma amplitude maior quando comparado os valores entre o  $K_{bas}$  e  $K_{int}$ , isso ocorre porque o escoamento superficial é mais rápido do que o escoamento subsuperficial, e este último é mais rápido do que o escoamento subterrâneo (COLLISCHONN, 2001).

Por fim, os parâmetros que controlam o atraso dos fluxos superficiais ( $C_s$ ), subsuperficiais ( $C_i$ ) e subterrâneo ( $C_B$ ) apresentaram maiores valores nas sub-bacias 1 e 2 por se tratar de regiões com baixa declividade. Isso ocorre porque o retardo dos reservatórios diminui à medida que a declividade do terreno aumenta, favorecendo a geração de escoamento nesses três reservatórios.

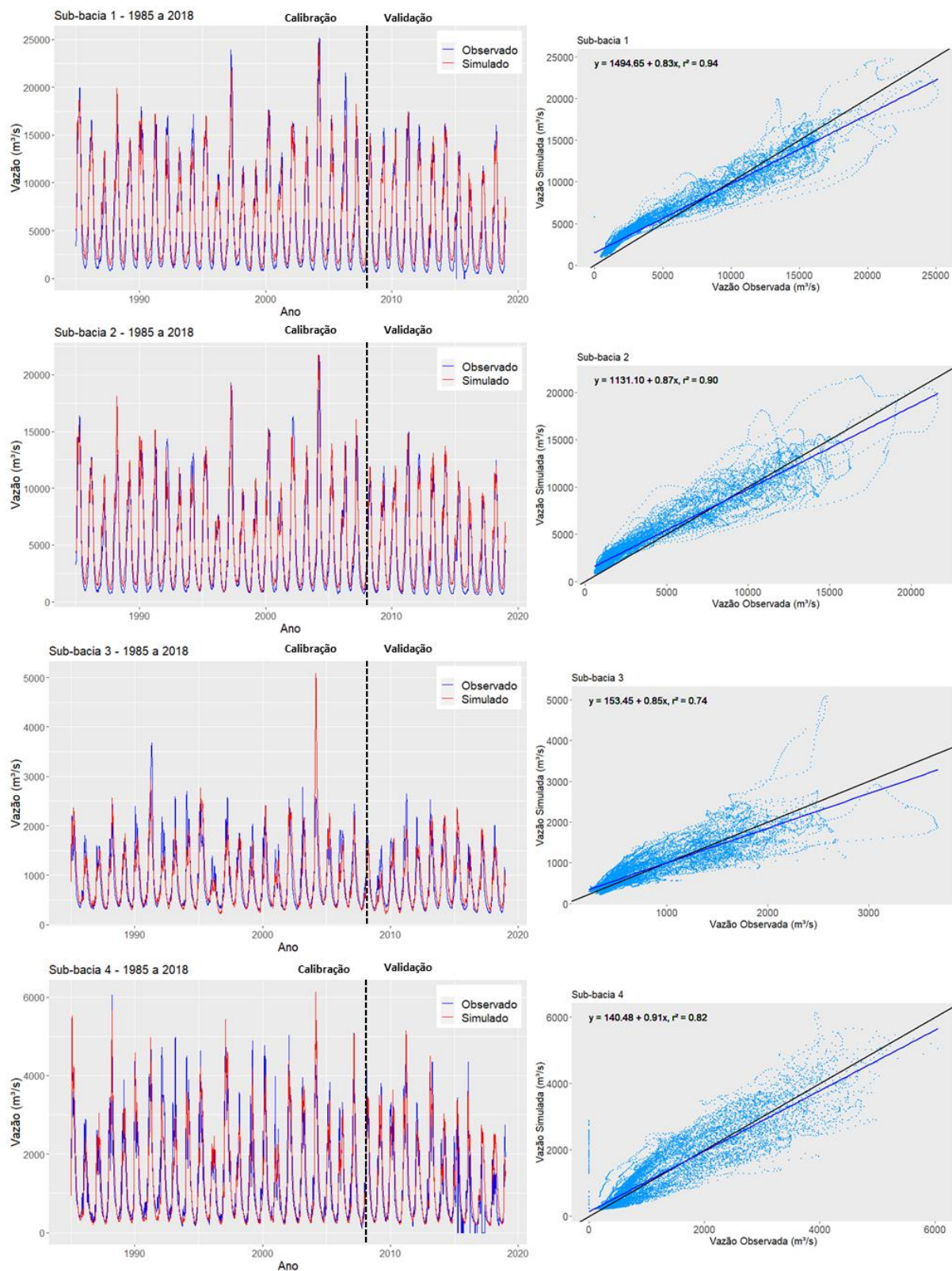
Na Figura 6.3 é possível observar os hidrogramas simulados e observado para cada sub-bacia. Nota-se que após o processo de calibração os parâmetros adotados conseguiram representar de maneira satisfatória a geração de vazão ao longo de toda a série histórica. Em paralelo uma avaliação de desempenho do modelo foi realizada por meio de três funções objetivo: o Nash-Sutcliffe ( $NS$ ), Nash-Sutcliffe versão logaritmo ( $NSlog$ ) e Erro no volume ( $\Delta V$ ), com os resultados apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Resultados da avaliação do desempenho no MGB-IPH para a Bacia do Rio Araguaia nos períodos de calibração e validação.

|                                  | Calibração (1985 – 2007) |      |      |       | Validação (2008-2018) |       |      |      |
|----------------------------------|--------------------------|------|------|-------|-----------------------|-------|------|------|
|                                  | Sub1                     | Sub2 | Sub3 | Sub4  | Sub1                  | Sub2  | Sub3 | Sub4 |
| <b>NS</b>                        | 0,92                     | 0,89 | 0,72 | 0,84  | 0,91                  | 0,88  | 0,76 | 0,84 |
| <b>NSlog</b>                     | 0,84                     | 0,87 | 0,84 | 0,86  | 0,76                  | 0,78  | 0,79 | 0,85 |
| <b><math>\Delta V</math> (%)</b> | 6,80                     | 8,33 | 1,32 | -1,78 | 9,63                  | 10,33 | 3,24 | 7,19 |

Fonte: Produção do autor.

Figura 6.3 - Hidrogramas simulados pelo MGB-IPH e observados por sub-bacia.



Fonte: Produção do autor.

Os resultados revelam que o NS para o período de calibração varia entre 0,72 e 0,92 e no de validação entre 0,76 e 0,91, sendo os maiores valores encontrados na sub-bacia 1 e menores na sub-bacia 3. Em média, tanto para a calibração como validação, os valores obtidos foi de 0,85, indicando que, para os eventos extremos na estação chuvosa, o modelo consegue representar adequadamente a geração da vazão (TUCCI; COLLISCHONN, 2001; RÁPALO et al., 2021).

Para o NSlog os valores variaram entre 0,84 e 0,87 para o período de calibração, entre 0,76 e 0,85 para o de validação e em média de 0,82 para ambos, com maiores valores encontrados para sub-bacia 2 e menores na sub-bacia 1. Os resultados indicam valores abaixo do NS, principalmente no período de validação. Ao comparar as vazões simuladas e observados (Figura 5.3) é possível perceber uma menor precisão nos períodos de recessão durante a estação seca, uma vez que, o NSlog é mais sensível para esses períodos (TUCCI; COLLISCHONN, 2001; RÁPALO et al., 2021).

Os resultados médios encontrados para o NS e NSlog estão próximos daqueles apresentados por Rápalo et al. (2021) e (OLIVEIRA et al., 2019), que ao realizarem a calibração do modelo encontraram valores médios de 0,8 para a Bacia do Rio das Mortes (estado de Goiás e correspondente à sub-bacia 3 da Bacia do Rio Araguaia) e a Bacia do Alto Teles Pires (estado de Mato Grosso).

Com relação ao erro de volume ( $\Delta V$ ), os resultados mostram que em geral, o modelo tende a superestimar a geração da vazão. Para o período de calibração os valores variaram entre -1,78% a 8,33% e no de validação entre 3,24% e 10,33%. Nota-se também que, para regiões com baixa declividade esses erros são maiores (sub-bacia 1 e 2) para ambos os períodos.

Além disso, nota-se que em 2004 foi registrado um evento considerável de vazões elevadas simuladas pelo modelo, principalmente na sub-bacia 3. Esse mesmo comportamento foi observado por Rápalo et al. (2021) para a mesma estação fluviométrica. Segundo os autores, esta estação está localizada em uma região periodicamente inundada (Ilha do Bananal), assim, a presença de meandros e lagos de várzea ao seu redor pode ser a principal razão para

atenuar o pico de vazão simulado pelo modelo no evento de 2004. Lininge e Latrubesse (2016) mostraram que os lagos da planície de inundação se conectam ao rio principal durante as cheias e aumentam sua área, atenuando os fluxos de pico em até 30% na planície de inundação do Araguaia (Ilha do Bananal), e isso aumenta o fluxo de base durante a estação seca. Além disso, Pontes et al. (2017) afirmam que esse comportamento pode ser devido ao módulo de propagação de vazão (inercial) utilizado no MGB-IPH, que ainda não representa adequadamente as perdas de água por evaporação ou retenção em lagos e meandros em áreas planas.

#### **6.4 Análise dos impactos nas mudanças de uso e cobertura da terra**

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações de mudanças de uso e cobertura da terra na BRA. Buscou entender como essas mudanças durante os períodos analisados e por meio dos cenários propostos podem impactar no balanço hídrico da bacia em relação à geração de vazão e de evapotranspiração. E ainda, como essas variáveis são impactadas em períodos de disponibilidade hídrica diferentes, ou seja, em épocas de cheia e estiagem.

Nos apêndices G e H são apresentados os gráficos dos erros percentuais médios anuais para os períodos de mudanças e dos cenários propostos, bem como para os períodos de cheia e estiagem com relação à geração de vazão e evapotranspiração. Estes gráficos refletem as discussões realizadas ao longo das próximas seções e revelam as magnitudes dos impactos decorrentes das mudanças de uso e cobertura da terra na BRA.

##### **6.4.1 Impacto nas vazões médias**

Os resultados das simulações realizadas durante os períodos analisados para as mudanças ocorridas na BRA entre os anos de 1985, 1995, 2005 e 2015 podem ser observados na Tabela 6.3. Nesta tabela estão apresentados os resultados encontrados por sub-bacia analisada e, é importante destacar que para cada sub-bacia a área de drenagem é diferente, e por isso os resultados

aqui analisados devem ser interpretados dessa maneira. As contribuições para a sub-bacia 1 são provenientes do balanço hídrico da própria área bem como todas as sub-bacias a montante dela (sub-bacias 2, 3 e 4), assim como para a sub-bacia 2 que recebe contribuição das sub-bacias 3 e 4. Enquanto estas duas últimas (3 e 4) não recebem contribuição de nenhuma outra a montante.

Os períodos simulados pelo modelo revelam que as mudanças de uso e cobertura da terra podem ser um fator que resulta em incrementos na vazão média de longo termo em bacias hidrográficas como a do Rio Araguaia. Observando os resultados das simulações para a área de estudo nota-se esse incremento à medida que a cobertura natural é alterada.

Com base na sub-bacia 1 e em comparação com o cenário de controle, a vazão média aumenta cerca de 2% ( $8 \text{ mm.ano}^{-1}$ ) para o período considerando o uso e cobertura de 1995, em que há uma redução de cerca de 16% ( $43.797 \text{ km}^2$ ) da cobertura natural. Enquanto para os períodos de 2005 e 2015 o aumento corresponde à 3% ( $16 \text{ mm.ano}^{-1}$ ) e 4% ( $18 \text{ mm.ano}^{-1}$ ), respectivamente, e com redução da vegetação de cerca de 28% ( $78.278 \text{ km}^2$ ) e 32% ( $90.106 \text{ km}^2$ ) do total de cobertura natural (formação florestal e Savânica) do cenário de controle.

Ao analisar os resultados para as demais áreas de contribuição (sub-bacias 2, 3 e 4) esse mesmo comportamento é observado. Os incrementos podem chegar até  $18 \text{ mm.ano}^{-1}$  quando se considera o mapa de uso e cobertura de 2015 para as sub-bacias 3 e 4, com MP de aproximadamente 4% e 5%, respectivamente. Para a área de contribuição correspondente à sub-bacia 2 esse incremento chega em torno de 3% ( $14 \text{ mm.ano}^{-1}$ ).

Foi realizado uma análise das médias de precipitações diárias, com o objetivo de verificar se esses incrementos poderiam ser provenientes da variabilidade de ocorrência de precipitação ao longo dos períodos analisados. Verificou por meio da ANOVA que as médias entre esses períodos não são diferentes, ao nível de significância de 5%. Portanto, há evidências que a substituição das classes de formação florestal e Savânica podem ao longo do tempo proporcionar o aumento da vazão média na BRA. Esse incremento é resultado

da diminuição da capacidade de armazenamento de água no solo promovido pelas alterações do uso e cobertura que, conseqüentemente, aumentam a geração de escoamento superficial e a vazão na rede de drenagem.

Tabela 6.3 - Vazões médias simuladas e mudança percentual para os períodos analisados considerando o cenário de controle e as mudanças de uso e cobertura da terra.

| Vazão média (mm/ano) |          |          |         |        |  |
|----------------------|----------|----------|---------|--------|--|
|                      | Períodos | Controle | Mudança | MP (%) | Redução de vegetação nativa <sup>1</sup> |
| Sub-bacia 1          | 1985     | 539      | 539     | 0      | <sup>2</sup> 275.178 km <sup>2</sup>     |
|                      | 1995     | 527      | 535     | -2     | 16% (43.798 km <sup>2</sup> )            |
|                      | 2005     | 519      | 535     | -3     | 28% (78.278 km <sup>2</sup> )            |
|                      | 2015     | 423      | 441     | -4     | 33% (90.107 km <sup>2</sup> )            |
| Sub-bacia 2          | 1985     | 518      | 518     | 0      | <sup>2</sup> 238.422 km <sup>2</sup>     |
|                      | 1995     | 509      | 514     | -1     | 14% (32.518 km <sup>2</sup> )            |
|                      | 2005     | 498      | 508     | -2     | 26% (62.250 km <sup>2</sup> )            |
|                      | 2015     | 412      | 426     | -3     | 31% (73.580 km <sup>2</sup> )            |
| Sub-bacia 3          | 1985     | 482      | 482     | 0      | <sup>2</sup> 46.148 km <sup>2</sup>      |
|                      | 1995     | 514      | 524     | -2     | 20% (9.299 km <sup>2</sup> )             |
|                      | 2005     | 458      | 473     | -3     | 34% (15.836 km <sup>2</sup> )            |
|                      | 2015     | 468      | 486     | -4     | 38% (17.429 km <sup>2</sup> )            |
| Sub-bacia 4          | 1985     | 454      | 454     | 0      | <sup>2</sup> 50.720 km <sup>2</sup>      |
|                      | 1995     | 476      | 485     | -2     | 20% (10.301 km <sup>2</sup> )            |
|                      | 2005     | 456      | 469     | -3     | 31% (15.771 km <sup>2</sup> )            |
|                      | 2015     | 384      | 402     | -5     | 36% (18.174 km <sup>2</sup> )            |

MP – Mudança Percentual (%) considerando as diferenças encontradas do período simulado em relação ao mesmo período do cenário de controle. <sup>1</sup>Percentual de perda de vegetação nativa em relação ao cenário de controle. <sup>2</sup>Área total de vegetação nativa para cada área de contribuição do cenário de controle.

Fonte: Produção do autor.

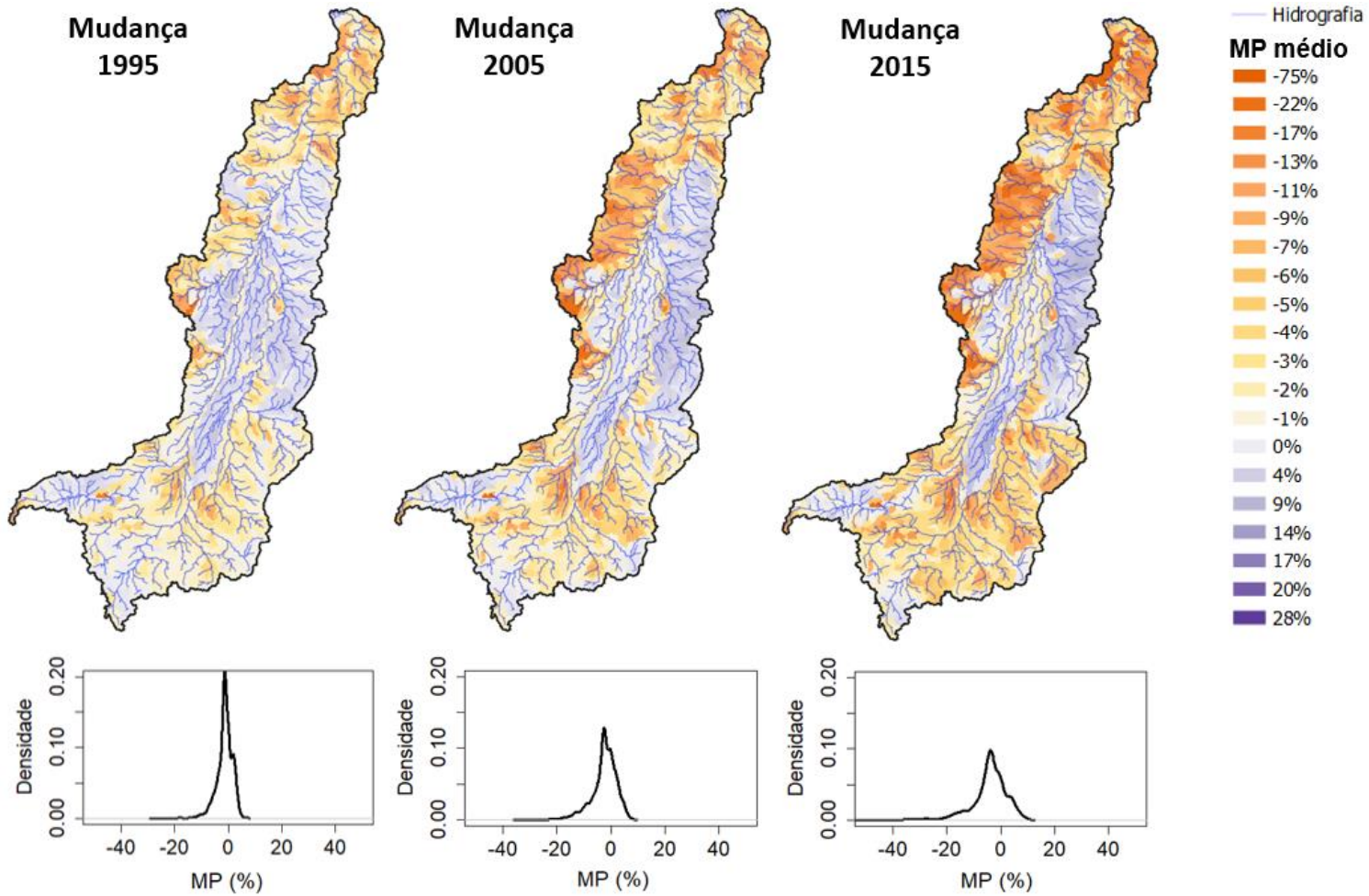
Porém, é necessário salientar que, em análises de grande escala, os processos hidrológicos que ocorrem são mais complexos e podem variar de acordo com a escala e tempo analisados (TUCCI, 2005). Na BRA é observado a influência do fator escala nos resultados, uma vez que, quando analisado de forma independente produzem diferentes resultados de incrementos, que não foram observados ao considerar as médias de cada área de contribuição.

O balanço hídrico simulado pelo MGB é realizado por minibacias, que correspondem a menor área de contribuição para geração de vazão a partir da segmentação da rede de drenagem. No processo de discretização da BRA foram gerados 1757 minibacias (Figura 5.4), e que foram analisadas individualmente quanto ao MP da diferença entre as vazões médias geradas no cenário de controle com relação ao período considerado para as mudanças de uso e cobertura da terra.

A Figura 6.5 apresenta o MP por minibacias ao longo dos períodos de mudança de 1995, 2005 e 2015. Observa-se que os incrementos das vazões médias variam ao longo de toda a bacia e que se tornam maiores à medida que há perdas da vegetação nativa. Essas mudanças são maiores em minibacias que estão localizadas em regiões de maiores declividades, como nas sub-bacias 3 e 4 e em partes da sub-bacia 2 e 1. E se tornam maiores em regiões onde há predominância da classe de formação florestal.

Os valores do MP de incremento das vazões médias das minibacias para os períodos de mudanças de 1995, 2005 e 2015 podem chegar em até 28%, 34% e 53%. Conforme mencionado anterior, esses valores foram observados nas minibacias que apresentaram redução da classe de formação florestal. Para regiões onde predomina a classe de formação Savânica o valor do MP chegou em até 18%, 30% e 35% de incremento para os mesmos períodos. É interessante observar que, apesar de que algumas minibacias apresentaram MP acima dos valores médios (Tabela 6.3), existem regiões que mesmo com as mudanças de uso e cobertura da terra sofrem alterações com valores variando entre 0,1% e 0,5%.

Figura 6.4 - Mudança percentual por minibacias das mudanças em relação ao período de controle para as vazões médias.



Fonte: Produção do autor.



Os resultados também indicam que existem minibacias que se comportam de maneira contrária ao observado anteriormente. Nessas regiões ocorrem reduções nas vazões média que podem chegar em até 7%, 8% e 10%, respectivamente, quando considera-se as mudanças de uso e cobertura 1995, 2005 e 2015 em relação ao cenário de controle. Esse comportamento ocorre principalmente em regiões em que a declividade é muito baixa, ou seja, naquelas que apresentam grandes extensões de áreas planas na bacia. Essas diferenças também são observadas na distribuição dos valores encontrados, conforme os gráficos de densidade para cada período de mudança. Nota-se um alargamento e achatamento da curva dessa distribuição.

A sub-bacia 2 foi a área que representou melhor essas taxas de incremento e redução da vazão média. Observa-se que aproximadamente 72% da área apresenta declividades que variam entre 0% e 3%. Nessas regiões, as baixas declividades causam um retardo maior nos reservatórios superficiais, subsuperficiais e subterrâneos, resultando nas reduções dos escoamentos gerados em cada minibacia e, conseqüentemente, a redução da geração de vazão na rede de drenagem. Como consequência, pode haver maiores áreas alagadas nessa sub-bacia, uma vez que a drenagem desses reservatórios ocorre de maneira mais lenta e acumulam os volumes provenientes de minibacias a montante. Importante destacar que neste estudo não foi avaliado a contribuição dessa redução na vazão média em relação ao aumento de áreas alagadas.

Os resultados considerando os cenários propostos neste estudo em termos de vazão média refletem os mesmos comportamentos observados anteriormente, e estão apresentados na Tabela 6.4. Ressalta que, para o cenário 1 (Sav) ocorre substituição de apenas a classe de formação Savânica pela agrossilvipastoril, enquanto no cenário 2 (Agr) a substituição pela mesma classe ocorre também na formação florestal. Há também o cenário 3 (Reg) que corresponde à tentativa de entender como as vazões médias se comportam quando considera toda a vegetação natural para área de estudo.

Observa-se que em média, no cenário 1 (Sav), os valores de MP podem variar entre -4% e 5%, ou seja, ocorrem incrementos de até 20 mm.ano<sup>-1</sup> e reduções na vazão média de até 22 mm.ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Para o cenário 2 (Agr), os MP variam entre -8% à valores menores que 1% resultando em incrementos de até 38 mm.ano<sup>-1</sup> e reduções de aproximadamente 1 mm.ano<sup>-1</sup>. Enquanto no cenário 3 (Reg) há áreas de contribuições que em média não apresentaram mudanças e podendo alcançar à uma redução da vazão em torno de 8 mm.ano<sup>-1</sup> (MP de 2%).

