



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE
NACIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

PEDRO IVO GUEDES BARBOSA

**MODELAGEM HIDRÁULICA COM BASE EM DOIS MODELOS
HIDROLÓGICOS COMO SUBSÍDIO À PREDIÇÃO DE EVENTOS DE
CHEIAS NA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL/ES**

**VITÓRIA
2020**

PEDRO IVO GUEDES BARBOSA

**MODELAGEM HIDRÁULICA COM BASE EM DOIS MODELOS
HIDROLÓGICOS COMO SUBSÍDIO À PREDIÇÃO DE EVENTOS DE
CHEIAS NA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL/ES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, na área de concentração Instrumentos da Política de Recursos Hídricos, sob orientação do Prof. Marco Aurélio Costa Caiado, PhD.

VITÓRIA
2020

**MODELAGEM HIDRÁULICA COM BASE EM DOIS MODELOS
HIDROLÓGICOS COMO SUBSÍDIO À PREDIÇÃO DE EVENTOS DE
CHEIAS NA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL/ES**

Pedro Ivo Guedes Barbosa

Banca Examinadora:

Prof Marco Aurélio Costa Caiado, PhD
Orientador – Coord. Eng. Sanitária e Ambiental/UFES

Prof. Dr. Diogo Costa Buarque
Co-Orientador – PPGEA/CT/UFES

Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti
Examinador Externo – DCFM/UFES

Edmilson Costa Teixeira
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos
Hídricos

A uma Edna e a um João Pedro

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Agência Nacional de Águas (ANA) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), representada pelo Departamento de Engenharia Ambiental, pela possibilidade de realizar o curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua).

À minha família, pelo entendimento de que esta etapa seria difícil não só para mim, mas para aqueles que nos cercam e que, de certa maneira, tiveram que abdicar das relações sociais que tínhamos antes.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Marco Aurélio Caiado, pela possibilidade de me permitir ser seu orientado. Professor pelo qual construí admiração pela capacidade científico-intelectual, persistência e paciência, mesmo quando este orientando não retribuía, de imediato, às suas expectativas.

Às colegas da turma do ProfÁgua 2017, Sabrina, Sandriane, Gilse, Gabrielle e Patrícia. As nossas conversas coletivas, acompanhadas de um bom café, sempre foram instrutivas e produtivas para o andamento e persistência de cada um, individualmente.

Aos professores que, de uma forma geral, deram suas contribuições individuais em sala de aula, para o meu crescimento profissional e pessoal. Ao Professor Edmilson, em especial, pois seus questionamentos em sala de aula, sempre colocaram luz a questões que, erroneamente, pensávamos que havíamos superado.

Agradeço, em especial atenção, à Eng. Ambiental Lívia Luchi Rabello, bolsista pesquisadora – FEST /RRDM, Laboratório EcoHidro do IFES Campus Vitória, pela sua disponibilidade, entendimento e capacidade explicativa em relação ao modelo SWAT (modelagem e calibração). Sem as suas explicações, possivelmente, os objetivos deste estudo não seriam atendidos em sua plenitude.

A todos que, individualmente e coletivamente, contribuíram à execução desse estudo, agradeço.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito”.

(Chico Xavier)

RESUMO

O fenômeno da urbanização brasileira processou-se de maneira desorganizada, sem planejamento urbano em sua grande maioria e com permissividade e passividade do poder público no que concerne ao ordenamento do território. Em consequência, diversas cidades têm apresentado o problema das cheias em seus espaços que, em última análise, está relacionado às intervenções que se realizaram nas bacias hidrográficas, como desmatamentos, lançamento de carga poluidora, ocupações em áreas ribeirinhas naturalmente alagáveis, canalização e retificação de canais e sistemas de drenagem urbana ausentes ou ineficientes. Diante deste complexo cenário, a modelagem hidrológica e hidráulica apresenta-se como uma importante ferramenta metodológica para avaliar os sistemas de drenagem urbana, construindo cenários preditivos aos eventos de inundações. Desta maneira, a presente pesquisa objetivou analisar a resposta hidráulica, utilizando o modelo HEC-RAS para construção de manchas de inundação na bacia hidrográfica do rio Jucu Braço Sul que abrange o núcleo urbano do município de Marechal Floriano, localizado na região serrana do Estado do Espírito Santo, apoiado em pesquisas levadas a cabo por Graciosa (2010), Santilan et al (2012) e Coutinho (2015), cujas vazões de pico utilizadas no modelo hidráulico foram apropriadas com base no uso de dois modelos hidrológicos, um concentrado (HEC-HMS) e outro semi-distribuído (SWAT), enquanto metodologia para se estabelecer as diferenças qualitativas e quantitativas na apropriação de vazões máximas e suas respostas em termos de altura da linha d'água, profundidade, velocidade e extensão das manchas de inundação. Essa metodologia encontra abrigo em Pereira et al (2016), Khoi (2016) e Hamidon et al (2011). Como resultados, obteve-se diferenças quantitativas em termos de vazões de pico, onde os modelos foram calibrados apresentando índice estatístico SNE de 0,65 (HEC HMS) e 0,6 (SWAT) satisfatórios, sendo que o SWAT apresentou vazões com menores diferenças na média da série histórica de 30 anos de simulação diária. Estes resultados foram inseridos no modelo HEC RAS, ocorrendo a elaboração de produto técnico que poderá ser apropriados ao planejamento do território, zoneamento urbano e medidas de controle de inundações para bacia do Jucu Braço Sul em trabalhos técnico-científicos futuros, com fornecimento de parâmetros físicos, hidrológicos e hidráulicos para realidade desta bacia; além de base metodológica consistente para ações futuras de modelagem hidráulica e drenagem urbana na bacia em estudo.

Palavras-chave: Modelos Hidrológicos; Resposta Hidráulica; Marechal Floriano

ABSTRACT

The phenomenon of Brazilian urbanization was carried out in a disorganized manner, without urban planning in its great majority and with permissiveness and passivity of the public power regarding the ordering of the territory. As a result, several cities have presented the problem of flooding in their spaces, which is ultimately related to interventions that have taken place in the river basins, such as deforestation, release of polluting cargo, occupations in naturally floodable riparian areas, channeling and rectification of absent or inefficient canals and urban drainage systems. Given this complex scenario, hydrological and hydraulic modeling is an important methodological tool to evaluate urban drainage systems, building predictive scenarios for flood events. Thus, the present research aimed to analyze the hydraulic response, using the HEC-RAS model for construction of flood spots in the river basin of the Jucu Braço Sul River that covers the urban core of the municipality of Marechal Floriano, located in the mountainous region of the State of Espírito Santo, supported by research carried out by Graciosa (2010), Santilan et al (2012) and Coutinho (2015), whose peak flow rates used in the hydraulic model were appropriate based on the use of two hydrological models, one concentrated (HEC-HMS) and the other semi-distributed (SWAT) as a methodology to establish qualitative and quantitative differences in the appropriation of maximum flows and their responses in terms of water line height, depth, velocity and extent of flood spots. This methodology can be found in Pereira et al (2016), Khoi (2016) and Hamidon et al (2011). The results showed quantitative differences in peak flow rates, where the models were calibrated with a SNE statistical index of 0.65 (HEC HMS) and 0.6 (SWAT) satisfactory, being that the SWAT presented flows with minor differences in the average of the historical series of 30 years of daily simulation. These results were inserted in the HEC RAS model, with the development of a technical product that may be appropriate to the planning of the territory, urban zoning and flood control measures for the Jucu Braço Sul basin in future technical and scientific work, providing physical, hydrological and hydraulic parameters for the reality of this basin; as well as a consistent methodological basis for future actions of hydraulic modeling and urban drainage in the basin under study.

Key-words: Hydrological Models; Hydraulic Response; Marechal Floriano.

CONSIDERAÇÕES SOBRE SINGREH

O programa de pós-graduação em Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua) possui a perspectiva, dentre outras, de desenvolver estudos com aderência metodológica objetivando a sua reprodutibilidade para outros cenários no que tange à gestão e regulação de recursos hídricos. A Agência Nacional de Águas, adicionalmente, contribui para o sistema com informações de monitoramento em tempo real, através das salas de situação, monitorando as vazões, além do Sistema de Informações Hídricas (HIDROWEB). Na escala de bacia, os estudos acerca das cheias urbanas, principalmente, são de relevância para a elaboração dos planos de bacia, que devem ser construídos em concomitância aos planos diretores municipais, a fim de se estabelecer metas, ações e programas de longa duração para efetivação da eliminação dos riscos de cheias ou atenuação de suas consequências, como a criação de sistemas de alerta e alarme, treinamento de comunidades, educação e conscientização ambiental, políticas orientadas de ocupação dos espaços urbanos (zoneamento), destinação de áreas da cidade como zonas de amortecimento, aumento da taxa de infiltração das águas, além de obras de engenharia. O presente estudo objetiva analisar a resposta de um modelo hidráulico na predição de manchas de inundação com base nas informações de vazões de pico simuladas por dois modelos hidrológicos, um concentrado e outro semi-distribuído. Pretende-se verificar se as diferenças das vazões geradas pelos dois modelos hidrológicos geram respostas muito diferentes nos resultados de um modelo hidráulico a ponto de justificar a utilização de um modelo que requer maior nível de tratamento de dados e parâmetros, como são os modelos distribuídos e semi distribuídos, em detrimento da utilização de um modelo hidrológico de interface e manuseio mais fáceis, como um modelo concentrado. Para tanto, foram estudadas as diferenças nas manchas de inundação, geradas pelo modelo hidráulico em face das diferenças nos valores das vazões geradas pelos dois modelos hidrológicos. Mesmo se sabendo que as respostas do modelo hidrológico são dependentes do relevo, com relevo escarpado gerando pequenas diferenças nas manchas de inundação e relevos planos e suaves resultando em grandes diferenças nas manchas devido a menores variações de vazão, achou-se por bem verificar as diferenças em um caso real. Ressalta-se que a falta de dados de chuva e vazão, a ocorrência de séries históricas com falhas, bacias com problemas de inundações e com relevos acidentados, com vales fortemente ocupados por manchas urbanas são comuns no Brasil. Dessa forma, a aderência metodológica acerca de sua reprodutibilidade viabiliza o presente estudo, com contribuição ao Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos.

CONSIDERATIONS FOR SINGREH

The postgraduate program in Professional Masters in National Network in Water Resources Management and Regulation (Profágua) has the perspective, among others, to develop studies with methodological adherence aiming its reproducibility to other scenarios regarding the management and regulation of water resources. The National Water Agency additionally contributes to the system with real-time monitoring information, through the situation rooms, monitoring flows, and the Water Information System (HIDROWEB). In the basin scale, the studies on urban floods, mainly, are of relevance for the elaboration of the basin plans, which must be built, in concomitance with the municipal master plans, in order to establish targets, long-term actions and programmes to effectively eliminate flood risks or mitigate their consequences, such as the creation of early warning and alarm systems, community training, education and environmental awareness, policies oriented to the occupation of urban spaces (zoning), destination of city areas as buffer zones, increased rate of water infiltration, as well as engineering Works. The present study aims to analyze the response of a hydraulic model in the prediction of flood spots based on information of peak flows simulated by two hydrological models, one concentrated and the other semi-distributed. It is intended to verify whether the differences in the flows generated by the two hydrological models generate very different responses in the results of a hydraulic model to the point of justifying the use of a model that requires a higher level of data and parameters processing, as the distributed and semi-distributed models are, to the detriment of the use of a hydrological model of easier interface and handling, as a concentrated model. To this end, we studied the differences in flood stains, generated by the hydraulic model in the face of the differences in the flow values generated by the two hydrological models. Even though it is known that the responses of the hydrological model are dependent on the relief, with steep relief generating small differences in flood stains and smooth flat reliefs resulting in large differences in stains due to smaller flow variations, thought it best to check the differences in a real case. It is noteworthy that the lack of rain and flow data, the occurrence of historical series with failures, basins with flooding problems and with rugged reliefs, with valleys heavily occupied by urban spots are common in Brazil. Thus, the methodological adherence regarding its reproducibility enables the present study, with contribution to the National Water Resources Management System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Evolução mundial comparativa entre população urbana e rural.....	29
Figura 02. Esquema de diferenciação entre enchente e inundação.....	31
Figura 03. Relação entre impermeabilização da bacia e vazão de pico.....	33
Figura 04. Localização da bacia do rio Jucu.....	59
Figura 05. Divisão do rio Jucu em braço norte e sul.....	60
Figura 06. Rio Jucu Braço Sul no início da área urbana de Marechal Floriano.....	61
Figura 07. Rio Jucu Braço Sul na área urbana de Marechal Floriano.....	62
Figura 08. Mapa do Modelo Digital de Elevação da Bacia do Rio Jucu Braço Sul, desconsiderando o núcleo urbano de Marechal Floriano.....	66
Figura 09. Mapa de localização das estações fluviométrica (57190000) e pluviométrica (2040012) Marechal Floriano na Bacia do Rio Jucu Braço Sul.....	67
Figura 10. Mapa de classes de solos bacia do rio Jucu Braço Sul.....	75
Figura 11. Mapa de uso e ocupação da bacia do rio Jucu Braço Sul.....	77
Figura 12. Modelo de bacia elaborado no HEC-HMS.....	80
Figura 13. Divisão do Jucu Braço Sul em sub-bacias pelo SWAT.....	81
Figura 14. Declividade gerada pelo ArcSWAT para bacia do Jucu Braço Sul.....	82
Figura 15. Índices estatísticos antes da calibração.....	86
Figura 16. Hidrograma obtido antes da calibração.....	86
Figura 17. Índices estatísticos após calibração.....	87
Figura 18. Hidrograma obtido após calibração.....	87
Figura 19. Hidrogramas de vazão não calibrados e calibrados (1981-1985).....	92
Figura 20. Hidrograma de validação SWAT (1986-1988).....	93
Figura 21. Mapa do trecho urbano de Marechal Floriano considerado na modelagem hidráulica.....	94
Figura 22. TIN do rio Jucu Braço Sul trecho urbano e córregos afluentes.....	96
Figura 23. Geometria do modelo hidráulico elaborado no RAS Mapping.....	98
Figura 24. Exemplo de mancha de inundação elaborada para núcleo urbano de Marechal Floriano.....	99
Figura 25. Vazões Máximas de 30 anos simuladas pelo HEC-HMS.....	103
Figura 26. Vazões Máximas de 30 anos simuladas pelo SWAT.....	104
Figura 27. Vazões Máximas comparadas entre modelos HEC-HMS e SWAT.....	105

Figura 28. Diferenças percentuais entre vazões máximas anuais.....	106
Figura 29 Ajuste da distribuição de Correlação Pearson 3 aos dados de vazões máximas anuais obtidas utilizando o programa HEC-HMS associadas a diferentes períodos de retorno.....	107
Figura 30. Ajuste da distribuição LogNormal II aos dados de vazões máximas anuais obtidas utilizando o programa SWAT associadas a diferentes períodos de retorno.....	108
Figura 31. Gráfico comparativo entre vazões simuladas pelo modelo SisCAH para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos utilizando dados de vazão simuladas pelos modelos HEC-HMS e SWAT.....	110
Figura 32. Gráfico comparativo entre as vazões de pico simuladas pelo SisCAH para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos utilizando dados de vazão simuladas pelos modelos HEC-HMS e SWAT, apresentando diferenças percentuais.....	112
Figura 33. Coeficiente de correlação entre as vazões de pico simuladas.....	112
Figura 34. Hidrograma de vazões máximas de série histórica para o modelo HEC-HMS.....	113
Figura 35. Hidrograma de vazões máximas de série histórica para o modelo SWAT.....	114
Figura 36 Relação entre elevação de superfície de água e períodos de retornos para os modelos HEC HMS e SWAT no trecho urbano do rio Jucu Braço Sul.....	119
Figura 37. Perspectiva 3D do relevo do trecho urbano do rio Jucu Braço Sul.....	120
Figura 38. Cross sections dos trechos alto, médio e baixo do Braço Sul em Marechal Floriano.....	121
Figura 39. Profundidade hidráulica rio Jucu Braço Sul em seu trecho urbano para vazões calculadas pelos modelos HEC HMS e SWAT.....	123
Figura 40. Profundidade máxima no canal do rio Jucu Braço Sul em seu trecho urbano.....	124
Figura 41. Velocidade total simulada pelo HEC RAS para o trecho urbano de Marechal Floriano.....	126
Figura 42. Mapa de bairros inseridos no trecho urbano de Marechal Floriano.....	127
Figura 43. Comparativo entre áreas de manchas de inundação para Marechal Floriano.....	129
Figura 44. Manchas de inundação para TR de 10 anos.....	130
Figura 45. Manchas de inundação para TR de 50 anos.....	131
Figura 46. Manchas de inundação para TR de 100 anos.....	132
Figura 47. Divisão do rio Jucu Braço Sul em subtrechos.....	134
Figura 48. Mapa comparativo entre as manchas de inundação com TR de 10 anos para os modelos HEC HMS e SWAT.....	135
Figura 49. Elevação máxima comparada para cada subtrecho urbano do rio Jucu Braço Sul.....	137

Figura 50. Profundidade máxima comparada para cada subtrecho urbano do rio Jucu Braço Sul.....	139
Figura 51. Velocidade máxima comparada para cada subtrecho urbano do rio Jucu Braço Sul.....	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Distribuição espacial dos tipos de relevo na bacia do rio Jucu Braço Sul.....	61
Tabela 02. Distribuição espacial das classes de solos na bacia do rio Jucu Braço Sul.....	73
Tabela 03. Usos do solo na bacia do rio Jucu Braço Sul.....	74
Tabela 04. Parâmetros utilizados para calibração do rio Jucu Braço Sul.....	88
Tabela 05. Parâmetros com valores otimizados após calibração.....	88
Tabela 06. Índices de qualidade da vazão simulada com base nos coeficientes adotados.....	90
Tabela 07. Valores de referência para coeficiente de Manning.....	95
Tabela 08. Parâmetros fisiográficos da bacia do rio Jucu Braço Sul.....	99
Tabela 09. Resultados para diferentes métodos de tempo de concentração.....	100
Tabela 10. Valores de CN obtidos para cada modelo hidrológico.....	101
Tabela 11. Análise comparativa entre vazões simuladas pelo modelo SISCAH para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos utilizando dados de vazão simuladas pelos modelos HEC-HMS e SWA.....	109
Tabela 12. Análise comparativa entre as vazões de pico simuladas pelo SisCAH para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos utilizando dados de vazão simuladas pelos modelos HEC-HMS e SWAT, apresentando diferenças percentuais.....	110
Tabela 13. Diferenças de elevação na superfície de água por trecho.....	116
Tabela 14. Elevação, profundidade e velocidade no trecho urbano do rio Jucu Braço Sul.....	122
Tabela 15. Variações de áreas das manchas de inundação.....	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 01. Relação entre equações de tempo de concentração e área das bacias hidrográficas.....	66
Quadro 02. Grupos hidrológicos de solos para as condições brasileiras.....	70
Quadro 03. Valores do CN do SCS considerando a condição II de umidade em função do tipo e uso do solo.....	71
Quadro 04. Propriedades físicas dos solos requeridas pelo modelo SWAT.....	81
Quadro 05. Parâmetros sensíveis do modelo SWAT para calibração.....	87

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal em Nível Superior

CN – Curva Número

CEPED – Centro de Pesquisas sobre Desastres

CESAN - Companhia EspíritoSantense de Saneamento

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias

EM-DAT - The International Disaster Database

GEOBASES - Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo

HEC-HMS - Model Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System

HEC-RAS – Model Hydrologic Engineering Center – River Analysis System

HEC-GeoRAS - Hydrologic Engineering Center -Geospatial River Analysis Extension

HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas da Agencia Nacional de Águas

HRU – Unidade de Resposta Hidrológica

IDF – Intensidade-duração-frequência

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDEHC – Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido

MDT – Modelo Digital de Terreno

NS – Coeficiente de Nash e Sutcliffe

ONU – Organização das Nações Unidas

PBIAS – Percentual de Tendência

PNL – Programação Não Linear

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

RSR - Erro Padrão Médio Normalizado

SCS – Soil Conservation Service

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SWAT - Soil and Water Assessment Tool

TC – Tempo de Concentração

TIN - Triangulated Irregular Network

TR – Tempo de Recorrência

RADAMBRASIL – Projeto Radar da Amazônia

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UN-ISDR - United Nations International Strategy for Disaster Reduction

USACE - United States Army Corps of Engineers

UTM – Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SIMBOLOS

A – Área de uma seção

Ea - Evapotranspiração no dia i

g – Aceleração da gravidade em m/s^2

h – Profundidade em m

H – Altura média da bacia em m

i – intensidade

I – Declividade do talvegue em m/m

Ia - Abstração inicial que inclui o armazenamento na superfície, interceptação e infiltração anterior ao escoamento (mm H₂O)

L – Comprimento do talvegue em Km

m^3/s – metro cúbico por segundo

n – Número de Manning

N - Número de observações durante período de simulação

O_i - Valores observados

Q – Vazão (m^3/s)

Q_{gw} - retorno do fluxo no dia i (mm H₂O)

Q_{surf} - Escoamento superficial no dia i (mm H₂O)

R_d - Precipitação no dia i

S_f - Declividade da linha de energia (m/m)

S_i - Valores simulados pelo modelo

S₀ - Declividade do canal (m/m)

S_{wt} - Teor final de água no solo (mm H₂O)

s - Parâmetro de retenção (mm H₂O)

t - Tempo em dias

T – Período de Retorno em anos

u – Velocidade em m/s

δ - Média de valores simulados

σ - Média de valores observados

Swo - Teor inicial de água no solo (mm H₂O)

Wseep - Quantidade de água entrando na zona vadosa a partir do perfil de solo (mm H₂O)

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	23
2. OBJETIVOS.....	27
2.1. Objetivo Geral.....	27
2.2. Objetivos Específicos.....	27
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	28
3.1. EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS.....	28
3.2. CHEIAS URBANAS.....	32
3.2.1. Medidas de Controle na Drenagem Urbana.....	34
3.2.1.1. Medidas Estruturais.....	34
3.2.1.2. Medidas Não-Estruturais.....	35
3.3. MODELOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS.....	37
3.3.1. Modelos Hidrológicos.....	38
3.3.1.1. HEC-HMS.....	40
3.3.1.2. SWAT.....	42
3.3.2. Integração entre Modelos Hidrológicos.....	46
3.4. MODELAGEM HIDRÁULICA E CRIAÇÃO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO.....	48
3.4.1. Classificação dos escoamentos.....	50
3.4.1.1. Propagação da onda de cheia.....	51
3.4.1.2. Número de Manning.....	52
3.4.2. Modelo HEC-RAS.....	53
3.4.3. Manchas de Inundação.....	55

4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	57
4.2. DADOS DE ENTRADA NOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	62
4.3. PARÂMETROS HIDROLÓGICOS E DE TIPOS E USOS DE SOLOS PARA AS SIMULAÇÕES.....	65
4.3.1. Tempo de Concentração (Tc).....	66
4.3.2. Coeficiente de Armazenamento.....	68
4.3.3. Apropriação das Vazões Máximas.....	68
4.3.4. Curva Número (CN).....	69
4.3.5. Caracterização Pedológica e Uso e Ocupação do Solo.....	72
4.4. MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	75
4.4.1. Simulação Hidrológica com uso do HEC-HMS.....	76
4.4.2. Simulação com uso do SWAT.....	78
4.4.2.1. Modelo Digital de Elevação.....	79
4.4.2.2. Tipo de Solos.....	80
4.4.2.3. Uso e Ocupação do Solo.....	81
4.4.2.4. Geração das HRU's.....	81
4.4.2.5. Dados Climáticos.....	82
4.4.3. Calibração e Validação dos Modelos.....	83
4.4.3.1. Calibração do Modelo HEC-HMS.....	83
4.4.3.2. Calibração e Validação com SWAT.....	86
4.5. MODELAGEM HIDRÁULICA.....	92
4.5.1. Domínio e condição de contorno do modelo.....	95
4.5.2. Geometria do Modelo.....	96
4.5.3. Simulações com o HEC RAS.....	96

4.5.4. Determinação das Manchas de Inundação.....	97
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	99
5.1. PARÂMETROS FISIAGRÁFICOS E HIDROLÓGICOS DA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL.....	99
5.1.1. Parâmetros Fisiográficos.....	99
5.1.2. Parâmetros Hidrológicos.....	100
5.1.2.1. Tempo de Concentração e Coeficiente de Armazenamento.....	100
5.1.2.2. Curva Número (CN).....	101
5.2. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA PARA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL CONCENTRADO.....	101
5.2.1. Análise das Vazões Máximas Apropriadas.....	102
5.2.2. Vazões de Pico associadas a Períodos de Retorno.....	105
5.2.3. Hidrogramas Produzidos pelas Simulações.....	112
5.3. RESPOSTA HIDRÁULICA PARA O TRECHO URBANO DA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL.....	114
5.3.1. Elevação da Área de Superfície, Profundidade e Velocidade de Fluxo.....	115
5.3.2. Manchas de Inundação para o Setor Urbano de Marechal Floriano.....	123
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	137
7. CONTRIBUIÇÕES AO SINGREH.....	141
8. REFERÊNCIAS.....	146
9. ANEXOS.....	156
Anexo A.....	157
Anexo B.....	158

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída através da Lei Federal nº 9433, de 08 de janeiro de 1997, popularmente conhecida como “Lei das Águas”, estabeleceu, dentre outras questões, que a base físico-territorial de gestão integrada dos recursos hídricos seja a bacia hidrográfica. Assim, a bacia é o lócus preferencial de atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh), também delineado pela supracitada lei federal que, para além da definição do arcabouço jurídico da gestão das águas, definiu, também, o escopo de atuação dos órgãos governamentais e setoriais direta e indiretamente ligados à gestão das águas no Brasil.

O artigo 2º da Lei das Águas coloca como um de seus objetivos a realização da “[...] prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos hídricos” (BRASIL, 1997, p. 01), cuja definição legal vai ao encontro da Lei Federal nº 9984, de 17 de julho de 2000, que criou a Agência Nacional de Águas (ANA), que estabeleceu em seu artigo 4º, como um de seus objetivos “[...] planejar e promover ações destinadas a prevenir ou minimizar os efeitos de secas e inundações, no âmbito do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos em articulação com o órgão central do Sistema Nacional de Defesa Civil, em apoio aos Estados e municípios” (BRASIL, 2000).

A primeira questão que conduz e busca justificar a presente pesquisa, neste sentido, possui caráter institucional, ou seja, diz respeito à demanda do Sistema Nacional de Recursos Hídricos por aprimoramento de metodologias relacionadas à gestão integrada dos recursos hídricos, sendo que este aprimoramento técnico-científico deve ocorrer “pari passu” ao fomento e incentivo de pesquisas com temáticas relacionadas aos desastres naturais, uma vez que, como bem definiu Leandro Monteiro, o “[...] desenvolvimento da pesquisa em desastres naturais no Brasil ainda é tímido, mas tem ganhado destaque nos últimos anos” (MONTEIRO, 2013, p.14).

Nota-se que pesquisas sobre desastres naturais ganharam terreno ao mesmo tempo em que as preocupações com as suas consequências receberam notoriedade em razão dos números registrados nas últimas décadas por diversas agências governamentais de gestão de riscos naturais. Em recente pesquisa do Banco Mundial coordenada pelo Centro de Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED/UFSC), entre 1995 e 2014, o Brasil perdeu 182,8 bilhões de reais com desastres, seja para reabilitação de cenários afetados, seja para implementação de medidas emergenciais em resposta aos desastres (CEPED, 2016).

De acordo com o Emergency Disasters Data Base (EM-DAT), as inundações corresponderam a cerca de 60% dos óbitos e perdas materiais relacionadas aos desastres naturais entre os anos de 1982 a 2010 (EM-DAT, 2014). De acordo com Hora e Gomes (2009), somente no ano de 2007, aproximadamente 165.000 pessoas foram afetadas pelos eventos de inundação em todo o Mundo, acarretando na morte de 8.382 indivíduos. Esses números demonstram o impacto dos processos hidrológicos em termos de danos aos patrimônios particulares e públicos e de perda de vidas humanas, além de prejuízos econômicos.

No Brasil, as cheias são os fenômenos naturais que causam maiores danos e prejuízos sociais e econômicos. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008, conduzida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 27,4% dos municípios apresentaram inundações ou alagamentos e 23,9% dos municípios brasileiros apresentaram inundações ou alagamentos devido a pontos de estrangulamento que impedem a vazão natural dos córregos e rios. Percebe-se que mais da metade dos municípios brasileiros apresentam algum tipo de problema relacionado às cheias, sejam eles enchentes, inundações, enxurradas ou alagamentos (IBGE, 2008).

Verifica-se a necessidade, portanto, de constante sistematização, aprimoramento e atualização das informações sobre inundações, com produção e/ou refinamento de cartas de risco e de outras ferramentas, utilizando, por exemplo, modelos hidrológicos e hidráulicos capazes de construir cenários de perigo em razão de precipitações intensas e

períodos de retorno estabelecidos para cada realidade, observando as particularidades regionais no que tange a gestão de cheias, conformando a segunda questão que justifica o presente estudo, de caráter metodológico, isto é, a elaboração de modelagem hidráulica como subsídio aos cenários preditivos a cheias apresentará respostas mais consistentes com o uso de modelos hidrológicos de características físicas opostas, sendo contrastados seus resultados em análise comparativa, cujo resultado é a observação das discrepâncias produzidas na resposta hidráulica das vazões de pico apropriadas.

Os modelos de transformação chuva-vazão são alçados, assim, como possibilidade técnica para preencher falhas em séries históricas, estimar séries de vazões com base numa precipitação conhecida, prever vazões de projeto para obras hidráulicas, entre outros, subsidiando tomadas de decisões no planejamento dos recursos hídricos (Pereira et al, 2016).

A compreensão do deflúvio gerado pelo escoamento superficial é importante, porém, mais ainda é a definição da área atingida por uma cheia, das profundidades e do perfil de velocidade da água em diferentes pontos da paisagem. Enquanto o deflúvio é estabelecido por modelos hidrológicos, as áreas atingidas por cheias, as profundidades e o perfil de velocidade da água podem ser simulados por modelos hidráulicos.

Modelos hidrológicos podem ser classificados, quanto à discretização espacial, em concentrados e distribuídos. Modelos concentrados são aqueles que consideram todas as informações parametrizadas em uma média válida para toda a bacia hidrográfica, não considerando as especificidades espaciais que nela possam existir. Já os modelos distribuídos consideram, por seu turno, a variabilidade espacial dentro das bacias hidrográficas, discretizando as informações conforme o relevo, forma da bacia, tipo de solo e uso e ocupação do mesmo.

Ao se lançar mão de modelos hidrológicos para o cálculo das vazões em bacias que não possuem dados fluviométricos ou quando os possui de maneira incompleta e com pouca cobertura da rede hidrometeorológica, entende-se que o uso de modelos diametralmente

opostos na forma de discretização espacial (concentrado e distribuído) pode gerar resultados diferentes e que promovam diferenças significativas nas respostas do modelo hidráulico a ser utilizado para a predição das manchas de inundação, profundidades e perfil de velocidade.

Verifica-se, assim, a necessidade de se produzir material técnico-científico abordando o uso de diferentes tipos de modelos hidrológicos para análise das respostas de modelos hidráulicos, com foco em pequenas e médias bacias hidrográficas para subsidiar o planejamento e gestão das cheias, que poderão gerar produtos a serem apropriados ao planejamento do território, zoneamento urbano e adoção de medidas de controle de inundações adequadas à realidade específica de cada setor de uma bacia hidrográfica, de forma a direcionar tecnicamente ações de medidas de minimização dos riscos de cheias e subsidiar sistemas de alerta e alarme para defesa civil.

Parte do núcleo urbano do município de Marechal Floriano, localizado na região serrana do Estado do Espírito Santo, se assenta sobre a planície aluvial do rio Jucu Braço Sul e apresenta recorrência de cheias que vem trazendo prejuízos aos setores público e privado. Este apresenta dados topográficos e hidrológicos que fizeram com que fosse escolhido como a área de estudo para o presente trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral:

Analisar a resposta de um modelo hidráulico num trecho urbano da bacia do rio Jucu Braço Sul, com base na apropriação de vazões de pico calculadas utilizando dois modelos hidrológicos, um concentrado e outro semi-distribuído.

2.2. Objetivos Específicos:

- Analisar, comparativamente, dois modelos hidrológicos, concentrado e semi-distribuído, em função da vazão simulada, fornecendo subsídios à tomada de decisão na escolha de modelo hidrológico a ser utilizado em trabalhos que adotam este tipo de metodologia;
- Analisar informações de alturas dos níveis de água, profundidade, velocidade e extensão das áreas de inundação para diferentes períodos de recorrência advindas dos resultados da modelagem hidráulica utilizando o modelo HEC-RAS;
- Analisar, comparativamente, as manchas de inundação para o trecho urbano do rio Jucu Braço Sul, localizado no município de Marechal Floriano, disponibilizando parâmetros técnicos para tomadas de decisões futuras em relação ao planejamento dos recursos hídricos e gestão do território urbano.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS

Eventos hidrológicos extremos, e os seus riscos associados, estão relacionados à disponibilidade de água, tanto em relação à sua ausência (secas), quanto ao seu excesso (cheias). As cheias afetam milhões de pessoas anualmente por todo o Mundo e são processos de origem hidrometeorológica que compõem a dinâmica natural ligada ao ciclo hidrológico (IPT, 2007).

De acordo com o United Nations International Strategy for Disaster Reduction¹ (UN-ISDR, 2009), um desastre pode ser classificado como uma grave perturbação numa dada comunidade envolvendo perdas humanas, materiais, econômicas e ambientais, sem que a comunidade em si consiga restabelecer, por conta própria, a normalidade abalada (ANDRADE, 2017).

The International Disaster Database afirma que, entre os anos de 2001 a 2014, mais de um bilhão de pessoas no Mundo foram afetadas por eventos de inundação, com quase oitenta mil óbitos associados a este fenômeno, fato que o caracteriza como de proporções globais e que o eleva à condição de desastre mais recorrente em frequência e magnitude (EM-DAT/OFDA/CRED, 2015). Para a realidade brasileira, estima-se que as inundações representaram mais de 70% dos desastres naturais ocorridos no país durante o período de 2006 a 2016 (EMDAT, 2017).

Para Tominagua et al. (2009), desastre é o desequilíbrio da natureza que independe da ação humana. Assumindo uma linha argumentativa oposta, Bertone e Marinho (2013) afirmam que, no Brasil, a ocorrência e a intensidade de um desastre são dependentes mais

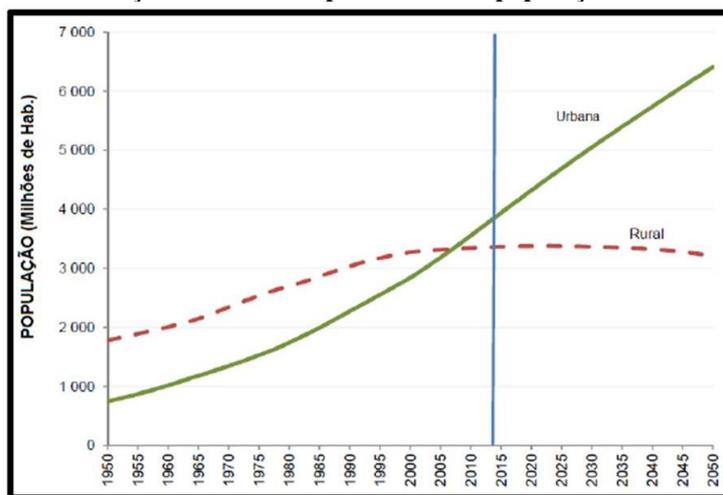
¹ O UN-ISDR é o escritório das Nações Unidas com objetivo de coordenar as ações da ONU no que tange à redução do risco de desastres, alinhando as agendas deste órgão às necessidades específicas de cada País ou região do Mundo.

da vulnerabilidade a qual os indivíduos estão sujeitos do que da magnitude dos eventos adversos em si.

Indo ao encontro destes últimos, Andrade (2017) afirma que os desastres são potencializados pela ação humana em razão das modificações que se processam e ainda se fazem presentes nos territórios, sejam rurais ou urbanos, com maior destaque para estes últimos, uma vez que é no território urbano que os desastres, como as inundações, por exemplo, se manifestam em maior intensidade e potencial destruidor.

De acordo com Sharma (2017), em 2013, os prejuízos globais associados às inundações superaram US\$ 50 bilhões. A expectativa é de que este montante mais do que dobre nos próximos vinte anos. Aliada a este aumento nos prejuízos, há a tendência de aumento da população global urbana nos próximos vinte anos em aproximadamente 23%, tornando-se, de fato, uma questão central para a segurança hídrica das populações, conforme é destacado na Figura 01, na qual nota-se a curva ascendente de crescimento da população urbana em detrimento da população rural.

Figura 01. Evolução mundial comparativa entre população urbana e rural



Fonte: United Nations, 2014.

Estudos acerca das inundações urbanas e desastres hidrológicos, diante deste cenário de crescimento urbano e intensificação dos eventos de cheias, prosperam na atualidade, como podem ser observados em Sharma, 2017; Rafiq et al, 2016; Ramos et al, 2017 e Thanvisitthpor; Shreestha; Pal, 2018. No cenário nacional, destacam-se os estudos conduzidos por Speckhann, 2018; Passamani, 2016; Luz, 2017; Ribeiro e Lima, 2011; Graciosa, 2010; Andrade, 2017; Rezende, 2012; Cabral et al, 2016; Rezende e Alamy Filho, 2017 e Abatti e Tschoke, 2018.

Desastres naturais relacionados a eventos hídricos podem ser subdivididos em enchentes, inundações, alagamentos e enxurradas (COBRADE, 2012). Enchentes são definidas como elevações temporárias do nível d'água de um canal de drenagem em função do aumento da vazão por conta de precipitação intensa, sendo a intensidade deste evento não superior à calha do rio (CHRISTOFOLETTI, 1980). Possui uma sazonalidade na ocorrência que lhe confere caráter singular, com uma dinâmica que propicia a ocupação de extensas áreas sem, contudo, ocupar o leito maior de drenagem, restringindo-se ao leito menor² (IPT, 2007; SILVA, 2013).

As inundações, além de se caracterizarem como elevações anormais no nível d'água, promovem o extravasamento das águas, ultrapassando a cota do nível máximo da calha principal de um rio. As águas ocupam a planície de inundação ou leito maior do rio, popularmente denominado de várzea, extrapolando, em razão de sua intensidade, a capacidade de descarga da calha do rio, ocupando, assim, as áreas marginais. O transbordamento normalmente é de modo gradual, ocasionado por chuvas prolongadas (IPT, 2007; CHRISTOFOLETTI, 1980; COBRADE, 2012). Essa dinâmica entre enchentes e inundações pode ser observada na Figura 02.

2 Leito menor, de acordo com Christofolletti (1980) corresponde à própria calha principal de um rio. Já o leito maior, ou várzea, são áreas contíguas ao rio que se estendem desde poucos metros das margens de um rio até dezenas de metros a partir da calha principal, sendo áreas que recebem as grandes cheias de períodos de recorrência excepcionais, servindo como zonas de recarga do sistema fluvial e amortecimento das ondas de cheias (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Figura 02. Esquema de diferenciação entre enchente e inundação.



Fonte: Carvalho et al (2007).

Já as enxurradas se caracterizam pelo alto poder destrutivo, associadas a áreas de relevo acidentado, fato que confere ao escoamento superficial grande energia e velocidade, provocadas por chuvas intensas e concentradas, normalmente associadas a pequenas bacias de drenagem, com transbordamento brusco da calha fluvial (COBRADE, 2012).

Por fim, o alagamento é a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e conseqüente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas. Pode-se afirmar que os alagamentos independem, a priori, de um sistema fluvial que influencia diretamente na dinâmica do escoamento superficial. O alagamento é fruto de projetos de macrodrenagem urbana defasados, associados a uma falta de política de educação ambiental entre as comunidades (COBRADE, 2012; ANDRADE, 2017).

Em resumo, é notório que em todas as tipologias de cheias descritas acima há a presença da precipitação intensa enquanto agente deflagrador seja enchente, inundação, enxurrada ou alagamento. Chuvas intensas estão associadas a caudais volumosos que causam danos e prejuízos às populações residentes em áreas de risco que, conseqüentemente, estão relacionadas às bacias urbanizadas, com forte intervenção antrópica, caracterizando tal fenômeno como cheias urbanas.

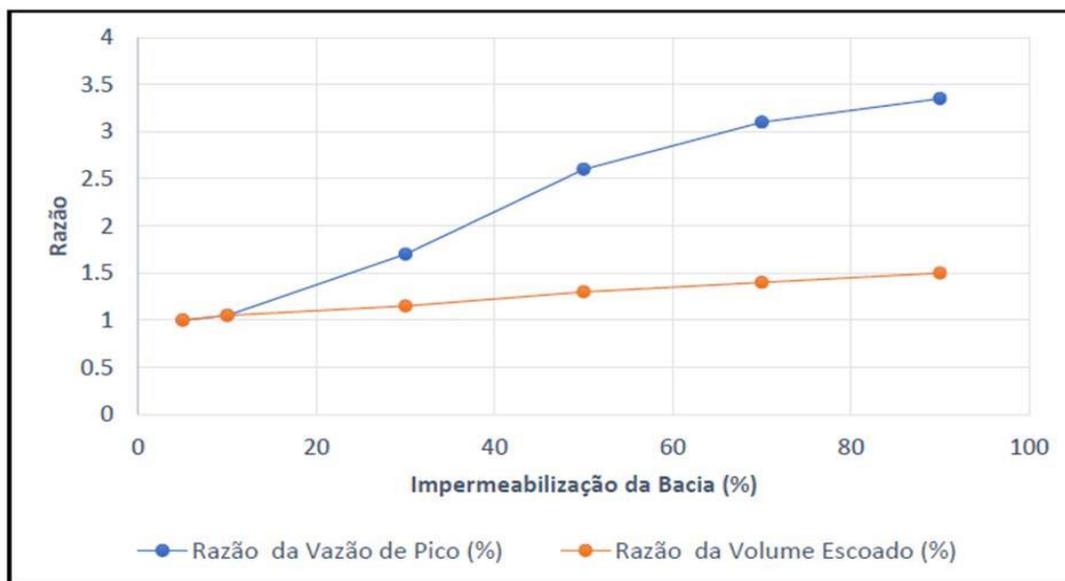
3.2. CHEIAS URBANAS

O ciclo hidrológico é um fenômeno global fechado de circulação de água entre a superfície terrestre e a atmosfera. As transferências de massas de água em seus diversos estados físicos representam a condução de água, tendo a bacia hidrográfica como o lócus preferencial de observação e atuação, passando pelas etapas de precipitação, interceptação, infiltração e percolação, escoamento superficial, transpiração e evaporação (LIMA, 1986; TUCCI, 1995; SILVEIRA, 2002).

O ciclo hidrológico representa o esquema ideal de circulação da água entre a biosfera e a atmosfera, contudo, há muito que o mesmo não se apresenta neste formato ideal. O que se observa atualmente é uma quebra neste ciclo, cujo elemento indutor é a urbanização. Este fato levou Botelho (2011) a afirmar que, nos espaços urbanos, o que se observa é o binômio precipitação-escoamento, sendo as demais etapas do ciclo suplantadas, trazendo consigo consequências diversas, em razão das alterações humanas realizadas nos territórios e, por extensão, nas bacias hidrográficas.

Para Ramos et al (2017) as bacias não urbanizadas são caracterizadas pela eficiência no sistema natural de controle de fluxos, representado pela vegetação, solos permeáveis, depressões naturais e aumento de infiltração e evapotranspiração. Já as bacias urbanizadas são caracterizadas pela presença maciça de superfícies impermeáveis que aumentam a velocidade de escoamento e os fluxos de picos e diminuem a evapotranspiração, a absorção de água da chuva e a recarga dos aquíferos. A Figura 03 demonstra a relação da razão entre a razão da vazão de pico com a impermeabilização da bacia, em porcentagem; e razão, também em porcentagem, entre volume escoado e a impermeabilização de uma bacia. Nota-se que a razão da vazão de pico torna-se discrepante à medida em que a impermeabilização da bacia se torna maior. Ao mesmo tempo, observa-se que o volume escoado tende a ser praticamente constante, alterando-se a vazão de pico, justamente pelo aumento da velocidade de escoamento, característica marcante de bacias altamente impermeabilizadas como afirma Ramos et al (2017).

