

Universidade Federal Fluminense

RENNAN MENDES DE MORAES DOS SANTOS DIAS

Modelagem Hidrológica e Hidráulica Aplicada
na Bacia Hidrográfica do Rio Pomba
Utilizando o Plugin MGB

VOLTA REDONDA

2021

RENNAN MENDES DE MORAES DOS SANTOS DIAS

Modelagem Hidrológica e Hidráulica Aplicada na Bacia Hidrográfica do Rio Pomba Utilizando o Plugin MGB

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

Orientador:

Professor D.Sc. Wagner Rambaldi Telles

Coorientador:

Professor D.Sc. Thiago Jordem Pereira

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VOLTA REDONDA

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEM
Gerada com informações fornecidas pelo autor

D541m Dias, Rennan Mendes de Moraes dos Santos
Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o plugin MGB / Rennan Mendes de Moraes dos Santos Dias ; Wagner Rambaldi Telles, orientador ; Thiago Jordem Pereira, coorientador. Volta Redonda, 2021.
135 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPG-MCCT.2021.m.13975459760>

1. Modelagem computacional. 2. Bacia hidrográfica. 3. Simulação por computador. 4. Inundação. 5. Produção intelectual. I. Telles, Wagner Rambaldi, orientador. II. Pereira, Thiago Jordem, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda. IV. Título.

CDD -

Modelagem Hidrológica e Hidráulica Aplicada na Bacia Hidrográfica do Rio Pomba Utilizando o Plugin MGB

Rennan Mendes de Moraes dos Santos Dias

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

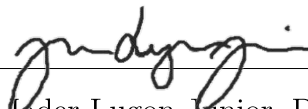
Aprovada por:



Prof. Wagner Rambaldi Telles, D.Sc.
MCCT-UFF (Presidente)



Prof. Panters Rodríguez Bermudez, D.Sc.
MCCT-UFF



Prof. Vader Lugon Junior, D.Sc.
IFFluminense

Volta Redonda, 20 de Dezembro de 2021.

Dedico este trabalho a
Amanda Rodrigues Mendes e Rogéria Mendes

Agradecimentos

Gratidão a minha amada esposa, Amanda Ribeiro de Azevedo Rodrigues Mendes, pelo amor, confiança e apoio, nos melhores e nos piores dias. Das certezas da vida, eu tenho a de que você estará sempre ao meu lado;

Gratidão a minha mãe, Rogeria Mendes de Moraes, por sempre enxergar em mim, seu único filho, o poder de conquistar o mundo;

Gratidão aos meus orientadores, em especial ao professor Wagner Rambaldi Telles, o qual me acompanha desde a graduação, sempre acreditando e estimulando o meu potencial. É uma honra ser orientando dos senhores;

Gratidão ao corpo docente e discente do Mestrado em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia pela vivência oferecida, mesmo em tempos de isolamento devido a pandemia da COVID-19 vocês se fizeram presentes;

Gratidão à Universidade Federal Fluminense pela excelência de seus cursos e programas. A universidade pública transforma vidas;

Gratidão a Deus e ao universo, onde eu, pequena parte do todo, tenho a honra de ter meus caminhos e conquistas corroborados.

Resumo

A preservação e o correto manuseio dos recursos hídricos estão entre as principais preocupações da sociedade atual. Para tal, necessita-se um conhecimento sobre as características desses corpos hídricos, objetivando-se o adequado gerenciamento e monitoramento dos mesmos. Nesta dissertação é realizada a modelagem hidrológica e hidráulica dos principais rios que compõem a bacia hidrográfica do rio Pomba, localizada na Zona da Mata Mineira, a qual abrange cerca de 35 municípios mineiros e 3 municípios fluminenses. Para execução das simulações foi utilizado o Modelo de Grandes Bacias (MGB), tendo como base o processamento do Modelo Digital de Terreno (MDT) com as ferramentas do IPH-Hydro Tools. Com o intuito de melhor determinar os valores dos parâmetros de solo necessários à modelagem e suas influências sobre o modelo, realizou-se uma análise de sensibilidade dos mesmos e posterior calibração manual e automática, sendo esta última, feita através do algoritmo de otimização Multi-Objective Complex Evolution (MOCOM-UA) inerente ao plugin do modelo MGB. Utilizaram-se dados topográficos disponibilizados pelo Google Earth Engine Explorer e dados pluviométricos e fluviométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Assim, dispondo-se do modelo devidamente calibrado por meio de dados experimentais, foi realizada a comparação do mesmo com hidrogramas e curvas de duração de fluxo obtidos para o período de 2010 a 2020. Além disso, os resultados das simulações apresentam curvas de duração de fluxo da vazão e hidrogramas de qualidade satisfatória em vista de auxiliar na tomada de decisões, tendo como base a prevenção de complicações causadas pelas cheias que ocorrem em diversas cidades situadas ao longo da bacia.

Abstract

The preservation and correct handling of water resources are among the main concerns of today's society. For this, knowledge about the characteristics of water bodies is needed, aiming to the proper management and monitoring of the same. In this dissertation, is performed a hydrological and hydraulic modeling for the main rivers that make up the hydrological basin of the Rio Pomba, located in Zona da Mata Mineira, which covers about 35 municipalities in Minas Gerais and 3 municipalities in Rio de Janeiro. For the execution of the simulations was used the MGB model, based on the processing of the Digital Terrain Model (DTM) with the tools from the IPH-Hydro Tools. In order to better determine the values of the soil parameters used in that model and its influences on the model, a sensitivity analysis was carried out and subsequent manual and automatic calibration, which is done through the multiobjective optimization MOCOM-UA inherent in the MGB template plugin. Topographic data was provided by Google Earth Engine Explorer and pluviometric and fluviometric data from National Water and Basic Sanitation Agency (ANA). Thus, with the model properly calibrated using experimental data, it was compared with hydrographs and flow duration curves obtained for the period 2010 to 2020. The sensitivity analysis allowed greater understanding of soil parameters and their influence on the model. In addition, the simulation results show flow duration curves and hydrographs of satisfactory quality in order to assist in decision making, based on the prevention of complications caused by the floods that occur in cities located along the basin.

Palavras-chave

1. Modelagem Hidrológica e Hidráulica;
2. Bacia Hidrográfica do Rio Pomba;
3. Softwares de Simulação Hidrológica;
4. Modelo de Grandes Bacias (MGB);
5. Inundações.

Glossário

AgriProf	Agricultura em Solo Profundo
AgriRas	Agricultura de Solo Raso
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APP	Áreas de Preservação Permanente
ARL	Áreas de Reserva Legal
ASI	Áreas Semi-Impermeáveis
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
Bias	Error Nodule in the Total Volume
CampProf	Campo de Solo Profundo
CampRas	Campo de Solo Raso
DEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
DHI	Danish Hydraulic Institute
FlorProf	Floresta de Solo Profundo
FlorRas	Floresta de Solo Raso
GDEM	Global Digital Elevation Model
GEE	Gases do Efeito Estufa
HAND	Height Above the Nearest Drainage
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center-River Analysis System
HGE	Hidrologia de Grande Escala
HR	Hydrological Retrospective
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MDT	Modelo Digital de Terreno
MGB	Modelo de Grandes Bacias
MOCOM-UA	Multi-Objective Complex Evolution
Nash	Nash-Sutcliffe Efficiency
Nash-Log	Nash-Sutcliffe Efficiency of the Logarithm of the Flows

PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
QGIS	Quantum Geographic Information System
QM	Quantidade de Movimento
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPRINT	Simulation Program for River Networks
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	Usina Hidrelétrica
URH	Unidades de Resposta Hidrológica
Varzea	Várzeas

Lista de Símbolos

$A[m^2]$	área da seção transversal
$A_{fl}[m^2]$	área inundada
$b[-]$	relação entre fração de área saturada e armazenamento médio de umidade no solo
$B[m]$	largura da seção transversal
$c[m/s]$	celeridade
$CAP[mm/dia]$	fluxo de retorno da camada subterrânea para o solo
$CB[dias]$	parâmetro de retardo do reservatório subterrânea
$CI[-]$	parâmetro para calibração da propagação subsuperficial
$CS[-]$	parâmetro para calibração da propagação superficial
$Evq[mm/\Delta t]$	perda por evaporação na área inundada
$F_B[N]$	força hidrostática resultante da modificação da largura da seção
$F_e[N]$	força de pressão
$F_f[N]$	força de atrito
$F_g[N]$	força peso devido à gravidade
$F_l[N]$	força hidrostática atuando sobre o limite esquerdo do trecho
$F_r[N]$	força hidrostática atuando sobre o limite direito do trecho
$g[m^2/s]$	aceleração da gravidade
$h[m]$	variável de integração
$K_{bas}[mm/dia]$	parâmetro de escoamento subterrâneo
$K_{int}[mm/dia]$	parâmetro de escoamento subsuperficial
$n[s/m^{1/3}]$	coeficiente de rugosidade de Manning
$Nd[-]$	número de dados experimentais
$P_m[m]$	perímetro molhado
$P[mm]$	precipitação direta sobre a área inundada
$q[m^2/s]$	vazão de contribuição lateral por unidade do trecho descarga
$Q[m^3/s]$	descarga do canal
$QB[m^3/s.km^2]$	condição inicial do modelo

$R[m]$	raio hidráulico
$S_0[m/m]$	declividade do fundo do canal
$S_f[m/m]$	declividade da linha de energia
$S_{flow}[m/m]$	declividade da linha de água
$T[-]$	número total de passos no tempo
$t[s]$	variável temporal
$V[m^3]$	volume total armazenado no canal e planície de inundação
$V_c[m/s]$	velocidade característica
$Wc[-]$	fração de W_m a qual, abaixo, não há geração de escoamento subterrâneo e subsuperficial
$Wm[mm]$	capacidade de armazenamento de água no solo
$x[m]$	variável espacial
$X[-]$	coeficiente de sensibilidade
$XL[-]$	parâmetro que controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subterrânea
$y[m]$	profundidade do escoamento
$y_{flow}[m]$	profundidade na seção transversal entre minibacias
$z[m]$	elevação da superfície livre
$z_f[m]$	elevação do fundo do canal

Símbolos Gregos

$\alpha[-]$	fator de ajuste do critério de estabilidade
$\gamma[-]$	vetor dos parâmetros conhecidos
$\lambda[m]$	comprimento da onda
$\rho[kg/m^3]$	massa específica
$\tau[N/m^2]$	esforço cortante
$\phi[-]$	vetor dos parâmetros que serão estimados
$\Omega[-]$	variável de estado do modelo

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xx
1 Introdução	21
1.1 Justificativa	25
1.2 Objetivos	26
1.2.1 Objetivo Geral	26
1.2.2 Objetivos Específicos	27
1.3 Organização do Trabalho	28
2 Caracterização da Região de Interesse	29
2.1 Bacias Hidrográficas	29
2.2 Bacia Hidrográfica do Rio Pomba	31
3 Modelagem Matemática e Solução do Problema Proposto	36
3.1 Modelagem Matemática de Escoamentos Superficiais	36
3.2 Solução do Problema Proposto	42
3.2.1 O Plugin MGB	42
3.2.2 Procedimentos para Simulação no MGB	47
3.2.3 Calibração Automática	52
3.3 Análise de Sensibilidade	57
4 Pré-Processamento da Bacia Hidrográfica do Rio Pomba Utilizando o	

Plugin IPH-Hydro Tools	59
4.1 Pré-Processamento com Uma Sub-Bacia	62
4.2 Pré-Processamento com Três Sub-Bacias	67
5 Resultados e Discussões	69
5.1 Localização das Estações para Aquisição de Dados	69
5.2 Resultados Referentes à Modelagem Direta do Problema de Inundações . .	71
5.3 Resultados Envolvendo a Calibração Manual dos Parâmetros do Plugin MGB	78
5.3.1 Resultados da Análise de Sensibilidade	78
5.3.2 Resultados da Calibração Manual dos Parâmetros do MGB para Uma Sub-Bacia	97
5.3.3 Resultados da Calibração Manual dos Parâmetros do MGB para Três Sub-Bacias	102
5.4 Resultados Envolvendo a Calibração Automática do Plugin MGB	108
5.4.1 Resultados da Calibração Automática dos Parâmetros do MGB para Uma Sub-Bacia	111
5.4.2 Resultados da Calibração Automática dos Parâmetros do MGB para Três Sub-Bacias	116
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	125
6.1 Conclusões	125
6.2 Trabalhos Futuros	127
Referências	128

Lista de Figuras

1.1	Número de pessoas afetadas e frequência de ocorrência de inundações pelo mundo de 1974 a 2005.	22
2.1	Localização da bacia hidrográfica do rio Pomba nos contextos regional, estadual e nacional.	32
2.2	Localização dos municípios e da área urbanizada da bacia hidrográfica do rio Pomba.	33
2.3	Inundações em alguns municípios da bacia hidrográfica do rio Pomba. . . .	34
2.4	Localização dos reservatórios de maior relevância da bacia hidrográfica do rio Pomba.	35
3.1	Representação esquemática de um balanço de massa em um trecho de rio de comprimento dx	37
3.2	Termos usados na equação de quantidade de movimento.	38
3.3	Resumo do funcionamento do MGB.	43
3.4	Segmentos de rio e posicionamento das variáveis em acordo com o esquema numérico adotado no modelo inercial.	44
3.5	Página inicial do site da ANA.	47
3.6	Página do “ <i>Google Earth Engine Explorer</i> ” exibindo o resultado da busca por “ <i>SRTM Digital Elevation Data Version 4</i> ”.	48
3.7	Descrição das URHs sugerida pelos idealizadores do MGB.	50
3.8	Parâmetros de vegetação sugeridos no manual do MGB.	51
3.9	Parâmetros de solo sugeridos no manual do MGB para uma sub-bacia. . . .	52
3.10	Janela principal do processo de calibração automática do modelo MGB. . . .	53
4.1	MDE utilizado para pré-processamento da bacia hidrográfica do rio Pomba. .	60

4.2	Extração do MDE para a região de interesse.	60
4.3	Mapa das direções de fluxo.	61
4.4	Mapa da vazão acumulada.	61
4.5	Camada da rede de drenagem sob a camada dos principais rios da bacia do rio Pomba.	62
4.6	Delimitação da bacia hidrográfica do rio Pomba, onde, em rosa, localiza-se o exutório próximo a foz do rio Pomba e, em azul, seus principais rios. . . .	63
4.7	Rede de drenagem extraída para a delimitação da bacia.	63
4.8	Rede de drenagem segmentada.	64
4.9	Minibacias delimitadas.	64
4.10	Conversão da delimitação da bacia e das minibacias para o formato vetorial <i>Shapefile</i>	65
4.11	URHs extraídas para a região de interesse.	65
4.12	Levantamento dos perfis transversais do rio Pomba para dedução das relações geomorfológicas.	66
4.13	Parâmetros utilizados nas relações geomorfológicas.	66
4.14	Localização dos três exutórios.	67
4.15	Delimitação das três sub-bacias.	68
5.1	Localização das estações fluviométricas consideradas neste trabalho.	70
5.2	Localização das estações pluviométricas consideradas neste trabalho.	70
5.3	Localização das estações climáticas consideradas neste trabalho.	71
5.4	Parâmetros de vegetação utilizados para albedo.	72
5.5	Parâmetros de vegetação utilizados para índice de área foliar.	72
5.6	Parâmetros de vegetação utilizados para altura média.	72
5.7	Parâmetros de vegetação utilizados para resistência superficial.	73
5.8	Hidrograma da Estação 550 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.	74

5.9	Duração de fluxo da Estação 550 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.	74
5.10	Hidrograma da Estação 566 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.	75
5.11	Duração de fluxo da Estação 566 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.	75
5.12	Hidrograma da Estação 578 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.	76
5.13	Duração de fluxo da Estação 578 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.	76
5.14	Hidrograma da Estação 598 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.	77
5.15	Duração de fluxo da Estação 598 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.	77
5.16	Análise de sensibilidade dos parâmetros CB, CI, CS e QB sobre a estação 550.	79
5.17	Análise de sensibilidade dos parâmetros CB, CI, CS e QB sobre a estação 566.	79
5.18	Análise de sensibilidade dos parâmetros CB, CI, CS e QB sobre a estação 578.	80
5.19	Análise de sensibilidade dos parâmetros CB, CI, CS e QB sobre a estação 598.	80
5.20	Análise de sensibilidade do parâmetro b para cada URH sobre cada estação.	82
5.21	Análise de sensibilidade do parâmetro Kbas para cada URH sobre cada estação.	83
5.22	Análise de sensibilidade do parâmetro Kint para cada URH sobre cada estação.	84
5.23	Análise de sensibilidade do parâmetro Wc para cada URH sobre cada estação.	85
5.24	Análise de sensibilidade do parâmetro Wm para cada URH sobre cada estação.	86

5.25	Análise de sensibilidade do parâmetro XL para cada URH sobre cada estação.	87
5.26	Análise de sensibilidade na URH de agricultura em solo profundo de cada parâmetro sobre cada estação.	89
5.27	Análise de sensibilidade na URH de agricultura em solo raso de cada parâmetro sobre cada estação.	90
5.28	Análise de sensibilidade na URH de áreas semi-impermeáveis de cada parâmetro sobre cada estação.	91
5.29	Análise de sensibilidade na URH de campo de solo profundo de cada parâmetro sobre cada estação.	92
5.30	Análise de sensibilidade na URH de campo de solo raso de cada parâmetro sobre cada estação.	93
5.31	Análise de sensibilidade na URH de floresta de solo profundo de cada parâmetro sobre cada estação.	94
5.32	Análise de sensibilidade na URH de floresta de solo raso de cada parâmetro sobre cada estação.	95
5.33	Análise de sensibilidade na URH de várzea de cada parâmetro sobre cada estação.	96
5.34	Hidrograma da Estação 550 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.	98
5.35	Duração de fluxo da Estação 550 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.	98
5.36	Hidrograma da Estação 566 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.	99
5.37	Duração de fluxo da Estação 566 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.	99
5.38	Hidrograma da Estação 578 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.	100
5.39	Duração de fluxo da Estação 578 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.	100

5.40	Hidrograma da Estação 598 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.	101
5.41	Duração de fluxo da Estação 598 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.	101
5.42	Hidrograma da Estação 550 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.	104
5.43	Duração de fluxo da Estação 550 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.	104
5.44	Hidrograma da Estação 566 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.	105
5.45	Duração de fluxo da Estação 566 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.	105
5.46	Hidrograma da Estação 578 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.	106
5.47	Duração de fluxo da Estação 578 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.	106
5.48	Hidrograma da Estação 598 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.	107
5.49	Duração de fluxo da Estação 598 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.	107
5.50	Especificações e funções objetivo utilizadas na calibração automática em ambos os modelos.	110
5.51	Estações fluviométricas com dados confiáveis utilizados no processo de calibração automática.	110
5.52	Valores dos parâmetros CS, CI, CB e QB utilizados na calibração automática em ambos os modelos.	111
5.53	Hidrograma da Estação 550 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.	112
5.54	Duração de fluxo da Estação 550 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.	112

5.55	Hidrograma da Estação 566 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.	113
5.56	Duração de fluxo da Estação 566 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.	113
5.57	Hidrograma da Estação 578 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.	114
5.58	Duração de fluxo da Estação 578 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.	114
5.59	Hidrograma da Estação 598 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.	115
5.60	Duração de fluxo da Estação 598 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.	115
5.61	Hidrograma da Estação 550 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.	118
5.62	Duração de fluxo da Estação 550 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.	118
5.63	Hidrograma da Estação 566 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.	119
5.64	Duração de fluxo da Estação 566 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.	119
5.65	Hidrograma da Estação 578 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.	120
5.66	Duração de fluxo da Estação 578 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.	120
5.67	Hidrograma da Estação 598 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.	121
5.68	Duração de fluxo da Estação 598 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.	121
5.69	Área inundada do município de Guarani-MG, simulada pelo plugin MGB. .	122

5.70	Área inundada do município de Astolfo Dutra-MG, simulada pelo plugin MGB.	123
5.71	Área inundada do município de Cataguases-MG, simulada pelo plugin MGB.	123
5.72	Área inundada do município de Santo Antônio de Pádua-RJ, simulada pelo plugin MGB.	124

Lista de Tabelas

3.1	Classificação de performance dos indicadores de qualidade da simulação com modelos hidrológicos para a vazão.	56
5.1	Parâmetros do solo antes da calibração manual.	73
5.2	Parâmetros de solo obtidos por meio da calibração manual.	97
5.3	Parâmetros de solo após a calibração manual da sub-bacia 1.	102
5.4	Parâmetros de solo após a calibração manual da sub-bacia 2.	103
5.5	Parâmetros de solo após a calibração manual da sub-bacia 3.	103
5.6	Tabela de valores mínimos, máximos e médios dos parâmetros de solo, para cada URH, utilizados na calibração automática de ambos os modelos. . . .	109
5.7	Parâmetros de solo do modelo com uma sub-bacia após a calibração automática.	111
5.8	Parâmetros de solo da sub-bacia 3 após a calibração automática.	116
5.9	Parâmetros de solo da sub-bacia 2 após a calibração automática.	117
5.10	Parâmetros de solo da sub-bacia 1 após a calibração automática.	117

Capítulo 1

Introdução

A atual sociedade tem, entre suas principais preocupações, a preservação e o correto manuseio dos recursos hídricos. Como Telles [65] afirma, necessita-se um conhecimento das características desses corpos hídricos, como lagos, córregos e, em particular, rios, objetivando-se o adequado monitoramento e gerenciamento dos mesmos.

No que tange ao Brasil, sabe-se que este possui a mais extensa rede hidrográfica da Terra, segundo Cordeiro [15], sendo a maior parte dos mesmos, os rios de montanha, com significativa importância econômica dado o seu potencial energético.

Nota-se que os estudos envolvendo bacias hidrográficas são de grande relevância, visto que neste local geográfico natural verifica-se a dependência da maioria dos componentes do crescimento e posterior desenvolvimento da sociedade, definido nos múltiplos usos desse recurso hídrico, a água [18].

Além disso, nesses locais geográficos naturais (bacias hidrográficas), infelizmente, são registrados todos os anos, a ocorrência de desastres naturais, dentre eles, as inundações. Ainda, em concordância com as Diretrizes Estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico [41], as inundações no Brasil geram gastos superiores a 1 bilhão de dólares por ano. Na Figura 1.1 mostra-se a frequência e o número de pessoas afetadas pelas inundações no mundo no final do século XX e início do século XXI.

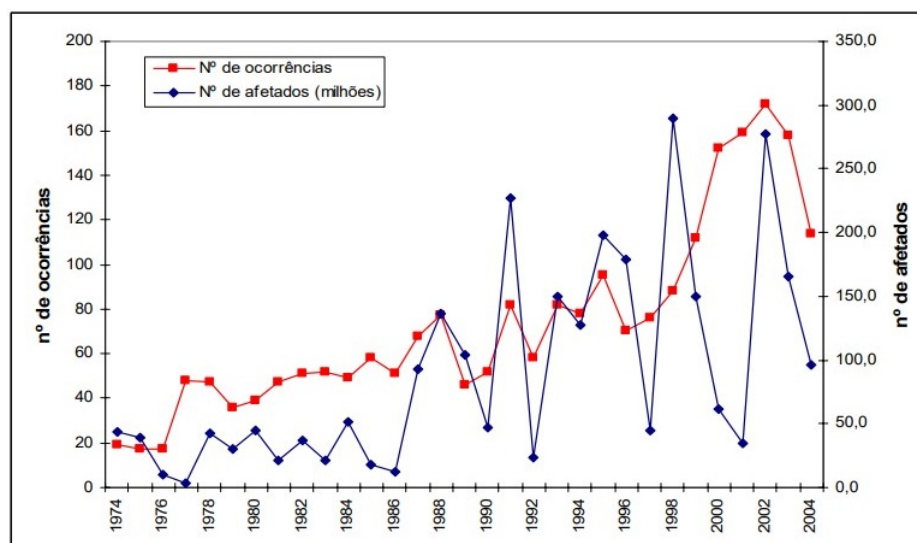


Figura 1.1: Número de pessoas afetadas e frequência de ocorrência de inundações pelo mundo de 1974 a 2005.

Fonte: EM-DAT: OFDA/CRED *International Disaster Database - Université Catholique de Louvain* [19].

Sendo assim, torna-se relevante uma gestão mais adequada dos riscos de inundação, com melhor tomada de decisões e, conseqüentemente, implementação e execução de medidas preventivas e paliativas aos impactos causados por essas catástrofes [54].

No Brasil, as drenagens urbanas, responsabilidade das prefeituras municipais, se ressentem de baixa coordenação, na maioria dos casos, baixa cooperação da população local, e capacidade de gestão associada a carência de recursos, o que resulta na falta de prioridade para estas atividades, segundo Muñoz [45].

Para melhorar esse cenário, podem-se realizar estudos por meio de modelos investigativos, requerendo-se informações fisiográficas da área de interesse, como a distribuição espacial, características geométricas e a configuração da rede de canais [27]. Em particular, para a análise e simulação de processos que ocorrem nas bacias hidrográficas, necessita-se a obtenção de dados úteis ao mapeamento cuja região será estudada, sendo esses, em resumo: dados topográficos, dados físicos e dados administrativos [35].

Nesse contexto, a utilização de modelos matemáticos, juntamente com softwares desenvolvidos para a modelagem de corpos hídricos, tem sido crescente. Em especial, no âmbito de bacias hidrográficas, tais modelos encontram-se amplamente aplicados.

Na literatura, como cita Telles et al. [67] e Ogden et al. [48], ainda encontram-se diversos estudos envolvendo softwares que têm como base modelo matemáticos, alguns

exemplos são: aplicações em florestas, como o ForestGALES, destinado à modelagem do risco de ventos [32]; calibração e validação do *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) para a bacia hidrográfica do rio Attanagalu Oya [33]; avaliação do software *Simulation Program for River Networks* (SPRINT) aplicado aos rios Guadalupe e San Antonio [37], dentre outros. A totalidade desses aplicativos baseiam-se em modelos matemáticos que, quando implementados, adotam uma série de parâmetros, tais como o coeficiente de rugosidade e outros.

Em particular, apresenta-se por Fleenor e Jensen [23], uma comparação entre o software *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System* (HEC-RAS) e o software de propriedade do *Danish Hydraulic Institute* (DHI), MIKE 11, famosos por seu uso na previsão de inundações ao redor do mundo. Um outro exemplo, é a utilização da abordagem *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) *Global Digital Elevation Model* (GDEM) associada ao software HEC-RAS/HEC-GeoRAS para a simulação de inundações no rio Tisza [28].

Citam-se, também, autores que utilizaram softwares para simulação do escoamento em bacias hidrográficas, obtendo bons resultados. Telles et al. [66], no artigo intitulado “Calibração Automática de um Simulador Aplicado a um Rio de Montanha Empregando Dados Experimentais de Precipitação e Nível – Estudo de Caso: Córrego D’Antas, RJ”, realizaram o acoplamento de técnicas de otimização ao modelo hidrodinâmico MOHID-Land, objetivando o desenvolvimento de uma ferramenta de calibração automática, aplicado à simulação de cheias no principal curso d’água da bacia hidrográfica do Córrego D’Antas. Enquanto Tavares [63], utilizando o MOHID-Land, construiu um modelo hidrológico para a bacia do rio Macaé com intuito de auxiliar no controle das cheias na região.

Aplicando de forma integrada o software HEC-GeoRAS acoplado ao software de sistema de informação geográfica ArcGIS, o modelo hidrológico HEC-HMS e o modelo hidráulico HEC-RAS, Cabral et al. [8] puderam delimitar áreas inundadas por uma chuva centenária da cidade do Crato, na bacia do rio Granjeiro, no Ceará. Já no artigo “Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Simulação Hidrológica-Hidrodinâmica”, de Neto et al. [47], realizou-se uma reconstituição de um evento hidrológico severo ocorrido nos estados de Pernambuco e Alagoas, fazendo uso do modelo chuva-vazão HEC-HMS e do modelo hidrodinâmico HEC-RAS.

Com o propósito de checar a aplicabilidade do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) ao mapeamento de áreas suscetíveis a inundação, em Igrejinha-RS, bem como estimar a influência da área mínima de contribuição e da resolução do modelo di-

gital do terreno (MDT) sobre a performance do modelo, Goerl et al. [30] elaboraram o trabalho de título “Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Inundação com o Modelo HAND e a Análise do seu Desempenho em Diferentes Resoluções Espaciais”. A partir de uma abordagem similar, Momo et al. [43] mapearam áreas passíveis de inundação, avaliando o desempenho do método HAND *countour*, nos municípios de Blumenau-RS e Brusque-RS.

Por outro lado, fazendo uso da modelagem hidrodinâmica, com o modelo computacional bidimensional IBER, Silva et al. [58] estruturaram mapas de potenciais áreas de risco de inundação no município de Quebrangulo-AL, a partir de dados do censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010. Já no artigo “Cheias na Foz do Rio Sabor: Comparação dos Perímetros de Inundação Definidos pelo Método Hidro-Histórico e pela Modelação Hidráulica (software IBER)” Carmo et al. [9] tiveram por objetivo a comparação dos perímetros de inundação para dois eventos de cheia, delimitados a partir de duas metodologias diferentes, modelação hidráulica com o software IBER e método hidro-histórico.

Em particular, neste trabalho é feita a modelagem da bacia hidrográfica do rio Pomba, localizada entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, utilizando, para essa finalidade, o plugin Modelo de Grandes Bacias (MGB) acoplado ao software *Quantum Geographic Information System* (QGIS).

Encontra-se, no cenário acadêmico, uma vasta quantidade de autores que realizaram estudos tendo como base o MGB. Pereira et al. [50] apresentaram uma metodologia de integração do modelo hidrológico MGB e sistemas de informação geográfica (SIG) para auxiliar na tomada de decisões diante de pedidos de outorga de direito de uso da água. Já Fan et al. [20] trazem a derivação de um mapa de Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) para toda a América do Sul, com base nas informações de uso e tipo de solo em diferentes escalas, a ser aplicado diretamente em modelagens hidrológicas de grandes bacias hidrográficas, como é o caso modelo MGB.

Tem-se, ainda, os estudos de Correa et al. [16], donde propõe-se uma metodologia chamada *Hydrological Retrospective* (HR), a qual simula grandes conjuntos de dados de chuvas, usando estes como entrada para modelos como o MGB com o objetivo de desenvolver registros do passado hidrológico da região, tornando possível de analisar inundações e secas passadas. Aplicada a bacia da Amazônia, o uso dessa metodologia se mostrou eficaz no trabalho intitulado “*Hydrological Reanalysis Across the 20th Century: A Case Study of the Amazon Basin*”, incentivando seu uso em outras regiões [71].

Utilizando o MGB para estudos sobre processos hidrológicos e ambientais, Fleisch-

mann et al. [25] incluíram um esquema de acoplamento bidirecional e testaram diferentes estruturas do modelo, a fim de avaliar quais processos são importantes para serem simulados em grandes pântanos semi-áridos e como eles interagem com os componentes da água. Encontra-se, também, o trabalho de Lopes et al. [39], o qual desenvolveu-se com a intenção de investigar uma abordagem alternativa, a simulação de corpos hídricos com um só modelo hidrológico-hidráulico, o modelo MGB, avaliando a inclusão da influência do vento ao algoritmo inercial de propagação de vazões.

Por outro lado, Fan et al. [21] apresentam, em seu trabalho, alguns testes da aplicabilidade de uma solução numérica através de um esquema explícito do modelo inercial unidimensional, objetivando sua integração futura como módulo de propagação de vazões em modelos como o MGB. Já Schwanenberg et al. [56] mostram uma estrutura para a gestão de curto prazo de reservatórios operados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) ao longo de um horizonte de previsão de até 15 dias utilizando o MGB.

Realizam-se, também, estudos de efeitos e impactos de reservatórios no regime hidrológico de diversos sistemas, de geração de energia ao de barragens de controle de cheia. Como em Collischonn et al. [13], onde apresenta-se uma aplicação do modelo MGB à bacia do rio Quaraí-RS, na fronteira do Uruguai com o Brasil. Ou como em Fleischmann et al. [26], onde exhibe-se um extensivo exame dos papéis que as várzeas desempenham na condução dos formatos dos hidrogramas.

No ano de 2020, Breda et al. [7] avaliaram alterações médias das variáveis de balanço hídrico e vazão de rios na América do Sul, até o final deste século, usando dois cenários diferentes de Gases do Efeito Estufa (GEE), RCP4.5 e RCP8.5. De forma similar, anteriormente, Adam et al. [1] apresentaram o uso do modelo MGB para analisar o impacto das mudanças climáticas sobre as vazões mínimas e máximas, em diferentes locais de controle da bacia do rio Paraná.

Fleischmann et al. [24] ainda colaboram com uma adaptação do MGB para simular reservatórios como uma condição de contorno interna, permitindo a simulação explícita de processos hidrodinâmicos ao longo dos reservatórios e suas interações com planícies de inundação a montante e a jusante.

1.1 Justificativa

O estudo da bacia hidrográfica do rio Pomba torna-se relevante, uma vez que, o rio Pomba, principal curso d'água dessa bacia, o qual dá nome à mesma, teve mudanças em

sua estrutura devido a construção de hidrelétricas ao longo do seu trecho de drenagem, como as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) Ivan Botelho I, II e III, entrando em operação em 2003 e 2004 e a Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna em 2010, a 60 km de sua foz no rio Paraíba do Sul.

Essas construções resultaram na alteração da vazão experienciada, principalmente em períodos de chuvas intensas, nesses trechos e a jusante dos mesmos, modificando o cenário de inundações em diversas regiões.

Múltiplos trabalhos foram elaborados para esta região de interesse. Guedes et al. [31] avaliaram a qualidade da água e identificaram os grupos de poluição presentes na região do médio rio Pomba, através da técnica estatística multivariada. Enquanto Jacovine et al. [34] quantificaram as Áreas de Preservação Permanente (APP) e as Áreas de Reserva Legal (ARL) nas propriedades localizadas na microrregião da mata de Ubá, sub-bacia do rio Pomba, município de Rio Pomba-MG.

Por outro lado, Silva, Siqueira e Nogueira [60] determinaram possíveis impactos ambientais dos efluentes lácteos nos cursos d'água da bacia do rio Pomba. Já Farage et al. [22] avaliaram o grau de trofia do curso de água e o índice de estado trófico para fósforo (IET_{pt}) em nove diferentes pontos do rio Pomba, durante os períodos de chuva e estiagem.

Neste contexto, mas com diferente enfoque, emerge a possibilidade de se estudar a bacia hidrográfica do rio Pomba sob o ponto de vista das cheias e inundações utilizando-se do plugin MGB, um modelo ainda não aplicado à região de interesse.

1.2 Objetivos

Adiante são apresentados o objetivo geral desta dissertação de mestrado, bem como os objetivos específicos para cada etapa deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Diante do exposto na introdução e justificativa descritos anteriormente, o objetivo geral desse trabalho é analisar o comportamento hidrológico e hidráulico de uma bacia hidrográfica e sua rede de drenagem com base na utilização do plugin MGB acoplado ao software QGIS.

Para esse fim, será estudada a bacia hidrográfica do rio Pomba a partir dos dados de quatro de suas estações fluviométricas, localizadas em Guarani-MG, Astolfo Dutra-MG,

Cataguases-MG e Santo Antônio de Pádua-RJ.

1.2.2 Objetivos Específicos

Sendo assim, baseando-se no objetivo geral e na relevância do estudo para a região de interesse, os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- Construir, com base em um Modelo Digital de Terreno (MDT), um modelo da rede de drenagem da bacia do rio Pomba utilizando o plugin IPH-Hydro Tools no software QGIS;
- Delimitar a bacia hidrográfica do rio Pomba por meio do plugin IPH-Hydro Tools no software QGIS;
- Determinar as vazões em diferentes regiões da bacia hidrográfica do rio Pomba, bem como a duração de fluxo das mesmas, utilizando para isso o plugin MGB no software QGIS;
- Efetuar uma análise de sensibilidade dos parâmetros de solo do modelo MGB;
- Realizar a calibração manual dos parâmetros do modelo MGB;
- Realizar a calibração automática dos parâmetros do modelo MGB;
- Comparar os resultados das vazões obtidas através da solução do problema com base no plugin MGB, com os dados experimentais obtidos diretamente do site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para um período compreendido entre 2010 e 2020.

Além disso, pretende-se esclarecer alguns questionamentos conceituais que possam surgir, como:

- Os dados meteorológicos disponíveis na região são suficientes para simular as vazões adequadamente?
- Os dados de vazão registrados pela operação dos reservatórios são suficientes para calibração dos parâmetros do MGB?
- O que pode-se dizer a respeito da sensibilidade dos parâmetros de solo do plugin MGB?
- Os coeficientes de sensibilidade ajudaram na calibração?
- O modelo MGB pode ser aplicado na bacia do rio Pomba?

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho divide-se em 6 capítulos, sendo o primeiro a “Introdução”, onde é apresentado um panorama geral a cerca dos assuntos a serem discutidos nos capítulos seguintes.

No Capítulo 2, “Caracterização da Região de Interesse”, fala-se sobre os fenômenos naturais envolvendo o ciclo hidrológico, bacias hidrográficas e rede de drenagem e descreve-se o problema de inundações sobre um contexto global. Além disso, é feita a caracterização da região de interesse, a bacia hidrográfica do rio Pomba.

Já no Capítulo 3, “Modelagem Matemática e Solução do Problema Proposto”, em um primeiro momento, encontra-se as principais equações utilizadas para realizar a modelagem matemática do problema de escoamentos superficiais, posteriormente, descreve-se o plugin MGB, etapas para realizar uma simulação e o processo de calibração automática. Ainda é citado, neste capítulo, o conceito de análise de sensibilidade.

No Capítulo 4, “Pré-Processamento da Bacia Hidrográfica do Rio Pomba Utilizando o Plugin IPH-Hydro Tools”, apresentam-se todas as construções preliminares para a bacia do rio Pomba, com uma única sub-bacia e com três sub-bacias, necessária para realizar a simulação do escoamento na região de interesse.

A origem dos dados utilizados, assim como os resultados referentes à modelagem do problema de inundações antes e após as calibrações manual e automática, bem como a análise de sensibilidade dos parâmetros de solo do modelo são apresentados no Capítulo 5, “Resultados e Discussões”.

Finalizando esta dissertação, o Capítulo 6, “Conclusões e Trabalhos Futuros”, trata das conclusões obtidas através da modelagem hidrológica e hidráulica da bacia hidrográfica do rio Pomba, além das propostas e recomendações para estudos a serem realizados no futuro.

Capítulo 2

Caracterização da Região de Interesse

Nesse capítulo são descritos, brevemente, os fenômenos naturais envolvendo o ciclo hidrológico e sua relação com as bacias hidrográficas, bem como é feita a caracterização do estudo de caso dessa dissertação, a bacia hidrográfica do rio Pomba.

2.1 Bacias Hidrográficas

Parte integral do planeta Terra, a água é um componente essencial da natureza e de sua dinâmica, cooperando em todos os ciclos e sustentando a vida. Os seres humanos, assim como todos os outros organismos vivos, utilizam a água para suas funções vitais, além de a utilizarem, também, para produção de energia e alimentos, deslocamento, desenvolvimentos industrial, agrícola e econômico, entre outras diversas atividades. Sabe-se que somente cerca de 100 mil km³ (0,3% do total de água do planeta) encontra-se disponível para utilização pelo homem, armazenado em lagos, fluindo pelos rios e sendo a principal fonte de suprimento ampliado de águas subterrâneas [29].

Essa água superficial, instável e móvel, localizada em rios, lagos, tanques e represas, além das águas subterrâneas, em suas três fases (sólida, líquida e gasosa), compõe o perpétuo ciclo dinâmico da água. Para o homem, a fase líquida é a mais importante, onde ela se encontra pronta para sua utilização. Compondo o ciclo hidrológico, estão os processos de evaporação, precipitação, transpiração, percolação, infiltração e drenagem.

Cabe salientar que, todos os anos, estima-se que 47 mil km³ de água retornam aos oceanos partindo dos lagos, rios, represas e águas subterrâneas. Além disso, a distribuição não é homogênea durante o ano, nas diversas regiões do mundo, causando desequilíbrio e

desencadeando medidas de gerenciamento variadas para enfrentamento da escassez ou do excesso de água [51].

Toda a água precipitada é captada por áreas denominadas bacias hidrográficas, onde faz-se convergir o escoamento para um único ponto de saída. Segundo Tucci [68], a bacia hidrográfica é composta de uma coleção de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem constituída por cursos de água que confluem até um único leito em seu exutório.

Outras definições para bacia hidrográfica são encontradas e se assemelham à de Barrela [4], onde define-se como um conglomerado de terras drenadas por um rio e seus afluentes, concebida nas regiões de maior altitude do relevo por divisores de água, onde as águas das precipitações, ou correm superficialmente formando os rios e riachos, ou infiltram-se no solo para elaboração de nascentes e do lençol freático. Escoando pelos riachos para as partes mais baixas do terreno, as águas superficiais formam cabeceiras em terrenos íngremes das serras e montanhas e, a medida que descem, unem-se a outros cursos d'água, crescendo em volume e formando os primeiros rios, que continuam os seus caminhos recebendo água de outros secundários, formando rios ainda maiores até desembocarem no oceano.

Considera-se, então, a bacia hidrográfica como um ente sistêmico, onde realizam-se os balanços de água, de entrada proveniente da chuva e saída pelos exutórios, permitindo a delimitação das bacias e sub-bacias conectadas pelos sistemas hídricos. São nesses territórios que se praticam as atividades humanas, com todas as suas áreas urbanas, industriais, agrícolas e de preservação [52].

Dentro de uma bacia hidrográfica, definem-se como os fenômenos da natureza transformadores da paisagem e do espaço geográfico, os desastres naturais, os quais são oriundos de eventos extremos de precipitação. Estes, ao se intensificarem no meio urbanizado podem gerar situações de risco, gerando danos materiais de difícil reparo e, nos piores casos, ocasionando óbitos [61]. Segundo Marcelino [40], tais eventos estão presentes em mais de 80% dos municípios brasileiros, associados às instabilidades atmosféricas severas.

Como exemplo de problemas ocasionados pelos eventos extremos de precipitação, pode-se citar as inundações urbanas, as quais são uma ocorrência antiga tanto quanto qualquer aglomerado urbano, e elas acontecem quando as águas dos rios, riachos e galerias pluviais extravasam o leito de escoamento em decorrência da falta de capacidade de transporte de, pelo menos, um destes sistemas, ocupando as áreas onde a população reside, desloca-se, e utiliza para comércio, indústria e lazer [70].

Segundo Tucci [70], esses eventos podem ocorrer por duas causas, como consequência do comportamento natural dos rios ou acentuados pela ação humana de impermeabilização das superfícies e canalização dos rios no processo de urbanização.

A primeira destas ocorre de forma aleatória em função dos sistemas climáticos locais e regionais. Quando há forte precipitação e excede-se a capacidade de infiltração do solo, escoando-se grande parte do volume de água para a rede de drenagem, superando, assim, sua continência natural de escoamento. Este volume ocupa a várzea inundando-a de acordo com a topografia da região próxima ao rio.

Já a segunda, conforme a população de determinada área impermeabiliza o solo e, por meio de condutos e canais, acelera o escoamento, aumenta-se o volume de água que chega simultaneamente ao sistema de drenagem, provocando inundações com maior frequência do que as ocorridas no tempo em que a superfície era permeável com escoamento natural.

Diante do exposto, na seção seguinte (Seção 2.2), é caracterizada a região de estudos, a bacia hidrográfica do rio Pomba, e comentado sobre eventos críticos envolvendo as cheias do rio Pomba e sua respectiva bacia.

2.2 Bacia Hidrográfica do Rio Pomba

O rio Pomba nasce no município de Santa Bárbara do Turgúrio-MG, região da Mantiqueira, à 1.182 m de altitude e deságua à 55 m de altitude no rio Paraíba do Sul, na cidade de Aperibé-RJ. Dá origem a bacia hidrográfica do rio Pomba, a qual está localizada entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro ($21^{\circ}42'46.8''$ e $20^{\circ}52'3.''S$, $43^{\circ}45'27.4''$ e $41^{\circ}58'38.2''W$) [59] como mostrado na Figura 2.1.

