



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

YURI TOMAZ NEVES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA ACOPLADA 1D/2D  
UTILIZANDO IMAGENS DE PERFILAMENTO A LASER**

Recife  
2019

YURI TOMAZ NEVES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA ACOPLADA 1D/2D  
UTILIZANDO IMAGENS DE PERFILAMENTO A LASER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Recife

2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

N513m Neves, Yuri Tomaz.

Modelagem hidrológica e hidrodinâmica acoplada 1D/2D utilizando imagens de perfilamento a laser / Yuri Tomaz Neves - 2019.

105 folhas, figs.; tabs.; abbrev.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.  
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.  
Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia Civil. 2. HEC-HMS. 3. HEC-RAS. 4. Bacia do Rio Morno. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019 - 95

YURI TOMAZ NEVES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA ACOPLADA 1D/2D  
UTILIZANDO IMAGENS DE PERFILAMENTO A LASER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 26/02/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares (Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco

A Deus por me sustentar com sua doce providência; a minha mãe, a minha esposa e a minha sogra, por toda luta e compreensão durante esses dois anos, DEDICO.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela vida de paz e harmonia. Pela oportunidade de evolução espiritual e pelo amparo nos momentos de dificuldade.

À minha mãe, à minha sogra e à minha esposa, por todo o carinho e amor. Por todo o esforço que fizeram por mim, pelo incentivo e por acreditarem em meu potencial.

Ao meu filho Yuri pela alegria boba nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos de vida Anderson, André, Eduardo e Demóstenes, pelas conversas motivacionais as quais me alegraram e me mantiveram forte.

Ao professor Jaime Cabral, pessoa que sempre admirei ao longo da graduação e tive a honra de ser orientando no mestrado. Obrigado pelos conselhos, horas disponíveis, livros emprestados e o principal: apresentar-me a linha de pesquisa métodos numéricos em recursos hídricos.

Aos professores Alfredo Ribeiro, Anderson Paiva e Roberto Azevedo que de forma sempre solícita sanaram minhas dúvidas.

A todos do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE, em especial aos amigos Edinilson de Castro, Gastão Cerquinha, Livia Fragoso, Marcos Barbosa e Mayara Arruda que contribuíram com discussões acerca dos modelos de simulação.

A Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB) que colaborou fornecendo fotos e dados das seções transversais do rio morno. Obrigado ao Engenheiro Pedro Oliveira por toda contribuição solidária.

Aos funcionários da UFPE, pela presteza e atendimento quando necessário.

A Capes pela bolsa concedida.

Enfim, a todos que me ajudaram direta ou indiretamente para a realização dessa conquista. Esta vitória é nossa!

“Mais fácil me foi encontrar as leis com que se movem os corpos celestes, que estão a milhões de quilômetros, do que definir as leis do movimento da água, que escoam frente aos meus olhos. Galileu Galilei (1564 - 1642).”

(AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015, p. 4).

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo realizar modelagem hidrológica e hidrodinâmica acoplada 1D/2D utilizando imagens de perfilamento a laser. Para isso, foram utilizados os *softwares* livres HEC-HMS, HEC-RAS, HEC-DSSVue e QGIS (com o seu complemento dzetsaka e a ferramenta externa TauDEM). As imagens de perfilamento a laser utilizadas foram fornecidas pelo projeto Pernambuco Tridimensional e possuem resolução de 1:5000. A área de estudo selecionada para aplicar os modelos foi à bacia do Rio Morno, afluente do rio Beberibe – PE. A calibração e a validação foram realizadas com dados de vazão disponíveis e foi simulado um evento real que ocorreu no dia 30/05/2016. Como resultado da modelagem hidrológica foi possível verificar o impacto dos hidrogramas gerados na bacia e na modelagem hidrodinâmica foi possível analisar a variação espacial e temporal da mancha de inundação e gerar mapas com indicadores e índices de perigo. Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir com os órgãos gestores na adoção de medidas estruturais e/ou não estruturais para esse local, tendo em vista que se trata de uma bacia que frequentemente enfrenta diversos problemas de inundação.

Palavras-chave: HEC-HMS. HEC-RAS. Bacia do Rio Morno.

## **ABSTRACT**

The present work had the objective of 1D/2D coupled hydrodynamic and hydrodynamic modeling with laser profiling images. HEC-HMS, HEC-RAS, HEC-DSSVue and QGIS (with its dzetsaka complement and an external TauDEM tool) were used for this. As profile images a laser was injected by the Pernambuco Tridimensional project and has a resolution of 1:5000. A study area selected for the application of the models in the Morno River basin, a tributary of the Beberibe - PE river. Calibration and validation were performed using the available flow feature and simulated a real event that occurred on 05/30/2016. As a result of the hydrological modeling, it was possible to verify the impact of the hydrographs generated in the basin and in the hydrodynamic modeling, it was possible the spatial and temporal analysis of the flood and generation of maps with indicators and indices of danger. It is hoped that the results can be the main gestures in front of a situation and/or not for that location, considering that they are a basin that fits the flood problems.

Keywords: HEC-HMS. HEC-RAS. Morno River Basin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Hierarquia dos modelos.....	20
Figura 2 –	Classificação dos escoamentos em condutos livres .....	24
Figura 3 –	Seção transversal de um rio.....	28
Figura 4 –	Bacia hidrográfica com cinco estações.....	29
Figura 5 –	Interface gráfica principal do HEC-HMS .....	41
Figura 6 –	Etapas para realizar uma simulação no HEC-HMS .....	44
Figura 7 –	Etapas para calibrar e validar um modelo de forma manual no HEC-HMS .....	46
Figura 8 –	Interface gráfica principal do HEC-RAS .....	48
Figura 9 –	Etapas para realizar uma simulação no HEC-RAS .....	49
Figura 10 –	Divisão do estado de Pernambuco em cinco blocos .....	55
Figura 11 –	Diagrama de perigo de inundação .....	58
Figura 12 –	Localização da bacia do rio Morno .....	59
Figura 13 –	Encontro dos rios Beberibe e Morno .....	60
Figura 14 –	Problemas observados no rio Morno .....	60
Figura 15 –	Esquema desenvolvido no HEC-HMS .....	61
Figura 16 –	MDT utilizado na modelagem .....	62
Figura 17 –	Distribuição espacial das PCD's utilizadas no modelo .....	63
Figura 18 –	Esquema desenvolvido no HEC-RAS .....	64
Figura 19 –	Células permeáveis e impermeáveis da bacia hidrográfica do rio Beberibe .....	66
Figura 20 –	Dados de chuva e vazão obtidos na calibração .....	68
Figura 21 –	Dados de chuva e vazão obtidos na validação .....	69
Figura 22 –	Hidrogramas gerados no HEC-HMS .....	69
Figura 23 –	Área atingida pela inundação .....	71
Figura 24 –	Bairros afetados pela inundação .....	72
Figura 25 –	Resultados dos indicadores de perigo: (1) profundidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo (m); (2) velocidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo (m/s) .....	73
Figura 26 –	Resultados dos indicadores de perigo: (1) força máxima	74

	do fluxo de água em todos os locais, independente do tempo ( $m^3/s^2$ ); (2) energia específica máxima da água em todos os locais, independente do tempo (m) .....	
Figura 27 –	Resultado do indicador de perigo intensidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo ( $m^2/s$ ) ..	75
Figura 28 –	Mapas dos índices de Perigo: (1) metodologia proposta por Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016); (2) metodologia proposta por Monte, Tschiedel e Goldenfum (2017); e (3) metodologia proposta por Stephenson (2002) .....	76
Figura 29 –	Duração da inundação (horas) .....	78
Figura 30 –	Tempo decorrido em horas para: (1) inundação atingir o limiar de 0,60m; (2) inundação atingir limiar de 1,20m; (3) inundação recuar para limiar de 1,20m; e (4) inundação recuar para limiar 0,60m .....	78
Figura 31 –	Variação da mancha de inundação de 01:00h até 04:00h	79
Figura 32 –	Variação da mancha de inundação de 05:00h até 12:00h	80
Figura 33 –	Variação da mancha de inundação de 13:00h até 18:00h	81
Figura 34 –	Mapas: (1) profundidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo; (2) velocidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo; (3) profundidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma Córrego da Areia; (4) velocidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma Córrego da Areia; (5) profundidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma BRM4; (6) velocidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma BRM4 .....	82
Figura 35 –	Mapas: (1) profundidade da água quando atingida a vazão máxima dos hidrogramas BRM2 e BRM3; (2) velocidade da água quando atingida a vazão máxima dos hidrogramas BRM2 e BRM3; (3) profundidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma J1; (4)	83

velocidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma J1; (5) profundidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma no exutório; (4) velocidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma no exutório .....