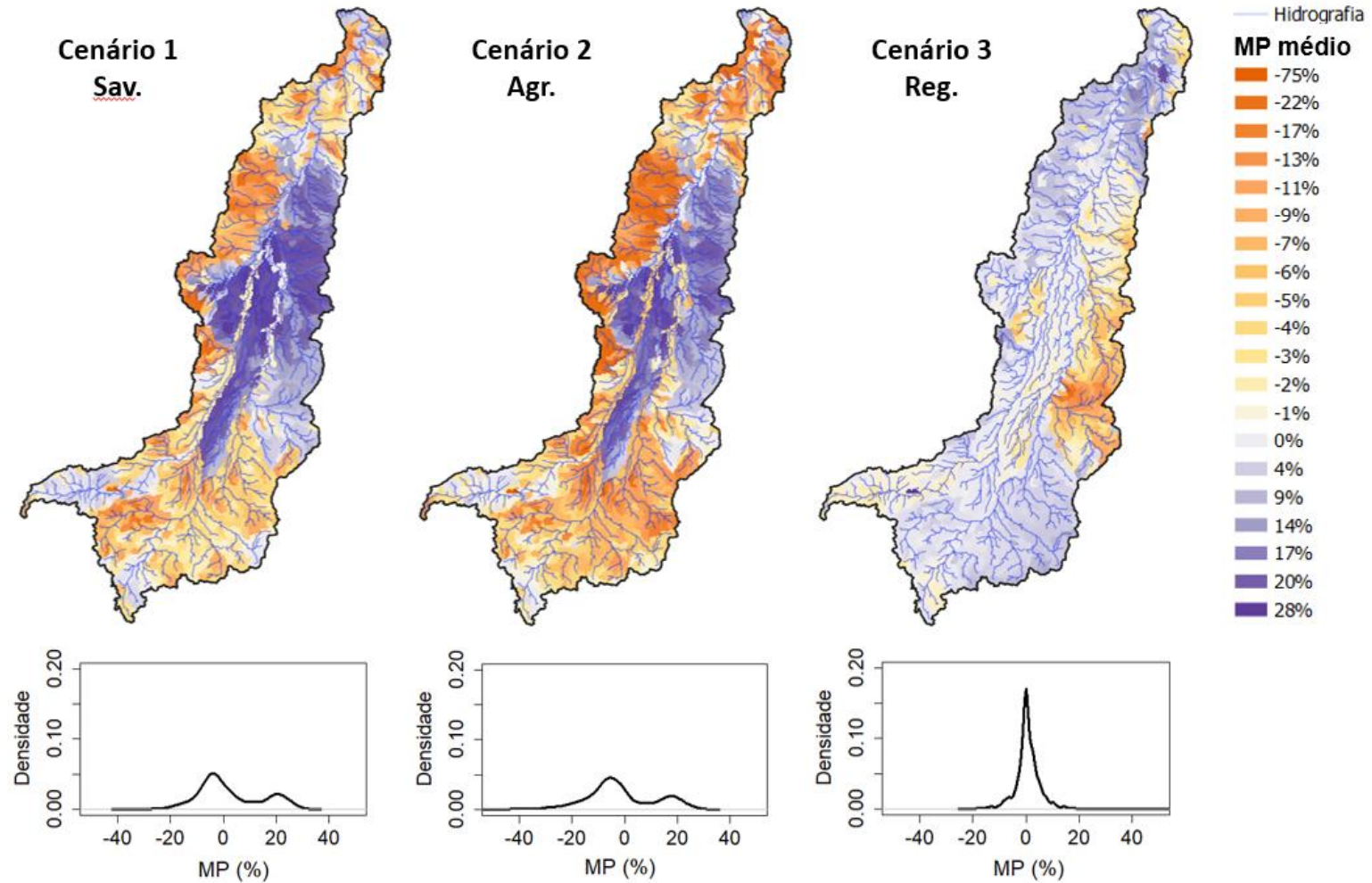
Tabela 6.4 - Vazões médias simuladas e mudança percentual para os cenários de mudança de uso e cobertura do solo propostos em relação ao cenário de controle.

|             |     | Vazão média (mm/ano) |          |         |        |
|-------------|-----|----------------------|----------|---------|--------|
|             |     | Cenários             | Controle | Mudança | MP (%) |
| Sub-bacia 1 | Sav |                      | 516      | 500     | 3      |
|             | Agr |                      | 516      | 522     | -1     |
|             | Reg |                      | 516      | 511     | *      |
| Sub-bacia 2 | Sav |                      | 497      | 475     | 5      |
|             | Agr |                      | 497      | 495     | *      |
|             | Reg |                      | 497      | 498     | *      |
| Sub-bacia 3 | Sav |                      | 483      | 501     | -4     |
|             | Agr |                      | 483      | 521     | -8     |
|             | Reg |                      | 483      | 483     | 0      |
| Sub-bacia 4 | Sav |                      | 453      | 473     | -4     |
|             | Agr |                      | 453      | 485     | -7     |
|             | Reg |                      | 453      | 445     | 2      |

\* MP menores que 1%. Fonte: Produção do autor.

Ao analisar esses valores médios de MP é possível observar que a variabilidade dos resultados não segue um padrão de incremento e/ou redução das vazões médias em consequência da diminuição e/ou aumento das classes de vegetação nativa (formação florestal e Savânica). Da mesma forma, é necessário observar os valores para cada minibacia, onde as mudanças apresentam valores distintos, principalmente atrelados ao fator topográfico da BRA.

Figura 6.5 - Mudança percentual por minibacias dos cenários em relação ao período de controle para as vazões médias.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 6.6 apresenta o MP médios por minibacias dos cenários analisados. Fica evidente a variabilidade espacial das mudanças ocorridas ao longo de toda a área de estudo. Há regiões que apresentam incrementos maiores que a média apresentada e outras com reduções da vazão média. No cenário 1 os valores de MP por minibacia podem variar entre -35% representando incrementos e 30% correspondente a redução das vazões médias. No cenário 2 os incrementos podem resultar em valores de MP de até -76% e de 30% nas reduções. Enquanto no cenário 3 os valores de MP por minibacia podem variar entre -23% a 24% de incrementos e reduções, respectivamente, nas vazões médias simuladas pelo modelo.

Os resultados apresentados evidenciam ainda mais o papel da vegetação na geração da vazão média na BRA. Conforme mencionado anteriormente, nos cenários propostos os incrementos nas vazões médias associadas à perda da vegetação nativa (cenários 1 e 2) e em regiões com maiores declividades refletem a perda da capacidade de armazenamento de água no solo com o aumento do escoamento superficial. Regiões com baixas declividades, os impactos de redução da vazão são ainda maiores ao comparar com os resultados encontrados considerando os períodos de mudança.

Com relação ao cenário 3, a recomposição da vegetação nativa pode resultar em grande parte da área na diminuição das vazões médias. Esse comportamento reflete que à medida que a vegetação nativa é estabelecida, os escoamentos superficiais diminuem e, em consequência, maiores volumes de água passam para o reservatório de base.

#### 6.4.2 Impacto nas vazões em períodos de cheia e estiagem

Da mesma forma que nas vazões médias, os impactos decorrentes das mudanças de uso e cobertura da terra na BRA em períodos de cheia e estiagem também foram analisados e, os valores médios das vazões simuladas e MP com relação ao cenário de controle podem ser observados na Tabela 6.5. É importante destacar que neste trabalho, as vazões médias simuladas nos períodos de cheia são tratadas como vazões máximas e aquelas observados nos períodos de estiagem como vazões mínimas. Além disso, os meses considerados como cheia foram entre outubro a março, enquanto a estação seca nos meses de maio a agosto.

Tabela 6.5 - Mudança percentual da diferença entre o cenário de controle e os períodos de mudança para as vazões máximas e mínimas.

| Períodos    |      | Vazão (m <sup>3</sup> /s) |         |        |          |         |        |
|-------------|------|---------------------------|---------|--------|----------|---------|--------|
|             |      | Estiagem                  |         |        | Cheia    |         |        |
|             |      | Controle                  | Mudança | MP (%) | Controle | Mudança | MP (%) |
| Sub-bacia 1 | 1985 | 4316                      | 4316    | 0      | 8215     | 8215    | 0      |
|             | 1995 | 4249                      | 4154    | 2      | 8004     | 8253    | -3     |
|             | 2005 | 4447                      | 4321    | 3      | 7712     | 8125    | -5     |
|             | 2015 | 3496                      | 3394    | 3      | 6383     | 6825    | -7     |
| Sub-bacia 2 | 1985 | 3293                      | 3293    | 0      | 6966     | 6966    | 0      |
|             | 1995 | 3234                      | 3155    | 2      | 6843     | 6993    | -2     |
|             | 2005 | 3331                      | 3226    | 3      | 6575     | 6854    | -4     |
|             | 2015 | 2719                      | 2619    | 4      | 5471     | 5784    | -6     |
| Sub-bacia 3 | 1985 | 690                       | 690     | 0      | 1066     | 1066    | 0      |
|             | 1995 | 710                       | 684     | 4      | 1155     | 1207    | -4     |
|             | 2005 | 645                       | 612     | 5      | 1019     | 1095    | -7     |
|             | 2015 | 682                       | 646     | 5      | 1025     | 1110    | -8     |
| Sub-bacia 4 | 1985 | 739                       | 739     | 0      | 1748     | 1748    | 0      |
|             | 1995 | 779                       | 739     | 5      | 1825     | 1902    | -4     |
|             | 2005 | 761                       | 699     | 8      | 1738     | 1854    | -7     |
|             | 2015 | 648                       | 596     | 8      | 1460     | 1588    | -9     |

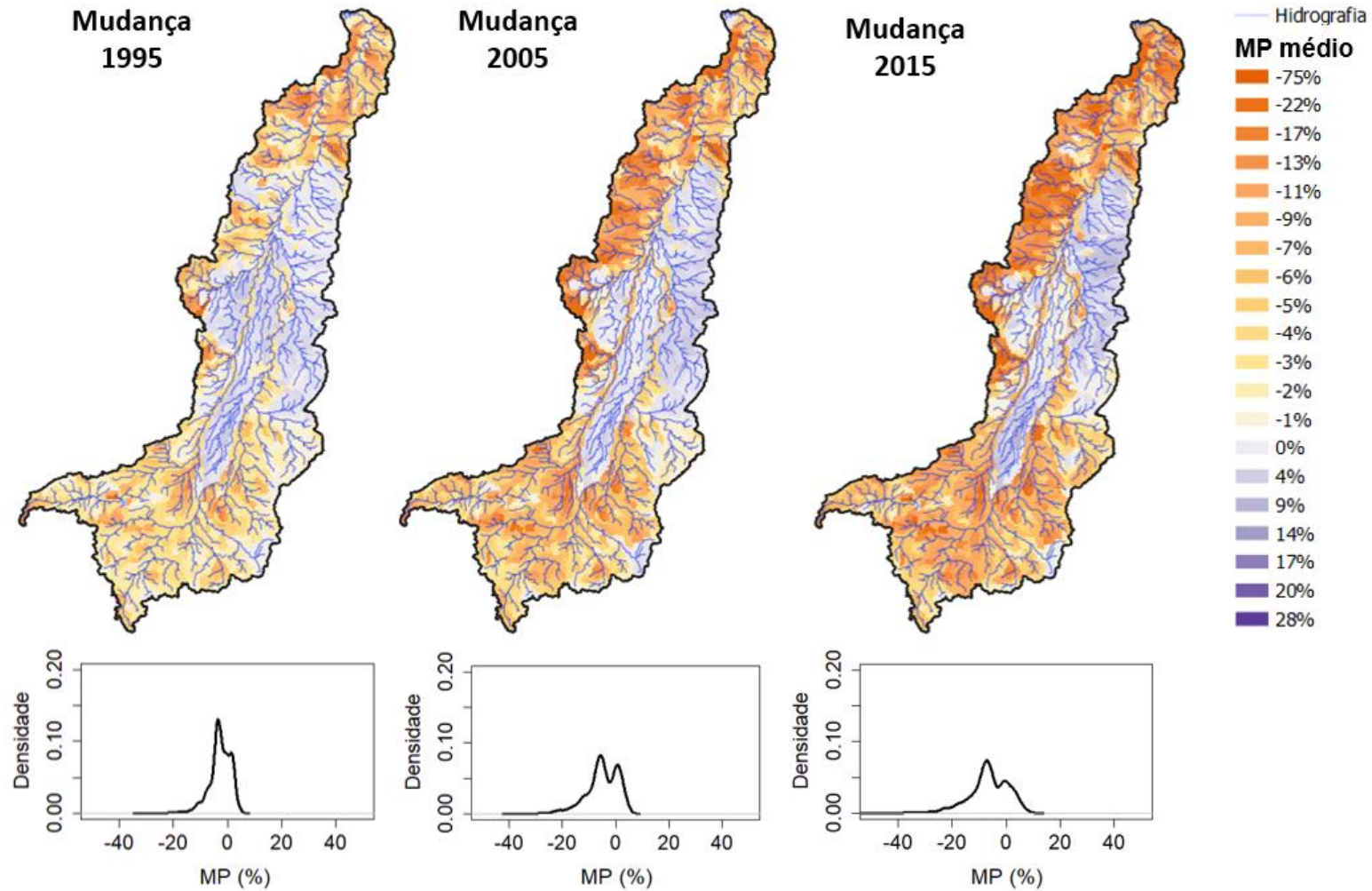
Fonte: Produção do autor.

Os resultados mostram que a substituição da vegetação nativa pela classe de agrossilvipastoril pode resultar no incremento das vazões máximas e uma diminuição nas vazões mínimas da área de estudo. É possível perceber que, comparando os valores de MP médio para os períodos de 1995, 2005 e 2015 ocorre um incremento de aproximadamente 3% ( $249 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), 5% ( $413 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e 7% ( $442 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), respectivamente, nas vazões máximas. Enquanto as reduções nas vazões mínimas variam entre 2% ( $95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e 3% ( $125 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $101 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) para os mesmos períodos.

Esse mesmo comportamento é observado nas demais áreas de contribuição (sub-bacias 2, 3 e 4). Os maiores valores de MP quando considerado a mudança em 2015 para as vazões máximas (9%) e mínimas (8%) correspondem à sub-bacia 4, onde proporcionalmente apresentam áreas com declividades mais acentuadas das demais. Nestas áreas o escoamento superficial é favorecido e, portanto, toda a chuva incidente pode rapidamente chegar à rede de drenagem. Em consequência, menores volumes são drenados para os reservatórios subsuperficiais e subterrâneo que são responsáveis por gerar vazão em períodos de estiagem, resultando na redução das vazões mínimas entre os períodos analisados.

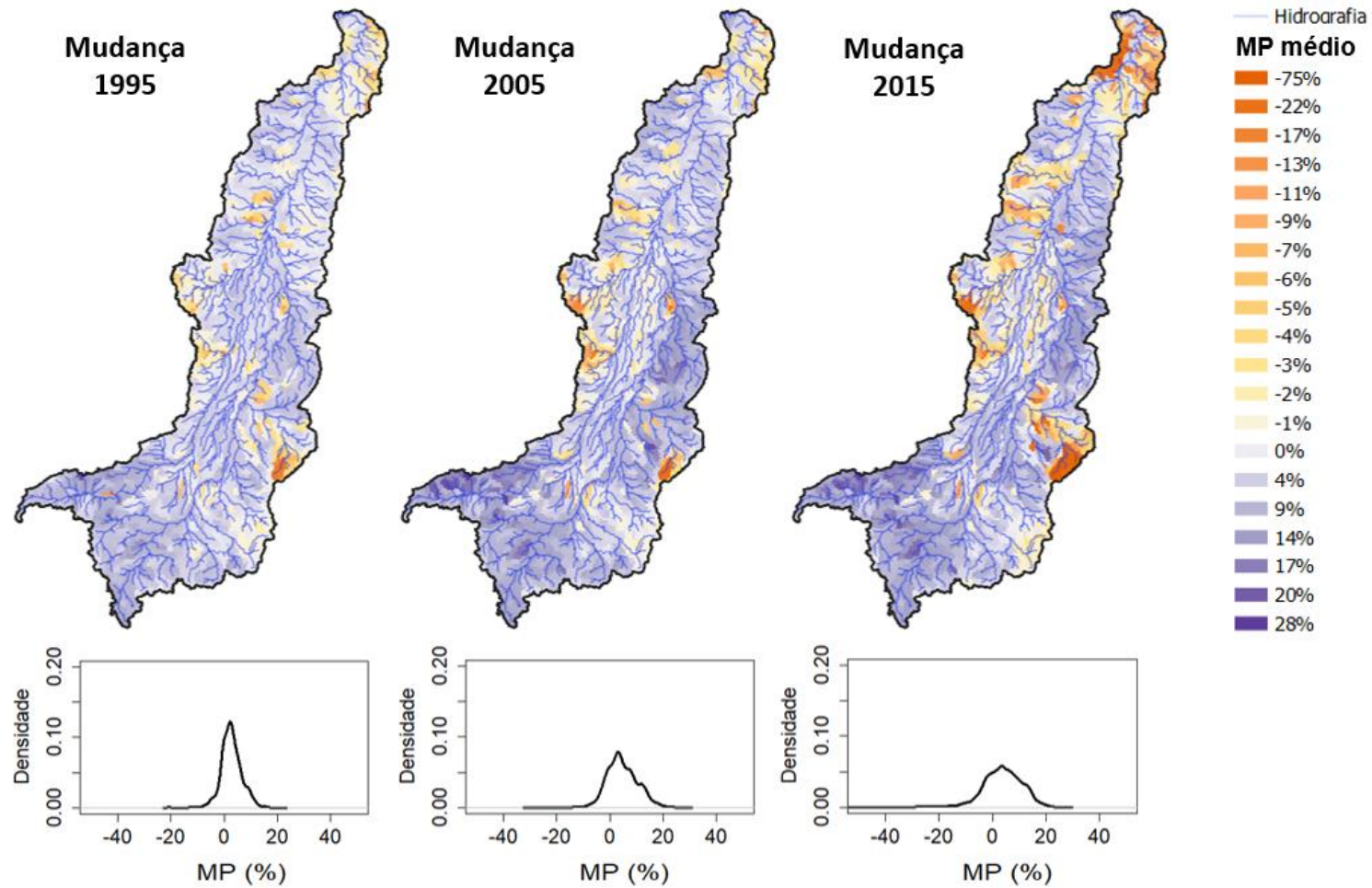
Na escala de minibacias os percentuais de incrementos e/ou redução das vazões máximas e mínimas podem ser superiores aos valores médios encontrados. Para as vazões máximas os valores de MP podem variar entre -33% e 6%, -39% e 6%, -55% e 10% ao considerar o período de mudança de 1995, 2005 e 2015 respectivamente. Enquanto para as vazões mínimas essas variações são de -20% e 22%, -29% e 27%, -70% e 25% para os mesmos períodos. As distribuições espaciais dos valores médios de MP por minibacias são apresentados nas Figuras 6.7 (vazões máximas) e 6.8 (vazões mínimas).

Figura 6.6 - Mudança percentual por minibacias das mudanças em relação ao período de controle para as vazões máximas.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.7 - Mudança percentual por minibacias das mudanças em relação ao período de controle para as vazões mínimas.



Fonte: Produção do autor.



Ao comparar os resultados com os cenários propostos neste estudo, é possível perceber que os impactos acontecem em maiores magnitudes (Tabela 6.6). Quando a classe de formação Savânica é substituída pela agrossilvipastoril (Cenário 1) nota-se que para as vazões máximas na sub-bacia 1 o incremento é de 2% ( $164 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) enquanto nas vazões mínimas as reduções são de aproximadamente 16% ( $666 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Já para o Cenário 2 as vazões máximas podem aumentar 8% ( $621 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e apresentar também uma redução de 16% ( $679 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Enquanto no Cenário 3 onde ocorre a recomposição de toda a vegetação nativa os resultados mostram que há incrementos na vazão mínimas de 8\* ( $355 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) e reduções nas vazões máximas de 5% ( $360 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Da mesma forma para as outras áreas de contribuição esse comportamento é semelhante, com maiores impactos apresentados na sub-bacia 4.

Tabela 6.6 - Mudança percentual da diferença entre o cenário de controle e os cenários propostos de mudança para as vazões máximas e mínimas.

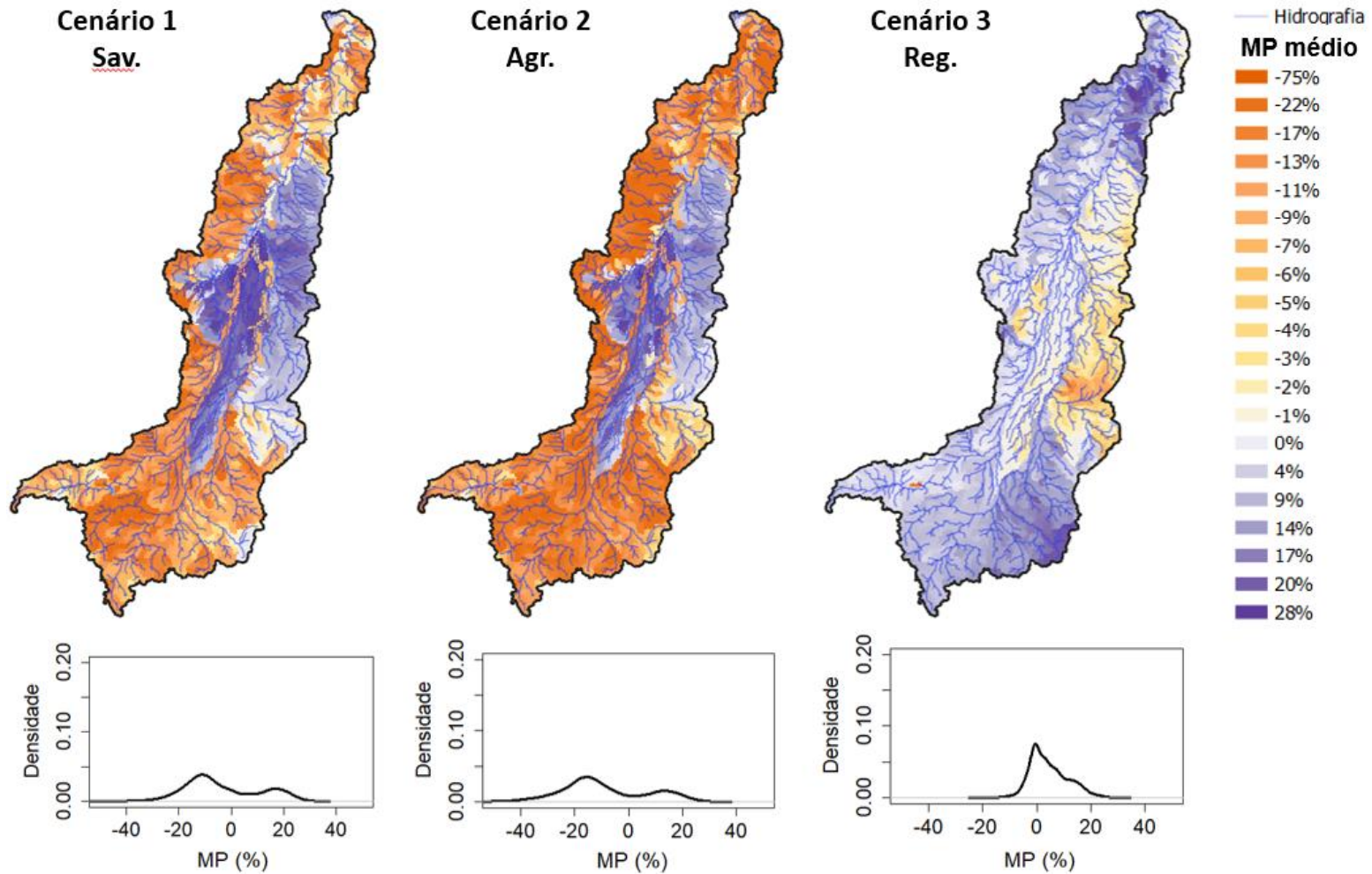
| Cenários    |     | Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) |         |        |          |         |        |
|-------------|-----|---------------------------------|---------|--------|----------|---------|--------|
|             |     | Estiagem                        |         |        | Cheia    |         |        |
|             |     | Controle                        | Mudança | MP (%) | Controle | Mudança | MP (%) |
| Sub-bacia 1 | Sav | 4238                            | 3572    | 16%    | 7789     | 7953    | -2%    |
|             | Agr | 4238                            | 3559    | 16%    | 7789     | 8411    | -8%    |
|             | Reg | 4238                            | 4593    | -8%    | 7789     | 7429    | 5%     |
| Sub-bacia 2 | Sav | 3220                            | 2606    | 19%    | 6639     | 6682    | -1%    |
|             | Agr | 3220                            | 2611    | 19%    | 6639     | 7056    | -6%    |
|             | Reg | 3220                            | 3527    | -10%   | 6639     | 6421    | 3%     |
| Sub-bacia 3 | Sav | 682                             | 562     | 18%    | 1074     | 1221    | -14%   |
|             | Agr | 682                             | 569     | 17%    | 1074     | 1281    | -19%   |
|             | Reg | 682                             | 726     | -7%    | 1074     | 1040    | 3%     |
| Sub-bacia 4 | Sav | 747                             | 586     | 21%    | 1734     | 1953    | -13%   |
|             | Agr | 747                             | 551     | 26%    | 1734     | 2042    | -18%   |
|             | Reg | 747                             | 953     | -28%   | 1734     | 1541    | 11%    |

Fonte: Produção do autor.

Nas Figuras 6.9 e 6.10 são apresentados os valores médios de MP para as vazões máximas e mínimas encontrados na modelagem. Em escala de minibacias os percentuais de incrementos e/ou redução das vazões máximas e mínimas nos cenários propostos são superiores aos valores encontrados quando se considera as mudanças nos períodos analisados e para as vazões médias. Os valores de MP para as vazões máximas podem variar entre -44% e 35%, -57% e 28%, -20% e 30% para os cenários 1 (Sav), 2 (Agr) e 3 (Reg) respectivamente. Enquanto para as vazões mínimas essas variações são de -12% e 54%, -32% e 62%, -91% e 11% para os mesmos cenários.