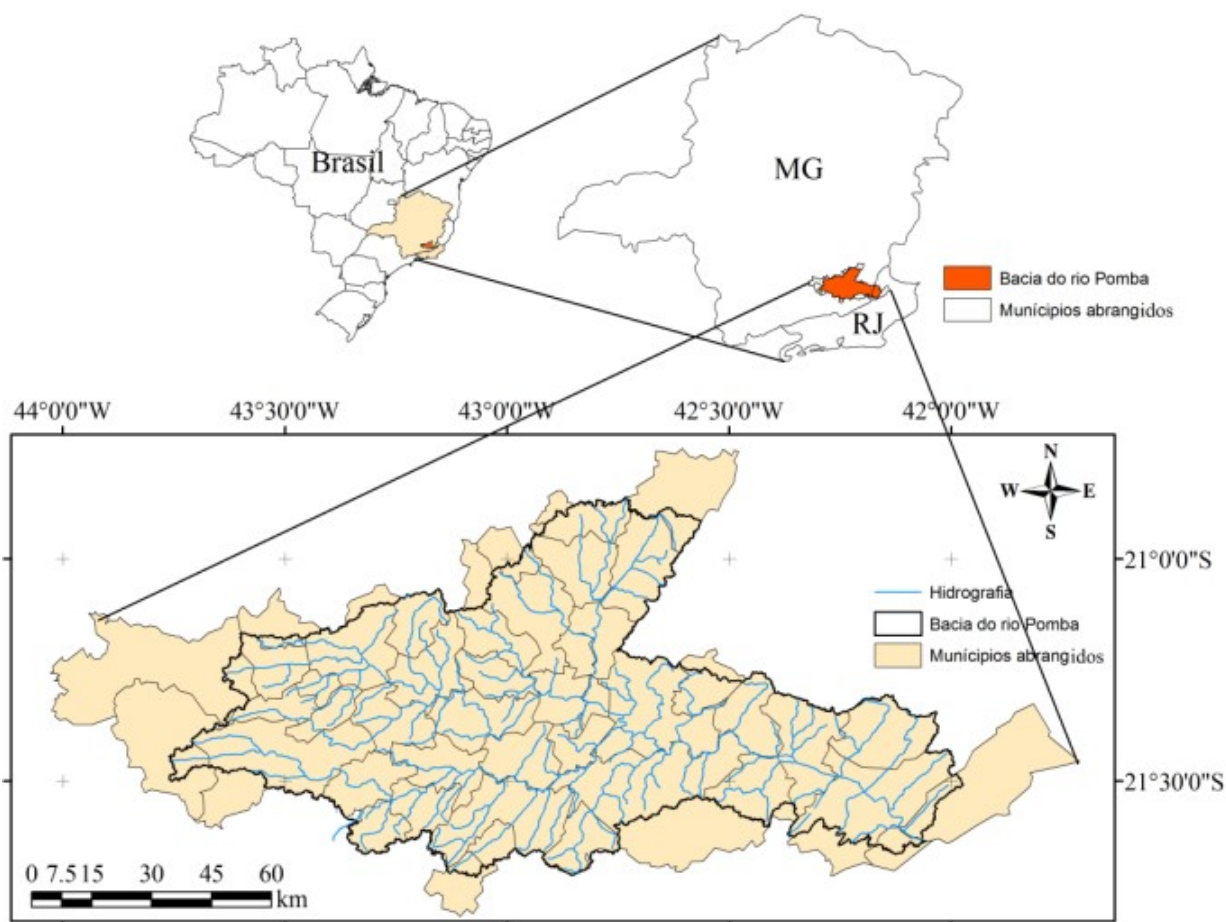


Figura 2.1: Localização da bacia hidrográfica do rio Pomba nos contextos regional, estadual e nacional.

Fonte: Pereira [49].

Segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul [2] a bacia do rio Pomba compreende uma área de drenagem de 8.616 km^2 , abrangendo cerca de 35 municípios mineiros e 3 municípios fluminenses, apresentando uso e ocupação do solo relativamente uniforme. Dentre esses municípios, os que possuem maior representatividade do ponto de vista populacional (mais de 20.000 habitantes) são: Santo Antônio de Pádua-RJ, Miracema-RJ, Cataguases-MG, Leopoldina-MG, Santos Dumont-MG, São João Nepomuceno-MG, Ubá-MG e Visconde do Rio Branco-MG. Na Figura 2.2 é possível ter uma visualização da distribuição populacional desta bacia hidrográfica.

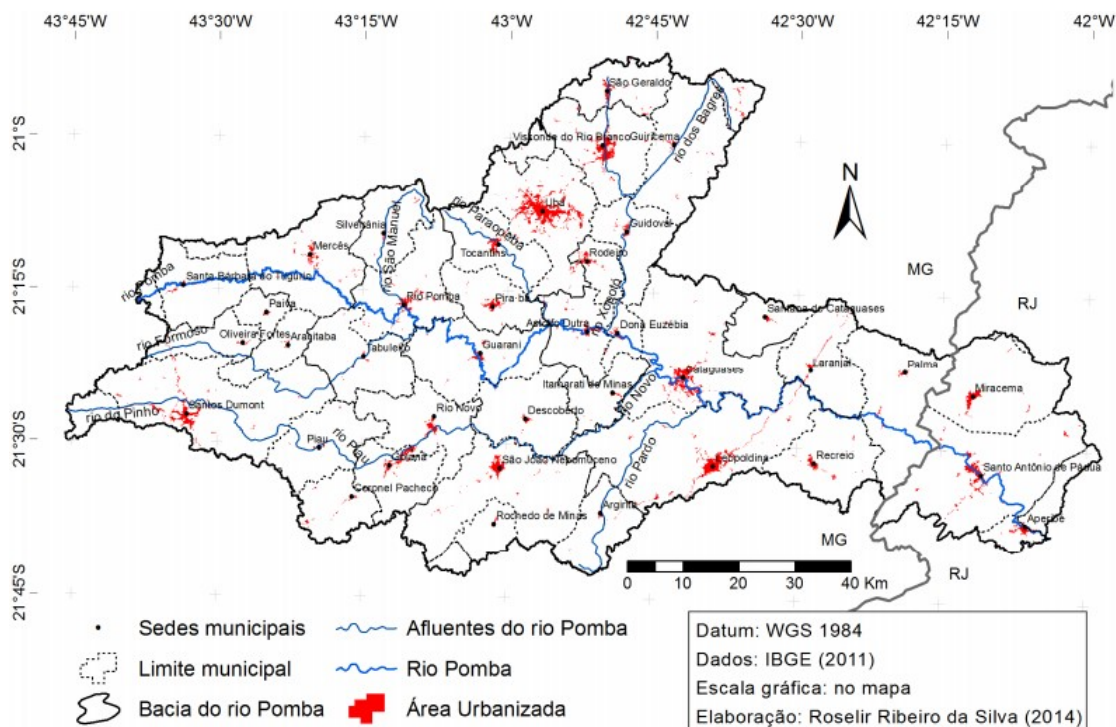


Figura 2.2: Localização dos municípios e da área urbanizada da bacia hidrográfica do rio Pomba.

Fonte: Silva [59].

Cabe destacar, ainda, que o processo de desmatamento, o qual teve origem no ciclo do café em toda Zona da Mata, deixou as terras da bacia do rio Pomba severamente desmatadas, não poupando nem mesmo as regiões das nascentes do rio [2]. Além disso, Lopes et al. [38] relatam que, apesar da importância da mata ciliar para o rio, esta encontra-se significativamente degradada, contribuindo para inundações urbanas, por exemplo.

Nesse contexto de inundações, destaca-se que as cheias ordinárias do rio Pomba atingem em geral a população invasora da calha do rio, denominada ribeirinha. Entretanto, há a ocorrência de cheias excepcionais, onde parcelas das áreas urbanas consolidadas em níveis mais altos também são invadidas pelas águas.

Como exemplos de cheias ocorridas na bacia do rio Pomba, pode-se citar os eventos na cidade de Santo Antônio de Pádua, nos anos de 2008, 2012 e 2020, localizada no noroeste fluminense. Ou, ainda, os ocorridos em março de 2020, onde chuvas causaram alagamentos e deixaram famílias desalojadas nas cidades de Cataguases-MG, Guarani-MG, Rio Pomba-MG, Santos Dumont-MG e Visconde do Rio Branco-MG. Na Figura 2.3 a seguir, estão ilustrados os casos relatados neste parágrafo.



Figura 2.3: Inundações em alguns municípios da bacia hidrográfica do rio Pomba.
Fonte: Portal G1¹.

Outro fator importante e relevante a ser destacado na bacia hidrográfica do rio Pomba, são os acúmulos de água formados pelas PCH's Ivan Botelho I, II, III e pela UHE Barra do Braúna, como exibidos na Figura 2.4. Tais reservatórios desempenham importante papel na retenção das águas das chuvas (isto foi levado em consideração, quando escolhidas as estações fluviométricas próximas e a jusante de cada um desses locais para a obtenção

¹Portal G1 - Disponível em: <<https://g1.globo.com/>>. Acesso em: 27 de ago. de 2021.

Capítulo 3

Modelagem Matemática e Solução do Problema Proposto

Neste capítulo, são discutidas as equações por trás da modelagem de eventos de precipitação e escoamentos superficiais. Além disso, expõe-se a cerca da solução do problema proposto, onde é apresentado um modelo de simulação hidrodinâmica, o Modelo de Grandes Bacias (MGB).

3.1 Modelagem Matemática de Escoamentos Superficiais

Referindo-se aos modelos matemáticos, variam-se as formulações, desde as unidimensionais, com as equações de Saint Venant [55], sendo esta deduzida a partir das equações da continuidade e conservação da quantidade de movimento (*Momentum*) aplicadas a um volume de controle no interior de um fluido em movimento, até as formulações tridimensionais, com as equações de Navier-Stokes aproximada para fluidos incompressíveis e com superfície livre [64].

Como descrito por Tucci [69], considerando-se um trecho dx de escoamento em uma superfície livre, assim como exposto na Figura 3.1, tem-se que a massa que entra na seção de montante é igual a $\rho Q dt$, para um intervalo de tempo dt . Nesse mesmo período de tempo, a massa que entra pela contribuição lateral é igual a $\rho q dx dt$. Já a massa que sai na seção de jusante é $\rho [Q + (\partial Q / \partial x) dx] dt$. Enquanto que a variação da massa armazenada neste intervalo dt é igual a $\rho (\partial A / \partial t) dx dt$.

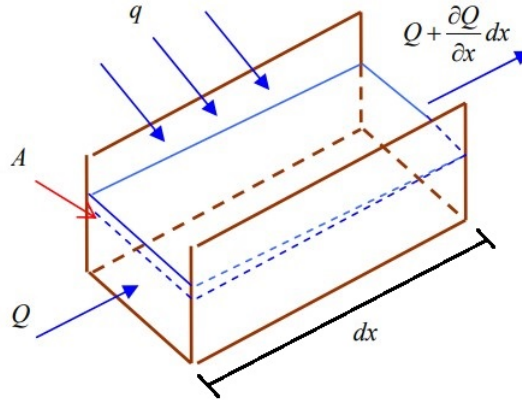


Figura 3.1: Representação esquemática de um balanço de massa em um trecho de rio de comprimento dx .

Fonte: Adaptado de Castanharo [10].

Dessa maneira, tem-se a equação de continuidade, baseada na conservação de massa, dada por:

$$\rho \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) dx dt = \rho Q dt + \rho q dx dt - \rho \left[Q + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) dx \right] dt \quad (3.1)$$

onde $x[m]$ e $t[s]$ são as variáveis espacial e temporal, respectivamente; $dx[m]$ é um trecho de escoamento; $t[s]$ é um intervalo de tempo; $Q[m^3/s]$ é a descarga do canal; $A[m^2]$ é a área da seção transversal; $q[m^2/s]$ é a vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento do trecho e $\rho[kg/m^3]$ é a massa específica.

Ainda, realizando a divisão dos termos da Equação (3.1) por dx e dt e considerando a massa específica (ρ) constante, a equação da continuidade é reescrita como:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (3.2)$$

A segunda das equações mencionadas, a da conservação da quantidade de movimento, conhecida também como equação dinâmica, que representa a interação das forças que agem sobre o escoamento, assim como a consequente aceleração do mesmo, segundo Fan [21], é composta por cinco principais termos, denominados inércia local, inércia advectiva, força peso devido à gravidade (F_g), força de atrito (F_f) e força de pressão (F_e).

Tomando como referência um trecho de escoamento dx , a quantidade de movimento (QM) em uma seção de área A é dada pelo produto da massa pela velocidade ($\rho v A = \rho Q$). Assim, a variação desta quantidade de movimento no tempo (termo de inércia local) é representada por:

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} dx \quad (3.3)$$

Por outro lado, o fluxo de QM através desta seção A que entra no trecho dx de rio é $\rho v^2 A = \rho Q^2 / A$, enquanto o que sai do mesmo é igual a $\rho Q^2 / A + [\partial(\rho Q^2 / A) / \partial dx] dx$ [69]. Daí, a quantidade de movimento resultante, ou termo de inércia advectiva, fica:

$$- \left[\frac{\partial(\rho Q^2 / A)}{\partial x} \right] dx \quad (3.4)$$

Já a força peso, devido à gravidade, é a componente do peso da água no sentido do escoamento, como mostrado na Figura 3.2, ou seja [69]:

$$F_g = \rho g A dx \sin \theta \quad (3.5)$$

onde $g[m/s^2]$ é a aceleração da gravidade.

Levando em consideração a aproximação para $\sin \theta \approx \tan \theta = S_0$, na Equação (3.5), tem-se o termo da força peso na direção longitudinal dado pela Equação (3.6):

$$F_g = \rho g A dx S_0 \quad (3.6)$$

onde $S_0[m/m]$ é a declividade do fundo do canal, ou seja, a diferença de elevação entre dois pontos no fundo do rio, dada em metros, distantes entre si em 1 metro.

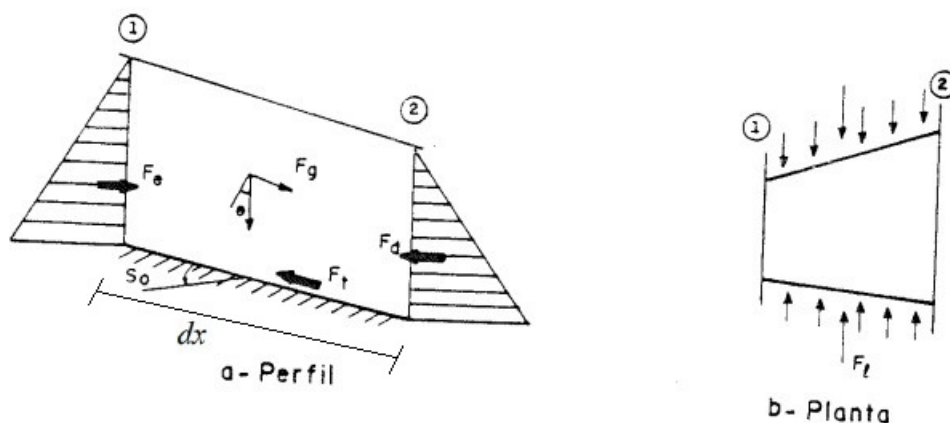


Figura 3.2: Termos usados na equação de quantidade de movimento.
Fonte: Adaptado de Tucci [69].

No que se refere a força de atrito, segundo Tucci [69], esta ocorre devido a resistência

das paredes, ao escoamento, dada pela Equação (3.7):

$$F_f = -\tau P_m dx \quad (3.7)$$

onde $\tau[N/m^2]$ é o esforço cortante, ou seja, a intensidade da força de cisalhamento na seção transversal, e $P_m[m]$ é o perímetro molhado (comprimento da região de contato entre as paredes do rio e a água).

Tem-se, ainda, que o esforço cortante é dado conforme na Equação (3.8):

$$\tau = \rho g R S_f \quad (3.8)$$

onde $R[m]$ é o raio hidráulico (quociente da área molhada pelo perímetro molhado) e $S_f[m/m]$ é a declividade da linha de energia.

Substituindo o esforço cortante, Equação (3.8), na Equação (3.7), tem-se o termo da força de atrito dado pela Equação (3.9).

$$F_f = -\rho g A S_f dx \quad (3.9)$$

Por fim, toma-se a força de pressão como sendo hidrostática a fim de estima-la. Dessa maneira, consideram-se as forças atuantes sobre os dois limites do trecho dx e, também, a força relativa à pressão resultante da variação da largura da seção ao decorrer deste trecho [69]. Portanto, atuando à esquerda (F_l) e à direita (F_r) do volume de controle, as forças hidrostáticas estão dadas, respectivamente, pelas Equações (3.10) e (3.11).

$$F_l = \int_0^y \rho g (y - h) B dh \quad (3.10)$$

$$F_r = F_l + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_0^y \rho g (y - h) B dh \right] dx \quad (3.11)$$

onde $y[m]$ é a profundidade do escoamento; $h[m]$ é a variável de integração e $B[m]$ é a largura da seção transversal.

Levando em consideração que $\int_0^y B dh = By = A$, a resultante dessas forças (que atuam nos limites do trecho), dadas pelas Equações (3.10) e (3.11), é igual a:

$$F_l - F_r = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^y \rho g(y-h) B dh \right) dx = -gA \frac{\partial \rho y}{\partial x} dx - \left[\int_0^y \rho g(y-h) \frac{\partial B}{\partial x} dh \right] dx \quad (3.12)$$

Já a força de pressão hidrostática resultante da modificação da largura da seção, a qual é alcançada tomando a integração no volume de controle obtido por $\rho g[(y-h)(\partial B/\partial x) dh dx]_{y=y_0}$, onde $y_0[m]$ é uma profundidade de referência entre o fundo do rio e a superfície livre ao longo do trecho. A Equação (3.13) expõe a força resultante (relacionada a variação da largura).

$$F_B = \int_0^y \rho g(y-h) \left[\frac{\partial B}{\partial x} \right]_{y=y_0} dh dx \quad (3.13)$$

Logo, o termo da força de pressão (hidrostática) é a soma das forças resultantes das Equações (3.12) e (3.13), dada pela Equação (3.14).

$$F_e = -gA \frac{\partial \rho y}{\partial x} dx \quad (3.14)$$

Finalmente, segundo Tucci [69], a variação da quantidade de movimento do trecho dx ao longo do tempo, Equação (3.3), é dada com base nas Equações (3.4), (3.6), (3.9) e (3.14), conforme descrito na Equação (3.15).

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} dx + \frac{\partial(\rho Q^2/A)}{\partial x} dx + gA \frac{\partial(\rho y)}{\partial x} dx = \rho g A S_0 dx - \rho g A S_f dx \quad (3.15)$$

Considerando ρ constante e realizando algumas simplificações, tem-se a equação da conservação da quantidade de movimento (ou equação dinâmica). Esta, aplicada a um volume de controle no interior de um fluido em movimento, está representada na Equação (3.16) [64].

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + Ag \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (3.16)$$

As Equações (3.2) e (3.16) formam as equações unidimensionais do escoamento ou equações de Saint Venant.

De acordo com Telles [65], as declividades do fundo do canal (S_0) e da linha de energia (S_f), são expressas nas Equações (3.17) e (3.18).

$$S_0 = -\frac{\partial z_f}{\partial x} \quad (3.17)$$

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{R^{4/3} A^2} \quad (3.18)$$

onde $z_f[m]$ é a elevação do fundo do canal em relação a um referencial único; $n[s/m^{1/3}]$ é o coeficiente que relaciona todos os elementos que opõem a resistência do canal ao fluxo (como o fundo e as margens do rio), também conhecido como coeficiente de rugosidade de Manning e os demais termos já foram explicitados anteriormente.

Levando em consideração que $z = z_f + y$, onde $z[m]$ é a elevação da superfície livre em relação a um nível referência específico (por exemplo, nível do mar), tem-se [69]:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z_f}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} \quad (3.19)$$

ou ainda:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 \quad (3.20)$$

Considerando, ainda, que o rio possui uma seção transversal retangular com largura B , tem-se $A = By$, e que S_f é estimado pela equação empírica de Manning, Equação (3.18), após desprezar-se o segundo termo da Equação (3.16), tem-se a equação dinâmica simplificada (Equação (3.21)):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g(By) \frac{\partial z}{\partial x} + g(By) \frac{Q^2 n^2}{(By)^2 R^{4/3}} = 0 \quad (3.21)$$

Assim, para os canais naturais, os quais possuem largura (B) maior do que sua profundidade (y), o perímetro molhado (P_m), pode ser aproximado por B , e com isso, pode-se tomar o raio hidráulico (R) igual à profundidade (y), ou seja, $R = A/P_m = By/B = y$. Daí, a Equação (3.21) é modificada e reescrita como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g(By) \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{Q^2 n^2}{By^{7/3}} = 0 \quad (3.22)$$

Portanto, tem-se o modelo inercial baseado na combinação das equações da continuidade (Equação (3.2)) e da quantidade de movimento (Equação (3.22)), o qual será utilizado para calcular o escoamento da água através da rede de drenagem e considerado

como uma simplificação das equações de Saint Venant.

As equações de Saint Venant, da forma em que foram descritas nas Equações (3.2) e (3.22) aplicadas a escoamentos não-permanentes, requerem, de acordo com Porto [53], técnicas numéricas ou analíticas elaboradas para a sua solução, para mais de uma significativa quantidade de dados hidráulicos do canal.

Neste trabalho, é empregado o plugin MGB para simular o escoamento na bacia do rio Pomba, o qual tem como base as equações de Saint-Venant (Equações (3.2)-(3.22)), que, por sua vez, são resolvidas aplicando um esquema numérico descrito por Bates et al. [5].

3.2 Solução do Problema Proposto

Na sequência, é feita uma descrição do plugin MGB (o qual é utilizado para a realização da modelagem da bacia hidrográfica do rio Pomba proposta nesta dissertação), bem como das etapas para se realizar uma simulação e do processo de calibração automática.

As informações contidas nas subseções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3 tem como fonte os manuais do Curso de Capacitação Tecnológica para Aplicações e Desenvolvimento [3, 14], de março de 2020, entre outras informações disponibilizadas online pelo grupo de pesquisa Hidrologia de Grande Escala (HGE), parte do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Demais fontes bibliográficas são citadas no decorrer do texto.

3.2.1 O Plugin MGB

O Modelo de Grandes Bacias (MGB) foi elaborado no contexto do projeto “Cooperação em Tecnologias para Análises Hidrológicas em Escala Nacional” para a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), sob desenvolvimento do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Collischonn (2001) e Collischonn et al. (2007) apresentaram a primeira versão do MGB, sendo esta modificada ao longo dos anos com diversas melhorias conceituais introduzidas por Buarque et al. (2008), Paiva et al. (2011), Pontes et al. (2017) e Fleischmann et al. (2018).

Este modelo foi desenvolvido para aplicações em grandes bacias hidrográficas e, segundo o grupo de pesquisa do MGB, estas são regiões geralmente maiores do que 1.000 km², onde o tempo de viagem da água na rede de drenagem seja longo e que os pro-

cessos de atenuação de ondas de cheias e translação sejam relevantes no entendimento das dinâmicas da bacia, sendo desprezada a diferença entre os divisores de água subterrânea e superficial, nos locais em que não se consideram homogêneas, para toda a área, as condições de chuva e outras características como tipo e uso do solo, onde necessita-se do apoio de técnicas de sistemas de informação geográfica (SIG) e sensoriamento remoto devido a difícil caracterização do terreno por meio de medições puramente *in-situ*, ou seja, medições realizadas no lugar.

O modelo de simulação hidrológica MGB utiliza-se de equações de base física e conceitual, dividindo a bacia hidrográfica em muitas unidades espaciais menores (discretização), chamadas de células ou minibacias e trechos de rios, simulando o ciclo hidrológico terrestre, a partir de dados como a precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica, com o intuito de se estimar séries temporais de vazões ao longo da rede hidráulica, bem como outras variáveis: níveis d'água, evapotranspiração e áreas inundadas. Na Figura 3.3 é apresentada uma representação esquemática do ciclo hidrológico simulado pelo MGB.

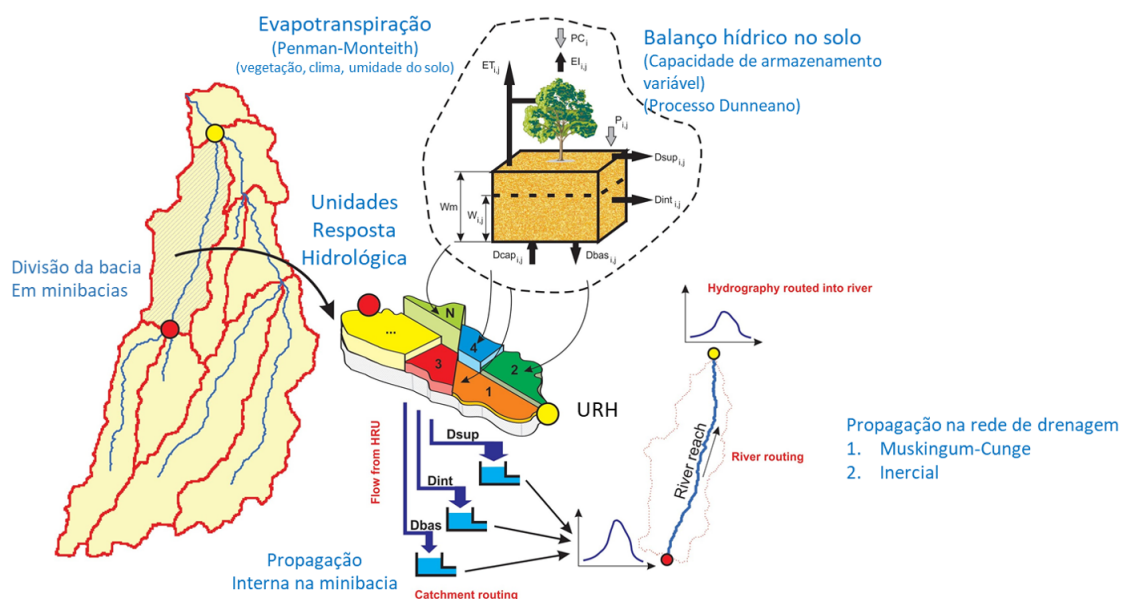


Figura 3.3: Resumo do funcionamento do MGB.

Fonte: Adaptado do Manual de Referência Teórica do MGB [14].

No modelo MGB, o escoamento por toda a extensão da rede de drenagem principal representa-se com maior precisão física através de uma das duas opções: ou o modelo Muskingum-Cunge, ou o modelo inercial [14].

quantidade de movimento, Equação (3.22), contudo, se faz o cálculo da derivada espacial nas faces de cada célula. O resultado da aplicação deste esquema numérico é descrito nas Equações (3.23) e (3.24).

$$Q_i^{t+1} = \left(\frac{(Q_i^t) - gB\Delta t(yflow_i Sflow_i)}{\left(1 + \frac{g\Delta t yflow_i (Q_i^t)^2}{B(yflow_i)^{10/3}}\right)} \right) \quad (3.23)$$

$$V_i^{t+1} = V_i^t + \left[\left(\sum Q_{in}^t \right) - \left(\sum Q_{out}^t \right) + \left(\frac{(P_i^t - Evq_i^t) A_{fl_i}^t}{1000} \right) \right] \Delta t \quad (3.24)$$

onde $V_i^{t+1}[m^3]$ é o volume total armazenado no canal e planície de inundação na minibacia i ao final de um passo no tempo; $V_i^t[m^3]$ é a totalidade do volume armazenado no canal e planície de inundação na minibacia i ao início de um passo no tempo; $\sum Q_{in}^t$ é o somatório de vazões de entrada no segmento, incluindo a vazão de segmentos de drenagem que estão localizados a montante e a vazão gerada na própria minibacia i ; $\sum Q_{out}^t$ é o somatório de vazões de saída; $Evq_i^t[mm/\Delta t]$ é a perda por evaporação na área inundada; $P_i^t[mm]$ é a precipitação direta sobre a área inundada; e $A_{fl_i}^t[m^2]$ é a área inundada na minibacia i , no início do intervalo de tempo Δt , incluindo a calha do rio e a planície de inundação.

Além disso, a variável $yflow_i[m]$ faz alusão à profundidade na seção transversal que está localizada entre as minibacias i e $i + 1$. Dessa forma, pode-se estimar $yflow_i$ através da Equação (3.25):

$$yflow_i^t = \max[y_{i+1}^t + y_{f_{i+1}}, y_i^t + y_{f_i}] - \max[y_{f_{i+1}}, y_{f_i}] \quad (3.25)$$

Por sua vez, a declividade da linha de água, representada pela a variável $Sflow_i[m/m]$, é dada pela Equação (3.26):

$$Sflow_i^t = \frac{(y_{i+1}^t + y_{f_{i+1}}) - (y_i^t + y_{f_i})}{\Delta x} \quad (3.26)$$

Por fim, ao utilizar-se um esquema numérico explícito para a solução do modelo inercial, necessita-se tratar da estabilidade do modelo, estando este sujeito a uma limitação de tamanho do intervalo de tempo, a fim de evitar a instabilidade numérica nos cálculos realizados.

De acordo com Bates et al. [5], para que ocorra a estabilidade numérica no modelo, o adimensional número de Courant (Cr), dado pela Equação (3.27), deve ser menor do que 1.

$$C_r = V_c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (3.27)$$

onde $V_c[m/s]$ é a velocidade característica.

Para o caso de águas rasas, onde, devido às simplificações, o termo de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento (Equação 3.15) é ignorado, essa velocidade é dada por:

$$c = \sqrt{gy} \quad (3.28)$$

onde $c[m/s]$ é a celeridade, a qual é interpretada, segundo Chow [12], como a velocidade de deslocamento da onda em relação a água (referencial) ou, ainda, como \sqrt{gy} , de acordo com Bates [5], ao se tratar de uma onda longa caracterizada como sendo de gravidade e de pequena amplitude.

Logo, no que tange ao critério de estabilidade do modelo inercial utilizado pelo MGB, o valor adotado para Δt deve estar em conformidade com a condição de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), descrita na Equação (3.29):

$$(\sqrt{gy}) \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1 \quad (3.29)$$

Ao longo da simulação no modelo MGB, escolhe-se, internamente, o valor adequado do intervalo de tempo, de forma que, a cada passo no tempo durante o cálculo do modelo inercial, identifica-se a minibacia de maior profundidade, ou seja y_{max} , e defini-se o Δt para o passo seguinte conforme a Equação (3.30):

$$\Delta t = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{gy_{max}}} \quad (3.30)$$

em que $\alpha < 1$ pode ser definido pelo usuário.

Entretanto, Bates et al. [5], com base em algumas simulações realizadas com o intuito de investigar a instabilidade do modelo, recomendam que o valor de α esteja limitado a valores entre 0,3 e 0,7. Para este trabalho, utilizou-se $\alpha = 0,3$ devido as indicações contidas na própria literatura do MGB [14].

3.2.2 Procedimentos para Simulação no MGB

Para realizar uma simulação no Modelo de Grandes Bacias (MGB), faz-se um pré-processamento dos arquivos de entrada com o pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools, o qual também é um plugin para o software de SIG *Quantum GIS* (QGIS), utilizado como interface para o modelo MGB. São gerados arquivos caracterizadores do terreno, nesta etapa, como delineamento da bacia hidrográfica e de minibacias, rede de drenagem e definição das classes de resposta hidrológicas.

Entre outros arquivos de dados, a partir das informações obtidas, é gerado o arquivo “MINI.gtp”, o qual tem grande relevância para o processo, por concentrar informações como área de drenagem a montante, comprimento do trecho de rede, coordenada do centroide com suas *features* e suas respectivas IDs, entre outros, sobre cada uma das minibacias em que foi discretizada a bacia alvo do estudo. Torna-se fundamental este arquivo de topologia para as etapas posteriores de preparação de dados do modelo hidrológico e de simulação através do MGB. A seguir, são descritos de forma mais detalhada os principais passos do pré-processamento.

Em um primeiro momento, é de grande importância adquirir um arquivo *Shapefile* da bacia que se deseja modelar. Isto pode ser feito através do portal de metadados do site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)¹. Na Figura 3.5 é mostrada a página inicial deste site.

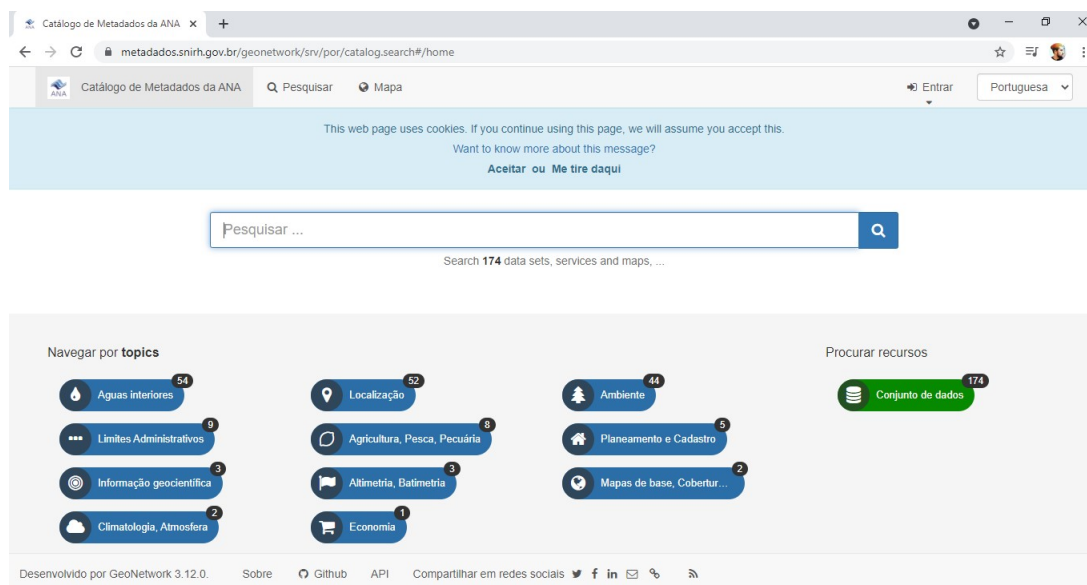


Figura 3.5: Página inicial do site da ANA.

Fonte: O Autor.

Inseri-se, então, o arquivo *Shapefile* da rede de drenagem da bacia do rio estudado sobre uma camada de localização geográfica. Vale atentar que a identificação do trecho principal do rio é de grande valia, e isto pode ser feito através da tabela de atributos do arquivo *Shapefile* da bacia hidrográfica, caso esta tenha sido obtida pelo site da ANA, mencionado anteriormente. Caso contrário, deve-se verificar, na fonte, as possibilidades do arquivo adquirido.

Em seguida, pela ferramenta virtual do *Google Earth Engine Explorer*, pode-se obter um arquivo (do tipo *Raster*) do modelo digital de elevação do terreno (MDE) da região de interesse buscando por “*SRTM Digital Elevation Data Version 4*”. Na Figura 3.6, abaixo, é exibida a referida ferramenta com a busca mencionada.

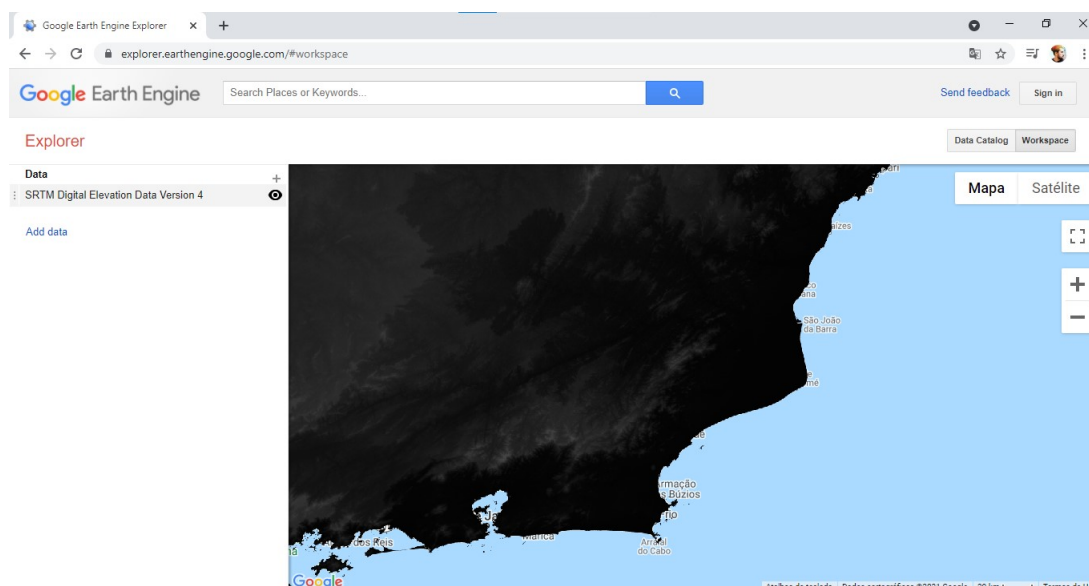


Figura 3.6: Página do “*Google Earth Engine Explorer*” exibindo o resultado da busca por “*SRTM Digital Elevation Data Version 4*”.

Fonte: O Autor.

Adiciona-se ao software QGIS o arquivo *Raster* do modelo digital de elevação (MDE) para visualização no mapa e realizam-se alguns procedimentos a fim de melhorar os arquivos da região a ser trabalhada. Cria-se, então, uma “máscara” com o objetivo de reduzir a região a ser modelada pelo software e se extrai o MDE para a região delimitada pela “máscara”. Daí, usa-se a ferramenta “*Sink and Destroy*” para remover as depressões e se obter o mapa das direções de fluxo. Finalizando essa etapa, utiliza-se a função “*Flow Accumulation*” gerando um mapa de acúmulo de fluxo.

Posteriormente, através da ferramenta do IPH-Hydro Tools, “*Stream Definition*”,

¹Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/>>. Acesso em: 28 de ago. de 2021.

elabora-se o arquivo da rede de drenagem para a região desejada, podendo este ser mais ou menos denso de acordo com o limiar escolhido.

Na sequência, adicionam-se os exutórios ao mapa, no formato *Shapefile*, de acordo com a proposta pretendida e, adiante, vale-se da ferramenta “*Watershed Delineation*” para delimitar a bacia hidrográfica e extrair a rede de drenagem para esta delimitação da bacia recém obtida.

Necessita-se, então, seccionar a bacia (discretizar). Nesta etapa do pré-processamento, indica-se, preferencialmente, optar pela opção “*Fixed Length Segmentation*”, visto que esta, apesar de também realizar a segmentação em função das confluências, respeita o comprimento estipulado pelo usuário, além de ser indispensável para funcionamento do modelo inercial do MGB.

Em seguida, delimitam-se as minibacias através da função “*Unit-catchments Delineation*”. Depois, realiza-se a transformação desses arquivos *Raster* da bacia hidrográfica e das minibacias para um arquivo vetorial (*Shapefile*).

Já a penúltima etapa do pré-processamento é destinada à inclusão das unidades de resposta hidrológica (URHs). Aqui, é possível utilizar um mapa já desenvolvido por Fan et al. [20] e disponibilizado no site do grupo de pesquisa do MGB. Então extrai-se parcela do referido mapa para a área de interesse com a ferramenta “*Extract by Polygon*”.

Conclui-se o pré-processamento através da função “*MGB-Processing*”, onde, a partir dos arquivos gerados anteriormente, elabora-se, entre outras fichas, o arquivo “*MINI.gtp*”, que condensa todas as informações topológicas da bacia. Vale ressaltar que nesta etapa, para qualquer outra região de interesse, necessita-se de uma análise mais cuidadosa das relações geomorfológicas, através de levantamentos de diversos perfis transversais do rio para formulação de uma curva, a qual, a equação geradora, retorna os parâmetros a serem usados. Essas relações regem como o modelo estima as larguras e profundidades dos trecho de rio, assumindo uma relação com a área de drenagem da bacia.

Com as etapas de pré-processamento finalizadas, inicia-se a utilização do plugin MGB com a ferramenta “*HRCs description*” onde associa-se um código para cada uma das unidades de resposta hidrológica (URHs) com base na descrição apropriada para o mapa de URHs adquirido anteriormente. Para esta etapa, é possível utilizar a relação sugerida pelos idealizadores do MGB, Figura 3.7.

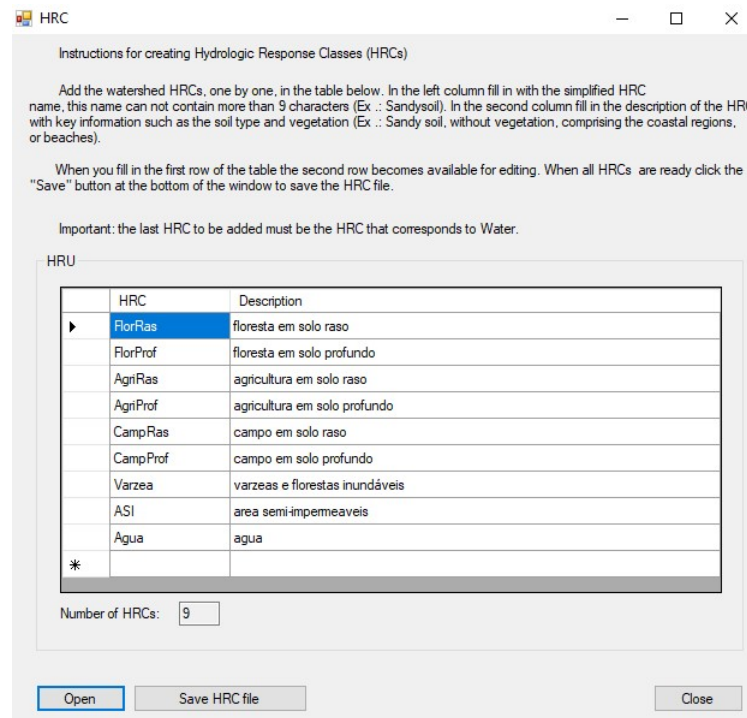


Figura 3.7: Descrição das URHs sugerida pelos idealizadores do MGB.
Fonte: O Autor.

Em seguida, necessita-se realizar o *download* dos dados de chuva e de vazão, sendo este usado, principalmente, para posterior validação e calibração do modelo. Nesta etapa de preparação para utilização do modelo MGB pode-se contar com o auxílio da opção “*ANA data Acquisition*”, a qual adquire os dados diretamente da base de dados do site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Após a obtenção dos dados de chuva, os mesmos são interpolados através da função, do plugin MGB, chamada “*Precipitation/Using ANA data (Brazil)*”. Também adicionam-se as estações fluviométricas às suas respectivas minibacias. Neste passo, é fundamental a checagem dos códigos (IDs) das minibacias e, caso estas estejam desatualizadas, atualizam-se os IDs utilizando a ferramenta “*Update Unit-catchments Polygon*”.

O próximo passo é inserir as variáveis climáticas com a opção “*Climate variables/Using INMET climatology database (Brazil)*”. Primeiro, cria-se um arquivo *Shapefile* com todos os postos de informações sobre clima disponíveis na base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Depois, selecionam-se somente as estações dentro da região da bacia hidrográfica alvo do estudo, para a criação de um arquivo com as informações climáticas.

Agora, se preenchem os parâmetros de vegetação na opção “*Vegetation Parameters*”

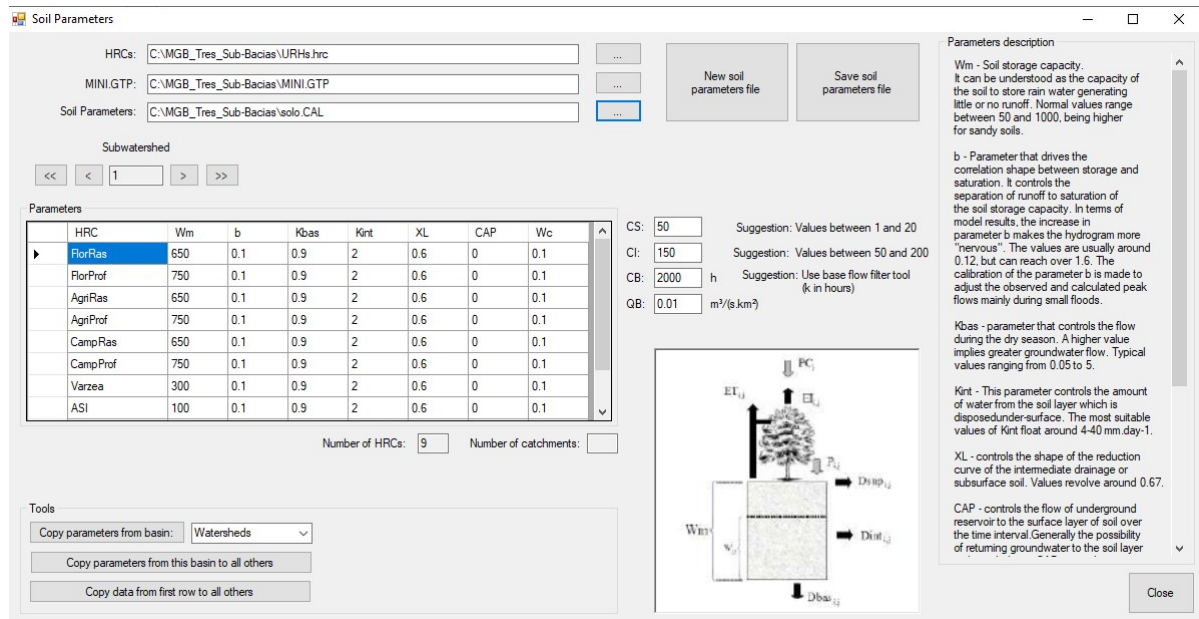


Figura 3.9: Parâmetros de solo sugeridos no manual do MGB para uma sub-bacia.
Fonte: O Autor.

Por fim, é gerado o projeto com a ferramenta “*Create/Edit Simulation Project*”, a partir da inserção do MINI.gtp, do COTA_AREA.flp (quando se deseja utilizar o modelo inercial do MGB) e dos arquivos de dados das URHs, de precipitação, de vazões observadas, de clima, de vegetação e de solo. Logo depois, através do instrumento “*Run Simulation*”, efetua-se a simulação selecionando o projeto criado.