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Ordem de grandeza dos termos da equação de Saint - Venant para três rios do Brasil .....	28
Tabela 2 –	Alguns programas de modelagem de sistemas hídricos.....	39
Tabela 3 –	Elementos Hidrológicos e suas descrições.....	42
Tabela 4 –	Modelos disponíveis para os elementos subbasin e reach no HEC-HMS .....	43
Tabela 5 –	Características técnicas dos produtos do PE3D .....	55
Tabela 6 –	Indicadores de perigo e seus limiares .....	57
Tabela 7 –	Dados das PCD'S utilizadas no modelo.....	63
Tabela 8 –	Percentual de área impermeável de cada bacia hidrográfica .....	67
Tabela 9 –	Parâmetros dos rios após calibração e validação .....	67
Tabela 10 –	Parâmetros das bacias após calibração e validação .....	68
Tabela 11 –	Coeficientes de Eficiência Nash-Sutcliffe após calibração e validação do modelo .....	68
Tabela 12 –	Volume precipitado, escoado e de perdas ocorrido em cada bacia .....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCII	AMERICAN STANDARD CODE FOR INFORMATION INTERCHANGE
BRM	BACIA RIO MORNO
CAD	COMPUTER AIDED DESIGN
CN	CURVE NUMBER
DSS	DATA STORAGE SYSTEM
DSSVue	DATA STORAGE SYSTEM VISUAL UTILITY ENGINE
EMLURB	EMPRESA DE MANUTENÇÃO E LIMPEZA URBANA
EUA	UNITED STATES OF AMERICA
GeoTIFF	GEOREFERENCED TAGGED IMAGE FILE FORMAT
HEC	HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER
HMS	HYDROLOGIC MODELING SYSTEM
LIDAR	LIGHT DETECTION AND RANGING
MDE	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO
MDF	MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS
MDT	MODELO DIGITAL DE TERRENO
MEC	MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO
MEF	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS
MVF	MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS
OSGeo	OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION
PCD	PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS
PE3D	PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL
PNG	PORTABLE NETWORK GRAPHICS
SCS	SOIL CONSERVATION SERVICE
SIG	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
TFW	WORLD FILE FOR TIFF
TIN	TRIANGULAR IRREGULAR NETWORK
RAS	RIVER ANALYSIS SYSTEM
RM	RIO MORNO
VC	VOLUME DE CONTROLE

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
3.1	MODELAGEM DE SISTEMAS HÍDRICOS .....	19
3.2	MODELOS HIDRODINÂMICOS E HIDROLÓGICOS .....	23
<b>3.2.1</b>	<b>Modelos Hidrodinâmicos</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Modelos Hidrológicos</b> .....	<b>29</b>
3.2.2.1	Precipitação .....	29
3.2.2.2	Perdas .....	30
3.2.2.3	Escoamento Superficial .....	32
3.2.2.4	Propagação de Vazão em Rios .....	34
3.3	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS .....	36
3.4	MÉTODOS NUMÉRICOS .....	37
3.5	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DE MODELAGEM .....	38
<b>3.5.1</b>	<b>Programa de Modelagem Hidrológica HEC-HMS</b> .....	<b>40</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Programa de Modelagem Hidrodinâmica HEC-RAS</b> .....	<b>47</b>
3.6	HEC-DSSVue .....	52
3.7	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) .....	52
3.8	PERFILAMENTO A LASER .....	54
3.9	MAPAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO .....	56
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>59</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	59
4.2	EVENTO SIMULADO .....	61
4.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	61
4.4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	64
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>66</b>
5.1	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	66
5.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	69
5.3	MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....	71

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO A – PLANTA CHAVE E SEÇÕES DO RIO MORNO .....</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As alterações nas bacias hidrográficas geradas pelo crescimento urbano desordenado evidenciam muitos problemas relacionados à drenagem de águas pluviais. O crescimento urbano promove a impermeabilização do solo, desmatamento da vegetação, ocupação das várzeas dos rios, estruturação do sistema viário em vias de fundo de vale, erosão e assoreamento, lixo e poluição.

Além dos processos de urbanização, situações como erro de concepção, falta de manutenção e obsolescência da infraestrutura urbana, bem como, o agravamento dos eventos de chuvas intensas ocasionadas pelas mudanças climáticas, também podem potencializar diversos impasses para com a drenagem de águas pluviais.

Os problemas na drenagem como a ocorrência de alagamentos, enchentes, inundações e enxurradas, geram diversos impactos sobre a população e ao meio ambiente, como prejuízos de perdas materiais e humanas, interrupção da atividade econômica das áreas inundadas, alteração da qualidade das águas superficiais e problemas relacionados à saúde pública (veiculação de doenças).

Para evitar esses impactos é de suma importância a predição de cenários, uma vez que experimentos de campo são dispendiosos, demandam tempo e algumas vezes são impossíveis de se conduzir. Assim, se faz necessário à utilização de instrumentos capazes de conhecer a dinâmica desses sistemas, além de criar condições técnicas que possam servir de suporte à tomada de decisões.

O uso de modelos de simulação hidrológica e hidrodinâmica tem se tornado uma ferramenta poderosa para descrever e estudar esses processos, principalmente quando os resultados do modelo hidrológico podem ser integrados de forma eficiente aos modelos hidrodinâmicos. Esses modelos estão em constante desenvolvimento e de acordo com Liu et al. (2015) um dos avanços recentes mais significativos dos modelos hidrodinâmicos 1D é a sua capacidade de ser acoplado a modelos hidrodinâmicos 2D. Essa abordagem permite representar o fluxo no rio como 1D e o fluxo na planície de inundação como 2D, superando a limitação que os modelos 1D possuem em representar o comportamento lateral da onda de inundação nos locais onde o fluxo não pode ser assumido com uma direção paralela ao fluxo na calha do rio. Além disso, é possível reduzir o custo computacional, uma vez que se elimina a malha 2D da calha do rio, onde o fluxo é predominantemente 1D.

No tocante aos dados utilizados nos modelos, uma boa descrição da topografia da área de estudo se mostra primordial para a obtenção de resultados representativos. Uma técnica que permite obter informações altimétricas da superfície terrestre com alta precisão é a do perfilamento a laser e, para isso, utiliza feixes de laser emitidos e captados por sensores instalados em aeronaves. Apesar do grande potencial, essa metodologia é explorada em poucas regiões do mundo.

Diversas são as aplicações dos modelos, a saber: mapeamento de risco de inundação (APEL et al., 2006; DUTTA; HERATH; MUSIAKE, 2006), avaliação de danos causados pelas inundações (BHUIYAN; DUTTA, 2011; MERZ et al., 2010), previsão de inundação em tempo real (ARDUINO; REGGIANI; TODINI, 2005), engenharia relacionada a inundações (GALLEGOS; SCHUBERT; SANDERS, 2009), e planejamento de recursos hídricos (VAZE et al., 2013), bem como tendo servido como um importante pré-requisito para investigar a erosão e o transporte de sedimentos (MARRIOTT, 1992; PIZZUTO, 1987), transporte de contaminantes (KARIM et al., 2015), hidrologia do sistema fluvial (DUTTA et al., 2013) e hidrologia de captação (ABBOTT et al., 1986; BEVEN, 1989).

Na região metropolitana de Recife, vários estudos de drenagem já foram realizados, tanto em experimentos de campo como em modelagem computacional, para analisar e entender melhor a problemática do manejo das águas pluviais (CABRAL; ALENCAR, 2005; SILVA; CABRAL, 2014; MELO et al., 2014; COUTINHO et al., 2016; SILVA JUNIOR; SILVA; CABRAL, 2017).

## 2 OBJETIVOS

Nesse item serão apresentados os objetivos da presente pesquisa.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar modelagem hidrológica e hidrodinâmica acoplada 1D/2D utilizando imagens de perfilamento a laser.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver, calibrar e validar modelo hidrológico;
- Desenvolver e integrar modelo hidrodinâmico a modelo hidrológico;
- Simular um evento real;
- Verificar o impacto dos hidrogramas gerados pelas bacias;
- Analisar a variação espacial e temporal da mancha de inundação;
- Gerar mapas com indicadores e índices de perigo.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse item serão apresentados conceitos primordiais para compreensão da presente pesquisa.