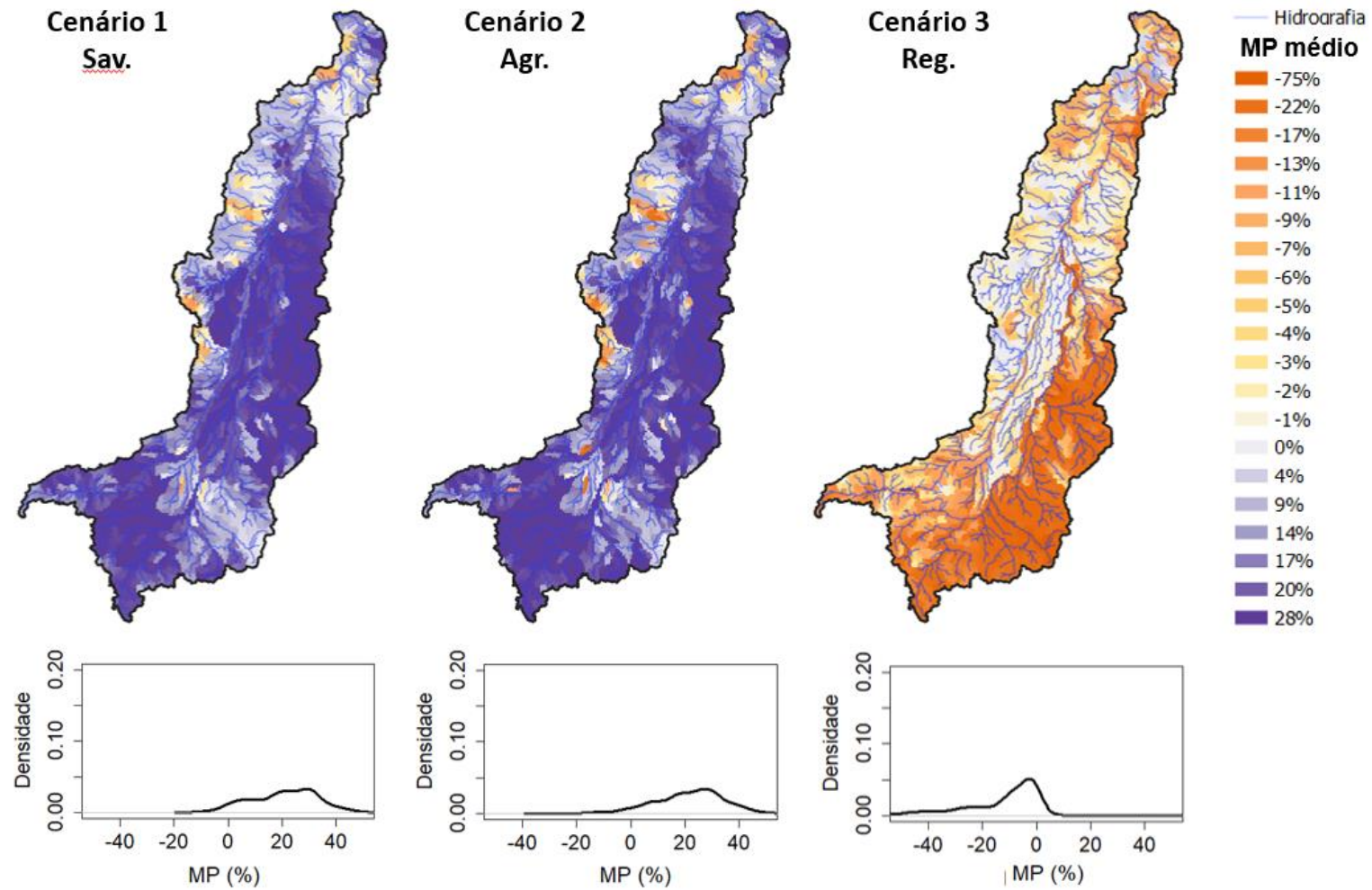
Dessa forma, as discussões levantadas na Seção 6.4.1 referentes às vazões médias também se aplicam para as vazões máximas e mínimas. Similar aos resultados encontrados na análise das vazões médias, é possível perceber que os maiores incrementos (MP negativo) estão em regiões na qual as perdas da classe de formação florestal foram maiores. Além disso, regiões com declividades mais acentuadas se comportou da mesma maneira. Em relação as vazões mínimas o mesmo comportamento é observado. Portanto, fica evidente que a declividade e o uso e cobertura da terra são os principais fatores que influenciam na geração das vazões, e as diferenças são maiores quando se considera os períodos de disponibilidade hídrica.

Figura 6.8 - Mudança percentual por minibacias dos cenários em relação ao período de controle para as vazões máximas.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.9 - Mudança percentual por minibacias dos cenários em relação ao período de controle para as vazões mínimas.



Fonte: Produção do autor.

### 6.4.3 Impactos na evapotranspiração

Os resultados das simulações em termo de evapotranspiração média realizadas durante os períodos analisados para as mudanças ocorridas na BRA entre os anos de 1985, 1995, 2005 e 2015 podem ser observados na Tabela 6.7. É possível notar que, para todas as áreas de contribuição/sub-bacias analisadas ocorre reduções da evapotranspiração média nos períodos analisados. Essas reduções chegam em até 1% aproximadamente em todos os períodos analisados, mesmo que ocorra as perdas da cobertura de vegetação nativa na área de estudo o valor de MP permanece constante ao longo dos períodos analisados.

Tabela 6.7 - Evapotranspirações médias simuladas e mudança percentual para os períodos analisados considerando o cenário de controle e as mudanças de uso e cobertura da terra.

|             |      | <i>Evapotranspiração (mm/ano)</i> |                 |                |               |
|-------------|------|-----------------------------------|-----------------|----------------|---------------|
|             |      | <b>Períodos</b>                   | <b>Controle</b> | <b>Mudança</b> | <b>MP (%)</b> |
| Sub-bacia 1 | 1985 |                                   | 1106            | 1106           | 0             |
|             | 1995 |                                   | 1103            | 1093           | 1             |
|             | 2005 |                                   | 1102            | 1088           | 1             |
|             | 2015 |                                   | 1072            | 1059           | 1             |
| Sub-bacia 2 | 1985 |                                   | 1102            | 1102           | 0             |
|             | 1995 |                                   | 1099            | 1093           | 1             |
|             | 2005 |                                   | 1096            | 1087           | 1             |
|             | 2015 |                                   | 1070            | 1061           | 1             |
| Sub-bacia 3 | 1985 |                                   | 1079            | 1079           | 0             |
|             | 1995 |                                   | 1063            | 1054           | 1             |
|             | 2005 |                                   | 1049            | 1036           | 1             |
|             | 2015 |                                   | 1050            | 1038           | 1             |
| Sub-bacia 4 | 1985 |                                   | 1062            | 1062           | 0             |
|             | 1995 |                                   | 1077            | 1069           | 1             |
|             | 2005 |                                   | 1060            | 1047           | 1             |
|             | 2015 |                                   | 1034            | 1021           | 1             |

Fonte: Produção do autor

É importante destacar que a resistência superficial adotada para a classe de URH da formação florestal e agrossilvipastoril em solo profundo foi a mesma. Dessa forma, pode-se dizer que apesar do mesmo valor desse parâmetro, a

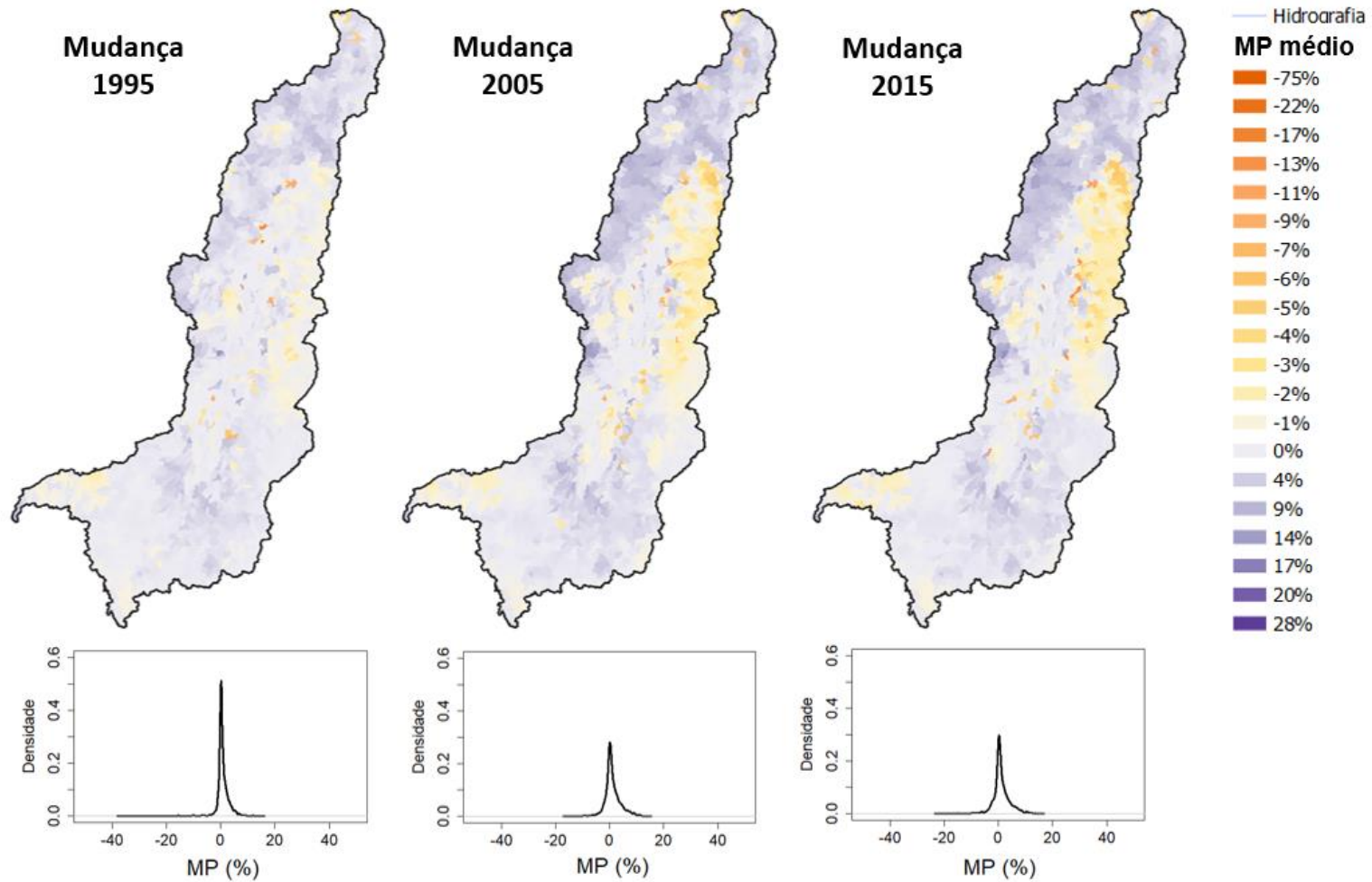
diminuição do IAF devido a conversão das classes de formação florestal e Savânica resulta em menores perdas por evapotranspiração e conseqüentemente o aumento da vazão média conforme analisado anteriormente.

Na Figura 6.11 é apresentado os valores médios de MP para as minibacias da área de estudo. Nota-se que dependendo da localização há incrementos ou reduções na evapotranspiração, principalmente em regiões planas e onde ocorre maior perda da classe de formação florestal, respectivamente. Para o período de 1995 os valores de MP em relação ao cenário de controle variam entre -38% e 16%, enquanto para o período de 2005 esses valores ficam entre -16% e 14% e, em 2015 entre -22% e 16%. Apesar dessas variações estarem relativamente próximas é possível perceber que as regiões em que ocorrem incrementos ou reduções da evapotranspiração se intensificam a cada período analisado.

Conforme mencionado, as regiões que apresentaram reduções estão localizadas e associadas às perdas da classe de formação florestal, principalmente pela redução do IAF e o aumento dos escoamentos. Enquanto as regiões que apresentam incrementos relacionam-se, principalmente, com aquelas houve reduções das vazões médias. Acredita-se que, nestas regiões como o escoamento é mais dificultado pela declividade, maiores volumes de água, provenientes das vazões intensificadas de minibacias a montante, ficam disponíveis para serem evaporados superficialmente.

Com relação aos cenários propostos neste estudo, a Tabela 6.8 apresenta os valores médios de evapotranspiração simulada pelo modelo no cenário de controle, dos cenários de mudança e os MP para cada uma das situações analisadas. Os resultados encontrados mostram que dependendo da área de contribuição/sub-bacias, estes divergem com relação as simulações considerando os períodos de mudança, como é caso das sub-bacias 1 e 2, que para os cenários 2 (Agr) e 3 (Reg) os valores de MP médio ficam abaixo de 1%, e no cenário 1 (Sav) a evapotranspiração é aumentada.

Figura 6.10 – Mudança percentual por minibacias dos períodos de mudanças em relação ao de controle para a evapotranspiração média.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 6.8 - Evapotranspirações médias simuladas e mudança percentual para os cenários analisados considerando o cenário de controle e os cenários de uso e cobertura da terra.

| <i>Evapotranspiração (mm/ano)</i> |                 |                 |                |               |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|
|                                   | <b>Cenários</b> | <b>Controle</b> | <b>Mudança</b> | <b>MP (%)</b> |
| <b>Sub-bacia 1</b>                | Sav             | 1100            | 1116           | -1,5          |
|                                   | Agr             | 1100            | 1095           | *             |
|                                   | Reg             | 1100            | 1104           | *             |
| <b>Sub-bacia 2</b>                | Sav             | 1096            | 1120           | -2            |
|                                   | Agr             | 1096            | 1099           | *             |
|                                   | Reg             | 1096            | 1095           | *             |
| <b>Sub-bacia 3</b>                | Sav             | 1062            | 1043           | 2             |
|                                   | Agr             | 1062            | 1023           | 4             |
|                                   | Reg             | 1062            | 1062           | 0             |
| <b>Sub-bacia 4</b>                | Sav             | 1062            | 1042           | 2             |
|                                   | Agr             | 1062            | 1029           | 3             |
|                                   | Reg             | 1062            | 1071           | -1            |

\* MP menores que 1%.

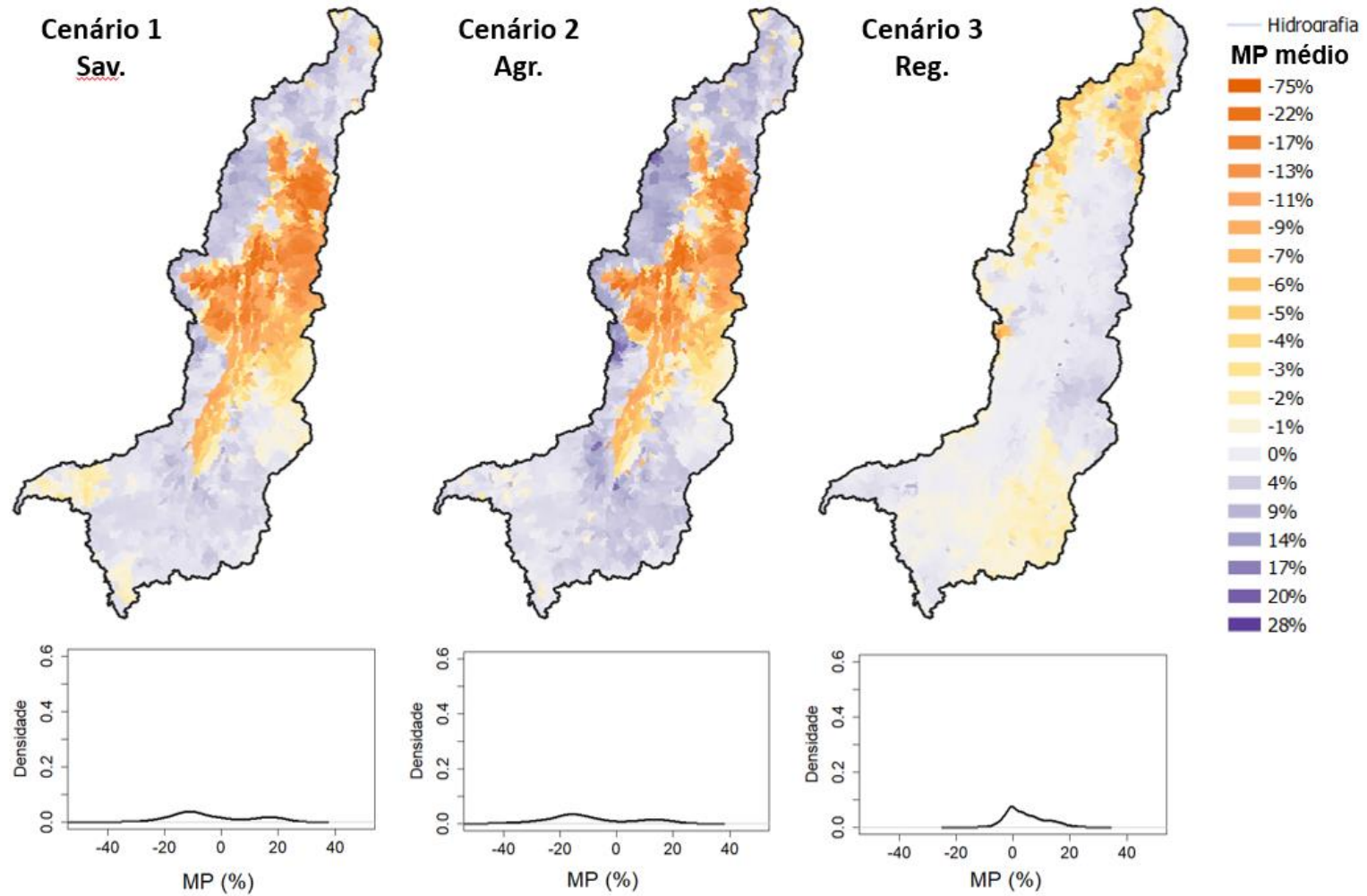
Fonte: Produção do autor.

Os resultados encontrados nas sub-bacias 3 e 4 relacionam-se melhor com aqueles esperados quanto à geração da evapotranspiração em consequência da redução da vegetação nativa. Para os cenários 1 e 2 as reduções chegam em torno de 19 mm.ano<sup>-1</sup> (2%) e 39 mm.ano<sup>-1</sup> (4%) na sub-bacia 3 e, de 20 (2%) e 33 mm.ano<sup>-1</sup> (3%) na sub-bacia 4. Já para o cenário 3 não houve incrementos na sub-bacia 3, enquanto na sub-bacia 4 o incremento é em torno de 9 mm.ano<sup>-1</sup> (1%).

Conforme analisado anteriormente, o fator escala influencia também nos resultados encontrados na análise da evapotranspiração, uma vez que a variabilidade espacial das mudanças influenciara nestes resultados, principalmente quando aumenta a área de contribuição. Na Figura 6.12 é apresentado os valores médios de MP para os cenários analisados em relação ao cenário de controle.



Figura 6.11 – Mudança percentual por minibacias dos cenários de mudanças em relação ao de controle para a evapotranspiração média.



Fonte: Produção do autor.

É possível perceber que há grande variabilidade dos resultados de MP por minibacias. Para os cenários 1, 2 e 3 os MP médios variam entre -34% e 15%, -34% e 20%, e -13% e 21% respectivamente. Nas regiões onde predominam declividades planas ocorre o incremento da evapotranspiração, causado principalmente pelo aumento das inundações sazonais da Ilha do Bananal. De acordo com Borma et al. (2009) o aumento da ET na estação chuvosa e particularmente no período de inundação indica que a água de superfície livre desempenha um papel dominante na troca de água durante a estação chuvosa, na área inundável dessa região. As maiores reduções são observadas nas áreas onde as perdas por vegetação nativa ocorre em maior quantidade para as classes de formação florestal.

Dessa forma, é possível perceber que as taxas de evapotranspiração variam de acordo com a escala analisada. Ao considerar toda a bacia, não é perceptível a variabilidade espacial dos incrementos ou reduções associadas à perda de vegetação nativa. Por isso, é importante analisar cada área de contribuição individualmente e relacionar com outros fatores que podem influenciar na geração da evapotranspiração, como os incrementos/reduções das vazões médias e a sazonalidade de eventos chuvosos ou secos.

Com relação a este último tópico e com os resultados aqui encontrados, espera-se que em situações de períodos de cheia que a ET aumente nas áreas onde as vazões máximas diminuem em decorrência da perda de cobertura natural. E ao contrário quando as vazões máximas aumentam, ou seja, menor quantidade de água disponível para os processos de evapotranspiração.

Ao observar os resultados do cenário 3 (Reg) nota-se que ao reestabelecer as formações florestais ocorre um incremento da ET nessas regiões, principalmente pelo aumento do IAF e da altura da vegetação. Em relação as regiões com predominância da formação Savânica em grande parte não ocorre mudanças em relação ao cenário de controle.

## 7 CONCLUSÃO

Esta pesquisa buscou entender o comportamento hidrológico em termos de geração de vazão e evapotranspiração em relação às mudanças de uso e cobertura da terra da Bacia do Rio Araguaia por meio de modelagem. A complexidade e os desafios em realizar modelagem hidrológica em bacias de grande escala são grandes, uma vez que diversos fatores podem influenciar o comportamento hidrológico e que refletem em resultados distintos ao considerar as escalas de análise.

Neste estudo utilizou-se o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) que apresentou ser um modelo amigável, de fácil compreensão e manipulação. Além de ser um modelo desenvolvido por pesquisadores nacionais. Os resultados das análises de sensibilidade demonstram que o modelo consegue produzir repostas em relação às mudanças dos parâmetros que se relacionam com a vegetação e, conseqüentemente, às mudanças de uso e cobertura da terra da área de estudo. Um processo de calibração e validação foi realizado no MGB-IPH com ajustes dos hidrogramas simulados com os observados a partir de um cenário de controle. Os resultados foram satisfatórios quando analisados em termos das funções objetivo.

No processo de parametrização foi utilizado produtos de sensoriamento remoto para estimar o IAF, albedo e altura da vegetação. A potencialidade no uso desses produtos é muito grande, uma vez que é possível realizar melhores estimativas e representatividade espacial desses parâmetros focados na área de estudo. Para este trabalho os resultados mostram-se condizentes aos valores encontrados na literatura.

Com relação aos impactos das mudanças de uso e cobertura da terra em relação a geração de vazão para os períodos de mudanças adotados neste estudo, os resultados indicam que ocorrem incrementos e reduções nas vazões médias na Bacia do Rio Araguaia. Os incrementos relacionam-se à perda da vegetação nativa e modificações das propriedades físicas do solo, que diminuem a capacidade da área em interceptar a precipitação, conseqüentemente o processo de evapotranspiração e aumentando o

escoamento superficial. Nos casos em que ocorreu reduções das vazões é observado uma forte influência da declividade na área de estudo. Além das reduções da vegetação nativa, em declividades mais acentuadas ocorrem incrementos nas vazões médias, em contrapartida, em regiões mais planas esse comportamento é diferente. Nessas regiões foi observado reduções na geração da vazão média, uma vez que o escoamento é retardado pela topografia da bacia, diminuindo os escoamentos e aumentando os volumes acumulados nos reservatórios, principalmente no superficial, que podem provocar maiores eventos de inundações, sendo uma característica predominante da Bacia do Rio Araguaia.

Nas vazões em períodos de cheia e estiagem os mesmos comportamentos são observados, porém em magnitudes maiores. A geração de vazão nesses períodos é fortemente atrelada à disponibilidade hídrica. Observou que em períodos de cheias ocorrem maiores incrementos na vazão devido principalmente ao escoamento superficial e a declividade. Nos períodos de estiagem nota-se uma redução nas vazões, uma vez que, com as mudanças de uso e cobertura da terra, a recarga dos reservatórios subsuperficial e subterrâneo é afetado e, portanto, ocorrem reduções nos fluxos de base, principal fator que mantém às vazões neste período.

Em termos de geração de evapotranspiração é possível observar que, em média, ocorrem reduções quando há perdas da vegetação nativa. Além disso, essa variável também se relaciona com as reduções das vazões observadas em regiões planas, onde o volume acumulado é maior, fornecendo maiores áreas de água livres e favorecendo o processo de evaporação.

Ao considerar os cenários reduções de vegetação nativa é possível observar os impactos que as mudanças podem provocar na geração de vazão e evapotranspiração, sendo estes condizentes com toda a análise realizada e descrita anteriormente nesta seção, porém ainda mais acentuadas quando comparados às simulações considerando os períodos de mudança na área de estudo. Quando se considera um cenário hipotético de regeneração da vegetação nativa ocorre um comportamento oposto, demonstrando o papel da

vegetação em assegurar na manutenção do comportamento hidrológico esperado na área de estudo.

É importante destacar que, quando se analisa os valores médios em bacias de grande escala em algumas vezes não é possível observar o real comportamento hidrológico, e essa questão também reflete na Bacia do Rio Araguaia. Os resultados mostram que a escala de análise é um fator que deve ser considerado, uma vez que na área de estudo existem regiões na qual há incrementos e/ou reduções na geração de vazão e evapotranspiração que, acabam influenciando nos resultados médios encontrados. Ao analisar os resultados em relação às minibacias é possível observar comportamentos distintos e sua relação com a escala analisada.

Como trabalhos futuros pretende-se:

- Analisar em outras bacias de grande escala que possuem as mesmas características topográficas da Bacia do Rio Araguaia, a fim de comprovar o relacionamento da topografia com relação ao comportamento hidrológico em diversas escalas de análise;
- Realizar a calibração do modelo em termos de geração de evapotranspiração com produtos de sensoriamento remoto;
- Considerar as variabilidades mensais dos parâmetros da vegetação e climatológicos para representar melhor a geração da evapotranspiração na área de estudo.;
- Analisar os efeitos de múltiplas escalas, pois esses efeitos podem ser inversos dependendo do fator escala;
- Analisar o que acontece com a umidade do solo e com esta se relaciona com as mudanças na ET, principalmente porque são relações fortes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Regiões hidrográficas**. Disponível em:  
<[http://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/b78ea64219b9498c8125cdef390715b7\\_0](http://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/b78ea64219b9498c8125cdef390715b7_0)>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019**. Brasília-DF: ANA, 2019. 110 p.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.
- ALMEIDA, C. T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; CUBO, P.; RAMOS, M. C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973-2013. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 4, p. 2013–2026, mar. 2017.
- ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E.; ROSALEM, L. M. P.; YOULTON, C.; OLIVEIRA, P. T. S. Hydrological trade-offs due to different land covers and land uses in the Brazilian Cerrado. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 3, p. 1263–1279, mar. 2019.
- ANDRADE, R. G.; DE C. TEIXEIRA, A. H.; SANO, E. E.; LEIVAS, J. F.; DE C. VICTORIA, D.; NOGUEIRA, S. F. Pasture evapotranspiration as indicators of degradation in the Brazilian Savanna: a case study for Alto Tocantins watershed. **Proceedings of SPIE**, v.9239, 2014.
- AQUINO, S.; LATRUBESSE, E. M.; SOUZA FILHO, E. E. DE. Caracterização hidrológica e geomorfológica dos afluentes da Bacia do Rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 1, 26 nov. 2009.
- ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; COE, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66–78, jul. 2016.
- ARIAS, M. E.; LEE, E.; FARINOSI, F.; PEREIRA, F. F.; MOORCROFT, P. R. Decoupling the effects of deforestation and climate variability in the Tapajós river basin in the Brazilian Amazon. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 11, p. 1648–1663, 2018.