Dentre os possíveis resultados a serem observados dentro da aba de opções “*Results*” do plugin do MGB, após a simulação, encontram-se os gráficos comparativos dos hidrogramas observados e simulados, das durações das vazões observadas e simuladas, entre outros.

3.2.3 Calibração Automática

Esta subseção teve como base as instruções fornecidas no Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB 2018 Utilizando o IPH-Hydro Tools [42].

Inicialmente, cabe salientar que para maior efeito da calibração automática, é requerido um conhecimento prévio da região de ótimo de cada parâmetro, a qual pode ser obtida através da calibração manual. Se os valores usados no modelo estiverem gerando pontos muito distantes daqueles considerados “ótimos”, a calibração automática não será capaz de fornecer bons resultados.

Dito isso, inicia-se esse processo acessando a primeira aba da janela de calibração

automática, onde faz-se necessário indicar o arquivo com as URHs e o arquivo contendo os parâmetros do solo do modelo a ser calibrado. Na Figura 3.10, visualiza-se esta janela principal.

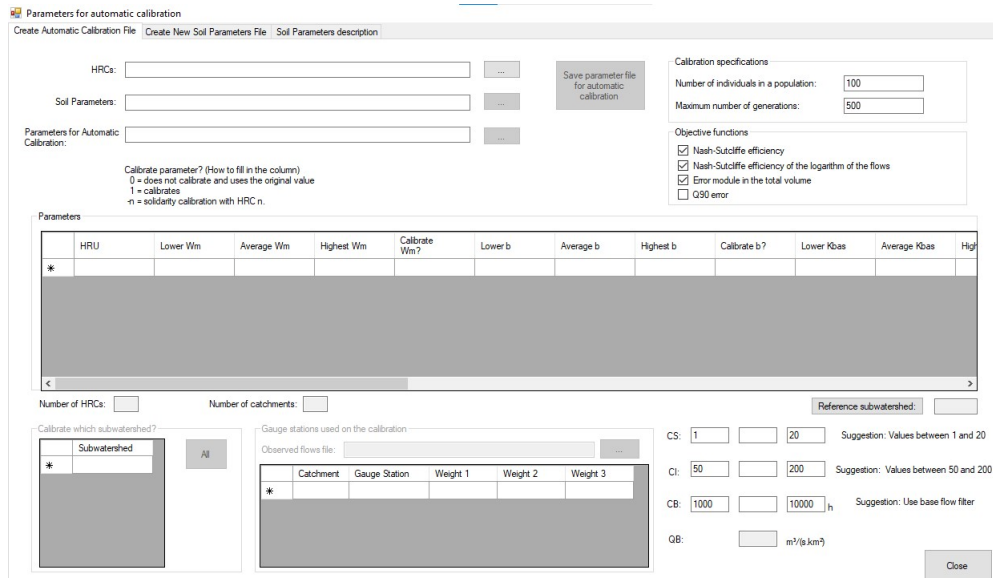


Figura 3.10: Janela principal do processo de calibração automática do modelo MGB.
Fonte: O Autor.

Pode-se, nesta janela (Figura 3.10), identificar os parâmetros calibráveis do modelo, assim como, os valores máximos, mínimos e médios que estes poderão assumir ao longo da calibração automática, para cada uma das sub-bacias construídas durante a etapa de pré-processamento. Dessa forma, seleciona-se a sub-bacia a ser utilizada como referência e os valores para a calibração são escolhidos conforme a preferência do usuário para a região selecionada. Os parâmetros passíveis de calibração no MGB são:

- W_m [mm]: Capacidade de armazenamento de água no solo;
- b [$-$]: Relação entre fração de área saturada e armazenamento médio de umidade no solo;
- K_{bas} [mm/dia]: Parâmetro de escoamento subterrâneo (controle de volume na recessão e estiagem);
- K_{int} [mm/dia]: Parâmetro de escoamento subsuperficial (drenagem intermediária);
- XL [$-$]: Parâmetro que controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subterrânea;

- W_c [—]: Fração de W_m a qual, abaixo, não há geração de escoamento subterrâneo e subsuperficial;
- CAP [mm/dia]: Fluxo de retorno da camada subterrânea para o solo, conhecido como capilaridade;
- CS [—]: Parâmetro para calibração da propagação superficial, multiplicativo do tempo de concentração;
- CI [—]: Parâmetro para calibração da propagação subsuperficial, multiplicativo do tempo de concentração;
- CB [$dias$]: Parâmetro de retardo do reservatório subterrânea;
- QB [$m^3/s.km^2$]: Não é um parâmetro de fato, mas sim uma condição inicial do modelo, com valor igual a 0,01.

Diferentes indicadores são utilizados para definir como será a calibração dos parâmetros de solo. Como exemplo, no conjunto de células referentes aos parâmetros “ W_m ”, caso não se deseje calibrá-lo para alguma URH, indica-se o valor “0” na coluna “Calibrar W_m ?”, na linha desta URH, caso contrário, utiliza-se o valor “1”. Ainda há a possibilidade de realizar a chamada “calibração solidária”, onde tomam-se valores para este parâmetro com base no multiplicador da calibração de outro, selecionando o valor “-X”, onde “X” representa a linha que será tomada como referência para a calibração solidária deste coeficiente.

Deve-se indicar quais sub-bacias serão calibradas ao mesmo tempo. Atenta-se para o fato de que melhores resultados poderão ser obtidos caso calibrem-se as sub-bacias individualmente.

Ainda nesta etapa de preparação para a calibração automática, necessita-se carregar o arquivo de vazões observadas e indicar, através do valor “1”, quais os postos fluviométricos que serão calibrados. Usa-se o valor “0” para aqueles postos que não possuem dados confiáveis para o procedimento de calibragem do modelo.

Na sequência, após clicar no botão “*Save parameter file for automatic calibration*”, pode-se criar um novo projeto indicando que, neste, haverá calibração automática, ao selecionar o arquivo recém criado na opção “*Parameters for Automatic Calibration*”.

Finalmente, na janela “*Run Simulation*”, seleciona-se o projeto criado e a opção de calibração “*Automatic*”. Portanto, será realizada a simulação com a calibração automática,

tomando bem mais tempo do que a calibração realizada manualmente. Por este fator, costuma-se utilizar o modelo Muskingum-Cunge do MGB nesta etapa.

Posteriormente à simulação, tem-se criado o arquivo temporário “EVOLUTION.txt”, o qual será carregado na segunda aba da janela de calibração automática, denominada “*Create new calibration parameter file*”, e usado para se criarem novos parâmetros de solo para o modelo, com base nos fatores de multiplicação estabelecidos pelo método de otimização utilizado no MGB.

Então, seleciona-se a linha desejada, após a análise dos valores encontrados para as funções objetivos utilizadas, e clica-se em “*Create new calibration calibration parameters file with the selected row*”.

Dessa maneira, após a realização dos processos mencionados anteriormente, retorna-se à janela “*Project*”, onde um novo projeto será criado indicando o novo arquivo de parâmetros do solo (criado como apontado no parágrafo anterior) e deixando em branco a aba do arquivo de calibração automática. Após execução deste novo projeto na opção “*Run Simulation*”, podem-se conferir os resultados obtidos após o procedimento tratado nesta subseção.

Nesta dissertação, o processo de calibração automática, realizado pelo plugin MGB, consiste no uso do método de otimização *Multi-Objective Complex Evolution* (MOCOM-UA) descrito com detalhes no relatório “*A multiobjective global optimization algorithm with application to calibration of hydrologic models*” [72] - para a minimização das funções objetivo *Nash-Sutcliffe efficiency* (Nash), *Nash-Sutcliffe efficiency of the logarithm of the flows* (Nash-Log) e *Error module in the total volume* (Bias) aplicadas às vazões simuladas e às vazões observadas obtidas no site da ANA.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash), como uma função objetivo, vem sendo amplamente utilizado por pesquisadores para quantificar o desempenho de um modelo [17]. Este parâmetro verifica a dinâmica e o ajuste dos picos da vazão, variando de infinito negativo (valores negativos demonstram uma simulação inadequada) até o valor 1, o qual representa uma simulação perfeita [46]. Na Equação (3.31), exibe-se como é realizado o cálculo deste coeficiente e os seus componentes.

$$Nash = 1 - \frac{\sum (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum (Q_t^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2} \quad (3.31)$$

onde Q_t^{obs} é a vazão observada no tempo t ; Q_t^{sim} é a vazão simulada no tempo t e $\overline{Q^{obs}}$ é

a média da vazão ao longo do período observado.

De forma similar, utiliza-se também o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para logaritmos das vazões (Nash-Log), dado pela Equação (3.32). Este também tem o valor máximo igual a 1 e sofrendo influência, principalmente, dos erros nas vazões mínimas (recessões e estiagens) [36].

$$Nash-Log = 1 - \frac{\sum (\ln(Q_t^{obs}) - \ln(Q_t^{sim}))^2}{\sum (\ln(Q_t^{obs}) - \ln(\overline{Q^{obs}}))^2} \quad (3.32)$$

Tem-se ainda o método do erro médio (Bias), conhecido como tendência ou viés segundo Celeste e Chaves [11], calculado conforme a Equação (3.33):

$$Bias = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_t^{obs} - Q_t^{sim}) \quad (3.33)$$

onde T é o número total de passos no tempo.

Em resumo, pode-se classificar o nível de performance da simulação do modelo hidrológico e suas calibrações através dos valores obtidos para as funções de avaliação mencionadas anteriormente, tomando como base a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação de performance dos indicadores de qualidade da simulação com modelos hidrológicos para a vazão.

Classe de Performance	Nash	Bias (%)
Muito Bom	$Nash > 0,80$	$ Bias \leq 5$
Bom	$0,70 < Nash \leq 0,80$	$5 \leq Bias < 10$
Satisfatório	$0,50 < Nash \leq 0,70$	$10 \leq Bias < 15$
Insatisfatório	$Nash \leq 0,50$	$ Bias \geq 15$

Fonte: Adaptado de Moraes [44].

Cabe ressaltar que, no processo de calibração dos parâmetros de um modelo, um passo preliminar importante é a análise da influência que tais parâmetros tem na variável de estado, nesse caso, no comportamento da vazão do rio. Esse processo de verificação pode ser feito por meio da chamada análise de sensibilidade, a qual é descrita na Seção 3.3.

3.3 Análise de Sensibilidade

Na resolução de problemas, como o proposto nesta dissertação, faz-se uso de modelos matemáticos que, constantemente, dependem de uma série de parâmetros. Silva et al. [57] relatam que a análise de sensibilidade desempenha um importante papel na estimativa desses coeficientes de interesse, já que ela possibilita analisar o comportamento do modelo matemático diante das variações realizadas nesses parâmetros.

Além disso, este tipo de análise (a de sensibilidade), permite avaliar se múltiplos parâmetros possuem independência entre si, tornando possível a estimativa dos mesmos simultaneamente. Isto é verificado, graficamente, quando os coeficientes de sensibilidade não apresentam o mesmo perfil, do contrário esses parâmetros estudados estarão correlacionados e desempenharam a mesma influência sobre o modelo [62].

Segundo Beck e Arnold [6], encontra-se um coeficiente de sensibilidade através da primeira derivada parcial de uma variável em relação ao parâmetro de interesse, como expresso na Equação (3.34).

$$X_i^j(t_j, \vec{\gamma}, \vec{\phi}) = \frac{\partial \Omega(\vec{t}, \vec{\gamma}, \vec{\phi})}{\partial \phi_i}, i = 1, \dots, m \quad e \quad j = 1, \dots, Nd \quad (3.34)$$

onde $\Omega(\vec{t}, \vec{\gamma}, \vec{\phi})$ representa uma variável de estado do modelo, que para esta dissertação é a vazão de água nos principais rios que compõe a rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Pomba; t_j é o instante de tempo de obtenção do dado experimental; $\vec{\gamma}$ é o vetor dos parâmetros conhecidos (parâmetros de configuração do plugin MGB acoplado ao software QGIS); $\vec{\phi}$ é o vetor dos parâmetros que serão estimados, que no presente trabalho são os parâmetros de solo do modelo MGB, citados anteriormente (Subseção 3.2.3), X_i é o coeficiente de sensibilidade no instante t_j para o parâmetro ϕ_i , m é o número de parâmetros que serão estimados e Nd é o número de dados experimentais.

Entretanto, as incógnitas que se desejam estimar nem sempre possuem as mesmas unidades de medida ou, até mesmo, ordem de grandeza, tornando-se adequado o uso de coeficientes de sensibilidade modificados, como dado na Equação (3.35), os quais permitem, frente aos diferentes parâmetros analisados, a comparação direta da sensibilidade do modelo.

$$X_i^j(t_j, \vec{\gamma}, \vec{\phi}) = \phi_i \frac{\partial \Omega(\vec{t}, \vec{\gamma}, \vec{\phi})}{\partial \phi_i}, i = 1, \dots, m \quad e \quad j = 1, \dots, Nd \quad (3.35)$$

Para este trabalho, com o intuito de se analisar a sensibilidade dos parâmetros de solo do modelo MGB, através de seu coeficiente de sensibilidade, utilizou-se o método de diferenças finitas centradas com erro de truncamento de ordem $(\phi_i)^2$ para aproximar a derivada parcial da vazão em relação a cada um desses parâmetros de solo.

Capítulo 4

Pré-Processamento da Bacia Hidrográfica do Rio Pomba Utilizando o Plugin IPH-Hydro Tools

Como apresentado anteriormente na Subseção 3.2.2, a utilização do plugin MGB acoplado ao QGIS requer o pré-processamento que, neste trabalho, foi executado com o plugin do IPH-Hydro Tools. Neste capítulo descrevem-se detalhadamente os valores usados para a bacia hidrográfica do rio Pomba e as camadas obtidas a cada etapa.

O modelo digital de elevação (MDE) obtido através do *Google Earth Engine Explorer* valeu-se da resolução de 90 metros, em um retângulo de vértices (em coordenadas WGS 84) -43.8465,-21.8379 : -41.8342,-20.7829 conforme Figura 4.1. Esses limites geográficos foram estimados com base nos principais rios que formam a bacia hidrográfica do rio Pomba, visualizados através de um arquivo *Shapefile* retirado do site da ANA. Necessitou-se, ainda, converter o formato deste arquivo MDE do tipo *Raster* “.tiff” para o formato *Raster* “.asc”, para que o QGIS pudesse reconhecê-lo e, em seguida, com a ferramenta “*Conversion QGIS ASCII - IPHHT ASCII*” converte-se para um *Raster* “.asc” que o plugin IPH-Hydro Tools trabalha.

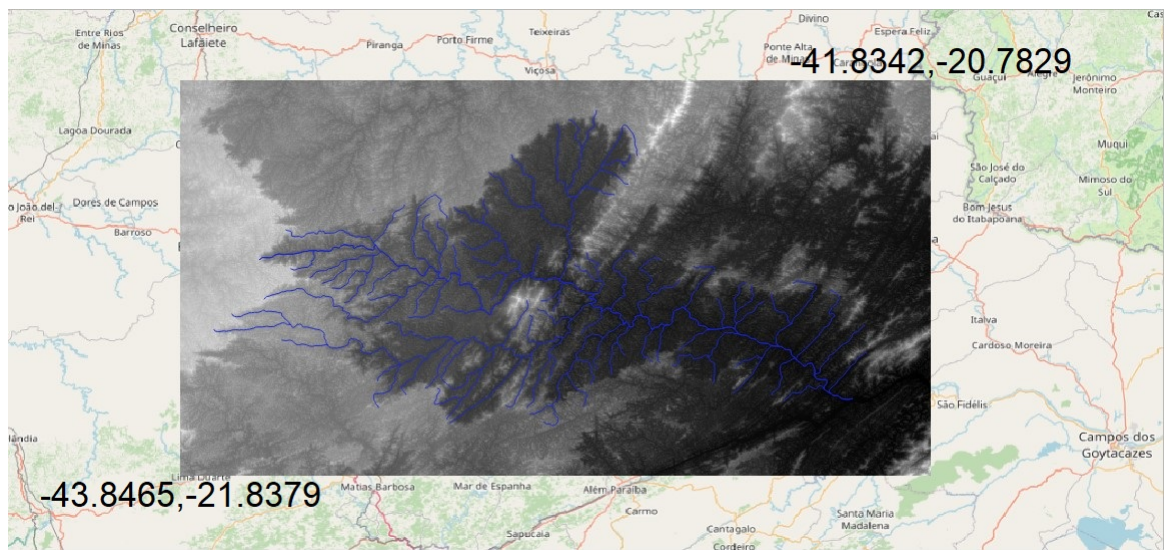
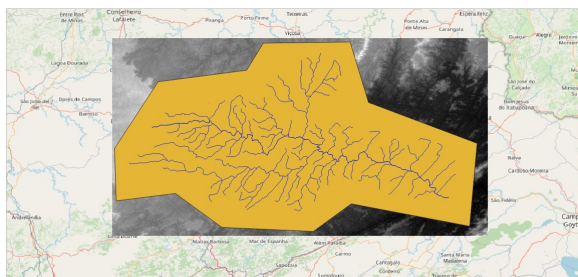
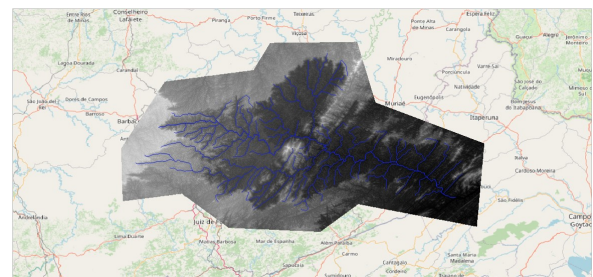


Figura 4.1: MDE utilizado para pré-processamento da bacia hidrográfica do rio Pomba.
Fonte: O Autor.

Na sequência criou-se uma camada *Shapefile* chamada “Máscara” em formato de polígono delimitando-se, de forma ainda mais restrita, uma região para extração do MDE, Figura 4.2(a). Atenta-se que se poderia trabalhar com o retângulo, exibido anteriormente (Figura 4.1), a custo de um maior tempo computacional no processamento. Com a ferramenta “*Extract by Polygon*”, tem-se, então, o modelo digital do terreno extraído para a região de interesse, Figura 4.2(b).



(a) Máscara para extração do MDE.



(b) MDE extraído para a região de interesse.

Figura 4.2: Extração do MDE para a região de interesse.
Fonte: O Autor.

Posteriormente, utilizou-se a ferramenta “*Sink and Destroy*” sobre o MDE extraído para a região de interesse para se remover as depressões e para gerar o mapa das direções de fluxo, visto na Figura 4.3. Em ambos, optou-se pelo formato “.asc” em detrimento do “.irfst”, já que este último somente oferece um processamento mais rápido, enquanto o pri-

meiro pode ser visualizado. Mantiveram-se os valores fornecidos pela própria ferramenta.

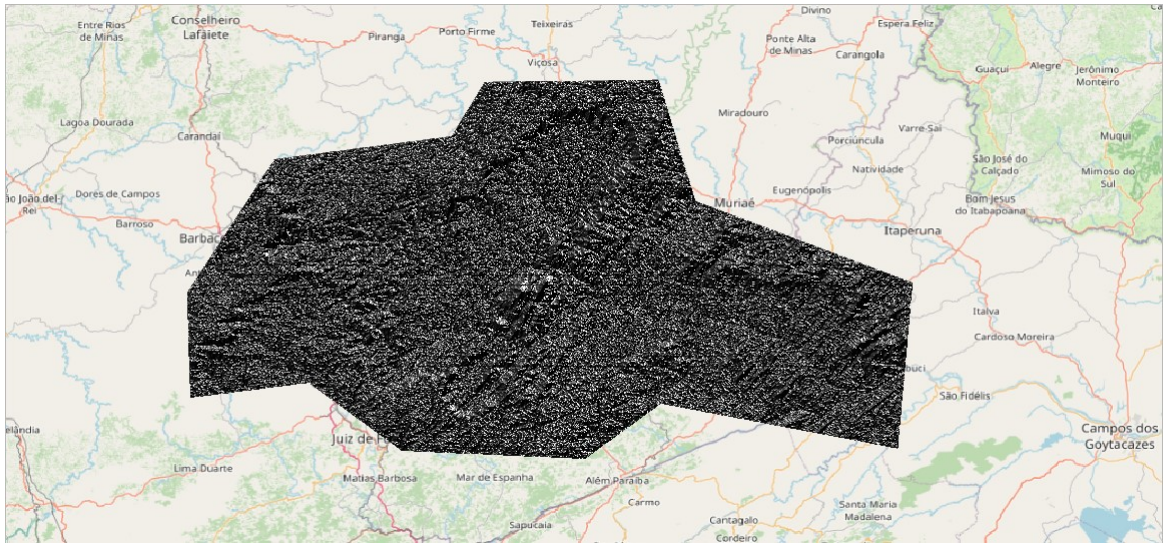


Figura 4.3: Mapa das direções de fluxo.
Fonte: O Autor.

Em seguida, foi gerado o mapa de vazão acumulada (Figura 4.4), a partir do arquivo das direções de fluxo, com a ferramenta “*Flow Accumulation*”.

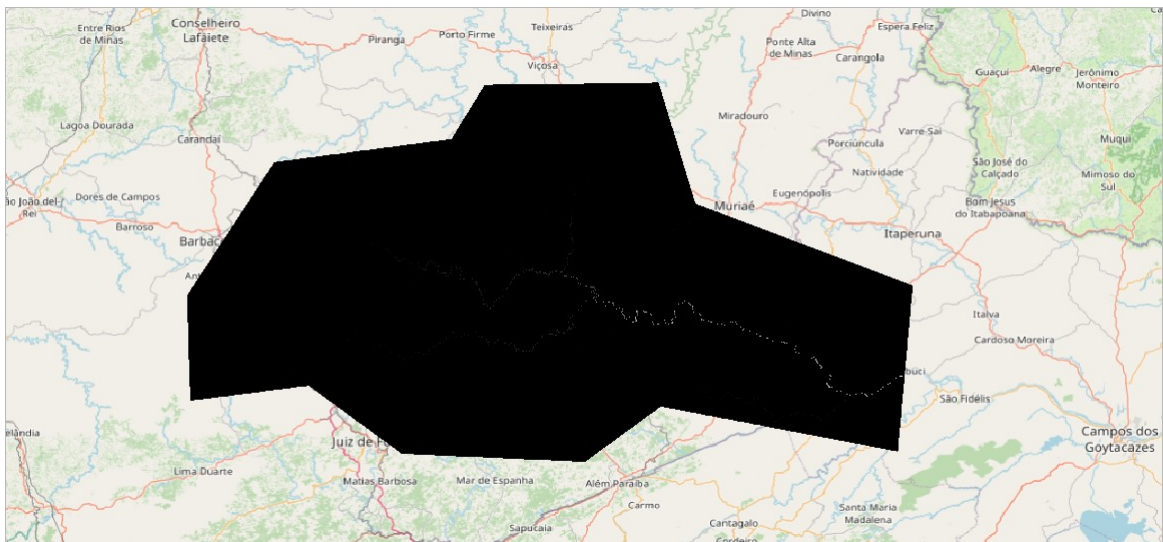


Figura 4.4: Mapa da vazão acumulada.
Fonte: O Autor.

Na próxima etapa, com uso do mapa de vazão acumulada como arquivo de entrada, criou-se a rede de drenagem em formato *Raster*, através da opção “*Stream Definition*”, com o limiar “*Area Treshold*” estipulado em 10 km^2 , obtendo-se uma camada que representa corretamente os principais rios da bacia hidrográfica do rio Pomba. Pode-se visualizar

este resultado na Figura 4.5.

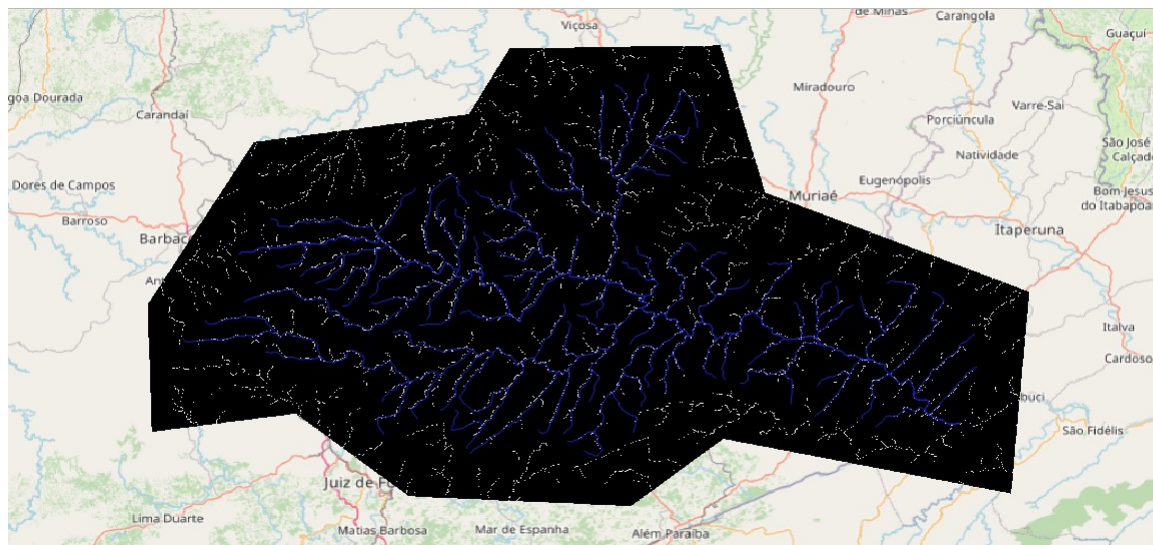


Figura 4.5: Camada da rede de drenagem sob a camada dos principais rios da bacia do rio Pomba.

Fonte: O Autor.

Neste momento foram tomados dois caminhos paralelos. O primeiro, optando por realizar a simulação com 1 (uma) única sub-bacia, ou seja, a própria bacia do rio Pomba. O segundo, dispondo-se de 3 (três) sub-bacias com exutórios localizados de forma estratégica. Ambos os caminhos são descritos a seguir, nas Seções 4.1 e 4.2, respectivamente.

4.1 Pré-Processamento com Uma Sub-Bacia

Adicionou-se uma camada *Shapefile*, como um ponto, para representar o exutório da bacia a qual deseja-se delimitar com a ferramenta “*Watershed Delineation*”. Este foi alocado próximo a sua foz, com auxílio do arquivo da rede de drenagem e da função “*Snap outlet to nearest stream*”, visto que o ponto necessita estar sobre a rede hidráulica. A delimitação da bacia hidrográfica do rio Pomba com exutório definido conforme descrito neste parágrafo pode ser vista na Figura 4.6.

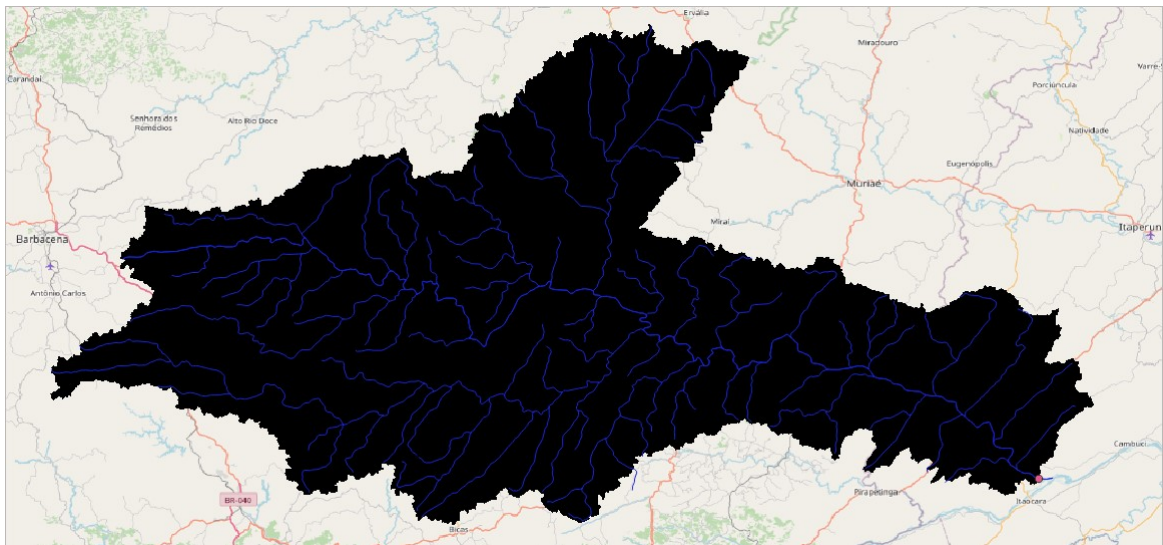


Figura 4.6: Delimitação da bacia hidrográfica do rio Pomba, onde, em rosa, localiza-se o exutório próximo a foz do rio Pomba e, em azul, seus principais rios.

Fonte: O Autor.

Extraiu-se, então, a rede de drenagem gerada para a bacia delimitada através da ferramenta “*Extract Raster by Raster*” (Figura 4.7).

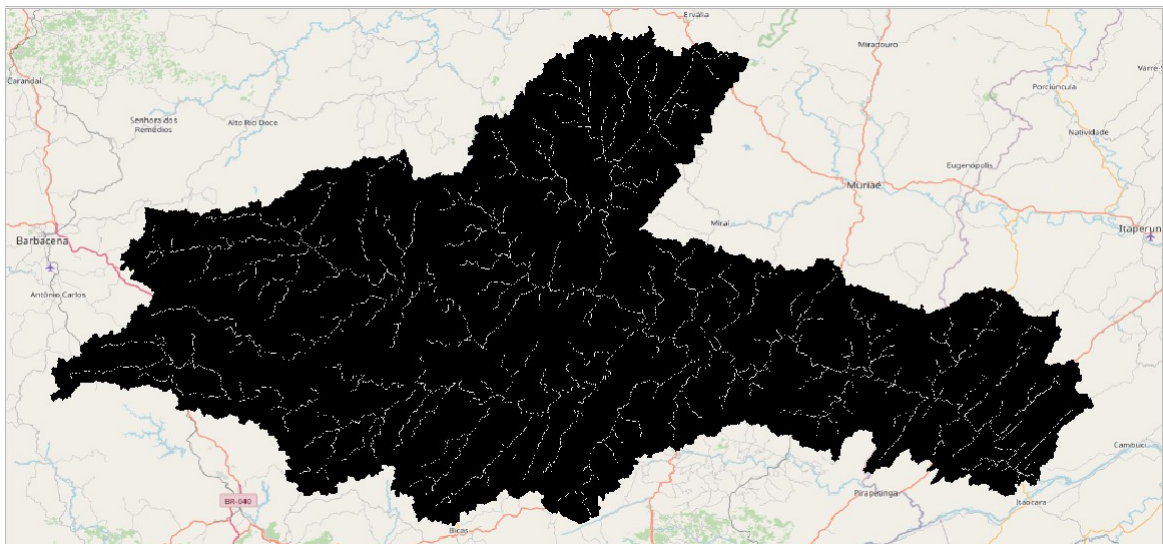


Figura 4.7: Rede de drenagem extraída para a delimitação da bacia.

Fonte: O Autor.

Necessitou-se segmentar a rede de drenagem da bacia, com a opção “*Fixed Length Segmentation*”, a partir dos arquivos requisitados (rede de drenagem extraída para a bacia, direção de fluxo e vazão acumulada) em trechos de 5 quilômetros, Figura 4.8, para, então, delimitar as minibacias, Figura 4.9, com a ferramenta “*Unit-catchments Delineation*”.

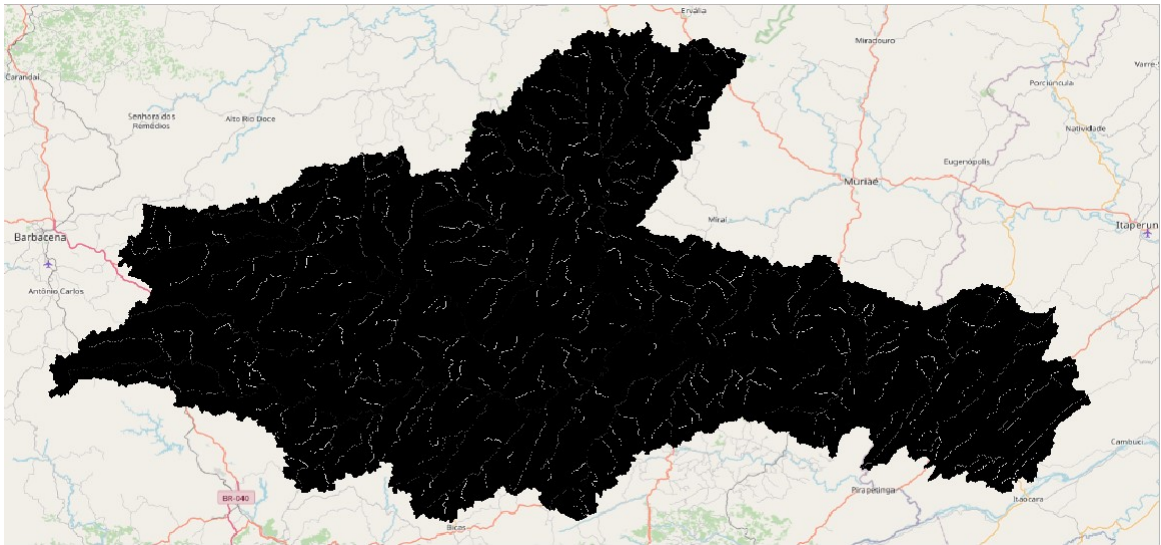


Figura 4.8: Rede de drenagem segmentada.

Fonte: O Autor.

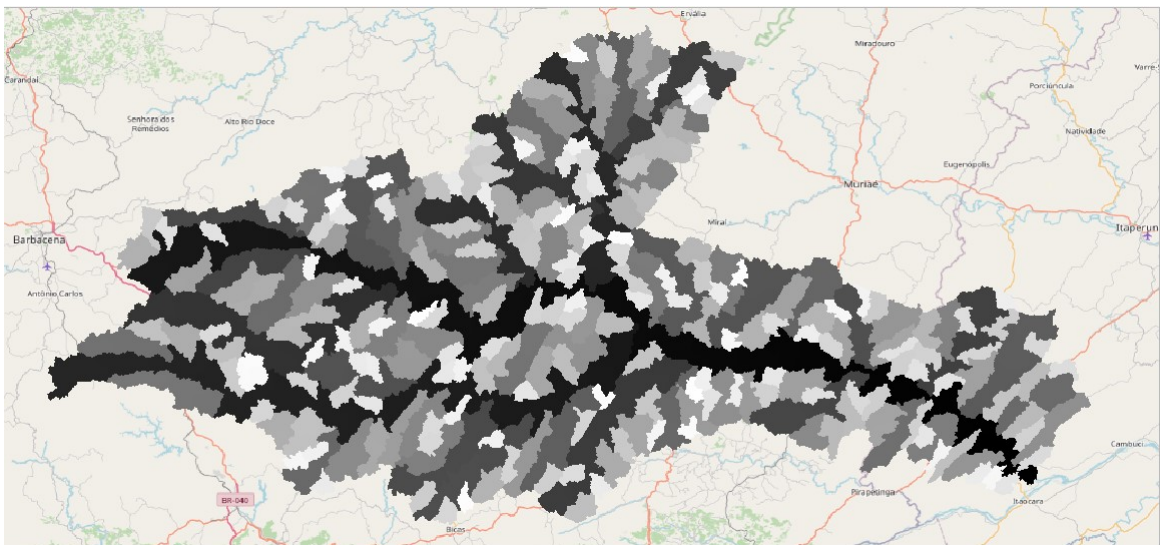
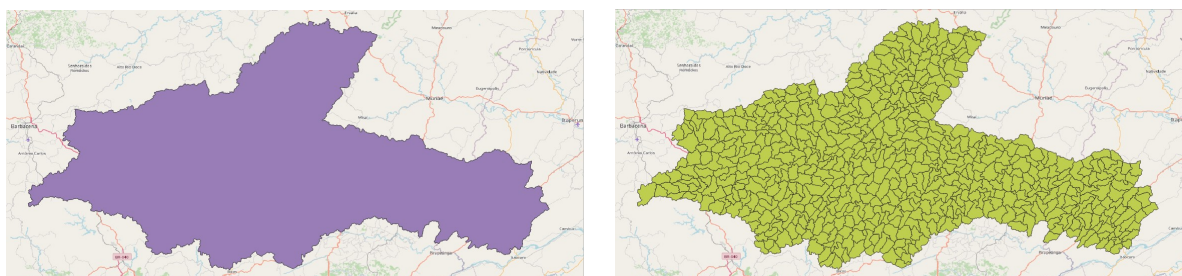


Figura 4.9: Minibacias delimitadas.

Fonte: O Autor.

Na sequência, os arquivos das minibacias e da delimitação da bacia foram convertidos do formato *Raster* para o formato vetorial *Shapefile*. Ambos podem ser vistos nas Figuras 4.10(a) e 4.10(b).



(a) Delimitação da bacia em formato vetorial (*Shapefile*).

(b) Minibacias em formato vetorial (*Shapefile*).

Figura 4.10: Conversão da delimitação da bacia e das minibacias para o formato vetorial *Shapefile*.

Fonte: O Autor.

Posteriormente, adquiriu-se um mapa para as Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) da América do Sul, elaborado por Fan et al. [20], em um artigo denominado “Um Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul”, apresentado ao XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos em Novembro de 2015. Com posse deste arquivo, extraiu-se parte dele para a região de interesse, usando o arquivo de máscara, citado anteriormente (Figura 4.2(a)), e o arquivo de direção de fluxo como parâmetros. Após tratamento das cores deste mapa de URHs extraído, pode-se visualiza-lo de maneira mais clara na Figura 4.11.

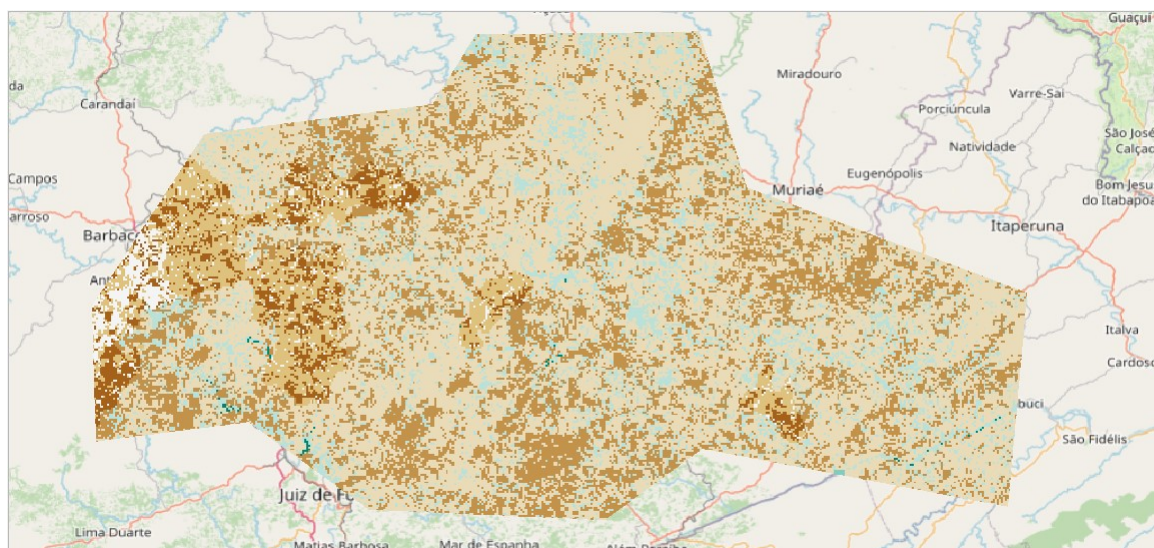


Figura 4.11: URHs extraídas para a região de interesse.

Fonte: O Autor.

Finalmente, o último passo realizado para o pré-processamento se deu pela ferra-

menta “MGB Tools/MGB-Processing” de onde são gerados os arquivos “MINI.gtp” e “COTA_AREA.flp” fundamentais para o funcionamento do modelo, a partir do MDE, da direção de fluxo, das minibacias, da rede de drenagem segmentada e das URHs extraídas para região de interesse. Cabe salientar que para os valores das relações geomorfológicas, fez-se necessário um levantamento dos vários perfis transversais do rio Pomba, criando-se uma curva com base na equação dada pelo próprio plugin. Podem-se observar o levantamento realizado e os valores utilizados nas Figuras 4.12 e 4.13, respectivamente.

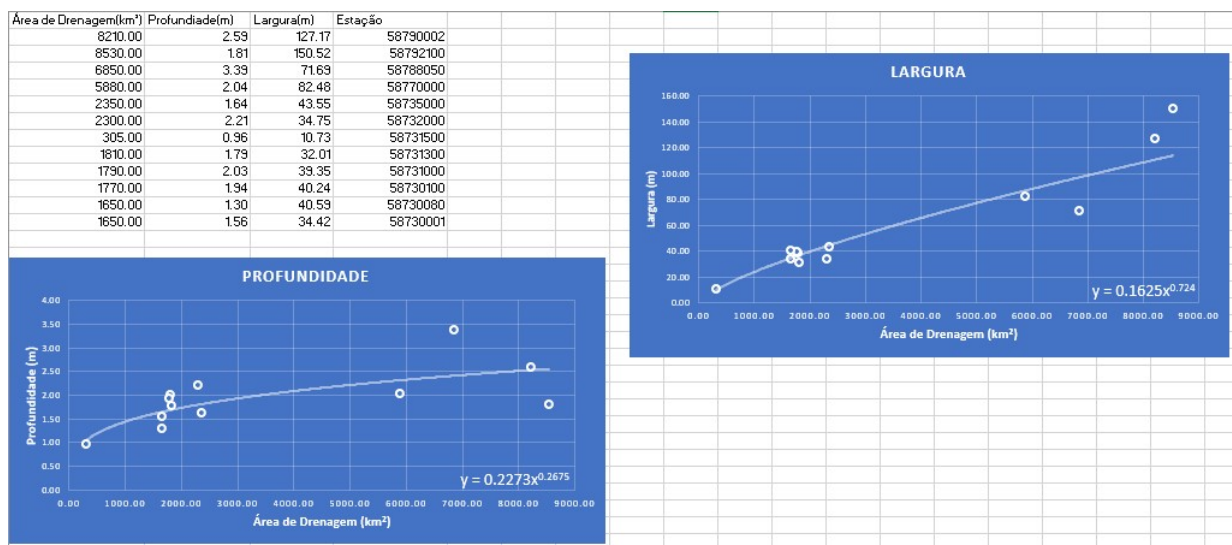


Figura 4.12: Levantamento dos perfis transversais do rio Pomba para dedução das relações geomorfológicas.

Fonte: O Autor.

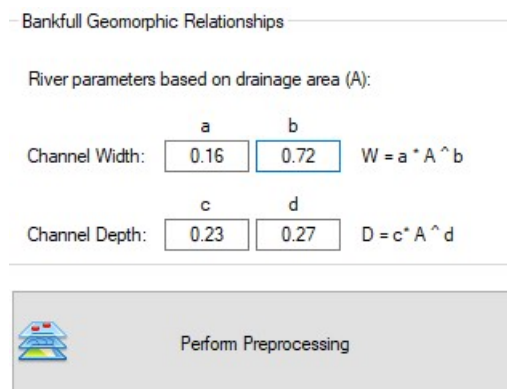


Figura 4.13: Parâmetros utilizados nas relações geomorfológicas.

Fonte: O Autor.

4.2 Pré-Processamento com Três Sub-Bacias

Seguindo as mesmas etapas e fazendo uso das mesmas ferramentas descritas na seção anterior (Seção 4.1) foram adicionados 3 (três) pontos representando os exutórios das sub-bacias, em uma camada vetorial. A partir da região de deságue em direção à nascente, o primeiro exutório, estabeleceu-se no mesmo local do pré-processamento para uma única sub-bacia, próximo a foz do rio Pomba, na cidade de Aperibé-RJ. O segundo, a jusante da Usina Hidrelétrica (UHE) Barra do Braúna, próximo a Cisneiros (distrito de Palma-MG). O terceiro, a jusante das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) Ivan Botelho I, II e III, no município de Astolfo Dutra-MG. A configuração descrita neste parágrafo pode ser visualizada na Figura 4.14.