#### 3.1 MODELAGEM DE SISTEMAS HÍDRICOS

De acordo com Campos (2009) sistema é uma estrutura formada por vários componentes que interagem entre si, recebem impulsos, efetuam transformações e emitem respostas.

Os modelos buscam representar os sistemas, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (TUCCI, 2005).

De acordo com Tucci (2005) os modelos podem ser classificados em:

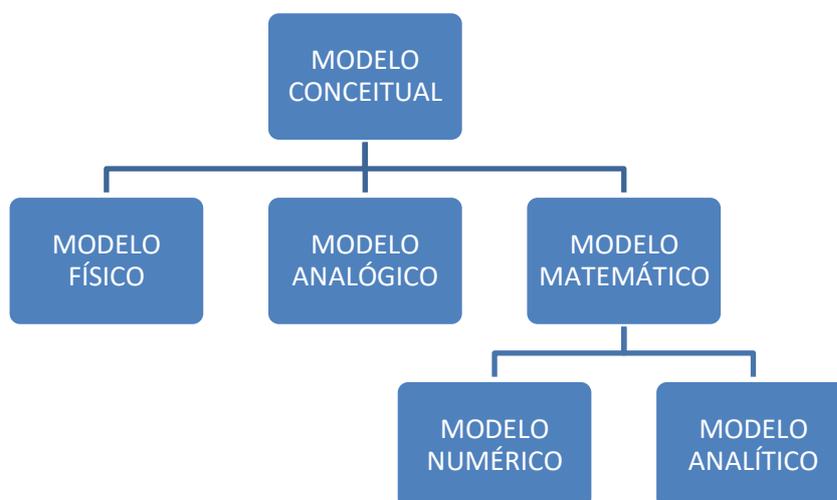
- Modelos físicos: buscam representar o sistema por um protótipo em escala menor;
- Modelos analógicos: utilizam de analogia das equações que regem diferentes fenômenos. Como exemplo tem-se a analogia entre um sistema hidráulico e um circuito elétrico (esses são mais simples e de menor custo);
- Modelos matemáticos, também chamados de digitais, buscam representar a natureza do sistema, através de equações matemáticas.

Rosman (2001) apresenta uma classificação mais abrangente, incluindo os seguintes modelos:

- Modelo conceitual: consiste em formar na mente a concepção do fenômeno observado, conhecer suas causas e efeitos, compreender as interações e relevâncias dos agentes intervenientes do fenômeno estudado;
- Modelo analítico: consiste na resolução direta dos modelos matemáticos. As equações diferenciais que regem o escoamento em rios e canais só proporcionam soluções gerais para situações bastante simplificadas e idealizadas;
- Modelo numérico: é a tradução dos modelos matemáticos adaptados para diferentes métodos de cálculo, como por exemplo, diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos.

Com base nos tipos de modelos citados, tem-se a Figura 1 com a hierarquia dos modelos:

Figura 1 – Hierarquia dos modelos.



Fonte: O Autor (2019).

Os modelos matemáticos são os mais utilizados hoje em dia em função do aumento da capacidade e da velocidade dos computadores, dos avanços científicos e do baixo custo. Além disso, sua versatilidade e praticidade fazem com que sejam os modelos mais aplicados na Engenharia (CAMPOS, 2009).

De acordo com Tucci (2005) os modelos podem ser agrupados nas seguintes classes:

- Contínuo e discreto: um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, enquanto que o sistema é discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos. Exemplo do registro de uma função contínua no tempo é o uso do linógrafo gráfico para registrar níveis. O registro discreto desta mesma variável é efetuado através de observadores, em determinadas horas do dia. A maioria dos sistemas hidrológicos é do tipo contínuo e representado por modelo discreto;
- Estocástico e determinístico: se a chance de ocorrência das variáveis é levada em conta, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. Caso contrário, o modelo e os processos são ditos determinísticos;

- Concentrado e distribuído: um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial. Em geral eles utilizam somente o tempo como variável independente. Como exemplo de modelo concentrado tem-se a precipitação média de uma bacia. Um modelo é dito distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo. Na prática não existem modelos puramente distribuídos, já que são utilizadas discretizações numéricas, que de alguma forma, tornam o modelo distribuído, concentrado, numa pequena subdivisão;
- Conceitual e empírico: um modelo é dito conceitual, quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. A definição de modelo conceitual é artificial, já que funções empíricas também são usadas (equações de Darcy, Horton, entre outras). Por esse motivo se subdividem em: semi-conceituais e físicos. Os modelos do tipo empíricos ou “caixa-preta” são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não tem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

O processo de utilização dos modelos dar-se o nome de simulação e de acordo com Tucci (2005), na simulação existe, em geral, três fases que estão interligadas com o objetivo geral de prever cenários:

- Estimativa ou ajuste dos parâmetros: é a fase da simulação onde os parâmetros devem ser determinados;
- Verificação: é a simulação do modelo com os parâmetros estimados, onde se verifica a validade do ajuste realizado;
- Previsão: é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para quantificação de sua resposta a diferentes entradas.

Tucci (2005) afirma que a estimativa ou ajuste dos parâmetros pode ser feito utilizando os seguintes métodos:

- Estimativa sem dados históricos: quando não existem dados sobre as variáveis do sistema, é possível estimar os valores dos parâmetros baseando-se em informações das características físicas do sistema. Cada parâmetro possui um intervalo de variação, obtido da literatura. A falta de dados pode influenciar os resultados, e valores dos parâmetros obtidos da literatura podem resultar em prognósticos limitados;
- Ajuste por tentativas: é o processo em que existindo valores das variáveis de entrada e saída, são obtidos por tentativas os parâmetros que melhor representem os valores observados através do modelo utilizado;
- Ajuste por otimização: utiliza os mesmos dados do processo por tentativa, mas por métodos matemáticos otimiza uma função objetiva que retrata a diferença entre os valores observados e os calculados pelo modelo;
- Amostragem: os valores dos parâmetros são obtidos através de medições específicas no sistema.

Alguns termos que vale a pena definir, por serem utilizados com frequência na área de modelagem de sistemas hídricos, são: fenômeno; variável; e parâmetro. Tucci (2005) define esses termos como:

- Fenômeno: é um processo físico que produz alteração de estado no sistema. Como exemplo pode-se citar a precipitação, a evaporação e a infiltração;
- Variável: é um valor que descreve quantitativamente um fenômeno, variando no espaço e no tempo. Como exemplo pode-se citar a vazão, que descreve o estado do escoamento;
- Parâmetro: é um valor que caracteriza o sistema, podendo também variar com o espaço e o tempo. Como exemplo pode-se citar a rugosidade de uma seção de um rio, a área de uma bacia hidrográfica e as áreas impermeáveis de uma bacia.

## 3.2 MODELOS HIDRODINÂMICOS E HIDROLÓGICOS

Os modelos de sistemas hídricos podem ser subdivididos em hidrológicos e hidrodinâmicos. Os modelos hidrológicos buscam simular o comportamento de uma bacia hidrográfica e são utilizados quando é preciso obter a vazão, sem considerar as características hidráulicas do escoamento. Já os modelos hidrodinâmicos consideram essas características, possibilitando analisar situações como o nível d'água ou vazão sob influência de remanso.

Nos itens 3.2.1 e 3.2.2 serão apresentados modelos na ótica dos manuais técnicos de referência dos programas de modelagem HEC-RAS 5.0.3 (USACE, 2016a) e HEC-HMS 4.2.1 (USACE, 2000), respectivamente.

### 3.2.1 Modelos Hidrodinâmicos

Os modelos hidráulicos podem ser classificados, quanto a sua dinâmica temporal em: regime permanente e não permanente (transiente). Se ao longo do tempo o vetor velocidade não se alterar em grandeza e direção em determinada seção transversal de um líquido em movimento, o escoamento nesse ponto é qualificado como permanente. Caso contrário, o escoamento é dito não permanente (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015).

Em relação à variação espacial, o escoamento pode ser classificado em uniforme e não uniforme (variado). Quando as características hidráulicas não variam de uma seção para outra, o escoamento é chamado uniforme. Por outro lado, é dito não uniforme quando essas características variam (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ, 2015).