BAKER, J. C. A.; SPRACKLEN, D. V. Climate benefits of intact Amazon Forests and the biophysical consequences of disturbance. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, ago. 2019.

BARKHORDARIAN, A.; SAATCHI, S. S.; BEHRANGI, A.; LOIKITH, P. C.; MECHOSO, C. R. A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 15331, dez. 2019.

BATHURST, J. C.; EWEN, J.; PARKIN, G.; O'CONNELL, P. E.; COOPER, J. D. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts: 3. blind validation for internal and outlet responses. **Journal of Hydrology**, v. 287, n. 1–4, p. 74–94, fev. 2004.

BATHURST, J. C.; IROUMÉ, A.; CISNEROS, F.; FALLAS, J.; ITURRASPE, R.; NOVILLO, M. G.; URCIUOLO, A.; BIÈVRE, B. DE; BORGES, V. G.; COELLO, C.; CISNEROS, P.; GAYOSO, J.; MIRANDA, M.; RAMÍREZ, M. Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American environments 1: field data analysis. **Journal of Hydrology**, v. 400, n. 3/4, p. 281–291, abr. 2011.

BAYER, D.; COLLISCHONN, W. Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da Terra. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 165–179, 2013.

BAYER, D. M. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. 2014. 172 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BAYER, M.; ASSIS, P. C.; SUIZU, T. M.; GOMES, M. C. Mudança no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Araguaia e seus reflexos nos recursos hídricos, o trecho médio do rio Araguaia em Goiás. **Confins**, n. 48, set. 2020.

BEZERRA, B. G.; SILVA, L. L.; SANTOS E SILVA, C. M.; DE CARVALHO, G. G. Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, n. 1–2, p. 565–576, jan. 2019.

BESERRA, P. S. **Avaliação dos efeitos das alterações na cobertura e uso do solo sobre o regime de vazões via modelagem hidrológica considerando incerteza paramétrica**. 2016. 145 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BIANCAMARIA, S.; HOSSAIN, F.; LETTENMAIER, D. P. Forecasting transboundary river water elevations from space. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 11, jun. 2011.

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1444–1449, jun. 2008.

BORMA, L. S.; DA ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M.; VON RANDOW, C.; COLLICCHIO, E.; KURZATKOWSKI, D.; BRUGGER, P. J.; FREITAS, H.; TANNUS, R.; OLIVEIRA, L.; RENNÓ, C. D.; ARTAXO, P. Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the Bananal Island region, Amazonia. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 114, n. 1, p. G01003, jan. 2009.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Lei nº 9.433. de 8 de janeiro de 1997**: institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm).

BUARQUE, D. C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: estudo de caso do rio madeira**. 2015. 182 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BUARQUE, D. C.; DE PAIVA, R. C. D.; CLARKE, R. T.; MENDES, C. A. B. A comparison of Amazon rainfall characteristics derived from TRMM, CMORPH and the Brazilian national rain gauge network. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. D19, p. D19105, out. 2011.

CABALLERO, C. B.; RUHOFF, A.; BIGGS, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: a systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 808, p. 152134, fev. 2022.

CAVALCANTE, R. B. L.; PONTES, P. R. M.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; SOUZA, E. B. Opposite effects of climate and land use changes on the annual water balance in the Amazon arc of deforestation. **Water Resources Research**, v. 55, n. 4, p. 3092–3106, abr. 2019.

CARAM, R. DE O. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. 2011. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CARUZZO, A.; ROCHA, H. R. Estimativa do índice de área foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com o método indireto ('gap fraction') durante o



experimento AMC/LBA-1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000.

CHANG, M. **Florest hydrology: an introduction to water and forests**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 598 p.

CHEN, J. M.; CHEN, X.; JU, W.; GENG, X. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. **Journal of Hydrology**, v. 305, n. 1–4, p. 15–39, abr. 2005.

COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1–3, p. 119–131, set. 2011.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, v. 360, n. 1–4, p. 207–216, out. 2008.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878–895, out. 2007.

COLOSSI, B.; FLEISCHMANN, A. S.; SIQUEIRA, V. A.; BITAR, A. A.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P.; COLLISCHONN, W. Using SMOS for validation and parameter estimation of a large scale hydrological model in Paraná river basin. In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION, 2017, Viena - Áustria. **Anais...** Viena - Áustria: EGU General Assembly Conference, 2017.

CONDÉ, R. C. C. **Fluxos de vapor d'água em um cerrado sensu stricto do Distrito Federal**. 1995. 50 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 1995.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D12, p. 14189–14198, jun. 1999.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 18–34, jan. 2000.

CULF, A. D.; FISCH, G.; HODNETT, M. G. The Albedo of Amazonian forest and ranch land. **Journal of Climate**, v. 8, n. 6, p. 1544–1554, jun. 1995.

DA SILVA, B. B.; WILCOX, B. P.; DA SILVA, V. DE P. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; DE OLIVEIRA, L. M. M. Changes to the energy budget and evapotranspiration following conversion of tropical savannas to agricultural lands in São Paulo State, Brazil. **Ecohydrology**, v. 8, n. 7, p. 1272–1283, out. 2015.

DAVIDSON, E. A.; DE ARAÚJO, A. C.; ARTAXO, P.; BALCH, J. K.; BROWN, I. F.; C. BUSTAMANTE, M. M.; COE, M. T.; DEFRIES, R. S.; KELLER, M.; LONGO, M.; MUNGER, J. W.; SCHROEDER, W.; SOARES-FILHO, B. S.; SOUZA, C. M.; WOFSY, S. C. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321–328, jan. 2012.

DE C. ABREU, L. G. Á.; MAILLARD, P. A model based on satellite altimetry and imagery to evaluate water volume changes in a reservoir in Brazil. In: NEASE, C. M. U.; MALTESE, A. (Ed.). **Remote sensing for agriculture, ecosystems, and hydrology**. [S.l.]: Spie, 2014.

DE OLIVEIRA, J. V.; FERREIRA, D. B. S.; SAHOO, P. K.; SODRÉ, G. R. C.; DE SOUZA, E. B.; QUEIROZ, J. C. B. Differences in precipitation and evapotranspiration between forested and deforested areas in the Amazon rainforest using remote sensing data. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 6, p. 239, mar. 2018.

DE OLIVEIRA SANTOS, V. **Identificação e análise de tendências das variáveis hidrológicas e mudanças no uso e ocupação das terras no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Uberaba, em Minas Gerais**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

DEBORTOLI, N. S.; DUBREUIL, V.; HIROTA, M.; RODRIGUES FILHO, S.; LINDOSO, D. P.; NABUCET, J. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 6, p. 2889–2900, maio 2017.

DIAS, L. C. P.; MACEDO, M. N.; COSTA, M. H.; COE, M. T.; NEILL, C. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 108–122, set. 2015.

DUBREUIL, V.; DEBORTOLI, N.; FUNATSU, B.; NÉDÉLEC, V.; DURIEUX, L. Impact of land-cover change in the Southern Amazonia climate: a case study

for the region of Alta Floresta, Mato Grosso, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 2, p. 877–891, fev. 2012.

ESPINOZA, J. C.; SÖRENSSON, A. A.; RONCHAIL, J.; MOLINA-CARPIO, J.; SEGURA, H.; GUTIERREZ-CORI, O.; RUSCICA, R.; CONDOM, T.; WONGCHUIG-CORREA, S. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 26, p. 100637, dez. 2019.

FAN, F.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 243–254, 2014.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília-DF. **Anais...** Brasília-DF: ABRH, 2015

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. RG2004, maio 2007.

FURLAN, D. N. **Variabilidade temporal e espacial das chuvas e do balanço hídrico no estado de Rondônia: caracterização e análise de tendência**. 2009. 129 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FURLAN, D. N. **Efeito da mudança do uso e cobertura do solo nos balanços hídrico e energético da bacia do rio Ji-Paraná (RO) utilizando dados multitemporais de sensoriamento remoto**. 2013. 152p. Tese (Doutorado em Química na Agricultura e no Ambiente) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

GAO, H.; BIRKETT, C.; LETTENMAIER, D. P. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. **Water Resources Research**, v. 48, n. 9, set. 2012.

GEORGESCU, M.; LOBELL, D. B.; FIELD, C. B.; MAHALOV, A. Simulated hydroclimatic impacts of projected Brazilian sugarcane expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 5, p. 972–977, mar. 2013.

GETIRANA, A. C. V.; BONNET, M.-P.; ROTUNNO FILHO, O. C.; COLLISCHONN, W.; GUYOT, J.-L.; SEYLER, F.; MANSUR, W. J. Hydrological

modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 22, p. 3219–3236, jun. 2010.

GRANIER, A.; HUC, R.; BARIGAH, S. T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 78, n. 1–2, p. 19–29, jan. 1996.

HIRPA, F. A.; GEBREMICHAEL, M.; HOPSON, T. M.; WOJICK, R.; LEE, H. Assimilation of satellite soil moisture retrievals into a hydrologic model for improving river discharge. In: LAKSHMI, V. et al. (Ed.). **Remote sensing of the terrestrial water cycle**. [S.l.]: AGU, 2015.

HONZÁK, M.; LUCAS, R. M.; AMARAL, I.; CURRAN, P. J.; FOODY, G. M.; AMARAL, S. Estimation of leaf area index and total biomass of tropical regenerating forest: comparasion of methodologies. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, J. M. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. New York: John Wiley & Sons, 1996. p. 265–381.

HOUGH, M. N.; JONES, R. J. A. The United Kingdom Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS version 2.0-an overview. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 1, n. 2, p. 227–239, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapeamento de recursos naturais do Brasil - Escala 1:250.000 - documentação técnica geral**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

JARDIM, P. F.; SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: pacote de ferramentas open source de geoprocessamento aplicado a recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília-DF. **Anais...** Brasília-DF: ABRH, 2015

JIMÉNEZ, K. Q. **Modelagem hidrológica com uso da estimativa de chuva por sensoriamento remoto**. 2011. 145 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

KEYS, P. W.; VAN DER ENT, R. J.; GORDON, L. J.; HOFF, H.; NIKOLI, R.; SAVENIJE, H. H. G. Analyzing precipitation sheds to understand the vulnerability of rainfall dependent regions. **Biogeosciences**, v. 9, n. 2, p. 733–746, fev. 2012.

KHANNA, J.; MEDVIGY, D.; FUEGLISTALER, S.; WALKO, R. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 3, p. 200–204, mar. 2017.

LATHUILLIÈRE, M. J.; JOHNSON, M. S.; DONNER, S. D. Water use by terrestrial ecosystems: temporal variability in rainforest and agricultural contributions to evapotranspiration in Mato Grosso, Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 2, e 024024, jun. 2012.

LATRUBESSE, E. M.; AMSLER, M. L.; DE MORAIS, R. P.; AQUINO, S. The geomorphologic response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: the case of the Araguaia River. **Geomorphology**, v. 113, n. 3–4, p. 239–252, dez. 2009.

LEON, J. G.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; BONNET, M.-P.; CAUHOPÉ, M.; FRAPPART, F.; FILIZOLA, N.; FRAIZY, P. Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges. **Journal of Hydrology**, v. 328, n. 3–4, p. 481–496, set. 2006.

LETTENMAIER, D. P.; ALSDORF, D.; DOZIER, J.; HUFFMAN, G. J.; PAN, M.; WOOD, E. F. Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. **Water Resources Research**, v. 51, n. 9, p. 7309–7342, set. 2015.

LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 213–238, maio 2001.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Estimativa da contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007

LININGER, K. B.; LATRUBESSE, E. M. Flooding hydrology and peak discharge attenuation along the middle Araguaia River in central Brazil. **CATENA**, v. 143, p. 90–101, ago. 2016.

LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105–109, maio 2011.

MEDEIROS, M. S.; FLEISCHMANN, A. S.; OLIVEIRA, A. M.; FAN, F. M.; MARTINBIANCHO, G. K.; JARDIM, P. F.; CORREA, S. W.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. **Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools**. Porto Alegre: [s.n.], 2019.

- MIRALLES, D. G.; DE JEU, R. A. M.; GASH, J. H.; HOLMES, T. R. H.; DOLMAN, A. J. Magnitude and variability of land evaporation and its components at the global scale. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 3, p. 967–981, mar. 2011.
- MIRANDA, A. C.; MIRANDA, H. S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; MCINTYRE, J. A.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R.; BRASS, J. Carbon dioxide fluxes over a Cerrado sensu stricto in central Brazil. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, J. M. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. New York: John Wiley & Sons, 1996. p. 353–361.
- MYNENI, R.; KNYAZIKHIN, Y.; PARK, T. **MCD15A3H MODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index/FPAR 4-day L4 Global 500m SIN Grid V006**. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD15A3H.006>>. Acesso em: 10 jan. 2021.
- NÓBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; TORRES, G. N.; KOVACS, K.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E.; GEROLD, G. Effects of conversion of native Cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. **PLOS ONE**, v. 12, n. 6, e0179414, jun. 2017.
- OLIVEIRA, A. M.; FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R. On the contribution of remote sensing-based calibration to model multiple hydrological variables. **Earth and Space Science Open Archive**, p. 31, 2020.
- OLIVEIRA, R. F. DE; ZOLIN, C. A.; VICTORIA, D. DE C.; LOPES, T. R.; VENDRUSCULO, L. G.; PAULINO, J. Hydrological calibration and validation of the MGB-IPH model for water resource management in the upper Teles Pires River basin in the Amazon-Cerrado ecotone in Brazil. **Acta Amazonica**, v. 49, n. 1, p. 54–63, mar. 2019.
- OLIVEIRA, J. R. DE F.; ORTIZ, J. DE O.; ROSIM, S. Comparison between drainage network extracted from elevation and surface models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, APPLICATIONS AND SERVICES (GEOPROCESSING), 6., 2014. **Proceedings...** 2014. p.89-93.
- OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; MORAN, M. S.; GOODRICH, D. C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H. V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7100–7114, set. 2014.
- PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias: estudo de caso: Bacia do Rio Solimões**. 2009. 182 p. Dissertação

(Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAIVA, R. C. D. **Hidrologia da bacia Amazônica: compreensão e previsão com base em modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto.** 2012. 167 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre; Université de Toulouse 3, Toulouse, 2012.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; BULHÕES MENDES, C. A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226–1243, mar. 2013.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; RUHOFF, A.; CORREA, S. W.; SORRIBAS, M. V.; GONDIM, G.; BRÊDA, J. P. F.; BRAVO, J. M.; JARDIM, P. F. SAMEWATER: Uma agenda de pesquisa integrada da hidrologia da América do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2017, Florianópolis-SC. **Anais...** Florianópolis-SC: ABRH, 2017.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3–4, p. 170–181, set. 2011.

PAIVA, R. C. D.; DURAND, M. T.; HOSSAIN, F. Spatiotemporal interpolation of discharge across a river network by using synthetic SWOT satellite data. **Water Resources Research**, v. 51, n. 1, p. 430–449, jan. 2015.

PAZ, A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91–103, 2009.

PEREIRA, J. L. G.; FERREIRA, L. V.; SALES, G. M.; THALÊS, M. C.; POCCARD-CHAPUIS, R.; RENNÓ, C. D.; ROSIM, S. Avaliação de ferramentas automáticas para a extração da rede de drenagem a partir de dados de elevação SRTM para o município de Paragominas, estado do Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, v. 13, n. 3, p. 409–433, 2018.

PIERCE, L. L.; RUNNING, S. W. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. **Ecology**, v. 69, n. 6, p. 1762–1767, dez. 1988.

- PONTES, P.; COLLISCHONN, W.; FAN, F.; PAIVA, R.; BUARQUE, D. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888–904, 2015.
- PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; DE PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F.; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1–20, ago. 2017.
- RÁPALO, L. M. C.; ULIANA, E. M.; MOREIRA, M. C.; DA SILVA, D. D.; DE MELO RIBEIRO, C. B.; DA CRUZ, I. F.; DOS REIS PEREIRA, D. Effects of land-use and -cover changes on streamflow regime in the Brazilian Savannah. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 38, p. 100934, dez. 2021.
- RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993.
- RENNÓ, C. D. Redução dos efeitos do desmatamento sobre modelo digital de elevação do SRTM usando imagem TM/LANDSAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p.7095-7102.
- ROBERTS, J. M.; CABRAL, O. M. R.; COSTA, J. P.; MCWILLIAM, A. L. C.; SÁ, T. D. A. An overview of the leaf area index and physiological measurements during ABRACOS. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, J. M.. **Amazonian deforestation and climate**. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996. p. 287–306.
- ROSARIO KLAUTAU DE ARAUJO GOMES, R.; LIMA FERNANDES, L. Hydrological characterization of the Araguaia River through reference flows. **Applied Water Science**, v. 7, n. 8, p. 4605–4614, 19 dez. 2017.
- ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; DE GONCALVES, L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885–894, jun. 2010.
- RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGAO, L. E. O. C.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. S. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical Savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 703–725, 12 mar. 2012.



SALAZAR, A.; BALDI, G.; HIROTA, M.; SYKTUS, J.; MCALPINE, C. Land use and land cover change impacts on the regional climate of non-Amazonian South America: A review. **Global and Planetary Change**, v. 128, p. 103–119, maio 2015.

SANO, E. E.; ROSA, R.; SCARAMUZZA, C. A. DE M.; ADAMI, M.; BOLFE, E. L.; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; MAURANO, L. E. P.; NARVAES, I. DA S.; OLIVEIRA FILHO, F. J. B. DE; SILVA, E. B. DA; VICTORIA, D. DE C.; FERREIRA, L. G.; BRITO, J. L. S.; BAYMA, A. P.; OLIVEIRA, G. H. DE; BAYMA-SILVA, G. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2002 to 2013. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, p. 5, 2019.

SCHAAF, C.; WANG, Z. **MCD43A4 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Nadir BRDF Adjusted Ref Daily L3 Global - 500m V006**. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A4.006>>. Acesso em: 10 jan. 2021.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993.

SILVA, J. L. B. DA; MOURA, G. B. DE A.; SILVA, M. V. DA; LOPES, P. M. O.; GUEDES, R. V. DE S.; SILVA, Ê. F. DE F. E; ORTIZ, P. F. S.; RODRIGUES, J. A. DE M. Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100372, nov. 2020.

SILVA, F. A. M. DA; ASSAD, E. D.; STEINKE, E. T.; MULLER, A. G. Clima do bioma cerrado. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. DA. **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília. 2. ed. Distrito Federal: EMBRAPA, 2008. p. 93–148.

SILVA, P. R. F. **A expansão agrícola no Cerrado e seus impactos no ciclo hidrológico: estudo de caso na região do MATOPIBA**. 2020. 155 p. Dissertação (Mestrado em Política e Gestão da Sustentabilidade) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2020.

SILVA JUNIOR, C.; ALMEIDA, C.; SANTOS, J.; ANDERSON, L.; ARAGÃO, L.; SILVA, F. Spatiotemporal rainfall trends in the Brazilian Legal Amazon between the years 1998 and 2015. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1220, 10 set. 2018.

SILVÉRIO, D. V.; BRANDO, P. M.; MACEDO, M. N.; BECK, P. S. A.; BUSTAMANTE, M.; COE, M. T. Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 10, p. 104015, out. 2015.

- SIMARD, M.; PINTO, N.; FISHER, J. B.; BACCINI, A. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. G4, e G04021, nov. 2011.
- SIQUEIRA, V.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P.; FAN, F.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 274–287, fev. 2016.
- SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 253, n. 1–4, p. 130–147, nov. 2001.
- SONG, X.; ZHANG, J.; ZHAN, C.; XUAN, Y.; YE, M.; XU, C. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 739–757, abr. 2015.
- SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3405–3413, out. 2016.
- STERLING, S. M.; DUCHARNE, A.; POLCHER, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 385–390, abr. 2013.
- TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 175, n. 1–4, p. 339–382, 1996.
- TUCCI, C.; BRAVO, J.; COLLISCHONN, W. Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 3, p. 37–50, 2009.
- TUCCI, C.; COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001.
- TUCCI, C.; COLLISCHONN, W. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27–39, 2003.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p. ISBN (9788570258236).

VERGOPOLAN, N.; FISHER, J. B. The impact of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia as observed from remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 22, p. 5412–5430, nov. 2016a.

VERGOPOLAN, N.; FISHER, J. B. The impact of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia as observed from remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 22, p. 5412–5430, nov. 2016b.

WANDERS, N.; BIERKENS, M. F. P.; DE JONG, S. M.; DE ROO, A.; KARSSENBERG, D. The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models. **Water Resources Research**, v. 50, n. 8, p. 6874–6891, ago. 2014.

WANG, J.; LI, X.; LU, L.; FANG, F. Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended Fourier Amplitude Sensitivity Test method. **Environmental Modelling & Software**, v. 48, p. 171–182, out. 2013.

WEBB, T. J.; WOODWARD, F. I.; HANNAH, L.; GASTON, K. J. Forest cover–rainfall relationships in a biodiversity hotspot: the Atlantic forest of Brazil. **Ecological Applications**, v. 15, n. 6, p. 1968–1983, dez. 2005.

WOHL, E.; BARROS, A.; BRUNSELL, N.; CHAPPELL, N. A.; COE, M.; GIAMBELLUCA, T.; GOLDSMITH, S.; HARMON, R.; HENDRICKX, J. M. H.; JUVIK, J.; MCDONNELL, J.; OGDEN, F. The hydrology of the humid tropics. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 9, p. 655–662, set. 2012.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A. Leaf area index of ground covers in a subtropical watershed. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 3, p. 425–431, 2003.

XIE, P.; JOYCE, R. J. Integrating information from satellite observations and numerical models for improved global precipitation analyses. In: LAKSHMI, V. et al. (Ed.). **Remote sensing of the terrestrial water cycle**. [S.l.]: AGU, 2015. p. 43–59.

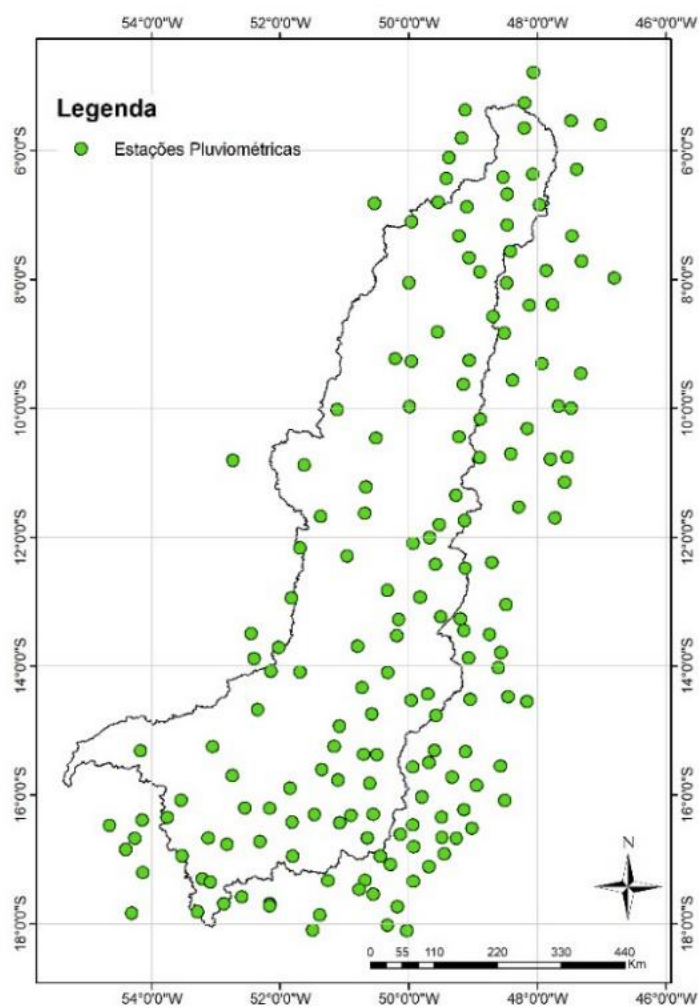
YANG, S.; SMITH, E. A. Convective–stratiform precipitation variability at seasonal scale from 8 Yr of TRMM observations: implications for multiple modes of diurnal variability. **Journal of Climate**, v. 21, n. 16, p. 4087–4114, ago. 2008.

ZANDBERGEN, P. A. The effect of cell resolution on depressions in Digital Elevation Models. **Applied GIS**, v. 2, n. 1, p. 4.1-4.1, jan. 2006.

## APÊNDICE A – INFORMAÇÕES DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM

A Tabela A.1 apresenta as informações das estações pluviométricas que foram utilizadas como dado de entrada da precipitação na modelagem. Os dados diários foram interpolados para os centroides das minibacias diretamente no MGB-IPH. E na Figura A.1 é possível observar a localização geográfica.

Figura A.1 - Localização das estações fluviométricas utilizados na modelagem.



Fonte: Produção do autor.