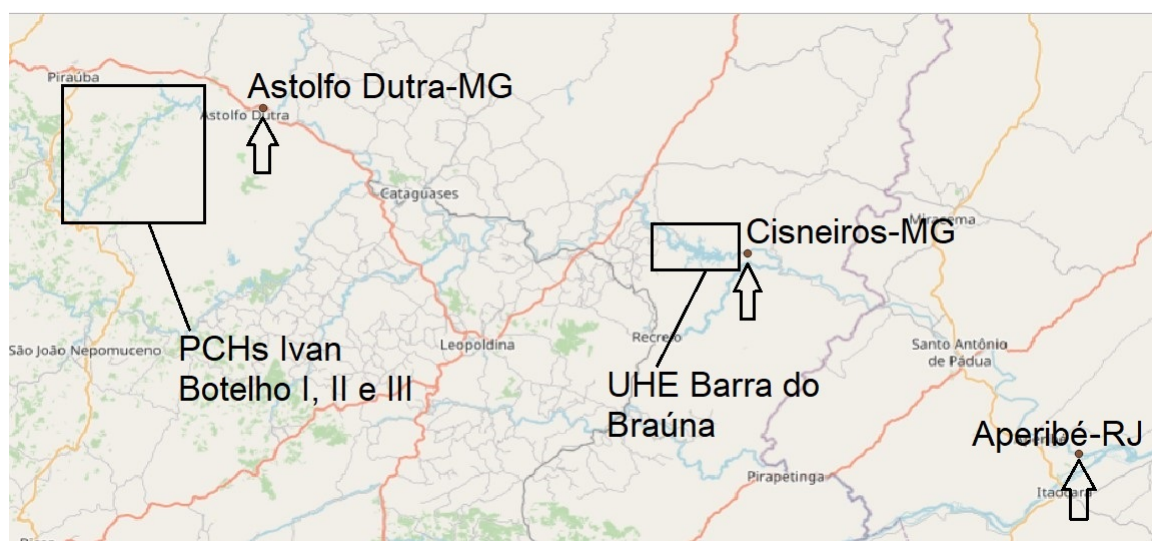


Figura 4.14: Localização dos três exutórios.

Fonte: O Autor.

Adiante, assim como ocorrido para o caso de uma única sub-bacia, delimitaram-se as 3 (três) sub-bacias para este cenário. Podem-se visualizar as sub-bacias delimitadas na Figura 4.15. Atenta-se para as IDs das bacias, sendo elas: 1, para a sub-bacia onde encontra-se a foz do rio Pomba, 2, para a sub-bacia a montante da sub-bacia 1 e, 3, para a sub-bacia onde localiza-se a nascente do rio.

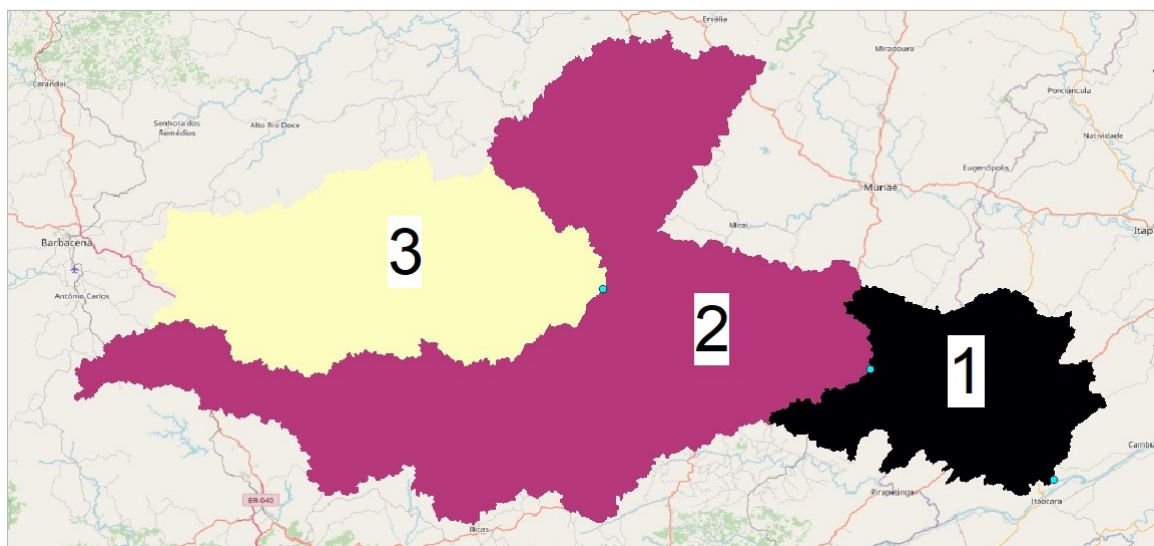


Figura 4.15: Delimitação das três sub-bacias.
Fonte: O Autor.

As demais etapas seguiram-se exatamente como realizado para a elaboração de uma única sub-bacia.

Esta divisão em duas frentes (uma sub-bacia e três sub-bacias), tem como objetivo avaliar o impacto da subdivisão da bacia ao processo de calibração e, conseqüentemente, aos resultados de vazão obtidos para diferentes regiões da bacia hidrográfica do rio Pomba.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e as análises realizadas tomando como base a divisão da bacia do rio Pomba em uma e em três sub-bacias.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Apresentam-se, neste capítulo, os resultados da modelagem do comportamento hidráulico do rio Pomba e sua bacia hidrográfica, desde sua nascente em Santa Bárbara do Turgúrio-MG até a sua foz em Aperibé-RJ, mediante a análise das vazões em 4 (quatro) estações fluviométricas, localizadas nos municípios de Guarani-MG, Astolfo Dutra-MG, Cataguases-MG e Santo Antônio de Pádua-RJ, a partir de dados de 104 (cento e quatro) estações pluviométricas e tendo como base a etapa de pré-processamento descrita no Capítulo 4, bem como a calibração dos parâmetros do modelo matemático manualmente e, em um segundo momento, por meio automático.

Também é exposta a análise de sensibilidade dos parâmetros de solo do Modelo de Grandes Bacias (MGB), realizada a fim de se obter maior entendimento da influência de cada parâmetro do modelo sobre a simulação, de forma a auxiliar nas calibrações efetuadas.

5.1 Localização das Estações para Aquisição de Dados

Neste trabalho, em todas as simulações realizadas, os dados de precipitação e vazão foram obtidos no período de 01 de janeiro de 2010 (01/01/2010) a 30 de setembro de 2020 (30/09/2020). A escolha deste intervalo de tempo se deve, além da quantidade e qualidade dos dados no período de interesse, à construção da UHE Barra do Braúna, em 2010, que alterou o cenário de enchentes em parte da região mineira e em toda região fluminense, bem como à disponibilidade dos mesmos no sistema da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

As estações fluviométricas utilizadas foram, de montante a jusante, Guarani-MG

(56730001), Astolfo Dutra-MG (58735000), Cataguases-MG (58770000) e Santo Antônio de Pádua-RJ (58790002), tratadas, neste trabalho, pelas IDs das minibacias em que se encontram, 550, 566, 578 e 598, nesta ordem, como são mostradas na Figura 5.1.

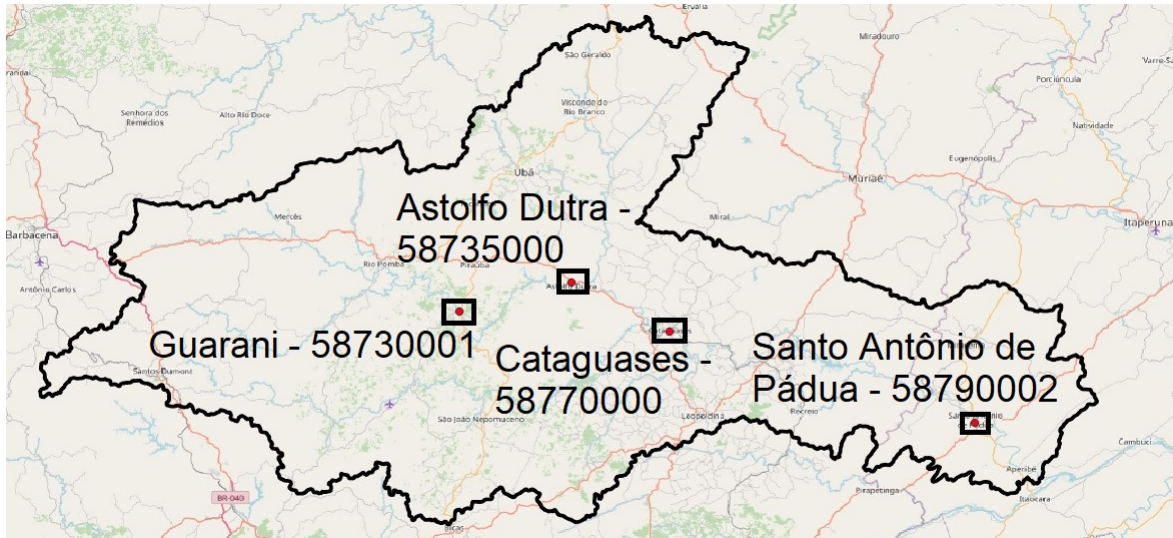


Figura 5.1: Localização das estações fluviométricas consideradas neste trabalho.
Fonte: O Autor.

Além destas, para obtenção dos dados de entrada do modelo MGB foram interpoladas as precipitações fornecidas pelas estações pluviométricas dispostas conforme na Figura 5.2.

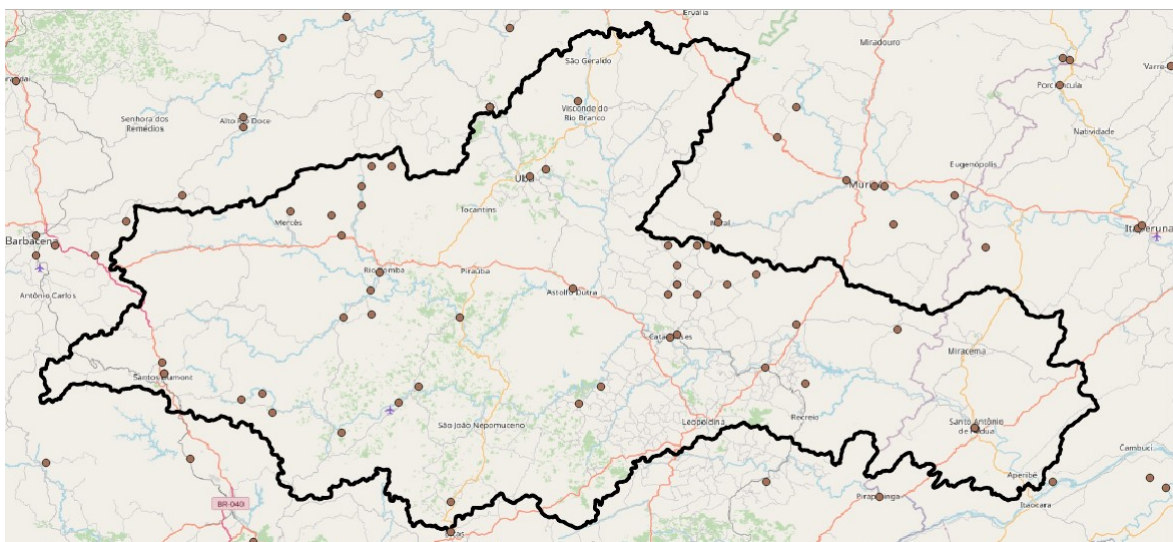


Figura 5.2: Localização das estações pluviométricas consideradas neste trabalho.
Fonte: O Autor.

Em contrapartida, as variáveis climáticas utilizadas neste trabalho foram obtidas com base nas estações climáticas de Coronel Pacheco-MG (00083037), Cataguases-MG

(00083027) e Santo Antônio de Pádua-RJ (00083805), localizadas como exposto na Figura 5.3. Cabe salientar que, onde houveram insuficiência de dados, tomaram-se as informações da estação mais próxima (não utilizada).

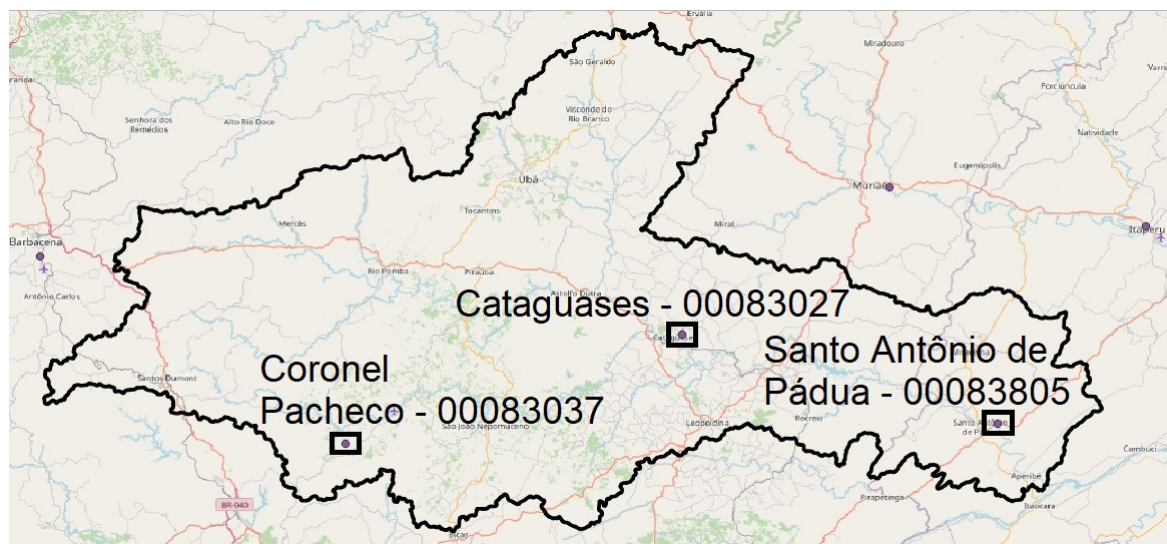


Figura 5.3: Localização das estações climáticas consideradas neste trabalho.
Fonte: O Autor.

5.2 Resultados Referentes à Modelagem Direta do Problema de Inundações

De forma mais detalhada, nesta seção foram exibidos os parâmetros usados para aplicação do modelo MGB à bacia hidrográfica do rio Pomba, através de seu plugin acoplado ao software QGIS. Em um primeiro momento (Capítulo 4) descreveram-se as etapas em comum para as duas simulações (com uma única sub-bacia e com três sub-bacias). Nessa seção, são exibidos os resultados das simulações para a divisão da bacia do rio Pomba em uma e três sub-bacias, tendo como base os valores dos parâmetros propostos pelo manual do plugin MGB.

Para os parâmetros de vegetação, foi utilizado para albedo, índice de área foliar, altura média da vegetação e resistência superficial, os valores expostos nas Figuras 5.4–5.7, respectivamente.

Albedo		Leaf area index	Average vegetation height		Surface resistance								
	HRC	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
▶	FlorRas	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
	FlorProf	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
	AgriRas	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	AgriProf	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
	CampRas	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	CampProf	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
	Varzea	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	ASI	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
	Agua	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
*													

Figura 5.4: Parâmetros de vegetação utilizados para albedo.
Fonte: O Autor.

Albedo		Leaf area index	Average vegetation height		Surface resistance								
	HRC	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
▶	FlorRas	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	FlorProf	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
	AgriRas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	AgriProf	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
	CampRas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	CampProf	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	Varzea	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	ASI	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Agua	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
*													

Figura 5.5: Parâmetros de vegetação utilizados para índice de área foliar.
Fonte: O Autor.

Albedo		Leaf area index	Average vegetation height		Surface resistance								
	HRC	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
▶	FlorRas	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	FlorProf	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	AgriRas	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	AgriProf	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	CampRas	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	CampProf	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	Varzea	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	ASI	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	Agua	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
*													

Figura 5.6: Parâmetros de vegetação utilizados para altura média.
Fonte: O Autor.

Albedo	Leaf area index	Average vegetation height		Surface resistance									
	HRC	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
	FlorRas	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
	FlorProf	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.
	AgriRas	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
	AgriProf	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.
	CampRas	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
	CampProf	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
	Varzea	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
	ASI	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
*													

Figura 5.7: Parâmetros de vegetação utilizados para resistência superficial.

Fonte: O Autor.

Nos parâmetros do solo, antes da calibração manual, foram utilizados os mesmos valores para ambas as simulações e para todas as sub-bacias (da referida simulação). Estes valores são $CS = 20$, $CI = 150$, $CB = 2.000$, $QB = 0,01$. Já os demais parâmetros podem ser visualizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros do solo antes da calibração manual.

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
FlorProf	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
AgriRas	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
AgriProf	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
CampRas	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
CampProf	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
Varzea	500	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
ASI	300	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Para a primeira simulação, dispendo-se de uma única sub-bacia, constituída pela totalidade da bacia hidrográfica do rio Pomba, com os valores dos parâmetros mencionados anteriormente, conforme as Figuras 5.4–5.7 e a Tabela 5.1, obtiveram-se os hidrogramas (Figuras 5.8, 5.10, 5.12 e 5.14) e as durações de fluxo (Figuras 5.9, 5.11, 5.13 e 5.15) elaborados para cada uma das regiões onde estão localizadas as quatro estações fluviométricas utilizadas como referência para análise do modelo.

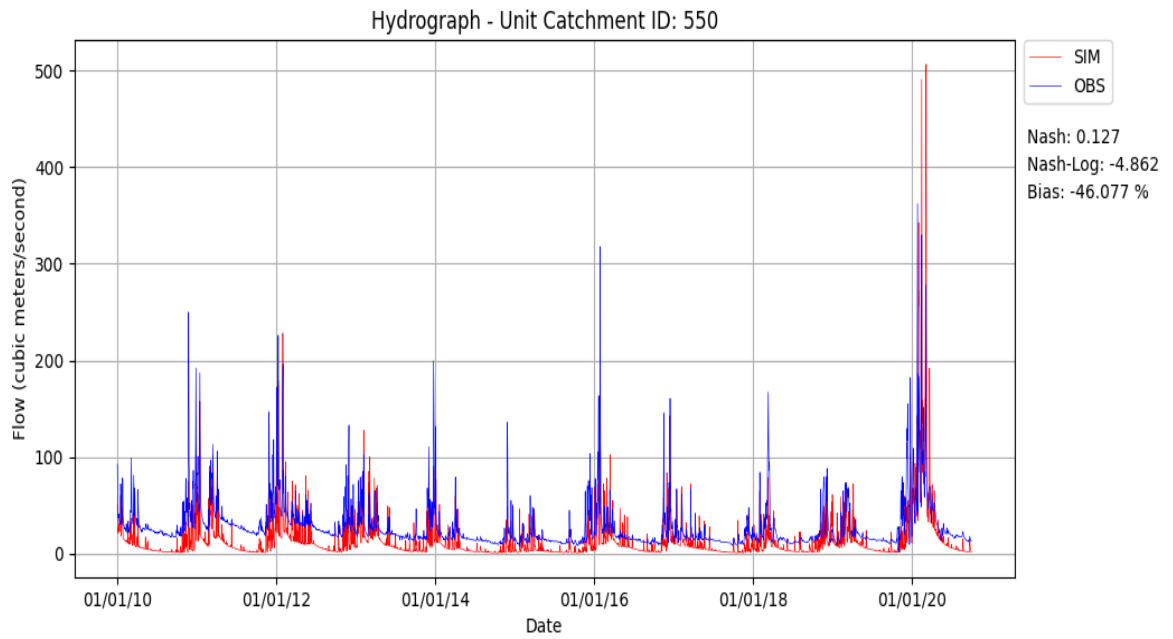


Figura 5.8: Hidrograma da Estação 550 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.

Fonte: O Autor.

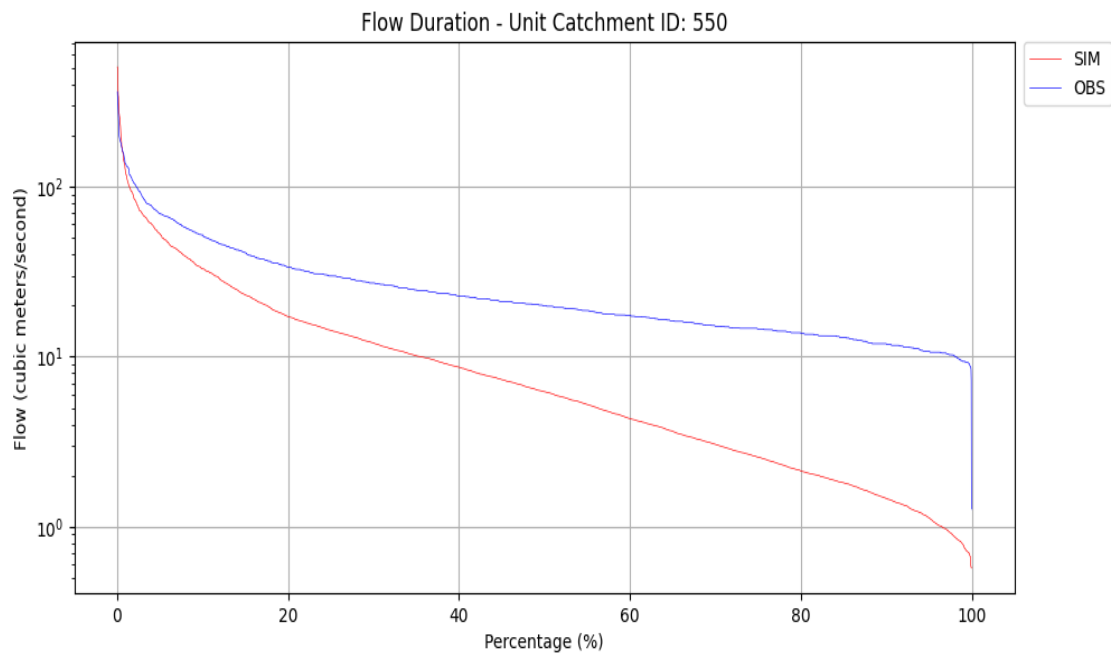


Figura 5.9: Duração de fluxo da Estação 550 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.

Fonte: O Autor.

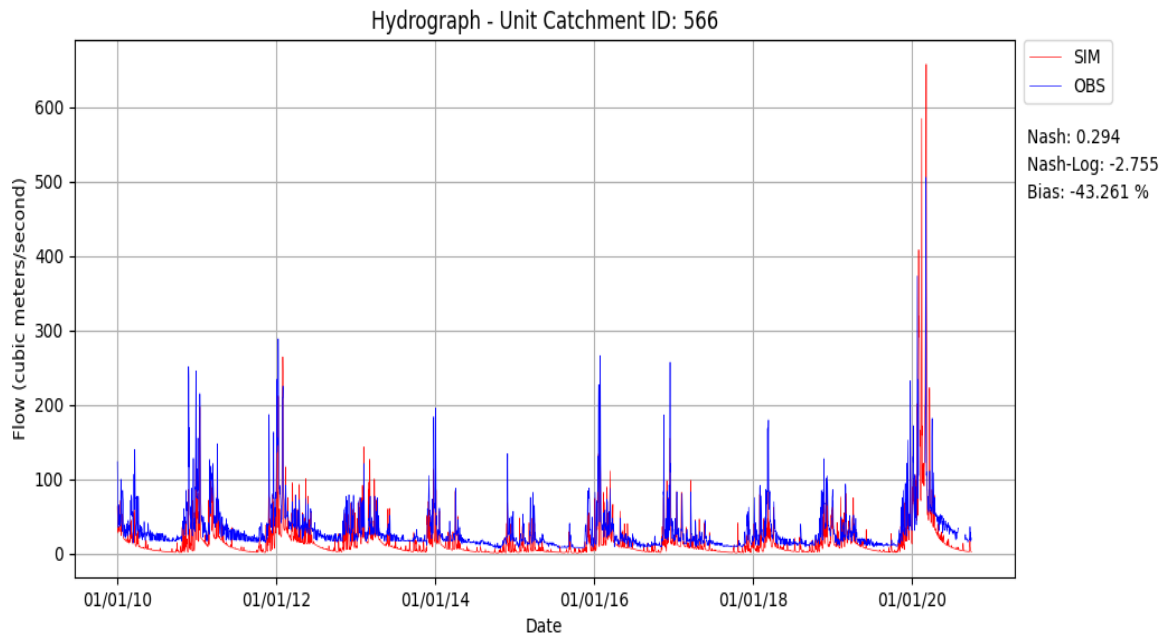


Figura 5.10: Hidrograma da Estação 566 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.

Fonte: O Autor.

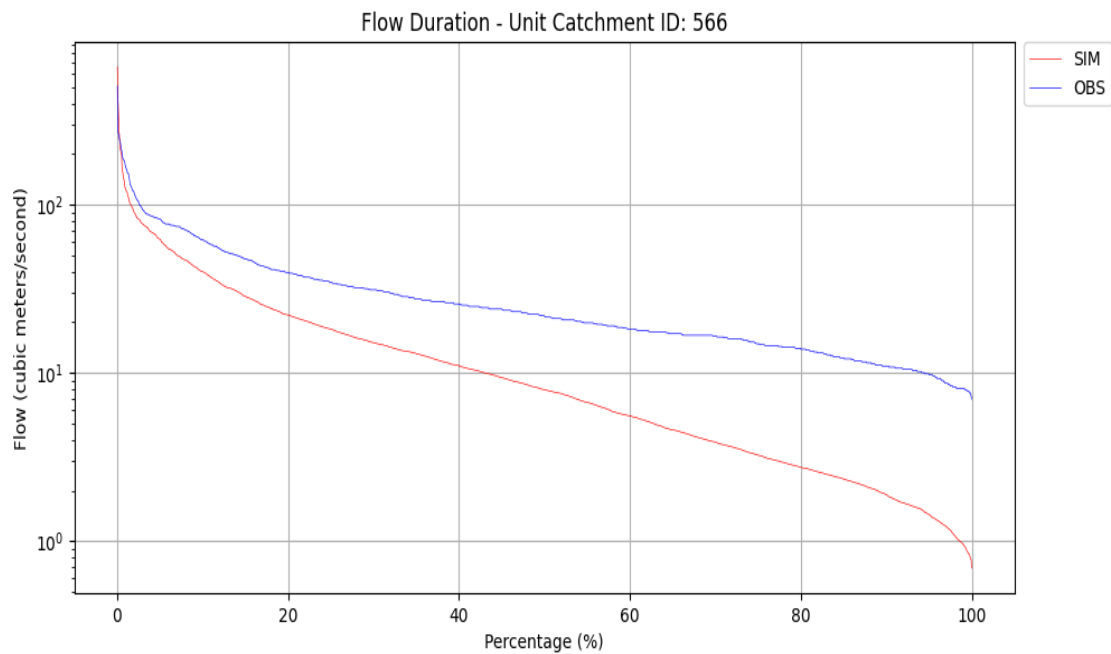


Figura 5.11: Duração de fluxo da Estação 566 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.

Fonte: O Autor.

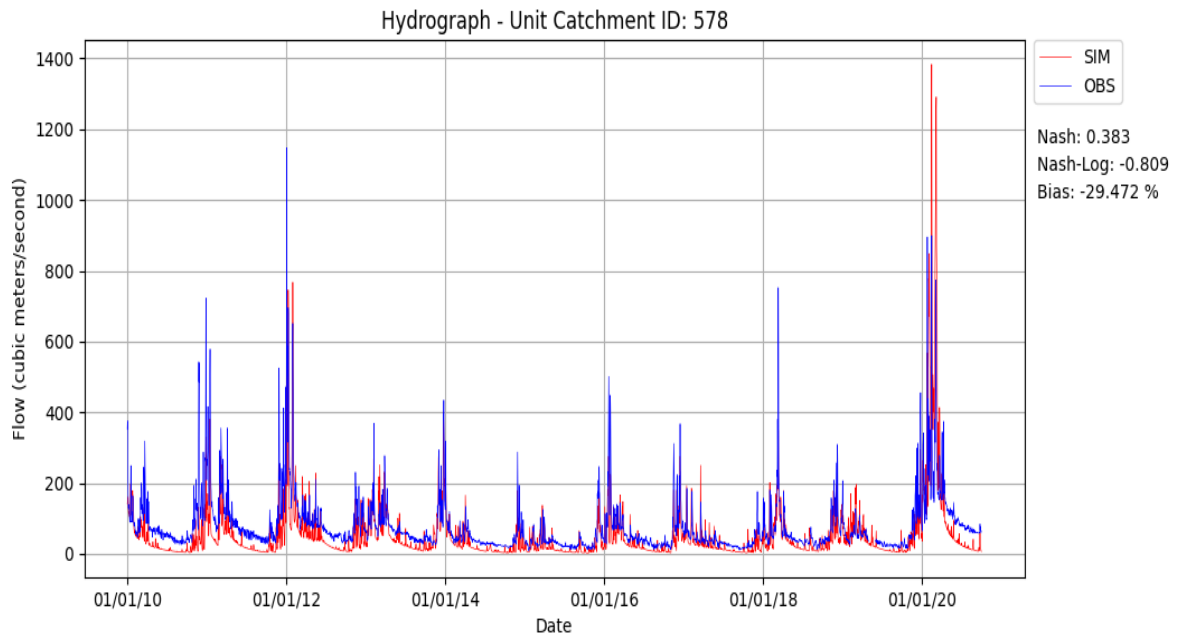


Figura 5.12: Hidrograma da Estação 578 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.

Fonte: O Autor.

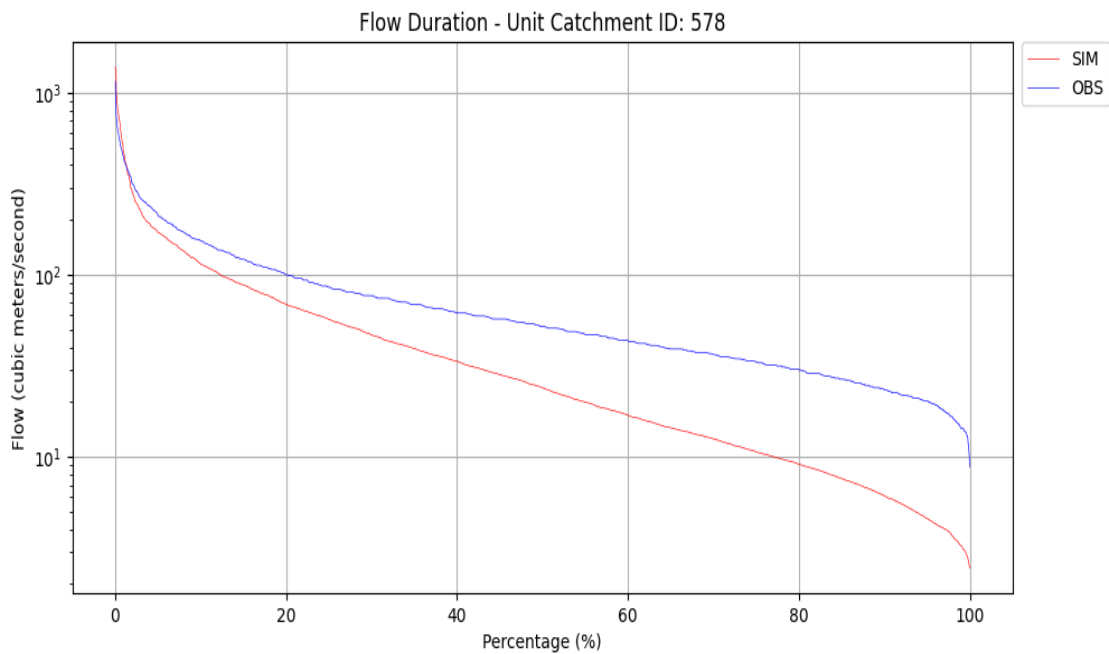


Figura 5.13: Duração de fluxo da Estação 578 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.

Fonte: O Autor.

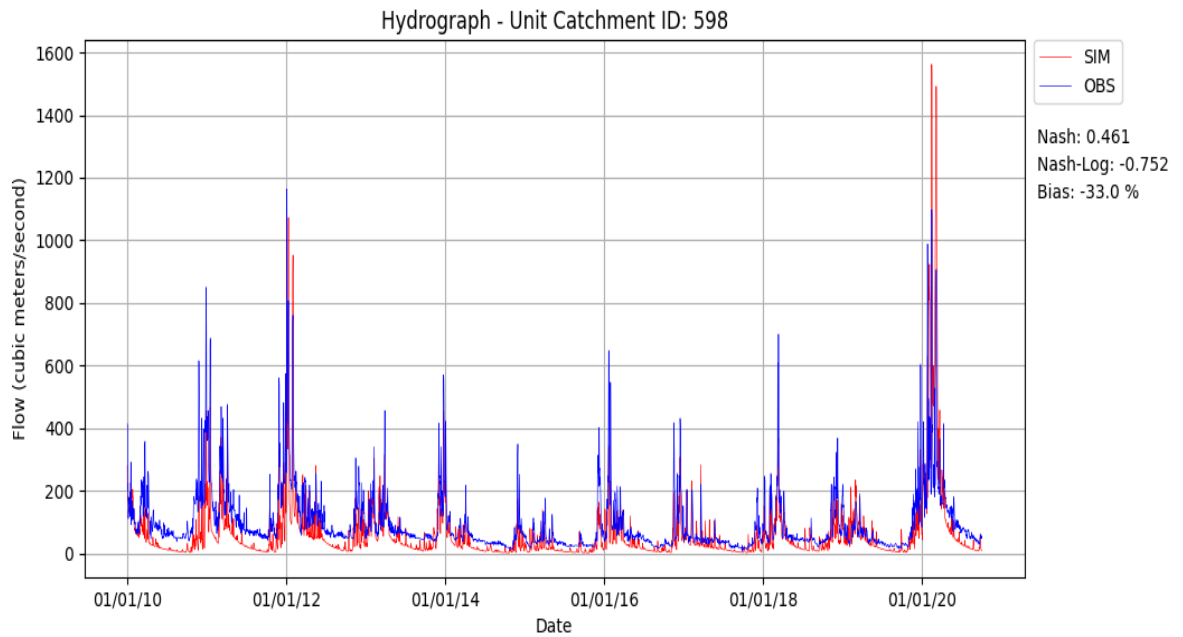


Figura 5.14: Hidrograma da Estação 598 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.

Fonte: O Autor.

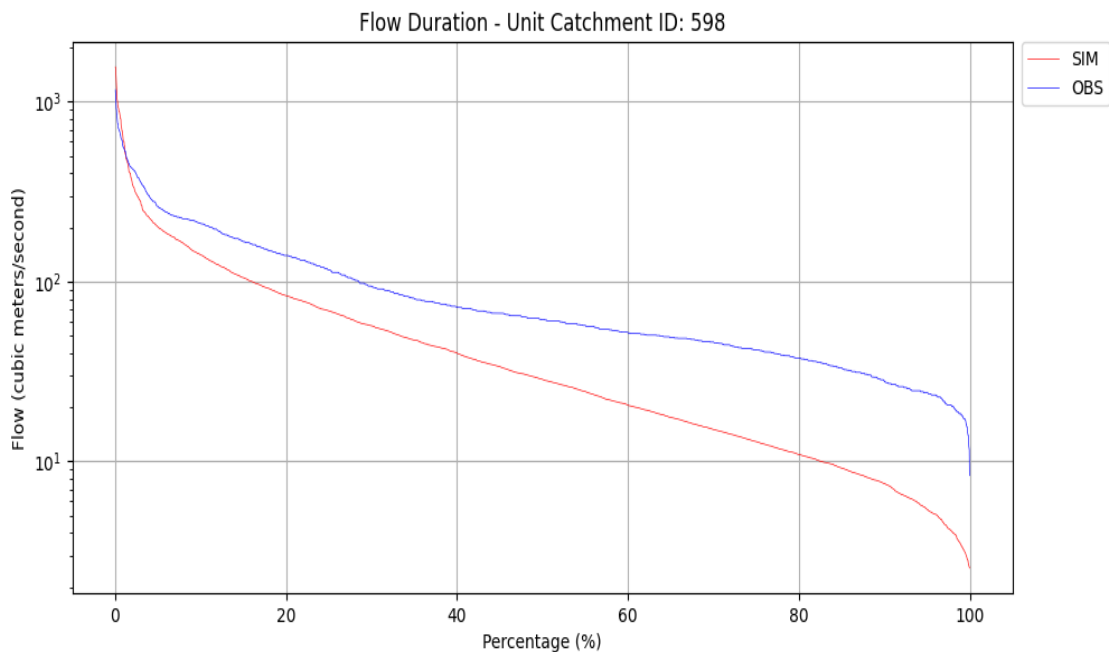


Figura 5.15: Duração de fluxo da Estação 598 com os valores dos parâmetros sugeridos no manual do MGB.

Fonte: O Autor.

Embora o perfil das curvas apresentadas nos gráficos das Figuras 5.8 a 5.15 se assemelhem a olho nú, as diferenças entre elas e os valores das métricas de avaliação reforçam a necessidade de se realizar a calibração dos parâmetros do plugin MGB, efetuando-se ajustes que adéquem os coeficientes de solo do modelo às características da bacia hidrográfica estudada.

Além disso, no que se refere aos resultados obtidos para as simulações com a bacia do rio Pomba dividida em três sub-bacias, devido ao fato dos parâmetros para cada uma destas sub-bacias serem os mesmos utilizados para uma única sub-bacia, tais resultados em nada diferiram dos resultados obtidos para uma única sub-bacia, não havendo, assim, necessidade de expor os hidrogramas e gráficos de duração de fluxo para esta simulação, visto que o resultado é idêntico. Dessa forma, fica clara que a divisão em sub-bacias só possui efeito nos resultados simulados quando realizadas alterações nos seus valores, individualmente.

5.3 Resultados Envolvendo a Calibração Manual dos Parâmetros do Plugin MGB

Nesta seção, apresentam-se os resultados da análise de sensibilidade realizada dos parâmetros de solo do modelo MGB, para a bacia do rio Pomba uma única sub-bacia. Exibem-se também os resultados obtidos com o modelo calibrado manualmente com uma sub-bacia e com três sub-bacias.

5.3.1 Resultados da Análise de Sensibilidade

A seguir, são expostos e comparados os resultados das análises de sensibilidade realizadas para cada um dos parâmetros de solo, de cada URH, do modelo MGB. Para esta análise, variou-se cada parâmetro, para cada URH, em -10% e $+10\%$, a partir dos valores usados nas simulações antes da calibração manual, ou seja, aqueles exibidos na Seção 5.2.

Primeiramente, apresenta-se a análise para o volume no reservatório linear subterrâneo (QB), para o parâmetro relacionado a propagação superficial (CS), para o parâmetro relacionado a propagação subsuperficial (CI) e para o parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo (CB), em cada uma das 4 regiões abrangidas pelas estações fluviométricas utilizadas. Os resultados para o coeficiente de sensibilidade são expostos nas Figuras 5.16–5.19.

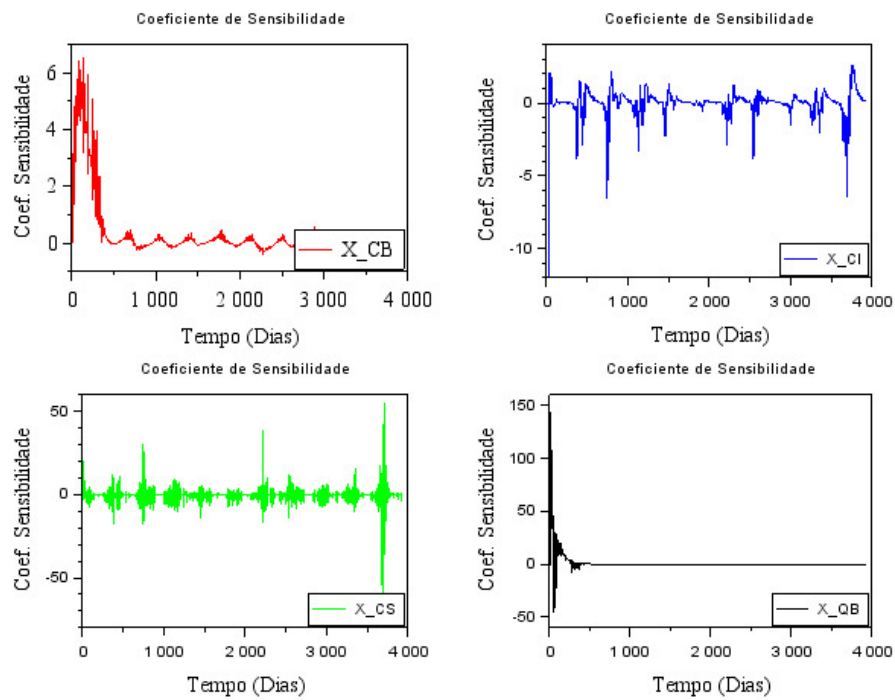


Figura 5.16: Análise de sensibilidade dos parâmetros CB, CI, CS e QB sobre a estação 550.

Fonte: O Autor.

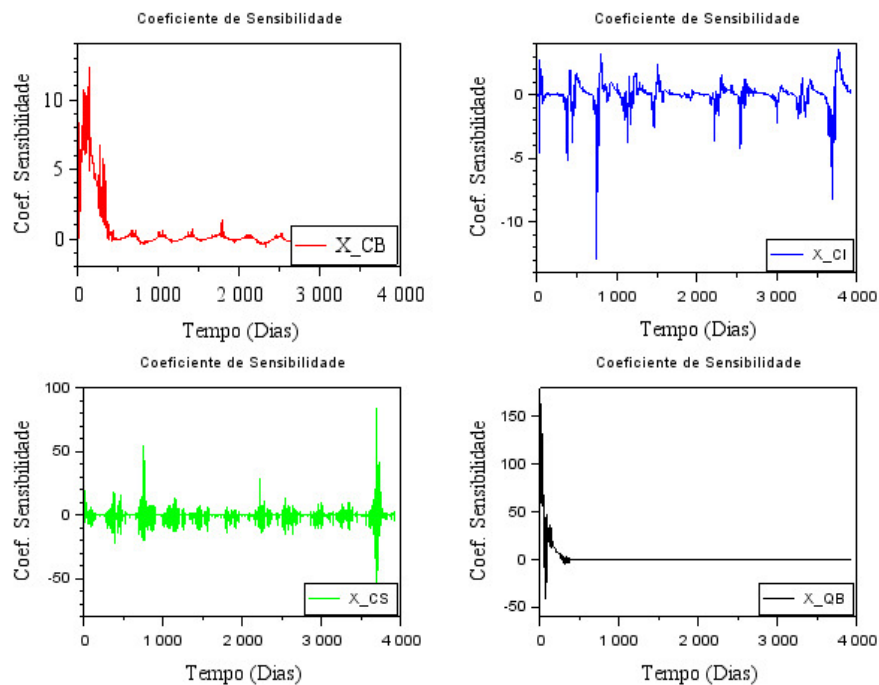


Figura 5.17: Análise de sensibilidade dos parâmetros CB, CI, CS e QB sobre a estação 566.

Fonte: O Autor.

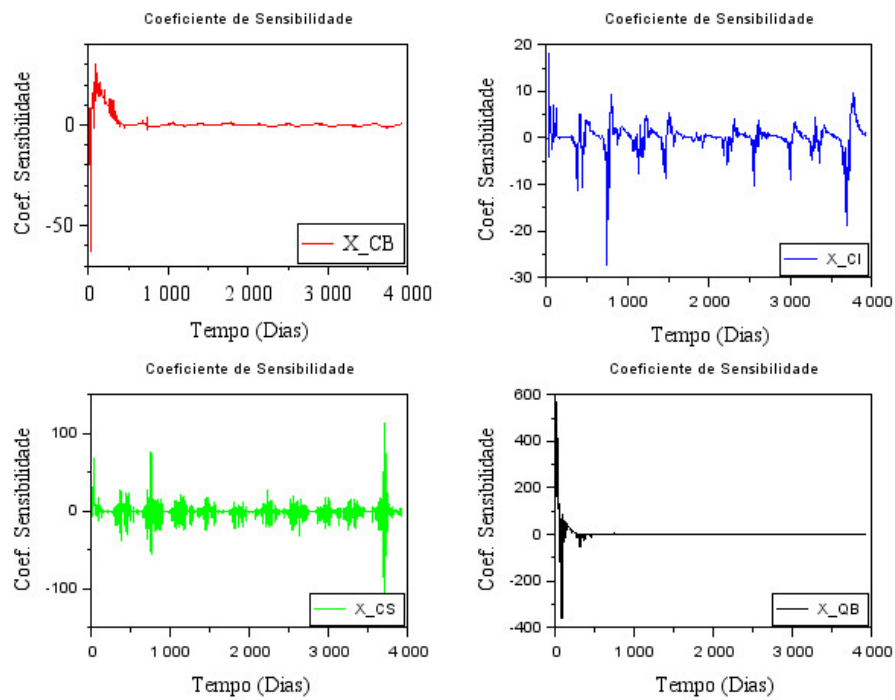


Figura 5.18: Análise de sensibilidade dos parâmetros CB, CI, CS e QB sobre a estação 578.

Fonte: O Autor.