Figura 03. Relação entre impermeabilização da bacia e vazão de pico



Fonte: Zhang; Guo; Xinya, 2015.

O fenômeno da urbanização brasileira processou-se de maneira desorganizada, sem planejamento urbano adequado em sua grande maioria e com permissividade e passividade do poder público no que concerne ao ordenamento do território. Como intervenções que propiciam e potencializam as cheias urbanas podem-se citar alterações na rede de drenagem natural, ocupações em áreas de várzeas naturalmente alagáveis, desmatamentos em vegetação ribeirinha, cortes em encostas que provocam o carreamento de sedimentos para calha dos rios e córregos, aterros de margens e impermeabilização do solo, com diminuição da infiltração. Essas são, grosso modo, as características comuns e observáveis nas áreas urbanas e que contribuem para o agravamento dos eventos hidrológicos extremos, uma vez suplantado o sistema natural de controle de fluxos citado acima (ANDRADE, 2017; IPT, 2007; TOMINAGUA et al, 2009; TUCCI, 1997).

Os danos trazidos pelas cheias urbanas possuem uma relação direta entre a sua severidade e algumas características do processo de cheia, tais como, por exemplo, as propriedades físicas do deflúvio gerado, a extensão da área e duração da inundação e a velocidade dos fluxos sobre as superfícies, tornando necessária a aplicação de medidas de controle para findar ou reduzir os riscos associados às cheias (SCHMITT; THOMAS; ETTRICH, 2004; PASSAMANI, 2016).

3.2.1. Medidas de Controle da Drenagem Urbana

Medidas de controle têm o objetivo de controlar e minimizar os problemas das cheias urbanas, conformando um conjunto de ações e intervenções no território que são classificados como medidas estruturais e não estruturais (PASSAMANI, 2016).

As características intrínsecas das bacias urbanas devem ser consideradas no momento da tomada de decisão acerca do planejamento para minimização das cheias, isto é, uma medida estrutural pode não ser a mais eficiente em relação a uma medida não-estrutural, por exemplo. A criação de bacias de retenção ou ampliação da largura dos canais podem ser medidas de controle inviáveis para a maioria das bacias com alto grau de urbanização. Assim, as medidas não-estruturais ganham contorno, ao mesmo passo em que a conjunção entre medidas estruturais e não-estruturais ascende enquanto tendências do planejamento territorial das cidades com problemas de inundações urbanas (MIGUEZ et al, 2009; PASSAMANI, 2016).

3.2.1.1. Medidas Estruturais

As medidas estruturais podem ser resumidamente compreendidas como o emprego de técnicas e obras de engenharia, com objetivo de intervenção direta para dar resolutividade às consequências trazidas pelas cheias. Sua aplicação é mais comumente observada em áreas densamente urbanizadas, com problemas e riscos hidrológicos já instalados, fato que reduz seu potencial de ação no controle direto das cheias (CANHOLI, 2005).

Dentre algumas medidas de controle estrutural existentes, podem-se citar, com base em Canholi (2005), Tucci (2005) e Passamani (2016):

- Aceleração do escoamento através de canalizações;
- Retardamento do fluxo d'água;

- Construção de reservatórios e bacias de detenção e retenção;
- Retificação de calhas de rios;
- Desvios dos escoamentos;
- Túneis de derivação;
- Dique de proteção;
- Bombeamento da água pluvial.

Estas medidas elencadas acima fazem parte de um escopo maior de técnicas e obras estruturais. São exemplos de ações que, na maioria das vezes, possuem alto custo de financiamento e envolvem problemas sociais, tais como remoção e desapropriação de comunidades, causando morosidade ao processo. As medidas estruturais podem, ainda, ser dividida entre medidas extensivas, que são aplicadas ao longo de toda a bacia na tentativa de modificar o padrão precipitação x vazão estabelecido; e medidas intensivas, com foco na macrodrenagem urbana (CANHOLI, 2005; TUCCI, 2005; RIGHETTO, 2009; PASSAMANI, 2016; STIVANIN, 2015).

3.2.1.2. Medidas Não-Estruturais

As medidas não-estruturais possuem caráter de prevenção (RESENDE, 2012). Preconizam a convivência harmônica da população com os rios, intentando em uso mais racional do espaço urbano. Por possuírem menor custo e tempo para a sua implantação, tais medidas são alçadas atualmente como as medidas de controle mais adotadas pelos órgãos públicos setoriais de planejamento e respostas aos riscos e recursos hidrológicos (PASSAMANI, 2016; REZENDE, 2012; CANHOLI, 2005; TUCCI, 2005; RIGHETTO, 2009; KUREK, 2012; STIVANIN, 2015). As medidas não-estruturais podem ser resumidas em:

- Planejamento de uso do solo;
- Zoneamento de áreas de inundação;
- Elaboração de programa de drenagem urbana;
- Critérios para construção no código de obras;

- Educação ambiental;
- Planos de evacuação;
- Programas de ações emergenciais;
- Sistema de alerta ligados à defesa civil;
- Seguro contra enchentes;
- Fiscalizações;
- Coleta de lixo;
- Manutenção de áreas verdes.

Dentre as medidas não-estruturais citadas acima, o zoneamento de áreas de inundação é um procedimento que traz um diagnóstico da realidade de uma bacia hidrográfica em termos de riscos de cheias. Tal zoneamento é fruto de diversas técnicas e procedimentos metodológicos para o mapeamento das áreas inundáveis (RESENDE e ALAMY FILHO, 2017).

Assim, os modelos hidrológicos e hidráulicos se inserem nesta seara de possibilidades como recurso metodológico ao zoneamento das áreas de cheias, criando manchas de inundação a partir de chuvas de projeto com períodos de recorrência pré-determinados, que se inter-relacionam às demais medidas não-estruturais, tais como as fiscalizações, planos de evacuação, sistema de alerta e critérios para novas construções; e, também, às medidas estruturais, como diques de proteção, bacias de retenção e sistemas de bombeamento pluvial. Resende e Alamy Filho (2017) resumem este pensamento ao afirmarem que com a “[...] simulação de cenários de precipitação, produz-se a delimitação de zonas afetadas por enchentes, demonstrando áreas passíveis de riscos de ocupação” (Resende e Alamy Filho, 2017. p.841).

A simulação de cenários é propiciada pelo uso conjunto entre modelos hidrológicos e hidráulicos, que fornecem subsídios técnicos para construção de cenários probabilísticos quanto ao risco de cheias.

3.3. MODELOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

Modelos podem ser compreendidos como uma simplificação de uma realidade que se quer representar, considerando sua estrutura, dinâmica e fatores intervenientes (OLIVEIRA, 2015), com capacidade para reconstruir tal realidade com previsão de seu comportamento ou evolução (CHRISTOFOLETTI, 1999). Busca, assim, reproduzir o comportamento de um sistema, analisando dados de entrada para predição de cenários, sendo bastante úteis no gerenciamento de processos e crises (GRACIOSA, 2010). De acordo com Haggett e Chorley (1967), um modelo é

[...] uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade (HAGGETT e CHORLEY, 1967, p. 13).

Machado (2002) orienta que, embora os modelos possam ser compreendidos como a simplificação de uma dada realidade parametrizável, não se pode incorrer no erro de tornar o modelo algo simplório. Dentro de sua simplicidade, um modelo deve representar mais fielmente possível o fenômeno que se queira simular. Assim, para Santini Junior (2018), os modelos devem se preocupar apenas com a representação das variáveis necessárias para solução de um problema.

A simplicidade, como alerta Tucci (2005), está na apresentação dos resultados, no acesso e no seu uso e não na falta de dados e parâmetros que possam, indubitavelmente, falsear os resultados produzidos. Nas palavras do autor, o modelo “[...] é a representação de algum tipo de objeto ou sistema numa linguagem ou forma de fácil acesso ou uso, com objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (TUCCI, 2005, p.17).

Neste contexto, os modelos hidrológicos surgem como possibilidade técnica capazes de produzirem respostas às demandas acerca do planejamento, gestão e segurança hídrica das populações. Os modelos matemáticos ganharam terreno após a Segunda Guerra Mundial, que produziu grande necessidade de estimativa dos componentes hidrológicos, tais como a precipitação, escoamento e infiltração (CORREIA, 2016). Tal preocupação alinhava-se às questões ambientais que emergiram no pós-guerra, onde a preservação ambiental assumiu a agenda de preocupação de diversos países, tendo os recursos hídricos como um dos pontos principais desta agenda (CORREIA, 2016; RIBEIRO, 2008).

3.3.1. Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos, especificamente, se propõem a descrever e quantificar os processos envolvidos no escoamento superficial (MAZIERO, 2010). A compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, em última análise, a compreensão de sua descarga, fornece importante base analítica para diversas situações relacionadas ao planejamento dos recursos hídricos ou segurança hídrica, sendo uma ferramenta útil de representação dos processos em uma bacia (TUCCI, 1997) e podem ser empregados na estimativa da alteração da oferta quali-quantitativa da água, gestão de cheias, subsídio a processos de outorga e enquadramento dos corpos d'água ou preenchimento de falhas de séries históricas em bacias hidrográficas não monitoradas (MAZIERO, 2010; VIESSMAN Jr e LEWIS, 1996).

Considerando a pluralidade de autores que intentaram uma classificação dos modelos hidrológicos, a presente pesquisa ater-se-á à classificação que encontra abrigo em Tucci (2005) e Almeida e Serra (2017). Indo ao encontro dos objetivos propostos neste trabalho, entende-se, enquanto representativas dos modelos hidrológicos, as seguintes classes:

- Estocásticos e determinísticos – Um modelo determinístico possui a característica do sistema em produzir sempre a mesma informação de saída em relação à

informação de entrada, enquanto que os modelos estocásticos se caracterizam pela aleatoriedade pautada por uma função de distribuição que faz a leitura estatística das possibilidades eventuais do fenômeno estudado ou de seus parâmetros;

- Discretos e contínuos – o modelo contínuo possui, como o nome induz, uma continuidade temporal do fenômeno modelado, fato que já não ocorre com os modelos discretos, que possuem intervalos determinados de tempo;
- Concentrados e distribuídos – os modelos concentrados transformam todas as informações parametrizadas em uma média válida para toda a bacia hidrográfica, não considerando as especificidades espaciais que nela existem, ao passo que os modelos distribuídos consideram, por seu turno, a variabilidade espacial dentro das bacias hidrográficas, discretizando as informações conforme o relevo, a forma da bacia ou outras características;
- Conceituais e empíricos – um modelo conceitual é construído com base nos processos físicos e se utiliza de equações de base física amplamente aceitas. Já o modelo empírico é aquele que ajusta as informações simuladas e observadas através de funções que não possuem relação com os processos físicos, sendo construídos, em muitos casos, para modelar um sistema ambiental localizado, com características próprias.

Os modelos hidrológicos, especificamente do tipo precipitação-vazão, ocupam-se em demonstrar e explicar a relação entre precipitação pluviométrica e o escoamento superficial dentro de uma bacia hidrográfica (MACEDO, 2013). Propõem-se a subsidiar a compreensão da maneira com que a entrada de água no sistema (precipitação pluviométrica) se transforma em vazão (escoamento superficial) em uma seção transversal de um curso d'água, ou seja, o objetivo é, a partir de uma precipitação conhecida, simular as respostas hidrológicas em termos de vazão (SOUZA et al, 2012), a exemplo das pesquisas levadas a cabo por Post e Jakeman (1999) e Vendruscolo (2005). Dentre os diversos modelos do tipo chuva-vazão, podem-se citar o HEC-HMS e o SWAT,

ambos adotados na presente pesquisa como caminho metodológico para simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Jucu Braço Sul.

3.3.1.1. HEC-HMS

O Hydrologic Modeling System (HMS) foi criado pelo United States Army Corps of Engineers, com o objetivo inicial de suprir as demandas internas deste órgão governamental norte-americano no que concerne às inundações em centros urbanos, frequência destas inundações, dimensionamento e operação de reservatórios (MACEDO, 2010).

Este modelo matemático é considerado um modelo de transformação chuva-vazão discreto, semi-conceitual, determinístico e concentrado e que possui a capacidade de realizar simulações de eventos únicos ou para longos períodos em razão de uma série de modelos e equações disponibilizados aos usuários. O HEC-HMS assume que toda a bacia hidrográfica é um grupo interligado de áreas e os parâmetros, assim, refletem as condições médias dentro deste conjunto de áreas (SOUZA, 2012). Quer dizer que, para o HEC-HMS, toda a bacia contribui e influencia, de maneira igualitária, aos processos hidrológicos.

O modelo permite realizar simulação de evaporação, precipitação e escoamento em bacias hidrográficas, sendo bastante requisitado para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, simulação de vazões de projeto para inundações, em cenários atuais e tendenciais. O modelo de bacia inclui métodos para o cálculo de perdas de precipitação, transformação da precipitação em escoamento e do escoamento em canais. Os elementos hidrológicos considerados são as sub-bacias, trechos d'água, junções, derivações, reservatórios, fontes e as depressões (SANTOS et al, 2006; SANTOS, 2017).

De acordo com Souza et al (2012), existem sete métodos que podem ser utilizados pelo usuário na modelação hidrológica: specified hyetograph, gageweighting, inverse-distance gageweighting, gridded precipitation, frequency storm, SCS storm e o standard Project storm.

Exemplos de aplicação do HEC-HMS em estudos sobre cheias urbanas podem ser observadas em pesquisa conduzida por Neto (2017) que aplicou o HEC-HMS em sub-bacias urbanas no município de Lajes/SC no sistema hídrico denominado Caveiras Montante, utilizando três eventos de inundações para calibração do modelo. Os hidrogramas de saída, com resultados satisfatórios, complementaram dados de monitoramento fluviométrico das sub-bacias.

Santos (2017) aplicou o HEC-HMS na bacia do córrego Lavapés para quantificar a produção de água. O modelo foi associado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para simulação de eventos para previsão de cenários de riscos quanto à possibilidade de cheias nesta bacia, contribuindo satisfatoriamente ao planejamento dos recursos hídricos e do território.

Já Souza e Farra (2017), utilizaram o HEC-HMS nas bacias hidrográficas de Pessegueiro, Pessegueirinho e Sanga do Inácio, com objetivo de utilizar duas formas para o cálculo do tempo de concentração e diferentes tipos de taxas de fator de pico, para observar a resposta hidrológica quando os parâmetros são alterados em razão das modificações trazidas pelos diferentes métodos de cálculo dos parâmetros. Assim, o modelo demonstrou os parâmetros mais sensíveis na produção das vazões de pico, subestimando e superestimando os dados simulados em comparação aos dados medidos.

No plano internacional, Unduche et al (2018) utilizaram quatro modelos hidrológicos, Watflood, Hbv-ec, HSPF e HEC-HMS, para simulação no padrão do uso da terra na bacia do Prairie, no Canadá. Os modelos foram calibrados com eventos entre os períodos 2005

a 2015 como ferramentas operacionais para previsão de inundação. O desempenho dos modelos foi avaliado pelos métodos estatísticos padrão: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, correlação coeficiente, erro médio quadrático, erro relativo absoluto médio e desvio dos volumes de escoamento. O modelo HEC-HMS apresentou um desempenho razoável para baixos e médios fluxos nos períodos de calibração e validação.

Koneti; Sunkara e Roy (2018) aplicaram o modelo HEC-HMS para analisar as mudanças no uso da terra que tiveram impacto direto na dinâmica do escoamento superficial entre os anos de 1985 e 2014, na bacia do rio Godavari. Verificou-se que o modelo HEC-HMS é compatível e funciona melhor para a modelagem chuva-vazão, pois leva em conta os vários parâmetros que influenciam o processo. O estudo indica que o desmatamento e expansões de terras agrícolas leva à diminuição na evapotranspiração e infiltração, com aumento no escoamento superficial.

Já Fang et al (2018) utilizaram o HEC-HMS na bacia do rio Qinhuai, na China, que apresenta problemas de controle das inundações. Foram simulados cinco cenários, futuro, atual e três cenários futuros tendenciais, de acordo com o padrão de urbanização existente na bacia. O modelo foi calibrado com oito eventos históricos de inundações e os hidrogramas gerados foram bastante próximos aos dados observados, com exceção apenas de um evento de cheia em que o HEC-HMS estimou o hidrograma de cheia três dias antes do evento observado. Assim, conclui-se que o modelo em questão apresentou resultados satisfatórios, sendo útil para simulação de eventos de cheias.

3.3.1.2. SWAT

O modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) foi elaborado na década de 1990 pelo Agricultural Research Service/ United States Department of Agriculture (ARS/ USDA) em parceria com a Texas A & M University (GUIMARÃES, 2016) e é classificado como um modelo semi-distribuído, contínuo, semi-conceitual e de base física, projetado para simular impactos de práticas agrícolas sobre o manejo do solo, transporte hidrológico de sedimentos e contaminantes, além de estimar vazões, em escala

de bacias, permitindo, também, simular diariamente os principais componentes do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica (DAHMI & PANDEY, 2013; PEREIRA et al, 2016; BLAINSKI et al, 2017; PIMENTEL, 2017; LI et al, 2018; VIANA et al, 2018).

O SWAT divide a bacia hidrográfica em sub-bacias que, por seu turno, são divididas em unidades de resposta hidrológica (HRU), que se caracterizam por serem pequenas unidades homogêneas nas quais o modelo discretiza a bacia, sendo os parâmetros de uso da terra, tipo de solo e declividade os mesmos dentro de uma HRU. O escoamento é estimado para cada HRU e extrapolado para se obter o escoamento total da bacia em análise, fato que aumenta a precisão e oferece uma melhor descrição física do equilíbrio hídrico (PIMENTEL, 2017). Além dos dados físicos e de vazão, o modelo requer dados meteorológicos como temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar (FUKUNAGA et al, 2015; PIMENTEL, 2017; TEIXEIRA, 2017). A fase terrestre do ciclo hidrológico simulada pelo SWAT é baseada na equação do balanço hídrico e escrita matematicamente como se segue abaixo (TEIXEIRA, 2017).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (Rd - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Onde,

SW_t = teor final de água no solo (mm H₂O);

SW_o = teor inicial de água no solo (mm H₂O);

T = tempo em dias;

Rd = precipitação no dia i;

Q_{surf} = escoamento superficial no dia i (mm H₂O);

Ea = evapotranspiração no dia i;

W_{seep} = quantidade de água entrando na zona vadosa a partir do perfil de solo (mm H₂O);

Q_{gw} = retorno do fluxo no dia i (mm H₂O).

O escoamento superficial no modelo pode ser obtido através de dois métodos, o Número da Curva (CN) ou através da Infiltração de Green-Ampt (TEIXEIRA, 2017; KATAOKA, 2017). O método CN, também desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos EUA, combina, através de uma equação (Equação SCS), grupos hidrológicos, características de uso e ocupação do solo e umidade antecedente do solo (TEIXEIRA, 2017; BASTOS, 2009). É um método bastante difundido, principalmente para situações onde há falta de dados hidrológicos das bacias hidrográficas, fato que retrata a realidade brasileira, de uma maneira geral, principalmente para pequenas e médias bacias.

A equação CN-SCS é um modelo empírico que estabelece relações de chuva-escoamento para pequenas bacias rurais, representada pela relação matemática abaixo

$$Q_{surf} = \frac{(Rd - Ia)^2}{(Rd - Ia + S)} \quad (02)$$

Onde,

Q_{surf} = escoamento acumulado (mm H₂O);

Rd = profundidade de precipitação para o dia (mm H₂O);

Ia = abstração inicial que inclui o armazenamento na superfície, interceptação e infiltração anterior ao escoamento (mm H₂O);

S = parâmetro de retenção (mm H₂O)

O parâmetro S varia, de acordo com Tucci (1997) e Teixeira (2017), especialmente devido às mudanças no solo, em razão do seu uso, declividade e retenção de água. Para obtenção do parâmetro S é utilizada a equação abaixo.

$$S = 25,4 \left(\frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (03)$$

O CN (Número da Curva) para o dia é um valor tabelado e varia conforme o tipo e uso do solo. O escoamento ocorre quando a precipitação R_d supera o valor de I_a . O CN varia de 0 a 100, sendo determinado pelo uso, grupo hidrológico, condições hidrológicas, manejo e umidade antecedente do solo. É um dos métodos mais difundido para cálculo de determinação do escoamento superficial em bacias hidrográficas (BALDISSERA, 2005; BOITHIAS et al, 2017; ALMEIDA, 2013; TEIXEIRA, 2017).

Diversas pesquisas são conduzidas tendo o modelo SWAT como metodologia para análises de processos hidrológicos. Almeida (2013) aplicou o SWAT para simulação preditiva de enchimento de barragem no rio Poxim Açú. O modelo mostrou-se satisfatório para modelação na produção de água e para simulação de comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica.

Paz et al (2018) aplicaram o SWAT na bacia do rio Goiana, em Pernambuco, com objetivo de calibração com base em nove estações pluviométricas. Verificou-se que o uso de dados observados de estações locais garantiu um maior número de estações satisfatoriamente calibradas. Os resultados obtidos demonstram que o SWAT é satisfatório para estimativas mensais de vazão, com boas previsões no exutório principal. Contudo, nas áreas mais secas da bacia os resultados foram insatisfatórios.

Bressiani (2016), objetivando estimar um índice de risco hidrológico, utilizou o SWAT na bacia do rio Piracicaba. Utilizando o SWAT-CUP para calibração, a autora trabalhou com modelagem sub-diária com módulo de calibração horária automática acoplado ao SWAT-CUP. O modelo se mostrou bastante robusto e com resultados satisfatórios, permitindo a previsão por conjunto de vazões em tempo real, com aplicabilidade em sistemas de alerta antecipado.

Boithias et al (2017), aplicou o SWAT em uma bacia costeira do Mediterrâneo (Sudoeste da França) numa análise comparativa com o modelo totalmente distribuído Marine, para as chamadas flash floods, ou inundações bruscas e repentinas. O SWAT demonstrou ser um modelo satisfatório na representação do pico de descarga, tempo de inundação e volume, com boa aplicabilidade em bacias propensas a inundações.

Li et al (2018) aplicaram o SWAT com objetivo de avaliar o desempenho do modelo na simulação de inundações em uma escala de tempo sub-diária para a bacia do rio Qilijie, localizado no sudeste da China e comparar os resultados com o modelo hidrológico Xin'anjiang (XAJ), modelo este mais popular na China. Os resultados demonstraram que o SWAT teve desempenho ruim na simulação sub-diária, porém apresentou bom desempenho na simulação do pico de fluxo, principalmente para fluxos altos.

Já Nguyen et al (2018) trouxeram um interessante estudo sobre a rotina de armazenamento de variáveis do SWAT. Tendo a bacia do rio Weser, localizado na Alemanha, como objeto de estudo, os autores afirmam que a sub-rotina de armazenamento de variáveis não transforma a onda de inundação. A sub-rotina de Muskingum do SWAT superestima a evaporação do canal (resultando em 14% a 19% streamflow) e subestima as perdas de transmissão. A correção da sub-rotina de Muskingum demonstrou que a forma da onda de inundação poderia ser melhorada.

3.3.2. Comparações entre Modelos Hidrológicos

O estudo de modelos de diferentes classes vem se mostrando um campo frutífero para pesquisas que objetivam estudar as respostas hidrológicas dos mesmos, buscando cenários mais fidedignos à realidade de uma bacia hidrográfica. A análise de modelos com diferentes níveis de discretização espacial, a exemplo dos modelos concentrado e semi-distribuído, promovem debates acerca da qualificação da informação hidrológica, uma vez que há o entendimento de que os modelos distribuídos são capazes de produzir

resultados com maior nível de precisão em relação aos modelos concentrados (NASCIMENTO et al, 2017).

Hamidon et al (2011), objetivando contribuir para a gestão integrada de bacias hidrográficas na Malásia enquanto uma política governamental orientada, realizaram um estudo comparativo entre os modelos HEC-HMS e SWAT na sub-bacia do Kurau, transformada em uma bacia experimental. Os modelos serviram de base analítica para se construir um cenário atual em relação à vazão e transporte de sedimentos, haja vista que esta bacia possuía informações mínimas e defasadas quanto à sua vazão. O HEC-HMS simulou uma vazão de 106,5 m³/s para uma vazão observada de 96,73 m³/s de um evento ocorrido em outubro de 1999, uma diferença de pouco mais de 10%, superestimando a vazão na bacia experimental. Já o SWAT simulou uma vazão de 84,76 m³/s, em comparação à vazão medida de 91,4 m³/s calibrada entre os anos de 1991 a 1993, com uma diferença de 7,3%. Os autores concluem que o HEC-HMS superestimou a vazão para um evento único, já o SWAT apresentou uma vazão simulada com um menor nível de erro.

Outros estudos realizados que se propuseram comparar modelos de distintas discretizações espaciais em suas análises, foi o estudo conduzido por Pereira et al (2016) que aplicou os modelos IPH II (concentrado) e SWAT (semi-distribuído) para simular vazões médias diárias na sub-bacia do rio Pomba, em Minas Gerais. O IPH II apresentou resultado bom e o SWAT um resultado satisfatório, sendo que este mostrou resultados diferentes dos observados no período de validação ao nível de 5% de significância pelo teste t pareado. Na análise comparativa, os autores concluíram que o modelo IPH II é mais confiável para simulação hidrológica.

Nascimento; Moura e Silva (2017) realizaram um estudo comparativo entre os modelos EPA-SWMM e o HEC-HMS na bacia do córrego Gorduras, na cidade de Belo Horizonte/MG, que é uma pequena bacia urbana monitorada. Os resultados demonstraram que o modelo EPA-SWMM requer maior nível de detalhamento da rede

de drenagem e espacialização da bacia, já o modelo HEC-HMS, com um mínimo de espacialização da informação, pode oferecer resultados confiáveis.

Khoi (2016) aplicou os modelos HEC-HMS e SWAT na bacia do rio Srepok, localizada no planalto central do Vietnã. A calibração foi realizada com dados hidrológicos entre os anos de 1981 e 2009. O modelo HEC-HMS apresentou um desempenho com NSE maior que 0,62 e R^2 maior que 0,65. Já o SWAT teve um desempenho com NSE maior que 0,72 e R^2 maior que 0,8. Assim, o autor concluiu que, diante dos dados espaciais, climáticos e hidrológicos disponíveis, o modelo SWAT apresentou um desempenho mais satisfatório aos objetivos desta pesquisa.

Estudos conduzidos por Tegegne; Park e Kim (2017), Alsafi; Sarukkalige e Kazemi (2019) e Yin et al (2018), também servem de base justificável para a presente pesquisa, que pretende analisar a resposta hidráulica em relação às inundações no rio Jucu Braço Sul, fornecendo como dados de entrada a vazão simulada através da análise comparativa entre dois modelos hidrológicos com discretizações espaciais opostas. Para cumprir este objetivo a presente pesquisa considera a modelagem hidráulica como ferramenta adequada e com ampla aceitação em diversos estudos de cheias urbanas.

3.4. MODELAGEM HIDRÁULICA E CRIAÇÃO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO

Os modelos hidráulicos, para Tucci (1998), são baseados nas equações da continuidade e de quantidade de movimento, fato que promove dois tipos de modelagem, uma com vazão constante e outra com vazão variável, podendo se apresentar como modelos do tipo 1D, 2D e 3D, sendo o modelo 1D (unidimensional) o mais comumente utilizado e de representação mais simples e, também, porque a dimensão predominante em sistemas fluviais é a longitudinal (LUZ, 2017; TENG et al, 2017; NASCIMENTO, 2017; RODRIGUES e CALIXTO, 2018).

Os modelos 1D resolvem as equações diferenciais assegurando a conservação da quantidade de movimento e de massa entre duas seções transversais. Estas equações são conhecidas como as Equações de Saint Venant, demonstradas abaixo (LUZ, 2017; ANDRADE, 2017).

Conservação da massa

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (04)$$

Conservação da quantidade de movimento

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q^2}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (05)$$

Sendo $Q = u \cdot A$

Onde, u é velocidade média na seção (m/s), A é área da seção (m²), t é o tempo (s), h é a profundidade da água (m), g é a aceleração da gravidade (m/s²), S_f representa a declividade da linha de energia (m/m) e S_0 a declividade do canal (m/m).

A equação do momento representa as forças atuantes no corpo d'água, tais como a força gravitacional, pressão, atrito, produto da massa do fluido e aceleração. Já a equação da continuidade representa a conservação da massa de água que entra e sai do sistema, relacionando a vazão afluyente e efluyente ao canal e a quantidade armazenada em um intervalo de tempo determinado (GRIBBIN, 2014; ANDRADE, 2017).

3.4.1. Classificação dos Escoamentos

A determinação do tipo de escoamento é etapa fundamental para modelação hidráulica em sistemas de canais abertos (rios, córregos). Podem ser classificados devido a direção do fluxo que se relaciona diretamente com as propriedades hidráulicas como pressão, velocidade e massa específica presentes na corrente de fluxo. Se a propriedade é observada em uma única direção, diz que o escoamento é unidimensional. Bidimensionais e tridimensionais, quando as partículas escoam em planos paralelos segundo trajetórias idênticas (ANDRADE, 2017; GRACIOSA, 2010).

O escoamento pode ser do tipo permanente ou não permanente. Um escoamento permanente é quando não há variação temporal das propriedades hidráulicas ao longo das seções dos rios. Já o escoamento não-permanente admite tal variação. É válido salientar que tal comportamento de não variação das propriedades hidráulicas é praticamente inexistente em rios, salvo exceções de escoamento de base. O escoamento permanente é observado facilmente em volumes de controle, sendo o escoamento não-permanente o mais observável em canais fluviais (ANDRADE, 2017; GRACIOSA, 2010; NASCIMENTO, 2017).

O escoamento também pode ser classificado em uniforme e não-uniforme. Um escoamento uniforme é aquele que o vetor velocidade, em módulo, direção e sentido, é idêntico em todos os pontos de observação. Quando há variação, diz ser um movimento não-uniforme (ANDRADE, 2017; NASCIMENTO, 2017).

Por fim, o escoamento pode ser classificado em subcrítico e supercrítico. Quando a profundidade do canal é grande, a velocidade tende a ser pequena, fato que caracteriza um escoamento subcrítico. Já um canal que apresenta pequena profundidade e alta velocidade é classificado como escoamento supercrítico (ANDRADE, 2017; NASCIMENTO, 2017).

3.4.1.1. Propagação da onda de cheia

O escoamento de um evento de precipitação a segue direção jusante, denominado onda de cheia. Em seu deslocamento à jusante, a altura da onda de cheia diminui e ela tende a se espalhar. A redução na altura da onda de cheia é chamada de atenuação, cujo procedimento para calcular denomina-se propagação (ANDRADE, 2017).

O Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos desenvolveu um procedimento para estimativa da propagação da onda de cheia que, atualmente, é um método universal para esta finalidade, denominado Método de Muskingum. Este método determina a velocidade de propagação do escoamento de rios e córregos, baseado na combinação da conservação de massa (ANDRADE, 2017; RODRIGUES e CALIXTO, 2018).

O modelo de Muskingum, embora bastante difundido, inclui parâmetros bastante difíceis de estimar. Assim, foi elaborada uma extensão deste modelo, denominada Muskingum-Cunge, que supera esta dificuldade apontada, uma vez que não requer dados hidrológicos para sua calibração (ANDRADE, 2017; TOMAZ, 2008).

Os dados requeridos para o modelo Muskingum-Cunge são a inclinação, largura, seção transversal do canal e influxo a montante que, normalmente, é obtido por simulação hidrológica como condição de contorno do modelo (ANDRADE, 2017; TOMAZ, 2008). As perdas de energia do escoamento são influenciadas pelo coeficiente de Manning (n).

3.4.1.2. Número de Manning

Em análises sobre cheias em bacias hidrográficas, o escoamento é dependente da declividade da bacia, da rede de drenagem e da cobertura vegetal, sendo a construção da

geometria dos canais o início de toda a modelagem hidráulica. Todavia, o modelo hidráulico é dependente, principalmente, do coeficiente de rugosidade de Manning, que reflete a resistência da passagem da água, ou seja, o seu escoamento, pelo tipo de superfície de um canal e do solo componente de uma bacia hidrográfica (SILVA, 2015; GRACIOSA, 2010).

O número n de Manning é um dos principais parâmetros de um modelo hidráulico, possuindo alta variabilidade em função do tipo de vegetação, tamanho e forma do canal, erosão, vazões, deposições, temperatura e concentração de sólidos em suspensão. O manual de utilização do HEC-RAS traz consigo valores diversos para variadas situações referentes ao número de Manning (USACE, 2016).

O coeficiente de Manning estima a resistência ao fluxo durante um percurso hidráulico, sendo n um número empírico que depende das características físicas da área por onde ocorre o percurso hidráulico, principalmente o tipo de revestimento do leito do canal fluvial e a cobertura de suas margens (ANDRADE, 2017; GRIBBIN, 2014). Alguns fatores, de acordo com Andrade (2017) e USACE (2016) podem influenciar o número de Manning, a saber:

- Tamanho e forma dos grãos do material que reveste o perímetro molhado;
- Obstruções nos canais;
- Tipo de vegetação;
- Irregularidades do canal, em seu formato;
- Assoreamento e expurgo.

Em situações de cheias, pode haver o transbordamento da calha principal e o fluxo se dará nas planícies de inundação que, comparativamente, possuem o número de Manning maior

do que os canais de drenagem, fato que deve ser considerado durante a etapa da modelagem no programa escolhido (ANDRADE, 2017).

3.4.2. Modelo HEC-RAS

Atualmente, o modelo HEC-RAS é amplamente utilizado em pesquisas que se dedicam à predição de eventos críticos relacionados às cheias em bacias. Este programa permite a modelagem de escoamento unidimensional em regime perene e transitório. Além da modelagem do fluxo de vazão, o HEC-RAS permite a análise de transporte de sedimentos, de leito móvel e de temperatura da água (COUTINHO, 2015; RIBEIRO e LIMA, 2011; LUZ, 2017).

O HEC-RAS possui a funcionalidade de resolução das equações completas de Saint Venant, utilizando o método das diferenças finitas para simulação em regime de escoamento não-permanente (USACE, 2016; WINTER, 2018).

A aplicação do modelo HEC-RAS pode ser observada em estudo conduzido por Napay e Luyun Jr (2018) que aplicaram o modelo para simular o risco de inundação na bacia do rio Quinali A, nas Filipinas. Os dados de entrada de vazão no modelo hidráulico foram obtidos através da modelagem hidrológica pelo HEC-HMS. Os períodos de recorrência foram estabelecidos em 5, 10, 25, 50 e 100 anos, gerando mapa de risco da planície de inundação, através das manchas de inundação, obtidas com o uso de SIG.

Khadka e Bhaukajee (2018) aplicaram o HEC-RAS em associação ao HEC-HMS para a bacia do rio Kankai, no Nepal e na bacia do rio Kävlinge, na Suécia, com objetivo de análise comparativa dos efeitos da chuva no escoamento superficial e as descargas de pico desses rios que, em última análise, produzem níveis de inundação de cheias permitindo avaliar os riscos de inundação em ambas as áreas.

Thakur et al (2017) utilizaram o HEC-RAS para determinar a extensão da planície de inundação da área de estudo Cobre Slough Watershed (CSW) em Champaign, Illinois, com dados de vazão obtidos através do HEC-HMS. O estudo se justifica pelas mudanças observadas no padrão de uso do solo na bacia, fato que tornou os eventos de inundações recorrentes na área. Os mapas de inundação se destinaram a alimentar o sistema de alerta a eventos de inundação na bacia.

Luz; Chaffe e Speckhann (2017) utilizaram o modelo HEC-RAS na bacia hidrográfica do rio Cubatão Sul, a fim de identificar e delimitar as áreas suscetíveis ao risco de inundação. A modelagem hidráulica empregada foi do tipo 1D, com a inserção dos hidrogramas de cheias para períodos de retorno de 20, 50 e 100 anos e seções transversais extraídas do modelo digital de elevação.

Farina et al (2018) aplicaram o modelo HEC-RAS no município de São Lourenço do Sul, em Rio Grande do Sul, com objetivo de identificar e mapear as áreas sujeitas a alagamentos, com previsibilidade futura, tendo por base uma chuva intensa centenária. Assim, construíram-se manchas de inundações para eventos futuros, subsidiando o planejamento urbano do município através da definição de áreas de risco que não poderão ser ocupadas ou, se forem, deverão ter usos restritivos.

Namba et al. (2018) utilizaram o HEC-RAS nos córregos Mandacaru e Maringá, localizados na cidade de Maringá, objetivando identificar e mapear pontos de risco de inundação. A partir de hidrogramas de cheias obtidos pelo HEC-HMS e informações de seções transversais fornecidas pelo Arcgis, a modelagem hidráulica identificou doze pontos de inundações ao longo dos dois córregos modelados.

Coutinho (2015), Neto et al (2015); Luz (2017), Santillan et al (2012), Parsa et al (2013), Rivera (2007), Zeleňáková et al (2018), Abdulrazzak et al (2019), Marko et al (2018) e Nascimento (2017) também desenvolveram pesquisas aplicadas a problemas de cheias urbanas com intuito de delimitar manchas de inundação.

3.4.3. Manchas de Inundação

A determinação de manchas de inundação é a premissa para elaboração dos mapas de riscos hidrológicos. É, portanto, uma ação bastante importante e que traz contribuições técnicas aos processos de planejamento urbano e ordenamento do território (REZENDE, 2012; SILVA, 2016). Ultrapassando a escala hidrográfica, a determinação das manchas de inundação possibilita planejar o território na escala da bacia, direcionando o uso de áreas sujeitas a inundações, limitando e restringindo os seus usos (SILVA, 2006). De acordo com Figueiredo (2003), o mapeamento de áreas inundáveis

[...] representa uma ferramenta importante para o direcionamento das expansões urbanas e a ordenação do uso e ocupação do solo, pois se dispondo do zoneamento dessas áreas, pode-se delimitá-las e designá-las para usos adequados (FIGUEIREDO, 2003, p.1791).

A construção das manchas de inundação é possível com o uso associado entre técnicas de geoprocessamento e modelagem hidrológica e hidráulica, sendo que as modelagens hidrológicas são incorporadas ao estudo em razão da necessidade de se determinar a vazão de entrada aos modelos hidráulicos, os quais predizem as alturas e perfis de velocidade da lamina d'água com períodos de recorrência excedidos (SILVA, 2006; REZENDE, 2012).

Mapas de manchas de inundação são importantes para a gestão de riscos de cheias, uma vez que os mapas de risco são ou deveriam ser oriundos de uma construção orientada pelas manchas de inundação e não apenas mapas temáticos que refletem a espacialização das ocorrências históricas de cheias (SILVA, 2016).

Para além dos registros históricos, os mapas de risco devem considerar as manchas de inundação elaboradas para diferentes períodos de recorrência, abordando a extensão e profundidade da inundação. Tais informações, aliadas ao quantitativo de moradores residentes numa localidade e ao grau de exposição dos mesmos ao perigo de cheias, configuram o risco hidrológico propriamente dito (SILVA, 2016).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos todos os procedimentos relacionados aos métodos de modelagem hidrológica e hidráulica para sistemas fluviais, cujo prisma metodológico volta-se à análise da resposta hidráulica em trecho urbano do rio Jucu Braço Sul com uso de dois modelos hidrológicos de diferentes discretizações espaciais (concentrado e semi-distribuído), considerados para simulações das vazões de pico, como caminho adotado aos objetivos propostos.

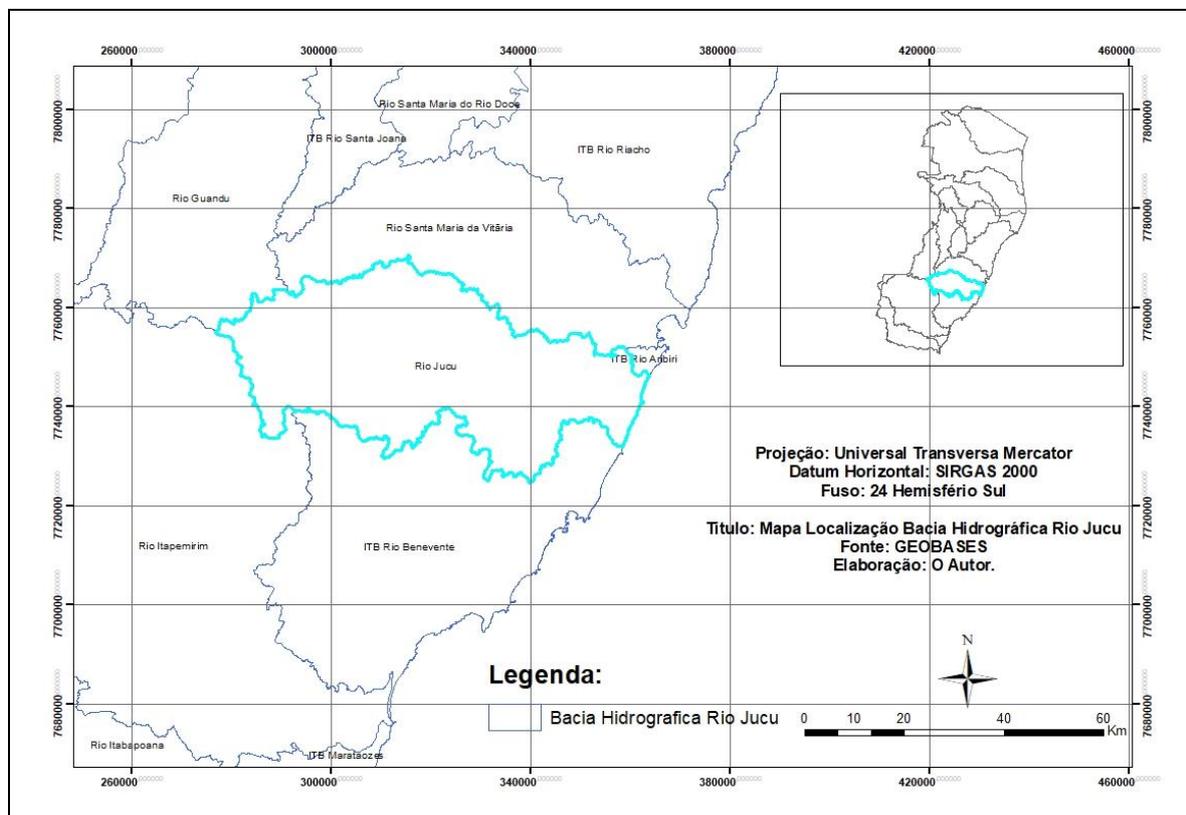
A adoção da bacia hidrográfica do rio Jucu Braço Sul ocorreu pelo fato de que, em nível estadual, é uma bacia com estudos pontuais do ponto de vista dos impactos e previsão das cheias mediante o uso da modelagem hidráulica. Outro fato é que se trata de uma bacia cuja área urbana apresenta problemas de inundações (Ver anexos B) em razão de suas respostas rápidas às chuvas intensas e à pequena capacidade de condutância dos seus canais fluviais, principalmente nas porções menos inclinadas do núcleo urbano, representando a realidade brasileira da maioria dos casos de cheias urbanas, o que vai ao encontro da aderência metodológica proposta, isto é, ser um estudo que possibilite um caminho metodológico para bacias de pequeno e médio porte e com séries históricas de vazão e/ou precipitação incompletas ou inexistentes, independentemente do local aonde se situa a bacia hidrográfica em estudo.

Por último, a aderência metodológica encontra abrigo no fato de que o relevo é fator limitante para respostas hidráulicas, mesmo com vazões bastante discrepantes, ou seja, regiões com relevos acidentados, com vales encaixados, apresentam pouca variação na elevação do nível d'água e na extensão da mancha de inundação, ao passo que aquelas com relevos menos ondulados são propícias a grandes alterações na mancha de inundação face a pequenas alterações na altura da lâmina d'água.

4.1. ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Jucu (UTM: 7770611/ 7724726 Ne 276767/ 360808 E) é estadual, com ottocodificação n° 7714, cuja nascente localiza-se no município de Domingos Martins (ES), localizado na região serrana do estado do Espírito Santo, desaguardo no Oceano Atlântico, na localidade de Barra do Jucu, pertencente ao município de Vila Velha/ES. A bacia abrange os municípios de Domingos Martins, Marechal Floriano, Cariacica, Viana, Vila Velha e Guarapari, conforme pode ser visualizado na figura 04 (DEINA, 2013).