Tabela A.1 - Informações das estações pluviométricas utilizadas na modelagem.

| <b>Código</b> | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>                    | <b>Código</b>  | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>              |
|---------------|-----------------|------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|------------------|--------------------------|
| <b>47002</b>  | -0.62306        | -47.3536         | SALINÓPOLIS                    | <b>1048005</b> | -10.3133        | -48.1594         | TAQUARUSSU DO PORTO      |
| <b>47003</b>  | -0.7375         | -47.8536         | CURUÇA                         | <b>1049001</b> | -10.4408        | -49.2239         | PIUM                     |
| <b>47004</b>  | -0.92944        | -47.0994         | PRIMAVERA                      | <b>1050000</b> | -11.2192        | -50.6681         | LUCIARA                  |
| <b>47005</b>  | -0.63361        | -47.6583         | MARUDA                         | <b>1050002</b> | -10.4611        | -50.5136         | SANTA TEREZINHA          |
| <b>47006</b>  | -0.77472        | -47.1775         | SÃO JOÃO DE PIRABAS            | <b>1051001</b> | -10.8756        | -51.6306         | PORTO ALEGRE DO NORTE    |
| <b>48006</b>  | -0.86806        | -48.1103         | VIGIA                          | <b>1052000</b> | -10.8044        | -52.7378         | VILA SÃO JOSÉ DO XINGU   |
| <b>51002</b>  | -0.39917        | -51.4203         | NAVIO                          | <b>1054000</b> | -10.7461        | -54.5461         | AGROPECUÁRIA CAJABI      |
| <b>52000</b>  | -0.57111        | -52.575          | SÃO FRANCISCO                  | <b>1145001</b> | -11.0478        | -45.2019         | FORMOSA DO RIO PRETO     |
| <b>145006</b> | -1.45583        | -45.7281         | CÂNDIDO MENDES                 | <b>1145004</b> | -10.9925        | -45.5267         | FAZENDA BOM JARDIM       |
| <b>146005</b> | -1.73306        | -46.5989         | TARARUA - PONTE                | <b>1145013</b> | -11.8961        | -45.6119         | PONTE SERAFIM - MONTANTE |
| <b>146008</b> | -1.8175         | -46.3439         | ALTO BONITO (FAZ. BELA AURORA) | <b>1146000</b> | -11.6253        | -46.8106         | DIANÓPOLIS               |
| <b>146009</b> | -1.23139        | -46.1878         | VISEU                          | <b>1147000</b> | -11.5789        | -47.1739         | ALMAS                    |
| <b>146010</b> | -1.29167        | -46.5836         | EMBORAI                        | <b>1147001</b> | -11.6969        | -47.7283         | NATIVIDADE               |
| <b>147002</b> | -1.20361        | -47.1781         | CAPANEMA                       | <b>1147002</b> | -11.1406        | -47.5767         | PINDORAMA DO TOCANTINS   |
| <b>147007</b> | -1.2975         | -47.9394         | CASTANHAL                      | <b>1147003</b> | -11.6125        | -47.045          | PORTO ALEGRE             |
| <b>147008</b> | -1.6775         | -47.77           | SÃO DOMINGOS DO CAPIM          | <b>1148000</b> | -11.5314        | -48.2947         | FAZENDA LOBEIRA          |
| <b>147010</b> | -1.1325         | -47.6283         | IGARAPÉ-AÇU                    | <b>1149000</b> | -11.3394        | -49.2675         | DUERE                    |
| <b>147011</b> | -1.65528        | -47.4919         | COLÔNIA SANTO ANTÔNIO          | <b>1149001</b> | -11.8017        | -49.5297         | FORMOSO DO ARAGUAIA      |
| <b>147016</b> | -1.55167        | -47.1172         | OUREM                          | <b>1149002</b> | -11.7364        | -49.1364         | GURUPI                   |
| <b>147017</b> | -1.03861        | -47.9133         | TERRA ALTA                     | <b>1150001</b> | -11.6275        | -50.6897         | SÃO FÉLIX DO ARAGUAIA    |
| <b>147018</b> | -1.655          | -47.4919         | SANTA MARIA DO PARÁ            | <b>1151000</b> | -11.68          | -51.3731         | BATE PAPO                |
| <b>148002</b> | -1.435          | -48.4378         | BELÉM                          | <b>1154001</b> | -11.9292        | -54.9981         | SANTA FELICIDADE         |
| <b>148003</b> | -1.29639        | -48.1708         | SANTA ISABEL DO PARÁ           | <b>1245014</b> | -12.1256        | -45.8108         | FAZENDA JOHA             |

| <b>Código</b> | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>              | <b>Código</b> | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>                 |
|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|---------------|-----------------|------------------|-----------------------------|
| 148009        | -1.95833        | -48.2075         | ACARÁ                    | 1245015       | -12.7653        | -45.9439         | RODA VELHA                  |
| 148010        | -1.73806        | -48.8589         | ABAETETUBA               | 1246000       | -12.0908        | -46.4794         | PONTE ALTA DO BOM JESUS     |
| 148011        | -1.6325         | -48.7544         | VILA DO CONDE            | 1246001       | -12.7139        | -46.4086         | AURORA DO NORTE             |
| 148012        | -1.09417        | -48.3986         | MOSQUEIRO                | 1247000       | -12.2325        | -47.3244         | CONCEIÇÃO DO TOCANTINS      |
| 149003        | -2.00194        | -49.8636         | OEIRAS DO PARÁ           | 1247002       | -12.4156        | -47.1997         | RIO DA PALMA                |
| 150003        | -1.79167        | -50.4347         | ANTÔNIO LEMOS            | 1247005       | -12.585         | -47.4867         | FAZENDA SANTA RITA          |
| 151000        | -1.12333        | -51.9964         | JARILÂNDIA               | 1248001       | -12.3878        | -48.7114         | COLONHA                     |
| 151001        | -1.79222        | -51.4344         | ACAMPAMENTO IBDF         | 1248003       | -13.0419        | -48.4069         | PALMEIRÓPOLIS               |
| 151002        | -1.21306        | -51.2622         | AREIAS                   | 1249000       | -12.4808        | -49.1242         | ALVORADA                    |
| 151003        | -1.5825         | -51.9178         | CARRAZEDO                | 1249001       | -12.9289        | -49.8275         | ARAGUAÇU                    |
| 152001        | -1.75139        | -52.2364         | PORTO DE MOZ             | 1249002       | -11.8394        | -49.7717         | PROJETO RIO FORMOSO         |
| 152005        | -1.52639        | -52.5783         | ALMEIRIM                 | 1249003       | -12.0886        | -49.9378         | BARREIRA DO PEQUI           |
| 152006        | -1.08194        | -53.1575         | FAZENDA BELA VISTA       | 1249004       | -12.4178        | -49.5892         | PRAIA ALTA                  |
| 245001        | -2.95389        | -45.6647         | ALTO TURI                | 1250000       | -12.8206        | -50.3361         | FAZENDA PIRATININGA         |
| 245003        | -2.05222        | -45.9583         | MARACACUME               | 1250001       | -12.2919        | -50.9636         | SANTO ANTÔNIO DO LEVERGER   |
| 245007        | -2.50472        | -45.7842         | BR-316 / RIO PARUA       | 1251000       | -12.1642        | -51.6969         | ALÔ BRASIL                  |
| 245008        | -2.97083        | -45.355          | PEDRO ROSÁRIO            | 1251001       | -12.9397        | -51.8264         | DIVÍNEA                     |
| 245009        | -2.59028        | -45.3653         | PIMENTA                  | 1345000       | -13.7342        | -45.4033         | ARROJOLÂNDIA                |
| 245011        | -2.27389        | -45.2711         | SANTA HELENA             | 1346000       | -13.3975        | -46.3158         | SÃO DOMINGOS                |
| 247000        | -2.51278        | -47.7681         | BADAJÓS                  | 1346001       | -13.7422        | -46.8775         | NOVA ROMA (FAZ.SUCURI)      |
| 247003        | -2.03556        | -47.7506         | FAZENDA JAUARÁ           | 1346002       | -13.5681        | -46.3672         | FAZENDA INGAZEIRO           |
| 247004        | -2.42611        | -47.5328         | FAZENDA SÃO RAIMUNDO     | 1346004       | -13.0358        | -46.7769         | CAMPOS BELOS                |
| 247005        | -2.77167        | -46.8025         | CAFEZAL                  | 1346005       | -13.6336        | -46.4672         | SÃO VICENTE                 |
| 247006        | -2.94833        | -47.8144         | PA-256 / RIO CAPIM       | 1346006       | -13.7519        | -46.14           | FAZENDA PLANALTO            |
| 248001        | -2.41389        | -48.6883         | FAZENDA URUCURE          | 1346007       | -13.3303        | -46.0622         | FAZENDA PRAINHA (FAZ.ANTAS) |
| 248003        | -2.42139        | -48.1492         | TOMÉ-AÇU                 | 1347001       | -13.4239        | -47.1319         | PONTE PARANÁ                |
| 248006        | -2.42056        | -48.2453         | PA-256 / RIO ACARA-MIRIM | 1348000       | -13.79          | -48.5669         | CAMPINAÇU                   |

| <b>Código</b> | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>              | <b>Código</b>  | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>                  |
|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------------------|
| <b>249002</b> | -2.80444        | -49.3778         | VILA ELIM                | <b>1348003</b> | -13.5128        | -48.745          | TROMBAS                      |
| <b>249003</b> | -2.785          | -49.6694         | BAIÃO                    | <b>1349000</b> | -13.8717        | -49.0714         | ESTRELA DO NORTE             |
| <b>250000</b> | -2.785          | -50.4536         | CIPOAL                   | <b>1349001</b> | -13.3286        | -50.1994         | NOVO PLANALTO                |
| <b>250001</b> | -1.99167        | -50.3686         | VILA SÃO BENEDITO        | <b>1349002</b> | -13.4472        | -49.1453         | PORANGATU (DESCOBERTO)       |
| <b>250002</b> | -2.45333        | -50.9228         | IRAPURU                  | <b>1349003</b> | -13.1028        | -49.2014         | ENTRONCAMENTO SÃO MIGUEL     |
| <b>250003</b> | -2.245          | -50.6297         | ACANGATA                 | <b>1350000</b> | -13.6897        | -50.8            | BANDEIRANTES                 |
| <b>251000</b> | -2.245          | -51.1794         | MARACACUERA FLORESTAL    | <b>1350001</b> | -13.5289        | -50.1883         | RIO PINTADO (FAZ.PONTAL)     |
| <b>252001</b> | -2.33639        | -52.9186         | ITAPEUÁ DO PARÁ          | <b>1350002</b> | -13.2739        | -50.1606         | SÃO MIGUEL DO ARAGUAIA       |
| <b>345000</b> | -3.77083        | -45.2183         | ARATOI GRANDE            | <b>1351000</b> | -14.0867        | -51.6964         | TRECHO MÉDIO                 |
| <b>345006</b> | -3.65833        | -45.4431         | PINDARÉ-MIRIM            | <b>1352000</b> | -13.8806        | -52.4119         | FAZENDA SETE DE SETEMBRO     |
| <b>345013</b> | -3.42444        | -45.6694         | NEWTON BELO              | <b>1352001</b> | -13.4956        | -52.4544         | GARAPU                       |
| <b>346001</b> | -3.34694        | -46.8772         | FAZENDA RURAL ZEBU       | <b>1352002</b> | -13.7053        | -52.0267         | SERRA DOURADA                |
| <b>346002</b> | -4.23139        | -46.1789         | TUCUMA                   | <b>1446004</b> | -14.8039        | -46.2533         | SÍTIO D'ABADIA               |
| <b>347000</b> | -3.01           | -47.3433         | PARAGOMINAS              | <b>1447000</b> | -14.1347        | -47.5117         | ALTO PARAÍSO DE GOIÁS        |
| <b>347001</b> | -3.74222        | -47.4975         | GURUPIZINHO              | <b>1447002</b> | -14.7072        | -47.5236         | SÃO JOÃO D'ALIANÇA           |
| <b>347002</b> | -3.45194        | -47.4689         | FAZENDA PLANALTO         | <b>1448001</b> | -14.475         | -48.4583         | NIQUELÂNDIA                  |
| <b>348001</b> | -3.16056        | -48.1            | FAZENDA MARINGA          | <b>1448004</b> | -14.5478        | -48.1656         | MOQUEM - FAZENDA VAU DA ONÇA |
| <b>349001</b> | -3.51           | -49.2092         | CACHOEIRA TRACAMBEUA     | <b>1448005</b> | -14.0222        | -48.6111         | PALMEIRINHA                  |
| <b>349002</b> | -3.82861        | -49.0992         | GOIANÉSIA                | <b>1449000</b> | -14.7644        | -49.5789         | PILAR DE GOIÁS               |
| <b>350000</b> | -3.85389        | -50.4625         | FAZENDA ESTRELA DO NORTE | <b>1449001</b> | -14.5192        | -49.0489         | PORTO URUAÇU                 |
| <b>351000</b> | -3.41944        | -51.2558         | GRANJA GAZELA            | <b>1449002</b> | -14.4333        | -49.7061         | SANTA TEREZINHA DE GOIÁS     |
| <b>351002</b> | -3.72306        | -51.5681         | FAZENDA CIPAUBA          | <b>1449003</b> | -14.5325        | -49.9628         | CRIXAS                       |
| <b>352001</b> | -3.21417        | -52.2131         | ALTAMIRA                 | <b>1450000</b> | -14.3328        | -50.7303         | LAGOA DA FLECHA              |
| <b>352005</b> | -3.61667        | -52.5411         | BRASIL NOVO              | <b>1450001</b> | -14.7414        | -50.5772         | MOZARLÂNDIA (CHAC. FOGUEIRA) |
| <b>445001</b> | -4.03111        | -45.2711         | ESPERANTINA              | <b>1450002</b> | -14.0975        | -50.3331         | GOVERNADOR LEÔNINO           |
| <b>445008</b> | -4.88639        | -46.0114         | ARAME                    | <b>1451000</b> | -14.9272        | -51.0806         | ARUANÃ                       |
| <b>445010</b> | -4.24056        | -45.3581         | SÃO JOÃO DO GRAJAU       | <b>1452000</b> | -14.6722        | -52.3547         | XAVANTINA                    |

| <b>Código</b> | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>                | <b>Código</b>  | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>               |
|---------------|-----------------|------------------|----------------------------|----------------|-----------------|------------------|---------------------------|
| <b>446000</b> | -4.30417        | -46.4936         | PONTE BR-222               | <b>1452004</b> | -14.0764        | -52.1503         | ÁGUA BOA                  |
| <b>446001</b> | -4.40917        | -46.7475         | FAZENDA PEDREIRAS          | <b>1548003</b> | -15.85          | -48.95           | PIRENÓPOLIS               |
| <b>446002</b> | -4.69806        | -46.9392         | VALE DO PINDARE            | <b>1548011</b> | -15.5531        | -48.5772         | FAZENDA MARAJÁ            |
| <b>447001</b> | -4.29444        | -47.5581         | KM ZERO / PA-70            | <b>1549000</b> | -15.3111        | -49.6042         | CERES                     |
| <b>447002</b> | -4.82861        | -47.2697         | RETA KM-32                 | <b>1549001</b> | -15.3289        | -49.1206         | GOIANÉSIA                 |
| <b>447003</b> | -4.11361        | -47.5456         | LIGAÇÃO DO PARÁ            | <b>1549002</b> | -15.5642        | -49.9436         | ITAPURANGA                |
| <b>448000</b> | -4.78222        | -48.0644         | RONDON DO PARÁ             | <b>1549003</b> | -15.7197        | -49.3289         | JARAGUÁ                   |
| <b>452000</b> | -4.66556        | -52.7203         | MONTE ALEGRE DO XINGU      | <b>1549009</b> | -15.4961        | -49.6908         | URUANA                    |
| <b>545011</b> | -5.7275         | -45.3131         | RIO CORDA II               | <b>1550000</b> | -15.8158        | -50.6086         | ITAPIRAPUA                |
| <b>546006</b> | -5.60444        | -46.2386         | FORTALEZA                  | <b>1550001</b> | -15.3731        | -50.5003         | JEROAQUARA                |
| <b>546007</b> | -5.88417        | -46.7019         | SÍTIO NOVO                 | <b>1550002</b> | -15.3689        | -50.7047         | TRAVESSÃO                 |
| <b>547000</b> | -5.535          | -47.4783         | IMPERATRIZ                 | <b>1551000</b> | -15.2467        | -51.1636         | BRITÂNIA                  |
| <b>547005</b> | -5.59444        | -47.0192         | BURITIRAMA                 | <b>1551001</b> | -15.6056        | -51.3567         | MONTES CLAROS DE GOIÁS    |
| <b>548000</b> | -5.64833        | -48.2078         | ARAGUATINS                 | <b>1551002</b> | -15.8897        | -51.8528         | PERES                     |
| <b>548001</b> | -5.25833        | -48.2008         | SÃO SEBASTIÃO DO TOCANTINS | <b>1551003</b> | -15.7672        | -51.1044         | SANTA FÉ                  |
| <b>549002</b> | -5.36556        | -49.125          | MARABÁ                     | <b>1552001</b> | -15.7           | -52.75           | GENERAL CARNEIRO          |
| <b>549007</b> | -5.80306        | -49.1833         | KM 60 / PA-150             | <b>1552002</b> | -15.2503        | -53.0547         | TORIQUEJE                 |
| <b>554000</b> | -5.65028        | -54.5211         | CAJUEIRO                   | <b>1554005</b> | -15.3147        | -54.1758         | RIO DAS MORTES            |
| <b>645002</b> | -5.98556        | -45.3994         | PAPAGAIO                   | <b>1648001</b> | -16.0833        | -48.5083         | PONTE ANÁPOLIS - BRASÍLIA |
| <b>645004</b> | -6.03917        | -45.9206         | FAZENDA PIRANHAS           | <b>1649000</b> | -16.4653        | -49.9428         | ANICUNS                   |
| <b>646005</b> | -6.81833        | -46.3336         | FAZENDA SÃO VICENTE        | <b>1649001</b> | -16.9119        | -49.4522         | ARAGOIÂNIA                |
| <b>646006</b> | -6.19278        | -46.2689         | FAZENDA SEMPRE VIVA        | <b>1649004</b> | -16.5164        | -49.0203         | GOIANÁPOLIS               |
| <b>647000</b> | -6.28722        | -47.3919         | TOCANTINÓPOLIS             | <b>1649006</b> | -16.3464        | -49.4942         | INHUMAS                   |
| <b>647001</b> | -6.83889        | -47.97           | WANDERLÂNDIA               | <b>1649007</b> | -16.0303        | -49.8003         | ITABERAÍ                  |
| <b>648000</b> | -6.41306        | -48.5356         | XAMBIOÁ                    | <b>1649009</b> | -16.2281        | -49.1436         | OURO VERDE DE GOIÁS       |
| <b>648001</b> | -6.36389        | -48.0714         | ANANAS                     | <b>1649010</b> | -16.8031        | -49.9286         | PALMEIRAS DE GOIÁS        |
| <b>648002</b> | -6.67167        | -48.4697         | PIRAQUE                    | <b>1649012</b> | -16.6594        | -49.4864         | TRINDADE                  |



| <b>Código</b> | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>           | <b>Código</b>  | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>         |
|---------------|-----------------|------------------|-----------------------|----------------|-----------------|------------------|---------------------|
| <b>649000</b> | -6.42778        | -49.4197         | FAZENDA SURUBIM       | <b>1649013</b> | -16.6736        | -49.2639         | GOIÂNIA             |
| <b>649001</b> | -6.79472        | -49.5486         | FAZENDA SANTA ELISA   | <b>1650000</b> | -16.6681        | -50.6489         | CACHOEIRA DE GOIÁS  |
| <b>649002</b> | -6.10528        | -49.3775         | ELDORADO              | <b>1650001</b> | -16.2986        | -50.5567         | CÓRREGO DO OURO     |
| <b>649003</b> | -6.8675         | -49.0975         | PORTO LEMOS           | <b>1650002</b> | -16.3164        | -50.9053         | ISRAELÂNDIA         |
| <b>650001</b> | -6.81528        | -50.5389         | FAZENDA CAIÇARA       | <b>1650003</b> | -16.6094        | -50.1328         | TURVÂNIA            |
| <b>745003</b> | -7.55806        | -45.2433         | RIBEIRO GONÇALVES     | <b>1651000</b> | -16.9489        | -51.8103         | CAIAPONIA           |
| <b>745004</b> | -7.13861        | -45.3478         | SAMBAIBA              | <b>1651001</b> | -16.4322        | -51.0792         | IPORÁ               |
| <b>745005</b> | -7.37472        | -45.6078         | FAZENDA TIGRE         | <b>1651002</b> | -16.4233        | -51.8214         | PIRANHAS            |
| <b>746006</b> | -7.5225         | -46.0342         | BALSAS                | <b>1651003</b> | -16.3025        | -51.4694         | SÃO FERREIRA        |
| <b>746007</b> | -7.92861        | -45.9886         | BREJO COMPRIDO        | <b>1652000</b> | -16.2086        | -52.1683         | BOM JARDIM DE GOIÁS |
| <b>746008</b> | -7.15778        | -46.5544         | MORRO VERMELHO        | <b>1652001</b> | -16.7664        | -52.8372         | PONTE BRANCA        |
| <b>746009</b> | -7.33139        | -46.3075         | RECURSOS              | <b>1652002</b> | -16.2006        | -52.5497         | TORIXOREU           |
| <b>747000</b> | -7.32306        | -47.4644         | CAROLINA              | <b>1652003</b> | -16.7217        | -52.3197         | DOVERLÂNDIA         |
| <b>747001</b> | -7.71139        | -47.315          | GOIATINS              | <b>1653000</b> | -16.0778        | -53.5475         | TESOURO             |
| <b>747009</b> | -7.85972        | -47.8619         | PALMEIRANTE           | <b>1653002</b> | -16.3508        | -53.7592         | GUIRATINGA          |
| <b>748001</b> | -7.87778        | -48.8953         | COLÔNIA               | <b>1653004</b> | -16.9439        | -53.5331         | ALTO GARÇAS         |
| <b>748002</b> | -7.55944        | -48.4208         | FAZ. PRIMAVERA        | <b>1653005</b> | -16.6689        | -53.1242         | CAFELÂNDIA DO LESTE |
| <b>748003</b> | -7.15444        | -48.4697         | MURICILÂNDIA          | <b>1654000</b> | -16.4706        | -54.6564         | RONDONÓPOLIS        |
| <b>749000</b> | -7.655          | -49.0647         | ARAPOEMA              | <b>1654001</b> | -16.6733        | -54.2639         | SANTA TEREZINHA     |
| <b>749001</b> | -7.32306        | -49.2242         | BOA VISTA DO ARAGUAIA | <b>1654004</b> | -16.8422        | -54.4072         | SANTA ESCOLÁSTICA   |
| <b>749002</b> | -7.09861        | -49.9597         | XINGUARA              | <b>1654005</b> | -16.3911        | -54.1522         | VALE RICO           |
| <b>845003</b> | -8.3175         | -45.9678         | BABILÔNIA             | <b>1748000</b> | -17.1919        | -48.7144         | CRISTIANÓPOLIS      |
| <b>845004</b> | -8.10139        | -45.5875         | BARRA DO FOSDÃO       | <b>1748004</b> | -17.9828        | -48.6414         | MARZAGÃO            |
| <b>845005</b> | -8.82111        | -45.9681         | INHUMAS               | <b>1749000</b> | -17.3414        | -49.9303         | EDÉIA (ALEGRETE)    |
| <b>846005</b> | -8.79028        | -46.1181         | BOA VISTA             | <b>1749001</b> | -17.1069        | -49.6883         | FAZENDA BOA VISTA   |
| <b>847001</b> | -8.39167        | -47.7653         | ITACAJA               | <b>1749002</b> | -17.81          | -49.6169         | JOVIÂNIA            |
| <b>847002</b> | -7.97111        | -46.8064         | CAMPOS LINDOS         | <b>1749003</b> | -17.7325        | -49.1153         | MORRINHOS           |

| <b>Código</b>  | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>               | <b>Código</b>  | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Nome</b>           |
|----------------|-----------------|------------------|---------------------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| <b>848000</b>  | -8.05278        | -48.4817         | COLINAS DO TOCANTINS      | <b>1749004</b> | -17.5167        | -49.4411         | PONTALINA             |
| <b>848001</b>  | -8.83083        | -48.5169         | GUARAI                    | <b>1749005</b> | -17.3072        | -49.0256         | PIRACANJUBA           |
| <b>848002</b>  | -8.57306        | -48.6908         | ITAPORÃ DO TOCANTINS      | <b>1749009</b> | -17.2911        | -49.3789         | CROMÍNIA              |
| <b>848003</b>  | -8.39806        | -48.1303         | TUPIRATINS                | <b>1750000</b> | -17.7322        | -50.1808         | BARRA DO MONJOLO      |
| <b>849002</b>  | -8.81028        | -49.5561         | ARAGUACEMA                | <b>1750001</b> | -17.0792        | -50.2894         | FAZENDA NOVA DO TURVO |
| <b>850000</b>  | -8.04389        | -50.0031         | REDENÇÃO                  | <b>1750003</b> | -17.5414        | -50.5561         | PONTE RIO VERDÃO      |
| <b>945011</b>  | -9.11306        | -45.9261         | ALTO PARNAÍBA             | <b>1750004</b> | -17.3258        | -50.6819         | PONTE RODAGEM         |
| <b>946003</b>  | -9.59194        | -46.6806         | LIZARDA                   | <b>1750008</b> | -17.4658        | -50.7742         | FAZENDA PARAÍSO       |
| <b>947001</b>  | -9.4575         | -47.3269         | MANSINHA                  | <b>1750013</b> | -16.9489        | -50.4469         | PARAUNA               |
| <b>948000</b>  | -9.56417        | -48.3875         | MIRACEMA DO TOCANTINS     | <b>1751001</b> | -17.8608        | -51.39           | PONTE RIO DOCE        |
| <b>948001</b>  | -9.30694        | -47.9292         | PORTO REAL                | <b>1751002</b> | -17.6858        | -52.1692         | BENJAMIN BARROS       |
| <b>949000</b>  | -9.625          | -49.155          | ABREULÂNDIA               | <b>1751004</b> | -17.3283        | -51.2608         | MONTIVIDIU            |
| <b>949001</b>  | -9.2575         | -49.065          | DOIS IRMÃOS DO TOCANTINS  | <b>1752002</b> | -17.6881        | -52.8828         | FAZENDA SÃO BERNARDO  |
| <b>950000</b>  | -9.27           | -49.9589         | CASEARA                   | <b>1752003</b> | -17.5794        | -52.6014         | PONTE DO CEDRO        |
| <b>950001</b>  | -9.2275         | -50.2108         | BARREIRA DO CAMPO         | <b>1752006</b> | -17.7178        | -52.1692         | BOM JARDIM            |
| <b>950002</b>  | -9.97028        | -49.9936         | CANGUSSU                  | <b>1753000</b> | -17.3019        | -53.2167         | ALTO ARAGUAIA         |
| <b>951000</b>  | -10.0306        | -51.1219         | VILA RICA                 | <b>1753002</b> | -17.3519        | -53.0914         | FAZENDA BABILÔNIA     |
| <b>954001</b>  | -9.81722        | -54.8858         | CACHIMBO                  | <b>1754000</b> | -17.2072        | -54.1389         | ITIQUEIRA             |
| <b>1047000</b> | -9.99056        | -47.4786         | JATOBÁ (FAZENDA BOA NOVA) | <b>1754004</b> | -17.8308        | -54.3131         | PEDRO SEVERO          |
| <b>1047001</b> | -9.96056        | -47.6747         | NOVO ACORDO               | <b>1850001</b> | -18.1047        | -50.0314         | FAZENDA ALIANÇA       |
| <b>1047002</b> | -10.7856        | -47.8            | PORTO GILÂNDIA            | <b>1850003</b> | -18.0186        | -50.3372         | MAURILÂNDIA           |
| <b>1047004</b> | -10.7508        | -47.5361         | PONTE ALTA DO TOCANTINS   | <b>1851004</b> | -18.095         | -51.4969         | POMBAL                |
| <b>1048000</b> | -10.7636        | -48.9022         | FÁTIMA                    | <b>1853000</b> | -17.8114        | -53.2889         | FAZENDA TAQUARI       |
| <b>1048001</b> | -10.1653        | -48.8906         | PARAÍSO DO TOCANTINS      | <b>8051002</b> | 0.045           | -51.1097         | MACAPÁ                |
| <b>1048003</b> | -10.7044        | -48.4183         | PALMAS                    |                |                 |                  |                       |

Fonte: Produção do autor.