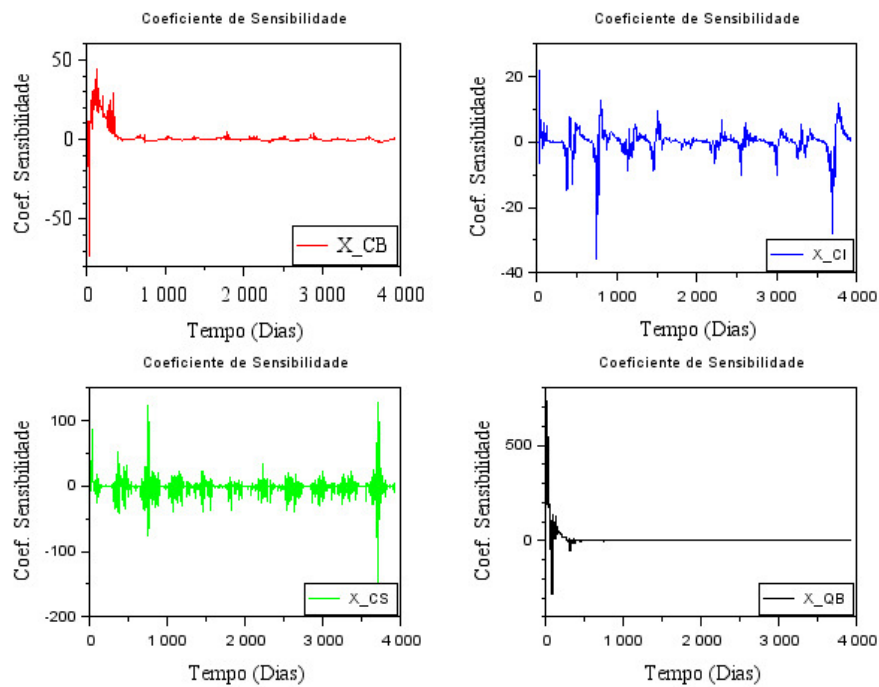


Figura 5.19: Análise de sensibilidade dos parâmetros CB, CI, CS e QB sobre a estação 598.

Fonte: O Autor.

Daí, pode-se notar alguns padrões que reforçam os conceitos teóricos por trás de cada parâmetro, como o coeficiente QB, que apresenta sensibilidade elevada somente no início da simulação, após esta fase, ele não sofre mais alterações. Isto se dá devido a ele representar a condição inicial do modelo de vazão por unidade de área. Já o parâmetro CS é o mais sensível dentre os 4 avaliados neste momento, reforçando o fato de a propagação superficial ser a que desempenha a maior influência sobre a simulação. Ainda, em comparação com os demais, o CB é o menos sensível, principalmente após o início da simulação, visto que este, relacionado ao retardo do reservatório subterrâneo, terá maior efeito nos períodos de estiagem. Por fim, nota-se aumento na sensibilidade dos quatro parâmetros apresentados, como consequência da quantidade de dados processados e acumulados ao longo da simulação, de montante para jusante na bacia hidrográfica.

Na sequência, são exibidos os gráficos, Figuras 5.20(a)–5.20(d), resultantes da análise de sensibilidade para o parâmetro que representa a forma da relação empírica entre fração de área saturada e armazenamento médio (parâmetro b), para cada tipo de URH, sobre a região de cada uma das quatro estações fluviométricas usadas neste trabalho. Além disso, na sequência, também foram expostos os resultados obtidos para os demais parâmetros, Kbas, Kint, Wc, Wm e XL, do modelo MGB, seguindo o mesmo padrão descrito neste parágrafo.

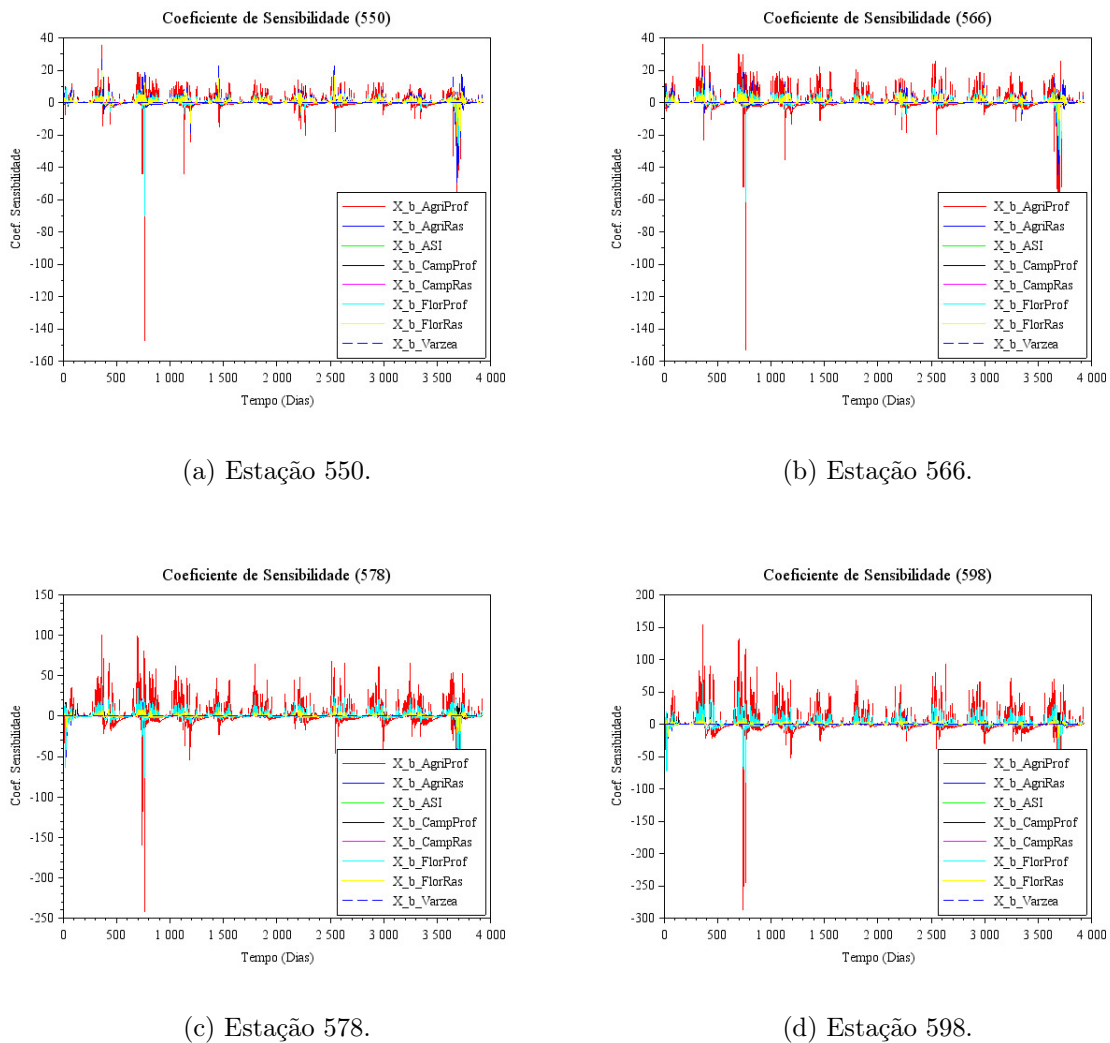
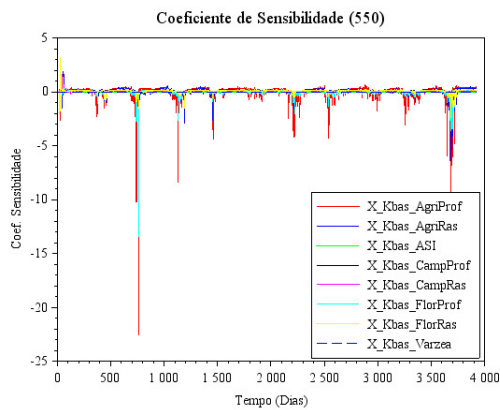


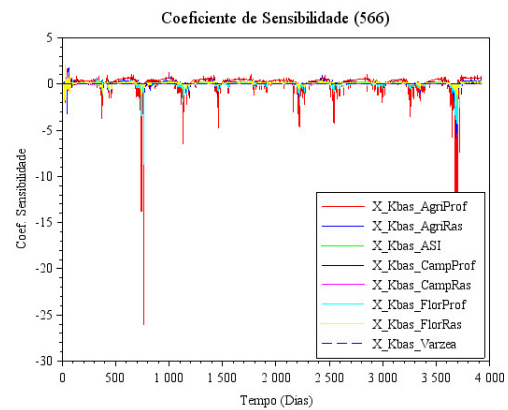
Figura 5.20: Análise de sensibilidade do parâmetro b para cada URH sobre cada estação.
Fonte: O Autor.

Nota-se que este parâmetro (b) possui maior sensibilidade na URH de agricultura em solo profundo (AgriProf). Observa-se, também, que sua variação é maior conforme aproxima-se da foz do rio, sendo mais sensível na estação 598.

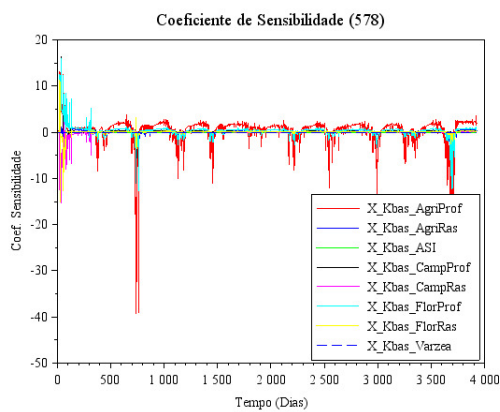
Adiante, são exibidos os gráficos da análise de sensibilidade do coeficiente do parâmetro de escoamento subterrâneo (controle de volume na recessão e estiagem), K_{bas} , nas Figuras 5.21(a)–5.21(d).



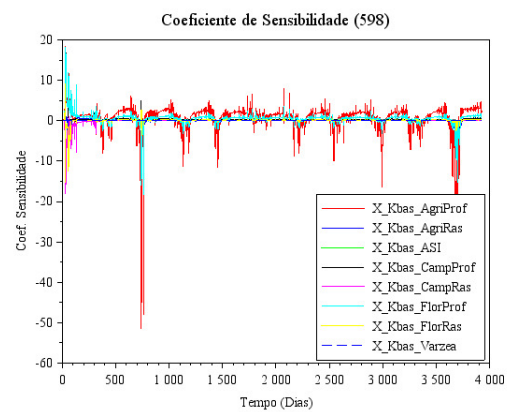
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



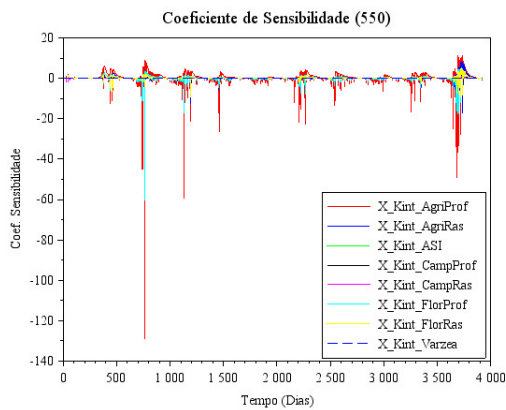
(d) Estação 598.

Figura 5.21: Análise de sensibilidade do parâmetro Kbas para cada URH sobre cada estação.

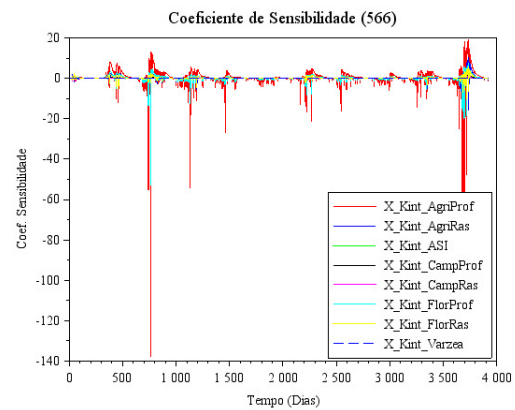
Fonte: O Autor.

Novamente, verifica-se que este parâmetro (Kbas) é mais sensível na URH de agricultura em solo profundo. Também, identifica-se aumento de sensibilidade nas estações mais a jusante do rio.

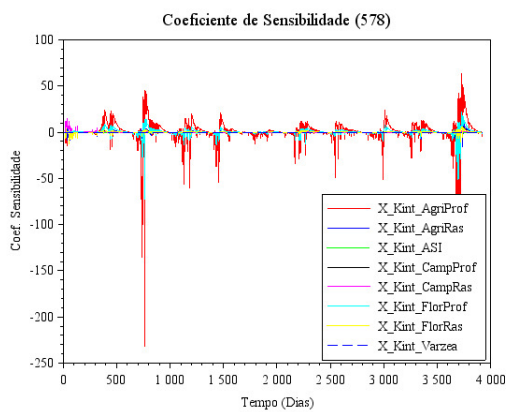
Já os gráficos do coeficiente de sensibilidade para o critério de escoamento subsuperficial (drenagem intermediária), Kint, são apresentados nas Figuras 5.22(a)–5.22(d).



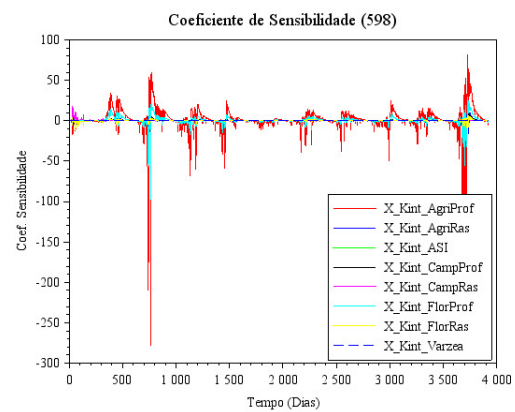
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



(d) Estação 598.

Figura 5.22: Análise de sensibilidade do parâmetro Kint para cada URH sobre cada estação.

Fonte: O Autor.

Verifica-se, com base nas Figuras 5.22(a)–5.22(d), que as mesmas considerações realizadas para o coeficiente Kbas, estendem-se ao parâmetro Kint.

Em seguida, os gráficos da análise de sensibilidade da fração abaixo da qual não há geração de escoamento subterrâneo e subsuperficial, W_c , são mostrados nas Figuras 5.23(a)–5.23(d).

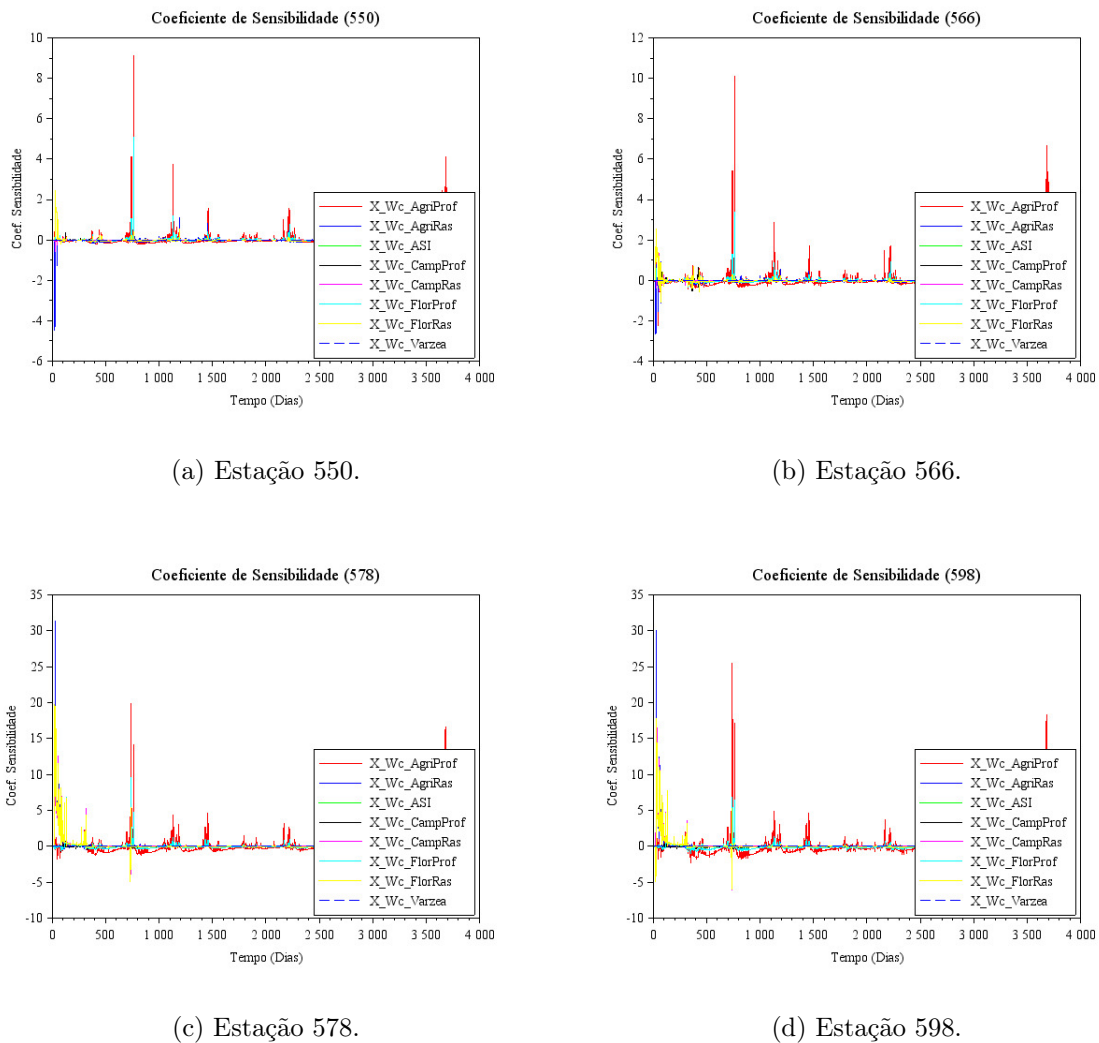
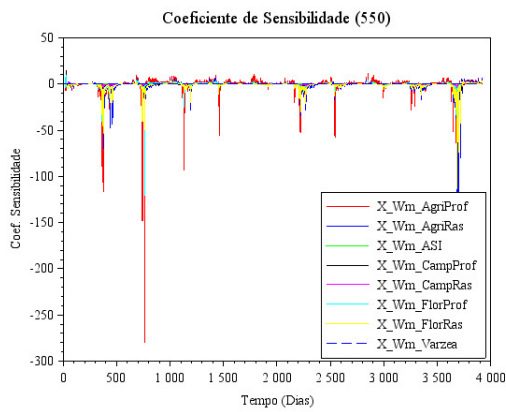


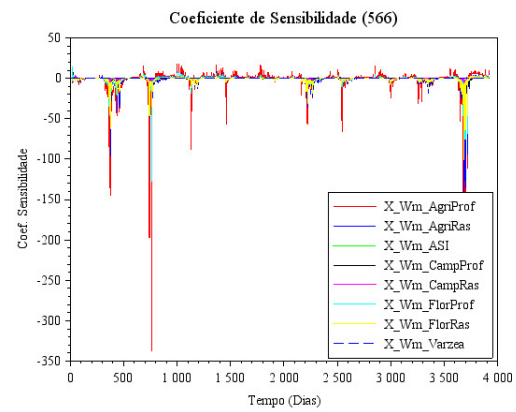
Figura 5.23: Análise de sensibilidade do parâmetro Wc para cada URH sobre cada estação.
Fonte: O Autor.

Para este parâmetro (Wc), constata-se que a maior sensibilidade se dá na URH de agricultura em solo profundo, exceto no início da simulação, onde a sensibilidade maior acontece na URH de agricultura em solo raso.

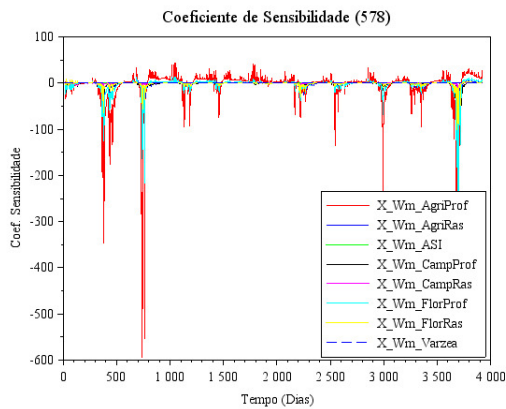
Por outro lado, os gráficos da análise de sensibilidade do parâmetro de capacidade de armazenamento de água no solo, Wm , encontram-se nas Figuras 5.24(a)–5.24(d).



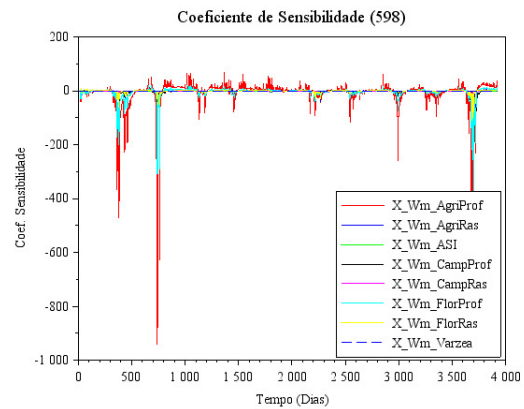
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



(d) Estação 598.

Figura 5.24: Análise de sensibilidade do parâmetro Wm para cada URH sobre cada estação.

Fonte: O Autor.

Percebe-se que este parâmetro (W_m) é mais sensível na URH de agricultura em solo profundo, apresentando grande aumento na sensibilidade próximo a foz do rio.

Também foi realizada a análise de sensibilidade do parâmetro XL, um coeficiente da equação do Kint, o qual controla o escoamento sub-superficial, cujos resultados são apresentados nas Figuras 5.25(a)–5.25(d).

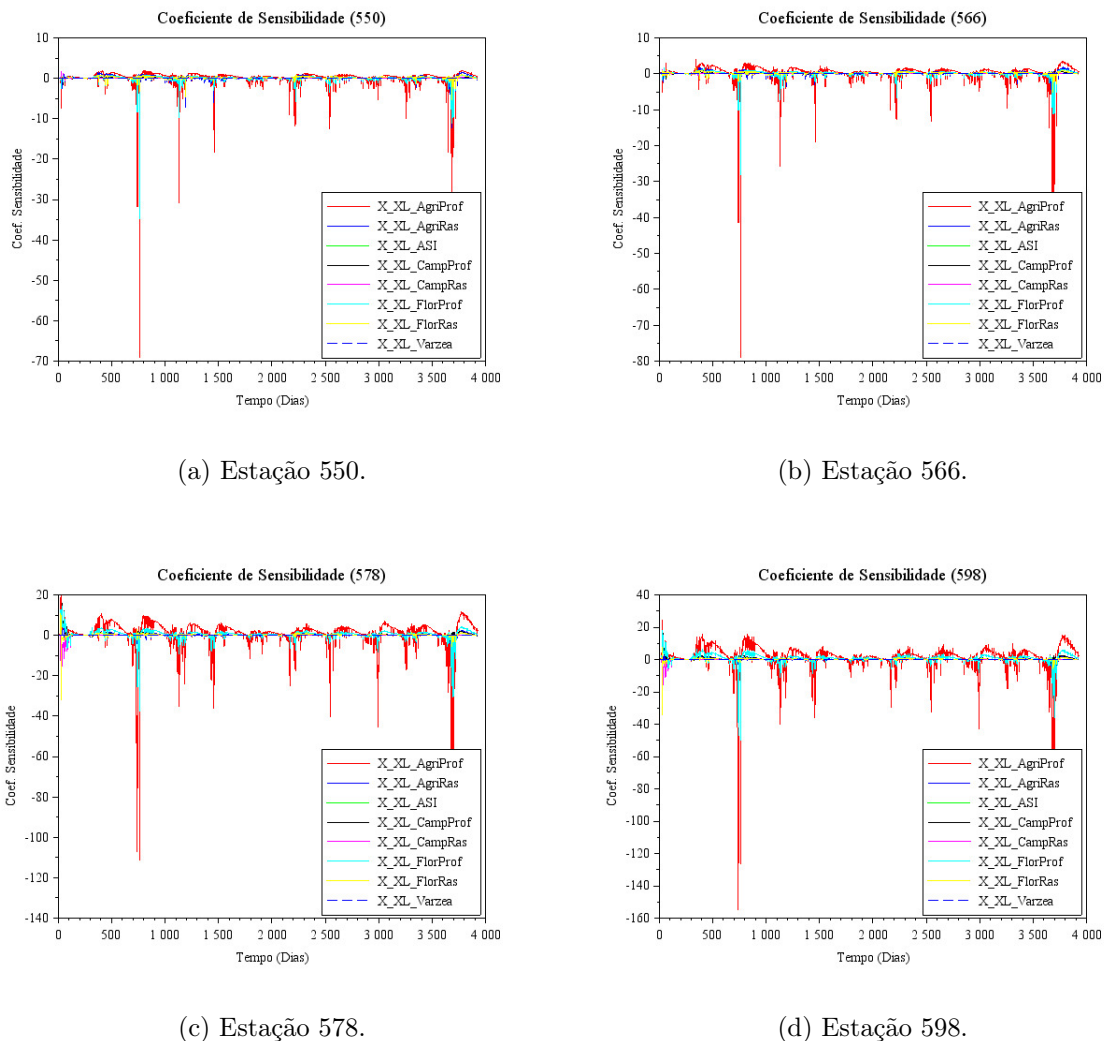


Figura 5.25: Análise de sensibilidade do parâmetro XL para cada URH sobre cada estação.
Fonte: O Autor.

Por fim, a sensibilidade do parâmetro XL apresentou comportamento similar ao do critério Wm.

A partir da observação dos gráficos das Figuras 5.20(a) a 5.25(d) e dos apontamentos realizados após os mesmos, podem-se realizar as seguintes ponderações a respeito dos parâmetros de solo do plugin MGB aplicado a bacia do rio Pomba.

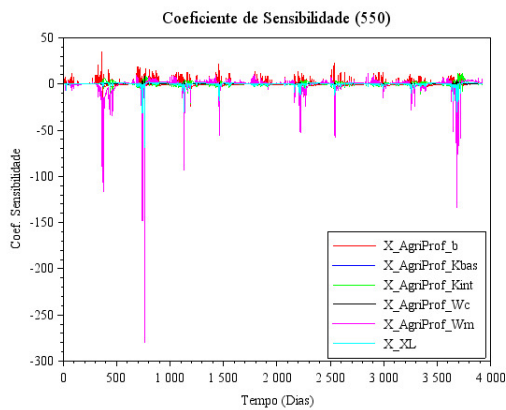
Identificaram-se, ao longo da rede de drenagem, maiores sensibilidades dos parâmetros na URH de agricultura de solo profundo. Isso se deve ao fato desta URH apresentar maior número de ocorrências ao longo da bacia. Desta forma, as perturbações nos valores dos parâmetros estarão presentes em mais células da discretização onde são realizados os balanços hídricos, gerando, portanto, maiores variações nos resultados.

No início da simulação, por outro lado, o parâmetro W_c apresenta maiores sensibilidades nas URHs de solo raso, devido a, neste momento inicial, os solos profundos ainda não terem alcançado a cota mínima para escoamento subterrâneo e subsuperficial (definida pelo W_c), de forma que, são as URHs de solo raso que sofrem influência deste coeficiente e, dentre elas, a agricultura de solo raso é a URH que apresenta maior ocorrência nesta bacia hidrográfica, manifestando, deste modo, maior sensibilidade.

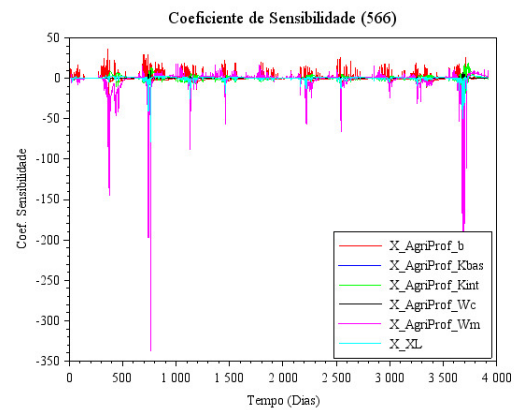
Ressalta-se, ainda, que os parâmetros de solo apresentam sensibilidades crescentes, de montante para jusante do rio, devido a cada trecho depender, também, dos resultados de escoamento encontrados a montante. Assim, as perturbações realizadas nos parâmetros disparam maiores variações nos resultados das regiões próximas a foz do rio, por lidarem com um maior número de dados.

Anteriormente, variou-se os valores de cada um dos parâmetros de solo e foi apresentado o comportamento da vazão para cada uma das URHs. Embora, adiante, tenha-se continuado realizando as variações nestes coeficientes, os resultados, agora, passam a ser exibidos considerando um parâmetro por vez para todas as URHs. O objetivo desse procedimento foi analisar se é mais interessante (e possível) trabalhar com a calibração de um único parâmetro para todas as URHs, simultaneamente, ou se é mais pertinente (e possível) variar todos os parâmetros para uma única URH, de cada vez.

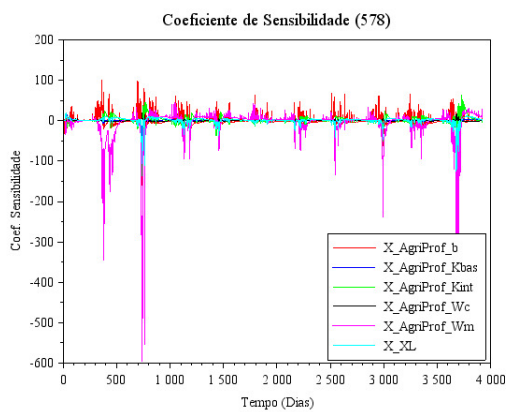
Assim, apresentam-se os resultados, em formato de gráfico, da análise de sensibilidade para cada um dos parâmetros de solo do modelo MGB, mencionados anteriormente neste trabalho, para a URH de agricultura em solo profundo (AgriProf), sobre a região de cada uma das 4 (quatro) estações fluviométricas observadas, Figuras 5.26(a)–5.26(d). Ainda, subsequentemente, são expostos os resultados da análise de sensibilidade, seguindo o mesmo padrão descrito neste parágrafo, para as demais unidades de resposta hidrológica (URHs): agricultura de solo raso (AgriRas), áreas semi-impermeáveis (ASI), campo de solo profundo (CampProf), campo de solo raso (CampRas), floresta de solo profundo (FlorProf), floresta de solo raso (FlorRas) e várzeas (Varzea).



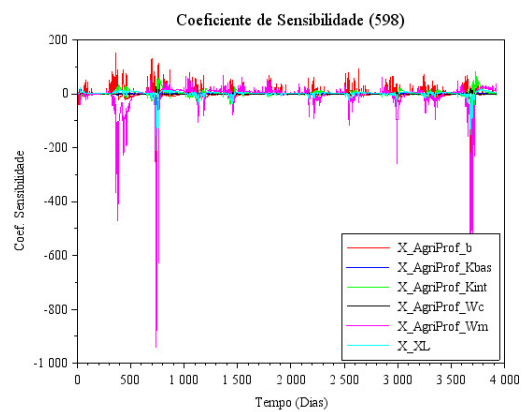
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



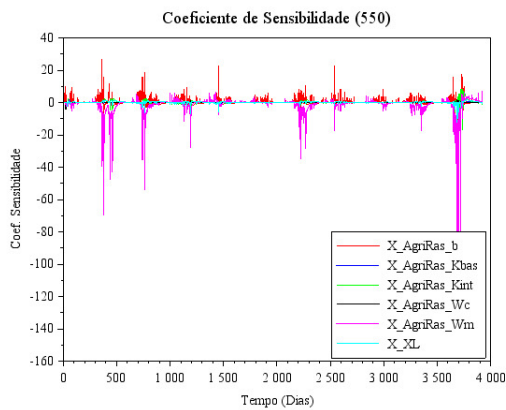
(d) Estação 598.

Figura 5.26: Análise de sensibilidade na URH de agricultura em solo profundo de cada parâmetro sobre cada estação.

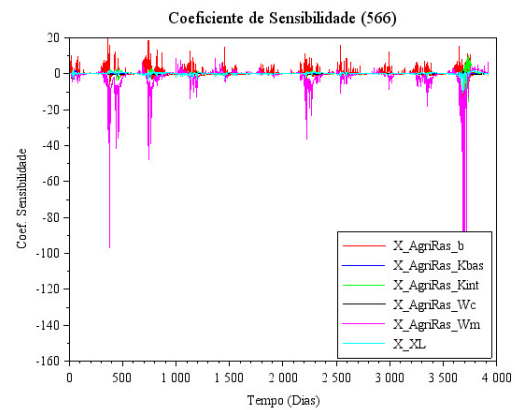
Fonte: O Autor.

Observa-se que, para a URH exposta acima, o parâmetro W_m apresenta maior sensibilidade. Verifica-se, também, que todos os coeficientes ficam mais sensíveis quanto mais a jusante no rio Pomba.

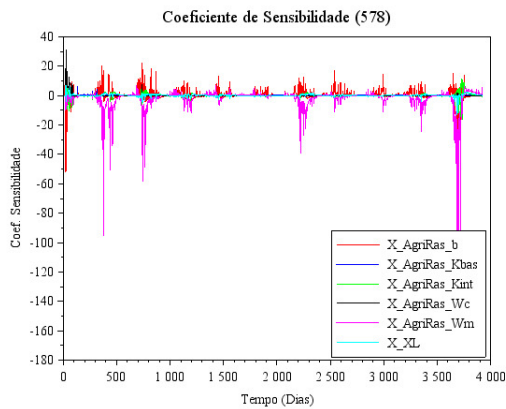
Posteriormente são apresentados os gráficos da análise de sensibilidade dos parâmetros de solo do modelo MGB, na URH de agricultura em solo raso, nas Figuras 5.27(a)–5.27(d).



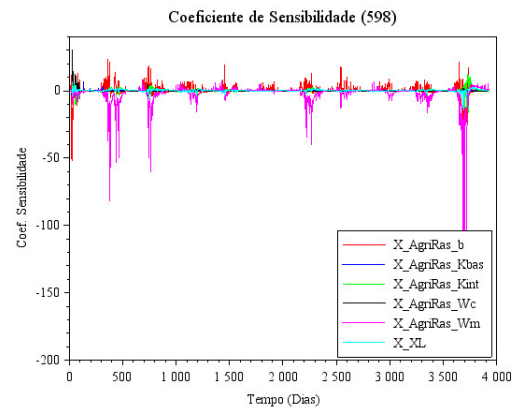
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



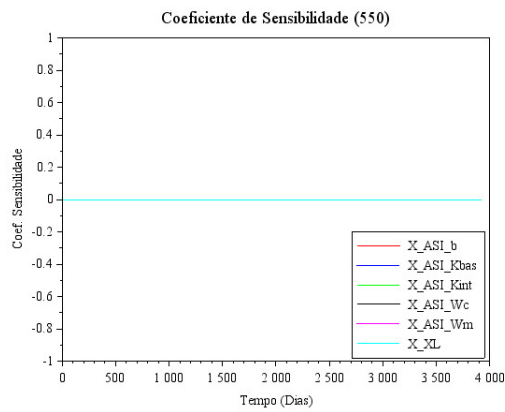
(d) Estação 598.

Figura 5.27: Análise de sensibilidade na URH de agricultura em solo raso de cada parâmetro sobre cada estação.

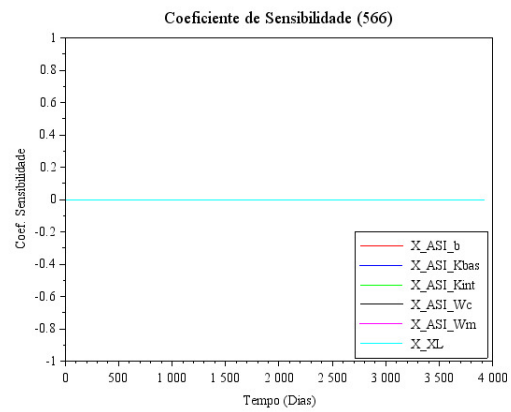
Fonte: O Autor.

As considerações feitas a respeito da variação de sensibilidade dos parâmetros do Modelo de Grandes Bacias (MGB) na URH de agricultura em solo profundo também se aplicam à URH de agricultura em solo raso.

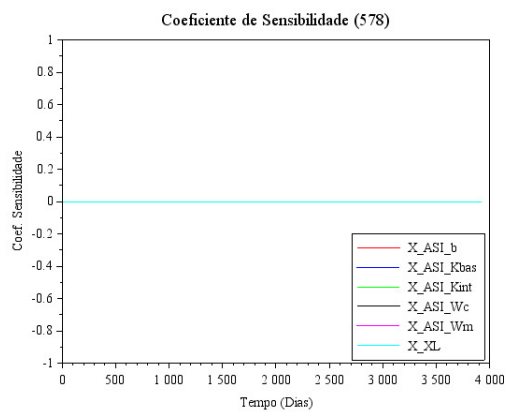
Adiante, são exibidos os gráficos da análise de sensibilidade dos parâmetros de solo do MGB, na URH de áreas semi-impermeáveis, Figuras 5.28(a)–5.28(d).



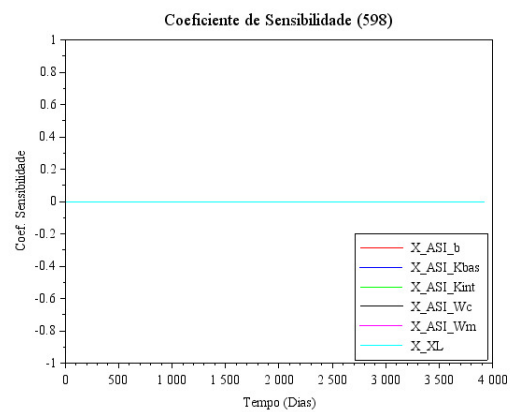
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



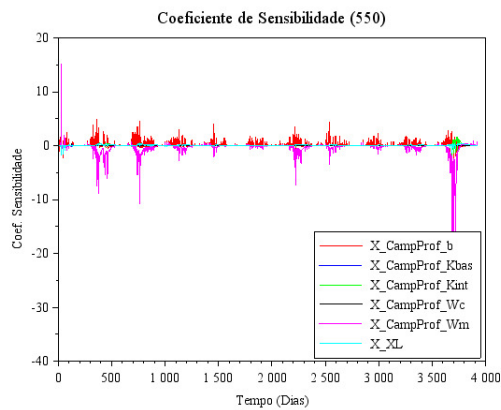
(d) Estação 598.

Figura 5.28: Análise de sensibilidade na URH de áreas semi-impermeáveis de cada parâmetro sobre cada estação.

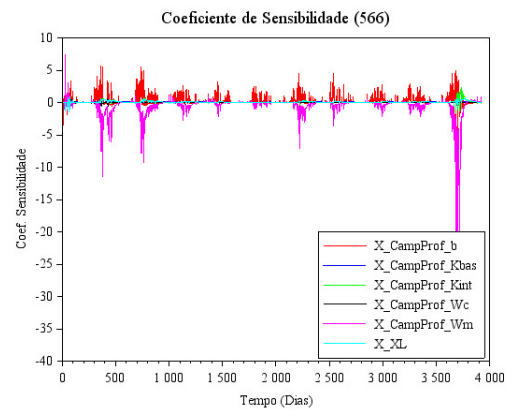
Fonte: O Autor.

Identifica-se que nenhum parâmetro apresentou sensibilidade na URH de áreas semi-impermeáveis, para nenhuma das regiões das quatro estações utilizadas neste trabalho.

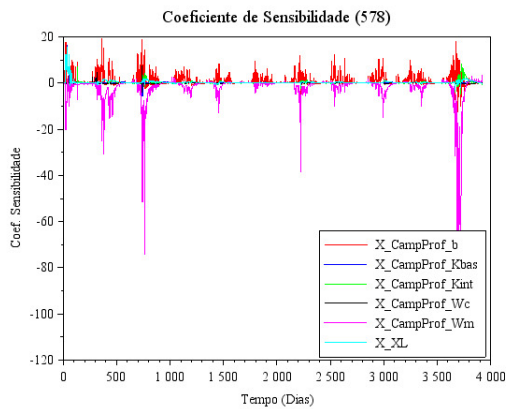
Abaixo, os gráficos da análise de sensibilidade realizada nos parâmetros da URH de campo de solo profundo. Veja as Figuras 5.29(a)–5.29(d).



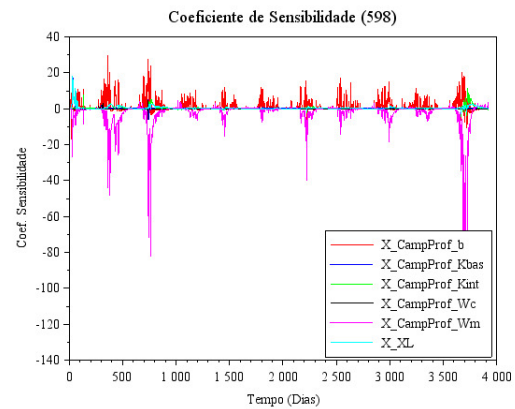
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



(d) Estação 598.

Figura 5.29: Análise de sensibilidade na URH de campo de solo profundo de cada parâmetro sobre cada estação.

Fonte: O Autor.

Nota-se que é o parâmetro W_m o que mais apresenta sensibilidade nesta URH. Também constata-se, que quanto mais próximo a foz do rio, maior a sensibilidade de todos os coeficientes do modelo MGB.

Na sequência, apresentam-se os gráficos da análise de sensibilidade dos parâmetros de solo do modelo, na URH de campo de solo raso, Figuras 5.30(a)–5.30(d).

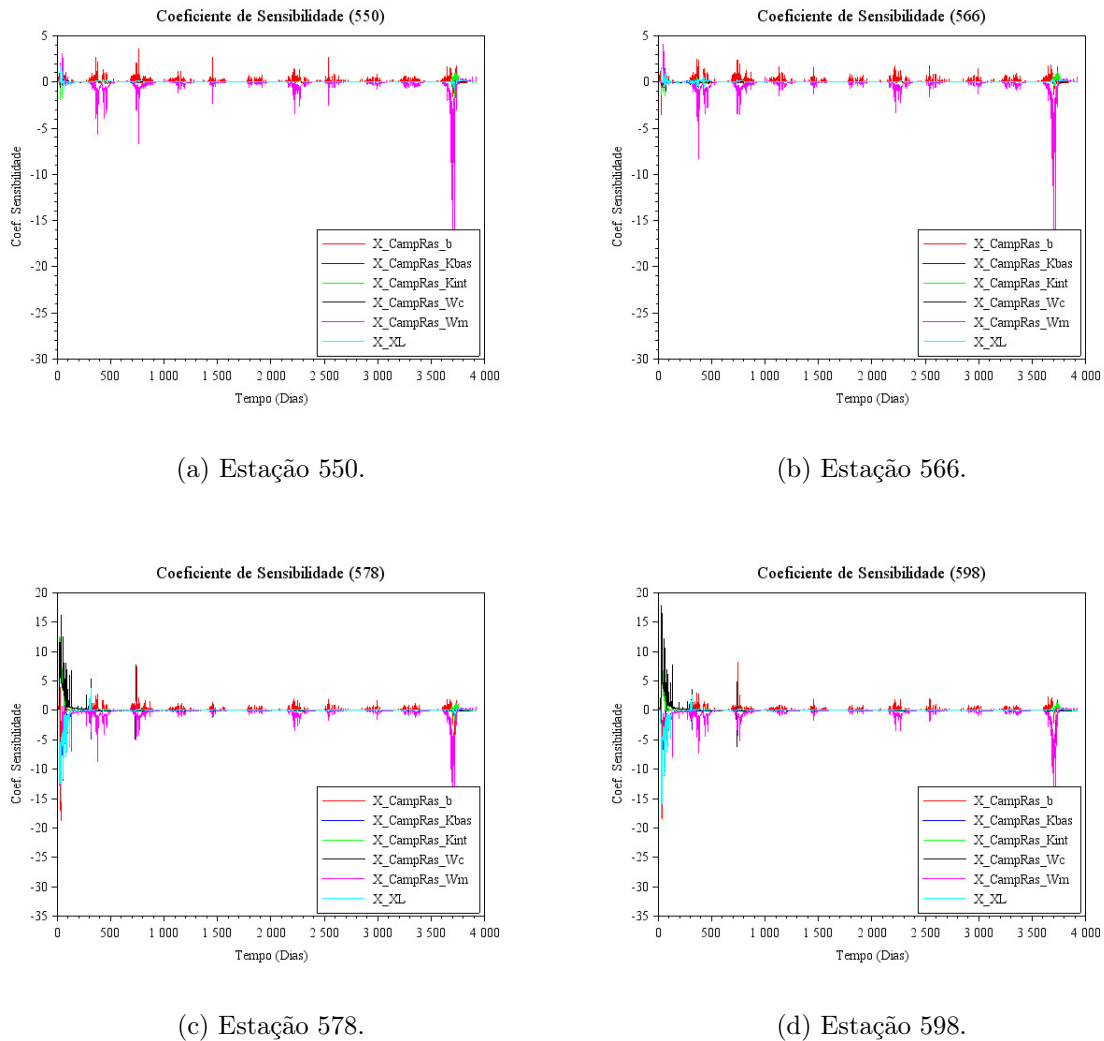
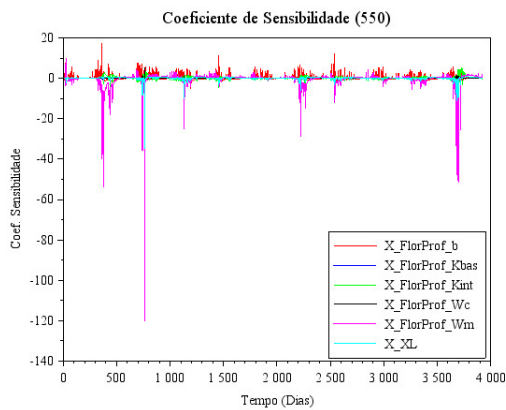


Figura 5.30: Análise de sensibilidade na URH de campo de solo raso de cada parâmetro sobre cada estação.