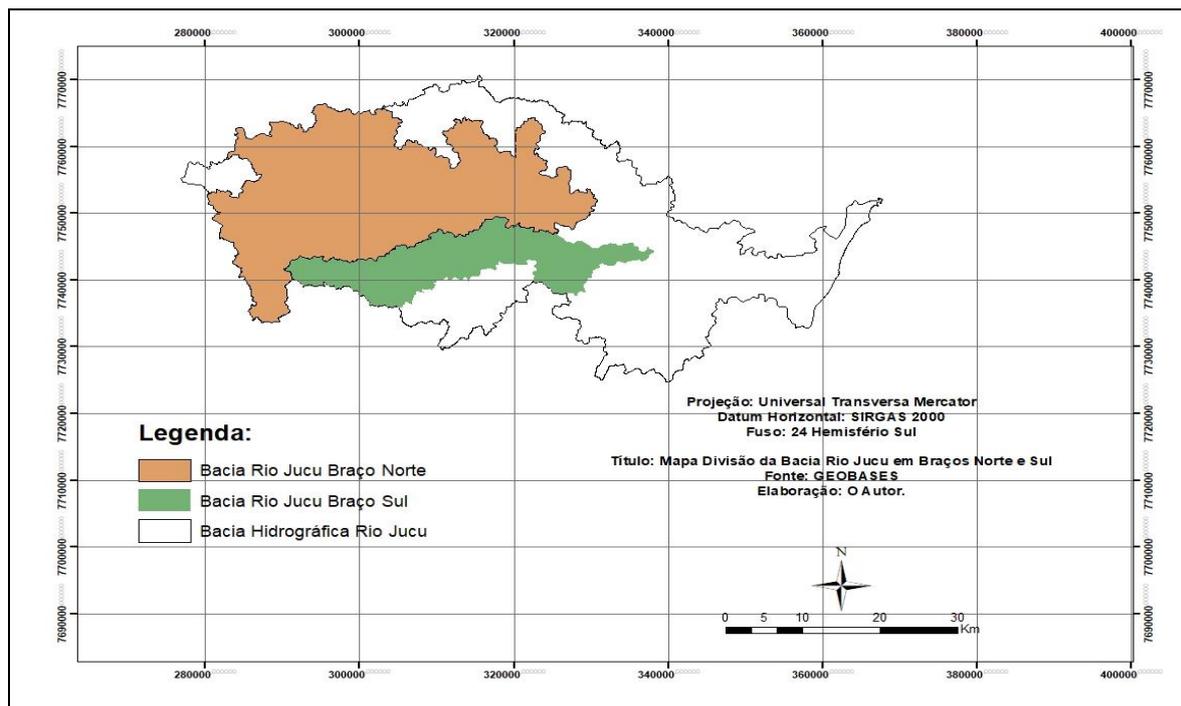
Figura 04. Localização da bacia do rio Jucu



Fonte: O autor.

A bacia do rio Jucu Braço Sul é um sistema fluvial integrante de uma bacia maior, denominada bacia hidrográfica do rio Jucu (BHRJ). Esta diferenciação ocorre pelo fato de que esta bacia é composta por dois braços, denominados Braço Sul e Braço Norte (Figura 05) que, à jusante, se unem, formando o rio Jucu (TERRA et al, 2009).

Figura 05. Divisão do Rio Jucu em Braço Norte e Sul



Fonte: O autor.

Os limites da bacia do rio Jucu são: a leste, a baía de Vitória; ao sul, as bacias dos rios Beneventes e Guarapari; ao norte, bacia do rio Santa Maria e a sudoeste, a bacia do rio Itapemirim, drenando uma superfície de 2.014 km² com extensão de seus cursos d'água de aproximadamente 5.130 km e densidade de drenagem de 2,45 km/km², considerada uma alta densidade de drenagem (DEINA, 2013; VIANA et al, 2017).

Como já dito anteriormente, o rio Jucu se divide em dois braços. O braço norte, que é a calha principal, nasce no município de Domingos Martins, na Serra do Castelo, ao sul do povoado de São Paulinho, a 1.200 m de altitude, próximo ao Parque Estadual de Pedra

Azul, com extensão aproximada de 168 km até a desembocadura na Barra do Jucu. Os principais córregos são Barcelos, Ponte, Melgaço, D'antas, Jacarandá, Ribeirão, Tijuco Preto, Biriricas, Santo Agostinho e Congo (DEINA, 2013; TERRA et al, 2009).

Já o Jucu Braço Sul, área de estudo, é formado pelo encontro entre os córregos São Floriano e Cavalos, na localidade de São Floriano, pertencente ao município de Marechal Floriano. No rio Jucu Braço Sul há presença de área urbana, uma vez que o mesmo corta a sede municipal de Marechal Floriano. O braço sul chega à sede urbana drenando uma área aproximada de 320,4 km², o que corresponde a 82,3% da área total de drenagem do mesmo (AVANTEC, 2013).

Além dos córregos São Floriano e Cavalos, outro importante afluente à montante do rio Jucu Braço Sul é o córrego rio Fundo, com bacia de drenagem de 115,5 Km², correspondendo a 36% da área drenada, com afluência localizada imediatamente a montante da sede municipal de Marechal Floriano. O rio Jucu Braço Sul em seu trecho urbano, juntamente com outros tributários, corta os bairros Ponto Frio, Jarbinhas, Centro e Vale das Palmas (AVANTEC, 2013). Seguem imagens para visualização do rio Jucu Braço Sul em seu trecho urbano (Figuras 06 e 07).

Figura 06. Rio Jucu Braço Sul no início da área urbana de Marechal Floriano.



Fonte: O autor.

Figura 07. Rio Jucu Braço Sul na área urbana de Marechal Floriano.



Fonte: O autor.

A geologia da bacia do rio Jucu Braço Sul é formada por um complexo de larga escala existente em toda a região serrana do estado do Espírito Santo, formado por rochas do Pré-Cambriano que representam o Complexo Paraíba do Sul, abrangendo desde o extremo oeste do município de Domingos Martins até áreas limítrofes ao litoral (DEINA, 2013). Sobre essas antigas rochas, desenvolveram-se relevos com forte inclinação que, de acordo com a classificação proposta pela EMBRAPA³, estão distribuídos em relevos planos, suave ondulado, ondulado, forte ondulado, montanhoso e escarpado. A Tabela 01

³ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

apresenta a distribuição de cada tipo de relevo existente na bacia do Jucu Braço Sul (DEINA, 2013; EMBRAPA, 2006).

Tabela 01. Distribuição espacial dos tipos de relevo na bacia do rio Jucu Braço Sul

Tipo de relevo	Distribuição na bacia
Plano/ suave ondulado	16,32%
Ondulado	52,20%
Forte ondulado	25,83%
Montanhoso	4,88%
Escarpado	0,77%

Fonte: O autor.

As classes de solos predominantes na bacia do rio Jucu Braço Sul são o Cambissolo Háplico e o Latossolo Vermelho-Amarelo, além de uma pequena cobertura de afloramento rochoso na parte mais íngreme da bacia. O Cambissolo Háplico é um solo pouco desenvolvido, com horizonte B incipiente. Constitui um solo distrófico, cuja fertilidade é média ou baixa, textura argilosa e média e ocorre em relevo montanhoso e forte ondulado (EMBRAPA, 2006). Já o Latossolo Vermelho-Amarelo abrange praticamente toda a bacia, sendo mais representativo no Braço Sul também. Trata-se de um solo formado por material mineral, com horizonte B latossólico, em avançado estágio de intemperização. É bastante evoluído devido ao resultado de transformações no material de formação. Pode ser originado a partir de variados tipos de rochas e na bacia em estudo, distribui-se por relevos ondulados, planos e montanhosos (EMBRAPA, 2006).

Predomina na bacia do rio Jucu Braço Sul o clima Tropical de Altitude (mesotérmico), de acordo com a classificação de Köppen, com temperaturas amenas durante estação quente e com reduções consideráveis na temperatura durante o inverno. Em razão do relevo acidentado, há grande acúmulo de precipitação do tipo orográfica na parte central da bacia, fato que provoca acumulados pluviométricos acima de 1.500 mm/ano (DEINA, 2013).

As características do clima local promovem um regime hidrológico fluvial perene, uma vez que acompanha a pluviosidade da bacia. As maiores vazões são observadas entre os meses de novembro e abril, sendo o mês de janeiro, historicamente, com registro das maiores vazões, em média 40,86 m³/s, ao passo que, entre os meses de maio e outubro,

são registradas as menores vazões, acompanhando a redução nas precipitações, sendo o mês de agosto com registro das menores vazões com média de 16,03 m³/s (DEINA, 2013).

Predominam como uso do solo no Jucu Braço Sul atividades agrícolas como plantio de café, cana-de-açúcar, banana e eucalipto, além da pecuária e atividades hortifrutigranjeiras. As maiores coberturas florestais encontram-se nos topos de morros. Nas áreas mais planas da bacia, desenvolvem-se as atividades econômicas e de ocupação residencial, representada pela existência do núcleo urbano de Marechal Floriano.

O rio Jucu Braço Sul percorre no trecho urbano de Marechal Floriano, uma extensão aproximada de 2,5 km, com declividades bastante reduzidas, da ordem de 0,0012 m/m. Grande parte do trecho urbano de Marechal Floriano se desenvolveu sob áreas de antigos meandros abandonados da planície de inundação, com cotas altimétricas muito baixas, fato que provoca o transbordamento de água nas áreas dos antigos meandros (AVANTEC, 2013).

4.2. DADOS DE ENTRADA NOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Para o desenvolvimento das simulações hidrológicas com os modelos HEC-HMS e SWAT são requeridos dados fisiográficos, que compreendem informações sobre topografia e modelo digital de elevação (MDE), tipo e uso do solo, dados de precipitação e vazão, informações sobre o clima da região (vento, umidade relativa, temperatura máxima e mínima e radiação solar); além de parâmetros hidrológicos, como o tempo de concentração, coeficiente de armazenamento e a curva número (CN) da bacia em estudo.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia do rio Jucu Braço Sul utilizado no presente estudo é proveniente do banco de dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e possui resolução de 30 metros. Essa informação foi obtida acessando o sítio eletrônico oficial do programa [www.https://earthdata.nasa.gov/](http://www.earthdata.nasa.gov/) e selecionando o quadrante no qual a bacia está inserida (quadrante S21W041). Após a aquisição do MDE

deste quadrante, a imagem foi trabalhada em ambiente computacional (Arcgis 10.3) onde foi ajustada e passou por tratamento, extraindo o MDE do rio Jucu Braço Sul (Figura 08).

Os dados de hidrografia, pedologia, uso e ocupação do solo, otobacias codificadas, limite municipal e mancha urbana foram extraídos do sítio eletrônico oficial do GEOBASES, em levantamento dos anos 2007-2008, a fim de serem trabalhados em ambiente SIG para delimitar a bacia do rio Jucu Braço Sul.

A série histórica de precipitação foi obtida através da estação pluviométrica existente no núcleo urbano de Marechal Floriano, denominada estação pluviométrica Marechal Floriano (2040012), cujos dados foram apropriados através do banco de dados do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA), especificamente pelo sistema Hidroweb, de domínio público. A série temporal foi escolhida com tamanho de 10 anos hidrológicos (1979-1988) para fins de calibração dos modelos.

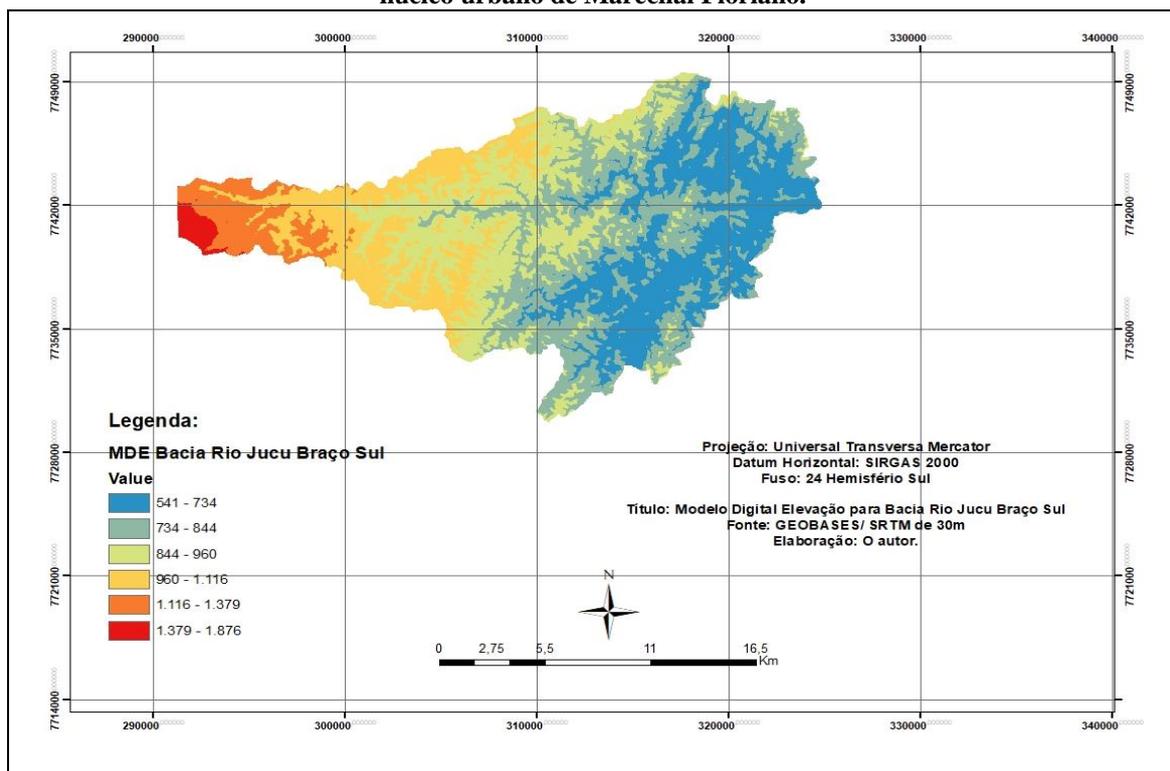
A estação fluviométrica utilizada na presente pesquisa situada no interior da bacia teve seus dados apropriados, também, através do sistema Hidroweb. Esta estação fluviométrica Marechal Floriano (57190000), tal qual a estação pluviométrica (Figura 09), localiza-se na entrada do município de Marechal Floriano, sendo uma estação convencional, atualmente desativada. Portanto, as informações completas de vazões disponíveis são até o ano de 1988, uma vez que as medições foram encerradas em 1990. Os dados de vazão também foram considerados para o intervalo temporal 1979-1988. Existem duas estações fluviométricas a jusante, porém, uma estação fluviométrica é apenas de qualidade da água e a outra (Estação Jucu Barramento) não possui dados disponíveis no hidroweb.

Por fim, a apropriação de dados climáticos ocorreu acessando o sítio eletrônico <https://globalweather.tamu.edu>, que permitiu o acesso a dados de estações climáticas para a área em estudo. Assim, foi selecionada a estação climática 205-409 (-20, 45/ -40,93) com intervalo temporal de dados pré-selecionado. Foram apropriadas informações sobre umidade relativa, temperatura máxima e mínima, radiação solar e vento. Essas

informações são requeridas especificamente pelo programa SWAT. Os dados de chuvas inseridos para o balanço hídrico que o modelo SWAT realiza foram utilizados da estação pluviométrica Marechal Floriano (2040012), qualificando a análise comparativa de ambos modelos hidrológicos.

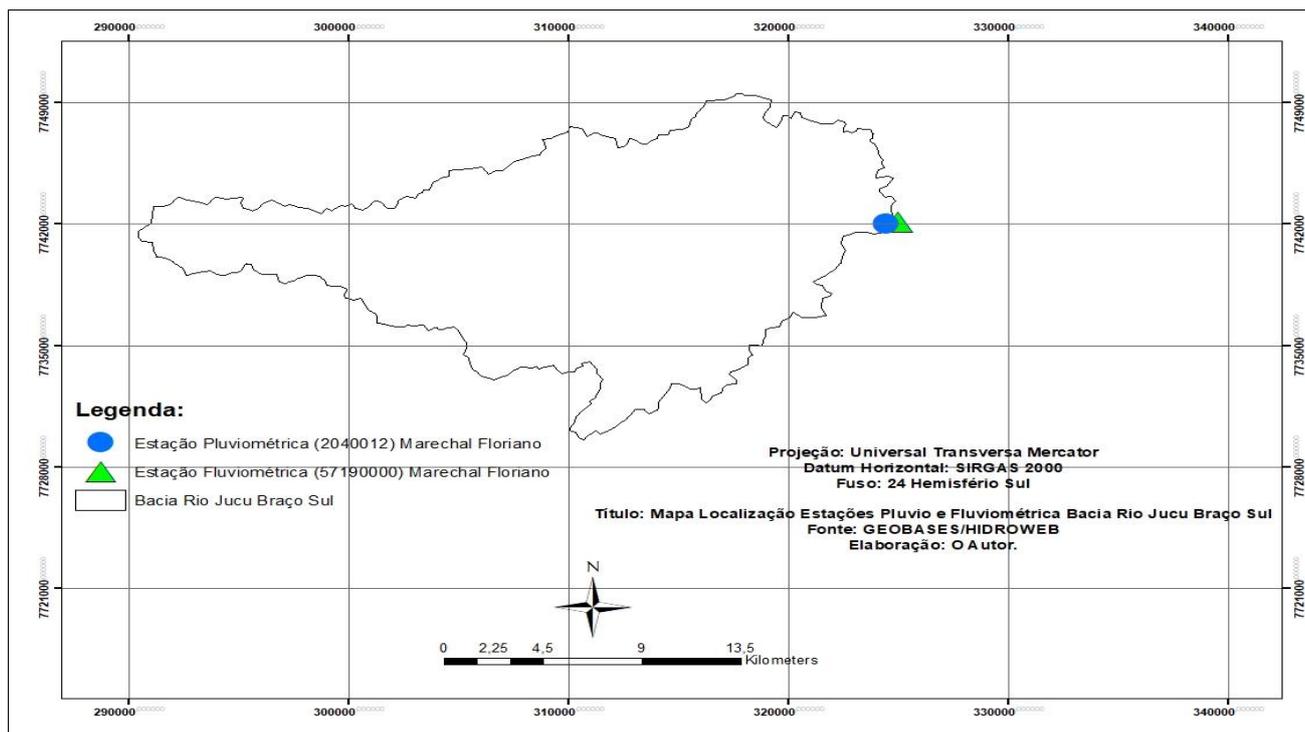
Com todos os dados hidrológicos e de topografia reunidos, passou-se ao tratamento e processamento dos mesmos através do software de geoprocessamento e planilha eletrônica, possibilitando gerar dados de entrada compatíveis para os modelos hidrológicos selecionados. A aquisição dos parâmetros hidrológicos, de tipo e uso dos solos e delimitação da bacia será discutida nos itens que se seguem.

Figura 08. Mapa do Modelo Digital de Elevação da Bacia do Rio Jucu Braço Sul, desconsiderando o núcleo urbano de Marechal Floriano.



Fonte: O autor.

Figura 09. Mapa de localização das estações fluviométrica (57190000) e pluviométrica (2040012) Marechal Floriano na Bacia do Rio Jucu Braço Sul



Fonte: O autor.

4.3. PARÂMETROS HIDROLÓGICOS E DE TIPOS E USOS DE SOLOS PARA AS SIMULAÇÕES

A modelagem hidrológica foi realizada para a bacia do rio Jucu Braço Sul até no ponto de entrada da cidade de Marechal Floriano, com objetivo de simular as vazões que chegam ao núcleo urbano, perfazendo uma área aproximada de 310 km². Toda a área da referida bacia hidrográfica teve suas vazões simuladas através do método de transformação chuva x vazão com o uso dos dois modelos, HEC-HMS e SWAT. Os procedimentos metodológicos para a elaboração das simulações e obtenção das vazões anuais e máximas anuais de 1 dia foram os seguintes: tempo de concentração, coeficiente de armazenamento, curva número (CN) e apropriação dos mapas de solos e de uso e ocupação da terra.

4.3.1. Tempo de Concentração (T_c)

Tempo de concentração é considerado o tempo para que toda a bacia passe a contribuir com fluxo em determinada seção do rio (AVANTEC, 2013; SOUZA, 2017). A compreensão do tempo de concentração e seu significado em termos de produção de vazões são essenciais para o entendimento da dinâmica das inundações, uma vez que uma chuva muito longa produz pouca intensidade, pois o tempo de concentração é espaçado. Quando a chuva possui a mesma duração que o tempo de concentração de uma bacia têm-se eventos de inundações mais severos. Já as chuvas com duração menor que o tempo de concentração possui o significado hidrológico de que nem todas as porções da bacia estão contribuindo para o fluxo de água (AVANTEC, 2013).

As equações para estimativa do tempo de concentração são escolhidas de acordo com as características físicas da bacia em estudo, como área, comprimento do talvegue, rugosidade e declividade do canal (SOUZA, 2017). Para a realização do presente estudo utilizaram-se os métodos de Temez, Giandotti e Doodge e o tempo de concentração considerado para a bacia foi a média aritmética dos resultados dos três citados métodos. Cumpre ressaltar que a escolha dos três métodos se deu em razão de terem sido elaborados para tamanhos de bacias compatíveis com a bacia objeto de estudo, conforme pode ser observado pela tabela abaixo (Quadro 01).

Quadro 01. Relação entre equações de tempo de concentração e área das bacias hidrográficas

Tamanho da bacia	Métodos
< 1km ²	Kirpich, Califórnia CulvertsPractice
Entre 1 e 10 km ²	Vente Chow, Williams, IPH II
Entre 10 e 30 km ²	Vente Chow, Williams, IPH II
Entre 30 e 100 km ²	Willians e IPH II
>100 km ²	Temez, Dooge, Giandotti

Fonte: Dados organizados pelo autor.

A equação de Temez é descrita matematicamente como:

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{I^{0,25}}\right)^{0,76} \quad (06)$$

Onde T_c representa o tempo de concentração em horas, L o comprimento do talvegue principal em km e I a declividade média equivalente em m/m.

A equação de Doodge foi elaborada para bacias rurais da Irlanda com áreas entre 140 e 930 km², sendo bastante representativa das condições de escoamento em canais. Sua formulação pode ser representada da seguinte maneira:

$$T_c = 21,88A^{0,41} \cdot I^{-0,17} \quad (07)$$

Onde T_c é o tempo de concentração em minutos, A representa a área da bacia em km² e I a declividade do talvegue em m/m.

Por fim, a equação de Giandotti foi originalmente preconizada para a regulação de pequenas barragens em Portugal, comumente utilizada para bacias com áreas superiores a 300 km², podendo ser descrita da seguinte forma:

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{H}} \quad (08)$$

Onde T_c representa o tempo de concentração em horas, A é a área da bacia em km², L o comprimento do talvegue em km e H a diferença altimétrica da bacia em metros.

4.3.2. Coeficiente de Armazenamento

O coeficiente de armazenamento responde pelos efeitos de armazenamento, podendo ser definida como o resultado do quociente entre a soma do tempo de concentração e do coeficiente de armazenamento (USACE, 2010). Em outras palavras, é o tempo de armazenamento temporário da precipitação excedida que vai diretamente ao exutório da bacia ou de algum ponto de controle (CANAL, 2011). O coeficiente de armazenamento foi calculado como sendo 60% do valor do tempo de concentração (LAZZARI et al, 2019; MISSIAGGIA et al, 2017; TOMAZ, 2016).

4.3.3. Apropriação das Vazões Máximas

As vazões da bacia do rio Jucu Braço Sul foram apropriadas pelo método chuva x vazão, que determina a vazão em uma seção a partir de dados pré-estabelecidos como os tipos de solo, uso e ocupação da área, tempo de concentração, coeficiente de armazenamento e número da curva, bem como série histórica de chuva e vazão observadas.

Este método é adotado pelos modelos HEC-HMS e SWAT, ajustados para calcular a chuva excedente e os hidrogramas. Desta maneira, foi inserida nos modelos citados a série histórica diária de chuva com tamanho de 10 anos (1979-1988), produzindo vazões diárias para igual período, fato que possibilitou calibrar os modelos, uma vez que há dados de vazão para este intervalo temporal. Em prosseguimento, com os modelos calibrados, foi inserida série histórica de precipitação com tamanho de 30 anos (1989-2018), em rotina diária, onde foi possível simular as vazões para este período.

De posse das vazões simuladas, selecionou-se a maior vazão observada para cada ano hidrológico. Essas informações foram inseridas no programa computacional de análise hidrológica SisCAH 1.0⁴ que, de maneira automatizada, forneceu as vazões máximas para a série de 30 anos, com análise estatística e considerando os períodos de retorno

⁴ SisCAH 1.0 é um programa computacional de análise hidrológica desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa.

escolhidos em 10, 50 e 100 anos. Cumpre ressaltar que a inserção de dados de vazão simuladas para o intervalo 1989-2018 se deu para os dois modelos hidrológicos (HEC-HMS e SWAT), apropriando-se, assim, de vazões máximas diferentes para cada intervalo de período de recorrência.

4.3.4. Curva Número (CN)

A aplicação do método do número da curva (CN-SCS) objetiva determinar o escoamento superficial, ou seja, todo o excesso pluviométrico que não foi infiltrado ou evaporado através dos processos hídricos do ciclo hidrológico. É um número que varia de 0 a 100, representando a capacidade de infiltração de uma área em razão das características de formação do solo, dos usos da terra e das condições de umidade (SOUZA, 2017).

O parâmetro CN foi determinado com base no cruzamento dos mapas pedológico e de uso e ocupação do solo. Para cada categoria existente no mapa de uso e ocupação do solo, foi estipulado um valor ao coeficiente CN, com base no grupo hidrológico ao qual o solo se enquadra. Foi considerada a condição de antecedência II de saturação do solo para cálculo do CN, conforme orienta o manual técnico do HEC-HMS (USACE, 2010). O quadro 02 retrata os grupos hidrológicos de solos e o quadro 03 o tipo de uso e ocupação do solo.

Grupo de Solo	Características	Tipos de solos que se enquadram
A	<p>Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); Solos de textura média; Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macro porosidade em todo o perfil; Solos bem drenados ou excessivamente drenados; Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa</p>	<p>LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macro porosidade;</p> <p>LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.</p>
B	<p>Solos profundos (100 a 200 cm); Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macro porosidade em todo o perfil; Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.</p>	<p>LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa;</p> <p>LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.</p>
C	<p>Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.</p>	<p>ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta;</p> <p>CAMBISSOLO de textura média e CAMBIS-SOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.</p>
D	<p>Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; Solos rasos (prof. < 50 cm); Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta) Solos orgânicos.</p>	<p>NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA;</p> <p>Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C;</p> <p>ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.</p>

Fonte: Sartori et al (2005).

Quadro 03. Valores do CN do SCS considerando a condição II de umidade em função do tipo e uso do solo.

Uso do solo	Superfície do Solo	Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Esparsas	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras e estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más condições	72	82	87	89
	De superfície compactada	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76
Zonas Cultivadas	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições de		68	79	86	89
Baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim		45	66	77	83
Floresta: cobertura boa		25	55	70	77

Continua...

.... Continuação

Uso do solo	Superfície do Solo	Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, em boas condições	Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	Com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
Lotes (m ²)	% média impermeável				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamentos, telhados, viadutos		98	98	98	98
Arruamentos e estradas					
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Fonte: Adaptado de Tucci et al (1993).

4.3.5. Caracterização Pedológica e Uso e Ocupação do Solo

O mapa pedológico foi elaborado tendo como base a carta de solos produzida pela EMBRAPA para o Estado do Espírito Santo e disponibilizado pelo GEOBASES. As informações foram consolidadas durante a fase de escritório, com complementação de dados através das ortofotomosaicos do Estado do Espírito Santo (IEMA, 2007-2008). Em ambiente SIG, o mapa pedológico da bacia do rio Jucu Braço Sul foi produzido em escala 1:150.000 (Figura 10).

As classes de solos predominantes na bacia são Latossolo vermelho-amarelo e o Cambissolo Háplico, com pequena representação de afloramento rochoso na parte mais

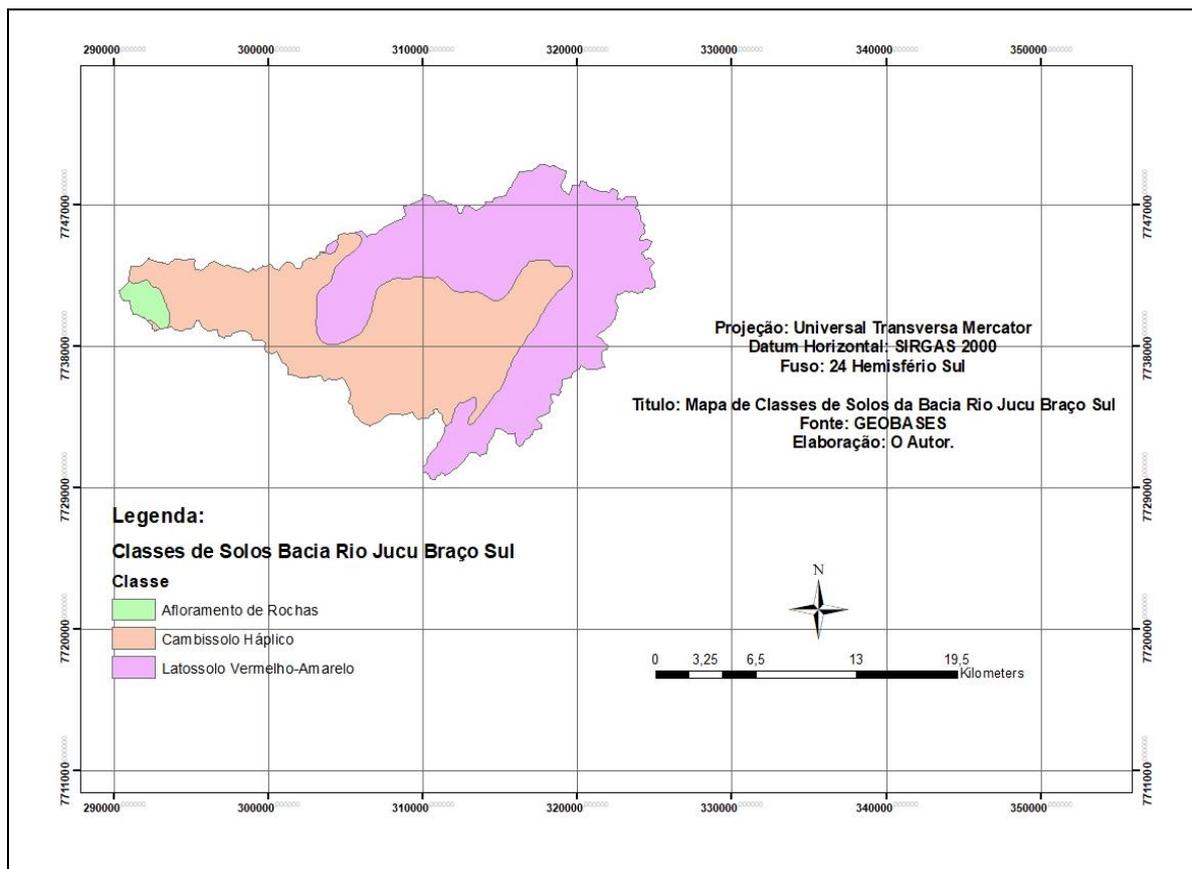
inclinada da bacia. A distribuição proporcional de cada classe de solo da bacia do Jucu Braço Sul está representada na tabela 02.

Tabela 02. Distribuição espacial das classes de solos na bacia do rio Jucu Braço Sul

Solo	Distribuição na bacia
Afloramento rochoso	1,64%
Cambissolo háplico	43,50%
Latossolo vermelho-amarelo	54,80%

Fonte: O autor.

Figura 10. Mapa de Classes de Solos Bacia do Rio Jucu Braço Sul



Fonte: O autor.

O mapa de uso e ocupação do solo da bacia do rio Jucu Braço Sul foi apropriado através do banco de dados do GEOBASES, elaborado com base nas ortofotomosaicos do Estado

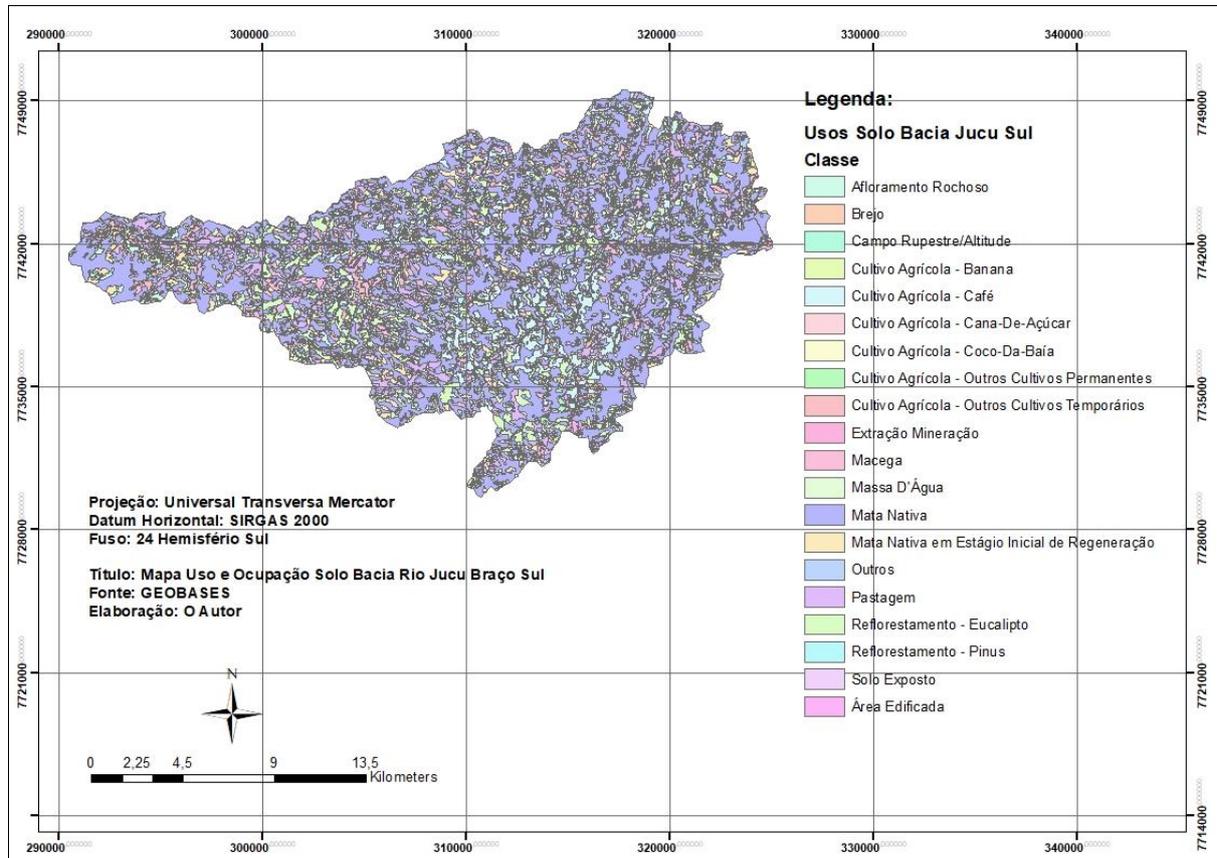
do Espírito Santo (IEMA, 2007-2008). As informações contidas na carta de uso do solo, em função do período de sua elaboração ser de 2007-2008, foram refinadas em ambiente SIG, em concomitância às imagens de satélite disponibilizadas pelo Google Earth, confirmando e atualizando os usos do solo dentro das bacias de drenagem do rio Jucu Braço Sul. O mapa de uso e ocupação do solo, elaborada em escala 1:200.000 está apresentado na figura 11, enquanto a tabela 03 apresenta os percentuais de cada uso do solo na bacia.

Tabela 03. Usos do solo na bacia do rio Jucu Braço Sul

Tipo de uso do solo	Cobertura de uso do solo
Extração mineral	5,61%
Cultivo agrícola – café	10,8%
Cultivo agrícola temporário	4,81%
Macega	6,74%
Mata nativa	43,70%
Mata nativa em estágio de regeneração	8,62%
Pasto	9,53%
Reflorestamento – eucalipto	9,08%
Afloramento rochoso	0,64%
Brejo	0,05%
Área edificada	0,40%
Massa d'água	0,02%

Fonte: Dados organizados pelo autor.

Figura 11. Mapa de Uso e Ocupação da Bacia do Rio Jucu Braço Sul



Fonte: O autor.

4.4. MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica ocorreu em duas etapas, haja vista que a proposta metodológica desta pesquisa é a modelagem hidráulica com base na inserção de dados de vazões de pico oriundas do uso de dois modelos hidrológicos distintos. A bacia do rio Jucu Braço Sul foi recortada na estação fluviométrica Marechal Floriano (57190000) que era localizada imediatamente a jusante da ponte sob o rio Jucu Braço Sul, no núcleo urbano de Marechal Floriano, originando a bacia denominada no presente estudo de Jucu Sul montante (Ver figura 08).

A bacia do rio Jucu Braço Sul possui área de 322,45 km², todavia, para o presente estudo, esta foi recortada, como descrito acima, para simular as vazões que chegam até a entrada do núcleo urbano de Marechal Floriano. Assim, a bacia em estudo possui área de drenagem aproximada de 310,22 km², área esta considerada para todo o estudo hidrológico e composição dos parâmetros de entrada dos modelos HEC-HMS e SWAT. Os dados de série histórica de vazão estão disponíveis até 1990, assim, optou-se pela adoção desta estação por possuir os dados disponíveis para calibração dos modelos hidrológicos.

4.4.1. Simulação Hidrológica com uso do HEC-HMS

O HEC HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling Systems) é um modelo que simula, através de diferentes módulos hidrológicos, a transformação do excedente precipitado em escoamento superficial. Para tanto, uma rotina de procedimentos deve ser seguida para atingir o objetivo de simular as vazões. Após a criação do projeto na interface do programa (HEC-HMS 4.3), foram utilizados os seguintes componentes:

- Basin Models (Modelos de bacia);
- Meteorologic Models (Modelos meteorológicos);
- Control Specifications (Especificações de controle);
- Time-Series Data (Dados de séries temporais).

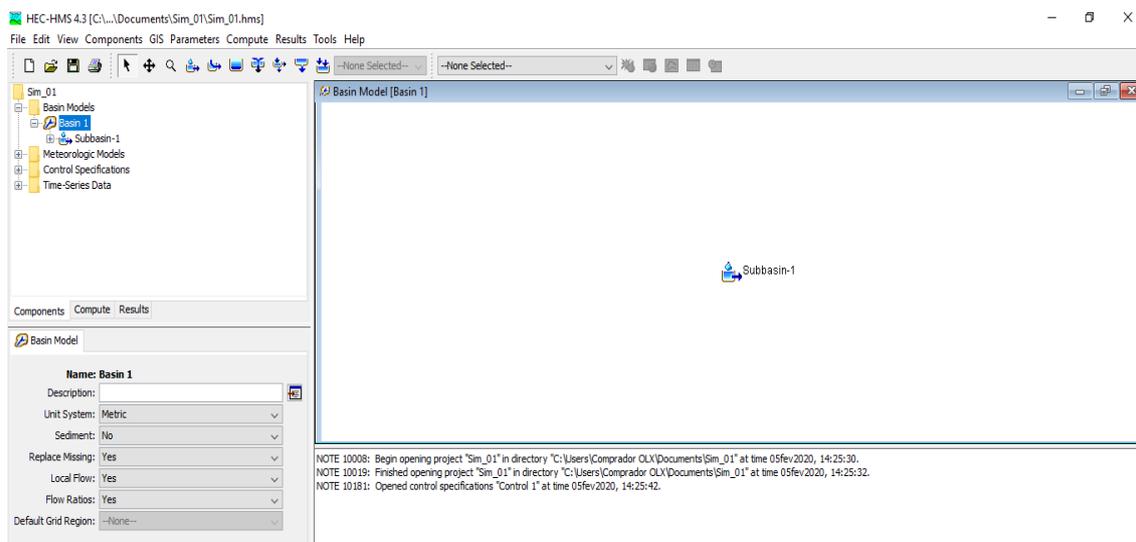
O modelo de bacia foi elaborado com a inserção apenas do elemento hidrológico sub-basin, que é a bacia de montante de Marechal Floriano, conforme demonstra a figura 12. A elaboração do modelo de bacia bastante simplificado se deu para que fosse possível utilizar a característica concentrada do programa HEC-HMS, contrapondo à característica semi-distribuída do modelo SWAT.

Foi necessário definir três módulos para a sub-bacia criada, a saber, o método de perdas (Loss), para o qual foi definido o método do SCS CN (Curve Number); o método de transformação (transform method), para o qual foi escolhido o método de Clark, o qual necessita do tempo de concentração e coeficiente de armazenamento, ambos em horas, sendo que o coeficiente de armazenamento foi calculado como sendo 60% do valor do tempo de concentração; e o método de fluxo de base (baseflow method), para o qual foi escolhido o método constant monthly. Para tanto, foram definidas as menores vazões de cada mês do ano, considerando o intervalo de anos hidrológicos estabelecido (1979-1988).

Para o componente Meteorologic Models, foi escolhido o método Specified Hyetograph. Para tanto, a chuva de projeto foi discretizada, informando a sua distribuição espacial, ou seja, se a chuva se deu em toda a bacia ou apenas na subbacia específica; ou ainda se ocorreram chuvas com intensidade e distribuição temporal diferentes.

O componente Control Specifications se trata de um arquivo criado para controle das simulações contendo informações sobre tempo total da simulação e os intervalos a ela associados. Por fim, no componente Time-Séries Data, foi inserido o dado Precipitation Gages relativo aos dados de chuvas diárias (Gage 1). Mesmo período que se estabeleceu para as vazões diárias, que foram inseridas no componente Discharge Gage (Gage 2), especificando a data de início e término do evento de chuva. Após a inserção de todos os parâmetros requeridos pelo programa, bem como a escolha dos métodos de transformação e perdas, processou-se a simulação pelo comando Simulation Run, que gerou dados de volumes escoados superficialmente e vazões diárias, seguindo procedimentos semelhantes em pesquisas conduzidas por Souza (2017), Luz (2017), Razi et al (2010), Souza e Farra (2017) e Santos (2017).

Figura 12. Modelo de bacia elaborado no HEC-HMS



Fonte: O autor.

4.4.2. Simulação com uso do SWAT

O programa de modelação hidrológica SWAT requer, como dados de entrada, o modelo digital de elevação (MDE), mapa de uso da terra e mapa pedológico, além de informações climáticas - vento, umidade relativa, temperatura máxima e mínima, radiação solar e precipitação. A interface utilizada foi o ArcSWAT 2012, compatível com o programa de geoprocessamento adotado (Arcgis 10.3).