## APÊNDICE B – INFORMAÇÕES DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM

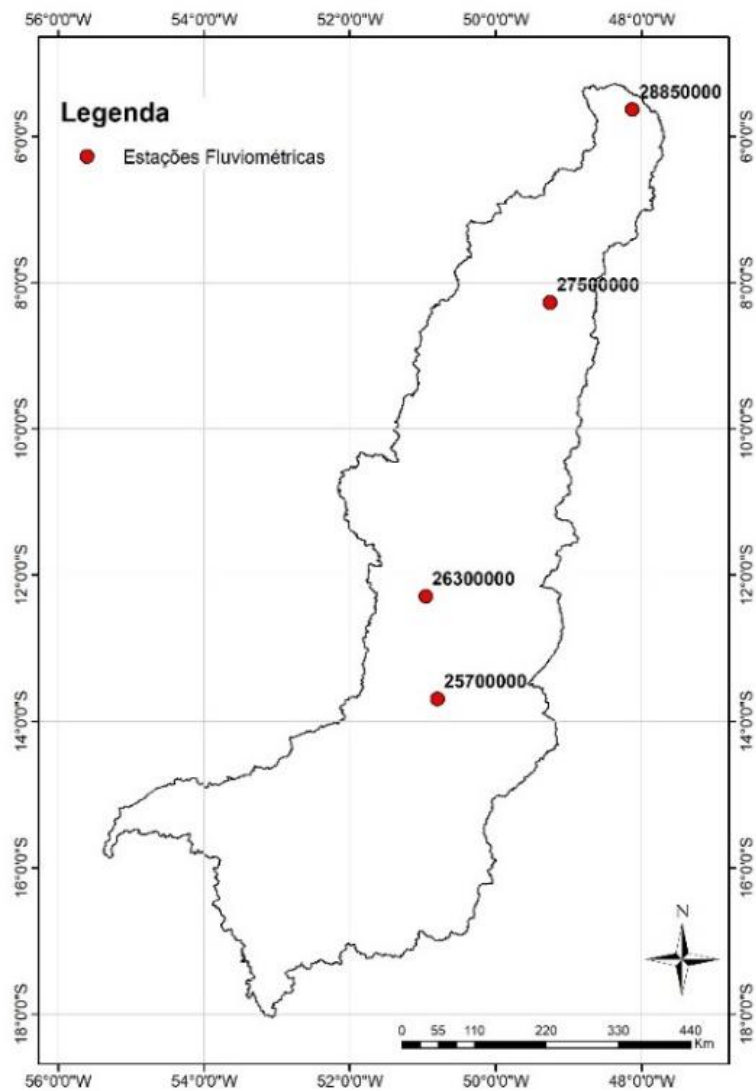
A Tabela B.1 apresenta as informações das estações fluviométricas que foram utilizadas como dado de entrada e na calibração da modelagem. E na Figura B.1 é possível observar a localização geográfica.

Tabela B.1 - Informações das estações fluviométricas utilizadas na calibração do MGB-IPH.

| <b>Código</b>   | <b>Nome</b>               | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Área de drenagem<br/>(km<sup>2</sup>)</b> |
|-----------------|---------------------------|-----------------|------------------|--|
| <b>25700000</b> | Bandeirantes              | -13.68972       | -50.80000        | 91.550                                       |
| <b>26300000</b> | Santo Antônio do Leverger | -12.29167       | -50.96305        | 59.257                                       |
| <b>27500000</b> | Conceição do Araguaia     | -8.269444       | -49.25945        | 329.153                                      |
| <b>28850000</b> | Araguatins                | -48.12972       | -5.634444        | 384.088                                      |

Fonte: Produção do autor.

Figura B.1 - Localização das estações fluviométricas utilizados na modelagem.



Fonte: Produção do autor.

## APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DAS ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM

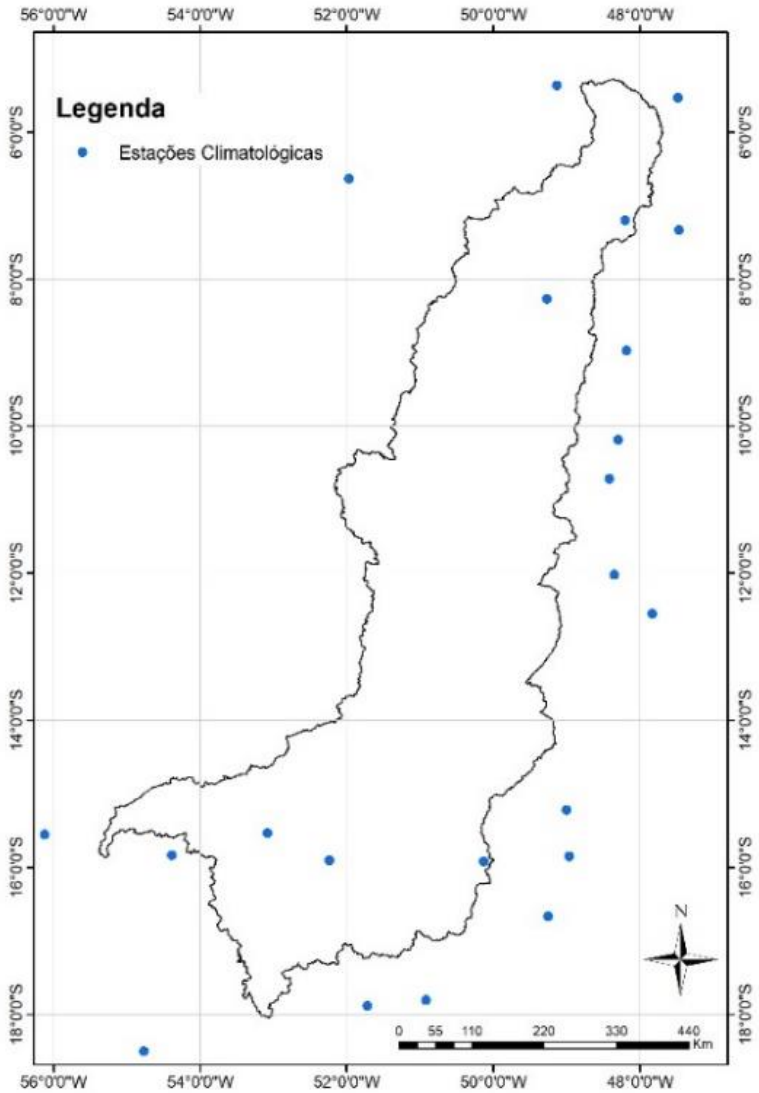
A Tabela C.1 apresenta as informações das estações climatológicas que foram utilizadas como dado de entrada da modelagem. E na Figura C.1 é possível observar a localização geográfica.

Tabela C.1 - Informações das estações pluviométricas utilizadas na modelagem.

| <b>Código</b> | <b>Nome da Estação</b> | <b>Latitude</b> | <b>Longitude</b> | <b>Atitude (m)</b> |
|---------------|------------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| 83368         | ARAGARCAS              | -15.90          | -52.23           | 345.00             |
| 83350         | GOIANESIA              | -15.22          | -49.00           | 650.91             |
| 83423         | GOIANIA                | -16.67          | -49.25           | 741.48             |
| 83374         | GOIAS                  | -15.92          | -50.13           | 512.22             |
| 83464         | JATAI                  | -17.92          | -51.72           | 662.86             |
| 83376         | PIRENOPOLIS            | -15.85          | -48.97           | 740.00             |
| 83470         | RIO VERDE              | -17.80          | -50.92           | 774.62             |
| 82765         | CAROLINA               | -7.34           | -47.46           | 192.83             |
| 82568         | GRAJAU                 | -5.82           | -46.47           | 163.07             |
| 82564         | IMPERATRIZ             | -5.53           | -47.48           | 123.30             |
| 83512         | COXIM                  | -18.50          | -54.77           | 287.00             |
| 83405         | CACERES                | -16.05          | -57.68           | 118.00             |
| 83361         | CUIABA                 | -15.62          | -56.11           | 145.00             |
| 83309         | DIAMANTINO             | -14.40          | -56.45           | 286.30             |
| 83264         | GLEBA CELESTE          | -12.29          | -55.29           | 415.00             |
| 83367         | MERURI                 | -15.53          | -53.08           | 418.00             |
| 83358         | POXOREO                | -15.83          | -54.38           | 450.00             |
| 82861         | CONCEICAO DO ARAGUAIA  | -8.27           | -49.27           | 156.85             |
| 82562         | MARABA                 | -5.37           | -49.13           | 95.00              |
| 82668         | SAO FELIX DO XINGU     | -6.63           | -51.97           | 206.00             |
| 82659         | ARAGUAINA              | -7.20           | -48.20           | 228.52             |
| 83033         | PALMAS                 | -10.19          | -48.30           | 280.00             |
| 83231         | PARANA                 | -12.55          | -47.83           | 275.00             |
| 82863         | PEDRO AFONSO           | -8.97           | -48.18           | 187.00             |
| 83228         | PEIXE                  | -12.02          | -48.35           | 242.49             |
| 83064         | PORTO NACIONAL         | -10.72          | -48.42           | 239.20             |

Fonte: Produção do autor.

Figura C.1 - Localização das estações climatológicas utilizados na modelagem.



Fonte: Produção do autor.

## APÊNDICE D – PARÂMETROS FIXOS DE ENTRADA UTILIZADOS NO MGB-IPH

A Tabela D.1 apresenta os valores estimados dos parâmetros fixos do modelo por meio de produtos de sensoriamento remoto e da literatura, conforme mencionado na seção 6.2. E a Tabela D.2 apresentam os valores encontrados na literatura destes parâmetros e que foram utilizados para nortear a validação das estimativas realizadas.

Tabela D.1 - Valores adotados dos parâmetros fixos do modelo.

| URH      | $\alpha$ | IAF | $r_s$ | h   |
|----------|----------|-----|-------|-----|
| FlorProf | 0,12     | 5,8 | 150   | 24  |
| FlorRaso | 0,12     | 5,6 | 100   | 24  |
| SavProf  | 0,11     | 1,5 | 200   | 11  |
| SavRaso  | 0,11     | 1,5 | 100   | 12  |
| AgrProf  | 0,16     | 1,1 | 150   | 2   |
| AgrRaso  | 0,16     | 0,7 | 40    | 0,5 |
| Várzea   | 0,12     | 2,5 | 70    | 14  |
| ASI      | 0,16     | 0,5 | 10    | 0,5 |
| Água     | 0,08     | 0   | 0     | 0   |

$\alpha$  – albedo (-); IAF – Índice de área foliar (-);  $r_s$  – resistência superficial ( $s.m^{-1}$ ); h – altura da vegetação (m); FlorProf – Floresta em solo profundo; FlorRaso – Floresta em solo raso; SavProf – Savânica em solo profundo; SavRaso – Savânica em solo raso; AgrProf – Agrossilvipastoril em solo profundo; AgrRaso – Agrossilvipastoril em solo raso; ASI – Áreas Semipermeáveis.

Fonte: Produção do autor.

Tabela D.2 - Valores encontrados na literatura dos parâmetros de albedo, índice de área foliar, resistência superficial e altura para diferentes coberturas do solo.

|        | Albedo                    |  |  | Resistência Superficial |                       |  |
|--------|---------------------------|--|--|-------------------------|-----------------------|--|
|        | Cobertura                 | Valores de referência  | Fonte  | Cobertura               | Valores de referência | Fonte  |
| Albedo | Água                      | 0,08   | (SHUTTLEWORTH, 1993)                                 | Floresta                | 100 – 250<br>50 – 100 | (BATHURST et al., 2004)<br>(BATHURST et al., 2011) |
|        | Florestas altas           | 0,11 – 0,16  | SHUTTLEWORTH, 1993)                                  | Floresta conífera       | 70                    | (HOUGH; JONES, 1997)                               |
|        | Floresta amazônica        | 0,134  | (CULF; FISCH; HODNETT, 1995)                         | Floresta decídua        | 80 – 180              | (HOUGH; JONES, 1997)                               |
|        | Floresta conífera         | 0,05 – 0,10  | (CHANG, 2006)  | Floresta de terra firme | 70 – 160              | (HOUGH; JONES, 1997)                               |
|        | Florestas mistas          | 0,10 – 0,15  | (CHANG, 2006)  | Floresta tropical       | 125                   | (GRANIER; HUC; BARIGAH, 1996)                      |
|        | Florestas temperadas      | 0,15 – 0,20  | (CHANG, 2006)  | Floresta de eucalipto   | 111                   | (SOARES; ALMEIDA, 2001)                            |
|        | Cultivos agrícolas        | 0,15 – 0,20 (altos)<br>0,20 – 0,26 (baixos)  | (SHUTTLEWORTH, 1993)                                 | Cerrado                 | 100 – 200             | (CONDÉ, 1995)                                      |
|        | Pastagens/gramíneas/campo | 0,20 – 0,26  | (SHUTTLEWORTH, 1993)                                 | Gramíneas               | 69<br>71<br>40 – 80   | (SHUTTLEWORTH, 1993)                               |
|        | Cerrado brasileiro        | 0,13 (época úmida)<br>0,18 (época seca)  | (MIRANDA et al., 1996)                               | Cultivo agrícola        | 70 - 700              | (BATHURST et al., 2004)                            |
|        | Solo exposto              | 0,10 (úmido)<br>0,35 (seco)  | (SHUTTLEWORTH, 1993)                                 | Solo exposto            | 100                   | (HOUGH; JONES, 1997)                               |
| IAF    | Floresta decídua          | 4,97 ±1,27   | (CARUZZO; ROCHA, 2000)                               | Floresta                | 10,00                 | (COLLISCHONN, 2001)                                |
|        | Floresta conífera         | 1,7 – 5,3  | (PIERCE; RUNNING, 1988)                              | Cerrado                 | 5,00                  |  |
|        | Floresta amazônica        | 4,63 – 6,10<br>2,97 – 9,60   | (ROBERTS et al., 1996)<br>(HONZÁK et al., 1996)      | Pastagem amazônica      | 0,53                  |  |
|        | Cerrado brasileiro        | 1,0 (época úmida)<br>0,4 (época seca)  | (MIRANDA et al., 1996)                               | Campo/pastagem          | 0,50                  |  |
|        | Culturas anuais           | 4,7 – 7,6 <sup>1</sup><br>2,8 – 6,2 <sup>2</sup><br>1,26 – 3,07 <sup>3</sup><br>0,12 – 3,34 <sup>4</sup> | (XAVIER; VETTORAZZI, 2003)                           | Agricultura             | 0,50                  |  |
|        | Pastagem                  | 0,66 – 2,45<br>0,49 – 3,90   | (XAVIER; VETTORAZZI, 2003)<br>(ROBERTS et al., 1996) |                         |                       |  |

<sup>1</sup>Soja irrigada no auge do ciclo; <sup>2</sup>Soja não irrigada no auge do ciclo; <sup>3</sup>Milho; <sup>4</sup>Cana-de-açúcar

Fonte: Adaptado de Bayer e Collischonn (2013).



## APÊNDICE E – PARÂMETROS CALIBRÁVEIS UTILIZADOS NO MGB-IPH ANTES DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO

A Tabela E.1 apresenta os valores inicialmente adotados dos parâmetros calibráveis utilizado na modelagem. Esses valores foram mantidos iguais para todas as sub-bacias, e a partir destes que foram realizados o processo de calibração.

Tabela E.1 - Parâmetros calibráveis estimados inicialmente para as simulações no MGB-IPH antes do processo de calibração.

|  | <b>Wm<br/>(mm)</b> | <b>b<br/>(-)</b> | <b>Kbas<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>Kint<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>XL<br/>(-)</b> | <b>CAP<br/>(mm)</b> | <b>Wc<br/>(mm)</b> |
|--|--------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| <i>FlorProf</i>  | 1000               | 1                | 2                                     | 20                                    | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>FlorRaso</i>  | 500                | 1                | 2                                     | 20                                    | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavPro</i>  | 1000               | 1                | 2                                     | 20                                    | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavRaso</i>   | 500                | 1                | 2                                     | 20                                    | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrProf</i>   | 500                | 0,5              | 1                                     | 15                                    | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrRaso</i>   | 250                | 0,5              | 1                                     | 15                                    | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Várzea</i>  | 1000               | 1                | 2                                     | 20                                    | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>ASI</i>   | 500                | 0,5              | 1                                     | 15                                    | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Água</i>  | 0                  | 0                | 0                                     | 0                                     | 0                 | 0                   | 0                  |
| <b>CS (-)</b>  | 50                 |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CI (-)</b>  | 180                |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CB (horas)</b>  | 5000               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>QB<br/>(m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>)</b> | 0,01               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |

Wm – capacidade de armazenamento do solo; b - Forma da relação entre armazenamento e saturação; Kbas - Drenagem subterrânea; Kint - Drenagem subsuperficial; XL - Forma da curva de redução; CAP - Fluxo ascendente; Wc - Armazenamento Residual; CS - Retardo do reservatório superficial; CI - Retardo do reservatório subsuperficial; CB - Retardo do reservatório subterrâneo; QB - Vazão de Base; FlorProf – Floresta em solo profundo; FlorRaso – Floresta em solo raso; SavProf – Savânica em solo profundo; SavRaso – Savânica em solo raso; AgrProf – Agrossilvipastoril em solo profundo; AgrRaso – Agrossilvipastoril em solo raso; ASI – Áreas Semipermeáveis.

Fonte: Produção do autor.

## APÊNDICE F – PARÂMETROS CALIBRÁVEIS UTILIZADOS NO MGB-IPH APÓS O PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO

As Tabelas F.1, F.2, F.3 e F.4 apresentam os valores dos parâmetros calibráveis ao final do processo de calibração por sub-bacia.

Tabela F.1 - Parâmetros calibráveis estimados para as simulações no MGB-IPH após o processo de calibração da Sub-bacia 1.

|  | <b>Wm<br/>(mm)</b> | <b>b<br/>(-)</b> | <b>Kbas<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>Kint<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>XL<br/>(-)</b> | <b>CAP<br/>(mm)</b> | <b>Wc<br/>(mm)</b> |
|--|--------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| <i>FlorProf</i>  | 2200               | 0,15             | 0,05                                  | 8,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>FlorRaso</i>  | 2000               | 0,20             | 0,05                                  | 8,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavProf</i>   | 2200               | 0,15             | 0,05                                  | 8,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavRaso</i>   | 2000               | 0,20             | 0,05                                  | 8,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrProf</i>   | 1600               | 0,25             | 0,01                                  | 4,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrRaso</i>   | 1400               | 0,30             | 0,01                                  | 4,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Várzea</i>  | 1600               | 0,20             | 0,05                                  | 8,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>ASI</i>   | 800                | 0,30             | 0,01                                  | 4,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Água</i>  | 0                  | 0                | 0                                     | 0                                     | 0                 | 0                   | 0                  |
| <b>CS (-)</b>  | 30                 |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CI (-)</b>  | 190                |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CB (horas)</b>  | 9000               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>QB<br/>(m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>)</b> | 0,01               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |

Wm – capacidade de armazenamento do solo; b - Forma da relação entre armazenamento e saturação; Kbas - Drenagem subterrânea; Kint - Drenagem subsuperficial; XL - Forma da curva de redução; CAP - Fluxo ascendente; Wc - Armazenamento Residual; CS - Retardo do reservatório superficial; CI - Retardo do reservatório subsuperficial; CB - Retardo do reservatório subterrâneo; QB - Vazão de Base; FlorProf – Floresta em solo profundo; FlorRaso – Floresta em solo raso; SavProf – Savânica em solo profundo; SavRaso – Savânica em solo raso; AgrProf – Agrossilvipastoril em solo profundo; AgrRaso – Agrossilvipastoril em solo raso; ASI – Áreas Semipermeáveis.

Fonte: Produção do autor.

Tabela F.2 - Parâmetros calibráveis estimados para as simulações no MGB-IPH após o processo de calibração da Sub-bacia 2.

|  | <b>Wm<br/>(mm)</b> | <b>b<br/>(-)</b> | <b>Kbas<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>Kint<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>XL<br/>(-)</b> | <b>CAP<br/>(mm)</b> | <b>Wc<br/>(mm)</b> |
|--|--------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| <i>FlorProf</i>  | 1800               | 0,15             | 0,05                                  | 1,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>FlorRaso</i>  | 1600               | 0,20             | 0,05                                  | 1,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavProf</i>   | 1800               | 0,15             | 0,05                                  | 1,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavRaso</i>   | 1600               | 0,20             | 0,05                                  | 1,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrProf</i>   | 1200               | 0,25             | 0,01                                  | 0,50                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrRaso</i>   | 1000               | 0,30             | 0,01                                  | 0,50                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Várzea</i>  | 1400               | 0,20             | 0,05                                  | 1,00                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>ASI</i>   | 400                | 0,30             | 0,01                                  | 0,50                                  | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Água</i>  | 0                  | 0                | 0                                     | 0                                     | 0                 | 0                   | 0                  |
| <b>CS (-)</b>  | 30                 |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CI (-)</b>  | 190                |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CB (horas)</b>  | 9000               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>QB<br/>(m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>)</b> | 0,01               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |

Wm – capacidade de armazenamento do solo; b - Forma da relação entre armazenamento e saturação; Kbas - Drenagem subterrânea; Kint - Drenagem subsuperficial; XL - Forma da curva de redução; CAP - Fluxo ascendente; Wc - Armazenamento Residual; CS - Retardo do reservatório superficial; CI - Retardo do reservatório subsuperficial; CB - Retardo do reservatório subterrâneo; QB - Vazão de Base; FlorProf – Floresta em solo profundo; FlorRaso – Floresta em solo raso; SavProf – Savânica em solo profundo; SavRaso – Savânica em solo raso; AgrProf – Agrossilvipastoril em solo profundo; AgrRaso – Agrossilvipastoril em solo raso; ASI – Áreas Semipermeáveis.

Fonte: Produção do autor.