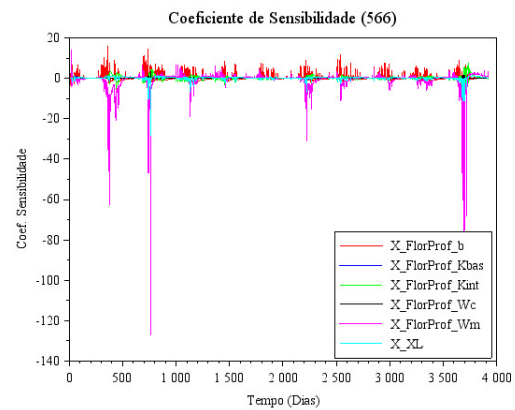
Fonte: O Autor.

Nesta URH, percebe-se que, novamente, o coeficiente W_m é o que apresenta maior sensibilidade, exceto no início das simulações nas regiões das estações 578 e 598, onde os parâmetros W_c e b possuem maior oscilação. É possível observar que nas estações da parte mais a jusante da bacia hidrográfica do rio Pomba, todos os parâmetros demonstram-se mais sensíveis.

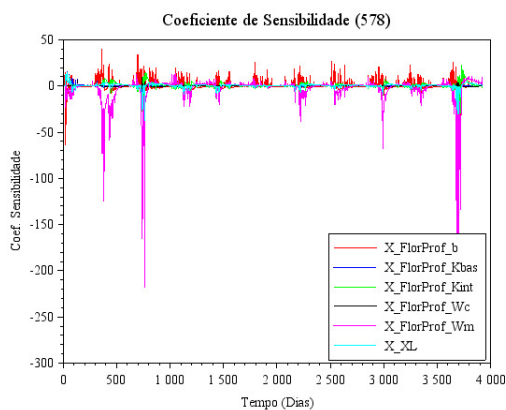
A seguir, são apresentados os gráficos da análise de sensibilidade dos parâmetros de solo do modelo MGB, na URH de floresta de solo profundo, nas Figuras 5.31(a)–5.31(d).



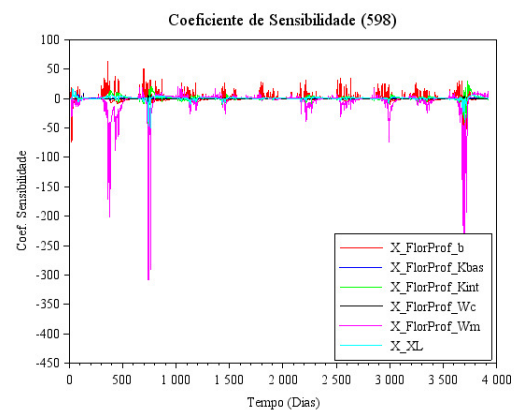
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



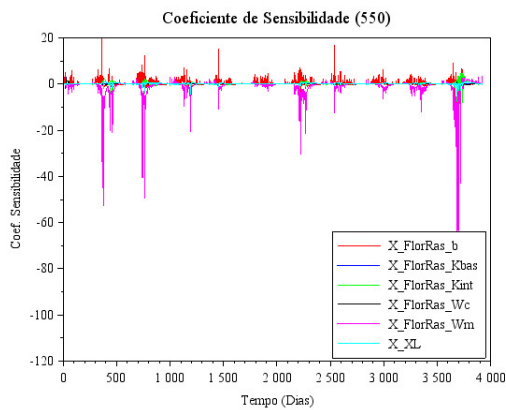
(d) Estação 598.

Figura 5.31: Análise de sensibilidade na URH de floresta de solo profundo de cada parâmetro sobre cada estação.

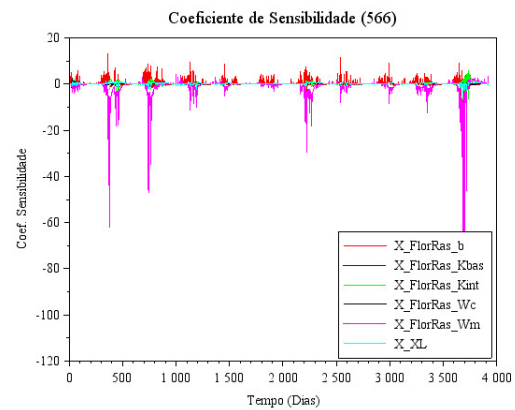
Fonte: O Autor.

Para esta URH, pode-se verificar maior sensibilidade no parâmetro Wm. Identifica-se, ainda, o aumento da sensibilidade em todos os coeficientes do modelo MGB quanto mais a jusante no rio estudado.

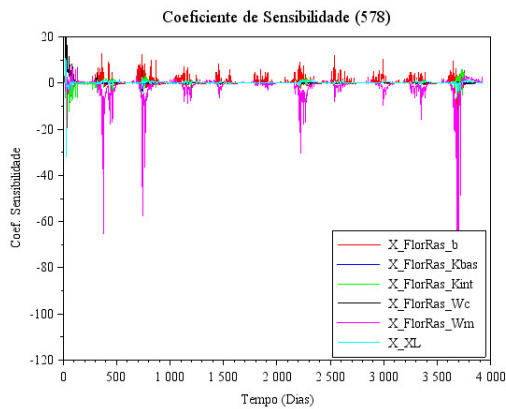
Depois, os gráficos da análise de sensibilidade da URH de floresta de solo raso exibidos nas Figuras 5.32(a)–5.32(d).



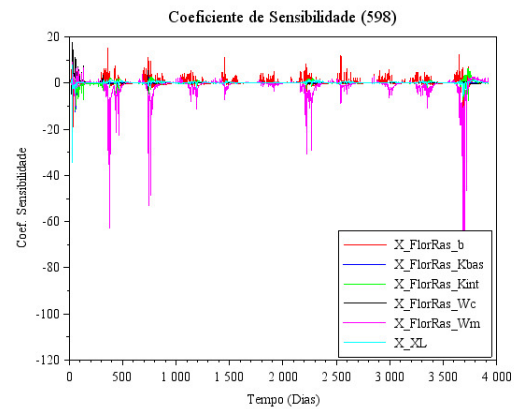
(a) Estação 550.



(b) Estação 566.



(c) Estação 578.



(d) Estação 598.

Figura 5.32: Análise de sensibilidade na URH de floresta de solo raso de cada parâmetro sobre cada estação.

Fonte: O Autor.

Para esta URH, percebe-se que o coeficiente W_m é o mais sensível, exceto no início das simulações nas regiões das estações 578 e 598, onde os parâmetros W_c e XL apresentam maior sensibilidade. Não há significativa variação na amplitude do coeficiente de sensibilidade entre as estações fluviométricas analisadas.

Finalmente, exibem-se os gráficos da análise de sensibilidade nos parâmetros de solo do MGB, na URH de várzeas, conforme Figuras 5.33(a)–5.33(d).

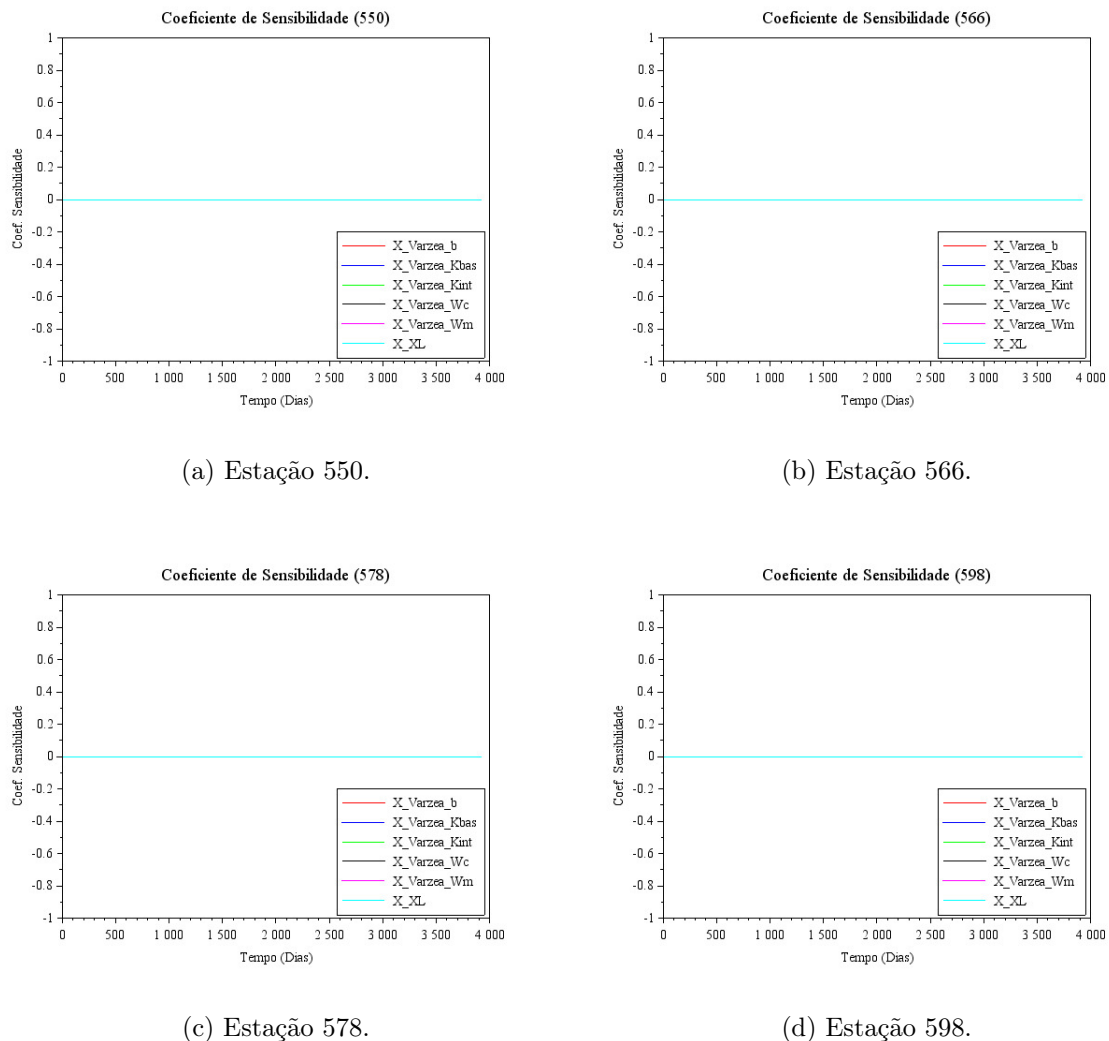


Figura 5.33: Análise de sensibilidade na URH de várzea de cada parâmetro sobre cada estação.

Fonte: O Autor.

Assim como as áreas semi-impermeáveis, nenhum parâmetro apresentou sensibilidade na URH de várzea, para nenhuma das regiões das 4 (quatro) estações fluviométricas utilizadas.

As diferentes curvas dos coeficiente de sensibilidade, de cada parâmetro, indicam que estes influenciam de maneiras diferentes os resultados. Desta forma, com base nos gráficos das Figuras 5.26(a) a 5.33(d) e nas observações realizadas, pode-se inferir, a partir dos diferentes perfis gráficos obtidos dos coeficientes de sensibilidade dos parâmetros de solo em cada URH, a possibilidade de se realizar a calibração dos mesmos simultaneamente, exceto nas URHs de áreas semi-impermeáveis (ASI) e várzeas (Varzea), onde, para ambos

os casos, os parâmetros não apresentaram sensibilidade para as perturbações realizadas.

Ainda, no que tange a escala de sensibilidade, o parâmetro W_m , responsável por indicar a capacidade de armazenamento de água no solo, foi o que apresentou maior sensibilidade em todas as unidades de resposta hidrológica (URH). Entende-se, com este resultado, a importância de definir-se bem o valor do coeficiente W_m , visto que ele está diretamente ligado aos diferentes tipos de escoamentos simulados pelo modelo MGB.

Por outro lado, nas URHs de solo raso, para as regiões das estações mais a jusante do rio (578 e 598), observou-se que, no início da simulação, o parâmetro W_c apresenta maior sensibilidade, reforçando as conclusões obtidas anteriormente.

Novamente, também foi possível reconhecer o aumento da sensibilidade nas regiões mais a jusante da bacia hidrográfica.

5.3.2 Resultados da Calibração Manual dos Parâmetros do MGB para Uma Sub-Bacia

Após realizar-se o processo de calibração manual do modelo, ajustando-se os valores dos parâmetros de solo, encontrou-se a configuração exposta na Tabela 5.2 e com os coeficientes $CS = 20$, $CI = 150$, $CB = 2.000$ e $QB = 0,01$.

Tabela 5.2: Parâmetros de solo obtidos por meio da calibração manual.

URH	W_m	b	Kbas	Kint	XL	CAP	W_c
FlorRas	650	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
FlorProf	750	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
AgriRas	650	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
AgriProf	750	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
CampRas	650	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
CampProf	750	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
Varzea	300	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
ASI	100	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Para esta configuração de valores apresentados na Tabela 5.2, foram obtidos os hidrogramas e gráficos de duração de fluxo, nas Figuras 5.34–5.41, onde pode-se observar a aproximação do gráfico simulado ao gráfico observado (elaborado com as vazões obtidas na ANA) e significativas melhoras nas métricas de desempenho, principalmente nas estações mais a jusante do rio (578 e 598).

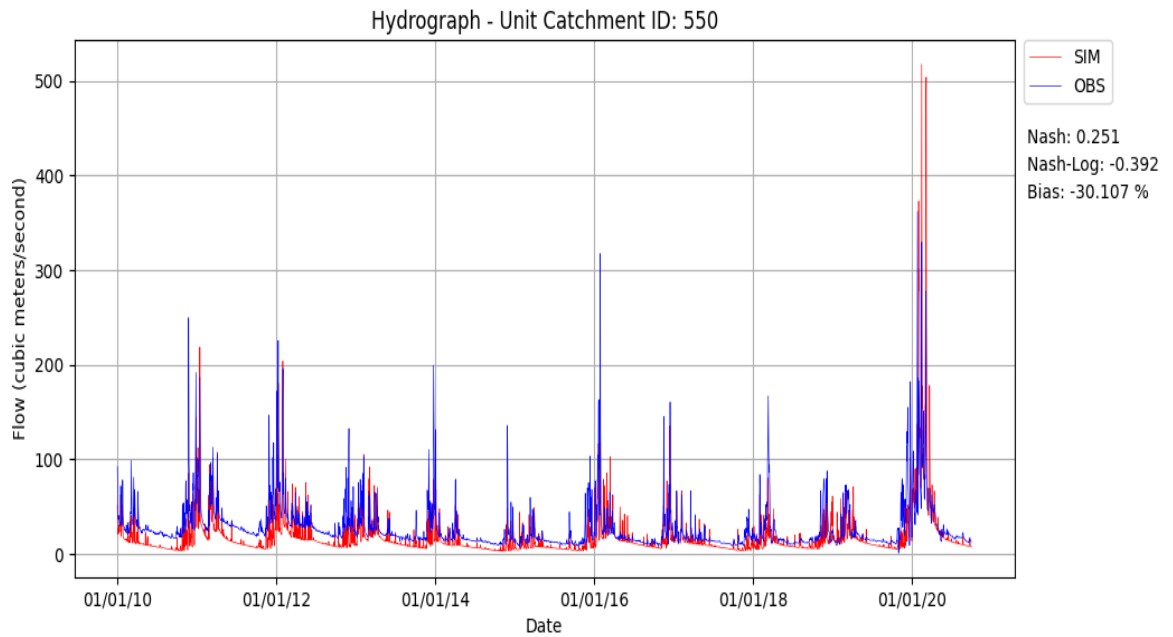


Figura 5.34: Hidrograma da Estação 550 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.

Fonte: O Autor.

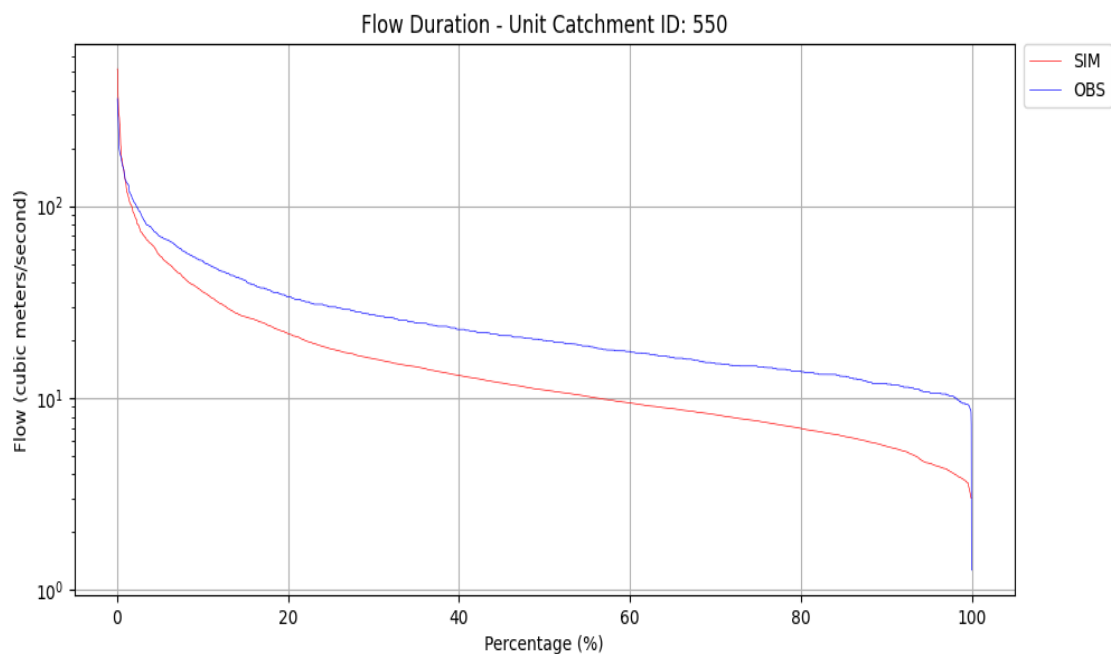


Figura 5.35: Duração de fluxo da Estação 550 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.

Fonte: O Autor.

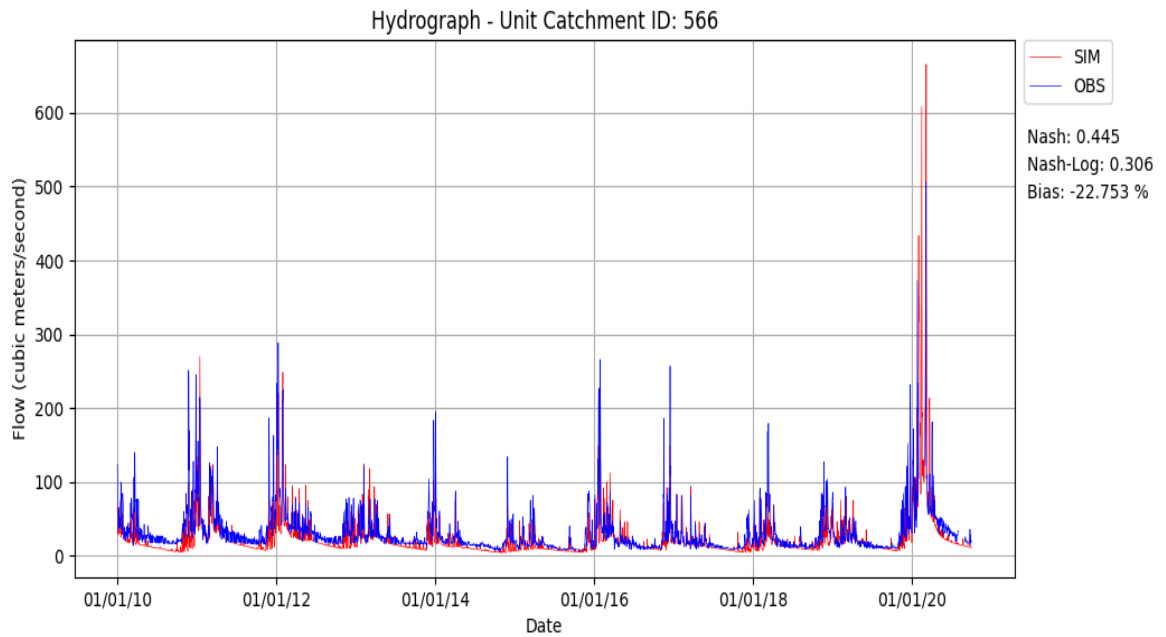


Figura 5.36: Hidrograma da Estação 566 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.

Fonte: O Autor.

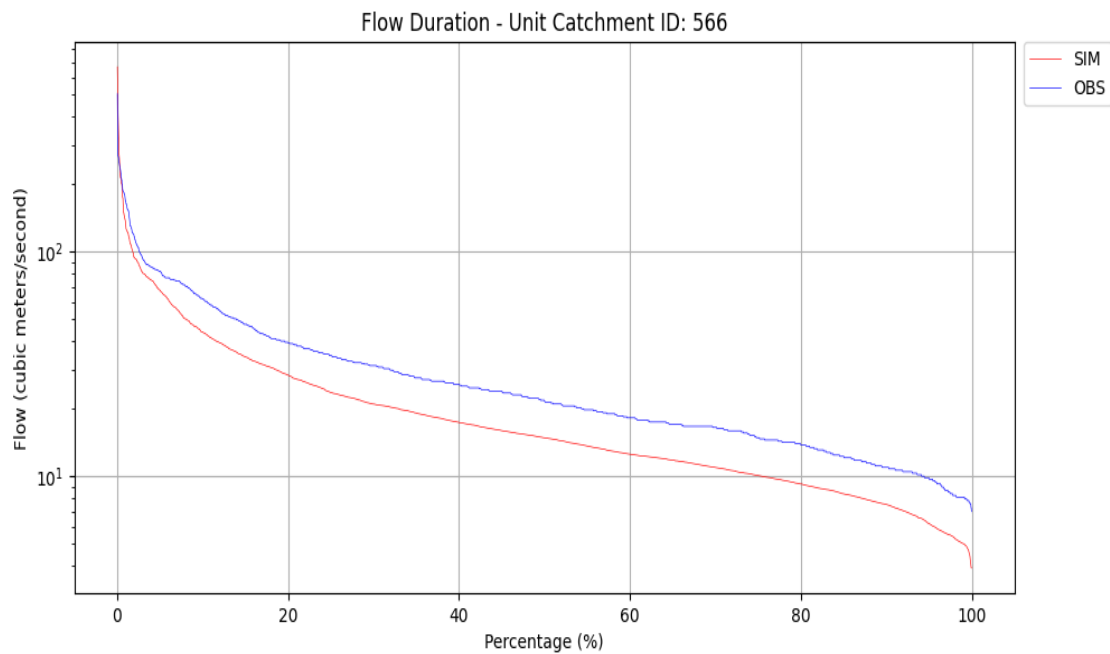


Figura 5.37: Duração de fluxo da Estação 566 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.

Fonte: O Autor.

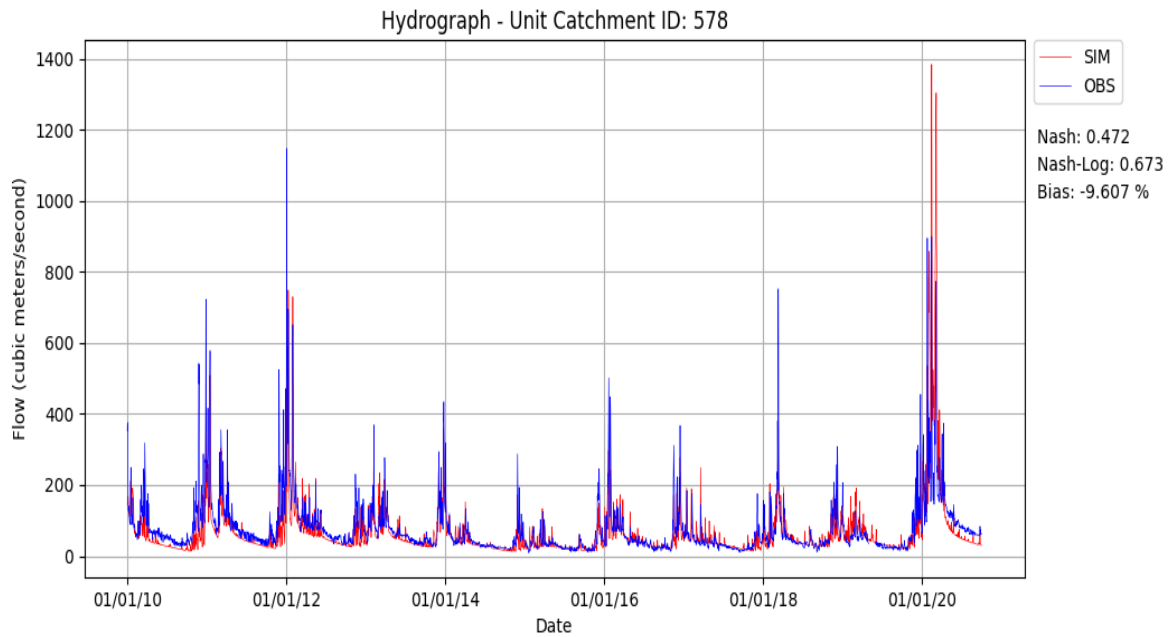


Figura 5.38: Hidrograma da Estação 578 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.

Fonte: O Autor.

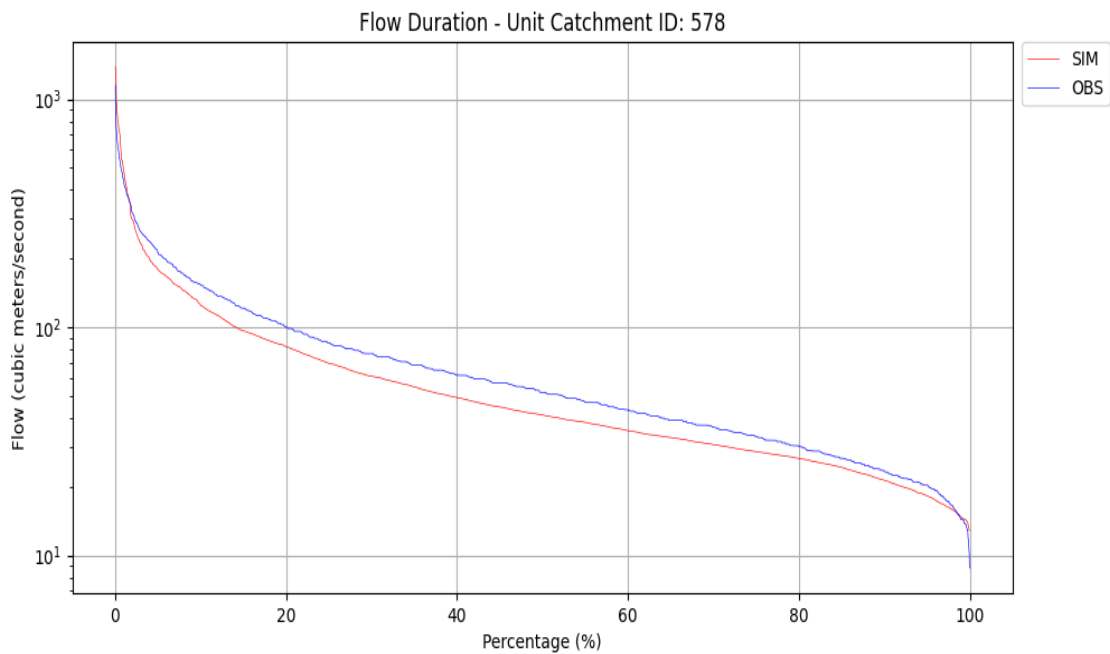


Figura 5.39: Duração de fluxo da Estação 578 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.

Fonte: O Autor.

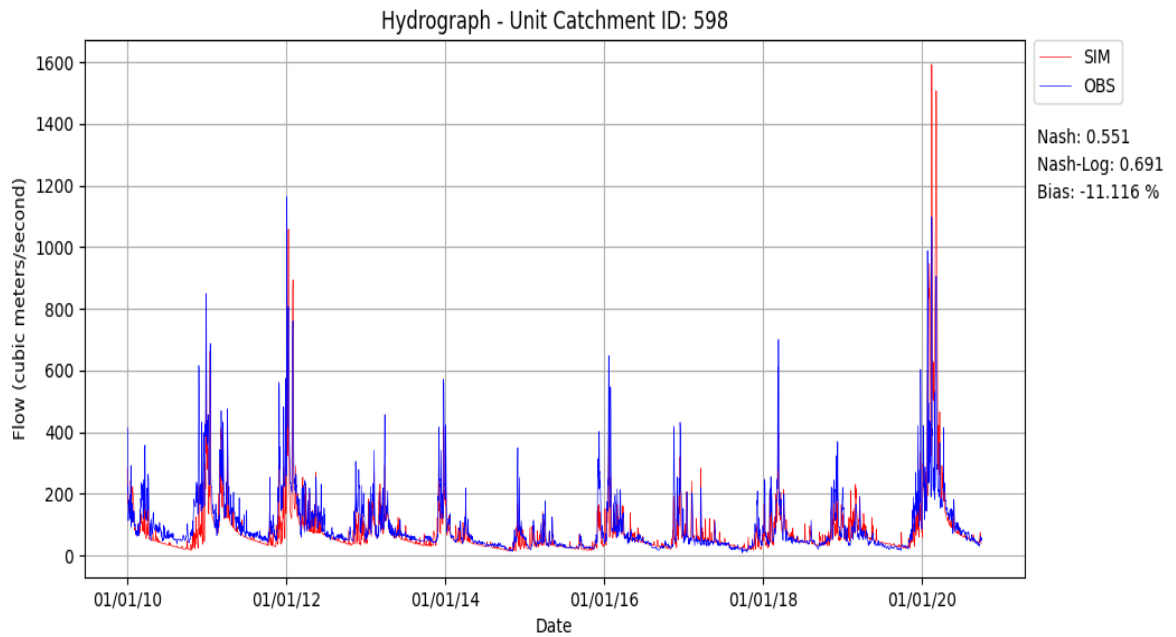


Figura 5.40: Hidrograma da Estação 598 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.

Fonte: O Autor.

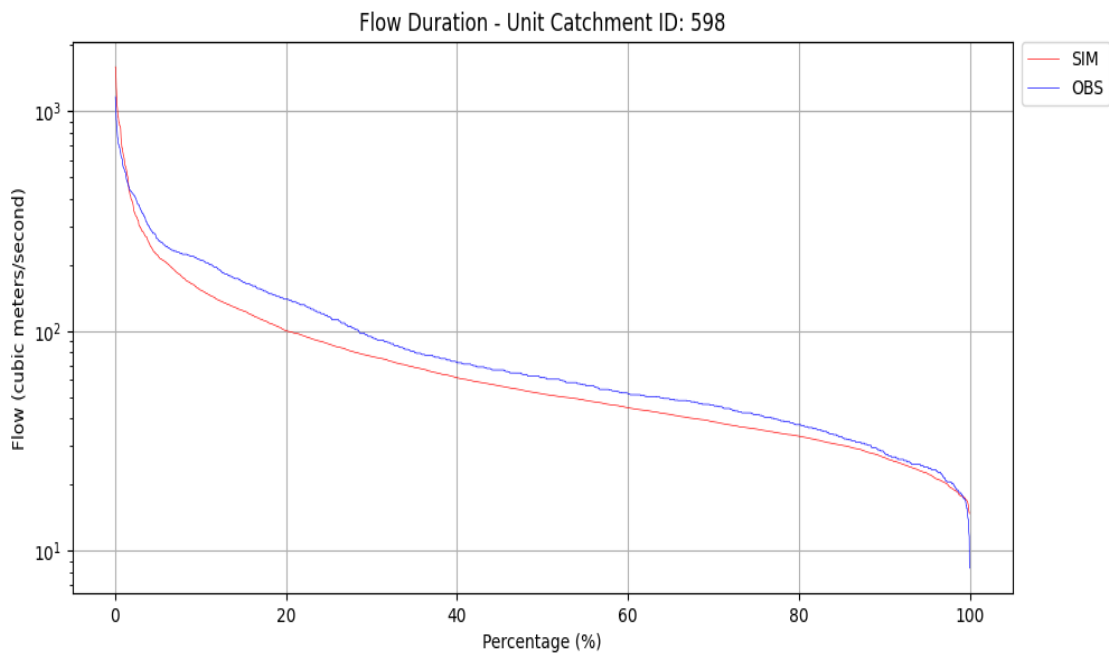


Figura 5.41: Duração de fluxo da Estação 598 com calibração manual dos parâmetros de interesse para uma única sub-bacia.

Fonte: O Autor.

Tomando como base os gráficos expostos nas Figuras 5.34 a 5.41, pode-se observar que as vazões simuladas pelo plugin MGB (linha vermelha) estão bem próximas das observadas, obtidas no site da ANA (linhas azuis), sobreponde-se umas as outras em diversos trechos ao longo do tempo. Com exceção da região no entorno da estação fluviométrica da minibacia de ID 550, as métricas Nash e Nash-Log confirmam esse resultado positivo nas regiões ao redor das demais minibacias (566, 578 e 598) ao apresentarem valores maiores do que zero, assim como a métrica Bias ao aproximar-se do valor zero.

5.3.3 Resultados da Calibração Manual dos Parâmetros do MGB para Três Sub-Bacias

Adiante são exibidos os valores assumidos para os parâmetros de solo do modelo MGB após calibração manual, nas Tabelas 5.3-5.5, para as 3 (três) sub-bacias utilizadas nesta simulação.

Para a sub-bacia 1, encontram-se os valores para $CS = 50$, $CI = 150$, $CB = 2.000$, $QB = 0,01$. Já os demais parâmetros são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Parâmetros de solo após a calibração manual da sub-bacia 1.

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	650	0,1	0,9	2	0,6	0	0,1
FlorProf	750	0,1	0,9	2	0,6	0	0,1
AgriRas	650	0,1	0,9	2	0,6	0	0,1
AgriProf	750	0,1	0,9	2	0,6	0	0,1
CampRas	650	0,1	0,9	2	0,6	0	0,1
CampProf	750	0,1	0,9	2	0,6	0	0,1
Varzea	300	0,1	0,9	2	0,6	0	0,1
ASI	100	0,1	0,9	2	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Já para a sub-bacia 2, foram obtidos os valores para $CS = 20$, $CI = 150$, $CB = 2.000$, $QB = 0,01$ e os demais parâmetros, exibidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Parâmetros de solo após a calibração manual da sub-bacia 2.

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	650	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
FlorProf	750	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
AgriRas	650	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
AgriProf	750	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
CampRas	650	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
CampProf	750	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
Varzea	300	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1
ASI	100	0,11	0,9	2	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Por fim, para a sub-bacia 3, obtiveram-se os valores de $CS = 20$, $CI = 150$, $CB = 2.000$, $QB = 0,01$ e os demais parâmetros são explicitados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Parâmetros de solo após a calibração manual da sub-bacia 3.

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	580	0,1	1,5	4	0,6	0	0,1
FlorProf	700	0,1	1,5	2	0,6	0	0,1
AgriRas	580	0,1	1,5	4	0,6	0	0,1
AgriProf	680	0,1	1,5	2	0,6	0	0,1
CampRas	580	0,1	1,5	4	0,6	0	0,1
CampProf	700	0,1	1,5	2	0,6	0	0,1
Varzea	285	0,1	1,5	2	0,6	0	0,1
ASI	95	0,1	1,5	2	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Para esta configuração de parâmetros expostos nas Tabelas 5.3-5.5, foram elaborados os hidrogramas e gráficos de duração de fluxo, nas Figuras 5.42–5.49, onde também pode-se observar a aproximação do gráfico simulado e do gráfico observado, com significativa melhora nas métricas de desempenho, principalmente nas estações mais a jusante do rio (578 e 598).

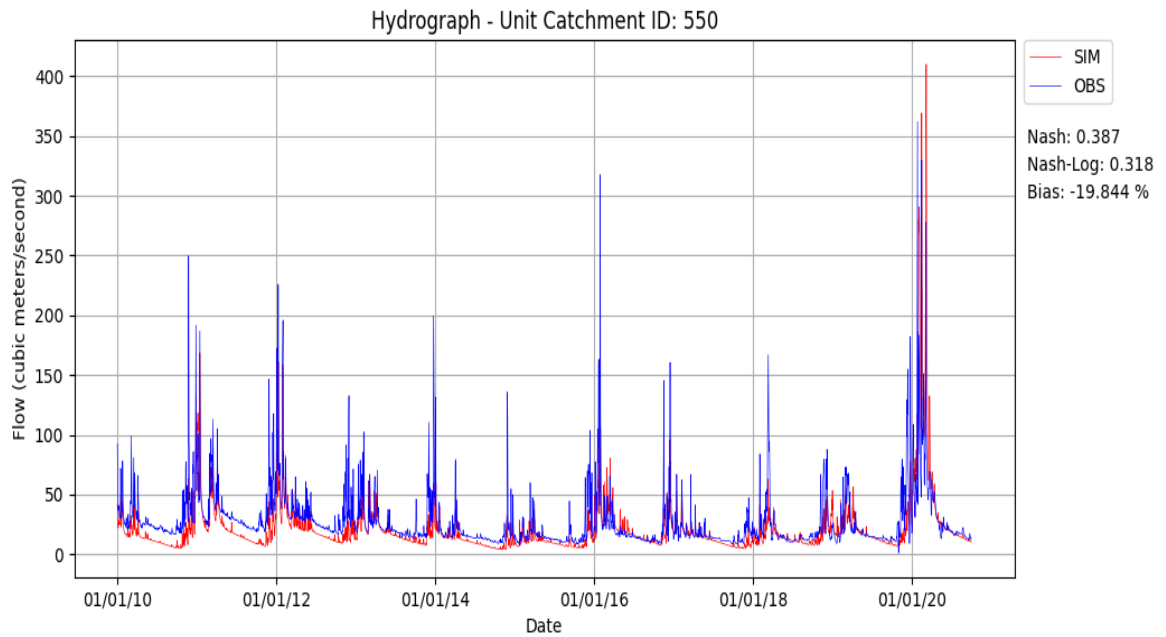


Figura 5.42: Hidrograma da Estação 550 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

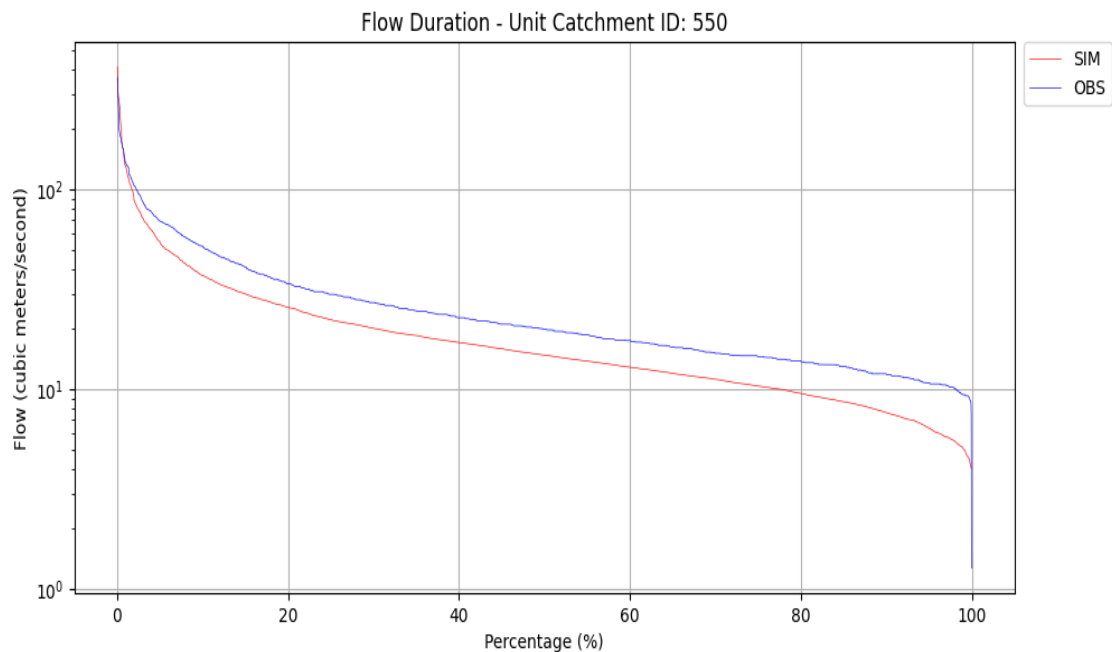


Figura 5.43: Duração de fluxo da Estação 550 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

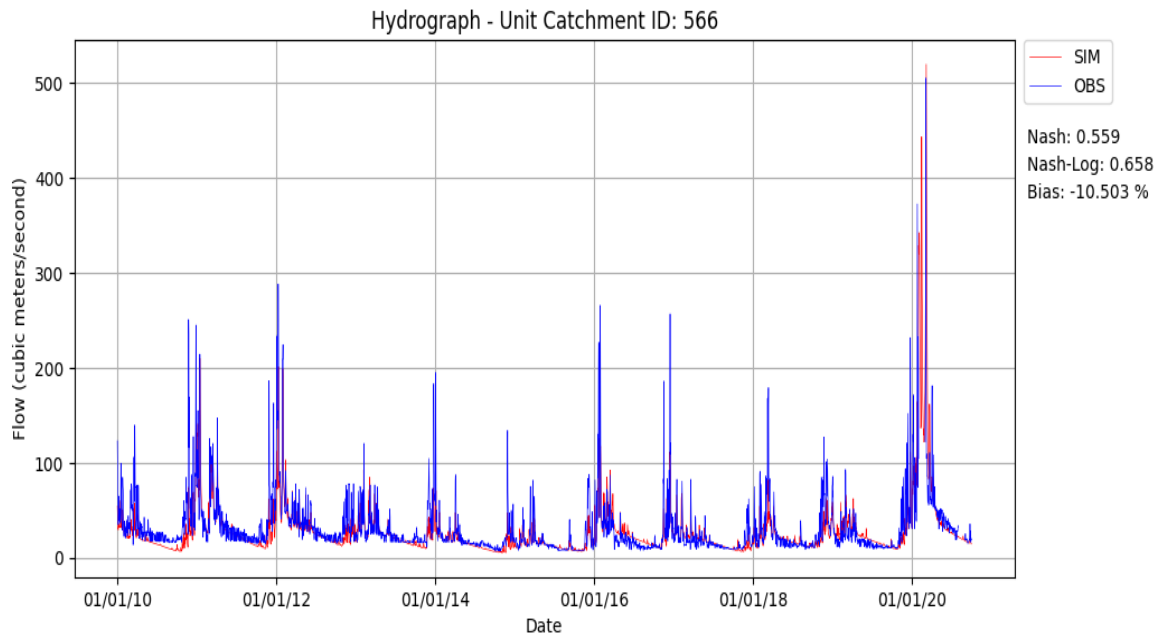


Figura 5.44: Hidrograma da Estação 566 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

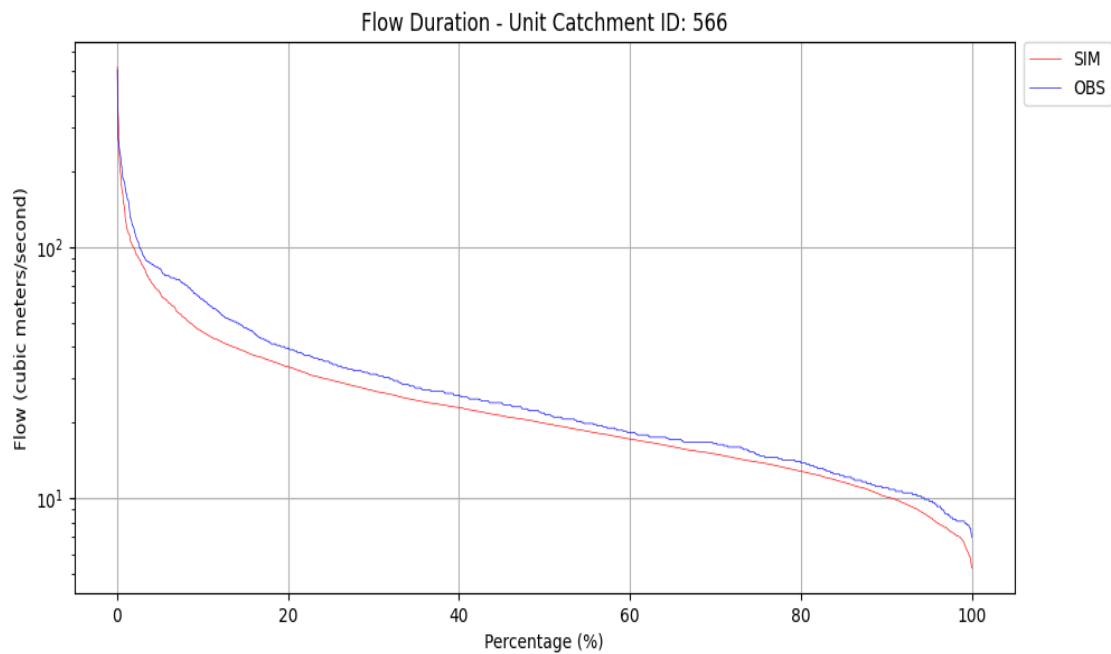


Figura 5.45: Duração de fluxo da Estação 566 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