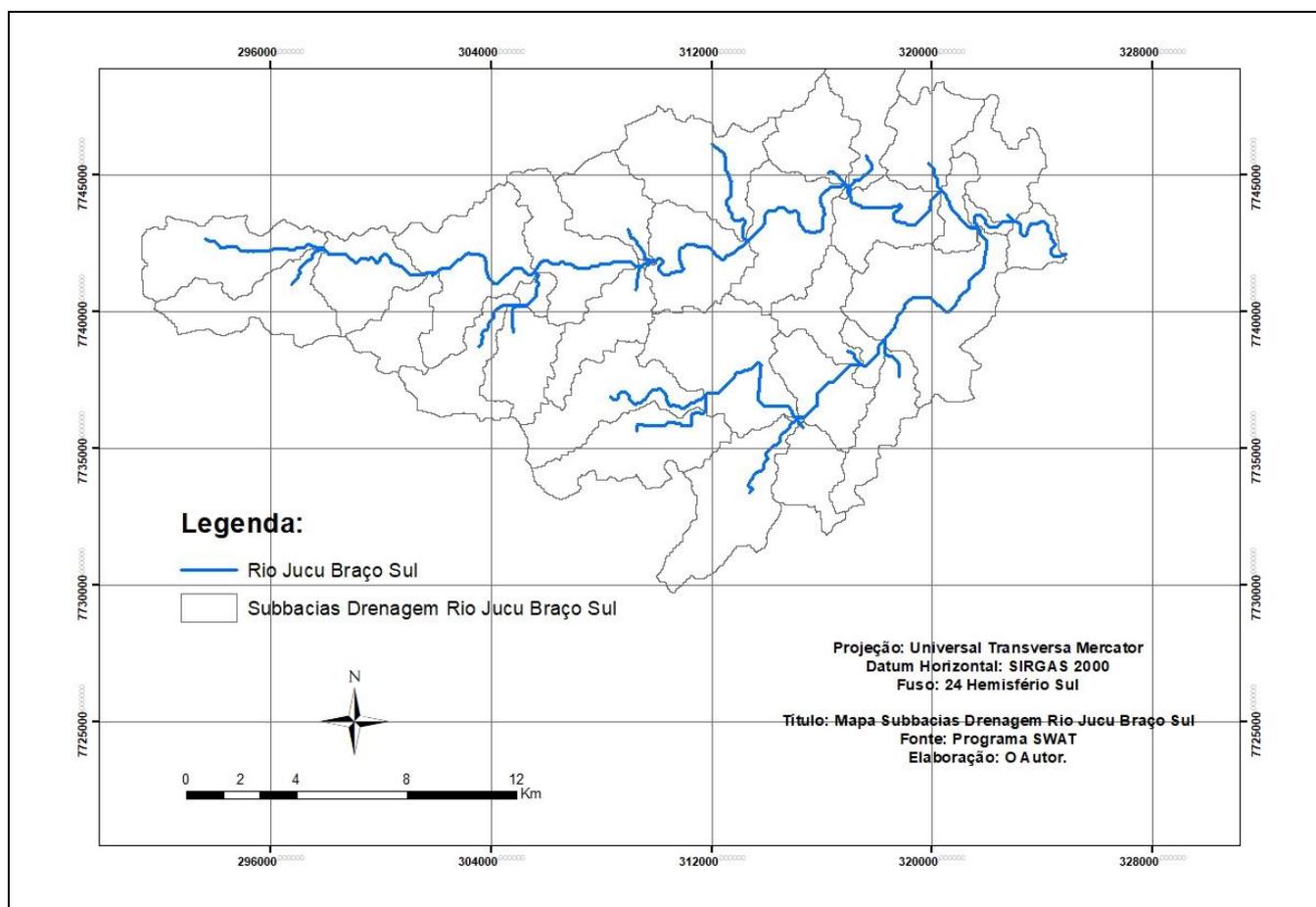
A inserção das informações de relevo, solo e uso da terra é necessária para que o modelo discretize a bacia em estudo em áreas com propriedades hidrológicas homogêneas, denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's). A divisão da bacia em HRU's permite que o modelo calcule, por exemplo, informações específicas para geração de carga de escoamento para cada unidade que são, no final, somadas para estimar o total de escoamento de uma bacia hidrográfica.

4.4.2.1. Modelo Digital de Elevação

O método de obtenção do modelo digital de elevação (MDE) para bacia do rio Jucu Braço Sul na seção a montante do núcleo urbano de Marechal Floriano está descrito no item 4.2. No ArcSWAT, o MDE foi inserido e gerada a rede de drenagem por meio do comando Watershed Delineator. Em seguida, a bacia foi dividida em subbacias de drenagem por meio do comando Automatic Watershed Delineation (Figura 13), que resultou na divisão da bacia em estudo em 35 sub-bacias,

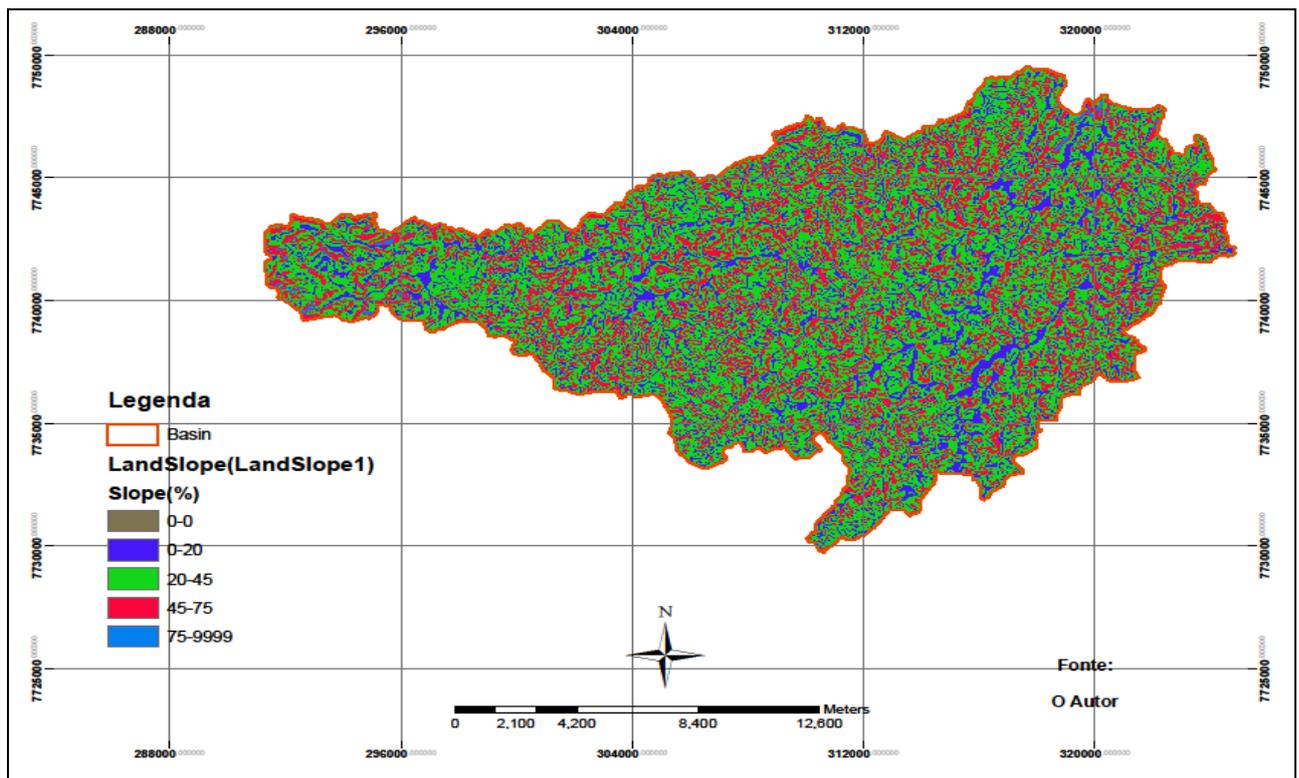
O MDE foi também utilizado para a elaboração do mapa de declividades da bacia (Figura 14). Para o mesmo, foi utilizada a classificação da EMBRAPA (2006), estabelecendo intervalos entre 3 e 75% de declividade.

Figura 13. Divisão do Jucu Braço Sul em sub-bacias pelo SWAT



Fonte: O autor.

Figura 14. Declividade gerada pelo ArcSWAT para bacia do Jucu Braço Sul



Fonte: O autor.

4.4.2.2. Tipo de Solos

O banco de dados do SWAT traz informações sobre características de solos dos Estados Unidos, país onde o programa foi elaborado. Para as simulações realizadas no Brasil, há necessidade de incremento desse banco de dados com a introdução de características dos solos brasileiros. Assim, houve a necessidade de edição dos dados pedológicos através do programa DBF de editor de tabelas para que houvesse a reclassificação dos solos de maneira automática pelo ArcSWAT. O quadro 04 apresenta informações de solo requeridas pelo modelo e que compuseram a sua tabela de edição.

Quadro 04. Propriedades físicas dos solos requeridas pelo modelo SWAT

Sigla no SWAT	Descrição do Parâmetro
SNAM	Nome das classes de solo
NILAYERS	Número de camadas (horizontes) do solo
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo (A, B, C e D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima possível de alcance da raiz (mm)
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo (decimal)
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm)
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm ³)
SOL_AWC	Capacidade de retenção de água do solo (mm/mm)
SOL_K	Condutividade hidráulica em solo saturado (mm/h)
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico do solo (%)
CLAY	Porcentagem de água no solo (%)
SILT	Porcentagem de argila no solo (%)
SAND	Porcentagem de silte no solo (%)
ROCK	Porcentagem de cascalho no solo (%)
SOL_ALB	Albedo do solo (decimal)
USLE_K	Fator de erodibilidade (K) da USLE

Fonte: Correia, 2016.

4.4.2.3. Uso e Ocupação do Solo

Para a tabela dos dados relacionados ao mapa de uso e ocupação do solo também houve a necessidade de edição no banco de dados do SWAT, uma vez que alguns usos são afetos à realidade brasileira e o referido banco de dados foi elaborado para a realidade norte americana. Desta maneira, foi realizada a adaptação de alguns usos do solo da bacia do rio Jucu Braço Sul, assemelhando-os aos usos existentes no SWAT.

4.4.2.4. Geração das HRU

Após a inserção de todos os dados e mapas requeridos pelo modelo, foram criadas as HRU's pelo comando HRU Definition, gerando 384 HRU's, cujas características de declividade, solo e uso da terra podem ser analisadas acessando o HRU Analysis Reports, para cada HRU produzida.

4.4.2.5. Dados Climáticos

Os dados climáticos foram apropriados pelo recurso oferecido no sítio eletrônico <https://globalweather.tamu.edu/>. Este sítio permite o download de informações climáticas em nível diário do Sistema de Reanálise de Previsão Climática (CFSR). A partir da escolha da região onde está inserida a bacia em estudo, é possível obter dados de precipitação, umidade relativa, ventos, radiação solar e temperatura. Todavia, essas informações estão disponíveis até o ano de 2014, havendo, portanto, necessidade de complementação dos dados entre 2015 a 2018 através da apropriação de estação climática administrada pelo INCAPER para a região de interesse.

Após a obtenção dos dados brutos, os mesmos passaram por tratamento com uso do arquivo Weather Database, disponibilizado no sítio eletrônico do SWAT, permitindo o cálculo estatístico automatizado para criação da estação climática do Jucu Braço Sul e adicionado na database do SWAT, criando tabelas próprias de dados climáticos. Cumpre ressaltar, novamente, que os valores de chuvas não foram apropriados pelo sistema da global weather, mas sim pela estação pluviométrica de Marechal Floriano (2040012), trabalhando com dados reais e medidos de precipitação para o período escolhido.

Após a inserção de todos os parâmetros e dados requeridos pelo modelo, foi realizada a simulação hidrológica através do comando Run SWAT. Após a simulação, na opção Read SWAT Output, foram importados os arquivos de interesse e a simulação salva, além de realizada análise preliminar no modelo elaborado, através do SwatCheck, em consonância a estudos conduzidos por Correia (2016), Delboni (2019) e Teixeira (2017). Em prosseguimento, passou-se à etapa de calibração e validação do modelo.

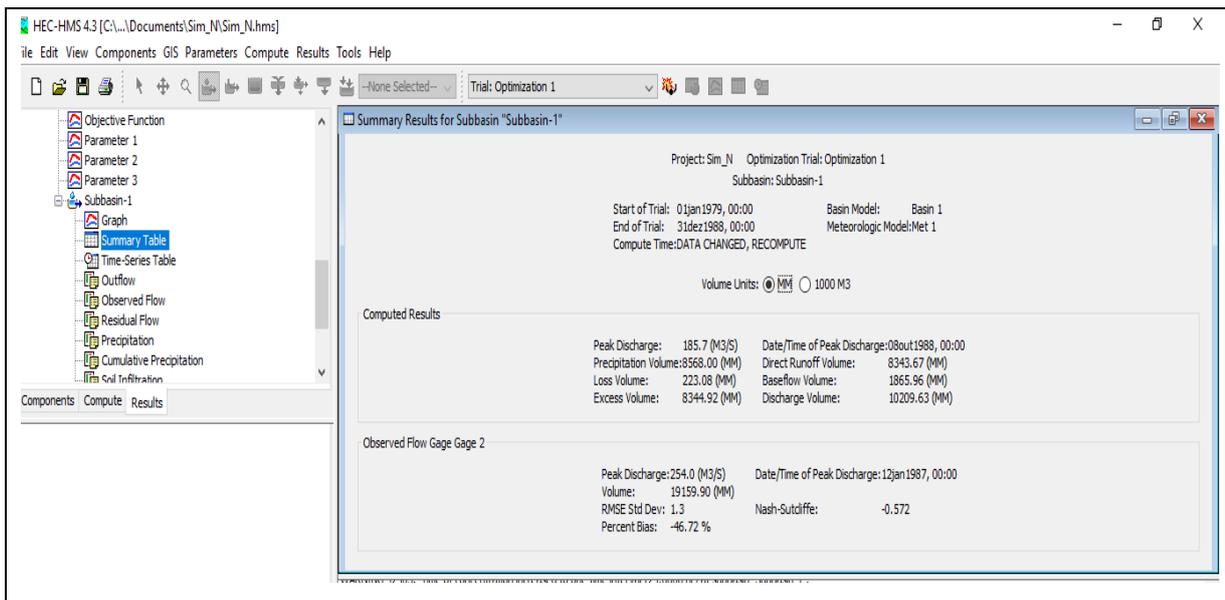
4.4.3. Calibração e Validação dos Modelos

4.4.3.1. Calibração do Modelo HEC-HMS

A calibração para o modelo HEC-HMS ocorreu adotando-se a função otimização, disponibilizado pelo próprio programa computacional. Essa opção possibilita a escolha e inserção manual dos parâmetros a serem calibrados, além da escolha da função objetivo que melhor se adaptar aos objetivos da calibração. Os parâmetros escolhidos para serem ajustados foram o tempo de concentração, coeficiente de armazenamento, número da curva e abstração inicial. A função objetivo adotada foi Root Mean Square Error. A otimização foi realizada, até que os parâmetros apresentassem mínima diferença percentual, atingindo índices estatísticos satisfatórios.

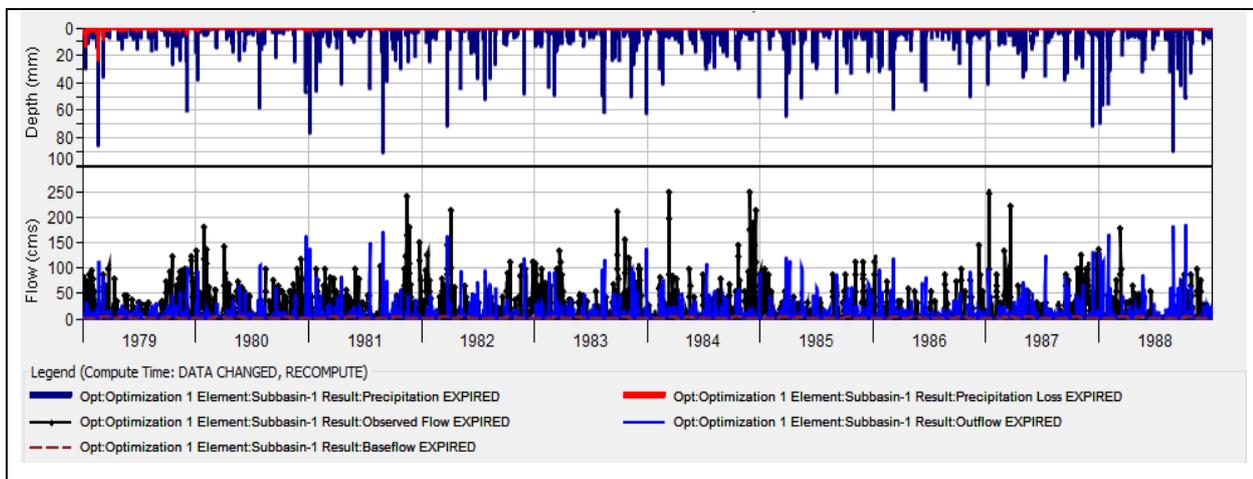
Antes da otimização, a simulação forneceu, como resultado estatístico, valor de Nash e Sutcliffe de -0,572; PBIAS -46,72% e RMSE de 1,3, números que enquadraram a simulação com insatisfatória, isto é, a confiabilidade na vazão observada era maior do que na vazão simulada (Figuras 15 e 16). Após a otimização, os valores alteraram-se para NSE de 0,65; PBIAS 7,5% e RMSE de 0,6, fato que classifica a simulação como Boa, conforme as figuras 17 e 18 demonstram.

Figura 15. Índices estatísticos antes da calibração



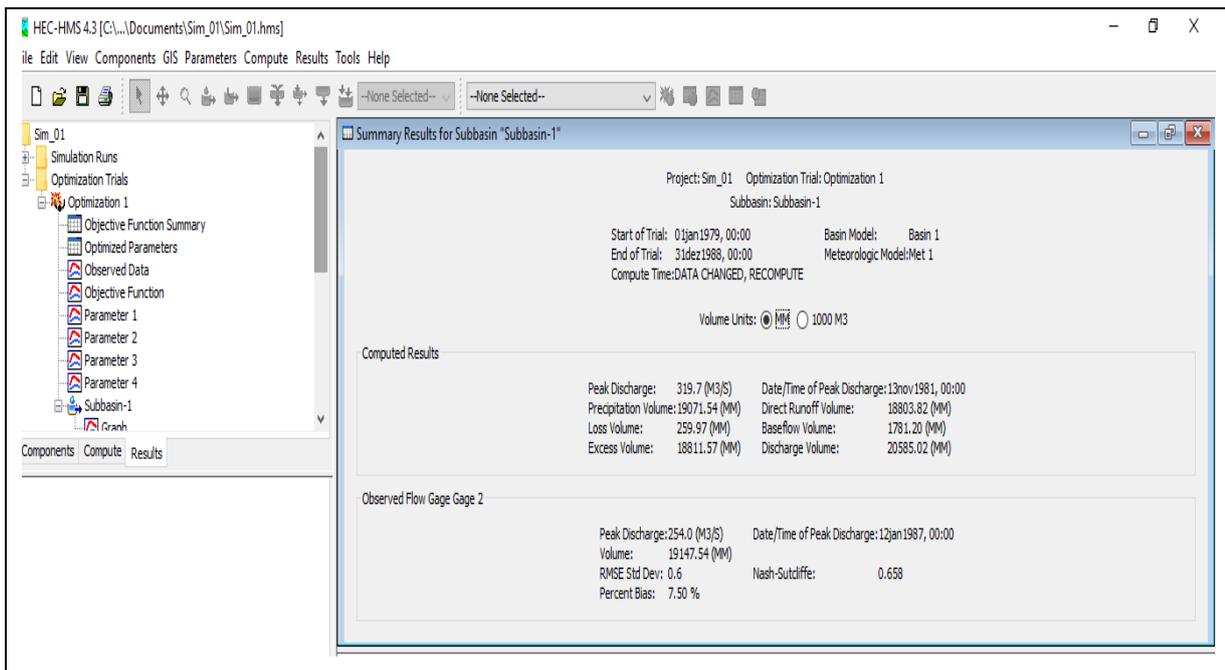
Fonte: O Autor.

Figura 16. Hidrograma obtido antes da calibração



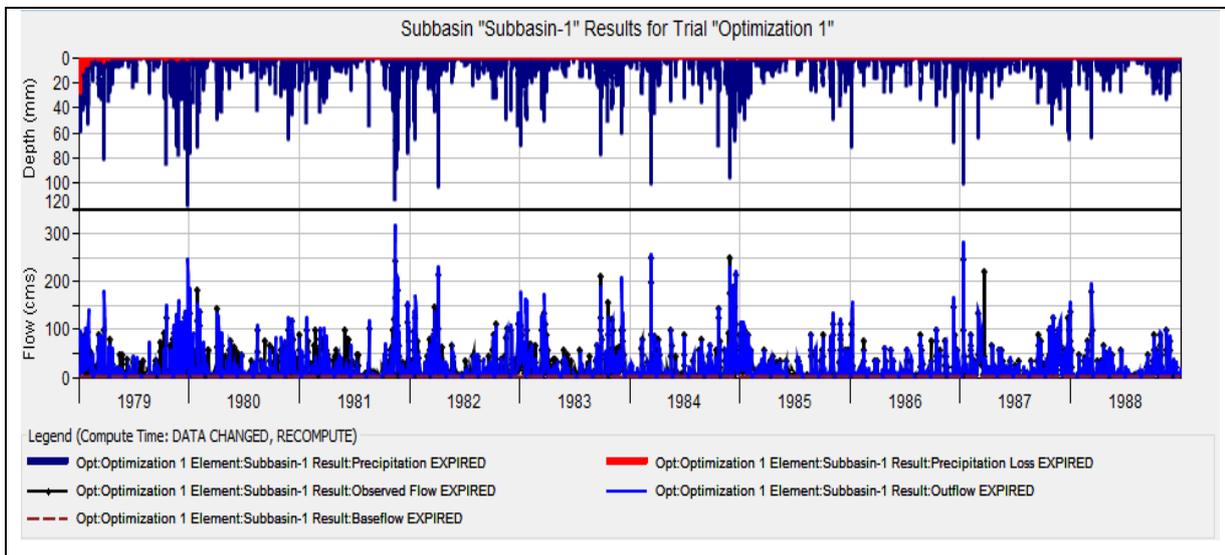
Fonte: O Autor.

Figura 17. Índices estatísticos após calibração



Fonte: O Autor

Figura 18. Hidrograma obtido após calibração



Fonte: O Autor.

4.4.3.2. Calibração e Validação com SWAT

Para a realização da calibração do modelo hidrológico SWAT, foi utilizado o programa SWAT CUP, que realiza a calibração automatizada, escolhendo-se a função SUFI2. Após, houve a divisão em três etapas subseqüentes, a saber, aquecimento, calibração e validação do modelo. Para o aquecimento do modelo, foram utilizados dados dos anos 1979-1980. A calibração ocorreu com dados de série histórica entre os anos de 1981-1985. Já a validação se deu com dados entre os anos de 1986-1988. A escolha do intervalo temporal para a calibração se deu para que houvesse equiparação com a simulação produzida pelo modelo HEC-HMS.

Os parâmetros calibrados manualmente foram escolhidos com base em estudos de sensibilidade levados a cabo por Fukunaga et al (2015), Lelis et al (2012), Correia (2016) e Moreira (2017), conforme demonstrado no quadro 05. O método se deu alterando os valores mais sensíveis de maneira manual em escala diária até que os resultados da simulação se tornassem aceitáveis. Os parâmetros efetivamente utilizados nesta pesquisa estão dispostos na tabela 04, com os valores iniciais. Para o processo de calibração do escoamento superficial, os parâmetros comumente utilizados são CN2, SOL_AWC, ESCO, SURLAG, EPCO e OV_N. Já para o processo de fluxo de base, os parâmetros a serem considerados são ALPHA_BF, GW_DELAY, GW_REVAP, RCHARG_DP, GWQMN e REVAPMN (CORREIA, 2016; DELBONI, 2019; TEIXEIRA, 2017).

A tabela 05 apresenta os parâmetros alterados para a presente simulação hidrológica. Os valores foram inseridos de forma automática na aba Par_Inf.txt, que possui a opção de inserção direta dos valores alterados através do arquivo gerado na iteração, denominado New_Pars.txt.

Quadro 05. Parâmetros sensíveis do modelo SWAT para calibração

Parâmetros	Descrição
CN2	Número da curva na condição II de umidade (adimensional)
ALPHA BF	Constante de recessão do escoamento de base (adimensional)
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H ₂ O/mm solo)
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)
REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o “revap” (mm)
SURLAGE	Coefficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional)
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm ³)
GWHT	Altura inicial da água subterrânea (mm)
EPCO	Fator de compensação de evaporação da planta (adimensional)
BIOMIX	Eficiência do revolvimento biológico (adimensional)
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h ⁻¹)
FFCB	Armazenamento inicial de água do solo inicial expressa como uma fração do teor de água na capacidade de campo (fração)
OV_N	Valor "n" de Manning para escoamento superficial
GWQMN	Profundidade do limite de água no aquífero raso para o escoamento de base (mm)
GW_REVAP	Coefficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração)
SOL_Z	Profundidade do solo (mm)
CNCOEF	Coefficiente de ponderação usado para calcular a retenção nos dependentes da evapotranspiração das plantas (adimensional)
SOL_K	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h ⁻¹)
SOL_ALB	Albedo do solo úmido (decimal)

Fonte: Correia, 2016. Dados organizados pelo autor.

Tabela 04. Parâmetros utilizados para calibração da bacia rio Jucu Braço Sul

Parâmetros utilizados	Valores selecionados
r__SOL_K().sol	0.207500
r__CN2.mgt	-0.197663
v__ALPHA_BF.gw	0.049250
v__GW_DELAY.gw	34.575001
v__GWQMN.gw	0.127237
r__GWQMN.gw	451.250000
r__GW_DELAY.gw	36.424992
r__SURLAG.bsn	19.975000
r__GW_REVAP.gw	0.095000
SOL_AWC	0.6
CH_K2	130
r__ESCO.bsn	0.826750

Fonte: O Autor.

Tabela 05. Parâmetros com valores otimizados após calibração

Parâmetros utilizados	Valores otimizados
r__SOL_K().sol	0.049016
r__CN2.mgt	-0.226778
v__ALPHA_BF.gw	0.074661
v__GW_DELAY.gw	13.520334
v__GWQMN.gw	0.101685
r__GWQMN.gw	437.935822
r__GW_DELAY.gw	37.122276
r__SURLAG.bsn	21.789255
r__GW_REVAP.gw	0.052684
r__ESCO.bsn	0.819671
SOL_AWC	0,4
CH_K2	67,50

Fonte: O Autor.

Para avaliar a qualidade das simulações produzidas no SWAT, foram utilizados índices estatísticos amplamente difundidos em pesquisas sobre modelação hidrológica com uso do SWAT. Os índices estatísticos aplicados foram o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS), percentual de tendência (PBias) e erro padrão médio normalizado (RSR). As equações de cada índice estão dispostas abaixo.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \sigma)^2} \quad (09)$$

$$PBias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \cdot 100 \quad (10)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \sigma)^2}} \quad (11)$$

Onde,

N = Número de observações durante período de simulação;

O_i = Valores observados;

S_i = Valores simulados pelo modelo;

σ = Média de valores observados;

δ = Média de valores simulados.

O coeficiente de Nash e Sutcliffe varia de $-\infty$ a 1. Valores próximos a 1 indicam uma simulação perfeita. Para o coeficiente PBias, valores positivos indicam superestimação do modelo e valores negativos apontam para subestimação dos resultados. Já valores baixos do coeficiente Erro Padrão Médio Normalizado indicam um bom desempenho do modelo. A tabela 06 extraída de pesquisa desenvolvida por Pimentel (2017), que aplicou o modelo SWAT na bacia do rio Jucu objetivando analisar a resposta hidrológica desta bacia para diferentes cenários de cobertura florestal, resume os índices indicativos da qualidade da simulação com base nos coeficientes adotados.

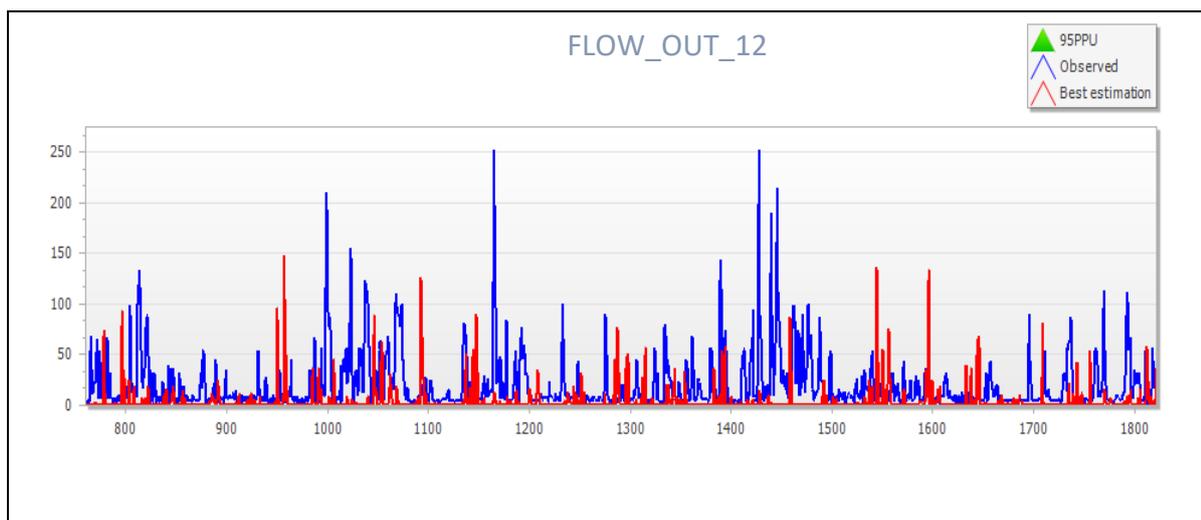
Tabela 06. Índices de qualidade da vazão simulada com base nos coeficientes adotados			
Classificação	NS	RSR	PBIAS (%)
Muito bom	$0,75 < NS \leq 1,00$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,5 < NS \leq 0,65$	$0,60 < RSR \leq 0,7$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NS \leq 0,5$	$RSR > 0,7$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Pimentel, 2017. Dados organizados pelo autor.

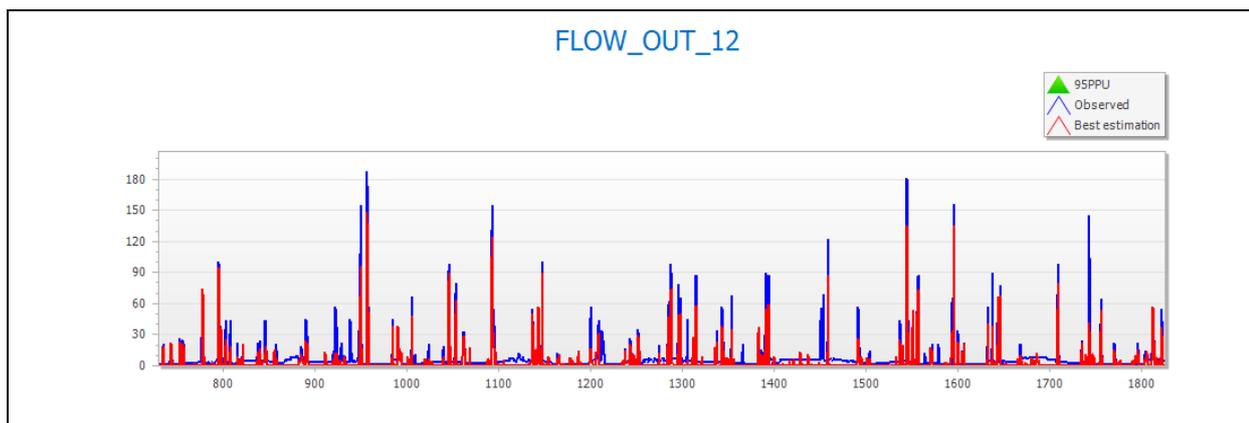
Antes do procedimento de calibração, o modelo SWAT forneceu resultados bastante insatisfatórios de índices estatísticos, com NS de -0,59; PBIAS igual a 90 e R2 igual a 0. Após a calibração, os valores foram significativamente alterados, fornecendo NS de 0,75; PBIAS abaixo de 10% e R2 igual a 0,6, sendo a simulação classificada como Boa. A figura 19 demonstra os hidrogramas, antes e após a calibração.

Figura 19. Hidrogramas de vazão não calibrados e calibrados (1981-1985)

Antes da Calibração



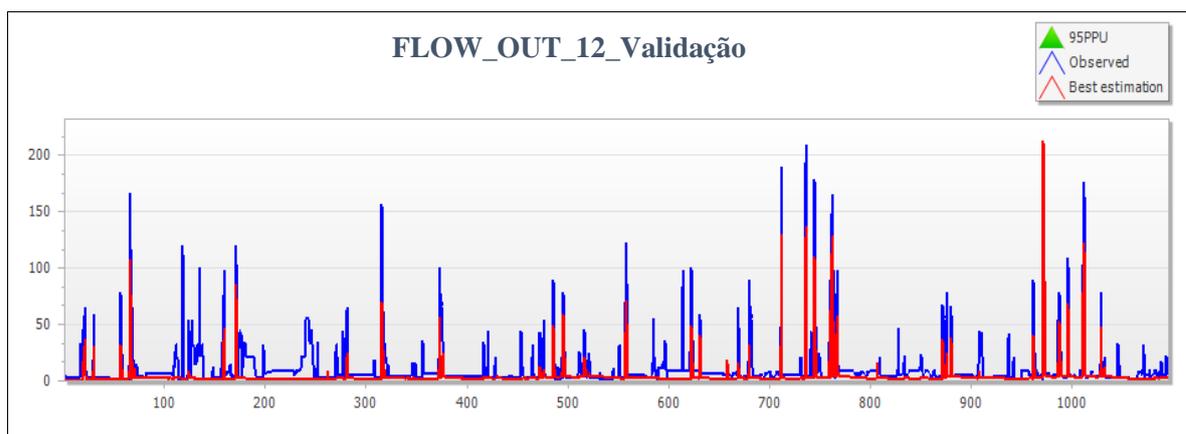
Após Calibração



Fonte: SWAT, 2020

Para Le Moine et al (2007), o parâmetro estatístico NSE não é representativo de uma boa simulação quando se considera pequenas e médias bacias hidrográficas, como é o caso da bacia em estudo. O NSE, de acordo com esses autores, possui menos falhas quando aplicado em grandes bacias. Contudo, o R^2 foi satisfatório e o PBias também, fato que demonstra que o modelo não superestimou as vazões.

A validação foi uma etapa importante também para averiguar se o modelo tem capacidade de simulação eficiente para outros períodos e condições diferentes das que foram calibrados. Na etapa de validação, não houve alteração nos valores dos parâmetros, utilizando apenas os anos hidrológicos destinados para esta finalidade (1986-1988). O hidrograma abaixo (Figura 20) representa o período de validação, cujo índice estatístico de Nash e Sutcliffe resultou em 0,6, sofrendo um decréscimo em relação ao período de calibração, contudo, ainda permanecendo na faixa aceitável para uma simulação satisfatória.

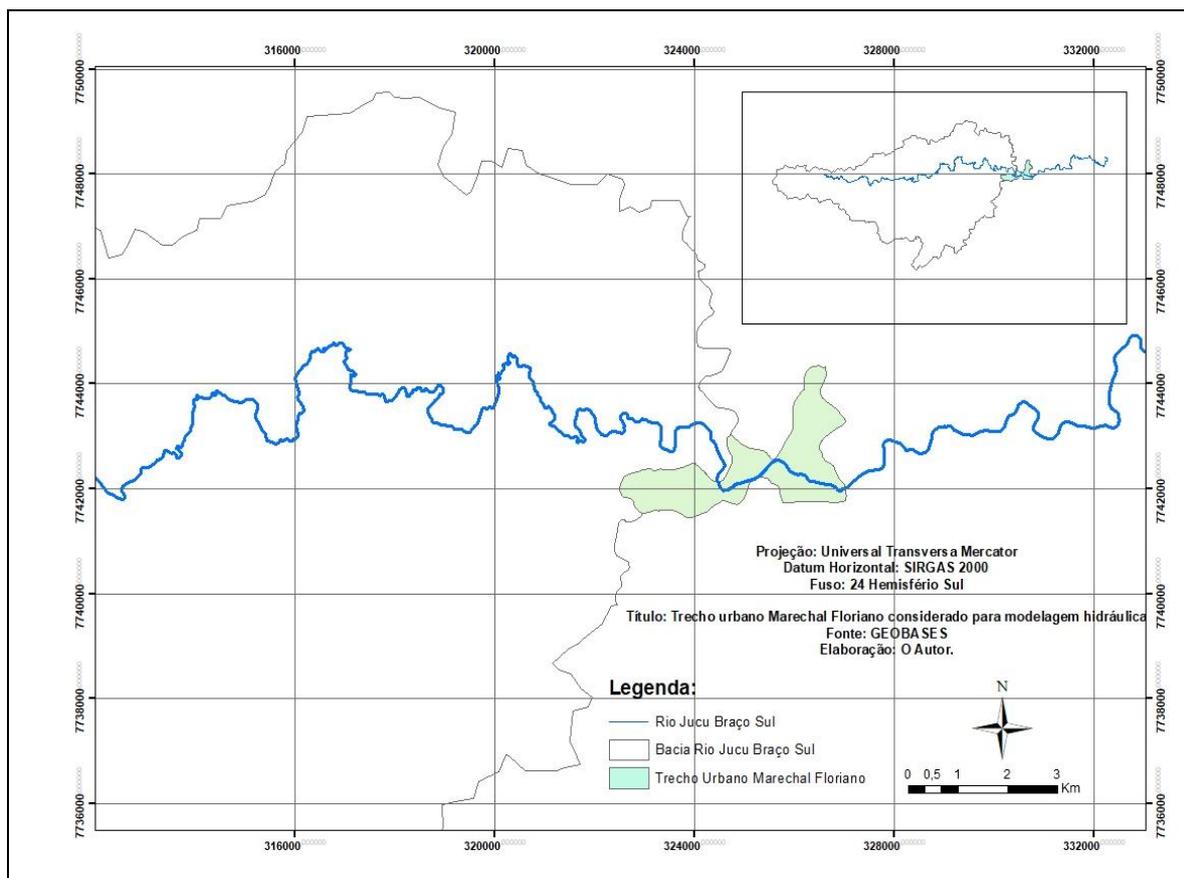
Figura 20. Hidrograma de validação SWAT (1986-1988)

Fonte: O Autor.

4.5. MODELAGEM HIDRÁULICA

Para a simulação hidráulica, foi considerado apenas o trecho urbano do município de Marechal Floriano (Figura 21), compreendendo a calha principal do rio Jucu Braço Sul e áreas lindeiras, de acordo com os objetivos da presente pesquisa. Foi utilizado o programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano. Amplamente utilizado para modelagem de canais naturais e artificiais, o modelo se baseia na resolução da equação de energia unidimensional (Bernoulli), considerando as perdas de energia por fricção (Equação de Manning) e contração ou expansão das seções transversais. Já a equação do momento, por exemplo, é empregada no cálculo para determinação dos níveis d'água nas confluências dos rios (AVANTEC, 2013).

Figura 21. Mapa do trecho urbano de Marechal Floriano considerado na modelagem hidráulica



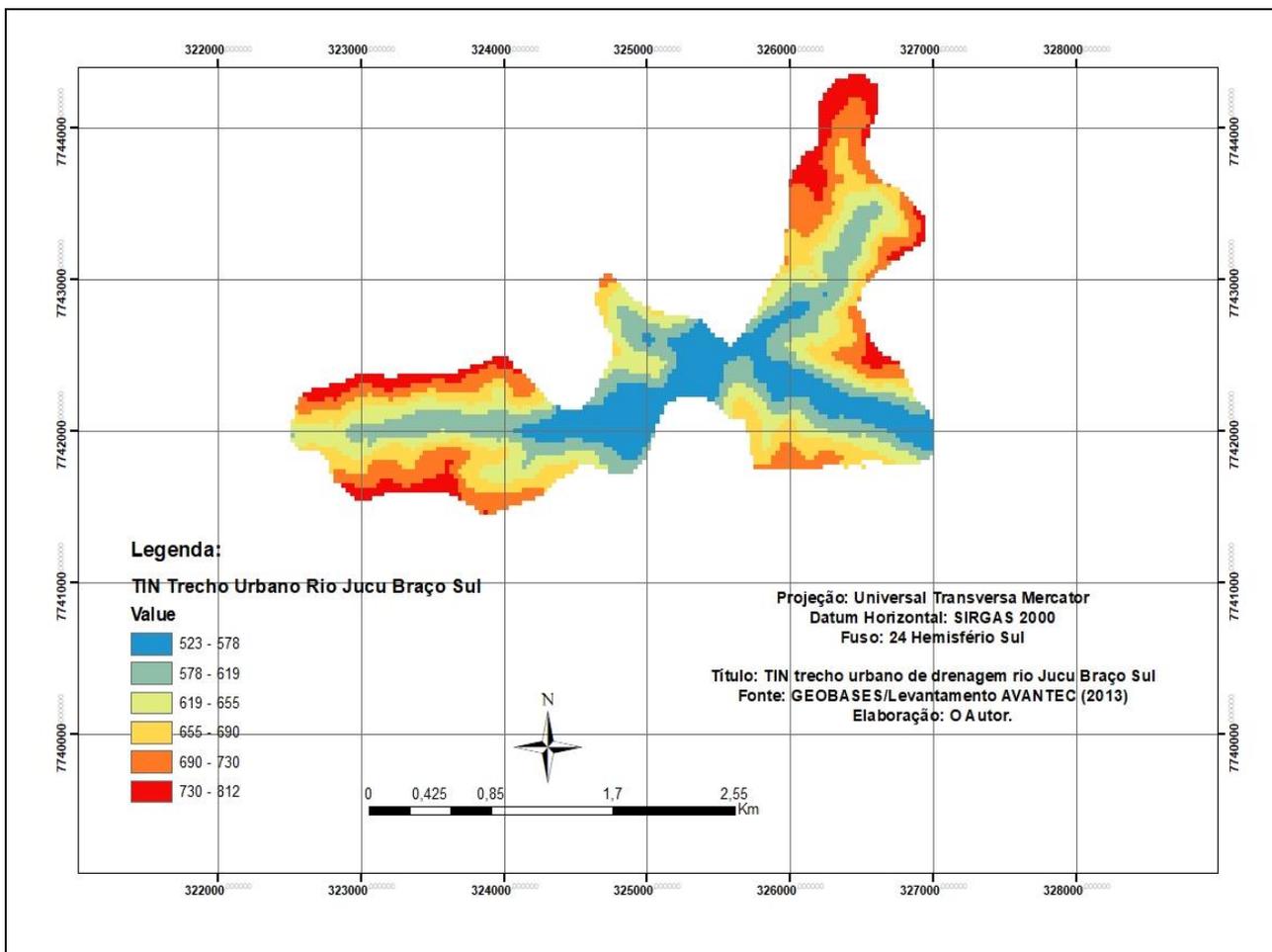
Fonte: O Autor.

O modelo requer uma representação geométrica bastante detalhada do terreno, a fim de se conseguir uma simulação hidráulica com qualidade e precisão. Portanto, o MDT da área a ser modelada foi elaborado em formato TIN a partir da associação do MDT do terreno e do talvegue principal em ambiente SIG e exportado para o programa HEC RAS posteriormente.

O TIN (triangulated irregular network) da área urbana de Marechal Floriano foi elaborado através de aerofotogrametria com curvas de nível de 2 metros de equidistância vertical, com complementação de informações através de levantamento topobatimétrico conduzido pela empresa Avantec Engenharia, no âmbito da elaboração do Plano Diretor de Águas Pluviais e Fluviais do Município de Marechal Floriano, em 2013, com cotas topo-batimétricas das seções dos canais principal do rio Jucu Braço Sul em seu trecho urbano (Figura 22).

Os coeficientes de Manning foram determinados com base nos valores recomendados por Chow (1959), nos tipos de revestimentos existentes observados por ortofotomosaicos das áreas e imagens de satélite do Google Earth e do tipo de uso e ocupação do solo. Assim, foram adotados os coeficientes de Manning que se encontram dispostos na tabela 07.

Figura 22. TIN do rio Jucu Braço Sul no trecho urbano de Marechal Floriano



Fonte: AVANTEC, 2013. Organizado pelo autor.

Tabela 07. Valores de referência para coeficiente de Manning

Revestimento	Coeficiente de Manning adotado (n)
Revestimento do canal principal:	
Canal aberto com paredes de concreto	0,020
Galerias fechadas de concreto	0,015
Canal aberto com cobertura vegetal	0,035
Revestimento da planície de inundação:	
Áreas densamente ocupadas	0,080
Gramma curta	0,035
Gramma densa	0,050
Floresta	0,150
Solo pedregulhoso com grama	0,030

Fonte: Chow, 1959. Dados organizados pelo autor.

As etapas metodológicas iniciaram-se com a determinação do domínio do modelo, seguidas pela determinação das condições de contorno e construção da geometria do mesmo, antes de processar, efetivamente, as simulações hidráulicas, conforme pode ser observado no que se segue.