Tabela F.3 - Parâmetros calibráveis estimados para as simulações no MGB-IPH após o processo de calibração da Sub-bacia 3.

|  | <b>Wm<br/>(mm)</b> | <b>b<br/>(-)</b> | <b>Kbas<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>Kint<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>XL<br/>(-)</b> | <b>CAP<br/>(mm)</b> | <b>Wc<br/>(mm)</b> |
|--|--------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| <i>FlorProf</i>  | 1700               | 0,20             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>FlorRaso</i>  | 1500               | 0,25             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavProf</i>   | 1700               | 0,20             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavRaso</i>   | 1500               | 0,25             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrProf</i>   | 800                | 0,30             | 0,50                                  | 18,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrRaso</i>   | 700                | 0,35             | 0,50                                  | 18,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Várzea</i>  | 1000               | 0,25             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>ASI</i>   | 300                | 0,35             | 0,50                                  | 10,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Água</i>  | 0                  | 0                | 0                                     | 0                                     | 0                 | 0                   | 0                  |
| <b>CS (-)</b>  | 30                 |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CI (-)</b>  | 170                |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CB (horas)</b>  | 8000               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>QB<br/>(m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>)</b> | 0,01               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |

Wm – capacidade de armazenamento do solo; b - Forma da relação entre armazenamento e saturação; Kbas - Drenagem subterrânea; Kint - Drenagem subsuperficial; XL - Forma da curva de redução; CAP - Fluxo ascendente; Wc - Armazenamento Residual; CS - Retardo do reservatório superficial; CI - Retardo do reservatório subsuperficial; CB - Retardo do reservatório subterrâneo; QB - Vazão de Base; FlorProf – Floresta em solo profundo; FlorRaso – Floresta em solo raso; SavProf – Savânica em solo profundo; SavRaso – Savânica em solo raso; AgrProf – Agrossilvipastoril em solo profundo; AgrRaso – Agrossilvipastoril em solo raso; ASI – Áreas Semipermeáveis.

Fonte: Produção do autor.

Tabela F.4 - Parâmetros calibráveis estimados para as simulações no MGB-IPH após o processo de calibração da Sub-bacia 4.

|  | <b>Wm<br/>(mm)</b> | <b>b<br/>(-)</b> | <b>Kbas<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>Kint<br/>(mm.dia<sup>-1</sup>)</b> | <b>XL<br/>(-)</b> | <b>CAP<br/>(mm)</b> | <b>Wc<br/>(mm)</b> |
|--|--------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| <i>FlorProf</i>  | 1100               | 0,20             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>FlorRaso</i>  | 900                | 0,25             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavProf</i>   | 1100               | 0,20             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>SavRaso</i>   | 900                | 0,25             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrProf</i>   | 600                | 0,30             | 0,50                                  | 18,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>AgrRaso</i>   | 500                | 0,35             | 0,50                                  | 18,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Várzea</i>  | 1000               | 0,25             | 0,90                                  | 25,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>ASI</i>   | 400                | 0,35             | 0,50                                  | 10,00                                 | 0,67              | 0                   | 0,1                |
| <i>Água</i>  | 0                  | 0                | 0                                     | 0                                     | 0                 | 0                   | 0                  |
| <b>CS (-)</b>  | 20                 |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CI (-)</b>  | 130                |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>CB (horas)</b>  | 7000               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |
| <b>QB<br/>(m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>)</b> | 0,01               |                  |                                       |                                       |                   |                     |                    |

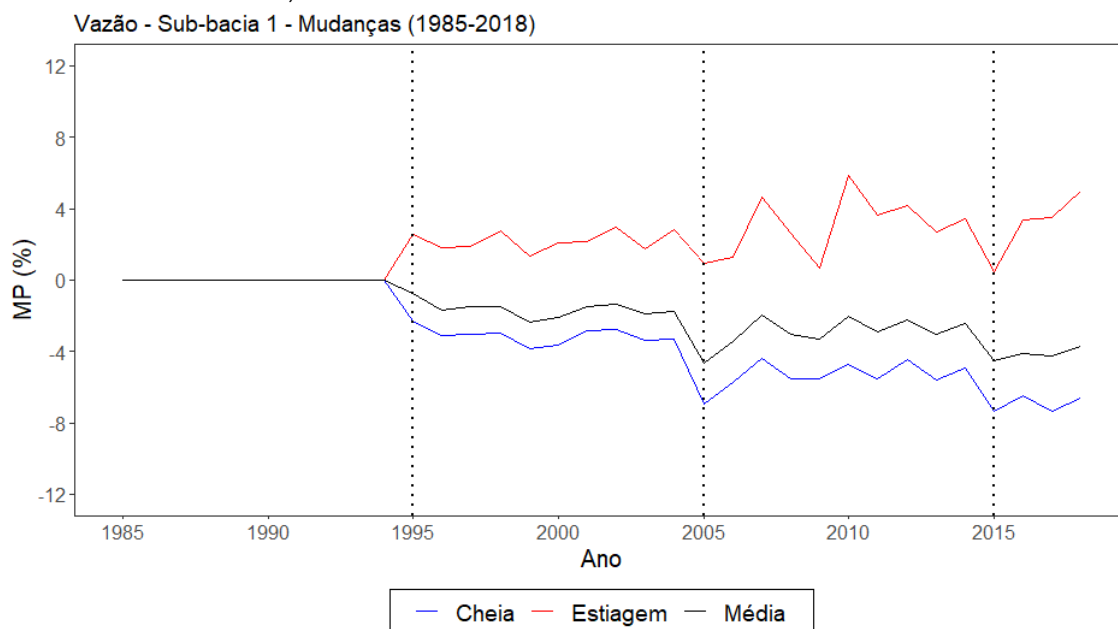
Wm – capacidade de armazenamento do solo; b - Forma da relação entre armazenamento e saturação; Kbas - Drenagem subterrânea; Kint - Drenagem subsuperficial; XL - Forma da curva de redução; CAP - Fluxo ascendente; Wc - Armazenamento Residual; CS - Retardo do reservatório superficial; CI - Retardo do reservatório subsuperficial; CB - Retardo do reservatório subterrâneo; QB - Vazão de Base; FlorProf – Floresta em solo profundo; FlorRaso – Floresta em solo raso; SavProf – Savânica em solo profundo; SavRaso – Savânica em solo raso; AgrProf – Agrossilvipastoril em solo profundo; AgrRaso – Agrossilvipastoril em solo raso; ASI – Áreas Semipermeáveis.

Fonte: Produção do autor.

## APÊNDICE G – GRÁFICOS DE MUDANÇAS PERCENTUAIS DAS VAZÕES SIMULADAS PELO MGB-IPH

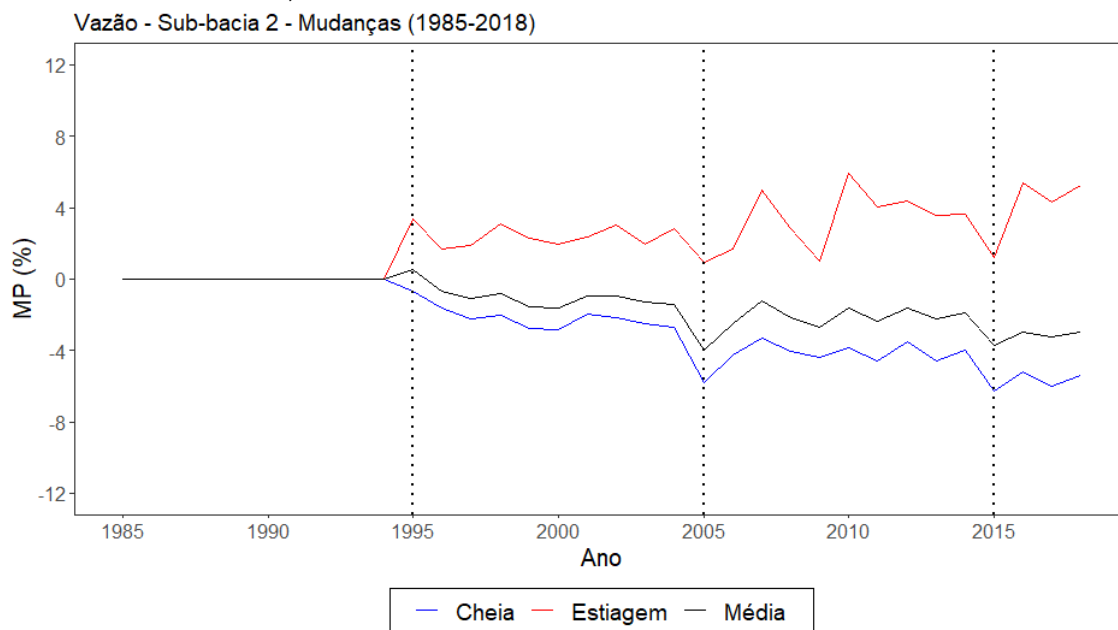
Os resultados do erro padrão ao longo da série histórica para as vazões considerando os períodos de mudanças e os cenários propostos estão apresentados nas figuras seguintes. É apresentado também os valores também considerando os períodos de estiagem e seca analisados neste estudo por sub-bacia.

Figura G.1 – Mudança percentual para os períodos de mudança para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 1.



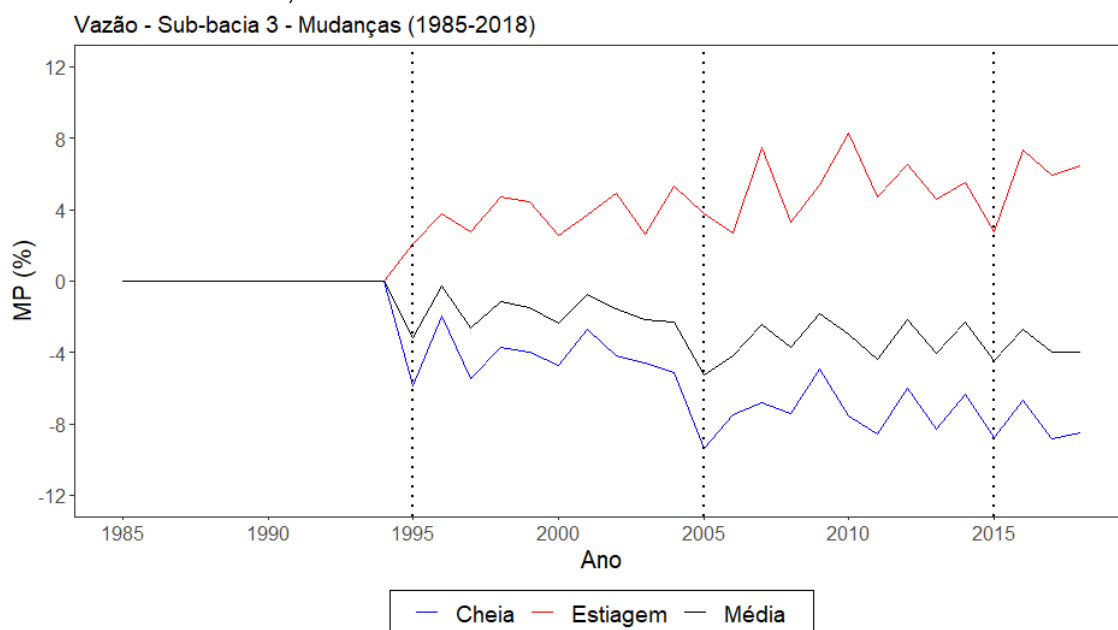
Fonte: Produção do autor.

Figura G.2 – Mudança percentual para os períodos de mudança para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 2.



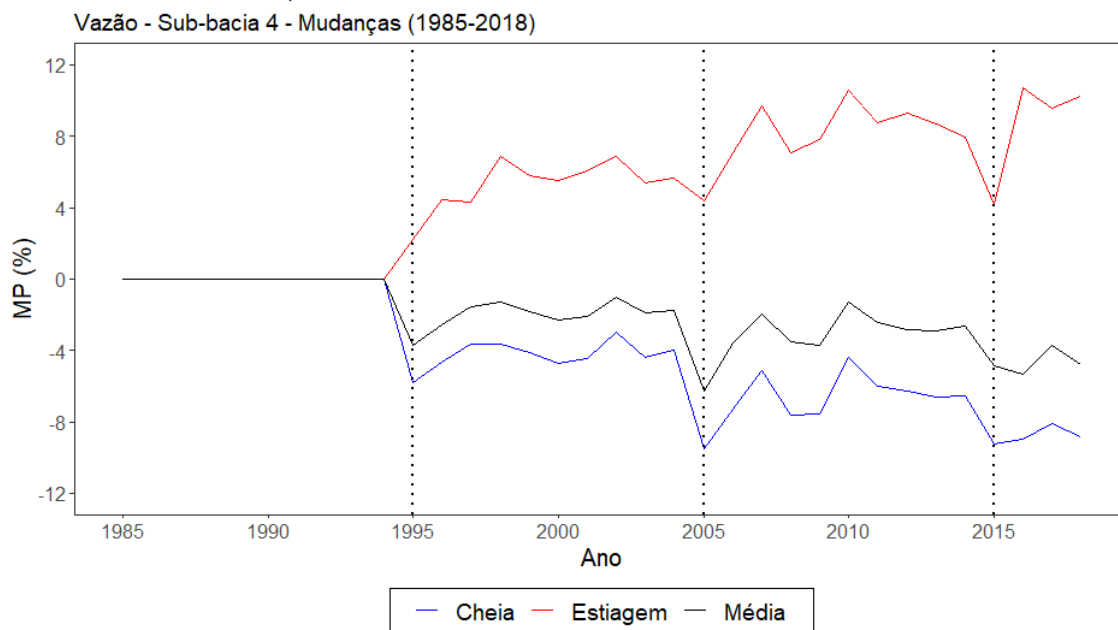
Fonte: Produção do autor.

Figura G.3 – Mudança percentual para os períodos de mudança para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 3.



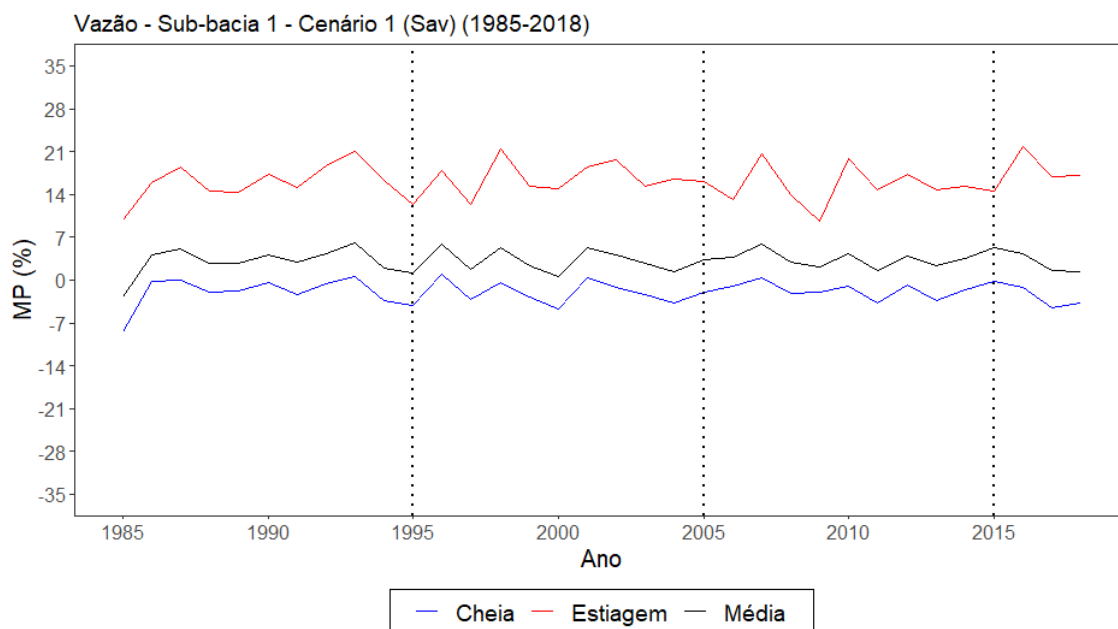
Fonte: Produção do autor.

Figura G.4 – Mudança percentual para os períodos de mudança para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 4.



Fonte: Produção do autor.

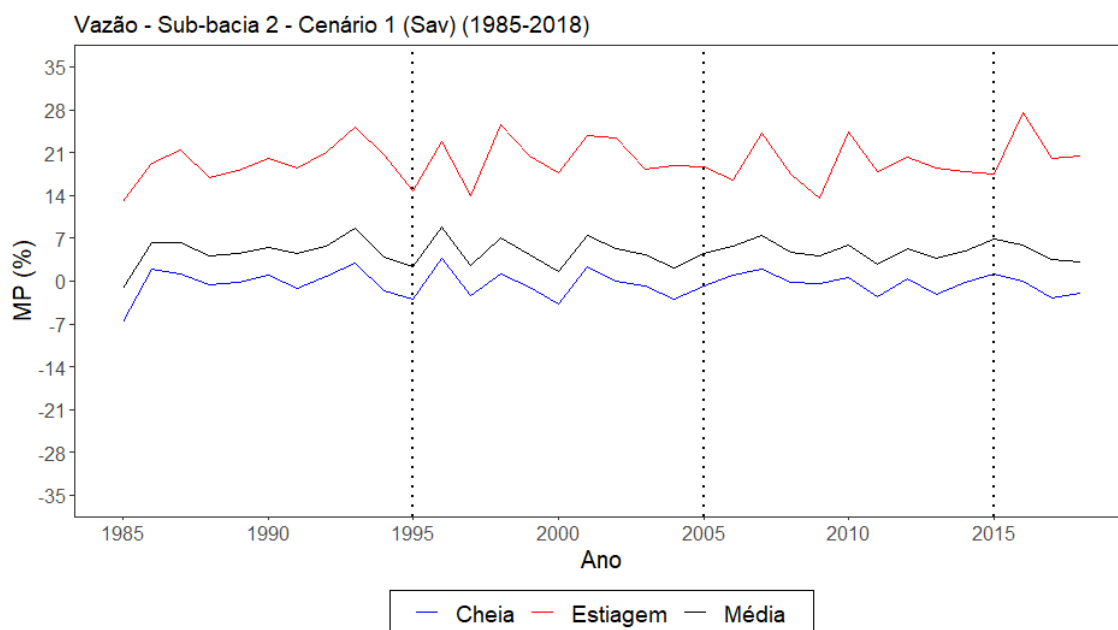
Figura G.5 – Mudança percentual para cenário 1 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 1.



Fonte: Produção do autor.

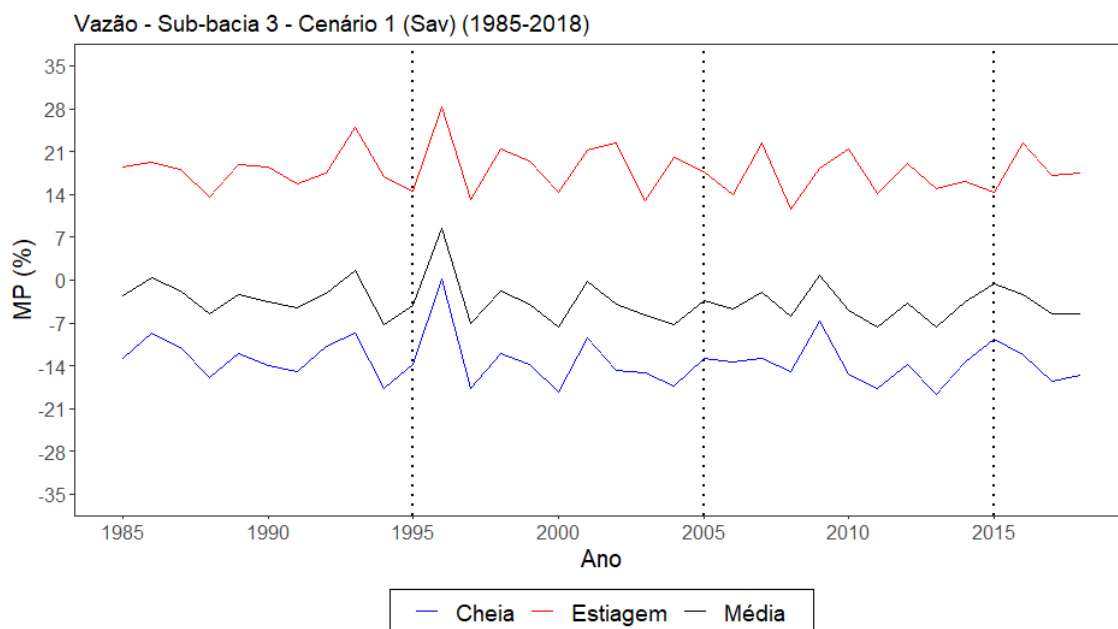


Figura G.6 – Mudança percentual para cenário 1 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 2.



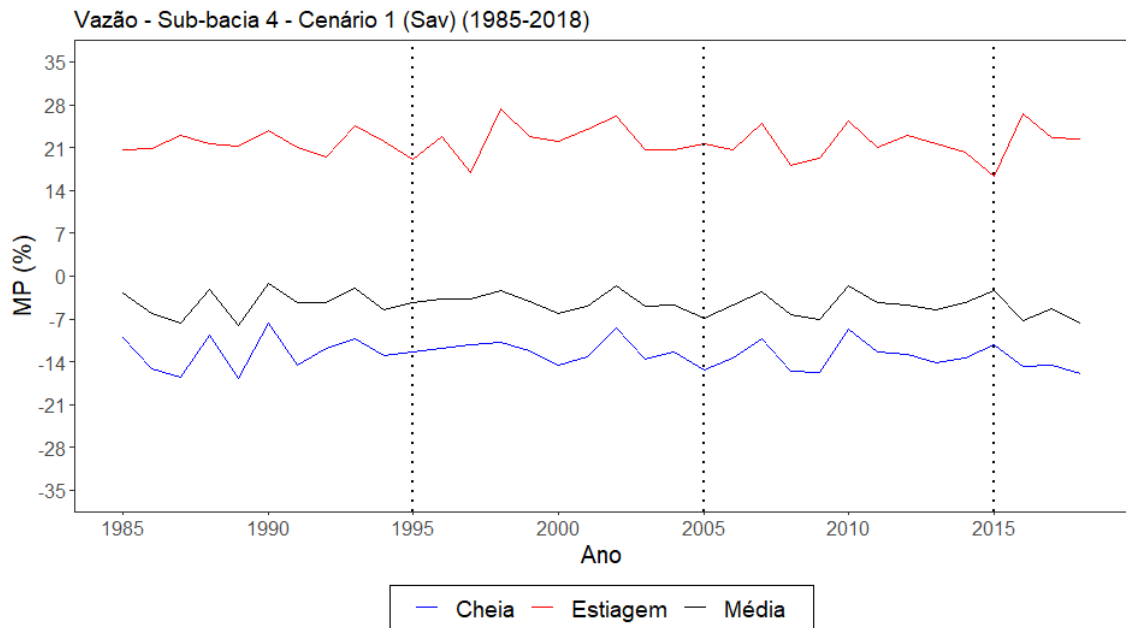
Fonte: Produção do autor.

Figura G.7 – Mudança percentual para cenário 1 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 3.



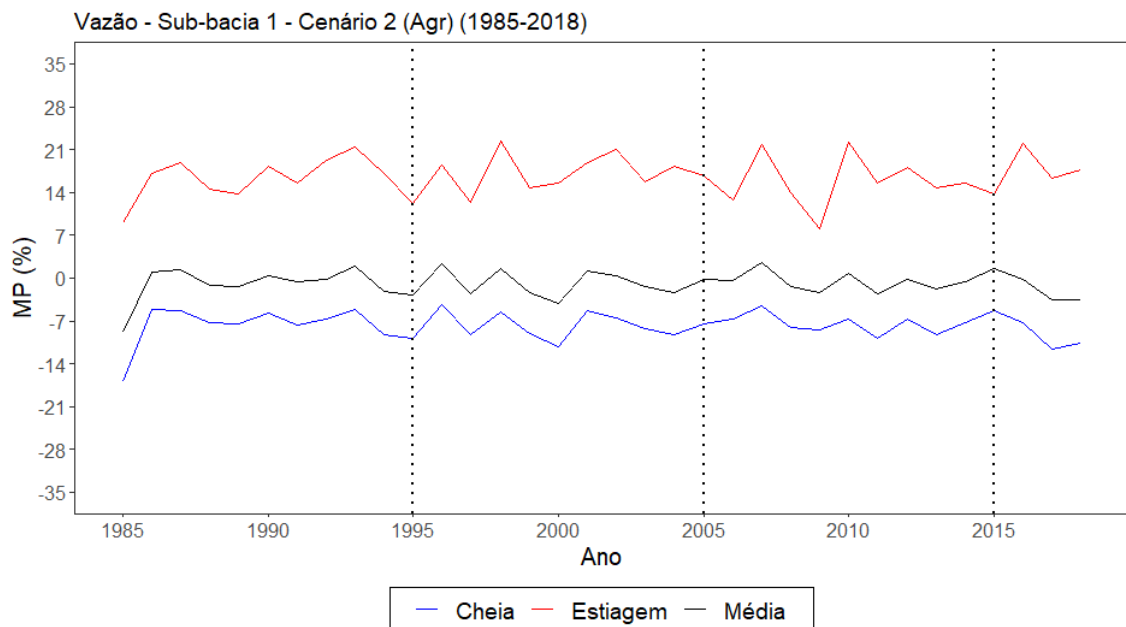
Fonte: Produção do autor.

Figura G.8 – Mudança percentual para cenário 1 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 4.