De acordo com Cirilo et al. (2014a) o escoamento variado pode ainda ser classificado em gradual e brusco (rápido). Quando estas características variam de forma lenta, gradual, diz-se que o escoamento é gradualmente variado; quando as características variam de forma brusca, repentina, diz-se que o escoamento é bruscamente variado.

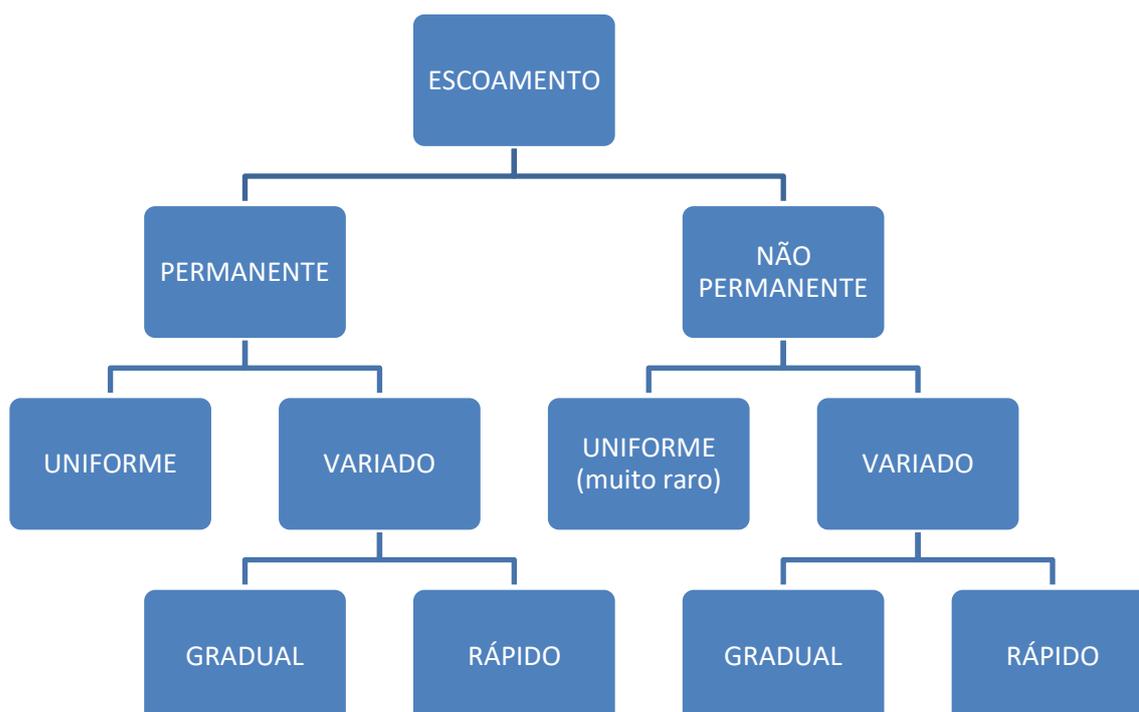
De acordo com Campos (2009) o regime permanente uniforme acontece em canais prismáticos de grande comprimento. Nesses, há suficiente espaço para eliminar as influências da estrutura de saída à jusante, como acontece em longos canais de irrigação. O regime permanente variado ocorre à montante de obras tipo vertedores, barragens, quedas e outras. Na avaliação de influências de barragens em rios, os modelos normalmente utilizam o regime variado.

O regime não permanente variado é o mais encontrado em estruturas hidráulicas e, a rigor, o único que acontece em rios e riachos naturais. O regime não permanente uniforme não pode ser encontrado na natureza (CAMPOS, 2009).

A ocorrência do escoamento gradualmente variado está associada aos trechos iniciais e finais de canais prismáticos, às transições verticais e horizontais graduais e aos canais com declividade variável. Já as situações práticas usuais de escoamento bruscamente variado estão associadas a estruturas hidráulicas, tais como vertedores, comportas, dissipadores de energia, degraus, obstáculos, transições bruscas, entre outras. Uma situação prática notável de ocorrência dessas duas situações é no trecho de um ressalto hidráulico. A montante e a jusante do ressalto o escoamento é caracterizado como gradualmente variado e, no ressalto, como bruscamente variado (CIRILO et al., 2014a).

A Figura 2 apresenta um esquema resumindo a classificação desses escoamentos com base em Porto (2006):

Figura 2 – Classificação dos escoamentos em condutos livres.



Fonte: Adaptado de Porto (2006).

Nos modelos hidráulicos, o movimento de fluidos em três dimensões é descrito pelas clássicas equações diferenciais parciais da continuidade (também chamada de conservação de massa) e da quantidade de movimento (também chamada de conservação do momento) de Navier-Stokes. Um caso particular dessas equações são as Equações de Águas Rasas, originadas com base nas seguintes simplificações:

- Fluxo incompressível;
- Densidade uniforme;
- Pressão hidrostática;
- Dimensão horizontal é muito maior que a dimensão vertical;
- Equações médias de Reynolds (Viscosidade turbulenta - *Eddy viscosity*);
- Ausência da força do vento.

As equações de Águas Rasas em duas dimensões são apresentadas a seguir, sendo a Equação 1 a da continuidade e as Equações 2 e 3 as da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + fv \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \quad (3)$$

Onde:  $H$  - elevação da superfície da água que é igual à elevação da superfície do terreno mais a altura da lâmina de água;  $t$  - tempo;  $h$  - altura da lâmina de água;  $u$  e  $v$  - são as componentes da velocidade nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $x$  e  $y$  - direções cartesianas;  $q$  - fluxo de entrada/saída;  $g$  - aceleração da gravidade;  $\nu_t$  - coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal;  $c_f$  - coeficiente de atrito; e  $f$  - parâmetro de Coriolis.

Outra forma de representar a Equação 1 é a vetorial, conforme pode ser visto na Equação 4:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \bullet hV + q = 0 \quad (4)$$

Onde:  $V = (u, v)$  - vetor velocidade; e  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$  - vetor operador de derivadas parciais;

O lado esquerdo das Equações 2 e 3 contém os termos da aceleração e o lado direito às forças internas e externas que atuam no fluido. Essas duas equações podem ser apresentadas na forma vetorial, em uma única equação, tornando-as mais compacta. A forma vetorial das equações da quantidade de movimento é representada pela Equação 5:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \bullet \nabla V = -g\nabla H + v_t \nabla^2 V - c_f V + fk \times V \quad (5)$$

Onde:  $k$  - vetor unitário na direção vertical.

Cada termo da Equação 5 possui um significado físico. Da esquerda para a direita tem-se: aceleração local, aceleração advectiva, gradiente de pressão, difusão devido à turbulência (*Eddy diffusion*), atrito e termo de Coriolis.

A partir das equações de Águas Rasas, duas equações muito utilizadas em modelos hidráulicos são obtidas.

A primeira é obtida quando os termos dominantes da Equação 5 são gradiente de pressão e atrito, podendo os demais serem desconsiderados. Admitindo essa simplificação e utilizando a equação de Chézy com o coeficiente de Manning para obter o coeficiente de atrito, surgem as equações bidimensionais da onda de difusão, que na forma vetorial é representada pela Equação 6:

$$V = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}} \quad (6)$$

Onde:  $R$  - raio Hidráulico; e  $n$  - coeficiente de Manning.

Ao substituir a Equação 6 diretamente na equação da continuidade, Equação 4, obtém-se a forma diferencial clássica do modelo conhecido como Equações de Onda Difusa de Águas Rasas, expresso pela Equação 7:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (7)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{(R(H))^{5/3}}{n|\nabla H|^{1/2}}. \quad (8)$$

A segunda equação obtida a partir das equações de Águas Rasas diz respeito a sua versão unidimensional. Essas equações recebem o nome de Equações de Saint-Venant (também conhecidas como equações da onda dinâmica) e podem ser representadas pelas Equações 9 e 10:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAc_f = 0 \quad (10)$$

Onde:  $A$  - área molhada;  $Q$  - vazão na seção transversal; e  $ql$  - fluxo de entrada lateral por unidade de comprimento.