4.5.1. Domínio e condição de contorno do modelo

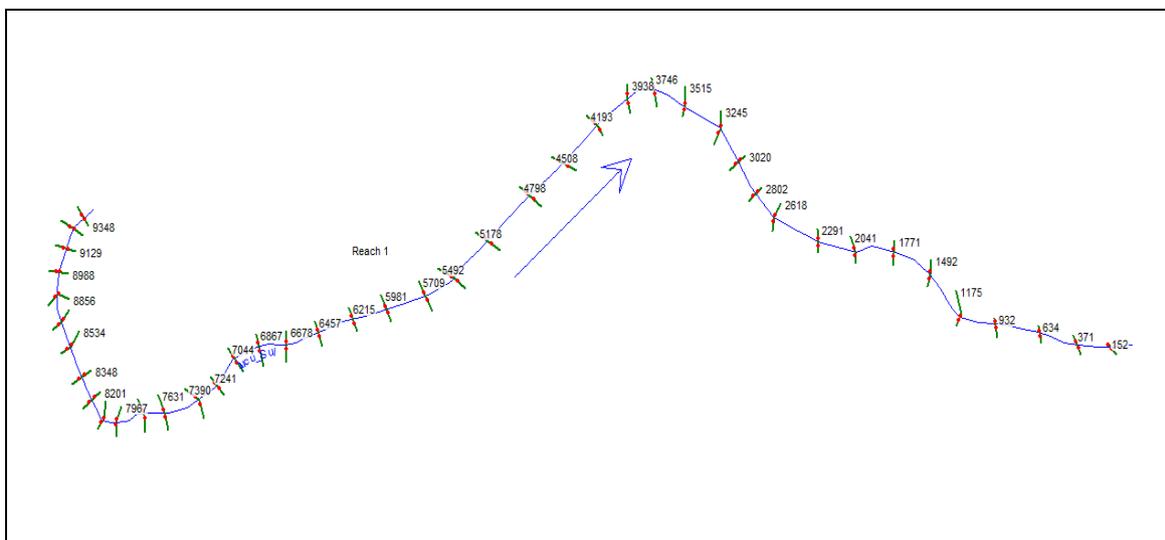
Para o domínio do modelo, foi definido o trecho urbano da bacia do rio Jucu Braço Sul dentro da sede do município de Marechal Floriano, com uma extensão aproximada de 8,2 quilômetros.

Já a condição de contorno escolhida para estabelecer a cota de inundação foi a declividade da linha de energia, considerada igual ao valor da declividade de canal. Além disso, as condições de contorno consideraram as laterais do rio, definindo as cotas superiores a 04 metros de altura em relação às cotas do rio Jucu Braço Sul. Os coeficientes de expansão e contração das seções transversais, requeridos pelo HEC-RAS para calcular as perdas de energia durante a propagação do escoamento, foram adotados como 0,3 e 0,1 respectivamente, representando uma transição gradual entre as seções.

4.5.2. Geometria do Modelo

A partir das informações topográficas de detalhe, foi elaborado, em ambiente SIG, o TIN do trecho urbano da área a ser modelada, o qual serviu como dado de entrada requerido pelo programa HEC RAS. O modelo hidráulico, propriamente dito, foi editado dentro do programa HEC RAS, na opção RAS Mapping, onde foi criada a geometria e traçados os elementos necessários, como River, Bank Lines e Cross Sections (Figura 23). Os coeficientes de Manning foram inseridos manualmente para cada seção.

Figura 23. Geometria do modelo hidráulico elaborado no RAS Mapping.



Fonte: O autor.

4.5.3. Simulações com o HEC RAS

Após a etapa de construção do modelo hidráulico, passou-se efetivamente à simulação hidráulica com os períodos de recorrência estabelecidos em 10, 50 e 100 anos. As simulações do fluxo das vazões no HEC-RAS foram realizadas nas condições de regime permanente com escoamento misto, isto é, subcrítico e supercrítico, uma vez que a calha do Jucu Braço Sul possui trechos com pequenas e grandes profundidades, provocando altas e baixas velocidades, respectivamente.

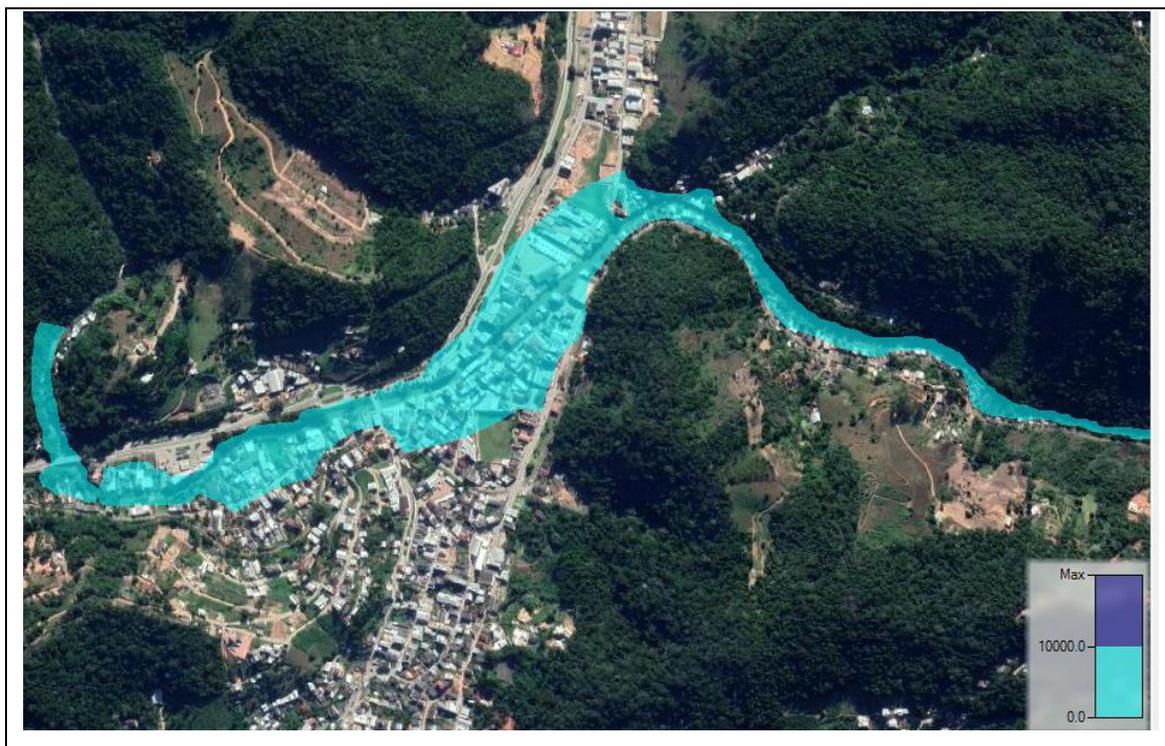
As vazões máximas de pico para entrada no modelo hidráulico foram obtidas pelas simulações hidrológicas dos programas HEC-HMS e SWAT, logo, foram geradas manchas de inundação para os períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos para cada resposta hidrológica, fato que produziu seis manchas de inundação ao final do processo.

4.5.4. Determinação das Manchas de Inundação

Os resultados obtidos pela simulação no HEC RAS foram exportados em formato tabular para análise (ver Anexo A), principalmente, do nível de elevação da água, profundidade máxima e velocidade total do fluxo. Além dessas informações, foi exportada a representação visual das áreas encobertas pelas vazões simuladas gerando arquivos delimites de inundação em formato Shapefile, obtendo-se, assim, as manchas de inundação (Figura 24).

As manchas de inundação foram exportadas do HEC RAS através do comando Export GIS DATA. Utilizando o programa Arcgis, foram seguidas as seguintes etapas objetivando a definição da superfície da água: RAS Mapping, Inundation Mapping e Water Surface Generation. Para a visualização das manchas de inundação, o TIN do terreno representado também foi exportado, produzindo seis manchas de inundações que estão discutidas no capítulo seguinte.

Figura 24. Exemplo de mancha de inundação elaborada para núcleo urbano de Marechal Floriano



Fonte: O autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão demonstrados os resultados da caracterização dos parâmetros fisiográficos e hidrológicos, a análise comparada das simulações realizadas com os modelos hidrológicos HEC HMS e SWAT para apropriação das vazões de pico, além do resultado da resposta hidráulica com uso do modelo HEC RAS, considerando a análise das manchas de inundação e parâmetros hidráulicos como a elevação superfície d'água, profundidade e velocidade, em função dos tempos de recorrência determinados para o trecho urbano do município de Marechal Floriano.

5.1. PARÂMETROS FISIAGRÁFICOS E HIDROLÓGICOS DA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL

5.1.1. Parâmetros Fisiográficos

Conforme citado no capítulo Materiais e Métodos, onde houve a descrição dos parâmetros físicos e climáticos requeridos pelos modelos hidrológicos, seguem os resultados trazidos pelas simulações. Os parâmetros comprimento do talvegue principal, declividade, cota mais alta e mais baixa e área da bacia foram obtidos através do programa Arcgis 10.3 e estão apresentados na tabela 08.

Tabela 08. Parâmetros fisiográficos da bacia do rio Jucu Braço Sul

Parâmetro	Bacia rio Jucu Braço Sul
Área total(A)	322,15 km ²
Área bacia concentrada (A')	310,22 Km ²
Comprimento talvegue principal (L)	100,42 km
Declividade (S)	0,01329 m/m
Cota mais alta	1.876 m
Cota mais baixa	541 m

Fonte: Organizado pelo autor.

5.1.2. Parâmetros Hidrológicos

5.1.2.1. Tempo de Concentração e Coeficiente de Armazenamento

O tempo de concentração foi obtido através de uma média simples entre a aplicação de três métodos para o seu cálculo. Foram utilizadas as fórmulas de Temez, Giandotti e Doodge⁵, fornecendo os seguintes resultados apresentados na tabela 09.

Tabela 09. Resultados para diferentes métodos de tempo de concentração

Tempo de concentração (Tc)	Resultado (minutos)
Temez	1.358,90
Giandotti	678,64
Doodge	479,19
Média	838,91

Fonte: O autor.

O coeficiente de armazenamento foi considerado como sendo 60% do valor do tempo de concentração, ou seja, o coeficiente de armazenamento obtido e inserido na simulação hidrológica no programa HEC HMS foi 503,34 minutos.

⁵ As equações para cálculo do tempo de concentração utilizadas pela presente pesquisa estão dispostas no capítulo 04 - Materiais e Métodos.

5.1.2.2. Curva Número (CN)

O valor da curva número para a bacia do Jucu Braço Sul é produto da associação dos mapas de tipo e uso do solo, em condição de umidade antecedente II, conforme orientação do manual de uso do HEC-HMS (USACE, 2018). Assim, o valor encontrado e utilizado para o método de perdas (Loss) do SCS-CN foi de 44,5. Após a otimização, este valor foi alterado para 35,5.

Já o modelo SWAT, em sua rotina de modelação, estabelece, de forma automática, um número de CN mais adequado às condições de solo e uso e ocupação da terra, fornecendo um CN de 39,3. A tabela 10 apresenta os valores de CN obtidos para a bacia do rio Jucu Braço Sul em função dos modelos hidrológicos utilizados.

Tabela 10. Valores de CN obtidos para cada modelo hidrológico

Modelos Hidrológicos	CN
HEC-HMS	35,5
SWAT	39,3
Diferença (%)	10,7

Fonte: O Autor.

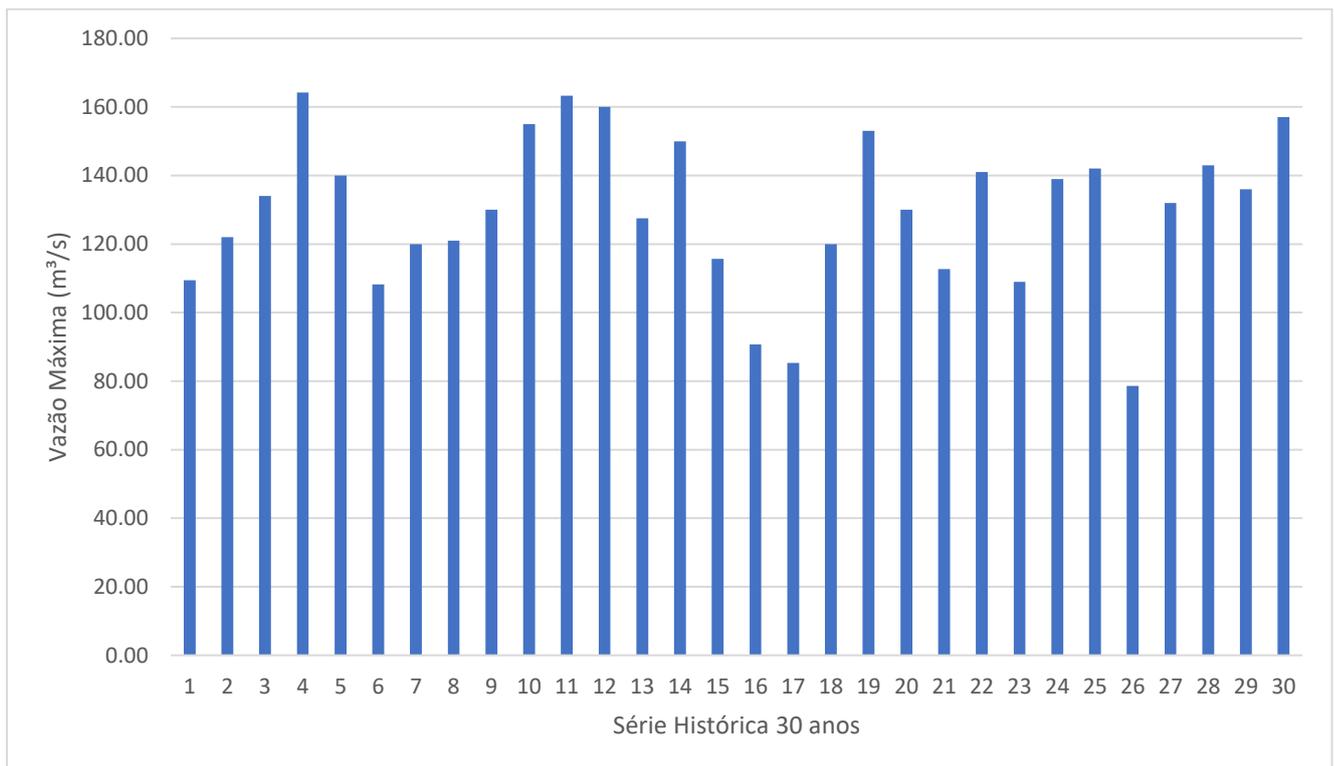
5.2. SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA PARA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL

Os resultados das simulações produzidas pelos modelos HEC-HMS e SWAT trouxeram, como resposta hidrológica para o presente estudo, série de vazões diárias para a bacia em estudo, considerando o período de simulação (1989-2018); e hidrogramas de escoamento superficial, em função das chuvas simuladas diretamente relacionadas aos períodos de recorrência selecionados em 10, 50 e 100 anos.

5.2.1. Análise das Vazões Máximas Apropriadas.

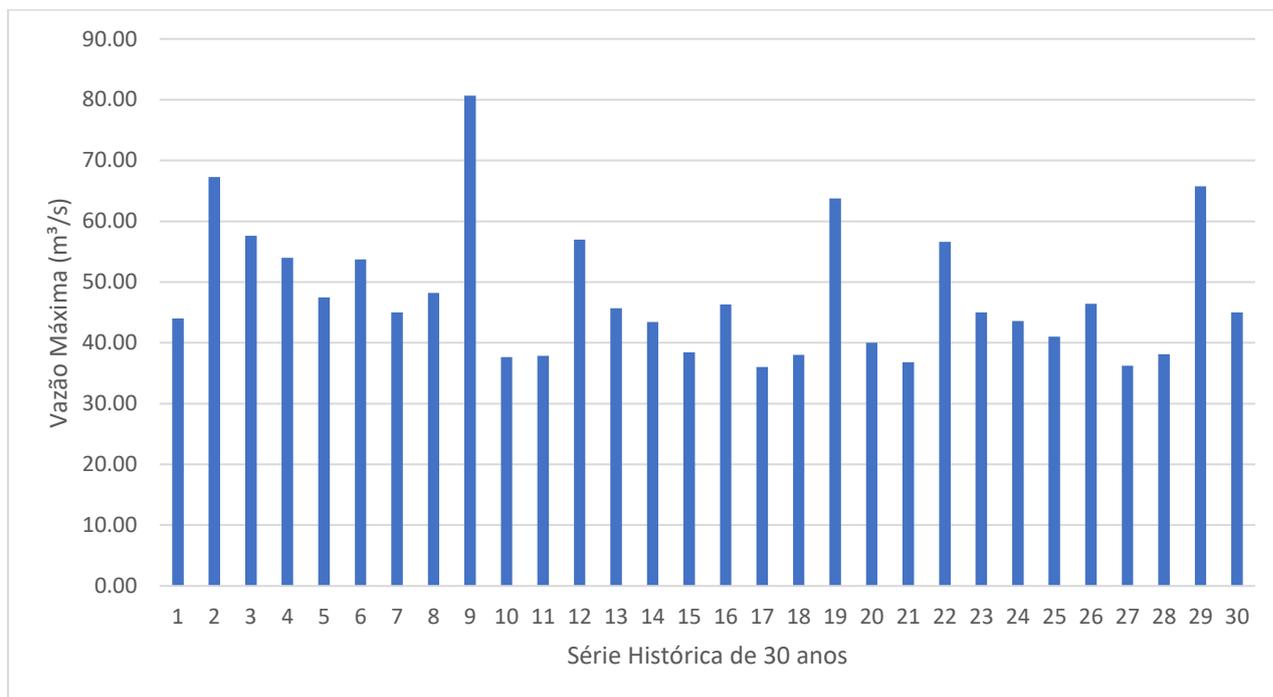
A figura 25 demonstra a série de vazões máximas simuladas pelo programa HEC-HMS, já a figura 26 expõe as vazões máximas anuais de 01 dia simuladas pelo modelo SWAT.

Figura 25. Vazões Máximas de 30 anos simuladas pelo HEC-HMS



Fonte: O Autor.

Figura 26. Vazões Máximas de 30 anos simuladas pelo SWAT



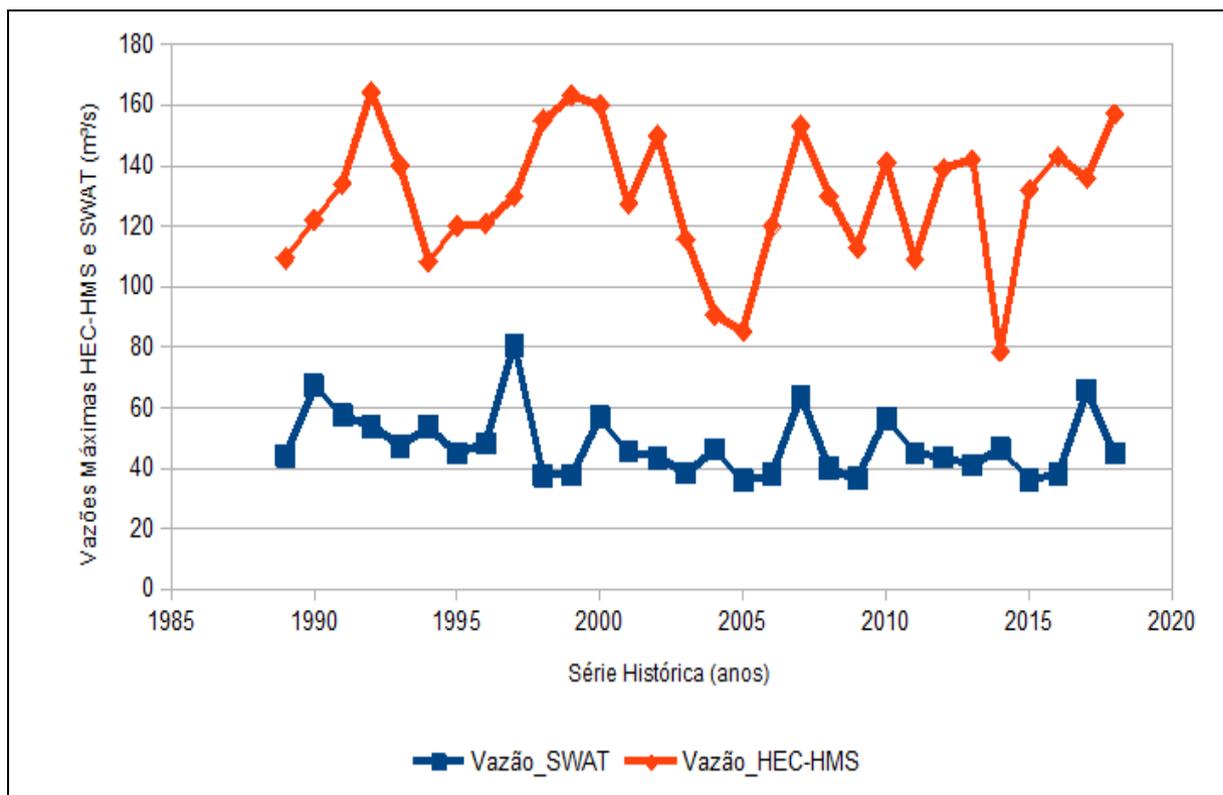
Fonte: O Autor.

Analisando a maior vazão para cada série histórica simulada por cada modelo hidrológico, observa-se que, no caso do HEC-HMS, a maior vazão simulada foi 164,20 m³/s; e, para o SWAT, foi 80,65 m³/s, resultando numa diferença percentual de 103,6%. A maior vazão simulada pelo HEC-HMS se deu no ano de 1992, já para o SWAT, a maior vazão simulada ocorreu no ano de 1997.

A diferença entre as vazões máximas obtidas pelos modelos hidrológicos fica nítida quando se observa a figura 27, que demonstra graficamente a diferença comparada entre as vazões máximas simuladas. Em razão do fato da bacia do rio Jucu Braço Sul não possuir monitoramento de longa duração das suas vazões após 1990, próximo ao núcleo urbano do município de Marechal Floriano, não é possível realizar uma análise comparada entre as vazões observadas e simuladas para o mesmo período e extrair informações sobre a diferença entre ambas, como a dispersão, por exemplo, fato que qualificaria ainda mais a análise ora proposta, a exemplo de estudo levado a cabo por Souza (2017), pois, de acordo com Jain e Sudheer (2008), a utilização de apenas um indicador estatístico, como o NSE por exemplo, não é representativo de uma boa

simulação, sendo necessária a utilização de recursos adicionais, como o citado gráfico de dispersão. Todavia, a bacia do rio Jucu Braço Sul não possui dados de vazão para o intervalo escolhido para simulação, impossibilitando o uso deste recurso complementar de análise estatística.

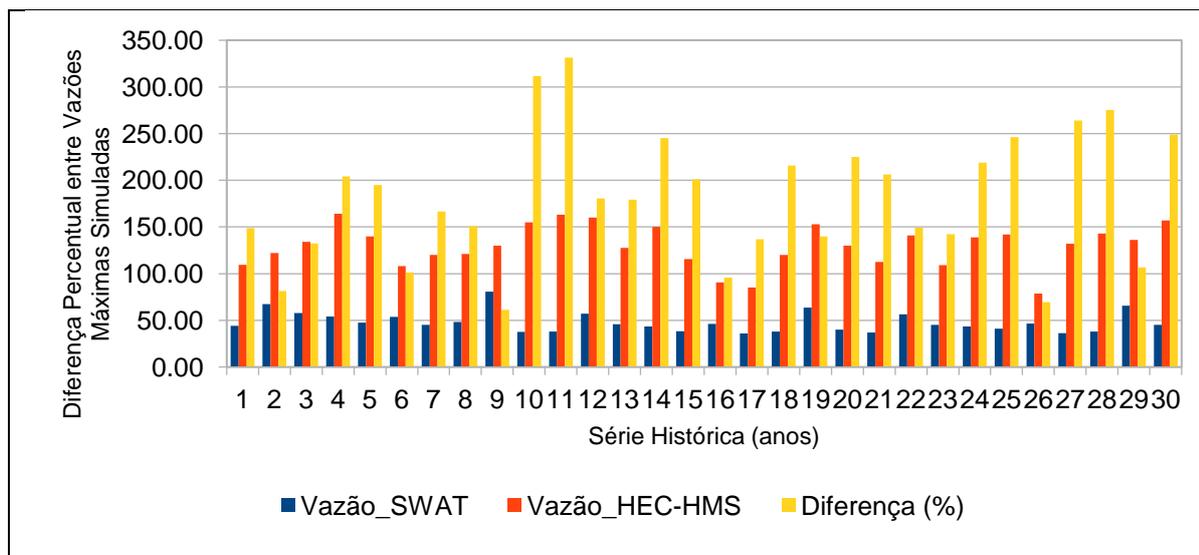
Figura 27. Vazões Máximas comparadas entre modelos HEC-HMS e SWAT



Fonte: O Autor.

Analisando o gráfico exposto acima, é notório que o modelo HEC-HMS superestima as vazões máximas em relação ao modelo SWAT considerando toda a série histórica de 30 anos de vazões máximas anuais de um dia. Esta diferença pode ser observada, também, no gráfico apresentado na figura 28, onde se notam as diferenças entre vazões máximas para cada ano simulado. A diferença média, considerando toda amostra de vazões, é de 181%.

Figura 28. Diferenças percentuais entre vazões máximas anuais



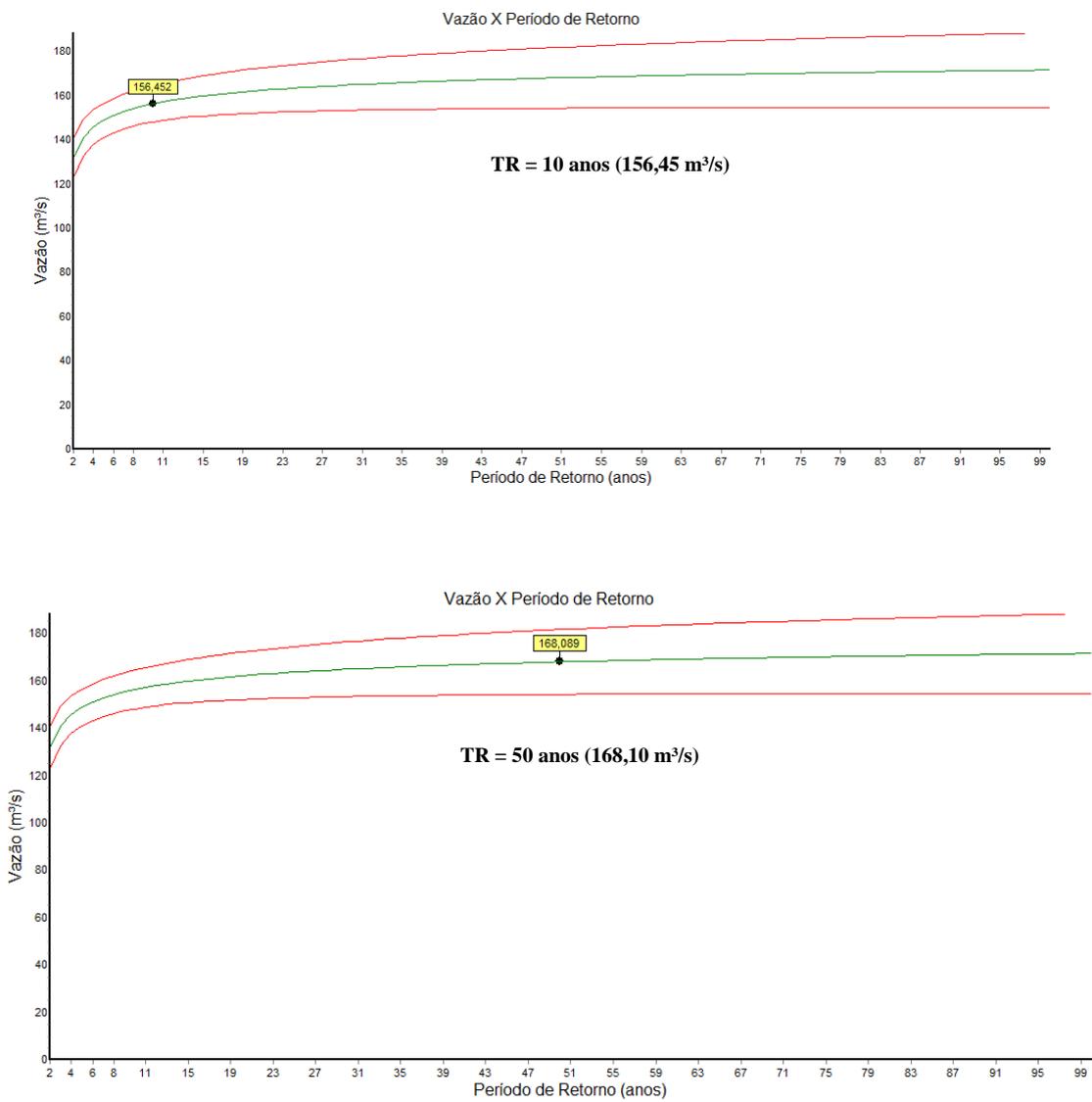
Fonte: O Autor.

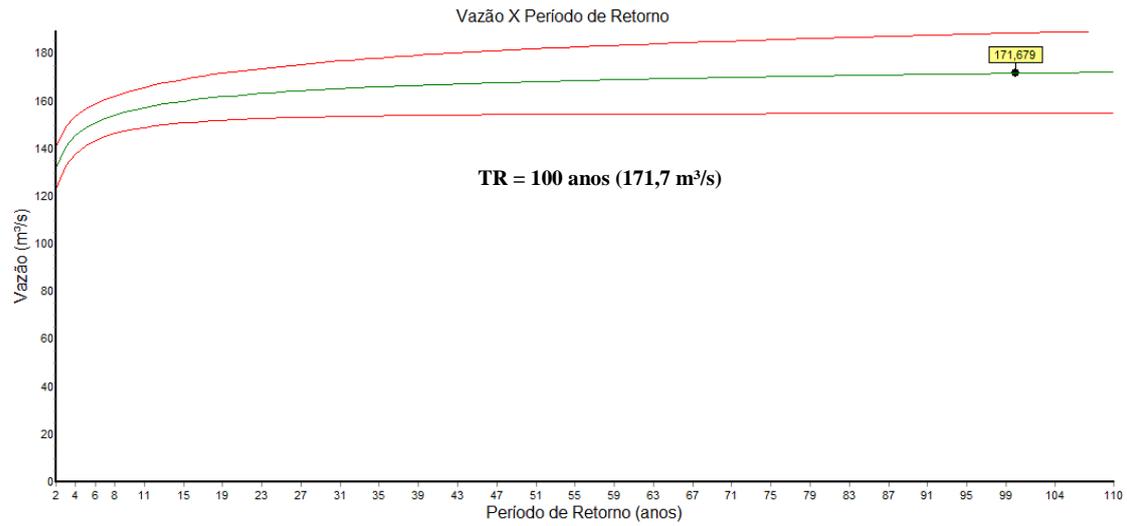
5.2.2. Vazões de pico associadas a períodos de retorno

A análise estatística elaborada pelo programa SisCAH 1.0 produziu vazões de pico associadas a frequências excedidas. Considerando o modelo HEC-HMS, todas as vazões de pico tiveram melhor ajuste estatístico com o coeficiente de correlação Pearson 3, independente do período de retorno adotado. Já para o SWAT, o melhor ajuste estatístico encontrado pelo SisCAH foi a distribuição LogNormal II, para todos os períodos de retorno considerados.

A figura 29 apresenta ajuste da distribuição estatística de Pearson 3 realizada pelo programa SisCAH, às vazões máximas anuais do rio Jucu Braço Sul em Marechal Floriano, obtidas por meio do programa HEC-HMS para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, enquanto que a figura 30 apresenta para o mesmo período de recorrência utilizando as vazões máximas anuais obtidas com a aplicação do programa SWAT, o ajuste de distribuição LogNormal II.

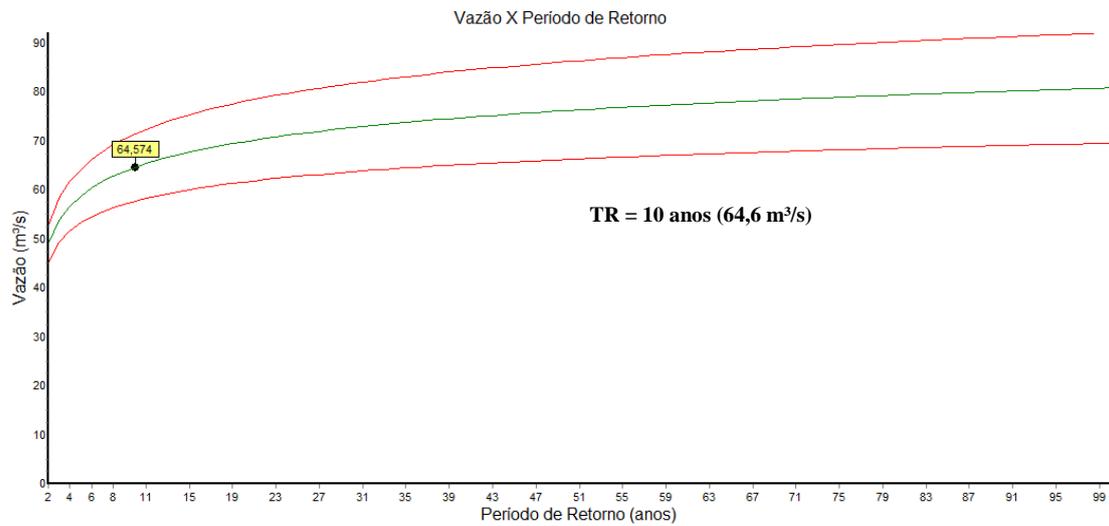
Figura 29. Ajuste da distribuição de Correlação Pearson 3 aos dados de vazões máximas anuais obtidas utilizando o programa HEC-HMS associadas a diferentes períodos de retorno.

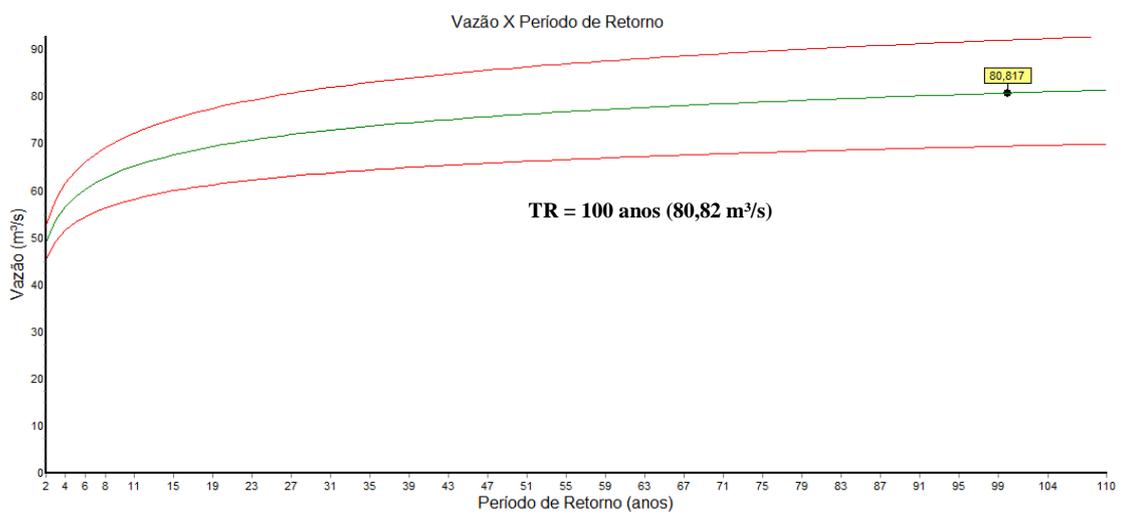
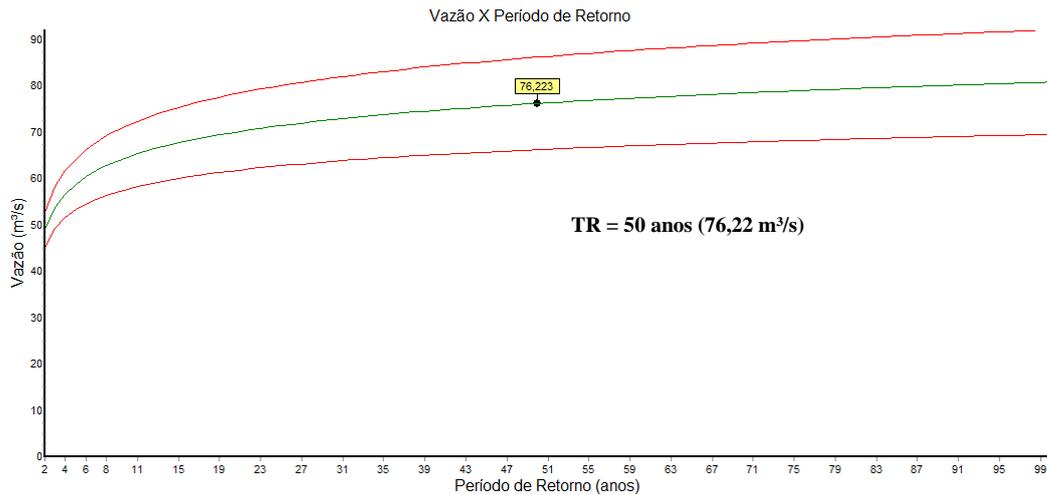




Fonte: Dados organizados pelo autor.

Figura 30. Ajuste da distribuição LogNormal II aos dados de vazões máximas anuais obtidas utilizando o programa SWAT associadas a diferentes períodos de retorno





Fonte: Dados organizados pelo autor.

As vazões simuladas pelo modelo SISCAN utilizando as vazões máximas anuais simuladas pelo HEC-HMS variaram de 156,45 m³/s, para período de retorno de 10 anos, até 171,7 m³/s, vazão associada ao período de retorno de 100 anos.

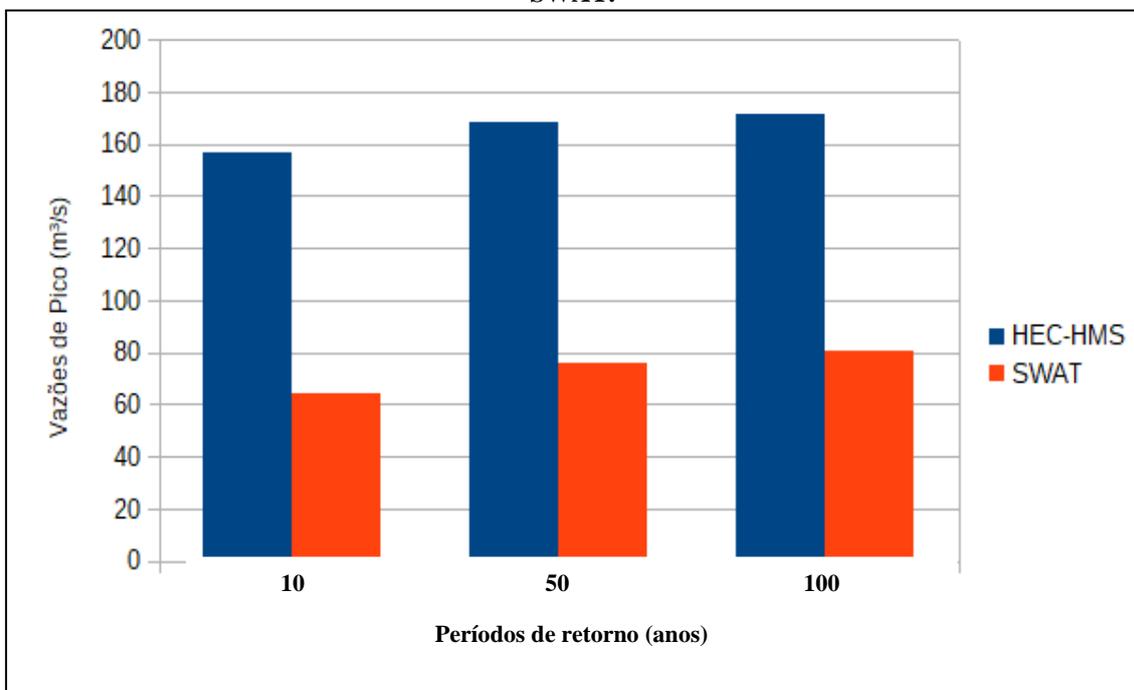
Por outro lado, as vazões obtidas utilizando as vazões máximas anuais simuladas pelo modelo SWAT, variaram de 64,6 m³/s (período de retorno de 10 anos) até 80,82 m³/s, para período de retorno de 100 anos, conforme a tabela 11 e a figura 31 demonstram.

Tabela 11. Análise comparativa entre vazões simuladas pelo modelo SISCAH para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos utilizando dados de vazão simuladas pelos modelos HEC-HMS e SWAT

Período de retorno (anos)	Vazão (m ³ /s)	
	Modelo HEC-HMS	Modelo SWAT
10	156,45	64,6
50	168,10	76,22
100	171,7	80,82

Fonte: O Autor.

Figura 31. Gráfico comparativo entre vazões simuladas pelo modelo SisCAH para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos utilizando dados de vazão simuladas pelos modelos HEC-HMS e SWAT.



Fonte: O Autor.

As vazões com períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, simuladas com dados advindos do modelo HEC-HMS apresentaram uma amplitude de 15,25 m³/s, com uma diferença percentual em 9,75% entre a maior e a menor vazão de pico simulada. Já para as vazões

simuladas utilizando os dados advindos do modelo SWAT apresentaram amplitude de 16,22 m³/s e diferença percentual de 25% entre as vazões de 10 e 100 anos.

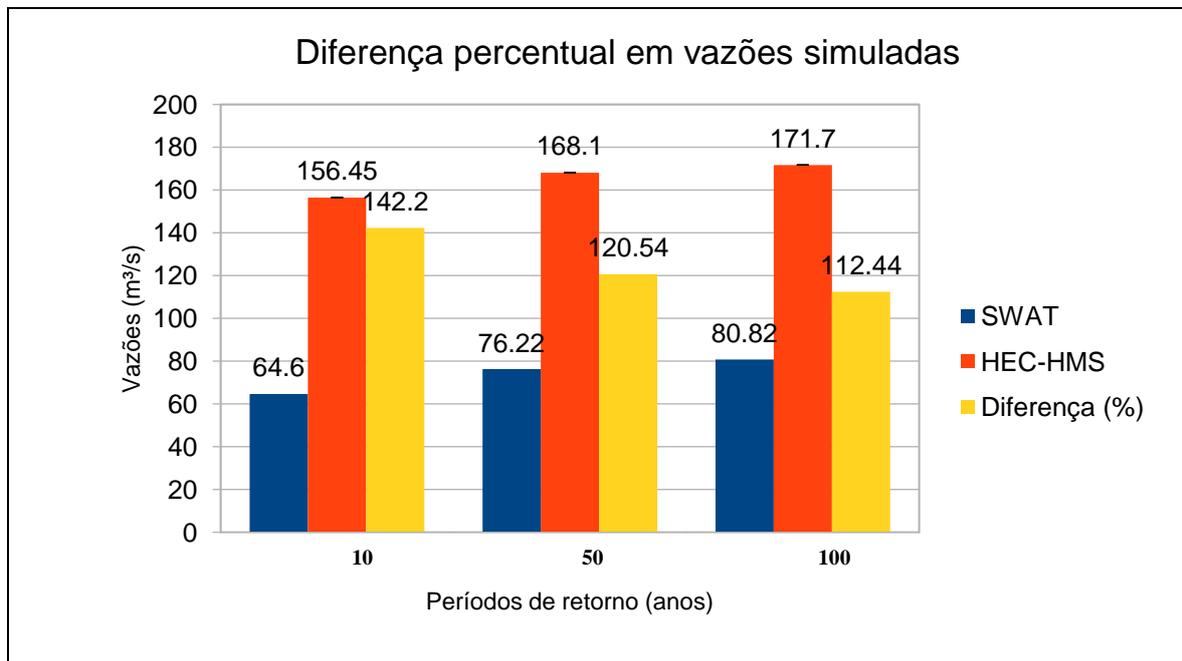
As vazões simuladas pelo modelo SWAT resultaram em vazões menores em relação ao HEC-HMS para todos os períodos de retorno analisados. Observa-se que nas vazões simuladas para o período de retorno de 100 anos, a diferença é menor entre ambas, de 112,5%, enquanto a vazão para o período de retorno de 10 anos, apresentou diferença percentual de 142,2%. Fato que segue uma tendência geral em que chuvas com períodos de retorno excepcionais tendem a produzir diferenças de vazões menos significativas, restringindo as diferenças mais significativas aos períodos de retorno menores, como frequências de 5 e 10 anos, por exemplo. A tabela 12 e a figura 32 demonstram as diferenças percentuais entre as vazões simuladas.