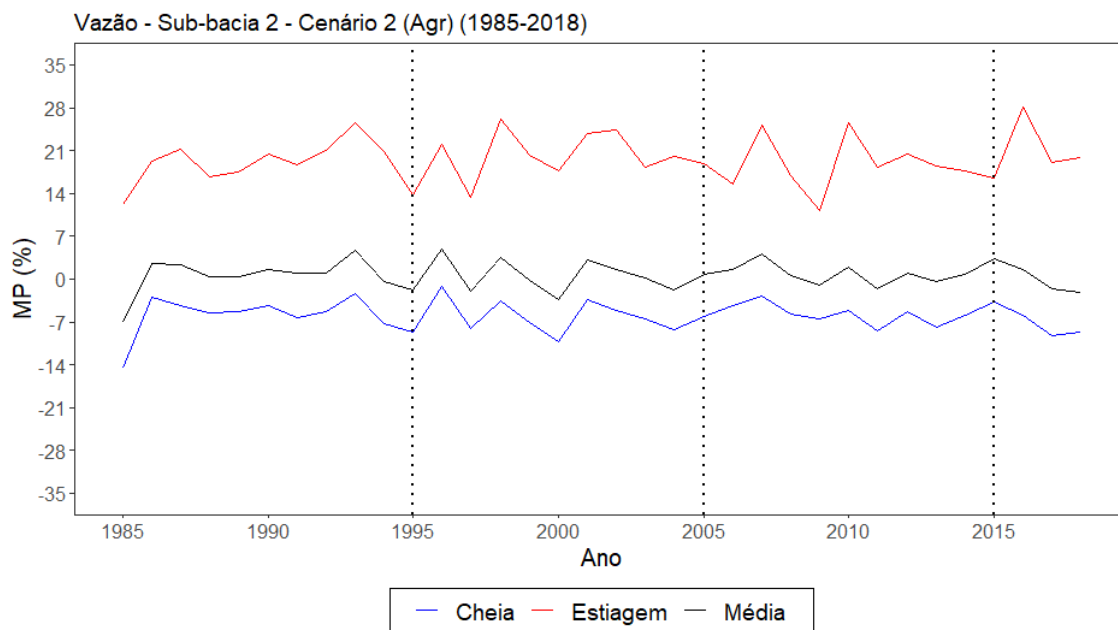
Fonte: Produção do autor.

Figura G.9 – Mudança percentual para cenário 2 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 1.



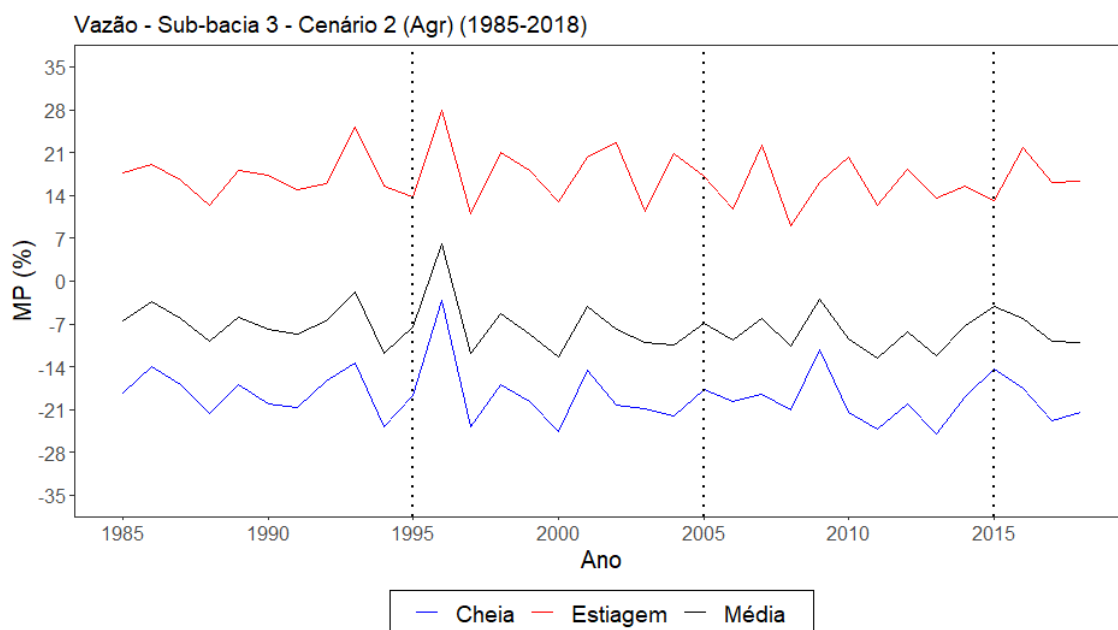
Fonte: Produção do autor.

Figura G.10 – Mudança percentual para cenário 2 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 2.



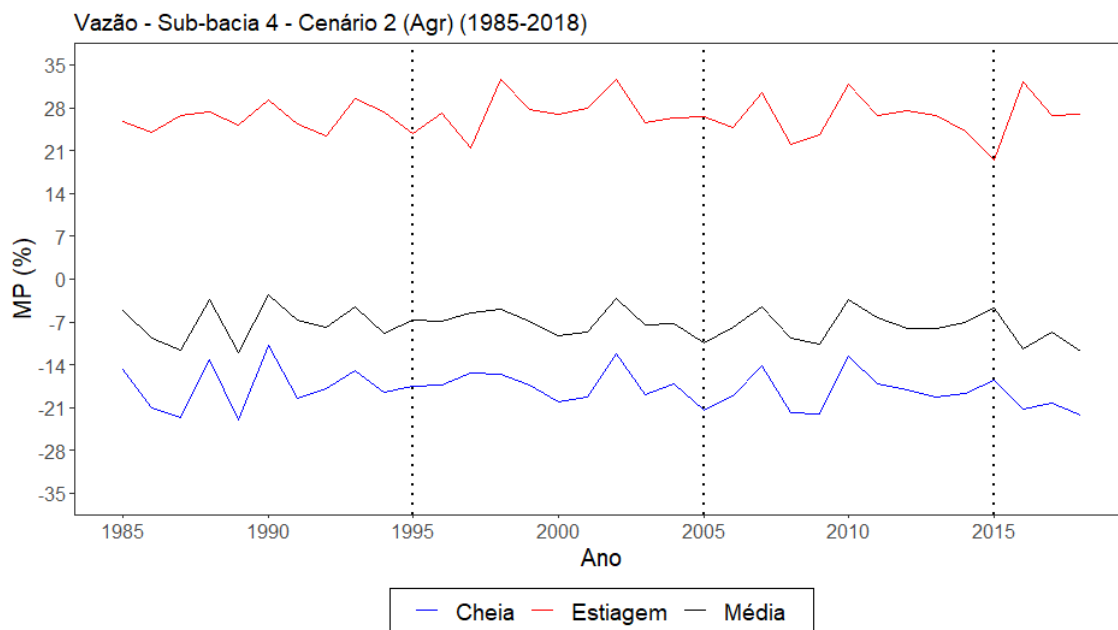
Fonte: Produção do autor.

Figura G.11 – Mudança percentual para cenário 2 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 3.



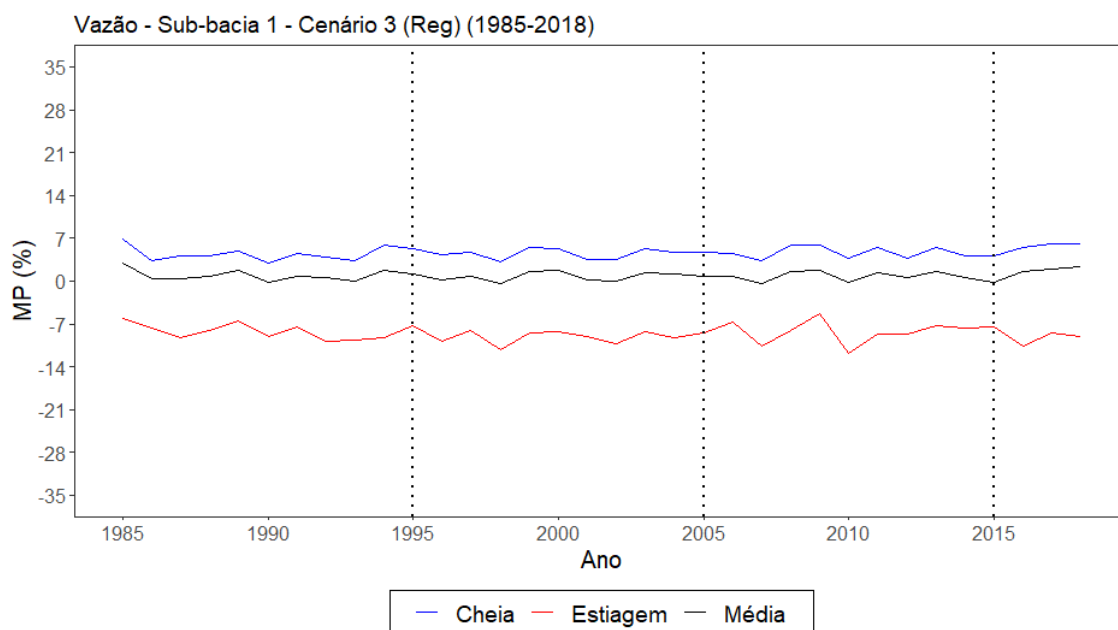
Fonte: Produção do autor.

Figura G.12 – Mudança percentual para cenário 2 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 4.



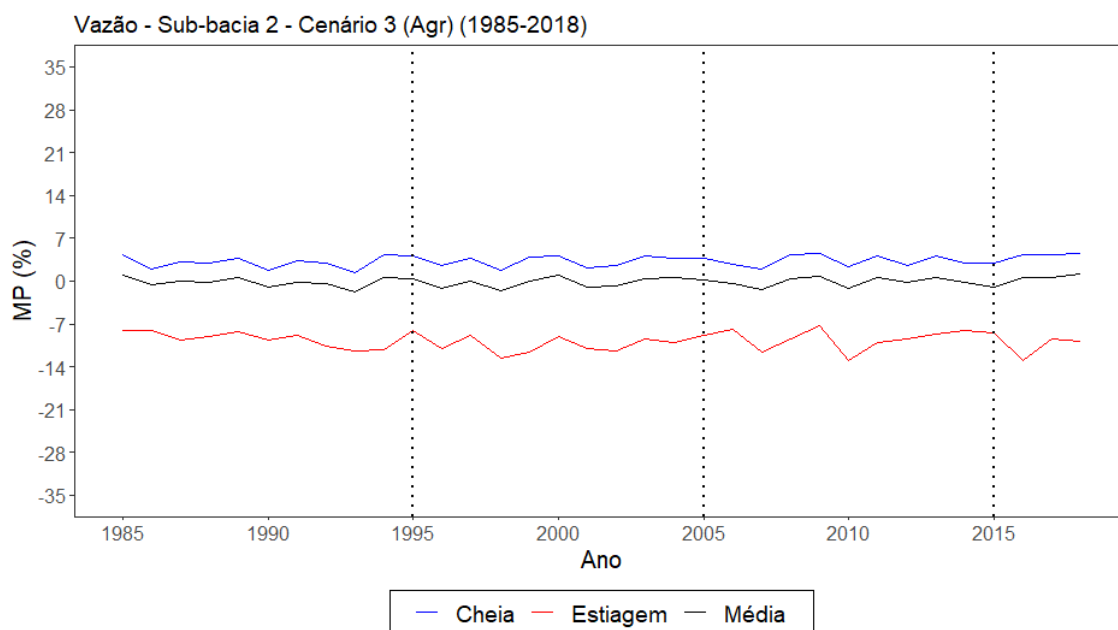
Fonte: Produção do autor.

Figura G.13 – Mudança percentual para cenário 3 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 1.



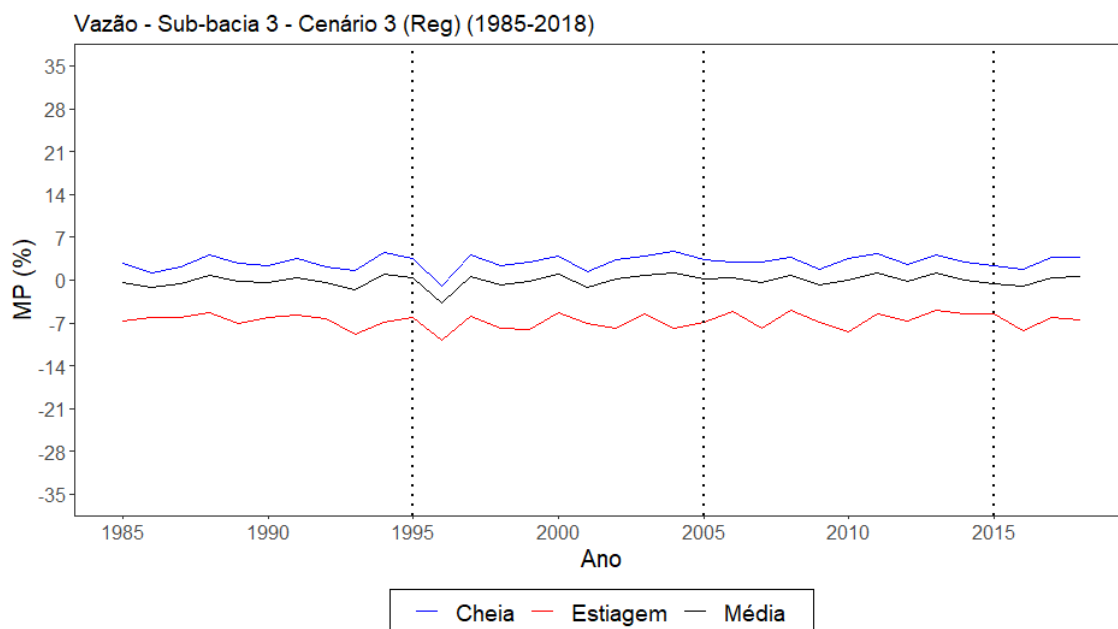
Fonte: Produção do autor.

Figura G.14 – Mudança percentual para cenário 3 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 2.



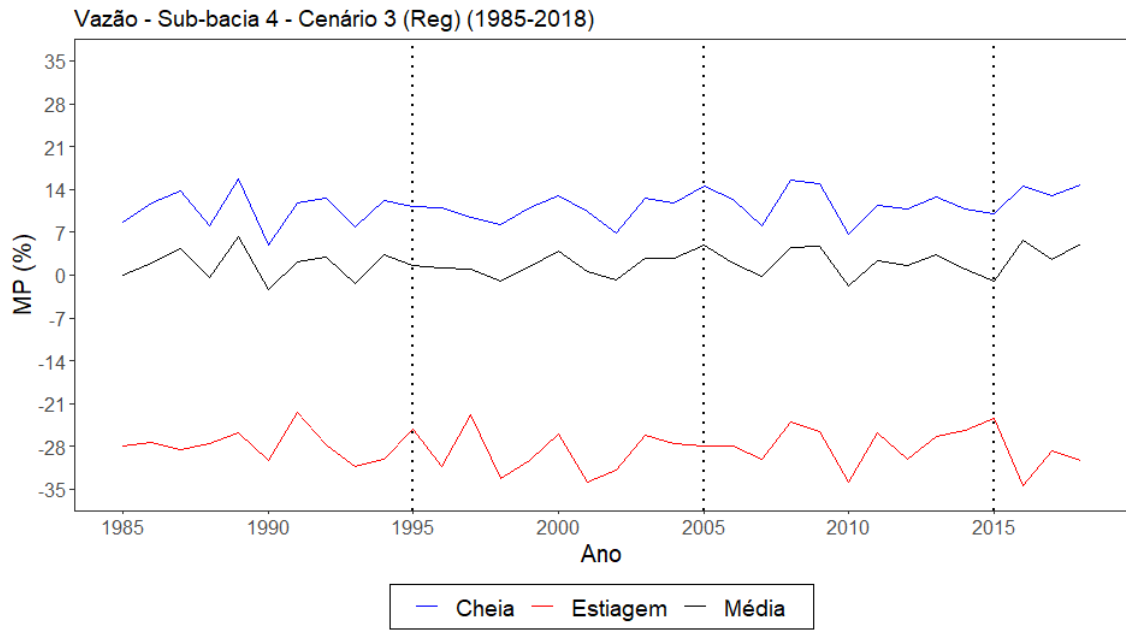
Fonte: Produção do autor.

Figura G.15 – Mudança percentual para cenário 3 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 3.



Fonte: Produção do autor.

Figura G.16 – Mudança percentual para cenário 3 para as vazões médias, máximas e mínimas da sub-bacia 4.

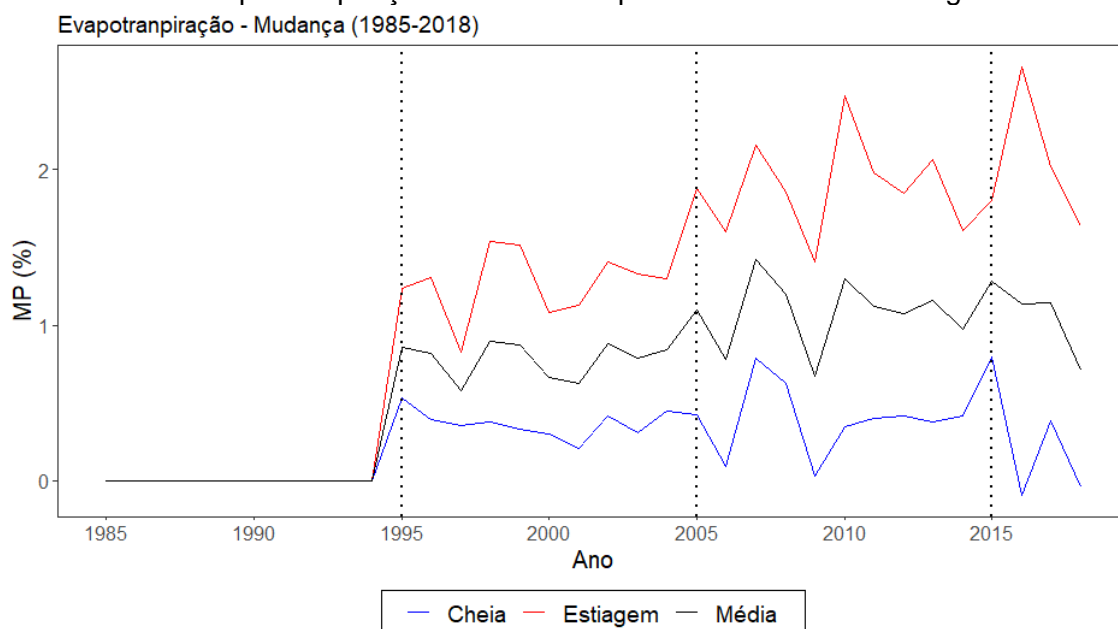


Fonte: Produção do autor.

## APÊNDICE H – GRÁFICOS DE MUDANÇAS PERCENTUAIS DA EVAPOTRANPIRAÇÃO SIMULADA PELO MGB-IPH

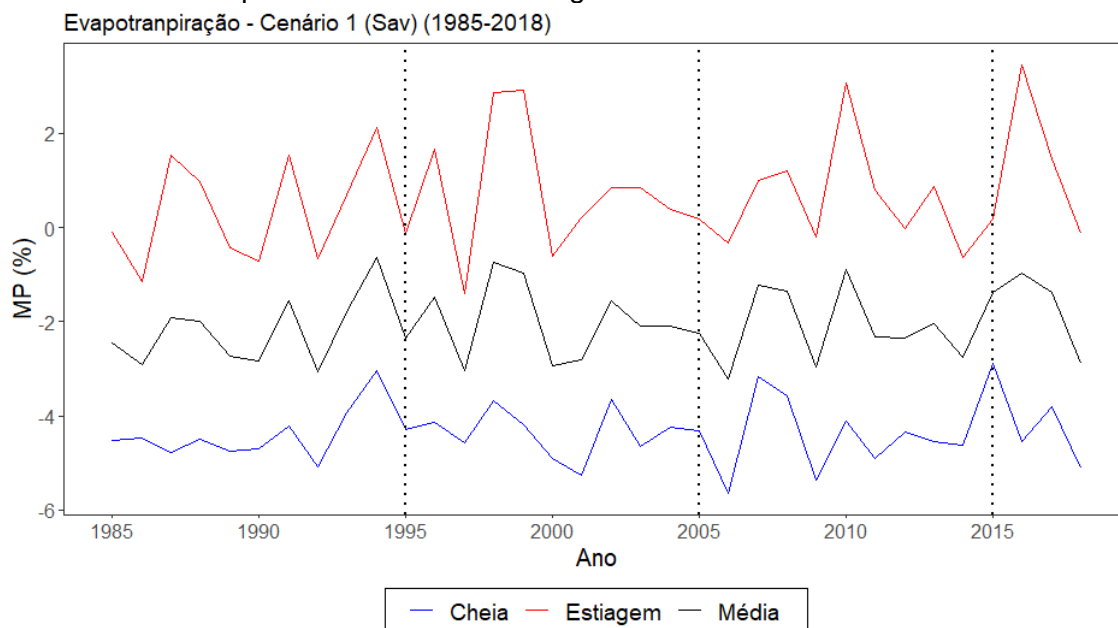
Os resultados do erro padrão ao longo da série histórica para evapotranspiração considerando os períodos de mudanças e os cenários propostos estão apresentados nas figuras seguintes. É apresentado também os valores considerando os períodos de estiagem e seca.

Figura H.1 – Mudança percentual para os períodos de mudança para a evapotranspiração médias e em períodos de cheia e estiagem.



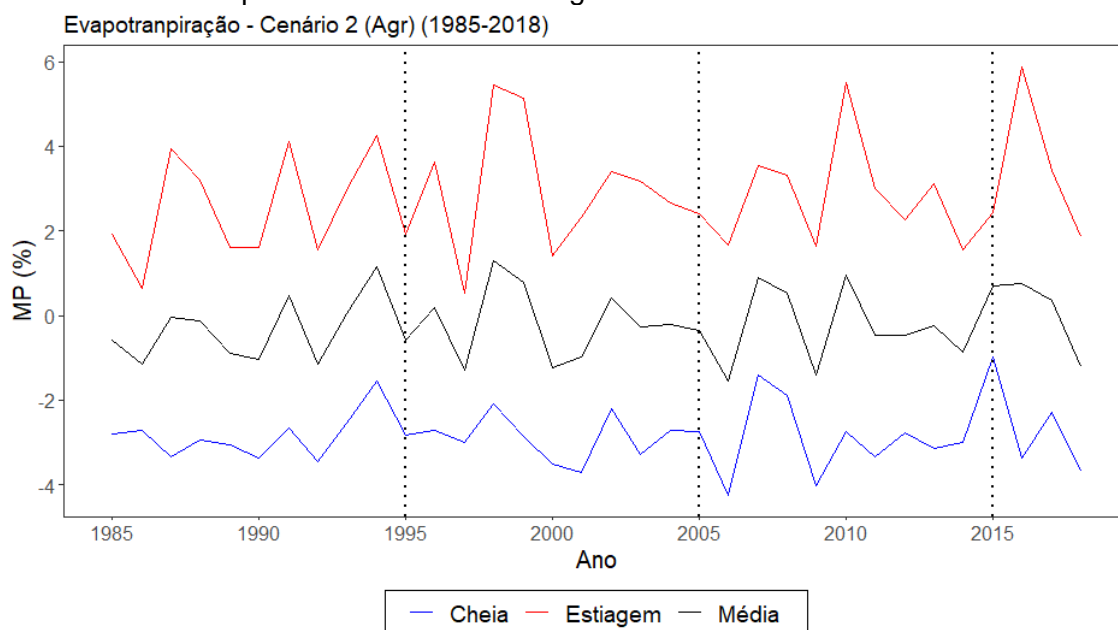
Fonte: Produção do autor.

Figura H.2 – Mudança percentual para o cenário 1 para a evapotranspiração médias e em períodos de cheia e estiagem.



Fonte: Produção do autor.

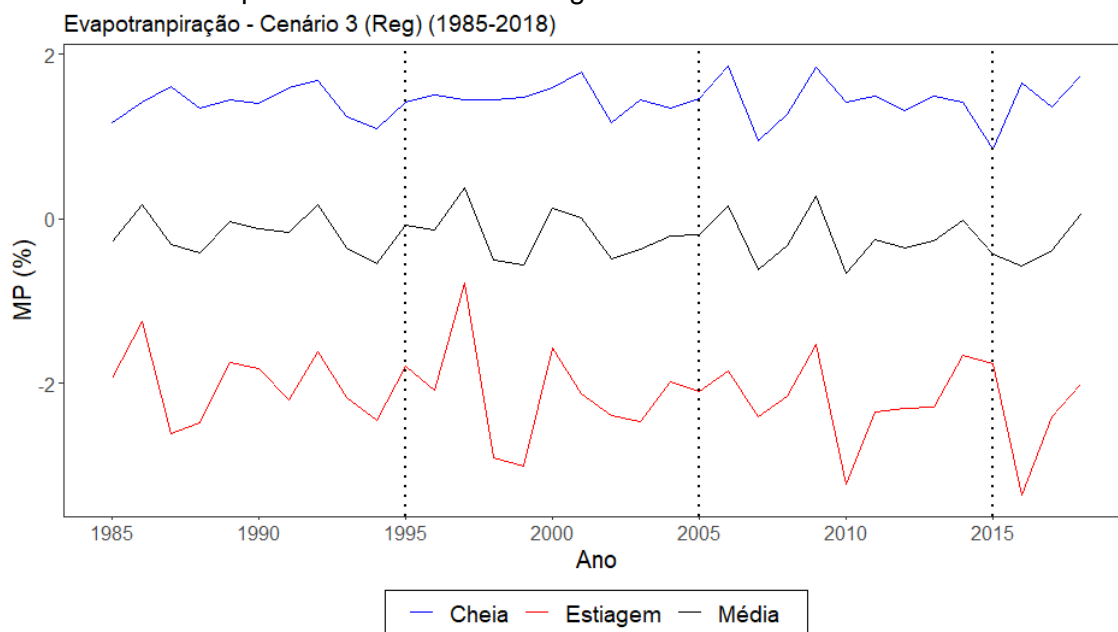
Figura H.3 – Mudança percentual para o cenário 2 para a evapotranspiração médias e em períodos de cheia e estiagem.



Fonte: Produção do autor.



Figura H.4 – Mudança percentual para o cenário 3 para a evapotranspiração médias e em períodos de cheia e estiagem.



Fonte: Produção do autor.