As Equações 9 e 10 representam as equações de Saint-Venant da continuidade e da quantidade de movimento, respectivamente. Existem outras formas de expressar a Equação 10, em função das variáveis vazão e elevação da superfície da água ( $Q$  e  $H$ ), a saber:

Em função da vazão e da altura da lâmina de água ( $Q$  e  $h$ ):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAc_f \quad (11)$$

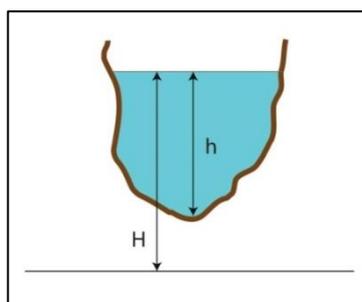
Em função da velocidade e da altura da lâmina de água ( $u$  e  $h$ ):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - c_f) \quad (12)$$

Onde:  $S_0$  - inclinação do eixo longitudinal do fundo do rio.

A Figura 3 ilustra a diferença entre elevação da superfície da água ( $H$ ) e a altura da lâmina de água ( $h$ ), variáveis utilizadas nas equações supracitadas:

Figura 3 – Seção transversal de um rio.



Fonte: O Autor (2019).

Ao analisar os diferentes termos da equação da quantidade de movimento de Saint-Venant, verifica-se que os termos possuem diferentes ordens de grandeza e que, em geral, a declividade longitudinal do fundo e a declividade da linha de atrito tem importância muito maior que os demais (SZYMKIEWICZ, 2010). A Tabela 1 apresenta valores médios da ordem de grandeza de cada termo para alguns rios brasileiros:

Tabela 1 – Ordem de grandeza dos termos da equação de Saint - Venant para três rios do Brasil.

Rios	$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t}$	$\frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x}$	$\frac{\partial y}{\partial x}$	$S_0$	$c_f$
Capibaribe (Limoeiro - Paudalho)	0,02	0,00	0,06	1,60	2,34
Paraíba do Sul (Caçapava - Tremembé)	0,00	0,00	0,03	6,67	6,70
Paraíba do Sul (Resende - Floriano)	0,00	0,00	0,02	0,21	0,26
Uruguai (Marcelino Ramos - Ita)	0,00	0,00	0,06	0,72	0,66

Fonte: Adaptado de Silva e Mascarenhas (1981) apud Silva (2006).

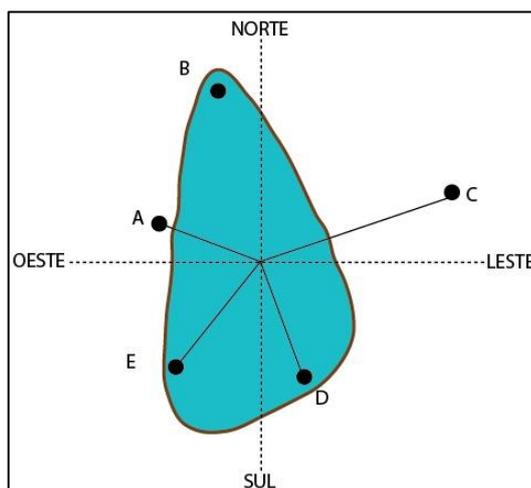
### 3.2.2 Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos permitem avaliar diversos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, como a precipitação, as perdas (interceptação, armazenamento superficial e infiltração), o escoamento superficial e a propagação de vazão em rios (com modelos simplificados). Os itens a seguir apresentarão modelos utilizados nesses processos.

#### 3.2.2.1 Precipitação

A precipitação é considerada a principal forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica. Para a sua obtenção, um dos modelos de interpolação mais utilizados é o do inverso da distância ao quadrado. Esse modelo consiste na obtenção do hietograma de um local (ponto) da bacia hidrográfica, com base em ponderações de precipitações registradas em seu entorno. Para ilustrar como o modelo se aplica, tem-se a Figura 4 apresentando uma bacia hidrográfica e cinco estações (A, B, C, D e E):

Figura 4 – Bacia hidrográfica com cinco estações.



Fonte: Adaptada de USACE (2000).

A análise começa com a criação de dois eixos hipotéticos NORTE-SUL, LESTE-OESTE, gerando quatro quadrantes. Em cada quadrante é selecionada a estação mais próxima do ponto.

Na próxima etapa, é realizado o cálculo do peso de cada estação. Tomando como exemplo a estação C, o cálculo é realizado da seguinte maneira:

$$w_C = \frac{\frac{1}{d_C^2}}{\frac{1}{d_C^2} + \frac{1}{d_D^2} + \frac{1}{d_E^2} + \frac{1}{d_A^2}} \quad (13)$$

Onde:  $w_C$  - peso atribuído à estação C;  $d_C$  - distância do ponto de análise a estação C;  $d_D$  - distância do ponto de análise a estação D;  $d_E$  - distância do ponto de análise a estação E; e  $d_A$  - distância do ponto de análise a estação A.

Por fim, são calculadas as ordenadas do hietograma do ponto no momento t, através da Equação 14:

$$p_{\text{ponto}}(t) = w_A p_A(t) + w_C p_C(t) + w_D p_D(t) + w_E p_E(t) \quad (14)$$

Onde:  $p_{\text{ponto}}(t)$  - precipitação no local/ponto de análise, no momento t;  $p_A(t)$ ,  $p_C(t)$ ,  $p_D(t)$ ,  $p_E(t)$  - precipitação nas estações A, C, D e E no momento t, respectivamente; e  $w_A$ ,  $w_C$ ,  $w_D$ , e  $w_E$  - pesos atribuídos às estações A, C, D e E.

O cálculo da Equação 14 é repetido para todos os tempos.

Analisando a Figura 4 é possível verificar que a estação B não foi utilizada. Isso se deve ao fato da estação B não ser a estação mais próxima do ponto em análise no quadrante noroeste. No entanto, se em algum momento a ordenada da precipitação estiver faltando na estação A, os dados da estação B serão utilizados. Em termos gerais, a estação mais próxima no quadrante com dados (incluindo um valor zero) será utilizada.

### 3.2.2.2 Perdas

As perdas representam a parcela da precipitação que não contribui com a geração do escoamento superficial. Diferentes tipos de perdas podem existir em uma bacia hidrográfica, sendo elas: interceptação, armazenamento superficial e infiltração. A interceptação e o armazenamento na superfície dizem respeito ao armazenamento de água em vegetações, depressões impermeáveis, rachaduras e fendas de estacionamentos ou coberturas, ou em uma área de superfície onde a água não é livre para se mover como escoamento superficial. Já a infiltração se refere à penetração da água no solo, a partir da superfície.

O modelo SCS - CN inclui todas essas perdas e é considerado um dos mais simples e mais utilizados para estimar a precipitação efetiva. O termo SCS do modelo se refere ao *National Resources Conservation Center* dos EUA (antigo *Soil Conservation Service* – SCS) e o CN porque está baseado em um parâmetro relacionado às características do solo e da ocupação da bacia, denominado *Curve Number*.

O modelo SCS - CN estima a precipitação efetiva acumulada em função da precipitação acumulada e das condições de cobertura, uso, tipo e umidade antecedente do solo, utilizando a Equação 15:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (15)$$

Onde:  $P_e$  - precipitação efetiva acumulada no tempo;  $P$  - precipitação acumulada no tempo;  $I_a$  - perdas iniciais (incluem acúmulo de água na superfície, interceptação, e infiltração no solo antes do início da geração de escoamento superficial); e  $S$  - máxima infiltração acumulada potencial (capacidade da bacia em absorver e reter a precipitação).

Analisando os resultados de pequenas bacias experimentais, o SCS desenvolveu uma relação empírica, apresentada na Equação 16:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (16)$$

Considerando a Equação 16, a Equação 15 pode ser reescrita como:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{(P + 0,8 \cdot S)} \quad (17)$$

A Equação 17 é utilizada quando  $P > I_a$ . Quando  $P \leq I_a$  não tem precipitação efetiva, ou seja:  $P_e = 0$ .

A precipitação efetiva incremental para um intervalo de tempo é calculada como a diferença entre a precipitação efetiva acumulada no fim e no início do período.

O valor de  $S$  foi analisado experimentalmente em diversas bacias rurais nos Estados Unidos na década de 1950 (Hawkins et al., 2009), e foi relacionado ao parâmetro CN, conforme a Equação 18:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (18)$$

Onde:  $CN$  – parâmetro adimensional cujo valor varia entre 0 e 100, sendo que 0 corresponde a um solo de capacidade de infiltração infinita e 100 corresponde a um solo completamente impermeável.