Tabela 12. Análise comparativa entre as vazões de pico simuladas pelo SisCAH para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos utilizando dados de vazão simuladas pelos modelos HEC-HMS e SWAT, apresentando diferenças percentuais.

Período de retorno (anos)	Vazão (m ³ /s)		
	Modelo HEC- HMS	Modelo SWAT	Diferença Percentual (%)
10	156,45	64,6	142,2%
50	168,1	76,22	120,5%
100	171,7	80,82	112,5%

Fonte: O Autor.

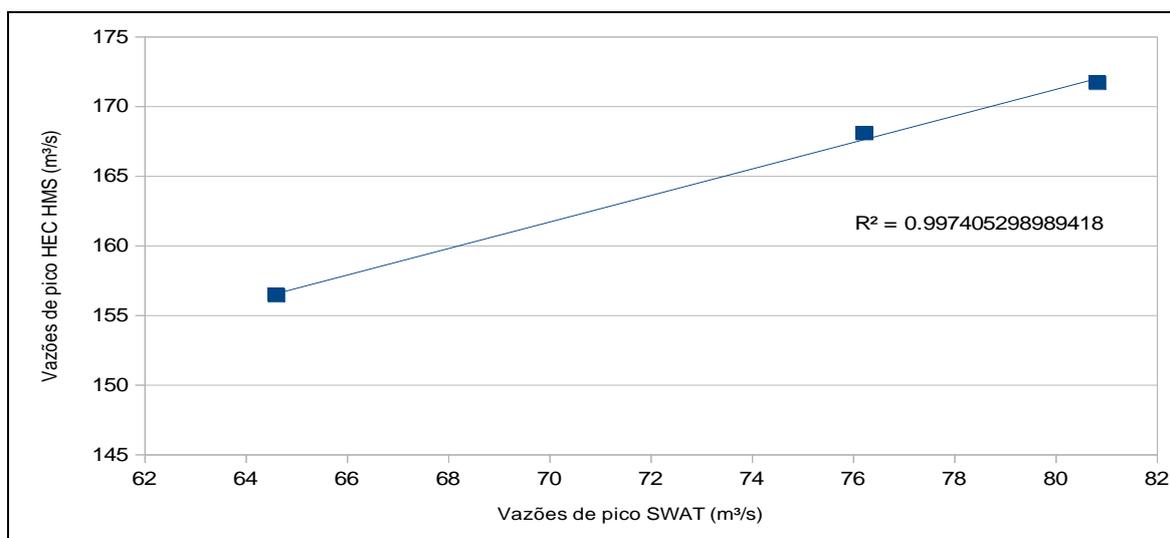
Figura 32. Gráfico comparativo entre as vazões de pico simuladas pelo SisCAH para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos utilizando dados de vazão simuladas pelos modelos HEC-HMS e SWAT, apresentando diferenças percentuais.



Fonte: O Autor.

A relação entre as vazões de 10, 50 e 100 anos apropriadas com dados das simulações dos dois modelos apresenta uma linearidade com coeficiente de correlação (R^2) muito alto (0,997), conforme pode ser visualizado na figura 33.

Figura 33. Coeficiente de correlação entre as vazões de pico simuladas

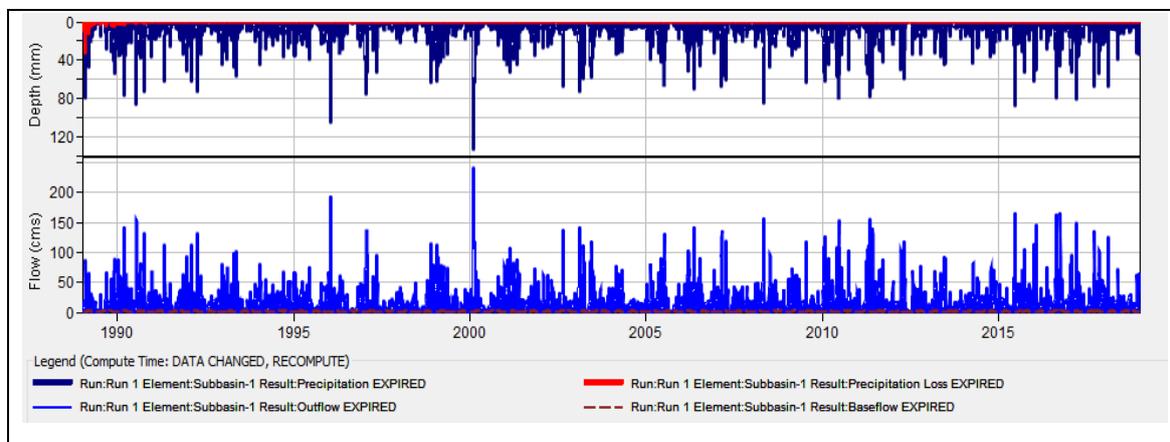


Fonte: O autor.

5.2.3. Hidrogramas Produzidos pelas Simulações

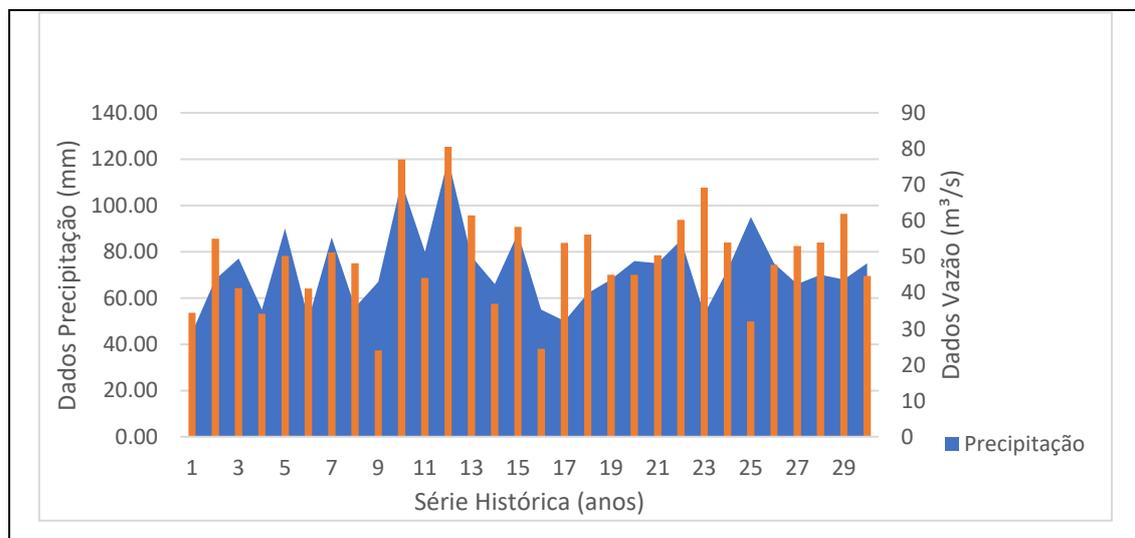
Os hidrogramas de cheias foram apropriados com base nas simulações executadas pelos modelos hidrológicos e podem ser observados nas figuras 34 e 35. O hidrograma produzido pelo modelo HEC-HMS foi retirado diretamente da interface do programa computacional, enquanto os dados de saída do programa SWAT foram levados a uma planilha eletrônica para a elaboração da figura 35.

Figura 34. Hidrograma de vazões máximas de série histórica para o modelo HEC-HMS



Fonte: O Autor.

Figura 35. Hidrograma de vazões máximas de série histórica para o modelo SWAT



Fonte: O Autor.

Diante das informações, tabelas e figuras destacadas acima, foi possível realizar as seguintes considerações:

- As simulações do SWAT produziram vazões de pico que variaram de 64,6 m³/s (TR = 10 anos) a 80,82 m³/s (TR = 100 anos). Já o programa HEC-HMS produziu vazões que variaram entre 156,45 m³/s (TR = 10 anos) até 171,7 m³/s (TR = 100 anos). A diferença média da série histórica de vazões máximas considerada na pesquisa é de aproximadamente 180%. As vazões máximas do SWAT apresentam uma amplitude de 44,65 m³/s, com uma diferença percentual de 124%. Para o HEC-HMS, a amplitude encontrada é de 85,6 m³/s, com uma diferença percentual de 109%, considerando a série histórica de 30 anos de vazões máximas;
- A diferença observada entre as vazões de pico encontra explicação não apenas na diferença do número de CN da bacia, pois quanto maior o CN, mais escoamento superficial. As diferenças residem, sobretudo, na própria estrutura dos modelos hidrológicos considerados neste estudo. O HEC-HMS é um modelo discreto, semi-conceitual, determinístico e concentrado, ou seja, além de requerer poucos parâmetros para a simulação, o modelo elabora uma média entre os parâmetros hidrológicos e físicos da bacia hidrográfica e extrapola esta média para todas as áreas da bacia de maneira uniforme, em termos práticos, uma chuva precipitada num certo ponto de uma bacia hidrográfica possui a interpretação hidrológica de que toda a bacia e áreas contíguas contribuem de maneira igualitária para formação do escoamento. Já o SWAT é um modelo contínuo, semi-conceitual, de base física e semi-distribuído, que considera diversos parâmetros hidrológicos, climáticos e físicos de uma bacia hidrográfica. O SWAT considera o tipo e uso de solo e topografia, além de estabelecer o valor da curva número para cada tipo e uso do solo. Esses fatores são determinantes na produção e direção do fluxo de escoamento numa bacia, na retenção e taxa de infiltração, considerando cada trecho da bacia com propriedades hidrológicas e climáticas diferenciadas (discretização espacial da bacia), o que interfere no escoamento final no exutório.

As diferenças entre as vazões de pico produzidas pelos modelos concentrado e semi-distribuído foram comparadas entre si. Há necessidade de se estabelecer se essas diferenças produzirão consideráveis diferenças na resposta hidráulica do trecho urbano da bacia do rio Jucu Braço Sul (núcleo urbano de Marechal Floriano), uma vez que o relevo atua como fator limitante à elaboração das manchas de inundação, sendo que relevos com vales pronunciados, encaixados ou ondulados tendem a produzir, para grandes variações de vazão, pequenas variações na extensão da mancha de inundação, ao passo que relevos planos ou levemente ondulados produzem grande diferença na extensão das manchas de inundação, mesmo para pequenas diferenças de vazão. O que se pretende, na próxima etapa deste estudo, é a verificação das respostas hidráulicas e se, mesmo havendo discrepância entre as vazões de pico dos dois modelos hidrológicos, há diferenças significativas na elaboração das manchas de inundação.

5.3. RESPOSTA HIDRÁULICA PARA O TRECHO URBANO DA BACIA DO RIO JUCU BRAÇO SUL.

A simulação hidráulica foi realizada com uso do modelo HEC RAS 5.0.7, cuja interface permite a construção 2D da geometria do terreno a ser modelado. Contudo, optou-se pela construção da geometria 1D, traçando-se os elementos River, Bank Lines e Cross Sections do setor de interesse. Em prosseguimento, optou-se por rodar o modelo em fluxo permanente com característica mista, isto é, supercrítico e subcrítico. Desta maneira, a condição de contorno foi estabelecida de montante para jusante, definindo-as como iguais às linhas de energia do rio (slope do talvegue), indo ao encontro de pesquisas que propuseram mesmos caminhos metodológicos como Andrade (2017) e Luz (2017).

O número de Manning foi inserido de acordo com as características das margens direita e esquerda e fundo do rio para cada trecho considerado. Foram criados dois planos de trabalho para inserção das vazões de pico para o HEC HMS e para o SWAT no modo Steady Flow, uma vez que não houve discretização das vazões, considerando os períodos de recorrência em 10, 50 e 100 anos. Após rodar o modelo, foram apropriados os

resultados de elevação da linha d'água, velocidade, profundidade e extensão da área inundada, cujos mesmos serão discutidos no que se segue.

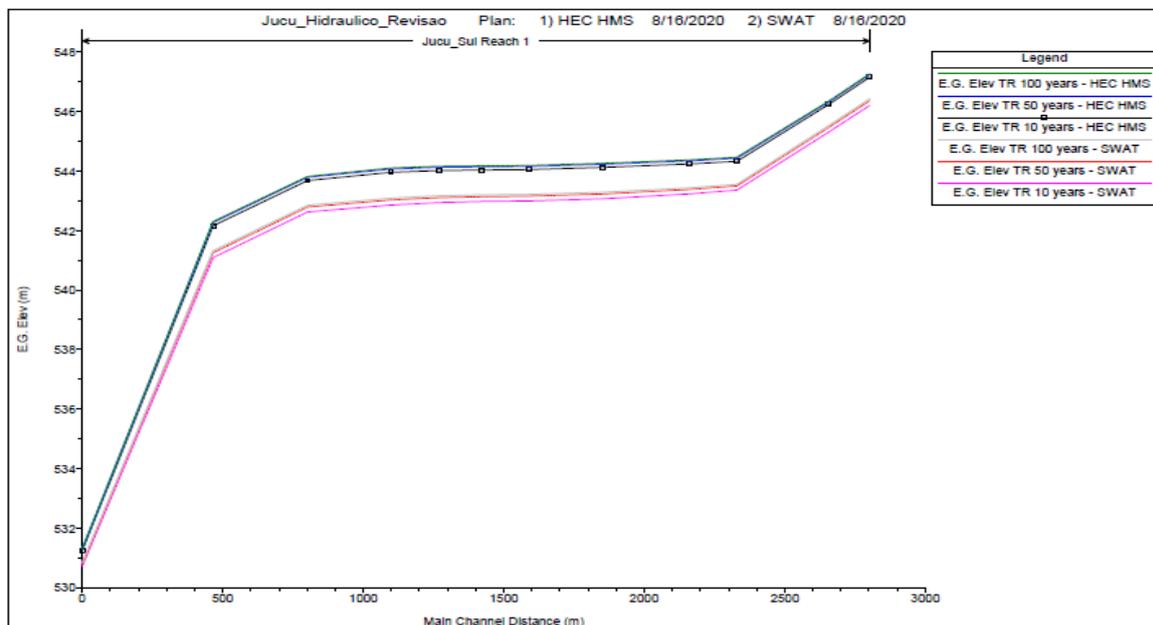
5.3.1. Elevação da Área de Superfície, Profundidade Máxima e Velocidade total do fluxo.

A elevação da superfície de água está ilustrada pela figura 37 e relaciona os mesmos períodos de frequência e vazões. Em trechos onde o relevo é menos ondulado, há tendência em produzir maiores diferenças entre as elevações da superfície de água para as duas situações simuladas (vazões de pico simuladas pelo HEC HMS e SWAT). Já aonde o relevo é fortemente dissecado, com encaixe de vale, como demonstra o gráfico da figura 36, há redução da diferença na elevação da superfície da água. Em certos trechos da calha do Jucu Braço Sul observa-se que o entalhamento dos vales produz diferenças ínfimas entre as elevações da superfície d'água.

Como forma de exemplificar o escrito acima, foram selecionadas três (03) cross sections existentes no trecho urbano do rio Jucu Braço Sul em Marechal Floriano de onde se abstraiu informações sobre elevações máximas da superfície de água, adotando-se TR de 10 anos, frequência em que as diferenças são mais pronunciadas. A primeira cross section foi a 6155, situada a montante, com relevo mais encaixado. Apresentou elevação, para a vazão HEC HMS com TR de 10 anos, de 545,66 m e, para o SWAT, uma elevação de 544,84 m, apresentando diferença real de 0,82 m e percentual de 0,15%.

A segunda cross section (4756), localizada na parte média da calha do Jucu Braço Sul, para as mesmas condições de vazões e período de retorno, apresentou uma elevação de 544,04 m (HEC HMS) e 542,98 m (SWAT), com diferença real de 1,06 m e percentual de 0,20%. Já a terceira cross section (86), localizada próxima ao limite do domínio do modelo, também considerando as mesmas condições de vazões e período de retorno, apresentou elevação, para a vazão do HEC HMS, de 531,25 m e, para a vazão do SWAT, de 530,73 m, com diferença real de 0,52 m e percentual de 0,09%. A tabela 13 reúne essas informações.

Figura 36. Relação entre elevação de superfície de água e períodos de retornos para os modelos HEC HMS e SWAT no trecho urbano do rio Jucu Braço Sul



Fonte: HEC RAS, 2020.

Tabela 13. Diferenças de elevação na superfície de água por trecho

Cross Sections	Elevação (m)/ TR		Diferença (%)	
	10 anos – HEC HMS	10 anos - SWAT	Real (m)	Percentual (%)
8803	545,66	544,84	0,82	0,15%
4756	544,04	542,98	1,06	0,20%
86	531,25	530,73	0,52	0,09%

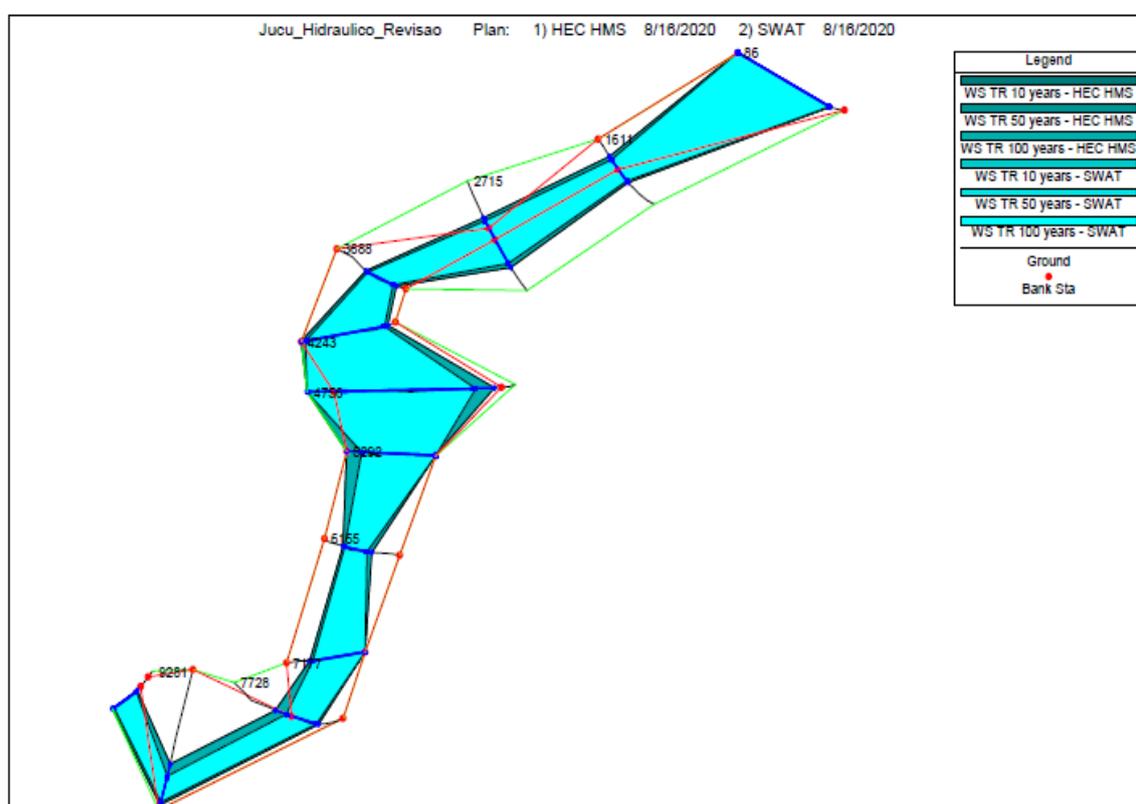
Fonte: O autor.

Considerando todo o trecho urbano do Jucu Braço Sul, a elevação atingiu 547,16 m para TR de 10 anos até 547,27 m para TR de 100 anos, para as vazões calculadas com o modelo HEC HMS. Para as vazões calculadas com o modelo SWAT, as elevações apresentaram variações de 546,21 m para TR de 10 anos até 546,43 m para TR de 100 anos. A diferença

entre as elevações, para os períodos de recorrência de 10 e de 100 anos, foi de 0,11 m ou 0,02% e 0,22 m ou 0,04%, respectivamente.

A figura 37 demonstra em formato 3D o relevo por onde há fluxo do rio Jucu Braço Sul dentro do trecho urbano de Marechal Floriano. Já a figura 38 ilustra as cross sections utilizadas no exemplo acima.

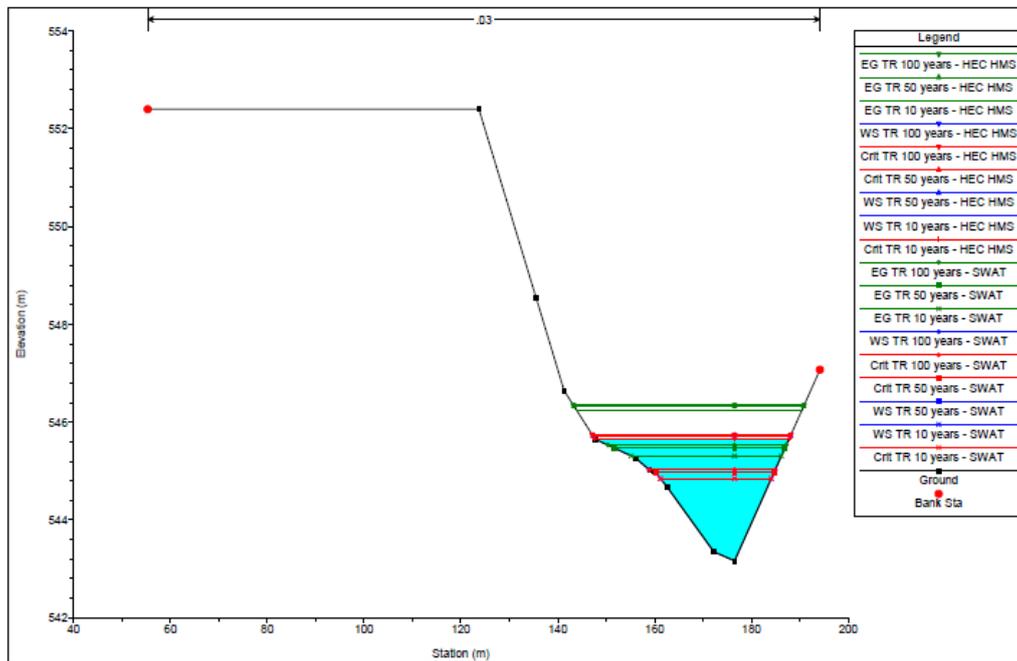
Figura 37. Perspectiva 3D do relevo do trecho urbano do rio Jucu Braço Sul



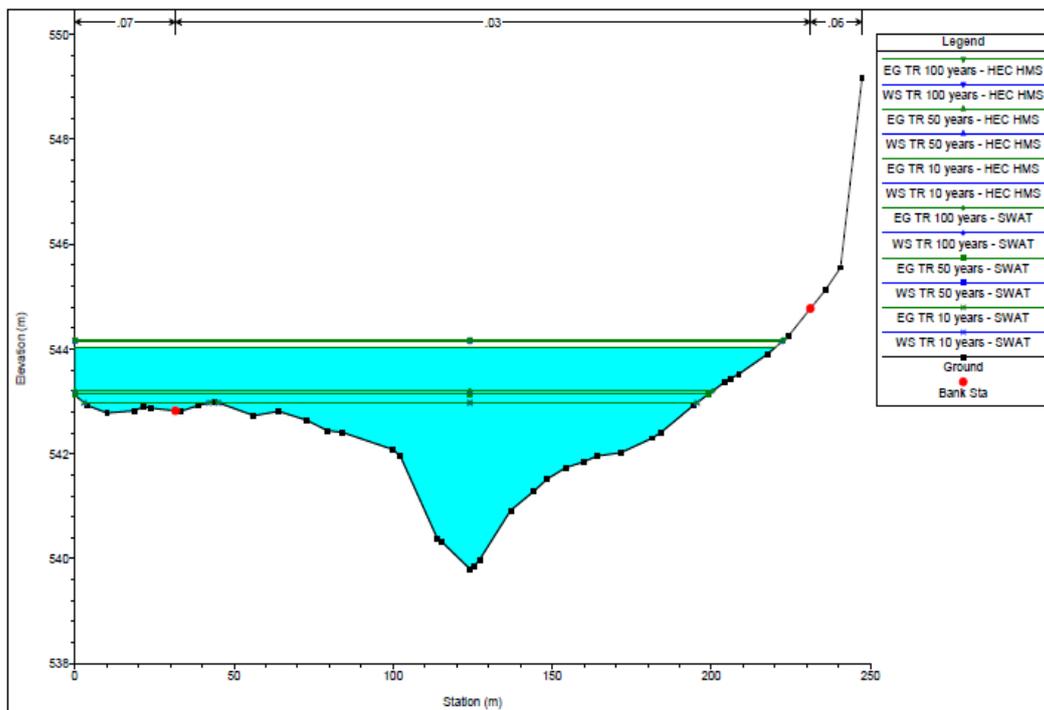
Fonte: HEC RAS, 2020.

Figura 38. Cross sections dos trechos alto, médio e baixo do Braço Sul em Marechal Floriano

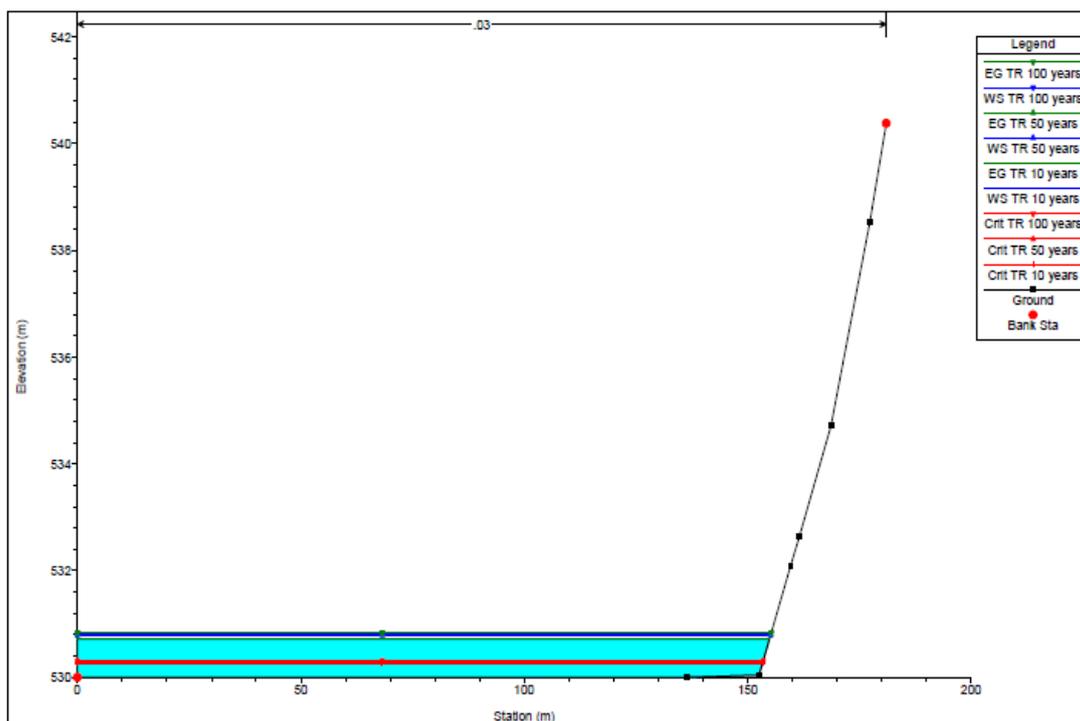
Cross Section 8803



Cross Section 4756



Cross Section 86



Fonte: HEC RAS, 2020.

A profundidade também é um importante elemento de análise hidráulica e foi considerada na presente pesquisa para comparar a resposta do modelo hidráulico às vazões calculadas pelos modelos SWAT e HEC HMS. A figura 40 demonstra a relação das profundidades ao longo do comprimento do trecho urbano do rio Jucu Braço Sul.

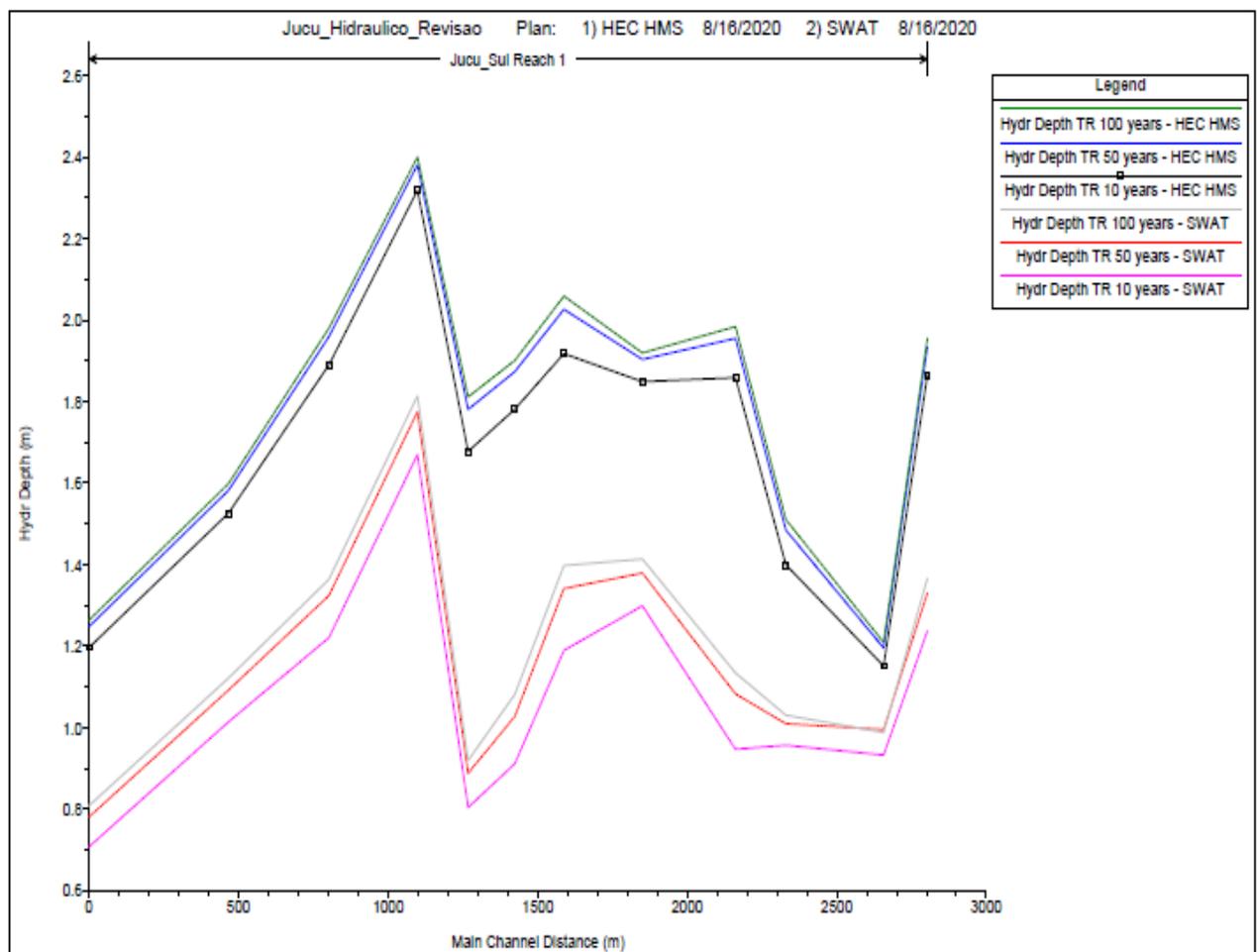
Para as vazões calculadas pelo HEC HMS, a profundidade média simulada pelo modelo hidráulico, considerando o trecho de maior profundidade hidráulica observada, foi de 2,32 metros para TR de 10 anos, enquanto que, para vazões calculadas pelo SWAT, a profundidade média alcançada foi de aproximadamente 1,67 metros para TR de 10 anos, com uma diferença real de 0,65 m e percentual de 46,1%, conforme pode ser observado na figura 39.

Considerando a profundidade máxima do canal simulada pelo HEC-RAS para as vazões simuladas pelo HEC HMS, têm-se valores de 4,23 m para TR de 10 anos e 4,37 m para

TR de 100 anos. Para as vazões simuladas pelo SWAT, tem-se profundidade máxima de 3,17 m para TR de 10 anos e 3,40 m para TR de 100 anos, como pode ser observado na figura 40.

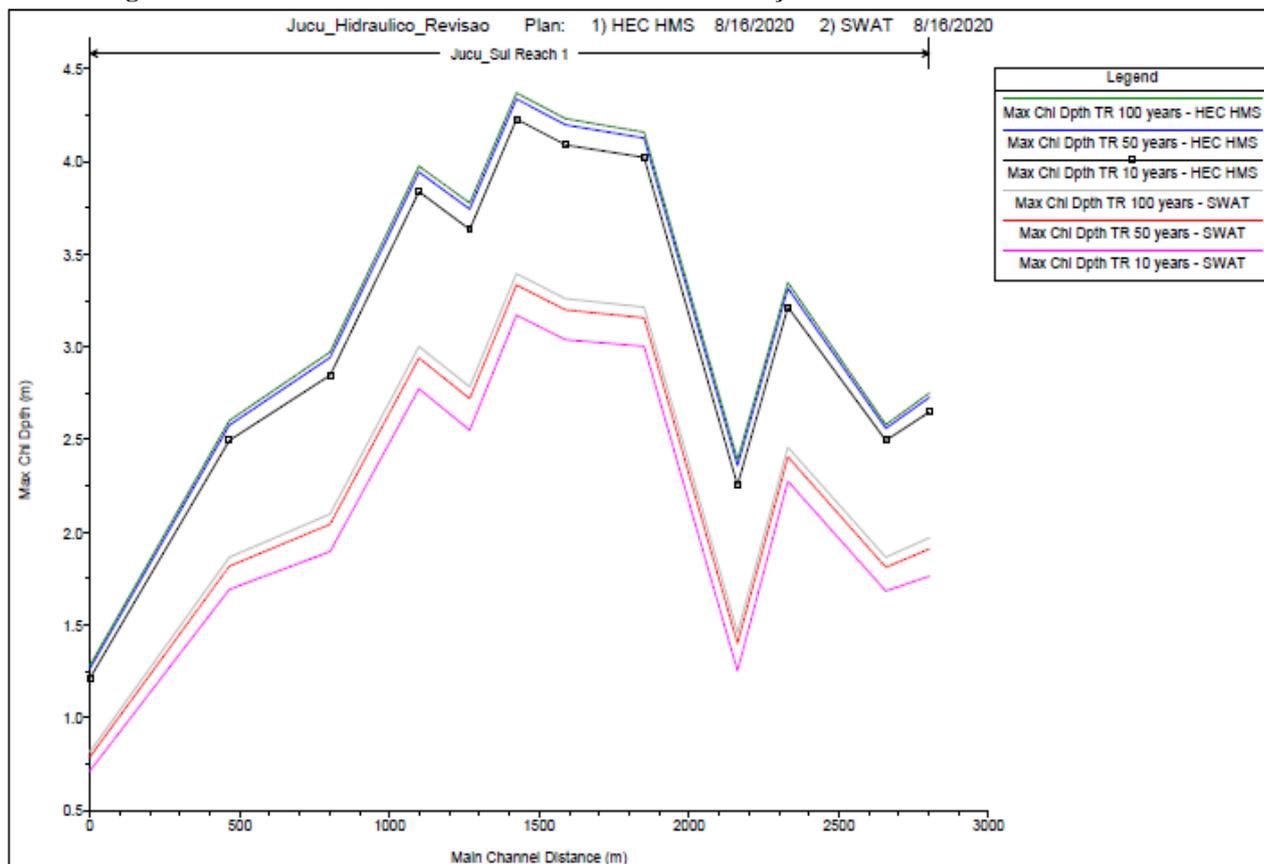
A diferença entre as profundidades máximas simuladas foi de 1,06 m e percentual de 33,43% entre as vazões de pico para TR de 10 anos; e 0,97 m e percentual de 28,52% para vazões com TR em 100 anos.

Figura 39. Profundidade hidráulica rio Jucu Braço Sul em seu trecho urbano para vazões calculadas pelos modelos HEC HMS e SWAT



Fonte: HEC RAS, 2020.

Figura 40. Profundidade máxima no canal do rio Jucu Braço Sul em seu trecho urbano



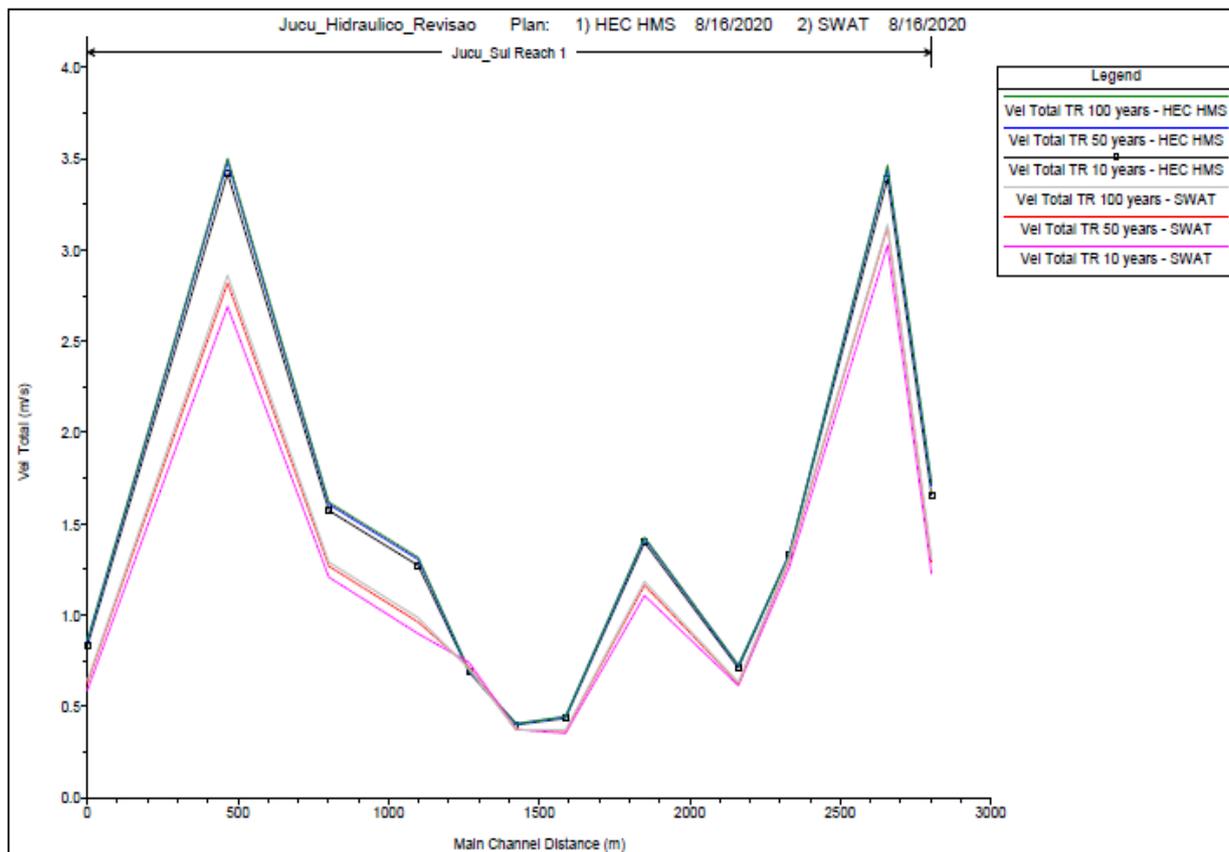
Fonte: HEC RAS, 2020.

O HEC RAS fornece, também, as velocidades no canal de drenagem para cada seção transversal, além das velocidades das margens esquerda e direita e velocidade total. Para fins comparativos, foi apropriada a velocidade total, que engloba todas as velocidades citadas acima.

Para as vazões fornecidas pelo HEC HMS, as velocidades máximas variaram de 3,42 m/s para TR de 10 anos até 3,50 m/s para TR de 100 anos. Já para as vazões do SWAT, houve variação de 2,69 m/s para TR de 10 anos até 2,86 m/s para TR de 100 anos. A figura 41 ilustra as variações de velocidade total ao longo do trecho urbano considerado na simulação. Em relação às diferenças percentuais observadas, a velocidade, para vazões apropriadas pelo HEC HMS, teve uma variação de 27,13% para TR de 10 anos com diferença de 0,73 m/s, e 22,37% para TR de 100 anos, com diferença de 0,64 m/s.

A tabela 14 reúne as informações sobre elevação de superfície de água, profundidade e velocidade para o trecho urbano sob influência do rio Jucu Braço Sul.

Figura 41. Velocidade total simulada pelo HEC RAS para o trecho urbano de Marechal Floriano



Fonte: HEC RAS, 2020.

Tabela 14. Elevação, profundidade e velocidade no trecho urbano do rio Jucu Braço Sul

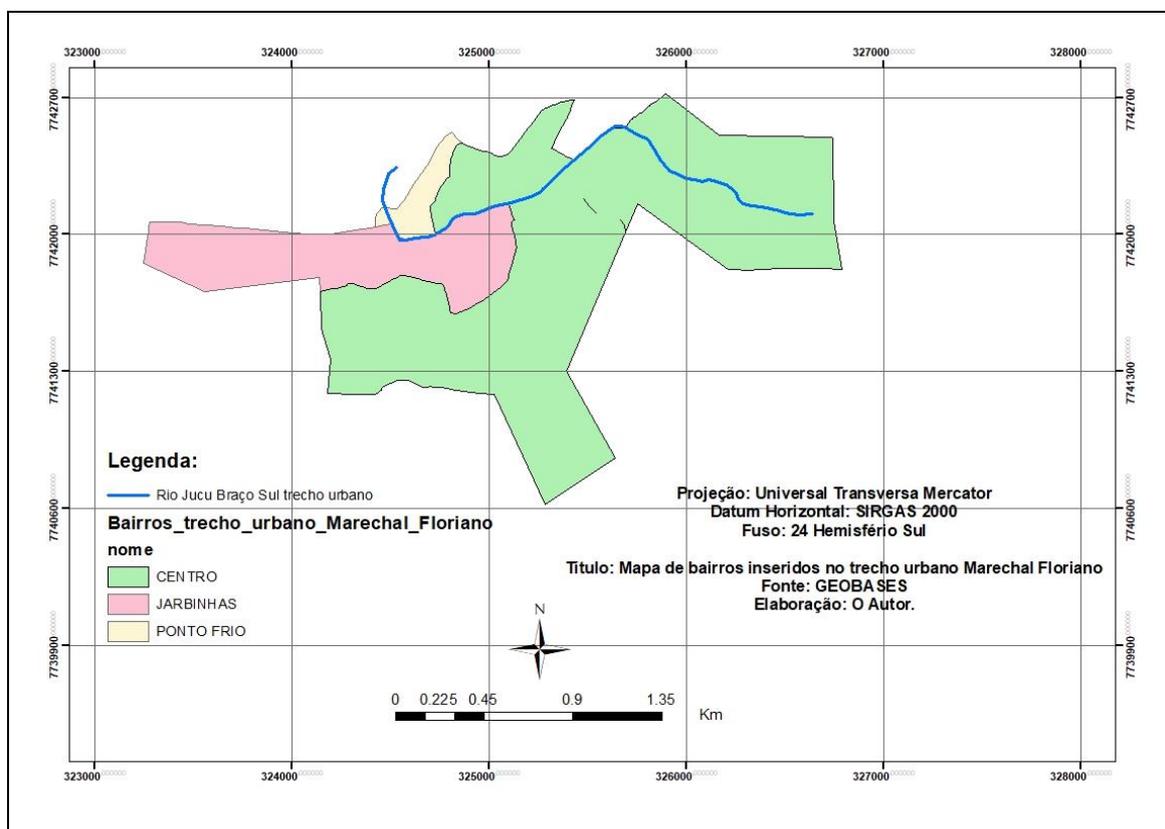
Parâmetros	HEC HMS			SWAT		
	Período de Retorno (anos)					
Hidráulicos	10	50	100	10	50	100
Elevação (m)	547,16	547,24	547,27	546,2	546,36	546,42
Profundidade máxima (m)	4,23	4,34	4,37	3,17	3,33	3,40
Velocidade total (m/s)	3,42	3,48	3,50	2,69	2,82	2,86

Fonte: O autor.