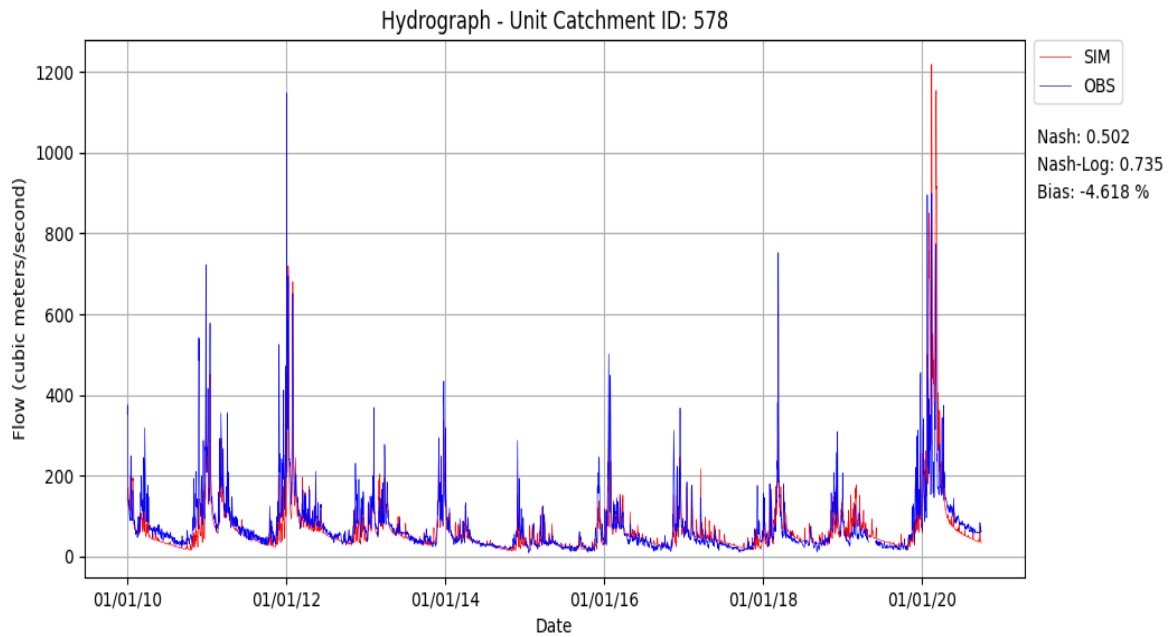


Figura 5.46: Hidrograma da Estação 578 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

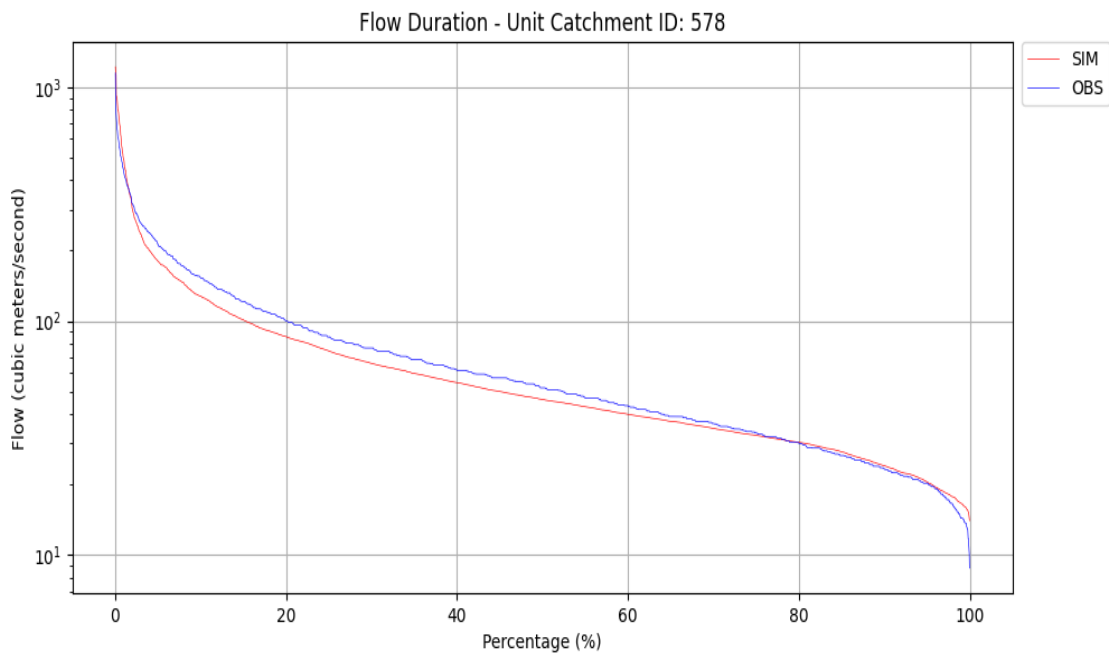


Figura 5.47: Duração de fluxo da Estação 578 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

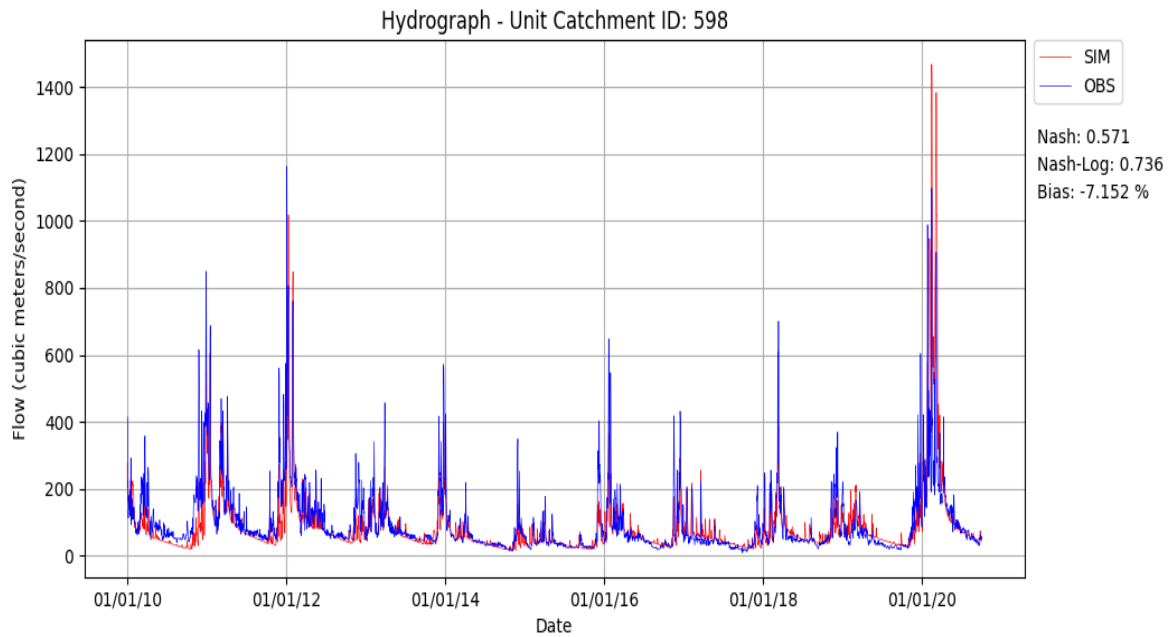


Figura 5.48: Hidrograma da Estação 598 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

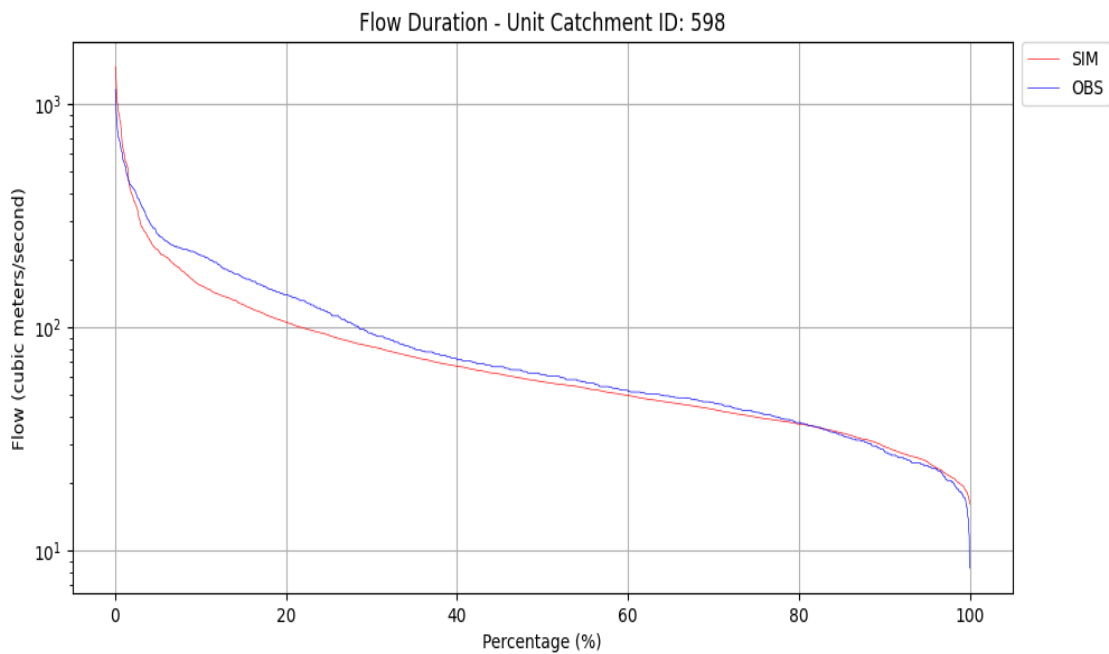


Figura 5.49: Duração de fluxo da Estação 598 com calibração manual dos parâmetros de interesse para três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

Com base nos gráficos contidos nas Figuras 5.42 a 5.49 e nos valores alcançados para as métricas Nash e Nash-Log (superiores a zero e próximos de um) e Bias (próximo a zero) em cada uma das regiões no entorno das estações fluviométricas utilizadas, verifica-se que as vazões simuladas pelo plugin MGB (linha vermelha) aproximam-se satisfatoriamente das vazões observadas da ANA (linha azul). Esse resultado é ainda mais positivo do que o obtido para a calibração manual com uma única sub-bacia, o que mostra maior eficiência do plugin MGB ao dividir-se a bacia hidrográfica em sub-bacias.

5.4 Resultados Envolvendo a Calibração Automática do Plugin MGB

Nesta seção, apresentam-se os gráficos obtidos nas simulações efetuadas para a bacia hidrográfica do rio Pomba após realizar-se a calibração automática do modelo com uma sub-bacia e com três sub-bacias. A verificação dos resultados não levou em consideração o tempo computacional gasto, visto que foram utilizados o mesmo ponto de partida, limites de busca e procedimentos da calibração automática, para os diferentes modelos. Em contrapartida, a análise se deu de forma qualitativa, sobre os aspectos visuais dos gráficos, onde a capacidade de representação dos picos de vazão, foi tomada como principal fator, seguido da sobreposição da curva simulada à curva observada para o hidrograma e o gráfico de duração de fluxo. Assim como, a análise quantitativa permeou-se pelas métricas das funções objetivo “Nash”, “Nash-Log” e “Bias”, que representam melhores resultados quando se aproximam de “1”, “1” e “0”, respectivamente.

O processo de calibração automática, para ambos os modelos (uma única sub-bacia e três sub-bacias), se deu, em um primeiro momento, pela calibração dos parâmetros de solo das URHs de “floresta de solo raso”, “floresta de solo profundo”, “agricultura de solo raso”, “agricultura de solo profundo”, “campo de solo raso” e “campo de solo profundo”. Em seguida, realizou-se, separada das demais, a calibração das unidades “várzea” e “área semi-impermeável”, posto que estas não apresentaram sensibilidade à variação dos coeficientes. Cabe ressaltar que, a cada uma dessas etapas da calibração automática, para cada modelo, foram gerados três resultados, sendo um para cada função objetivo (Nash, Nash-Log e Bias), onde selecionou-se o melhor resultado gráfico como ponto de partida para a próxima etapa.

Com base nos limites de variação dos parâmetros de solo do modelo MGB, dados na literatura do mesmo, e nos valores encontrados através da calibração manual, estipulou-se

os valores mínimos, máximos e médios utilizados nas calibrações automáticas, conforme mostrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Tabela de valores mínimos, máximos e médios dos parâmetros de solo, para cada URH, utilizados na calibração automática de ambos os modelos.

—	Wm			b		
URH	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
FlorRas	270	900	1000	0,03	0,1	0,18
FlorProf	300	1000	1000	0,03	0,1	0,18
AgriRas	270	900	1000	0,03	0,1	0,18
AgriProf	300	1000	1000	0,03	0,1	0,18
CampRas	270	900	1000	0,03	0,1	0,18
CampProf	300	1000	1000	0,03	0,1	0,18
Varzea	150	500	900	0,03	0,1	0,18
ASI	90	300	540	0,03	0,1	0,18
—	Kbas			Kint		
URH	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
FlorRas	0,05	0,1	2	2	2	20
FlorProf	0,05	0,1	2	2	2	20
AgriRas	0,05	0,1	2	2	2	20
AgriProf	0,05	0,1	2	2	2	20
CampRas	0,05	0,1	2	2	2	20
CampProf	0,05	0,1	2	2	2	20
Varzea	0,05	0,1	2	2	2	20
ASI	0,05	0,1	2	2	2	20

Fonte: O Autor.

Nota-se, observando os valores médios, que foram utilizados, como ponto de partida, os valores dos parâmetros sem nenhuma calibração, demonstrados na Seção 5.2. Além disso, não foram calibrados os parâmetros “XL”, “CAP” e “Wc”, pois estes assumem um valor usual da literatura do MGB, assim como a URH de água com todos os coeficientes iguais a 0.

Também são especificados as quantidades de indivíduos da população e de gerações a serem utilizadas pelo método de otimização do modelo MGB para a calibração automática, assim como as funções objetivo Nash, Nash-Log e Bias empregadas neste trabalho. Na Figura 5.50, pode-se visualizar essas opções.

Calibration specifications

Number of individuals in a population:

Maximum number of generations:

Objective functions

Nash-Sutcliffe efficiency

Nash-Sutcliffe efficiency of the logarithm of the flows

Error module in the total volume

Q90 error

Figura 5.50: Especificações e funções objetivo utilizadas na calibração automática em ambos os modelos.

Fonte: O Autor.

No que diz respeito a este trabalho, quando selecionou-se a sub-bacia a ser calibrada automaticamente, indicou-se a partir do valor “1”, na coluna denominada “*Weight*”, as estações fluviométricas que o procedimento de calibração tomará os dados como referência para determinação dos fatores multiplicativos dos parâmetros de solo, buscando o ótimo das funções objetivo citadas anteriormente. Com base na análise de sensibilidade, preferiu-se selecionar a estação mais a jusante de cada sub-bacia. Na Figura 5.51, estão expostos os códigos das estações (*Gauge Station*), suas minibacias associadas (*Catchment*), assim como seus pesos em cada uma das três sub-bacias (*Weight 1-3*) na configuração padrão, ou seja, ainda sem terem sido estabelecidos (indicado pelo valor “0”).

Gauge stations used on the calibration

Observed flows file: ...

	Catchment	Gauge Station	Weight 1	Weight 2	Weight 3
	550	58730001	0	0	0
	566	58735000	0	0	0
	578	58770000	0	0	0
▶	598	58790002	0	0	0
*					

Figura 5.51: Estações fluviométricas com dados confiáveis utilizados no processo de calibração automática.

Fonte: O Autor.

Para os valores dos parâmetros CS, CI, CB e QB, manteve-se o padrão dado pela própria ferramenta, como na Figura 5.52.

The image shows a software interface for parameter calibration. It consists of four rows of input fields and suggestions:

- CS:** Three input boxes containing the values 1, 20, and 20. To the right, a suggestion box says "Suggestion: Values between 1 and 20".
- CI:** Three input boxes containing the values 50, 150, and 200. To the right, a suggestion box says "Suggestion: Values between 50 and 200".
- CB:** Three input boxes containing the values 1000, 2000, and 10000. A unit 'h' is placed to the right of the last box. To the right, a suggestion box says "Suggestion: Use base flow filter".
- QB:** One input box containing the value 0.01. To the right, the unit 'm³/(s.km²)' is displayed.

Figura 5.52: Valores dos parâmetros CS, CI, CB e QB utilizados na calibração automática em ambos os modelos.

Fonte: O Autor.

Adiante, exibem-se as particularidades e resultados obtidos para a modelagem com uma única sub-bacia e com três sub-bacias.

5.4.1 Resultados da Calibração Automática dos Parâmetros do MGB para Uma Sub-Bacia

Posteriormente à realização da calibração automática para o modelo com uma única sub-bacia, obtiveram-se os valores dos parâmetros $CS = 19,52$, $CI = 193,05$, $CB = 8.467,08$, $QB = 0,01$. Os demais coeficientes do modelo MGB são exibidos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Parâmetros de solo do modelo com uma sub-bacia após a calibração automática.

HRC	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	We
FlorRas	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
FlorProf	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
AgriRas	803,7	0,05	3,9	5,53	0,6	0	0,1
AgriProf	412	0,09	02,07	19,34	0,6	0	0,1
CampRas	803,7	0,05	3,9	5,53	0,6	0	0,1
CampProf	412	0,09	02,07	19,34	0,6	0	0,1
Varzea	831,5	0,05	1,49	4,33	0,6	0	0,1
ASI	255,6	0,06	0,36	09,04	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Dispondo da configuração de valores apresentados anteriormente, foram obtidos os hidrogramas e gráficos de duração de vazão, para cada uma das quatro minibacias com as estações fluviométricas associadas, exibidos nas Figuras 5.53–5.60.

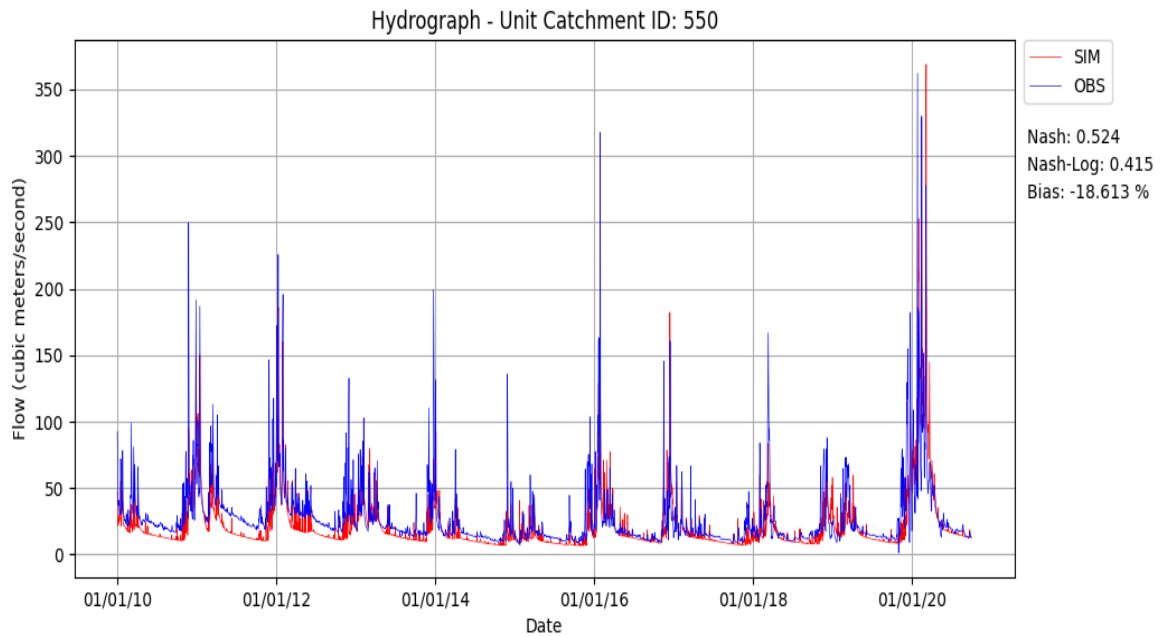


Figura 5.53: Hidrograma da Estação 550 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.

Fonte: O Autor.

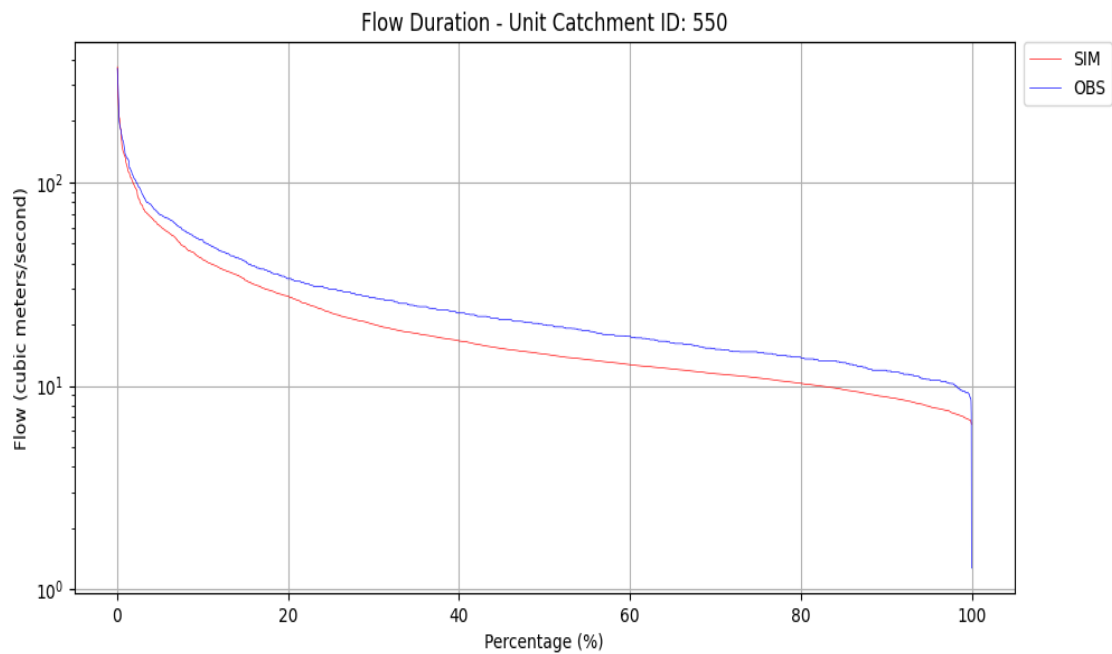


Figura 5.54: Duração de fluxo da Estação 550 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.

Fonte: O Autor.

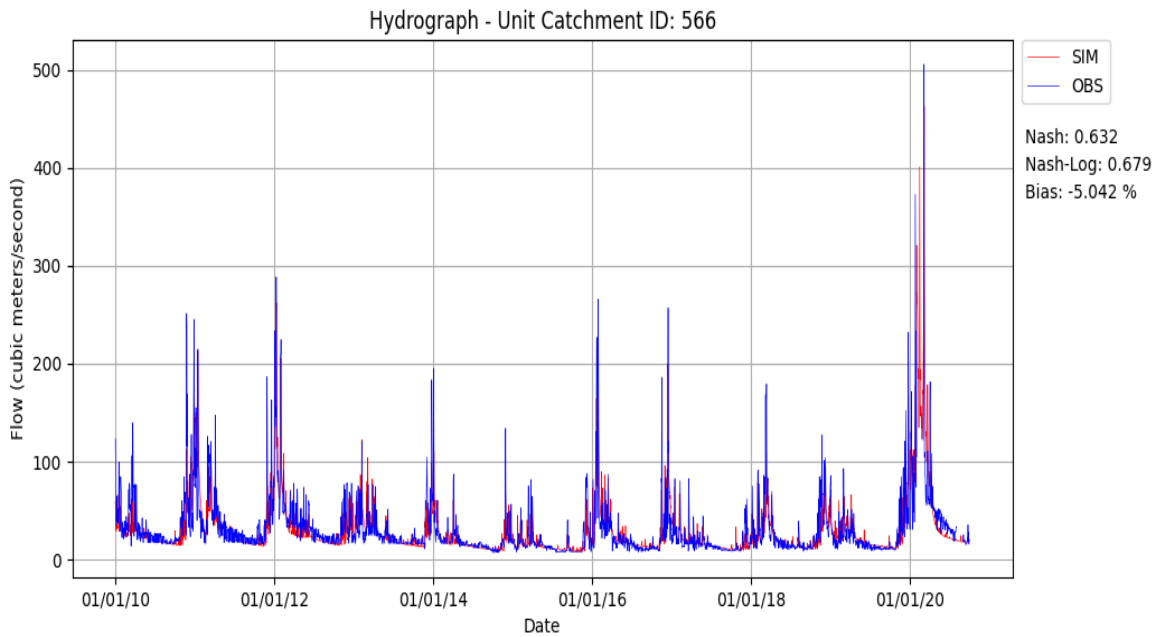


Figura 5.55: Hidrograma da Estação 566 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.

Fonte: O Autor.

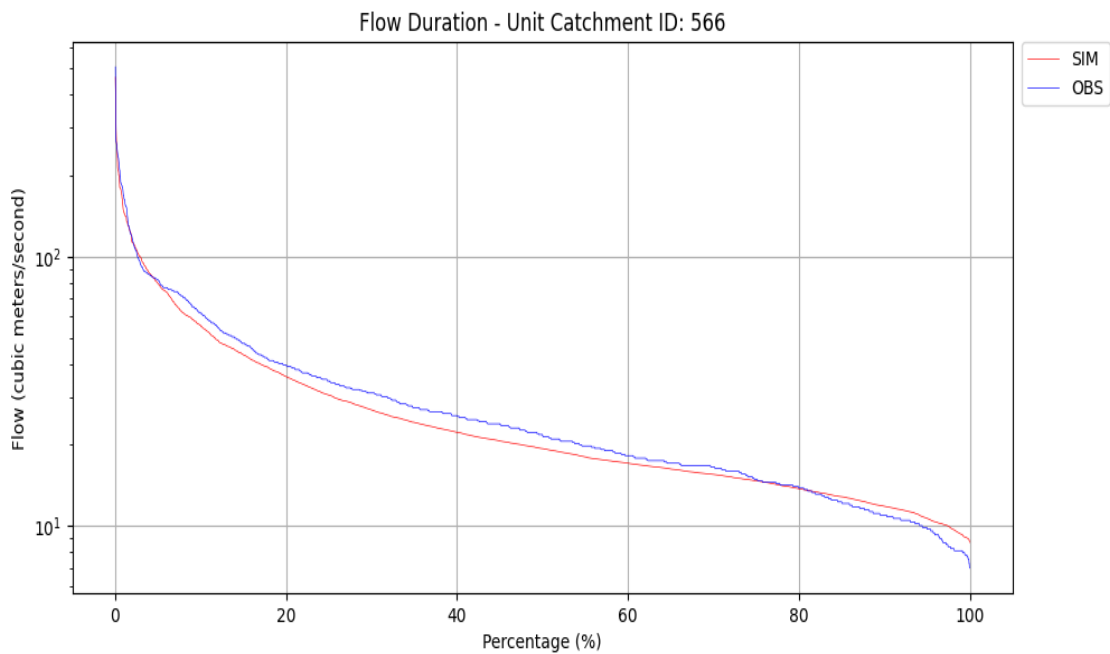


Figura 5.56: Duração de fluxo da Estação 566 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.

Fonte: O Autor.

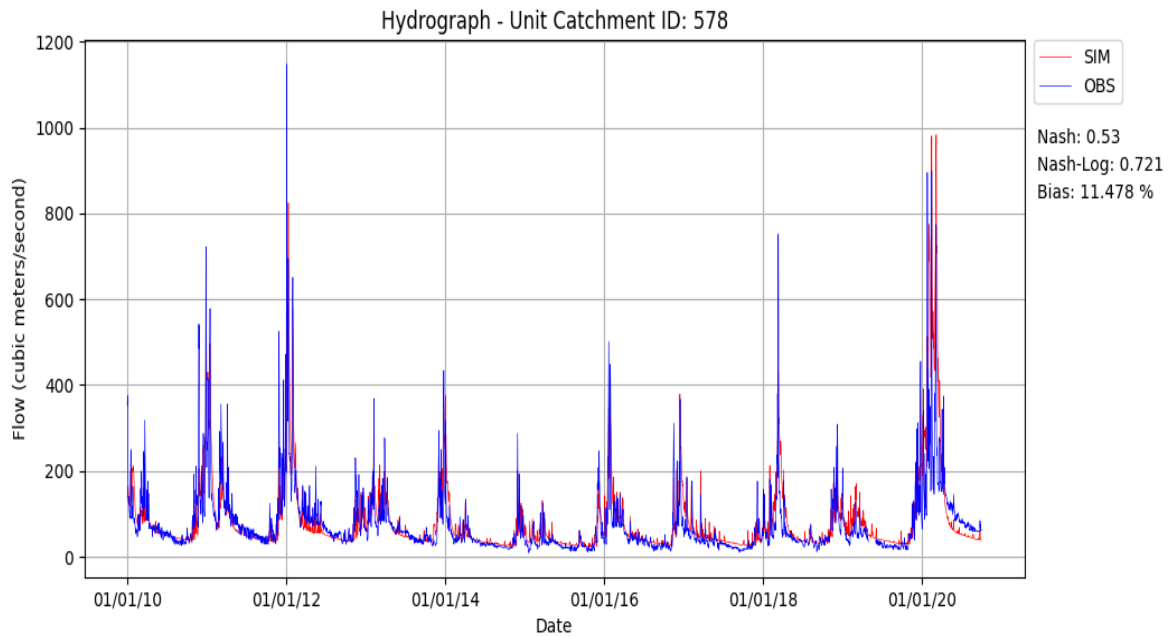


Figura 5.57: Hidrograma da Estação 578 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.

Fonte: O Autor.

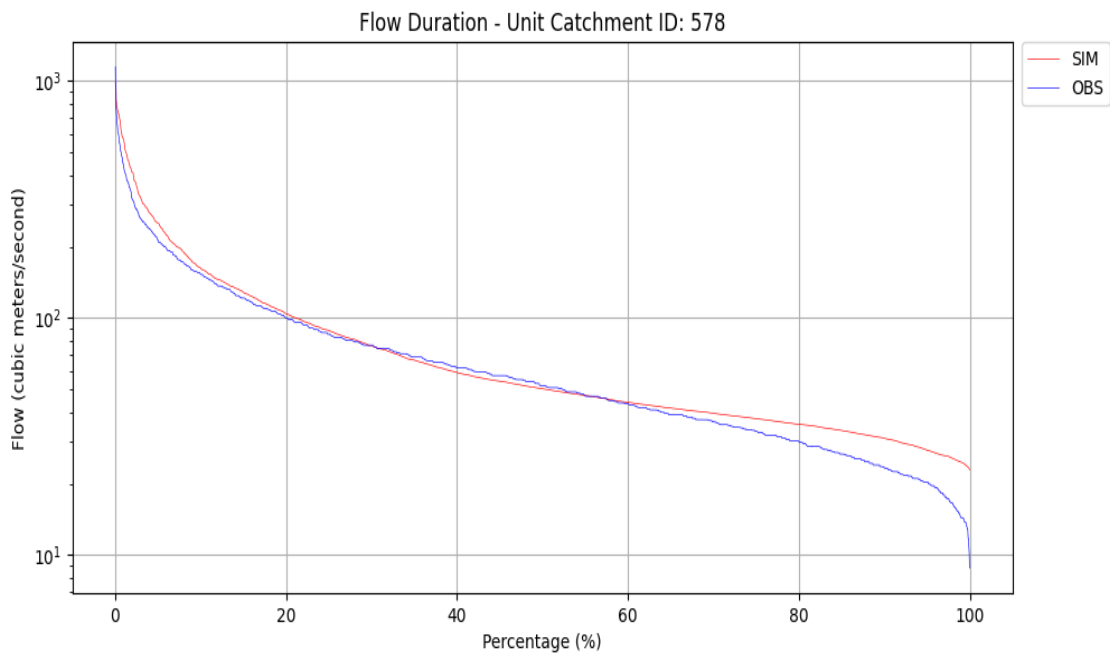


Figura 5.58: Duração de fluxo da Estação 578 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.

Fonte: O Autor.

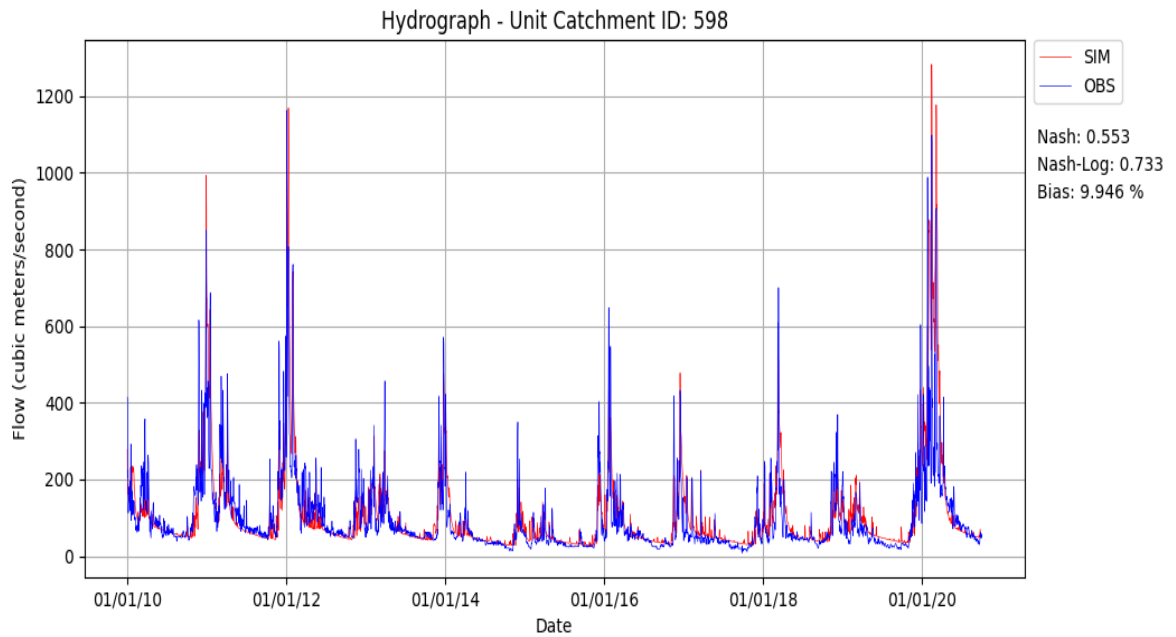


Figura 5.59: Hidrograma da Estação 598 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.

Fonte: O Autor.

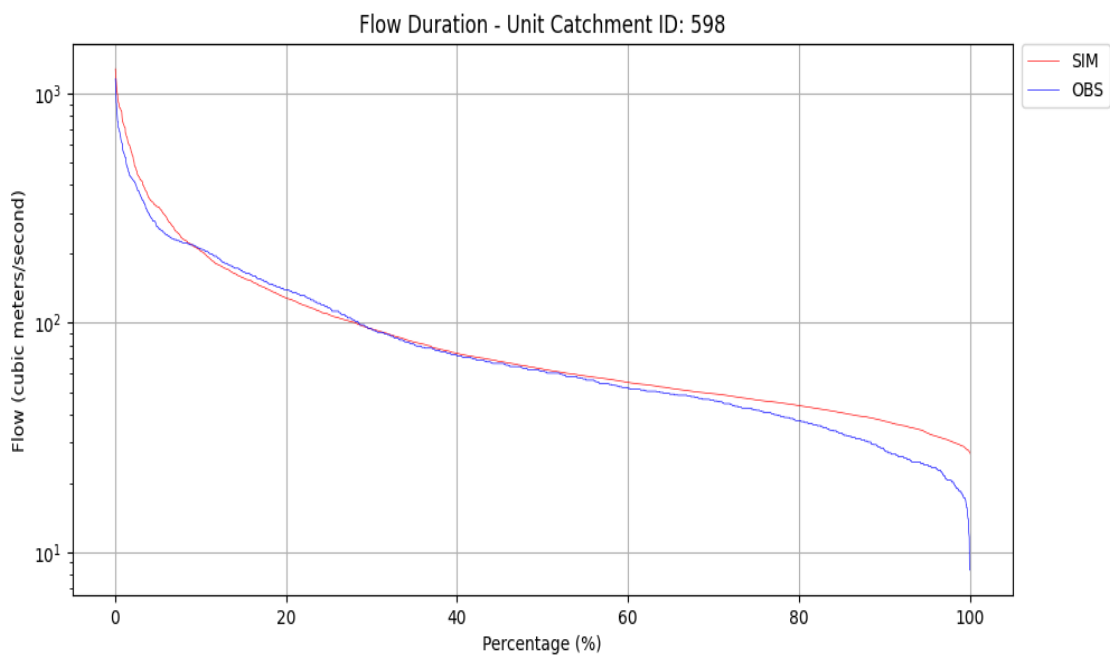


Figura 5.60: Duração de fluxo da Estação 598 com calibração automática para o modelo com uma sub-bacia.

Fonte: O Autor.

Pode-se observar uma significativa melhora nos resultados quando comparados com os hidrogramas e curvas de fluxo obtidos através da simulação com parâmetros da calibração manual, principalmente na estação mais a montante do rio Pomba (Estação 550). As métricas de Nash, Nash-Log e Bias também apresentaram valores superiores se comparados aos obtidos anteriormente. Isto se deve à maior precisão dos parâmetros encontrados pela calibração automática, a qual faz uso do método de otimização MOCOM-UA para busca de valores ótimos, tendo como base as funções objetivos Nash, Nash-Log e Bias.

5.4.2 Resultados da Calibração Automática dos Parâmetros do MGB para Três Sub-Bacias

Inicialmente, os parâmetros do solo obtidos para a terceira sub-bacia (a mais a montante do rio) através da calibração automática para o modelo com três sub-bacias, estão apresentados na Tabela 5.8. Além disso, foram obtidos os valores para os coeficientes dados por $CS = 20, 49$, $CI = 82, 04$, $CB = 9.443, 68$, $QB = 0, 01$.

Tabela 5.8: Parâmetros de solo da sub-bacia 3 após a calibração automática.

HRC	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
FlorProf	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
AgriRas	895,5	0,09	0,33	8,43	0,6	0	0,1
AgriProf	302	0,17	1,92	17,23	0,6	0	0,1
CampRas	895,5	0,09	0,33	8,43	0,6	0	0,1
CampProf	302	0,17	1,92	17,23	0,6	0	0,1
Varzea	695,5	0,18	1	2,34	0,6	0	0,1
ASI	182,4	0,12	1,39	11,79	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Na sequência, os parâmetros do solo obtidos para a segunda sub-bacia (região central da bacia hidrográfica) após da calibração automática para o modelo com três sub-bacias, estão expostos na Tabela 5.9. Para esta sub-bacia, foram encontrados os valores para os coeficientes dados por $CS = 20, 34$, $CI = 58, 36$, $CB = 2.515, 34$, $QB = 0, 01$.

Tabela 5.9: Parâmetros de solo da sub-bacia 2 após a calibração automática.

HRC	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	We
FlorRas	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
FlorProf	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
AgriRas	271,8	0,09	0,29	15,8	0,6	0	0,1
AgriProf	954	0,16	1,85	13,44	0,6	0	0,1
CampRas	271,8	0,09	0,29	15,8	0,6	0	0,1
CampProf	954	0,16	1,85	13,44	0,6	0	0,1
Varzea	593	0,12	01,06	5,34	0,6	0	0,1
ASI	242,1	0,05	1,2	9,48	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Já, os parâmetros do solo para a primeira sub-bacia (a mais a jusante do rio) obtidos após a etapa de calibração automática para o modelo com três sub-bacias, estão exibidos na Tabela 5.10. Analogamente, têm-se os coeficientes $CS = 16,57$, $CI = 194,46$, $CB = 9.602$, $QB = 0,01$.

Tabela 5.10: Parâmetros de solo da sub-bacia 1 após a calibração automática.

HRC	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	We
FlorRas	900	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
FlorProf	1000	0,1	0,1	2	0,6	0	0,1
AgriRas	271,8	0,15	1,93	12,16	0,6	0	0,1
AgriProf	826	0,09	1,97	6,77	0,6	0	0,1
CampRas	271,8	0,15	1,93	12,16	0,6	0	0,1
CampProf	826	0,09	1,97	6,77	0,6	0	0,1
Varzea	552,5	0,05	1,37	16,13	0,6	0	0,1
ASI	333,6	0,12	0,9	16,92	0,6	0	0,1

Fonte: O Autor.

Por fim, com base na configuração dos coeficientes apresentados nesta subseção contemplando as três sub-bacias, foram elaborados os hidrogramas e gráficos de duração de fluxo para as 4 minibacias onde estão localizadas as estações fluviométricas utilizadas nesse trabalho, os quais estão expostos nas Figuras 5.61–5.68.