O valor de CN é dado em tabelas desenvolvidas a partir de experimentos em bacias pequenas nos EUA, e varia de acordo com quatro tipos de solos e com o tipo de ocupação. Uma relação entre os tipos de solos dos EUA e os tipos de solos adotados na classificação brasileira é apresentada por Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005).

### 3.2.2.3 Escoamento Superficial

O escoamento superficial se refere à vazão (hidrograma) gerada pela precipitação efetiva. Uma teoria muito utilizada para prever esse hidrograma é a do hidrograma unitário, que recebe esse nome por ser gerado por uma precipitação efetiva unitária. Para realizar o cálculo do hidrograma utilizando a teoria do hidrograma unitário, utiliza-se uma representação discreta da precipitação efetiva em que um “pulso” da precipitação efetiva é conhecido para cada intervalo de tempo ( $\Delta t$ ); em seguida, aplica-se a equação da convolução discreta para um sistema linear, expressa pela Equação 19:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (19)$$

Onde:  $Q_n$  - ordenada do hidrograma no tempo  $n\Delta t$ ;  $P_m$  - precipitação efetiva no intervalo de tempo  $m\Delta t$  para  $(m+1)\Delta t$ ;  $M$  - número total de “pulsos” de precipitação discretos; e  $U_{n-m+1}$  - ordenada do hidrograma unitário no tempo  $(n-m+1)\Delta t$ .

A utilização da Equação 19 requer as seguintes suposições:

- A precipitação efetiva se distribui uniformemente no espaço e possui intensidade constante ao longo do intervalo de tempo  $\Delta T$  ;
- As ordenadas do hidrograma correspondente à precipitação efetiva de uma dada duração são diretamente proporcionais ao volume excedente;
- O hidrograma resultante de um dado incremento de precipitação efetiva é independente do tempo de ocorrência e da precipitação antecedente;
- Precipitação efetiva com duração igual produz hidrogramas com tempo de base equivalentes, independentemente da intensidade da precipitação.

A precipitação efetiva da Equação 19 pode ser obtida utilizando a metodologia descrita no item 3.2.2.2. No que diz respeito ao hidrograma unitário, um modelo que é bastante utilizado é o Hidrograma Unitário Sintético adimensional do SCS. Esse modelo se baseia na obtenção de parâmetros com base no tempo de concentração e na área das bacias.

Para aplicar o modelo, o passo inicial é obter o tempo de concentração da bacia, que pode ser estimado através da equação empírica de Kirpich, apresentada na Equação 20:

$$t_c = 57 \cdot \left( \frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (20)$$

Onde:  $t_c$  - tempo de concentração (*minutos*);  $L$  - comprimento do curso d'água principal (*km*);  $\Delta h$  - diferença de altitude ao longo do curso d'água principal (*m*).

A próxima etapa é determinar o tempo de pico do hidrograma, que é estimado como 60% do tempo de concentração, conforme Equação 21:

$$t_{lag} = 0,6 \cdot t_c \quad (21)$$

Na sequência, calcula-se o tempo de ascensão do hidrograma através da Equação 22:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (22)$$

Onde:  $\Delta t$  - duração da precipitação efetiva, que também é o intervalo computacional da simulação (*minutos*).

Recomenda-se que o intervalo computacional adotado na simulação ( $\Delta t$ ) seja menor que 29% do tempo de pico do hidrograma ( $t_{lag}$ ).

Por fim, calcula-se a vazão de pico através da Equação 23:

$$U_p = 2,08 \frac{A}{T_p} \quad (23)$$

Onde:  $U_p$  - vazão de pico ( $m^3/s$ );  $A$  - área da bacia hidrográfica ( $km^2$ ); e  $T_p$  - tempo de ascensão (*horas*).

Com  $U_p$  e  $T_p$  o hidrograma unitário é obtido na forma adimensional, que é embutido em programas de modelagem, por multiplicação.

#### 3.2.2.4 Propagação de Vazão em Rios

Os modelos de propagação de vazão em rios têm como objetivo determinar o hidrograma de vazões em uma seção transversal de um rio, baseando-se no hidrograma conhecido em uma ou mais seções transversais localizadas a montante. Entre os modelos desenvolvidos de propagação de vazão em rios está o de Muskingum-Cunge, que se baseia na combinação da equação da continuidade com uma simplificação da equação do momento (aproximação da onda de difusão). A Equação 24 apresenta a equação utilizada pelo modelo:

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_L \Delta x) \quad (24)$$

Onde:  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  - coeficientes;  $I_{t-1}$  e  $I_t$  ordenadas dos hidrogramas de entrada nos tempos  $t-1$  e  $t$ , respectivamente;  $O_{t-1}$  - ordenadas do hidrograma de saída no tempo  $t-1$ ;  $q_L$  - contribuição lateral;  $\Delta x$  - passo de distância.

Os coeficientes da Equação 24 são definidos pelas Equações 25, 26, 27 e 28:

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (25)$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (26)$$

$$C_3 = \frac{2(1-X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (27)$$

$$C_4 = \frac{2\left(\frac{\Delta t}{K}\right)}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (28)$$

Onde:  $\Delta t$  - passo de tempo;  $K$  e  $X$  - parâmetros.

Os parâmetros  $K$  e  $X$  são definidos através das Equações 29 e 30, respectivamente:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (29)$$

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BS_o c \Delta x} \right) \quad (30)$$

Onde:  $c$  - celeridade cinemática da onda de cheia;  $Q$  - vazão de referência;  $B$  - largura da superfície da água; e  $S_o$  - declividade longitudinal do fundo do rio.

Os valores de  $c$ ,  $Q$  e  $B$  nas Equações 29 e 30 variam com o tempo, logo os coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$ , Equações 25, 26, 27 e 28, também irão variar. Assim sendo, esses valores são recalculados em cada passo de tempo e espaço,  $\Delta t$  e  $\Delta x$ .

Uma boa escolha dos passos de tempo e distância é de suma importância, pois garantem precisão e estabilidade. O  $\Delta t$  é adotado como o valor mínimo dos três

seguintes tempos: passo de tempo especificado na simulação do modelo; tempo de escoamento pelo rio; ou 1/20 do tempo de ascensão do hidrograma de entrada com a parte ascendente mais inclinada, arredondando para o múltiplo ou divisor do passo de tempo especificado pelo usuário. Definido  $\Delta t$ , o valor de  $\Delta x$  é calculado utilizando a Equação 31:

$$\Delta x = c\Delta t \quad (31)$$

O valor de  $\Delta x$  possui a restrição apresentada na Equação 32:

$$\Delta x < \frac{1}{2} \left( c\Delta t + \frac{Q_o}{BS_o c} \right) \quad (32)$$

Onde:  $Q_o$  - fluxo de referência.

O fluxo de referência ( $Q_o$ ) é calculado a partir do hidrograma de entrada, conforme a Equação 33:

$$Q_o = Q_B + \frac{1}{2} (Q_{pico} - Q_B) \quad (33)$$

Onde:  $Q_B$  - escoamento de base;  $Q_{pico}$  - pico de entrada.

### 3.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS

De acordo com Brighenti et al., (2019) o critério estatístico mais utilizado em modelagem hidrológica para avaliar o ajuste do modelo é o Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970). Esse coeficiente pode ser obtido através da Equação 34:

$$NS = 1 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2 \right]}{\left[ \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \right]} \quad (34)$$

Onde:  $n$  - número de valores observados;  $\bar{o}$  - média dos  $n$  valores observados;  $o_i$  - valores observados;  $s_i$  - valores simulados;  $NS$  - Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe.

Os valores de  $NS$  variam de  $-\infty$  a 1, onde 1 representa a simulação perfeita. De acordo com Silva et al. (2008), quando o valor de  $NS$  for maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de  $NS$  entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto valores de  $NS$  inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável.

### 3.4 MÉTODOS NUMÉRICOS

Diversos modelos aplicam métodos numéricos na resolução de suas equações. Isso se deve pelas facilidades computacionais, pela capacidade praticamente ilimitada dos métodos numéricos e por alguns modelos não possuírem soluções analíticas para diversas aplicações úteis, como é o caso das equações de Saint-Venant.