5.3.2. Manchas de Inundação para o Setor Urbano de Marechal Floriano.

A análise das manchas de inundação ocorreu como já explicada anteriormente, apenas no trecho urbano que compreende a área de influência direta do rio Jucu Braço Sul, desconsiderando, portanto, trechos em que há contribuição de tributários que deságuam na área urbana de Marechal Floriano. Assim, apenas alguns bairros foram considerados na análise, conforme pode ser observado pela figura 42, a saber, Centro, Jarbinhas e Ponto Frio.

Figura 42. Mapa de bairros inseridos no trecho urbano de Marechal Floriano



Fonte: O autor.

As manchas de inundação apresentaram variações consideráveis em termos de área ocupada, comparando-se as respostas hidráulicas para as vazões de pico do mesmo modelo hidrológico e, também, quando se comparou as mesmas respostas para vazões de pico entre os modelos hidrológicos considerados na presente pesquisa.

As manchas produzidas de acordo com as vazões de pico apropriadas pelo modelo HEC HMS variaram de 20,85 ha para TR de 10 anos até 24 ha para TR de 100 anos. Já para as manchas produzidas de acordo com as vazões de pico apropriadas pelo modelo SWAT, a variação foi de 17,2 ha para TR de 10 anos até 20,2 ha para TR de 100 anos. A tabela 15 ilustra essas diferenças apontadas.

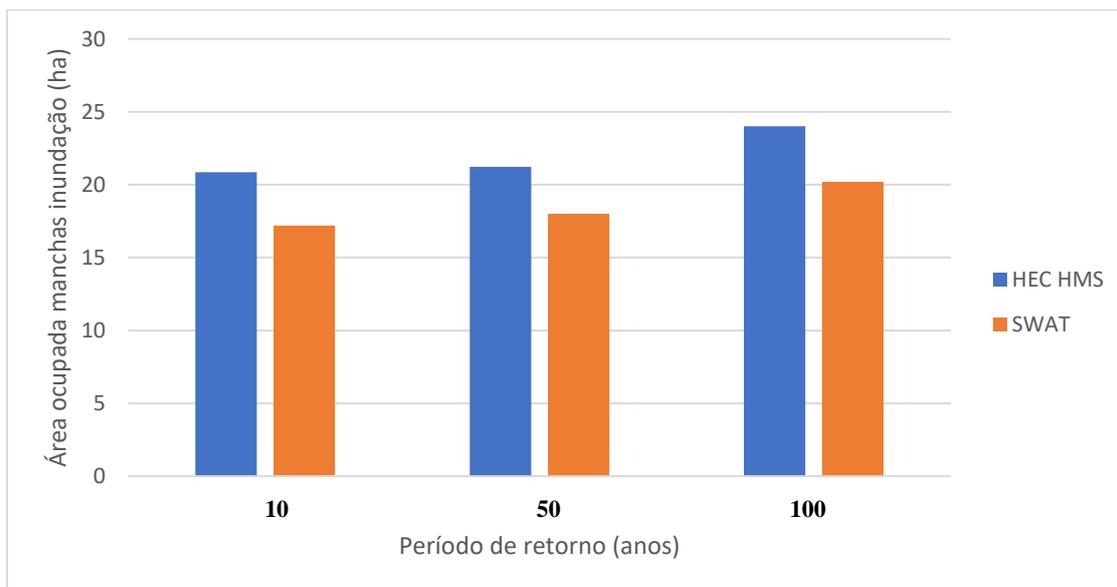
Tabela 15. Variações de áreas das manchas de inundação

Área das manchas de inundação em função dos modelos hidrológicos (ha)	Período de Retorno (anos)		
	10	50	100
HEC HMS	20,85	21,22	24
SWAT	17,2	18	20,2
Diferença (%)	21,22	17,7	18,8

Fonte: O autor.

O gráfico da figura 43 demonstra visualmente a diferença que, considerando a discrepância das vazões de pico inseridas nas simulações hidráulicas, pode ser classificada como considerável para predição de cenários de cheias, juntamente com as variações em porcentagem dos limites de inundação para cada período de recorrência e entre os modelos hidrológicos. Considerando as diferenças reais produzidas pelas vazões dos modelos hidrológicos, tem-se para TR de 10 anos, uma diferença de 3,65 ha; para TR de 50 anos, 3,22 ha; e para TR de 100 anos uma diferença de 3,8 ha. A maior diferença observada reside no período de recorrência de 10 anos e a menor diferença encontrada está no período de recorrência de 50 anos.

Figura 43. Comparativo entre áreas de manchas de inundação para Marechal Floriano

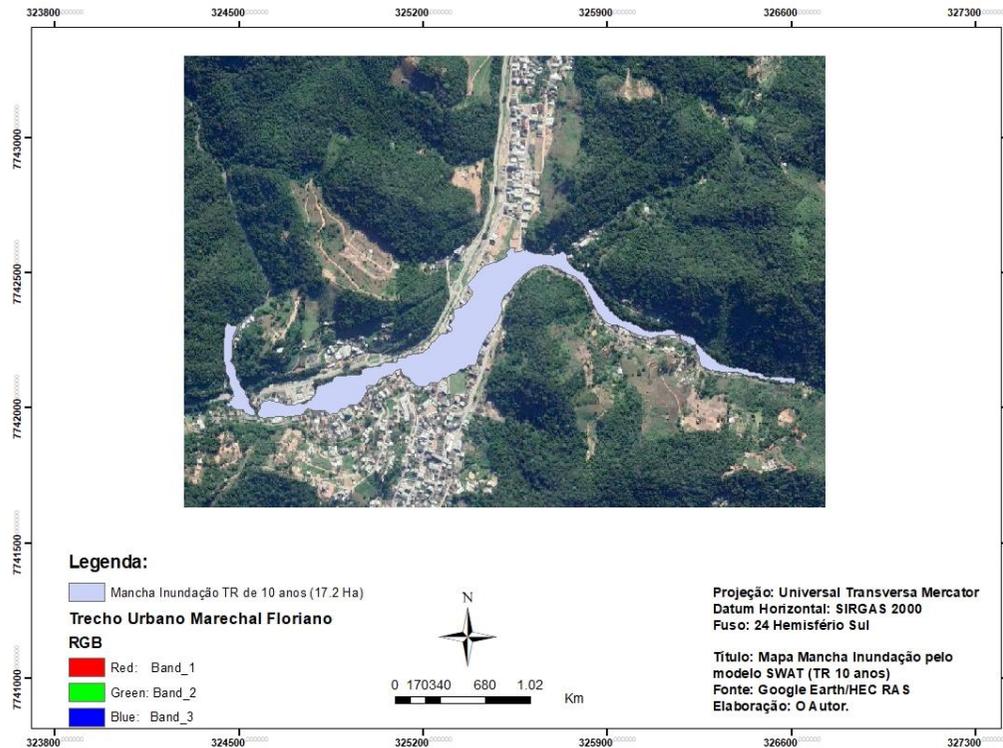


Fonte: O autor.

As figuras 44, 45 e 46 ilustram as diferenças entre as manchas de inundação para cada período de retorno. Assim, cada figura demonstra duas manchas de inundação para cada modelo hidrológico, considerando o mesmo período de recorrência, com objetivo de qualificar a análise comparativa ora proposta.

Figura 44. Manchas de inundação para TR de 10 anos

SWAT



HEC HMS

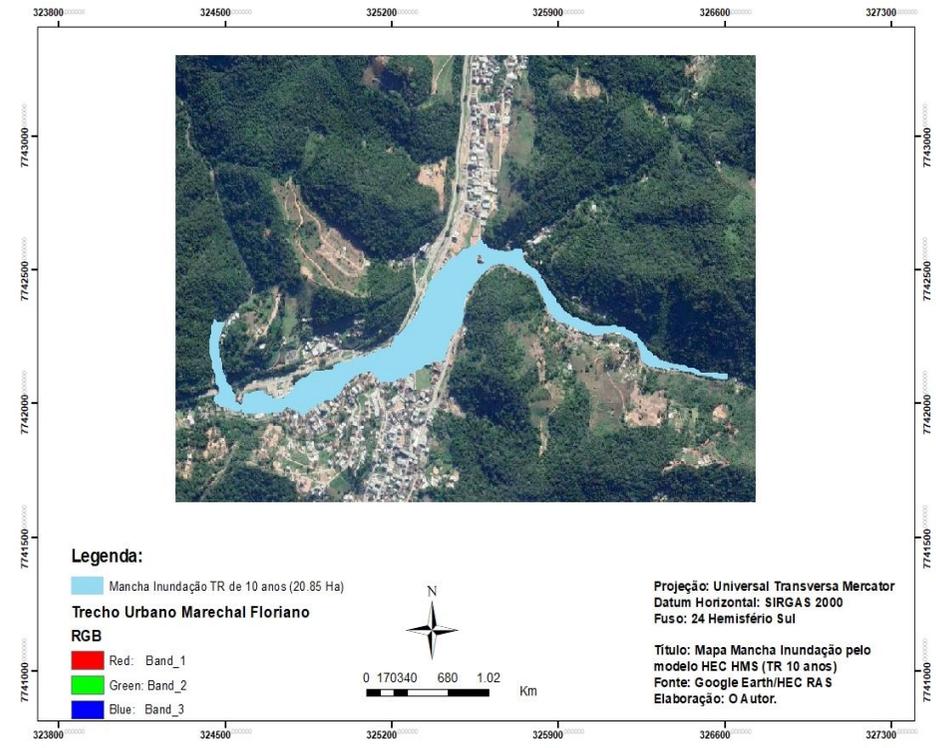
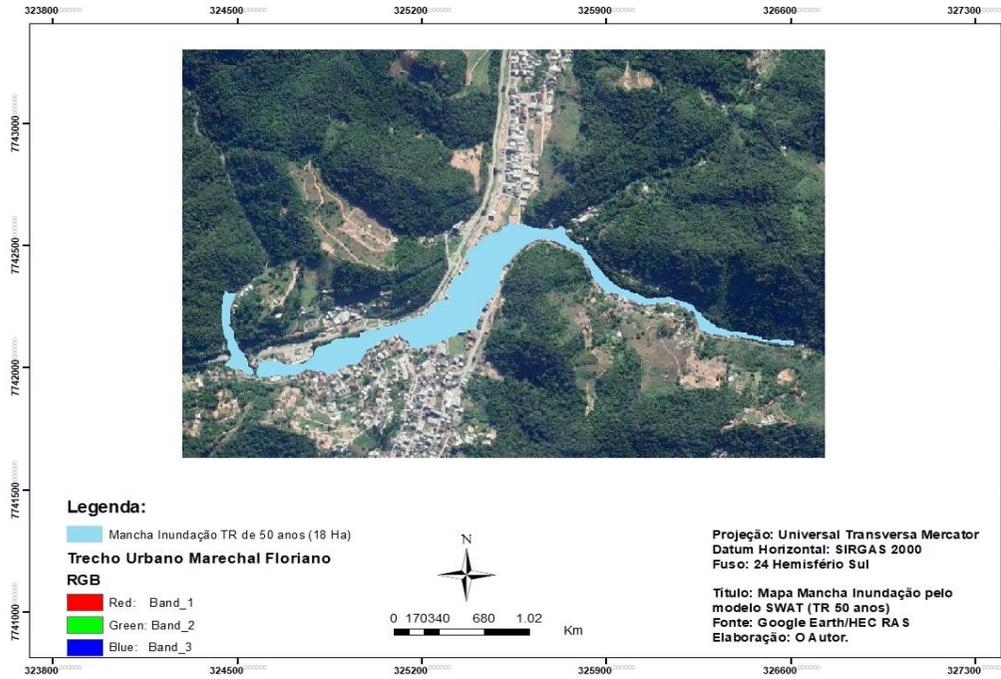


Figura 45. Manchas de inundação para TR de 50 anos

SWAT



HEC HMS

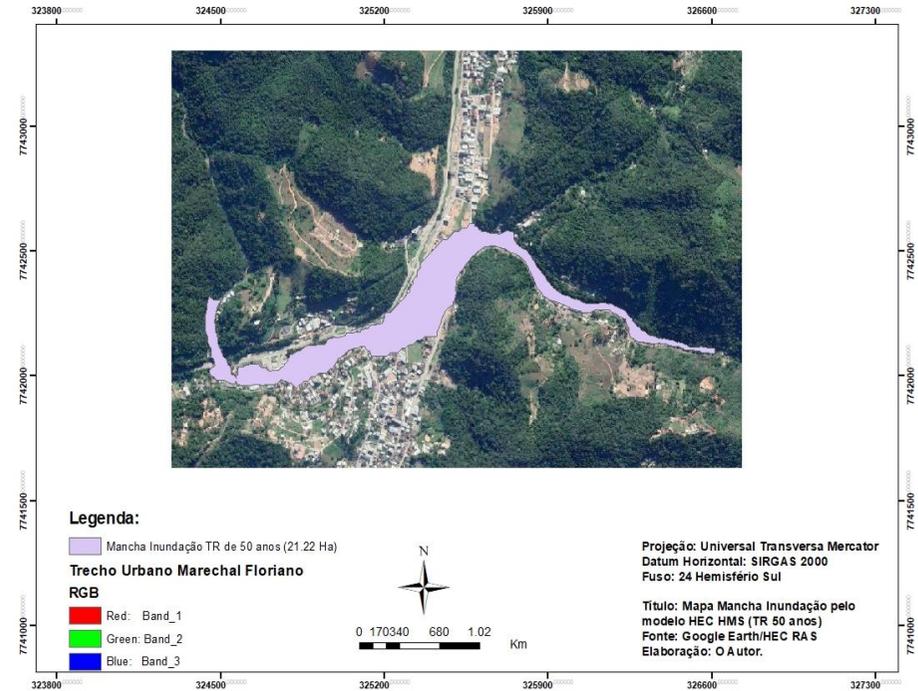
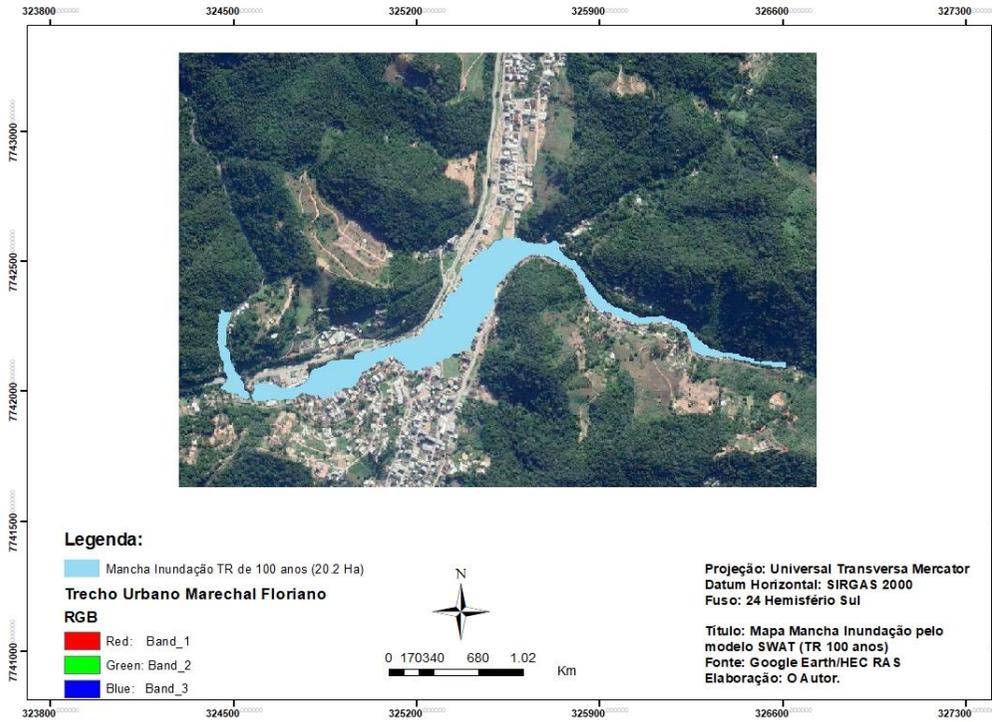
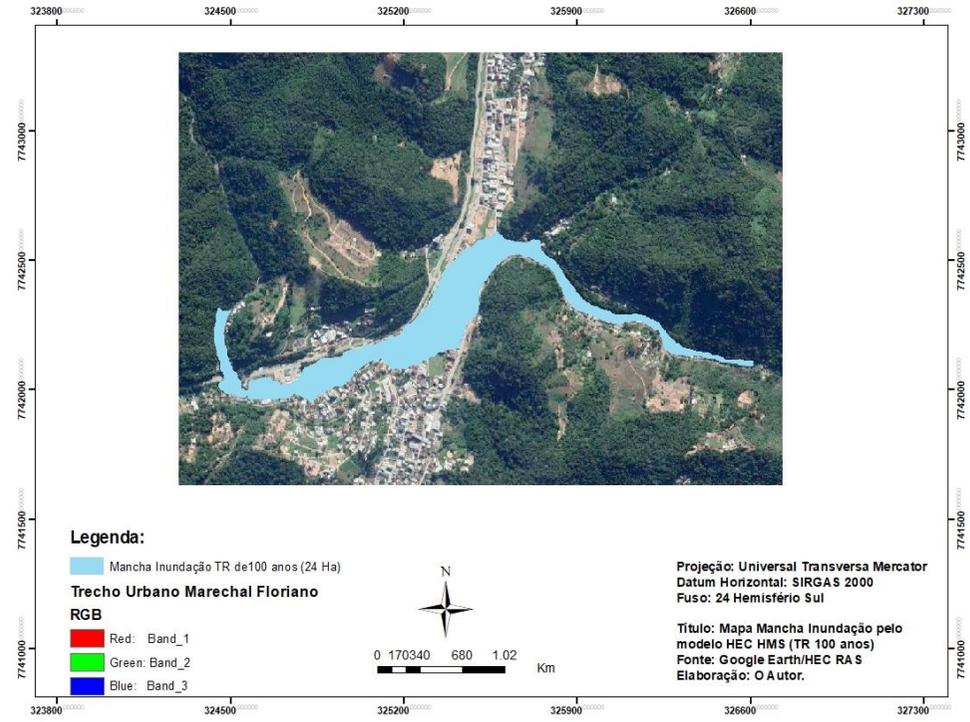


Figura 46. Manchas de inundação para TR de 100 anos

SWAT



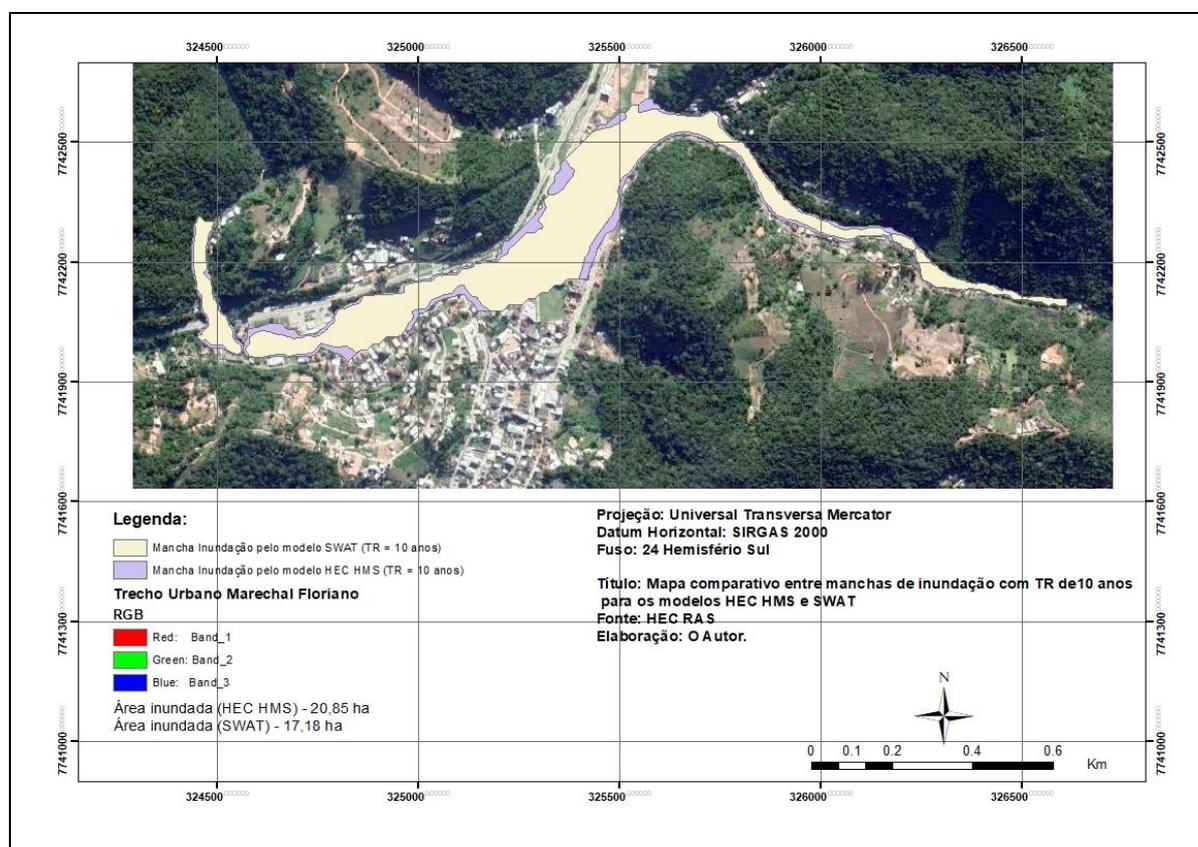
HEC HMS



Visualmente, observa-se pouca diferença de área ocupada entre as manchas de inundação, mesmo havendo grande discrepância entre as vazões de pico que originaram as simulações hidráulicas. Todavia, em termos de área ocupada pelas inundações, percebe-se que há diferenças significativas e que influenciam sobremaneira na predição de eventos de cheias, diferença esta que reside, de forma mais pronunciada, no período de recorrência para 10 anos.

Em ambiente SIG foi possível estabelecer o tamanho, em hectare, do trecho urbano de Marechal Floriano, onde se deu a simulação hidráulica, que é de 277,46 ha. Para as vazões de pico do modelo HEC HMS ocorreu uma ocupação de área de inundada, para TR de 10 anos, de 7,51% da área total, passando por 7,64% para uma TR de 50 anos até 8,65% para TR de 100 anos. Já para o modelo SWAT, ocorreu 6,2% da área total inundada, para uma TR de 10 anos, 6,5% para TR de 50 anos e 7,3% para TR de 100 anos. Esta comparação pode ser observada pelo mapa exposto na figura 47.

Figura 47. Mapa comparativo entre as manchas de inundação com TR de 10 anos para os modelos HEC HMS e SWAT



Fonte: O Autor.

As manchas de inundação sobrepostas, para TR de 10 anos, revelam as diferenças de áreas ocupadas em função dos dados fornecidos pelos modelos HEC HMS e SWAT. Nota-se que o HEC HMS produziu manchas mais pronunciadas, principalmente na porção do trecho urbano com relevo mais suave e reduzidas velocidades, em comparação às porções imediatamente a montante e a jusante, justamente na porção do núcleo urbano de Marechal Floriano onde há maior densidade de ocupação residencial e comercial. Nas porções a montante e a jusante do ponto de referência desta análise, há pouca discrepância nas áreas ocupadas pelas manchas, possivelmente pela presença de relevo mais encaixado, a montante e áreas lindeiras bastante vegetadas e, na parte a jusante, pelo aumento na inclinação do relevo, com aumento da velocidade e, conseqüentemente, do escoamento, além de possuir áreas mais vegetadas também.

Adicionalmente, o trecho urbano de Marechal Floriano foi subdividido em três (03) subtrechos para que fosse possível uma análise mais detida sobre algumas características que as simulações hidráulicas trouxeram, como a profundidade, elevação da superfície de água e velocidade, uma vez que há entendimento de que tais parâmetros são contributivos para formação, em linhas gerais, das manchas de inundação, que são consequência da conjunção desses citados parâmetros, sem perder de vista o fator relevo, que é limitante. A discussão está baseada em dados comparativos para TR de 10 anos entre os modelos.

O trecho urbano foi subdividido em subtrecho 01, subtrecho 02, subtrecho 03 e subtrecho 04 (Figura 48). O subtrecho 01 compreende o início do rio Jucu Braço Sul dentro da mancha urbana, considerada como domínio do modelo, até o viaduto sob a Rodovia BR 262. Após o viaduto até a ponte sobre o citado rio existente dentro da cidade de Marechal Floriano é o subtrecho 02. Da ponte até o trecho onde o rio Jucu Braço Sul faz uma inflexão se conforma o subtrecho 03; e a partir dessa inflexão até o fim do domínio do modelo é o subtrecho 04.

Figura 48. Divisão do rio Jucu Braço Sul em subtrechos

Subtrecho 01



Subtrecho 02



Subtrecho 03



Subtrecho 04



Fonte: O autor.

O subtrecho 01, que compreende o início do domínio do modelo até o viaduto sob a BR 262, perfazendo parte do bairro Ponto Frio, possui relevo mais inclinado, com menos ocupação residencial e comercial. As margens do Jucu Braço Sul são mais vegetadas e preservadas em relação às demais a jusante.

A elevação máxima da superfície da água, para vazões apropriadas pelo modelo HEC HMS, com TR de 10 anos foi de 547,16 m. Já as mesmas condições para o modelo SWAT, a elevação foi de 546.2 m. Logo no início do domínio do modelo, considerado como a mancha urbana, ocorrem as maiores elevações, em função das altitudes serem pronunciadas nesta porção da bacia. A profundidade máxima simulada com vazões oriundas da aplicação

do modelo HEC HMS foi de 4,87 m, enquanto a simulada utilizando dados do SWAT foi de 3,9 m.

A velocidade simulada pelo HEC-RAS com vazões oriundas do modelo HEC HMS atingiu uma máxima de 2,3 m/s, enquanto a máxima simulada com vazões do SWAT foi de 1,6 m/s. Neste subtrecho há forte presença de vegetação nativa ou em avançado estágio de regeneração, fato que implica em maior resistência à onda de cheia, em função do número de Manning ser maior nas margens do rio do que no leito, fato que limita um grande espraiamento da onda de cheia pela simulação, provavelmente pela boa capacidade de condutância do canal do rio Jucu Braço Sul neste trecho e pelo fato de que há forte presença de vegetação nas margens, fato que aumenta a capacidade de infiltração local.

O subtrecho 02 inicia-se a partir do viaduto sob a rodovia BR 262 e se estende até a ponte sobre o rio Jucu Braço Sul interligando as áreas marginais da citada rodovia ao interior do núcleo urbano de Marechal Floriano.

As elevações da superfície d'água ocorrem praticamente nos mesmos pontos ao longo desse subtrecho, havendo, conseqüentemente, diferenças entre estas, porém obedecendo a mesma dinâmica. Para as vazões do modelo HEC HMS (vazões de pico apropriadas para TR de 10 anos) a elevação máxima observada foi de 544,5 m e, para as vazões do SWAT, 543,1 m. Duas considerações são importantes, a primeira é que as elevações, de uma maneira geral tendem a serem menores, uma vez que houve redução no gradiente topográfico, comparativamente. Houve uma diferença maior entre estas elevações em relação às observadas no subtrecho 01, portanto, o fator relevo novamente deve ser considerado, uma vez que se optou pela simulação em regime permanente, isto é, as vazões no subtrecho 01 são as mesmas em todos os subtrechos.

Em relação às profundidades, para as vazões do modelo HEC HMS, a máxima profundidade neste trecho foi de 4,2 m, enquanto, para as vazões do SWAT, foi de 3,3 m. Cumpre destacar que neste trecho, a área urbana começa a ser mais evidente.

A velocidade para as vazões oriundas do modelo HEC HMS foi de 1,6 m/s e, para as simuladas pelo SWAT, foi de 1,3 m/s, uma vez que a calha do Braço Sul começa, neste trecho, a fluir por relevos menos ondulados, reduzindo a energia do escoamento.

O subtrecho 03 inicia-se a partir da ponte da passagem de veículos sobre o Jucu Braço Sul e estende-se até a curva aonde o rio faz uma inflexão à direita. A elevação da superfície neste trecho foi de 544,04 m para as vazões do modelo HEC HMS e 542,9 m para as simuladas pelo SWAT.

No tocante à profundidade, a simulação hidráulica forneceu, para vazões do modelo HEC HMS, 4,38 m e, para as do SWAT, 3,25 m. Já a velocidade observada foi de 3,2 m/s, para vazões do HEC HMS e 2,2 m/s para as do SWAT. Comparativamente, este é o subtrecho em que há maior espraiamento da onda de cheia. O fator que contribui para este espraiamento, além da topografia, é a presença de uma forma geomorfológica denominada soleira estrutural⁶ de sentido nordeste-sudoeste (CRUZ, 2015), justamente aonde a calha do rio é forçada a fazer uma curva, provocando inundação a montante, com velocidades bastante reduzidas nos extremos da onda de cheia, como pode ser observado na figura 52.

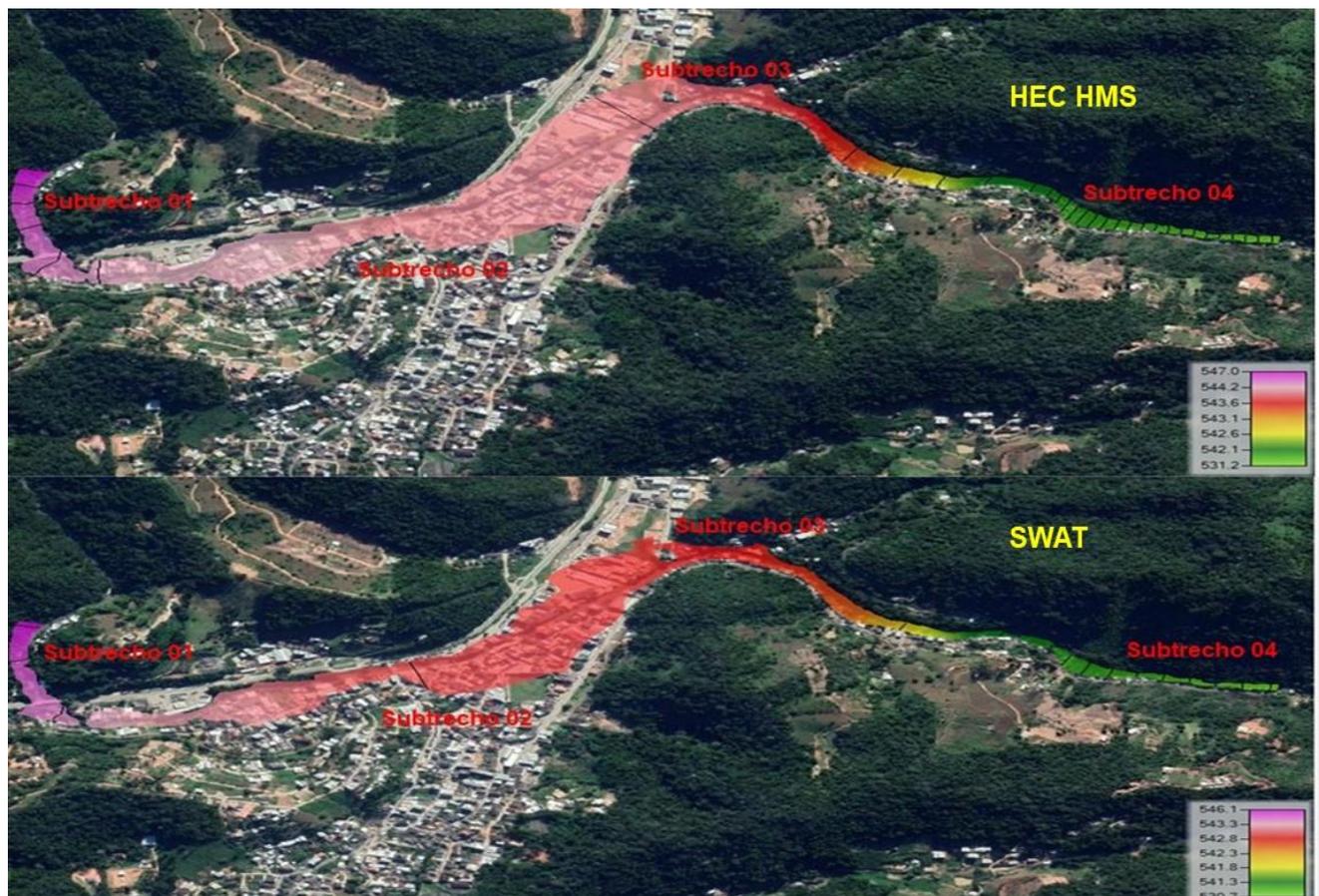
Por fim, o subtrecho 04 inicia-se ao término da curva (soleira estrutural) e estende-se até o fim do domínio do modelo, coincidindo com o fim da mancha urbana de Marechal Floriano. A elevação máxima da superfície d'água apresenta 543,8 m para vazões o contexto do modelo HEC HMS e 542,2 m para o SWAT. As profundidades tendem a serem mais reduzidas do que a porção diretamente a montante, com valores que variam de 3,7 m para a vazão de pico do HEC HMS e 2,63 m para a vazão do SWAT. Já a velocidade aumenta consideravelmente, com valores que variam de 5,3 m/s para o HEC HMS e 3,8 m/s para o SWAT.

⁶ As soleiras são trechos do talvegue topograficamente elevados, com fluxo convergente, materiais de fundo formados por sedimentos grossos e gradiente da linha d'água superior ao gradiente médio do trecho (FERNANDEZ, 2004)

Em relação às profundidades observadas, estas são mais reduzidas em relação aos subtrechos 02 e 03, fato que demonstra diminuição nas dimensões da calha fluvial do Braço Sul e um relevo em declive, característica que justifica, também, as elevadas velocidades observadas. Essas características trazem uma resposta hidráulica que pode ser observada pela diminuição na área ocupada pelas manchas de inundação nesse trecho e pela pouca diferença entre as áreas, considerando as vazões de pico dos modelos HEC HMS e SWAT.

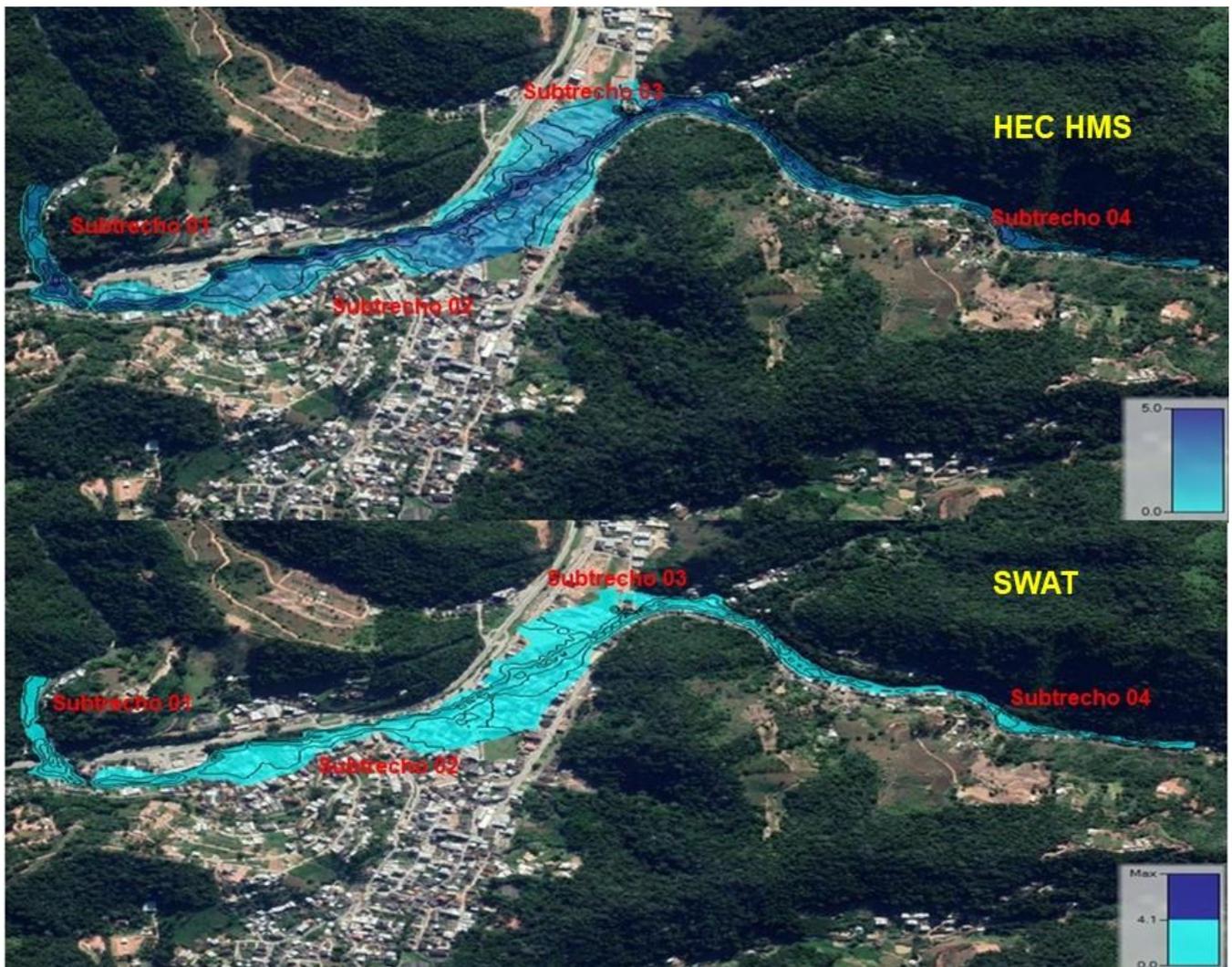
As figuras 49, 50 e 51 demonstram os parâmetros elevação máxima, profundidade máxima e velocidade total para cada subtrecho descrito em linhas acima, comparando as diferenças apropriadas para os modelos HEC HMS e SWAT.

Figura 49. Elevação máxima comparada para cada subtrecho urbano do rio Jucu Braço Sul



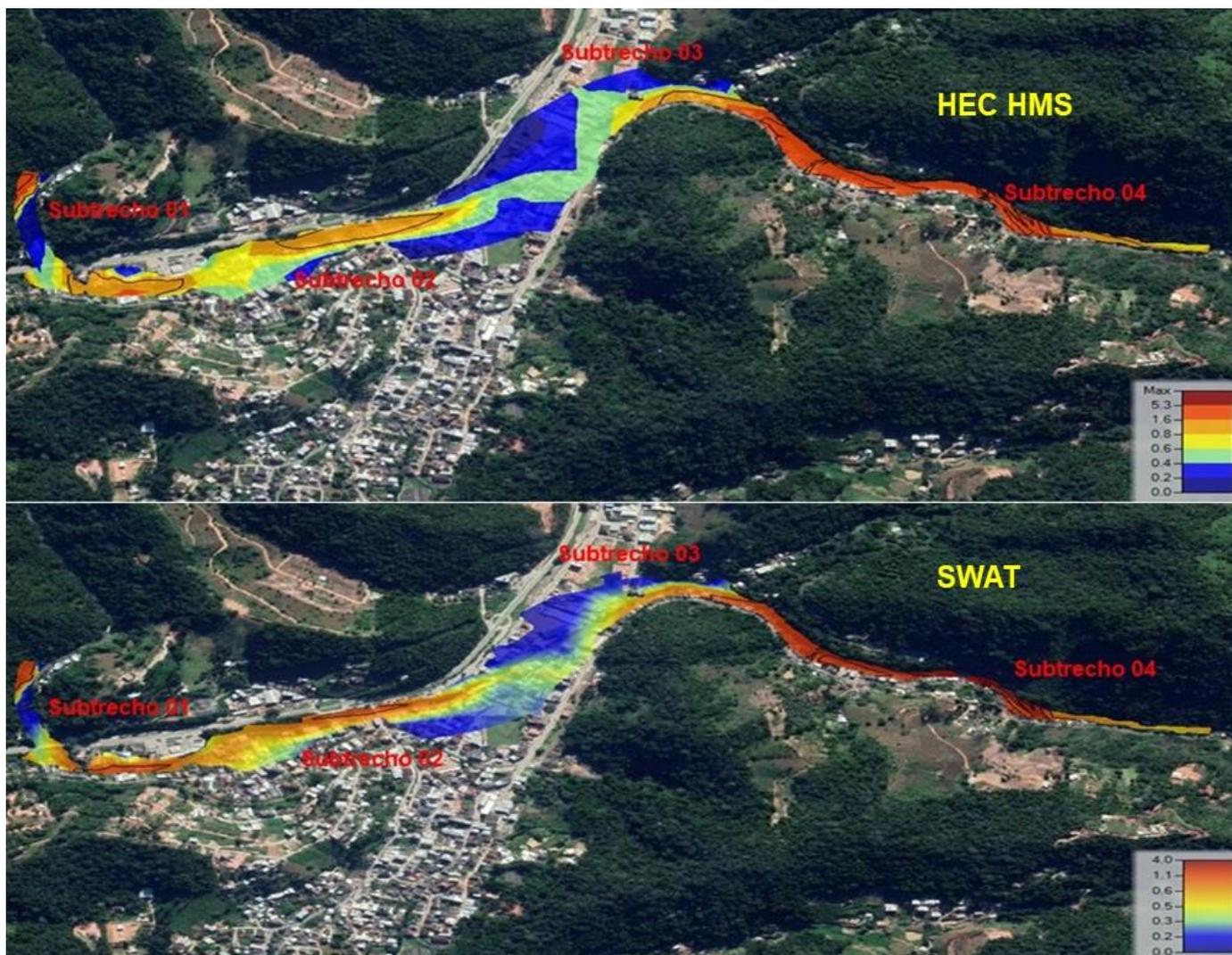
Fonte: HEC RAS, dados organizados pelo autor.

Figura 50. Profundidade máxima comparada para cada subtrecho urbano do rio Jucu Braço Sul



Fonte: HEC RAS, dados organizados pelo autor.

Figura 51. Velocidade máxima comparada para cada subtrecho urbano do rio Jucu Braço Sul



Fonte: HEC RAS, dados organizados pelo autor.

6. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÕES

Diante dos resultados hidrológicos e hidráulicos obtidos pelo uso combinado entre os modelos HEC HMS, SWAT e HEC RAS, considerações e conclusões acerca dos resultados apropriados podem ser elaboradas, como as que se seguem.

O prisma metodológico da presente pesquisa assentou-se sobre a análise comparada das vazões simuladas por dois modelos hidrológicos de distintas discretizações espaciais, sendo um modelo concentrado (HEC HMS) e outro semi-distribuído (SWAT). Após as calibrações dos modelos, foram simuladas as vazões diárias de longa duração (30 anos) pelo método de transformação chuva x vazão. Em prosseguimento, apropriaram-se as vazões máximas de 01 dia e, por consequência, as vazões de pico para os períodos de recorrência em 10, 50 e 100 anos.

Todos esses procedimentos metodológicos foram necessários, uma vez que não há medições de vazões consistentes na bacia do rio Jucu Braço Sul, possuindo apenas registro histórico de dados de vazão da estação fluviométrica 57190000 (Estação Marechal Floriano) até o ano 1990, ano em que a citada estação foi desativada. Além disso, tais procedimentos adotados foram necessários, também, para que houvesse dados de entrada no modelo hidráulico (HEC RAS) que requer, além do MDT, as vazões da área a ser modelada.

A análise hidráulica foi realizada com base na apropriação de alguns parâmetros hidráulicos que se julgou serem representativos e adequados para comparações entre as manchas e entendimento da dinâmica fluvial local. Assim, optou-se pelos parâmetros elevação da superfície d'água, profundidade, velocidade de fluxo no canal e limite de inundação, conformando as manchas de inundação em ambiente SIG.

De uma maneira geral, a pesquisa demonstrou que as manchas de inundação apresentaram considerável variabilidade de área ocupada. Esta variação se deu para as vazões de pico considerando o mesmo modelo hidrológico e, também, considerando a comparação entre as vazões de pico dos dois modelos hidrológicos utilizados para todos os períodos de retorno. As diferenças mais significativas residem no período de retorno de 10 anos e as menores diferenças encontram-se no período de recorrência de 50 anos. Neste sentido, as análises comparativas tiveram por base dados para o período de retorno de 10 anos.