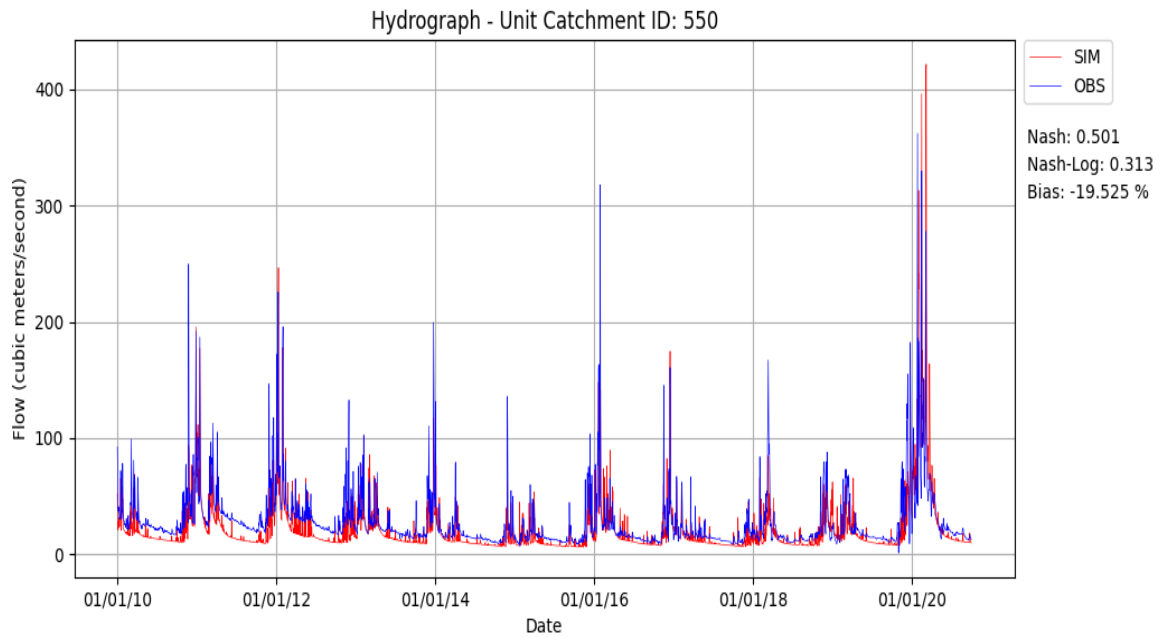


Figura 5.61: Hidrograma da Estação 550 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

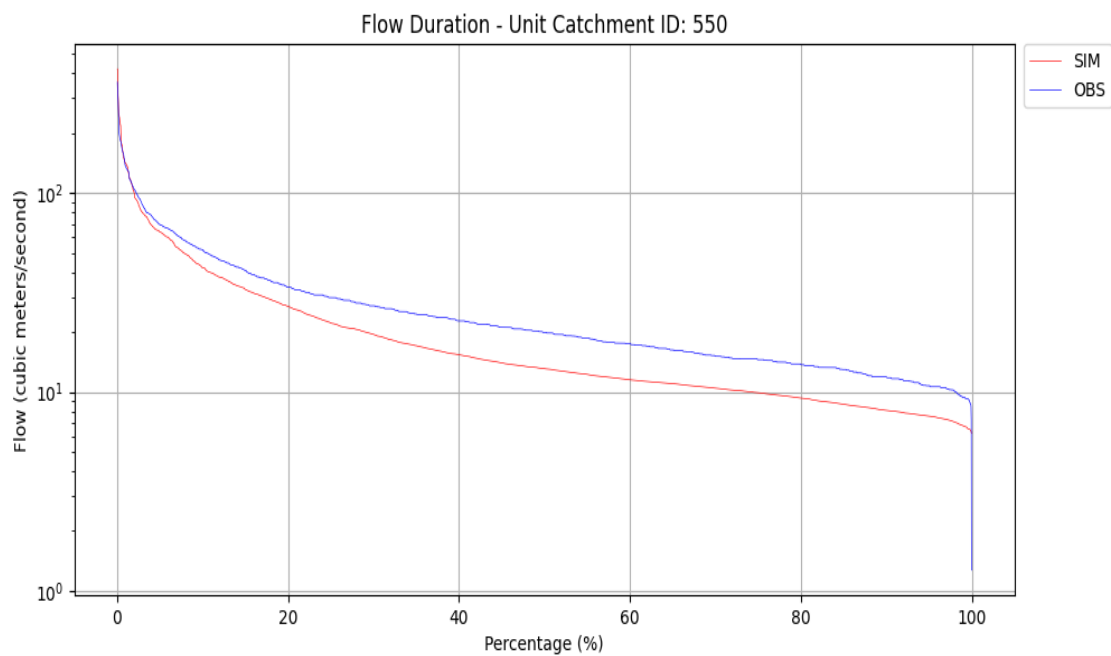


Figura 5.62: Duração de fluxo da Estação 550 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

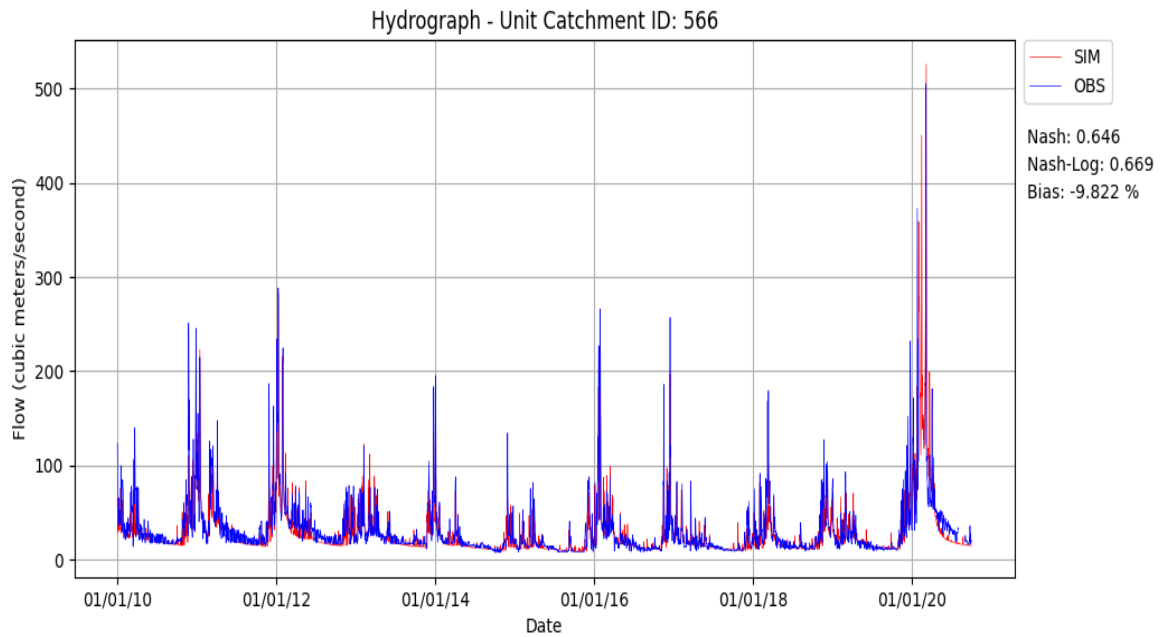


Figura 5.63: Hidrograma da Estação 566 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

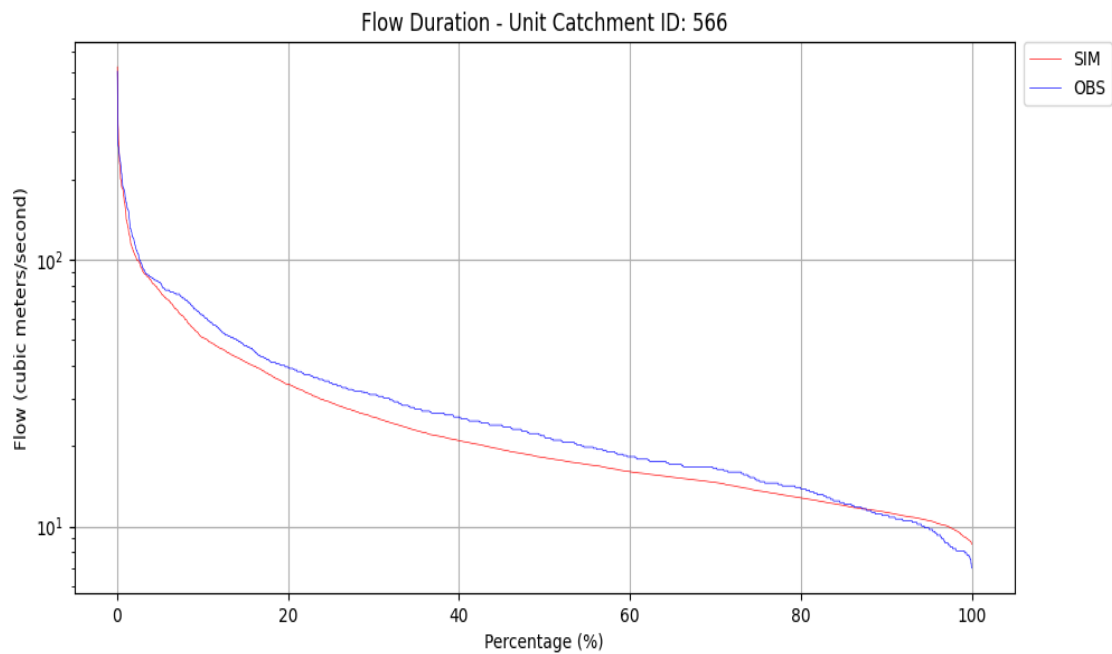


Figura 5.64: Duração de fluxo da Estação 566 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

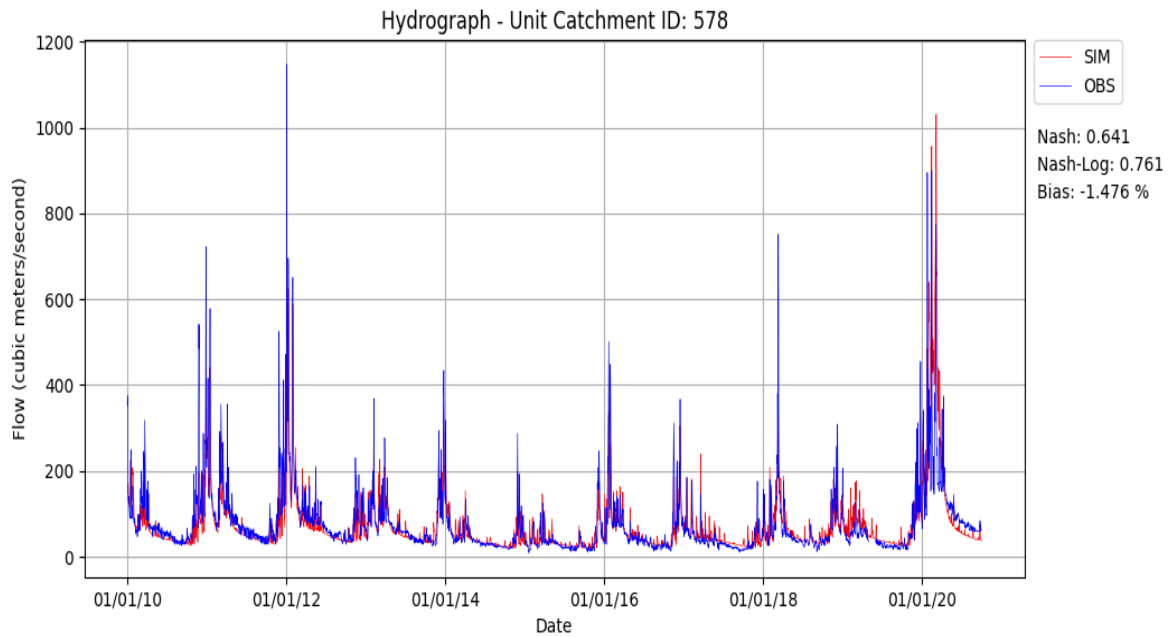


Figura 5.65: Hidrograma da Estação 578 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

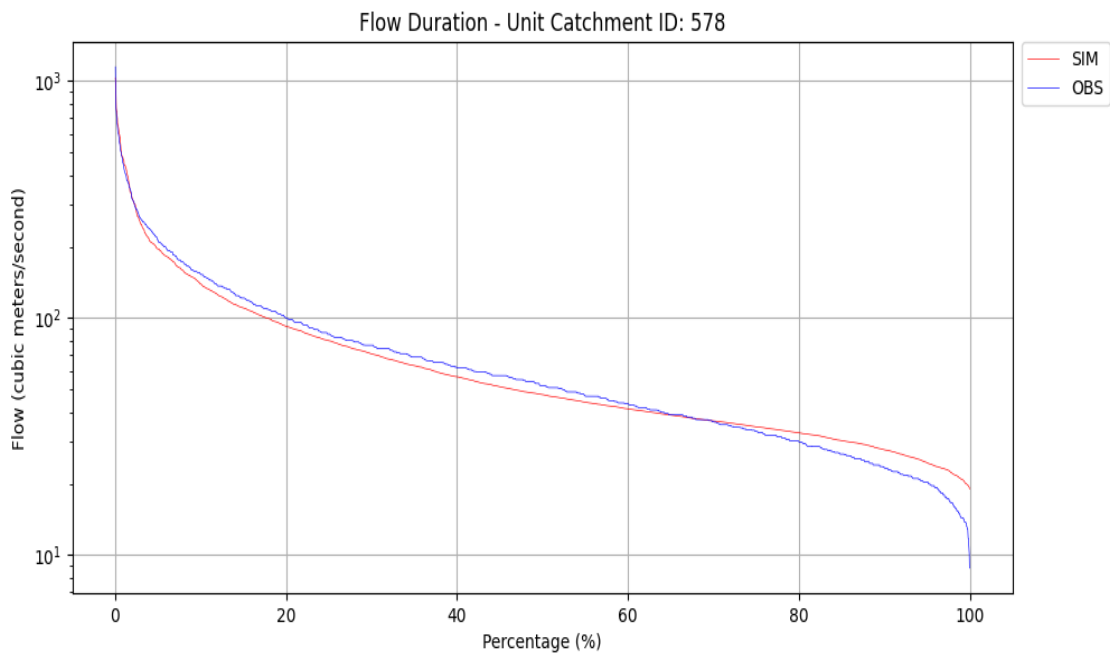


Figura 5.66: Duração de fluxo da Estação 578 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

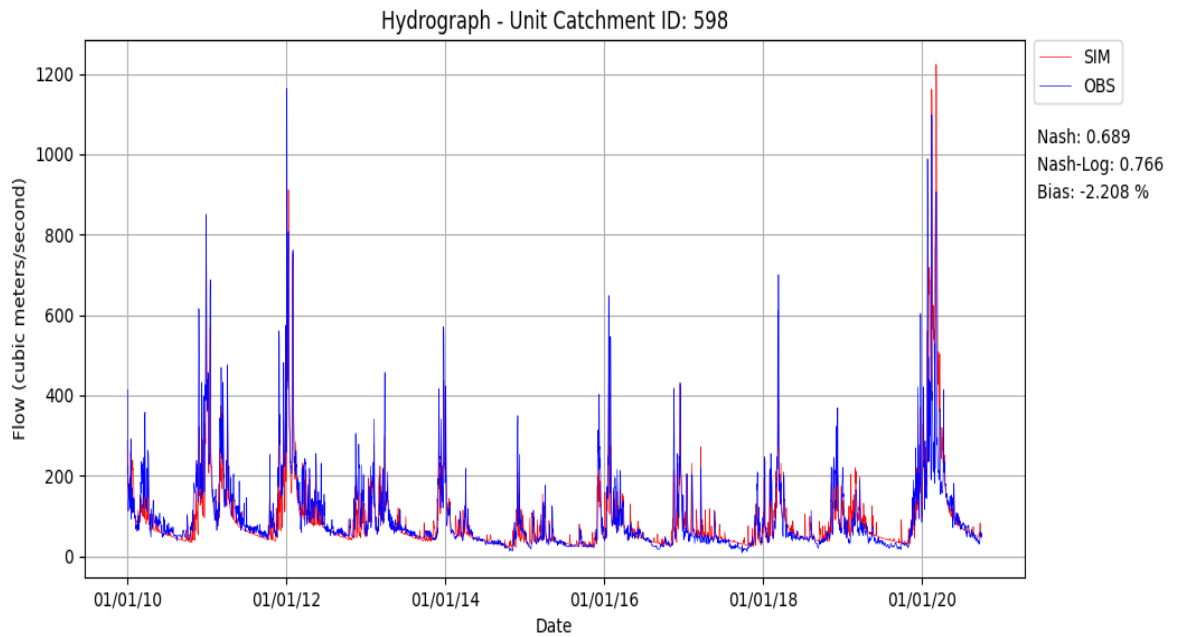


Figura 5.67: Hidrograma da Estação 598 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

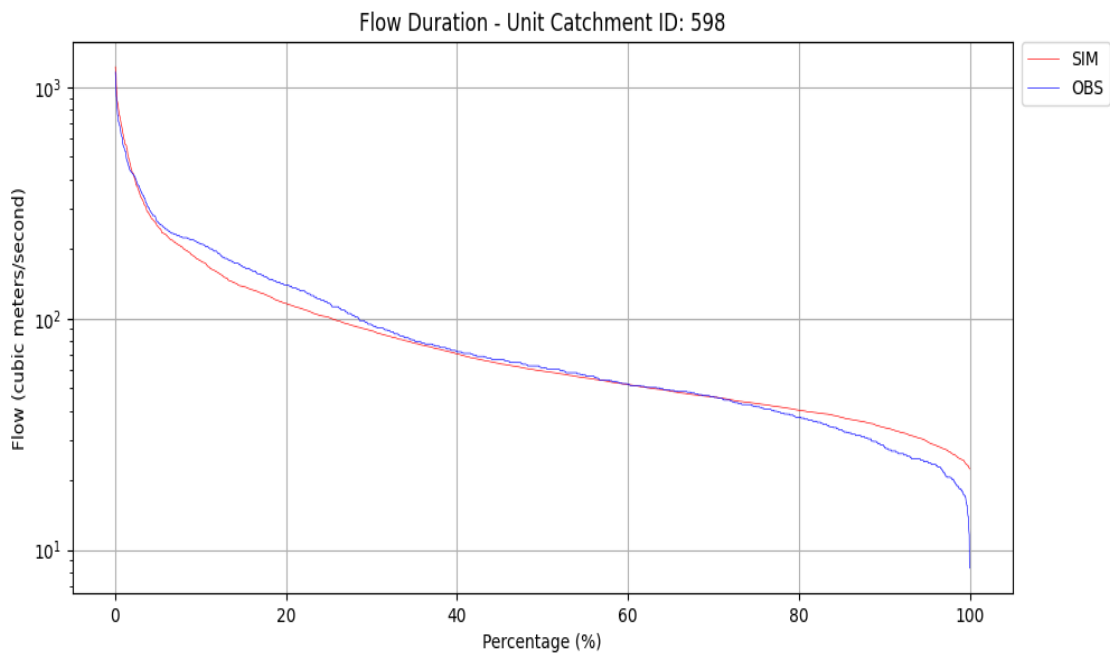


Figura 5.68: Duração de fluxo da Estação 598 com calibração automática para o modelo com três sub-bacias.

Fonte: O Autor.

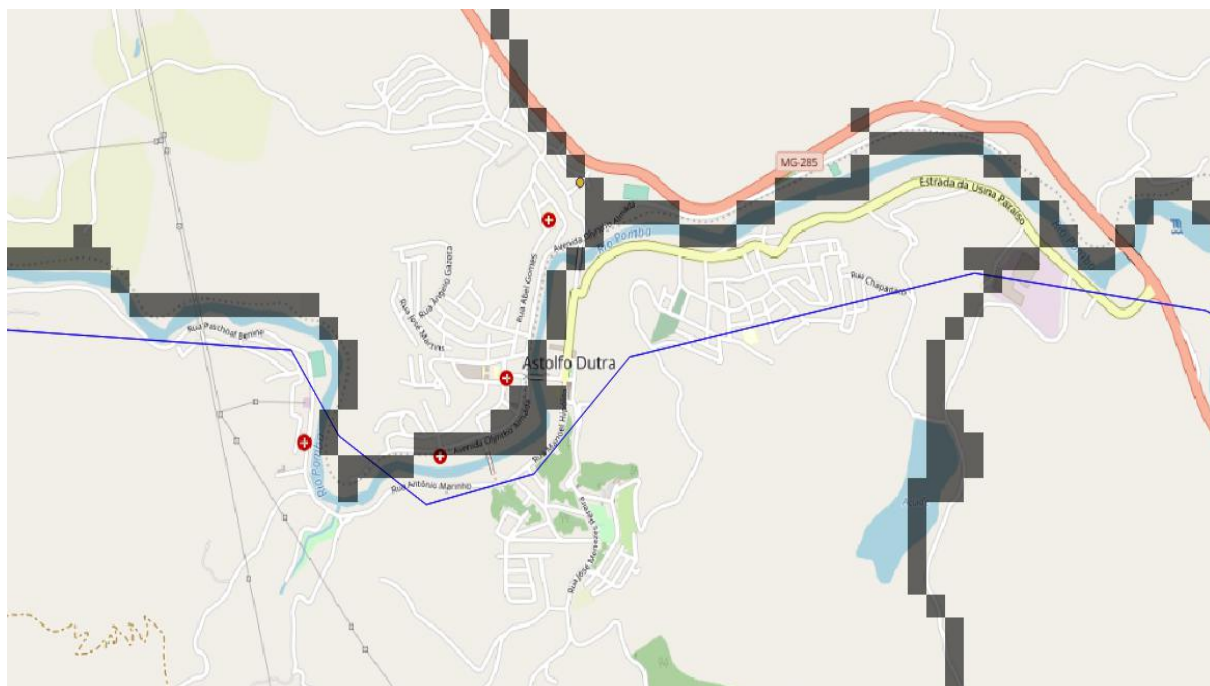


Figura 5.70: Área inundada do município de Astolfo Dutra-MG, simulada pelo plugin MGB.

Fonte: O Autor.

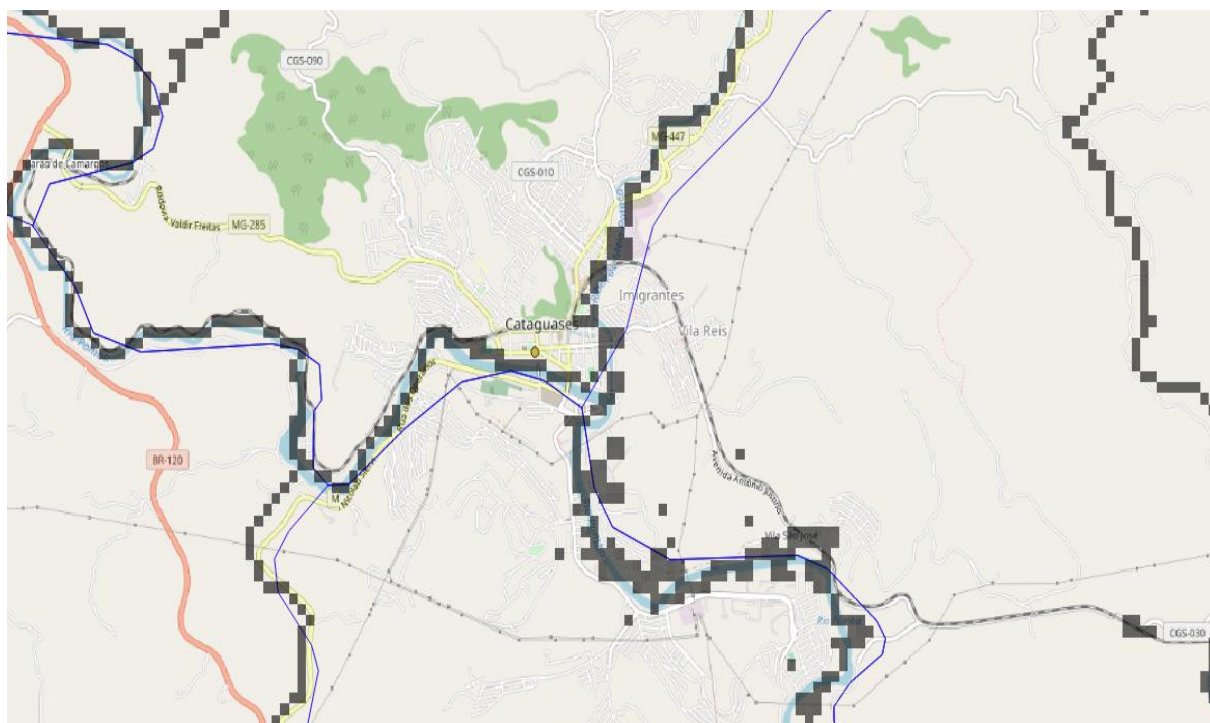


Figura 5.71: Área inundada do município de Cataguases-MG, simulada pelo plugin MGB.

Fonte: O Autor.

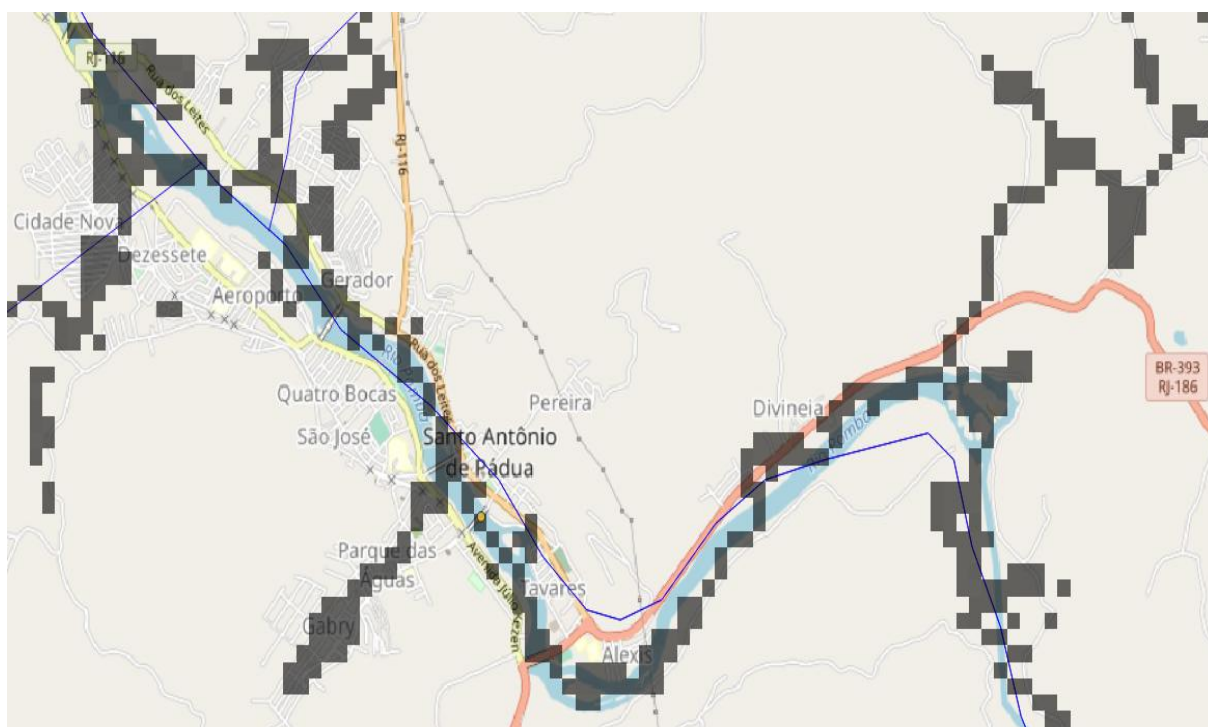


Figura 5.72: Área inundada do município de Santo Antônio de Pádua-RJ, simulada pelo plugin MGB.

Fonte: O Autor.

Com base nas Figuras 5.69 a 5.72, nota-se que o plugin MGB para o *software* QGIS apresentou, em diferentes escalas, as áreas inundadas simuladas, permitindo, com clareza, a visualização, a nível local (como bairros e ruas), das áreas alagáveis dos municípios.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo realizar a modelagem hidráulica e hidrológica dos principais rios que compõem a bacia hidrográfica do rio Pomba, bem como efetuar uma análise de sensibilidade dos parâmetros do solo para, posteriormente, sucederem as calibrações manual e automática, utilizando para isso, o plugin MGB, juntamente com a ferramenta IPH-Hydro Tools para o pré-processamento do MDT obtido através do *Google Earth Engine Explorer*. Buscou-se, ainda, comparar os resultados obtidos através da solução do problema direto, antes das calibrações e após as mesmas, com uma única sub-bacia e com três sub-bacias, para 4 (quatro) estações fluviométricas, com dados experimentais adquiridos diretamente do site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para um período compreendido entre os anos de 2010 e 2020.

Para as primeiras simulações, referentes à modelagem direta do comportamento hidrológico e hidráulico da bacia do rio Pomba utilizando-se dos valores padrões de parâmetros fornecidos pelos materiais de referência do MGB, para uma única sub-bacia e para três sub-bacias, verificou-se que esta divisão, por si só, em nada interfere nos resultados obtidos caso os parâmetros do modelo não sejam alterados da simulação com somente uma sub-bacia para a configuração com múltiplas sub-bacias. Além disso, pode-se notar que o modelo, apesar de subjugar a vazão na maior parte do tempo, foi capaz de reproduzir o perfil da curva hidrográfica para o período estudado. O gráfico de duração de vazão simulada, distante do observado, reforça o resultado obtido.

No que se refere a análise de sensibilidade realizada, a mesma pode agregar maior compreensão da influência dos parâmetros do solo sobre cada uma das URH's. Observou-se que o coeficiente “Wm” é, em geral, o mais sensível. Além disso, a URH de agricultura

em solo profundo é a que mais sofre impacto com a variação dos parâmetros. Percebeu-se, ainda, que as estações fluviométricas localizadas mais a jusante no rio são as que mais padecem com as mudanças realizadas, tanto nos critérios de solo da mesma, quanto nos das estações a montante dela. Em particular, cabe ressaltar, ainda, a contribuição deste trabalho no que se refere a uma maior compreensão do comportamento e influência dos parâmetros de solo do MGB, uma vez que a metodologia aplicada para a análise de sensibilidade aqui apresentada, não foi encontrada na literatura.

Já os resultados obtidos através das simulações realizadas após a calibração manual do modelo, para uma única sub-bacia e para três sub-bacias, foram capazes de mostrar parte da capacidade do Modelo de Grande Bacias (MGB), visto que as métricas de avaliação utilizadas (Nash, Nash-Log e Bias) alcançaram valores considerados bons pela literatura, aproximando satisfatoriamente as curvas simuladas do hidrograma e da duração de fluxo às curvas obtidas com base nos dados da ANA, para o período de tempo desejado. Ademais, nota-se que as estações fluviométricas mais próximas a foz possuem melhores resultados devido a influência que estas sofrem das estações localizadas mais a montante do rio. Este fato fica evidente na simulação com múltiplas sub-bacias, onde a possibilidade de realizar-se uma calibração mais específica, produziram resultados mais refinados.

Quanto aos gráficos elaborados com os parâmetros de solo encontrados após a calibração automática dos modelos com uma única sub-bacia e com três sub-bacias, pôde-se inferir que este procedimento de calibração apresenta resultados mais ajustados para o modelo MGB, depois de compara-los aos resultados obtidos anteriormente (etapa de solução direta e de calibração manual), neste trabalho, e aos dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Pode-se afirmar, também, que a calibração automática produz melhores métricas das funções objetivo Nash, Nash-Log e Bias. Novamente, observa-se que as estações fluviométricas mais a jusante do rio Pomba apresentam respostas mais adequadas na simulação. Tal efeito evidencia-se, como consequência natural do próprio processo, onde realiza-se a calibração automática por etapas de montante para jusante.

Com base nos resultados apresentados no Capítulo 5, pode-se inferir que abordagens envolvendo a modelagem de grandes bacias utilizando-se do plugin MGB apresentam um bom ajuste entre os dados calculados pelo modelo e os dados observados, manifestando-se como uma ferramenta promissora do ponto de vista ambiental, pela sua capacidade de simular diferentes cenários, e social, possibilitando sua utilização no auxílio do processo de tomada de decisões por parte das autoridades em eventos extremos, como períodos de

secas prolongadas e inundações.

Cabe ressaltar, ainda, a utilidade deste modelo na predição de inundações. Para qualquer região da bacia hidrográfica do rio Pomba, torna-se, agora, a partir dos dados de previsão pluviométrica na região da bacia, possível estimar-se a vazão na rede de drenagem dos trechos das minibacias e observar-se, no mapa, as áreas a serem afetadas pelo acúmulo de água estimado através da simulação realizada no plugin MGB.

Por fim, a despeito do modelo MGB ter sido aplicado pela primeira vez na bacia hidrográfica do rio Pomba, consideram-se os resultados obtidos como satisfatórios, pois tornou-se possível avaliar uma série histórica de, aproximadamente, 10 anos, com base na quantidade de precipitação incidente sobre a bacia com o objetivo de prevenir cenários extremos, bem como medir regiões a serem afetadas pelos mesmos, baseando-se em previsões meteorológicas.

6.2 Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram analisados os resultados obtidos para diferentes configurações de divisão da bacia hidrográfica, para diferentes valores obtidos através da literatura, da calibração manual e da calibração automática, após a análise de sensibilidade. No entanto, deseja-se, ainda, realizar-se outra simulação com o modelo MGB utilizando-se dos parâmetros de solo alcançados através calibração automática, partindo-se dos valores de parâmetros encontrados com a calibração manual, afim de analisar a influência desses pontos de partida e comparar os seus resultados com os demais já obtidos.

Outro fator a ser melhor explorado, está relacionado ao método de otimização utilizado pelo plugin do MGB na calibração automática. Tem-se, como objetivo para o futuro, a implementação e acoplamento de outros algoritmos ao modelo, visando estudar o seu desempenho com essas alterações.

Por fim, pretende-se examinar a possibilidade de aplicação do Modelo de Grandes Bacias (MGB) a bacias hidrográficas com diferentes características de declividade, área de drenagem, ocupação do solo, ocupação vegetal, entre outros, pretendendo validar o uso do modelo em diferentes cenários.

Referências

- [1] ADAM, K. N., FAN, F. M., PONTES, P. R., BRAVO, J. M., COLLISCHONN, W. *Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná*. Revista brasileira de recursos hídricos, v. 20, n. 4, p. 999–1007, 2015.
- [2] AGEVAP. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul-Resumo*. Caderno de ações bacia do rio pomba, Relatório Contratual R-10, 2017.
- [3] ALVES, M., MEYER, A., FAN, F., PAIVA, R. *Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools*. Hge, iph, ufrgs, 2020.
- [4] BARRELLA, W., PETRERE JR, M., SMITH, W. S., MONTAG, L. F. A. *As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes*. Rodrigues, RR; Leitão Filho; HF (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação, v. 2, p. 187–207, 2015.
- [5] BATES, P. D., HORRITT, M. S., FEWTRELL, T. J. *A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling*. Journal of hydrology, v. 387, n. 1-2, p. 33–45, 2010.
- [6] BECK, J. V., ARNOLD, K. J. *Parameter estimation in engineering and science*. James beck, 1977.
- [7] BRÊDA, J. P. L. F., DE PAIVA, R. C. D., COLLISCHON, W., BRAVO, J. M., SIQUEIRA, V. A., STEINKE, E. B. *Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections*. Climatic change, v. 159, n. 4, p. 502–522, 2020.
- [8] CABRAL, S. L., CAMPOS, J. N. B., DA SILVA SILVEIRA, C., DE ASSIS TEIXEIRA, F. A. *Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do Rio Granjeiro-CE*. Geociências-são paulo, v. 35, n. 1, p. 90–101, 2016.
- [9] CARMO, B., MARTINS, M., GOMES, A. A., SANTOS, P. *Cheias na Foz do Rio Sabor: comparação dos perímetros de inundação definidos pelo método hidro-histórico e pela modelação hidráulica (software Iber)*. Atas do ix congresso nacional de geomorfologia: Gomorfologia 2019: Que futuro para a geomorfologia...?, 2019.
- [10] CASTANHARO, G. *Aplicação de modelos hidrodinâmicos no contexto de previsão de aflúências a reservatórios*. Curitiba, UFPR, 2003.
- [11] CELESTE, A., CHAVES, V. S. *Avaliação de Algoritmos de Otimização e Funções Objetivo para Calibração Automática do Modelo Chuva-Vazão Tank Model*. Ciência e natura, v. 36, n. 3, p. 527-537, 2014.

- [12] CHOW, V. T. *Open Channel Hydraulics*. 680 p., McGraw - Hill Book Co, New York, E.U.A., 1959.
- [13] COLLISCHONN, B., PAIVA, R. C. D. D., COLLISCHONN, W., MEIRELLES, F. S. C., SCHETTINI, E. B. C., FAN, F. M. *Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: Caso do Rio Quaraí-RS*. Revista brasileira de recursos hídricos, v. 16, n. 4, p. 119–134, 2011.
- [14] COLLISCHONN, W., GAMA, C. H. A., SIQUEIRA, V. A., PAIVA, R. C. D., FLEISCHMANN, A. S. *Manual de Referência Teórica do MGB*. Hge, iph, ufrgs, 2020.
- [15] CORDEIRO, A. M. T. M. *Gestão dos recursos hídricos no Brasil do ponto de vista legal*. Centro universitário do norte - uninorte, faculdade de direito, <<https://www.hidroamazon.ufam.edu.br/pesquisa6.pdf>> Último acesso em: 25 de agosto de 2021, 2004-2007.
- [16] CORREA, S. W., DE PAIVA, R. C. D., ESPINOZA, J. C., COLLISCHONN, W. *Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts*. Journal of hydrology, v. 549, p. 667–684, 2017.
- [17] DELBONI, T. C. *Análise comparativa de modelos hidrológicos em função de sua estruturas e parametrização e de resultados de aplicações em bacias hidrográficas*. Dissertação de mestrado, UFES, Vitória, ES, 2019.
- [18] ECOECO. *bacias hidrográficas nova gestão de recursos hídricos*. Em 1º encontro nacional da ecoeco, Campinas-SP, 1996.
- [19] EMDAT. *The OFDA/CRED International Disaster Database*. Université catholique de louvain, Belgium, 2004.
- [20] FAN, F. M., BUARQUE, D. C., PONTES, P. R. M., COLLISCHONN, W. *Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul*. xxi simpósio brasileiro de recursos hídricos, Brasília, PAP019919, 2015.
- [21] FAN, F. M., PONTES, P. R. M., PAIVA, R. C. D. D., COLLISCHONN, W. *Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant*. rbrh: revista brasileira de recursos hídricos, Porto Alegre, RS, v. 19, n. 4, p. 137-147, 2014.
- [22] FARAGE, J. A. P., MATOS, A. T., SILVA, D. D., BORGES, A. C. *Determinação do índice de estado trófico para fósforo em pontos do rio Pomba*. Revista engenharia na agricultura-reveng, v. 18, n. 4, p. 322-329, 2010.
- [23] FLEENOR, W. E., JENSEN, M. *Evaluation of Numerical Models. HEC-RAS and DHI-MIKE 11*. Journal of hydraulic engineering, 2003.
- [24] FLEISCHMANN, A., COLLISCHONN, W., PAIVA, R., TUCCI, C. E. M. *Modeling the role of reservoirs versus floodplains on large-scale river hydrodynamics*. Natural hazards, v. 99, n. 2, p. 1075–1104, 2019.

- [25] FLEISCHMANN, A., SIQUEIRA, V., PARIS, A., COLLISCHONN, W., PAIVA, R., PONTES, P., CRÉTAUX, J.-F., BERGÉ-NGUYEN, M., BIANCAMARIA, S., GOSSET, M., OTHERS. *Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands*. *Journal of hydrology*, v. 561, p. 943–959, 2018.
- [26] FLEISCHMANN, A. S., PAIVA, R. C., COLLISCHONN, W., SORRIBAS, M. V., PONTES, P. R. *On river-floodplain interaction and hydrograph skewness*. *Water resources research*, v. 52, n. 10, p. 7615–7630, 2016.
- [27] GARBRECHT, J., MARTZ, L. W. *Digital elevation model issues in water resources modeling*. *Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems*, p. 1–28, 2000.
- [28] GICHAMO, T. Z., POPESCU, I., JONOSKI, A., SOLOMATINE, D. *River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling*. *Environmental modelling & software*, v. 31, p. 37–46, 2012.
- [29] GLEICK, P. H. *Water in crisis*. New york: Oxford university press, v. 100, 1993.
- [30] GOERL, R. F., MICHEL, G. P., KOBİYAMA, M. *Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais*. *Revista brasileira de cartografia*, v. 69, n. 1, 2017.
- [31] GUEDES, H. A. S., SILVA, D. D., ELESBON, A. A. A., RIBEIRO, C., MATOS, A. T., SOARES, J. H. P. *Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG*. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, v. 16, p. 558-563, 2012.
- [32] HALE, S. E., GARDINER, B., PEACE, A., NICOLL, B., TAYLOR, P., PIZZIRANI, S. *Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model*. *Environmental modelling & software*, v. 68, p. 27–41, 2015.
- [33] HALWATURA, D., NAJIM, M. *Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment*. *Environmental modelling & software*, v. 46, p. 155–162, 2013.
- [34] JACOVINE, L. A. G., CORRÊA, J. B. L., SILVA, M. L., VALVERDE, S. R., FERNANDES FILHO, E. I., COELHO, F. M. G., PAIVA, H. N. *Quantificação das áreas de preservação permanente e de reserva legal em propriedades da bacia do Rio Pomba-MG*. *Revista árvore*, v. 32, p. 269-278, 2008.
- [35] JOHNSON, L. E. *Geographic information systems in water resources engineering*. crc press, 2016.
- [36] KRAUSE, P., BOYLE, D. P., BÄSE, F. *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. *Advances in geosciences*, v. 5, n. 89, p. 89-97, 2005.
- [37] LIU, F., HODGES, B. R. *Applying microprocessor analysis methods to river network modelling*. *Environmental modelling & software*, v. 52, p. 234–252, 2014.
- [38] LOPES, R. S., ABRAHÃO, J., MELO, G. *Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de Santo Antônio de Pádua*. Série planos da mata atlântica, 2015.

- [39] LOPES, V. A. R. *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do Vento*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2017.
- [40] MARCELINO, E. V. *Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos*. Ministério da Ciência e da Tecnologia. Emergency events database período de 1900-2006, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Santa Maria, 2007.
- [41] MCT/CGE. *Diretrizes estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*. Disponível em: <http://www.ana.gov.br>, Último acesso em: 11 de agosto 2021, 2002.
- [42] MEDEIROS, M. S., FLEISCHMANN, A. S., OLIVEIRA, A. M., CORATI, B., FAN, F. M., MARTINBIANCHO, G. K., JARDIM, P. F., CORREA, S. W., SIQUEIRA, V. A., COLLISHCONN, W. *Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB 2018 Utilizando o IPH-Hydro Tools*. ipg/ufrgs, 83 páginas, 2019.
- [43] MOMO, M. R., PINHEIRO, A., SEVERO, D. L., CUARTAS, L. A., NOBRE, A. D. *Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial*. rbrh, v. 21, p. 200–208, 2016.
- [44] MORAIS, M. A. V. *Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Araguaia*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, MG, 2019.
- [45] MUÑOZ, H. R. *Interfaces da gestão de recursos hídricos: desafios da lei de águas de 1997*. <http://www.uff.br/cienciaambiental/biblioteca/rhidricos/prefacio.pdf>, Último acesso em: 02 de maio de 2021, 2000.
- [46] NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. E. *River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles*. Journal of hydrology, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.
- [47] NETO, A. R., CIRILO, J. A., DE OLIVEIRA DANTAS, C. E., SILVA, E. R. *Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica*. Revista brasileira de recursos hídricos, v. 20, n. 2, p. 394–403, 2015.
- [48] OGDEN, F. L., GARBRECHT, J., DEBARRY, P. A., JOHNSON, L. E. *GIS and distributed watershed models. II: Modules, interfaces, and models*. Journal of hydrologic engineering, v. 6, n. 6, p. 515–523, 2001.
- [49] PEREIRA, D. R. *Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, MG, 2013.
- [50] PEREIRA, M., KAYSER, R. B., COLLISCHONN, W. *Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água*. Revista de gestão de água da américa latina, v. 9, n. 2, p. 21–33, 2012.

- [51] PIELOU, E. C. *Fresh Water*. The university of chicago press, United States of America, 1998.
- [52] PORTO, M. F., PORTO, R. L. L. *Gestão de bacias hidrográficas*. Estudos avançados, v. 22, p. 43–60, 2008.
- [53] PORTO, R. D. M. *Hidráulica Básica, 2 edição*. eesc–usp, 1999.
- [54] ROUX, H., DARTUS, D. *Sensitivity analysis and predictive uncertainty using inundation observations for parameter estimation in open-channel inverse problem*. Journal of hydraulic engineering, v. 134, n. 5, p. 541–549, 2008.
- [55] SAINT-VENANT, A. *Theorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a introduction de mares dans leurs lits*. Comptes rendus des seances de academie des sciences, 1871.
- [56] SCHWANENBERG, D., FAN, F. M., NAUMANN, S., KUWAJIMA, J. I., MONTERO, R. A., DOS REIS, A. A. *Short-term reservoir optimization for flood mitigation under meteorological and hydrological forecast uncertainty*. Water resources management, v. 29, n. 5, p. 1635–1651, 2015.
- [57] SILVA, C. K. F., PEREIRA, M. A., SILVA, M. A. C., ALENCAR JÚNIOR, J. P., SILVA, Z. E. *Transferência de massa em tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*) submetido a desidratação osmótica–modelagem e estimação dos parâmetros*. Congresso nacional de engenharia mecânica, v. 4, 2006.
- [58] SILVA, P. V. R. M., JUNIOR, R. A. F. C., DE NORONHA, G. C. *Mapeamento e análise de risco de inundação da Bacia do Rio Paraíba/AL: estudo de caso*. Sistemas & gestão, v. 11, n. 4, p. 431–443, 2016.
- [59] SILVA, R. R. *Bacia do rio Pomba (MG): uso e ocupação do solo e impactos ambientais nos recursos hídricos*. Universidade federal de goiás, 2014.
- [60] SILVA, R. R., SIQUEIRA, E. Q., NOGUEIRA, I. D. S. *Impactos ambientais de efluentes de laticínios em curso d’água na Bacia do Rio Pomba*. Engenharia sanitaria e ambiental, v. 23, p. 217–228, 2018.
- [61] SILVA CALDANA, N. F., JÚNIOR, G. M. Y., DE MOURA, D. A. V., DA COSTA, A. B. F., CARAMORI, P. H. *Ocorrências de alagamentos, enxurradas e inundações e a variabilidade pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Iguaçu*. Revista brasileira de climatologia, v. 23, 2018.
- [62] SILVA NETO, A. J. *Problemas diretos e inversos em transferência radiativa e processos difusivos*. Brasil: Marca gráfica & editora, 2012.
- [63] SILVA TAVARES, L. P., DA COSTA, J. B., DE ALMEIDA KALAS, F., LUGON, J. *Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Macaé utilizando o MOHID Land*. Boletim do observatório ambiental alberto ribeiro lamego, v. 11, n. 1, p. 169–181, 2017.
- [64] STEINSTRASSER, C. E. *Método difusivo de Lax aplicado na solução das equações de Saint Venant*. Universidade federal do paraná, Curitiba, 2005.

- [65] TELLES, W. R. *Previsão do comportamento hidráulico de um rio com base na estimativa de coeficientes que controlam seu escoamento. Estudo de caso: Rio Bengalas, Nova Friburgo-RJ*. Tese de doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Nova Friburgo, RJ, 2014.
- [66] TELLES, W. R., RODRIGUES, P. P. G. W., SILVA NETO, A. J. *Calibração Automática de um Simulador Aplicado a um Rio de Montanha Empregando Dados Experimentais de Precipitação e Nível—Estudo de Caso: Córrego D’Antas, RJ*. rbrh, v. 21, p. 143–151, 2016.
- [67] TELLES, W. R., RODRIGUES, P. P. G. W., SILVA NETO, A. J. *Calibração automática da plataforma MOHID empregando um método estocástico de otimização e dados reais de um evento climático extremo em Nova Friburgo-RJ: parte 2—análise de sensibilidade e estimativa de parâmetros hidrológicos*. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, v. 33, n. 3-4, p. 204–211, 2017.
- [68] TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*, vol. 4. ABRH/Editora da UFRGS, 1997.
- [69] TUCCI, C. E. M. *Hidrologia 4—Ciência e Aplicação (Segunda edição)*. Editora da universidade (universidade federal do rio grande do sul)/abrh, Porto Alegre, 2000.
- [70] TUCCI, C. E. M., BERTONI, J. C. *Inundações urbanas na América do Sul*. Ed. dos autores, 2003.
- [71] WONGCHUIG, S. C., DE PAIVA, R. C. D., SIQUEIRA, V., COLLISCHONN, W. *Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin*. Journal of hydrology, v. 570, p. 755–773, 2019.
- [72] YAPO, P. O., GUPTA, H. V., SOROOSHIAN, S. *A multiobjective global optimization algorithm with application to calibration of hydrologic models*. Department of hydrology and water resources, University of Arizona, Tucson, AZ, 1997.