A ideia básica dos métodos numéricos é a discretização, que reduz o problema físico, contínuo, com um número infinito de incógnitas, a um problema discreto com um número finito de incógnitas, que pode ser resolvido por um computador (WROBEL, 1989).

Os métodos numéricos amplamente utilizados em modelagem de sistemas hídricos são: diferenças finitas, elementos de contorno, elementos finitos e volumes finitos.

O Método das Diferenças Finitas (MDF) substitui as derivadas parciais da equação contínua por formulas discretas de diferenças e o domínio da solução é coberto por uma malha com vários nós. Em cada nó, aplicam-se as formulas discretas de diferenças, que o relacionam com os nós vizinhos, dando origem a um sistema de equações algébricas cuja solução fornece os valores desejados (WROBEL et al., 1989).

O Método de Elementos de Contorno (MEC) consiste em aplicar uma transformação sobre as equações diferenciais parciais num domínio, de modo a se obter uma formulação integral no contorno do domínio. Em seguida, a integral de contorno é resolvida numericamente a partir da discretização do contorno em segmentos (para o caso bidimensional) ou polígonos (caso tridimensional) chamados de elementos de contorno que são conectados por nós. Uma vez que as integrais em cada elemento são resolvidas, obtém-se um sistema de equações algébricas, cuja solução fornece os valores das incógnitas no contorno. As incógnitas no domínio são obtidas após o cálculo dos valores no contorno, pela

aplicação direta da expressão geral da formulação do MEC (CABRAL, 1996; BREBBIA; TELLES; WROBEL., 1984).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) realiza a discretização do contínuo com o auxílio de elementos que podem ter diversas formas geométricas e são conectados a um conjunto de nós. Dentro de cada elemento, polinômios interpolam a variação da função incógnita e o erro cometido pela aproximação é minimizado por um método variacional ou de resíduos ponderados (WROBEL et al., 1989).

O Método dos Volumes Finitos (MVF) utiliza como ponto de partida a forma integral da equação da conservação. O domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controle (VC) contíguos, e a equação da conservação é aplicada a cada VC. No centroide de cada VC localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies dos VC obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC). Os integrais de volume e de superfície são aproximados usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada VC, na qual aparecem os valores das variáveis no nó em causa e nos nós vizinhos (GONÇALVES, 2007).

### 3.5 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DE MODELAGEM

Devido às diversas abordagens e aplicações, ao longo dos anos vários programas computacionais de modelagem foram surgindo. A Tabela 2 lista alguns modelos hidrológicos e hidrodinâmicos existentes:

Tabela 2 – Alguns programas de modelagem de sistemas hídricos.

Tipo	Modelos
Programas de Modelagem Hidrológica	SWAT, MIKE SHE, HBV, TOPMODEL, VIC, SMAP, IPH II, Hidro-Flu, HEC-HMS.
Programas de Modelagem Hidrodinâmica 1D	TUFLOW Classic 1D, FASTER, Flood Modeller Pro 1D Solvers, SOBEK Suite, MIKE11/MIKE HYDRO River, MASCARET, InfoWorks RS, SIPSON, HEC-RAS.
Programas de Modelagem Hidrodinâmica 2D	Flowroute-i, ANUGA Hydro, TUFLOW Classic 2D, TUFLOW GPU, TUFLOW FV, DIVAST, DIVAST-TVD, Flood Modeller Pro 2D solvers, SOBEK Suite, DELFT3D, MIKE21, TELEMAC 2D, InfoWorks 2D, JFLOW, TRENT, FINEL 2D, CaMa-Flood, LISFLOOD-FP, BreZo, UIM, XP2D, HEC-RAS.
Programas de Modelagem Hidrodinâmica 1D + 2D	TUFLOW Classic, Flood Modeller Pro, SOBEK Suite, MIKE Flood, InfoWorks ICM, TRENT, LISFLOOD-FP, UIM + SIPSON, XPSWMM, XPSTORM, HEC-RAS.
Programas de modelagem Hidrodinâmica 3D	TUFLOW FV, SPM, DELFT3D, MIKE 3, TELEMAC 3D, FINEL 3D, CFX, Fluent, Bifröst, Blender, PHEONIX, FD, Navié, Effex, Flip3D, Cinema 4D, RealFlow, Psunami, Houdini, Mantaflow, SisBaHiA.

Fonte: Adaptado de Teng et al. (2017) e Gayathri, Ganasri e Dwarakish (2015).

Os programas de modelagem hidrológica HEC-HMS e hidrodinâmica HEC-RAS são os programas utilizados na presente pesquisa e por esse motivo serão apresentados com mais detalhes.

O HEC-HMS e o HEC-RAS foram Desenvolvidos pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (US Army Corps of Engineers) nas

décadas de 1950 e 1960 e inicialmente eram chamados de HEC 1 e HEC 2, respectivamente.

O termo HEC (Hydrologic Engineering Center) se refere a uma família de modelos que inicialmente foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação Fortran. Esses modelos tinham como limitações as complexidades nas entradas de dados e as deficiências em recursos gráficos. Com a evolução dos recursos computacionais e surgimento de novas linguagens de programação, os modelos foram enriquecidos nas entradas de dados e na elaboração dos relatórios de saída.

Além de atualmente esses modelos contarem com recursos bastante atrativos, possuem a grande vantagem de serem de domínio público, sendo muito aplicados e analisados em todo o mundo.

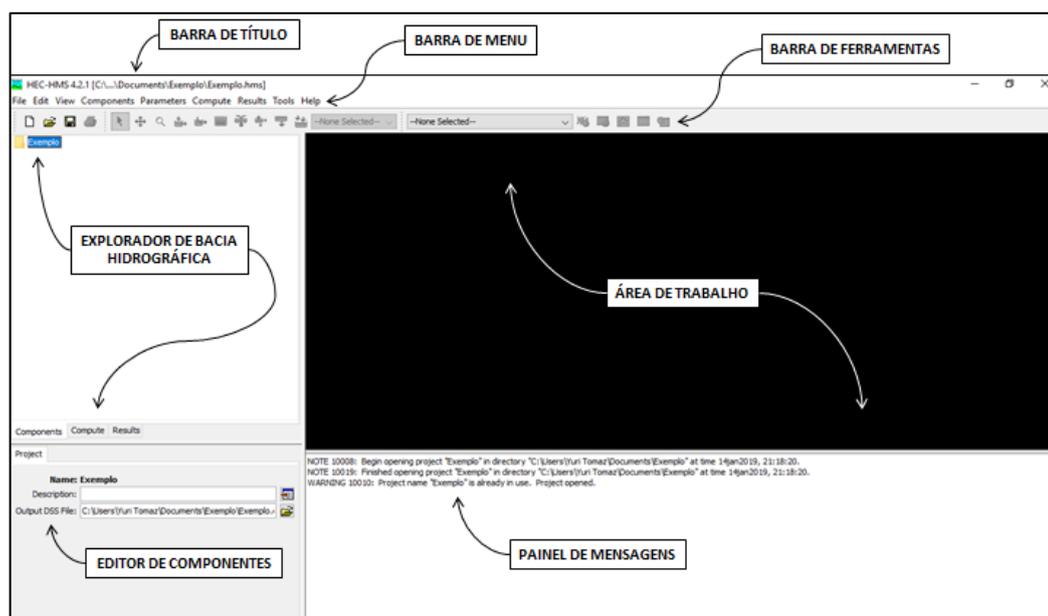
O item 3.3.1 apresentará o modelo hidrológico HEC-HMS e o item 3.3.2 o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, compilando informações de USACE (2016a), USACE (2016b) e USACE (2016c).

### **3.5.1 Programa de Modelagem Hidrológica HEC-HMS**

O HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) na sua versão 4.2.1 é um programa gratuito desenvolvido para representar processos hidrológicos em bacias hidrográficas dendríticas, podendo simular cheias para eventos de chuva de curta ou longa duração e um grande número situações que incluem desde grandes bacias hidrográficas até pequenas bacias urbanas.

A interface gráfica principal do programa contém as barras de título, menu e ferramentas; e quatro painéis. Esses painéis são chamados de: Explorador de Bacia Hidrográfica, Editor de Componentes, Painel de Mensagens e Área de Trabalho. A Figura 5 apresenta a tela do programa com todas as suas subdivisões e em seguida são apresentadas as funções de cada uma:

Figura 5 – Interface gráfica principal do HEC-HMS.