O município de Marechal Floriano possui um relevo bastante acentuado, com vales encaixados, proporcionando ramificações dos canais tributários com pequenas larguras e profundidades, fato que promove maior condutância do fluxo d'água nas partes mais íngremes e regime de fluxo supercrítico. A calha do rio Jucu Braço Sul no trecho urbano de Marechal Floriano reproduz essa tendência, com relevo inclinado no início da mancha urbana. As manchas de inundação nessa porção do trecho urbano são menores em termos de espriamento da onda de cheia, mesmo havendo grande diferença entre as vazões de pico utilizadas nas simulações hidráulicas.

O modelo HEC HMS, para TR de 10 anos, considerando ainda o trecho a montante mais inclinado, simulou uma vazão de pico de 156,45 m³/s. Já o modelo SWAT para o mesmo período de frequência, simulou uma vazão de pico de 64,6 m³/s, uma diferença de 142,2%. Todavia, essas vazões de pico atingiram elevação da superfície d'água para TR de 10 anos, de 547,16 m e 546,2 m para os modelos HEC HMS e SWAT, respectivamente, cuja diferença foi de 0,96 m e percentual de 0,17%. Concluí-se que o relevo encaixado foi fator limitante para que não houvesse discrepâncias mais pronunciadas entre as manchas de inundação, como pode-se observar objetivamente analisando a cross section 8803 disposta na figura 39 em comparação à cross section 4756.

A cross section 8803, localizada em trecho mais inclinado do domínio do modelo hidráulico, apresentou área ocupada pelo fluxo d'água de 46,14 m² para o HEC HMS e 21,36 m² para o SWAT, ocorrendo uma diferença de 24,8 m² e percentual de 116%. Já a cross section 4756 apresentou valores de área ocupada pelo fluxo d'água de 391,96 m² para

o HEC HMS e 172,53 m² para o SWAT. Uma diferença de 219,43 m² e percentual de 127,2%. Como optou-se pela simulação em regime permanente, isto é, a vazão é a mesma para todos os trechos da mancha urbana, nota-se a influência do relevo na dinâmica fluvial local, uma vez que a cross section 8803 possui um vale mais encaixado que a cross section 4756, localizada dentro do núcleo urbano de Marechal Floriano, com forte urbanização e relevo mais aplainado.

Esta dinâmica fluvial influencia diretamente a formação das manchas de inundação, haja vista que quanto menor o entalhamento do relevo, mais pronunciadas são as diferenças na área efetivamente ocupada pela onda de cheia, conforme pode-se comprovar pelas áreas calculadas pela presente pesquisa e os dados dispostos no Anexo A, com maior espalhamento em porções mais planas, onde há aumento da profundidade máxima alcançada, bem como diminuição das velocidades totais do fluxo d'água.

Visto que o trecho urbano de Marechal Floriano é bastante sinuoso, com entalhamento de vales e relevo elevado, mesmo havendo diferenças entre porções do terreno, ora mais inclinado, ora menos inclinado, é uma bacia com elevação do terreno acentuado, não apresentando grandes planícies de inundação. Desta maneira, a resposta hidráulica com base no uso de dois modelos hidrológicos é mais incisiva nos denominados subtrechos 02 e 03, comparando-se com as porções mais a montante e a jusante desses trechos de referência.

Isto posto, podem-se apresentar as seguintes conclusões como resultados da presente pesquisa:

- A resposta hidráulica do Jucu Braço Sul no trecho modelado possui íntima relação de causalidade entre as características das manchas de inundação e o relevo. Foi demonstrado que relevos com vales encaixados e inclinados possuem pouca diferença na resposta das manchas de inundação, mesmo para vazões com grandes diferenças entre si, ao passo que em porções do trecho urbano do rio Jucu Braço Sul onde o relevo é consideravelmente menos ondulado a resposta hidráulica

demonstra diferenças significativas entre as manchas de inundação em termos de área ocupada pelas cheias.

- Pelo quadro apresentado observa-se que o uso de um modelo hidrológico que possui uma interface mais complexa, que requer maior quantidade de parâmetros físicos, hidrológicos e climáticos, como o SWAT, apresentou diferença significativa em relação ao modelo HEC HMS, modelo este com interface mais simples, com menor necessidade de dados e parâmetros, quando aplicado numa bacia com características já descritas acima, confirmando a aderência metodológica, uma vez que tais características são comuns à maioria das bacias hidrográficas, tanto em termos de configuração do perfil de relevo quanto em termos de disponibilidade de dados e monitoramento pluvial e fluvial para pequenas e médias bacias;
- Assim, a presente pesquisa conclui que, considerando a calibração dos modelos HEC HMS e SWAT realizada, onde se obteve NSE de 0,65 e R^2 de 0,6 para o HEC HMS e NSE em 0,6 e R^2 de 0,6 para o SWAT, após a etapa de validação, haja vista que na etapa de calibração o NSE do modelo SWAT foi de 0,75, o modelo semi-distribuído possui a capacidade de representar com maior nível de qualidade da informação hidrológica a realidade da dinâmica fluvial do trecho urbano da bacia do rio Jucu Braço Sul, tanto em termos de altura do nível d'água, velocidade, profundidade e mancha de inundação em relação ao modelo concentrado, uma vez que o modelo semi-distribuído apresenta resultados de vazões simuladas mais próximos às vazões reais da bacia do rio Jucu Braço Sul para estas condições estabelecidas pela presente pesquisa.

7. CONTRIBUIÇÕES AO SINGREH

O programa de pós-graduação de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua) possui, além da capacitação técnico-científica de profissionais atuantes na área de recursos hídricos, a perspectiva de desenvolver estudos com aderência metodológica com característica de reprodutibilidade para outros cenários no que tange a gestão e regulação de recursos hídricos.

O presente estudo, assim, objetivou analisar a resposta de um modelo hidráulico como subsídio técnico e metodológico para elaboração de manchas de inundação com base nas informações de vazões simuladas por dois modelos hidrológicos, um concentrado e outro semi-distribuído.

É sabido que modelos hidrológicos de diferentes discretizações espaciais (concentrado e semi-distribuído) irão fornecer, em última análise, diferentes valores de vazões simuladas para uma mesma área, utilizando-se dos mesmos parâmetros, como procedimento adequado à análise comparativa. Todavia, torna-se imperioso compreender qualitativa e quantitativamente essas diferenças, fazendo-se reproduzir no tempo e no espaço se o uso de um modelo, que requer maior nível de tratamento de dados e parâmetros é necessário em detrimento de um modelo hidrológico de interface e manuseio mais fáceis quando se utiliza a simulação de vazões para modelagem hidráulica de manchas de inundação.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída através da Lei Federal nº 9433, de 08 de janeiro de 1997, popularmente conhecida como “Lei das Águas”, estabeleceu, dentre outras questões, que a base físico-territorial de gestão integrada dos recursos hídricos seja a bacia hidrográfica. Assim, a bacia é o lócus preferencial de atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh), também delineado pela supracitada lei federal que, para além da definição do arcabouço jurídico da gestão das águas definiu, também, o escopo de atuação dos órgãos governamentais e setoriais direta e indiretamente ligados à gestão das águas no Brasil.

O artigo 2º da Lei das Águas coloca como um de seus objetivos a realização da “[...] prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos hídricos” (BRASIL, 1997, p. 01), cuja definição legal vai ao encontro da Lei Federal nº 9984, de 17 de julho de 2000, que criou a Agência Nacional de Águas (ANA), e estabeleceu em seu artigo 4º, como um de seus objetivos “[...] planejar e promover ações destinadas a prevenir ou minimizar os efeitos de secas e inundações, no âmbito do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos em articulação com o órgão central do Sistema Nacional de Defesa Civil, em apoio aos Estados e municípios” (BRASIL, 2000).

Esses objetivos elencados acima encontram dificuldades justamente na qualidade da informação a ser utilizada nos modelos hidrológicos e hidráulicos, uma vez que há, no País, um déficit considerável de monitoramento das redes pluviométricas e fluviométricas, em especial atenção à última. Assim, a implementação de uma gestão eficaz e eficiente contra eventos hidrológicos extremos é dependente de dados confiáveis de medição de chuvas e vazões.

No Brasil, a responsabilidade direta pela gestão de eventos críticos de cheias, seja no planejamento ou na ação intervencionista direta, é de responsabilidade da Secretaria Nacional de Defesa Civil. A Agência Nacional de Águas, adicionalmente, contribui ao sistema com informações de monitoramento em tempo real, através das salas de situação, monitorando as vazões de rios e barragens, por exemplo, cujos dados podem ser compartilhados, além do Sistema de Informações Hídricas (HIDROWEB) que reúne as séries históricas de estações pluviométricas e fluviométricas.

Eventos de cheias são complexos e dependem da inter-relação entre agências e atores de gestão dos recursos hídricos para que os objetivos e metas progressivas de minimização dos riscos de cheias sejam atingidos. Na escala da bacia, os estudos acerca das cheias urbanas, principalmente, são de relevância à elaboração dos planos de bacia que devem ser construídos, em concomitância aos planos diretores municipais, ou seja, o comitê de bacia atuando conjuntamente com os municípios que compõem a referida bacia hidrográfica, a

fim de se estabelecer metas, ações e programas de longa duração para efetivação da eliminação dos riscos de cheias ou atenuação de suas consequências, como a criação de sistemas de alerta e alarme, treinamento de comunidades, educação e conscientização ambiental, políticas orientadas de ocupação dos espaços urbanos (zoneamento), destinação de áreas da cidade como zonas de amortecimento, aumento da taxa de infiltração das águas, além de obras de engenharia, de ação direta, em pequena escala, geralmente, e com alto custo de implementação.

Observa-se, portanto, que há uma seara bastante grande de atuação dos órgãos gestores dos recursos hídricos, com metodologias diversas, complementares ou díspares, dependendo dos objetivos das ações. Assim, o zoneamento das áreas sujeitas a inundações, considerando períodos de retorno pré-determinados, é uma ferramenta que pode oferecer subsídio ao processo de gestão de eventos críticos de cheias.

O zoneamento é uma decisão administrativa de se restringir e disciplinar os usos da terra no espaço urbano de uma cidade ou região. A sua decisão se faz a partir das cartas de manchas de inundação, produto técnico advindo da modelagem hidráulica das planícies de inundação de uma bacia hidrográfica, que fornece dados técnicos acerca da probabilidade de predição de vazões de referência para cada frequência de retorno excedida.

A predição de vazões de pico pode ser estabelecida pelo método de transformação chuva X vazão, método este amplamente difundido e utilizado em pesquisas nacionais e internacionais. O referido método é necessário em bacias com baixa frequência de medição de chuvas e vazões, dados com muitos anos de falhas, ou quando da sua inexistência. Todos os três cenários citados são comuns à maioria das bacias hidrográficas, principalmente às pequenas e médias bacias. Esta característica já demonstra a importância de estudos com este viés metodológico.

Assim, verifica-se a necessidade de se produzir material técnico-científico abordando pequenas e médias bacias hidrográficas carentes de séries históricas de vazões, para subsidiar o planejamento e gestão das cheias, que poderão gerar produtos a serem

apropriados ao planejamento do território, zoneamento urbano e adoção de medidas de controle de inundações adequadas à realidade específica de cada setor de uma bacia hidrográfica, de forma a direcionar tecnicamente ações de medidas de minimização dos riscos de cheias e subsidiar sistemas de alerta e alarme para defesa civil.

A apropriação das vazões máximas em uma bacia hidrográfica, especialmente para estudos de cheias, é passo fundamental à modelagem hidráulica. Determinar qual o modelo hidrológico é o mais adequado para esta apropriação não constitui os objetivos dessa presente pesquisa. Pretendeu-se a verificação do uso de dois modelos de distintas discretizações espaciais dos parâmetros físicos e hidrológicos de uma bacia, a fim de se observar a produção de vazões com diferenças significativas, cujo rebatimento espacial nas manchas de inundação foi bastante considerável em termos de abrangência territorial da mancha de inundação e altura da lâmina d'água.

Adicionalmente, observou-se, em relação às vazões simuladas, diferenças consideráveis na construção das manchas de inundação. Isto ocorre, dentre outros motivos, em razão do relevo. Quando uma bacia possui relevo escarpado, com vales encaixados ou fortemente ondulados, grandes diferenças de vazões produzem pequenas diferenças observáveis nas manchas de inundação, ao passo que relevos planos e suaves, já respondem fortemente pelas manchas de inundação mesmo com pouca diferença entre as vazões, uma vez que o espraiamento da onda de cheia, neste caso, é pronunciado, característica presente na bacia do rio Jucu Braço Sul.

Outro motivo é a própria simulação das vazões de pico feita pelos modelos hidrológicos que geraram uma resposta hidráulica com grandes diferenças em termos de altura do nível d'água, velocidade e manchas de inundação. Isto se deve pelo uso conjunto de um modelo semi-distribuído e concentrado, cujo primeiro apresentou uma melhor calibração, sendo o modelo com representatividade mais próxima à realidade.

Concluí-se, assim, que a falta de dados de chuva e vazão, séries históricas com falhas, bacias com problemas de inundações e com relevos acidentados, cujo vale é fortemente

ocupado por urbanizações é comum à maioria das pequenas e médias bacias hidrográficas no Brasil e, portanto, a aderência metodológica acerca de sua reprodutibilidade viabiliza o presente estudo, com contribuição ao Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos.

8. REFERÊNCIAS

ABDULRAZZAK et al. **Flash flood risk assessment in urban arid environment: case study of Taibah and Islamic Universities Campuses, Medina, Kingdom of Saudi Arabia**. Geomatic Natural Hazard and Risk. v 10. n 01, 2019. p.780-796.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. **Modelos Hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizados**. Rev. FAE. Curitiba. v. 20. n. 01. p.129-137. Jan-jun, 2017.

ALMEIDA, C. A. P de. **Predição de Enchimento de Barragem por meio de Modelagem Hidrológica na Bacia Hidrográfica do rio Poxim-Açú-SE**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal de Sergipe. São Cristovão, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Lei n. 9.433: Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997.

BRASIL. Lei n.9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 18 jul. 2000.

BRASIL, Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S; OGURA, A. T. (orgs.), Brasília, 2007.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (SoilWaterAssessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente). Instituto de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal do Mato Grosso. Cuiabá, 2005.

BLAINSKI et al. **Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense**. Ambiente&Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. v. 12. n.02. Taubaté. mar-abril, 2017.

BACK, Álvaro José. Relações Intensidade-Duração-Frequência de chuvas intensas de Chapecó, Estado de Santa Catarina. *ActaScientiarumAgronomy*, Maringá, v. 28, n. 4, p. 575-581, out./dez 2006.

BOITHIAS ET AL. **Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the Swat Model**. *Water*. v. 09. n. 929. p. 02-25, 2017.

BRESSIANI, D. A. **Lidando com riscos hidrológicos através de índice de risco de inundação, modelagem complexa de bacia hidrográfica, diferentes técnicas de calibração e previsão de vazões conjunto**. Tese (Doutorado) em Engenharia Hidráulica e Sanitária. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2016.

CABRAL et al. **Integração do SIG, HEC-HMS e HEC-RAS no Mapeamento de Áreas de Inundação Urbana: Aplicação à Bacia do Rio Granjeiro-CE**. *Revista Geociências*. v 35. n° 01. São Paulo. p.90-101, 2016.

CANAL, F. E. L. **Estimativa de Vazões de Enchente em Bacias Hidrográficas do Espírito Santo com o uso do Modelo HEC-HMS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Ambiental. Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2011.

CASTRO, C. O. DE et al. **Building Technology and Urban Development Water sustainability assessment for the region of Curitiba**. *International Journal of Sustainable*, v. 8, n. 2, p. 184–194, 2009.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. Reimpressão da edição de 1959. Caldwell, NJ. 1959

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo. Edgard BlucherLtda, 1999.

COUTINHO, M. M. **Avaliação do Desempenho da Modelagem Hidráulica Unidimensional e Bidimensional na Simulação de Eventos de Inundação em Colatina/ES**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

CRUZ, E. A da. **Potencial de Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Jucu/ES, Por meio de Parâmetros Morfométricos e Índices SL**. Dissertação (Mestrado em Geografia).

Programa de Pós-Graduação em Geografia. Centro de Ciências Humanas e Naturais. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.

DAHMI, B. S E PANDEY, A. **Comparative Review of Recently Developed Hydrologic Models**. Journal of Indian Water Resources Society. India. v. 33. n. 03, 2013.

DELBONI, T. C. **Análise Comparativa de Modelos Hidrológicos em função de suas Estruturas e Parametrização e de Resultados de Aplicações em Bacias Hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2019.

EM-DAT. **The OFDA/CRED International Disaster Database**. Disponível em: <http://www.emdat.be/advanced_search/index.html>. Acesso em: 24 de janeiro de 2019.

FANG, G et al. **Assessing the effects of urbanization on flood events with urban agglomeration polders type of flood control pattern using the HEC-HMS model in the Qinhuai river basin, China**. Water. v 1003. n 10, 2018.

FARINA et al. **Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação baseada em modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada em sistemas de informação geográfica**. In: 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves, 2018.

FERNANDEZ, O. V. Q. **Desenvolvimento de Soleiras e Depressões num Trecho Retificado do rio Toledo na cidade de Toledo (PR)**. V Simpósio Nacional de Geomorfologia e I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 01 a 07 de agosto de 2004.

GUIMARÃES, C. F. **Simulação Hidrológica e Hidrossedimentológica em uma Bacia com Reservatórios com o Modelo Soil na Water Assessment Tool (SWAT)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2016.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. **Models Paradigmes and the New Geographi**. In: Models in Geographi. London. Methuen e CO, 1967.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Gestão Municipal do Saneamento Básico. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, 2008.

HAMIDON ET AL. **Integrated River Basin Management: Application of HEC-HMS and Swat 2005 for Kurau River Sub-Basin, Perak.** In: III International Conference on Managing Rivers in the 21^o Century: Sustainable Solutions for Global Crisis of Flooding, Pollution and Water Scarcity. Malaysia. p.100-109, 2011.

HORA, S. B.; GOMES, R. L. **Mapeamento e avaliação do risco a inundação do rio cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA.** Ilhéus, 2009.

IEMA, **As Bacias Hidrográficas do Estado do Espírito Santo**, disponível em: <http://www.iema.es.gov.br>, acesso em: 18 de fevereiro de 2019.

JAIN, S. K.; SUDHEER, K. P. **Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash–Sutcliffe index.** Journal of Hydrologic Engineering, v. 13, n. 10, p. 981-986, out. 2008.

KHADKA, J e BHAUKAJEE, J. **Rainfall-runoff simulation and modelling using HEC-HMS and HEC-RAS models: case studies from Nepal and Sweden.** Master Thesis. Division of Water Resources Engineering. Department of Building and Environmental Technology. LudUniversity, 2018.

KONETI, S.; SINKARA, S. L.; ROY, P. S. **Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in Godavari river basin using the HEC-HMS model.** International Journal of Geo-information. v 206. n 07, 2018.

LAZZARI et al. **Análise do escoamento superficial de uma pequena bacia hidrográfica em caxias do sul-rs nos anos de 1955 e 2011.** In: ANAIS XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, 24 a 28 de novembro de 2019.

LE MOINE, N.; ANDREASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C. **“Outlier” catchments: what can we learn from them in terms of prediction uncertainty in rainfall-runoff modelling?** IAHS PUBLICATION, v. 313, p. 195-203, jul. 2007.

LI, D et al. **Development and integration of sub-daily flood modelling capability within the SWAT model and a comparison with XAJ model.** Water. n 10, 2018.

LUZ, L. M. R da. **Modelagem de Áreas Suscetíveis à Inundação na Bacia Hidrográfica do rio Cubatão Sul.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

LUZ, L. M. R da.; CHAFFE, P. L. B.; SPECKHANN, G. A. **Modelagem hidráulica de áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica do rio Cubatão Sul**. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Florianópolis, 2017.

MACEDO, M. J. H. **Aplicações de Redes Neurais Artificiais e Satélite TRMM na Modelagem Chuva-Vazão da Bacia Hidrográfica do rio Paraguaçu/BA**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.

MANDAL, S. P.; CHAKRABARTY, A. **Flash Flood Risk Assessment for Upper Teesta River Basin: Using the Hydrological Modeling System (HEC-HMS) Software**. Modeling Earth SistensandEnviroment.v 02, 2016.

MARKO et al. **Two dimensional flood inundation modeling in urban areas using WMS, HEC-RAS and GIS (case study in Jeddah city, Saudi Arabia)**. Journal of Geography, Environment and Earth Science International.v 280. n 02, 2018.

MAZIERO, E. **Histograma Tempo/Área Geoprocessado: Uso em Modelo Chuva-Vazão Concentrado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2010.

MISSIAGGIA, F. B. et al. **Calibração e Validação de um Modelo Hidrológico para uma microbacia hidrográfica localizada na Encosta Superior da Serra Gaúcha**. In: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis - SC: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.

NAMBA et al. **Modelagem hidrodinamica: aplicação do software HEC-RAS para previsão de níveis d'água máximos nos ribeirões Maringá e Mandacaru**. In: 27º Encontro Anual de Iniciação Científica/ Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2018.

NAPAY, M. A. O e LUYUN Jr, R. A. Hydrologic modelling and flood mapping at Quinali a watershed, Albany, Philippines using HEC-HMS and HEC-RAS.

NASCIMENTO, F.; MOURA, P. M.; SILVA, F. E. O. **Análise comparativa entre as respostas de modelos chuva-vazão concentrados e semi-distribuídos**. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Anais)/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Florianópolis, 2017.

NETO ET AL. **Modelagem Hidráulica dos Eventos de Inundação em Lages (SC)**. In: VI Congresso Nacional de Gestão Ambiental 2015. Porto Alegre. Anais. IBEAS, 2015.

NGUYEN et al. **Flood routing with the soil and water assessment tool: A review and verification**. Water.v 1419. n 10, 2018.

OLEY, J. O e LI, Zhi-Jia. **Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'na catchments i n China**.

OLIVEIRA, G. P. C. **Modelagem Hidrológica apoiada por Sistema de Informações Geográficas**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

PARSA ET AL. **Flood Zoning Simulation by HEC-RAS Model.Case Study: Johor Rier Kota Tinggi Region**.Journalof River Engineering. v. 01. Novembro, 2013.

PAZ, Yet al. **Análise de sensibilidade e calibração espacial do modelo SWAT aplicado em uma bacia do litoral pernambucano através de dados climáticos observados e de reanálise**. Revista Brasileira de Geografia Física. v 11. n 01, 2018. p.371-389.

PEREIRA et al, **Desempenho de um Modelo Hidrológico Concentrado e de um Semi-Distribuído na Predição de Vazões Diárias**. Irriga.Botucatu. v21. n° 02. p.409-424, 2016.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do Modelo Swat (SoilandWaterAssessment Tool) na Simulação Hidrográfica da Serra da Mantiqueira , MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2011.

PISTOCHI, A; MAZZOLI, P. **Use of HEC-RAS and HEC-HMS Models with Arcview for Hydrologic Risk Management**. In: International Congress on Envirommental Modelling and Software. Brigham Young University.p.305-310, 2002.

POST, D.A e JAKEMAN, A. J. **Predicting the daily streamflow of ungauged catchments inAustralia by regionalising the parameters of a lumped conceptual rainfall-runoffmodel**.Ecological Modeling. v. 123. p.91-104, 1999.

RIVERA ET AL. **Predicting Flood Hazard Areas: A Swat and HEC-RAS Simulations Conducteal in Aguan River Basin of Honduras, Central America**. ASPRS. AnnualConference. Florida, 2007.

ROSA, Daiani; LINDNER, Elfride Anrain; MASSIGNAM, Angelo Mendes. **Equação de chuvas intensas para o município de Joaçaba/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade do Oeste de Santa Catarina. Joaçaba, 2006.

SANTOS, J. B. **Modelagem Hidrológica HEC-HMS da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavapés, Botucatu-SP**. Tese (Doutorado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Botucatu, 2017.

SANTILLAN et al. **Development of a HEC-RAS Model for Near-Real Time Flood Extent Monitoring in Marikina River, Philippines**. In: First Philippine Geomatics Symposium. University of the Philippines. 23-24 november. Diliman. Philippines, 2012.

SHARMA, C. W. A. **Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures**. Scientific Reports, 2017. Disponível em: www.sciencedaily.com/releases/2017/08/170814092941.htm. Site acessado em 15 de janeiro de 2019, às 21:40h.

SILVA, E. R. **Modelagem Integrada para Controle de Cheias, Previsão e Alerta de Inundações: Estudo de caso da Bacia do rio Una em Pernambuco**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

SILVA, T. C. da. **Mapeamento das Manchas de Inundação para a cidade de Matias Barbosa – MG**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2016.

STEPHENSON, D. (2002). **Integrated flood plain management strategy for the Vaal**. Urban Water v. 4, pp 425–430.

SOPRANI, Marcela Aparecida; REIS, José Antônio Tosta dos. Proposição de equações de intensidade-duração-frequência de precipitações para a bacia do Rio Benevente, ES. Revista Capixaba de Ciência e Tecnologia, Vitória, n. 2, p. 18-25, 1. set. 2007.

SOUZA, T. C. T. de. **Influência Do Detalhamento Topográfico No Desempenho Do Hec-Ras Para O Dimensionamento De Estruturas De Macrodrenagem Urbana: Estudo de Caso no município de Marechal Floriano**. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.

_____. **Avaliação De Vazões Máximas Estimadas A Partir Dos Modelos Hec-Hms E Swmm – Estudo De Caso Para O Núcleo Urbano E Região Periurbana De Muniz Freire.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2017.

SOUZA et al. **Estudo Comparativo entre os Modelos SWMM e HEC-HMS para Simulação de Escoamento Superficial – Caso de Estudo na Bacia do Córrego Samambaia.** Revista Eletronica de Engenharia Civil. v 05. n° 02. p.1-11, 2012.

SOUZA, V. B de.; FARRA, R. A dal. **Estudo do software HEC-HMS para aplicação da modelagem matemática hidrológica em uma bacia hidrográfica.** Revista de Iniciação Científica da Ulbra. Canoas. n 15, 2017. p.116-128.

THAKUR et al. **Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in precipitation runoff modeling and evaluating flood plain inundation map.** Sacramento, California. World Environmental and water resources.Congress, 2017.p.240-251.

TEGEGNE, G.; PARK, D. K.; KIM, Y-OH.**Comparison of hydrological models for the assesment of water resources in a data-scarce region, the upper blue Nile river basin.** Journal of Hydrology: Regional studies. n 14, 2017. p.49-66.

TOMAZ, Plínio. Método Clark. Disponível em: <
http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo_calculos_vazao/capitulo113.pdf>. Acesso em janeiro de 2020.

TUO ET AL. **Evaluation of Precipitation Input for Swat Modeling in Alpine Catchment: A CaseStudy in the Adig River Basin (Italy).** Science of the Total Environment.n 573.p.66-82, 216.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre. 2ed. vol 04. ABRA Editora, 1997.

_____. **Drenagem urbana e controle de inundações.** In: CAMPOS, Heraldo & CHASSOT, Attico (orgs). **Ciências da Terra e meio ambiente.** São Leopoldo. Editora Unisinos, 1998.

_____. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

TUCCI, C. E. M & BERTONI, J. C. (orgs). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

UNISDR. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. United Nations. Published by the United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Geneva. Switzerland, May 2009.

UNDUCHE, F et al. **Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a canadian prairie watershed**. Hydrological Sciences Journal.v 63. n 8, 2018. p.1133-1149.

USACE-HEC. **Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.5** – User’s Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 318 p., 2010.

USACE (US Army Corps of Engineers). **HEC-RAS. Hydrologic Engineering Center’s – River Analysis System**. User’s Manual. Davis-CA, US, 2010.

VENDRUSCOLO, J. **Regionalização dos parâmetros de um modelo chuva-vazão para estimativa de vazões em bacias sem monitoramento sistemático**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.

VISSMAN Jr, W e LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology**. New York. Harper Collins College Publishers.4^oed, 1996.

Vilma et al. **Monitoramento do rio Jucu Braço Sul: Caracterização e avaliação dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos**. Natureza Online. Vol 7.nº 1, 2009. p.5-11. Disponível em www.naturezaonline.com.br, acesso em 15 de março de 2019.

YIN, Z et al. **Comparing the hydrological responses of conceptual and process-based models with varying rain gauge density and distribution**.sustainability. v 3209. n 10, 2018.

ZHANG, Xingqi; GUO, Xinya; HU, Maochuan. **Hydrological effect of typical low impact development approaches in a residential district**. Natural Hazards, [s.l.], v. 80, n. 1, p.389-400, 21 set. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-015-1974-5>.

ZELENAKOVÁ et al. **Flood risk modelling of the Slatvinec stream in Kruzlov village, Slovakia.**Journal of cleaner production.v 212. n 01, 2019. p.109-118.

ZHOU ET AL. **Hydrological Response to Urbanization at Different Spatio-Temporal Scales Simualted by Coupling of CLUE-S and the Swat Model in the Yangtze River Delta Region.**JournalofHydrology. v. 485. n. 02. p.113-125, 2013.

9. ANEXOS

ANEXO A – RESULTADOS APROPRIADOS PELA SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

HEC-RAS River: Jucu_Sul Reach: Reach 1

Reach	River Sta	Profile	Plan	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chi
Reach 1	9281	TR 10 years	HEC HMS	156.45	549.88	547.02	545.99	547.16	0.004379		94.34	50.61	0.00
Reach 1	9281	TR 10 years	SWAT	64.60	549.88	546.13	545.37	546.21	0.004129		52.56	42.51	0.00
Reach 1	9281	TR 50 years	HEC HMS	168.10	549.88	547.10	546.05	547.25	0.004446		98.28	50.82	0.00
Reach 1	9281	TR 50 years	SWAT	76.22	549.88	546.28	545.47	546.37	0.004143		59.01	44.40	0.00
Reach 1	9281	TR 100 years	HEC HMS	171.70	549.88	547.12	546.07	547.27	0.004467		99.47	50.89	0.00
Reach 1	9281	TR 100 years	SWAT	80.82	549.88	546.34	545.50	546.43	0.004114		61.67	45.16	0.00
Reach 1	8803	TR 10 years	HEC HMS	156.45	543.16	545.66	545.66	546.24	0.008694	3.39	46.14	40.07	1.01
Reach 1	8803	TR 10 years	SWAT	64.60	543.16	544.84	544.84	545.31	0.009188	3.02	21.36	22.90	1.00
Reach 1	8803	TR 50 years	HEC HMS	168.10	543.16	545.72	545.72	546.33	0.008552	3.45	48.75	40.78	1.01
Reach 1	8803	TR 50 years	SWAT	76.22	543.16	544.97	544.97	545.47	0.009005	3.13	24.38	24.50	1.00
Reach 1	8803	TR 100 years	HEC HMS	171.70	543.16	545.74	545.74	546.35	0.008500	3.46	49.57	41.00	1.01
Reach 1	8803	TR 100 years	SWAT	80.82	543.16	545.03	545.03	545.53	0.009164	3.14	25.74	26.06	1.01
Reach 1	7728	TR 10 years	HEC HMS	156.45	541.00	544.21	543.24	544.33	0.000935	1.53	117.80	84.18	0.36
Reach 1	7728	TR 10 years	SWAT	64.60	541.00	543.28	542.64	543.36	0.001358	1.27	51.30	53.65	0.39
Reach 1	7728	TR 50 years	HEC HMS	168.10	541.00	544.32	543.30	544.43	0.000898	1.55	126.47	85.18	0.35
Reach 1	7728	TR 50 years	SWAT	76.22	541.00	543.41	542.75	543.50	0.001295	1.33	58.66	58.14	0.39
Reach 1	7728	TR 100 years	HEC HMS	171.70	541.00	544.35	543.31	544.47	0.000888	1.56	129.09	85.46	0.35
Reach 1	7728	TR 100 years	SWAT	80.82	541.00	543.46	542.79	543.55	0.001270	1.35	61.67	59.88	0.39
Reach 1	7177	TR 10 years	HEC HMS	156.45	541.96	544.21		544.24	0.000202	0.71	220.32	118.51	0.17
Reach 1	7177	TR 10 years	SWAT	64.60	541.96	543.21		543.23	0.000367	0.61	105.11	111.06	0.20
Reach 1	7177	TR 50 years	HEC HMS	168.10	541.96	544.32		544.35	0.000195	0.72	232.82	119.06	0.16
Reach 1	7177	TR 50 years	SWAT	76.22	541.96	543.36		543.38	0.000320	0.63	121.57	112.32	0.19
Reach 1	7177	TR 100 years	HEC HMS	171.70	541.96	544.35		544.38	0.000193	0.73	236.59	119.23	0.16
Reach 1	7177	TR 100 years	SWAT	80.82	541.96	543.42		543.44	0.000306	0.63	127.89	112.81	0.19
Reach 1	6155	TR 10 years	HEC HMS	156.45	540.00	544.02		544.12	0.000787	1.40	111.90	60.51	0.33
Reach 1	6155	TR 10 years	SWAT	64.60	540.00	543.00		543.07	0.000791	1.11	58.35	44.94	0.31
Reach 1	6155	TR 50 years	HEC HMS	168.10	540.00	544.13		544.23	0.000782	1.42	118.36	62.17	0.33
Reach 1	6155	TR 50 years	SWAT	76.22	540.00	543.16		543.23	0.000807	1.16	65.47	47.47	0.32
Reach 1	6155	TR 100 years	HEC HMS	171.70	540.00	544.16		544.26	0.000780	1.43	120.34	62.67	0.33
Reach 1	6155	TR 100 years	SWAT	80.82	540.00	543.21		543.29	0.000809	1.18	68.24	48.28	0.32
Reach 1	5292	TR 10 years	HEC HMS	156.45	539.95	544.04		544.05	0.000073	0.43	359.66	187.50	0.10
Reach 1	5292	TR 10 years	SWAT	64.60	539.95	542.99		543.00	0.000090	0.35	183.21	154.05	0.10
Reach 1	5292	TR 50 years	HEC HMS	168.10	539.95	544.15		544.16	0.000070	0.44	380.02	187.50	0.10
Reach 1	5292	TR 50 years	SWAT	76.22	539.95	543.15		543.16	0.000083	0.37	208.06	155.14	0.10
Reach 1	5292	TR 100 years	HEC HMS	171.70	539.95	544.18		544.19	0.000069	0.44	386.14	187.50	0.10
Reach 1	5292	TR 100 years	SWAT	80.82	539.95	543.21		543.22	0.000061	0.37	217.43	155.55	0.10
Reach 1	4756	TR 10 years	HEC HMS	156.45	539.80	544.03		544.04	0.000071	0.43	391.96	220.02	0.10
Reach 1	4756	TR 10 years	SWAT	64.60	539.80	542.97		542.98	0.000123	0.38	172.53	189.35	0.12
Reach 1	4756	TR 50 years	HEC HMS	168.10	539.80	544.14		544.15	0.000068	0.43	416.07	222.08	0.10
Reach 1	4756	TR 50 years	SWAT	76.22	539.80	543.13		543.14	0.000109	0.39	204.37	199.00	0.11
Reach 1	4756	TR 100 years	HEC HMS	171.70	539.80	544.17		544.18	0.000068	0.43	423.36	222.69	0.10
Reach 1	4756	TR 100 years	SWAT	80.82	539.80	543.19		543.20	0.000104	0.39	216.55	200.34	0.11
Reach 1	4243	TR 10 years	HEC HMS	156.45	540.36	543.99		544.02	0.000216	0.69	227.24	135.43	0.17
Reach 1	4243	TR 10 years	SWAT	64.60	540.36	542.91		542.94	0.000664	0.74	87.15	106.47	0.26
Reach 1	4243	TR 50 years	HEC HMS	168.10	540.36	544.10		544.13	0.000203	0.69	242.12	135.95	0.17
Reach 1	4243	TR 50 years	SWAT	76.22	540.36	543.08		543.11	0.000542	0.72	106.59	120.12	0.24
Reach 1	4243	TR 100 years	HEC HMS	171.70	540.36	544.14		544.16	0.000200	0.70	246.60	136.11	0.17
Reach 1	4243	TR 100 years	SWAT	80.82	540.36	543.14		543.17	0.000505	0.71	114.35	124.46	0.24
Reach 1	3688	TR 10 years	HEC HMS	156.45	540.04	543.88		543.96	0.000483	1.27	123.04	53.05	0.27
Reach 1	3688	TR 10 years	SWAT	64.60	540.04	542.81		542.86	0.000372	0.90	71.95	43.07	0.22
Reach 1	3688	TR 50 years	HEC HMS	168.10	540.04	543.98		544.07	0.000492	1.31	128.76	54.06	0.27
Reach 1	3688	TR 50 years	SWAT	76.22	540.04	542.98		543.03	0.000394	0.96	79.23	44.63	0.23
Reach 1	3688	TR 100 years	HEC HMS	171.70	540.04	544.02		544.10	0.000494	1.32	130.50	54.36	0.27
Reach 1	3688	TR 100 years	SWAT	80.82	540.04	543.04		543.09	0.000402	0.99	82.01	45.21	0.23
Reach 1	2715	TR 10 years	HEC HMS	156.45	540.84	543.47		543.68	0.002167	2.71	99.47	52.63	0.57
Reach 1	2715	TR 10 years	SWAT	64.60	540.84	542.52		542.63	0.002167	1.90	53.50	43.83	0.52
Reach 1	2715	TR 50 years	HEC HMS	168.10	540.84	543.56		543.79	0.002168	2.79	104.58	53.37	0.57
Reach 1	2715	TR 50 years	SWAT	76.22	540.84	542.66		542.79	0.002159	2.04	60.11	45.41	0.53
Reach 1	2715	TR 100 years	HEC HMS	171.70	540.84	543.59		543.82	0.002168	2.81	106.12	53.57	0.57
Reach 1	2715	TR 100 years	SWAT	80.82	540.84	542.72		542.85	0.002159	2.09	62.62	45.91	0.53
Reach 1	1611	TR 10 years	HEC HMS	156.45	538.91	541.41	541.41	542.16	0.012917	4.64	45.74	29.98	1.26
Reach 1	1611	TR 10 years	SWAT	64.60	538.91	540.60	540.60	541.09	0.013979	3.79	24.01	23.70	1.23
Reach 1	1611	TR 50 years	HEC HMS	168.10	538.91	541.49	541.49	542.27	0.012750	4.72	48.24	30.50	1.26
Reach 1	1611	TR 50 years	SWAT	76.22	538.91	540.73	540.73	541.26	0.013902	3.93	27.04	24.78	1.24
Reach 1	1611	TR 100 years	HEC HMS	171.70	538.91	541.51	541.51	542.30	0.012701	4.74	49.00	30.65	1.26
Reach 1	1611	TR 100 years	SWAT	80.82	538.91	540.78	540.78	541.32	0.013816	3.98	28.24	25.19	1.24
Reach 1	86	TR 10 years	HEC HMS	156.45	530.00	531.21	530.48	531.25	0.000500	0.84	187.29	156.55	0.24
Reach 1	86	TR 10 years	SWAT	64.60	530.00	530.71	530.26	530.73	0.000501	0.59	109.50	154.83	0.22
Reach 1	86	TR 50 years	HEC HMS	168.10	530.00	531.27	530.50	531.31	0.000500	0.86	195.67	156.73	0.25
Reach 1	86	TR 50 years	SWAT	76.22	530.00	530.79	530.30	530.81	0.000500	0.63	121.06	155.08	0.23
Reach 1	86	TR 100 years	HEC HMS	171.70	530.00	531.28	530.51	531.32	0.000500	0.87	198.20	156.79	0.25
Reach 1	86	TR 100 years	SWAT	80.82	530.00	530.82	530.31	530.84	0.000500	0.64	125.44	155.18	0.23

ANEXO B – REPORTAGENS SOBRE INUNDAÇÕES EM MARECHAL FLORIANO**Defesa Civil entra em alerta máximo e Rio Jucu começa a transbordar em Marechal Floriano**

25.01.2020

Fotos: Divulgação/Defesa Civil**Por Redação do portal Notícia Capixaba**

A Defesa Civil de Marechal Floriano recomenda precaução a quem mora em áreas próximas ao rio Jucu e a córregos do município serrano. Na tarde deste sábado (25), o nível do rio apresentou elevação acima do nível normal, e houve transbordamento em alguns pontos da cidade.

Segundo o coordenador da Defesa Civil de Marechal, Fábio Stein, a cidade está em alerta máximo por causa das chuvas constantes dos últimos dias. Como a previsão do tempo indica a continuidade das chuvas, a Defesa Civil pede atenção aos moradores em áreas de riscos ou encostas.

Ainda segundo o coordenador Fábio Stein, a previsão indica grande acumulado, e os moradores devem ficar atentos a sinais como inclinação de árvores, postes, trincas e rachaduras em muros ou qualquer movimentação de terra.

Fábio disse ao portal Notícia Capixaba que, três famílias estão isoladas, devido o deslizamento de terra na estrada vicinal do Alto Santa Maria. Em Soído de Baixo, a comunidade ficou parcialmente alagada.

Conforme informação da Cesan, as fortes chuvas alagaram a estação de captação e o abastecimento encontra-se paralisado para os municípios de Marechal Floriano, Domingos Martins e distrito de Santa Isabel.

O órgão orienta que a população deve economizar água e evitar o desperdício. Os técnicos da Cesan estão atuando para implantar uma captação de água alternativa para os municípios, mas ainda não há previsão para restabelecimento do sistema.

Fonte: Notícia Capixaba, 2020. Site acessado em 13 de junho de 2020 as 8:58h.

<http://www.noticiacapixaba.com/site/conteudo.asp?codigo=7214>

A GAZETA Vitória (ES), segunda-feira, 13 de dezembro de 2004 CIDADES | 09

ÁGUA SANTA MARIA DE ARAGUAIA TAMBÉM FOI INUNDADA

Rio Jucu transborda e invade ruas de Marechal

Linhas de ônibus foram suspensas porque estradas já estão praticamente intransitáveis

ROBERLY PEREIRA
MARECHAL FLORIANO. Ruas, quintais, plantações e campo de futebol alagados, rios e córregos transbordando e muito transtorno. Este é o saldo das chuvas torrenciais que caem desde a última segunda-feira na Região Serrana. Os agricultores já estão tendo dificuldade em transportar seus produtos, já que as estradas se transformaram em verdadeiros lamaçais.

Os avicultores temem prejuízos para a produção granjeira. Linhas de ônibus municipais da empresa Transprimo, que atende Domingos Martins e Marechal Floriano, foram suspensas ou reduzidas em função do péssimo estado em que ficaram as estradas, a maioria de terra.

Temporal. Na madrugada de sábado, um temporal alagou a parte baixa da localidade de Santa Maria de Araguaia. O volume de água fez o córrego da região transbordar. O mesmo ocorreu em Marechal Floriano, onde o Braço Sul do Rio Jucu transbordou e invadiu ruas baixas e terrenos ribeirinhos.

Os córregos Banatal, Seido e Costa Pereira, que cortam a cidade, também transbordaram, mas não houve vítimas ou desabrigados.

Os policiais do Destacamento de Polícia Militar (DPM) ficaram ilhados com o enchente do último sábado. Eles precisaram estacionar a radiopatrulha sobre a calçada para chegar à delegacia. Nenhuma ocorrência foi registrada no plantão.

Os comerciantes das ruas próximas aos rios ficaram preocupados. "Já é de costume passar noites em claro por causa do rio. Mas a chuva é necessária. Espero que não tenha causado prejuízos aos agricultores", disse um comerciante, sem se identificar.

O gerente da Transprimo Elizio Deolindo disse que foi necessário suspender algumas linhas de ônibus em função dos buracos e lamaçais nas estradas. O presidente da Associação de Avicultores do Espírito Santo, Antônio Venturini, teme que a chuva traga prejuízos aos granjeiros, devido às condições das estradas vicinais. "Se o tempo ruim persistir, não poderemos entrar nas granjas com ração ou retirar os frangos para vender".



BARRENTAS. Aventuroso se arriscam nas águas do Braço Sul do Rio Jucu, que cresceu de volume com a chuva de sábado... (Foto: ROBERLY PEREIRA)

Fonte: A Gazeta, 2004. Site acessado em 13 de junho de 2020 as 9:04h.

http://www.ijsn.es.gov.br/ConteudoDigital/20160705_aj13950_riojucu.pdf