Fonte: O Autor (2019).

- Barra de Título: Exibe a versão do programa utilizado e a localização do projeto;
- Barra de Menu e Barra de Ferramentas: Possuem diversas opções que ajudam a utilizar o programa. Os itens com características semelhantes são agrupados e se algum estiver inativo é porque o comando não pode ser executado pelo programa no momento atual;
- Explorador de Bacia Hidrográfica: Fornece acesso rápido a todos os Componentes, Subcomponentes e Elementos Hidrológicos. Se subdivide em *components*, *computers* e *results*;
- Área de Trabalho: Apresenta os Elementos Hidrológicos (adicionados na Barra de Ferramentas) e suas conexões, que são utilizados com a finalidade de representar a bacia hidrográfica. Mapas de fundo podem ser importados para ajudar no desenvolvimento do modelo. Também apresenta janelas com resultados (ao selecionar o resultado desejado no Explorador de Bacia Hidrográfica), janelas que permitem a edição de dados de cada elemento (ao clicar duas com o botão esquerdo do *mouse* sobre o elemento) e janelas de edição de parâmetros globais (ao acessar o menu *Parameters* na Barra de Menu);
- Editor de Componentes: Quando um Componente ou Subcomponente, no Explorador de Bacia Hidrográfica, ou Elemento Hidrológico, na Área de

Trabalho, está ativo, um Editor de Componentes específico ficará ativo para inserir dados. Dados obrigatórios são indicados por um asterisco vermelho;

- Painel de Mensagens: Local onde são apresentadas notas, avisos e erros. Essas mensagens são uteis para identificar o motivo de uma simulação ter falhado.

Os Elementos Hidrológicos, citados anteriormente, e suas respectivas descrições podem ser visualizados na Tabela 3:

Tabela 3 – Elementos Hidrológicos e suas descrições.

Elemento Hidrológico	Descrição
Sub-bacia - <i>Subbasin</i> 	É utilizado para representar a bacia hidrográfica. Dada à precipitação, a saída é obtida subtraindo as perdas, calculando o escoamento superficial e adicionando o escoamento de base.
Trecho – <i>Reach</i> 	É utilizado para conduzir vazões. O fluxo de saída é obtido pela contabilização da atenuação e translação. Nessas estruturas as perdas podem ser opcionalmente incluídas.
Junção – <i>Junction</i> 	É utilizado para combinar dois ou mais Elementos Hidrológicos localizados a sua montante. O fluxo de saída é calculado pela soma de todas as entradas.
Fonte – <i>Source</i> 	É utilizado para introduzir um fluxo na bacia. Esse elemento não tem fluxo de entrada e o fluxo de saída é definido pelo usuário.
Sumidouro – <i>Sink</i> 	É utilizado para representar o exutório da bacia. Esse elemento não tem fluxo de saída e o fluxo de entrada pode ser originado de um ou vários elementos localizados a montante.
Reservatório – <i>Reservoir</i> 	É utilizado para o armazenamento de água ou atenuação de cheias. O fluxo de entrada no reservatório pode vir de um ou mais elementos localizados a montante. O programa fornece modelos para calcular a vazão de saída.
Derivação – <i>Diversion</i> 	É utilizado quando o fluxo vindo do Trecho – <i>Reach</i> precisa se dividir. O fluxo de entrada pode vir de um ou mais elementos de montante e o fluxo de saída pode se conectar com até dois elementos.

Fonte: Adaptado de USACE (2016c).

Os elementos sub-bacia, trecho, junção e sumidouro foram os únicos utilizados no presente estudo e desses elementos, os dois primeiros possuem

muitos modelos disponíveis para analisar os processos hidrológicos, conforme pode ser visto na Tabela 4:

Tabela 4 – Modelos disponíveis para os elementos *subbasin e reach* no HEC-HMS.

Elemento Hidrológico	Processo Hidrológico	Modelo
Sub-bacia - Subbasin 	Canopy – Representa a presença de plantas na bacia	Dynamic Simple (also gridded)
	Surface – Representa a superfície do solo onde a água pode se acumular	Simple (also gridded)
	Loss – Representa as perdas	Deficit and constant (also gridded) Exponential Green and Ampt (also gridded) Initial and constant SCS curve number (also gridded) Smith Parlange Soil moisture accounting (also gridded)
	Transform – Representa a transformação em escoamento superficial	Clark unit hydrograph Kinematic wave ModClark SCS unit hydrograph Snyder unit hydrograph User-specified s-graph User-specified unit hydrograph
Trecho – Reach 	Baseflow – Representa o escoamento de base	Bounded recession Constant monthly Linear reservoir Nonlinear Boussinesq Recession
	Routing – Representa a propagação de vazão (Resolvidas com o método das diferenças finitas)	Kinematic wave Lag Modified Puls Muskingum Muskingum-Cunge Straddle stagger
	Gain/Loss – Representa os ganhos e as perdas a partir de interações com o subsolo	Constant Percolation

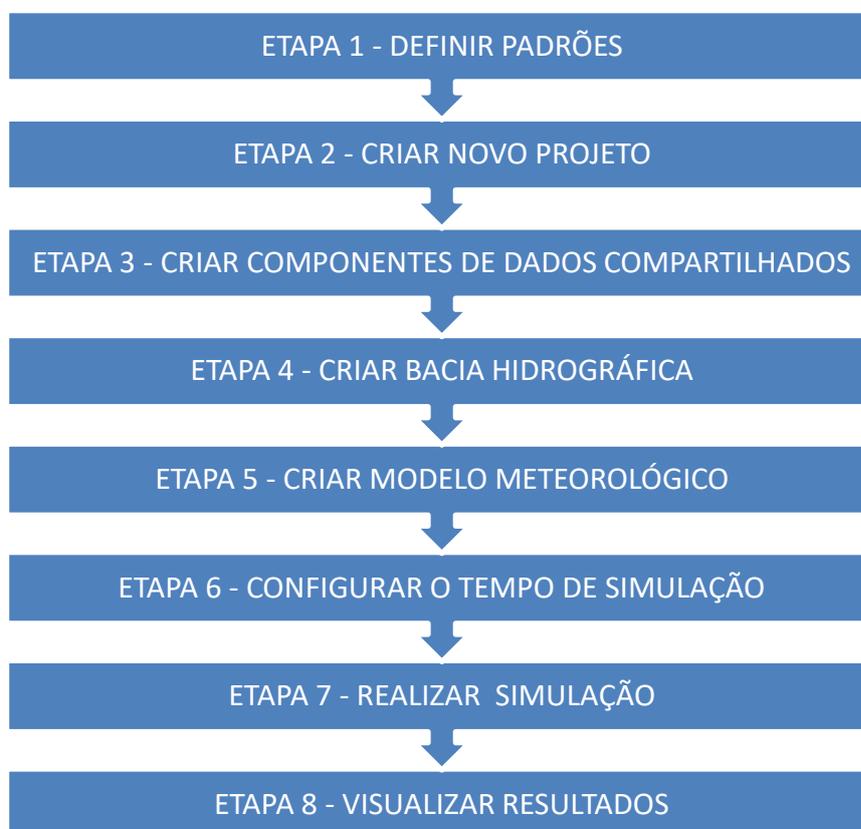
Fonte: Adaptado de USACE (2016c).

O programa foi projetado com dados que podem ser desenvolvidos de forma independente. No entanto, alguns desses dados dependem de outros para

definições importantes. Nesse sentido, existe uma sequência necessária para obter resultados com sucesso, que serão apresentadas a seguir.

Para realizar uma modelagem no HEC-HMS é necessário seguir oito etapas, apresentadas na Figura 6 e descritas na sequência:

Figura 6 – Etapas para realizar uma simulação no HEC-HMS.



Fonte: O Autor (2019).

- Etapa 1 – DEFINIR PADRÕES: Acessar a opção na Barra de Menu *Tools > Program Settings*. Nessa etapa são definidos os padrões que serão utilizados ao longo da modelagem (exemplo: separador decimal);
- Etapa 2 – CRIAR NOVO PROJETO: Acessar a opção na Barra de Menu *File > New* e em seguida nomear, inserir uma descrição, escolher um local para salvar e definir o sistema de unidades do projeto;
- Etapa 3 – CRIAR COMPONENTES DE DADOS COMPARTILHADOS: Acessar a opção na Barra de Menu *Components > Time-Series Data Manager* e/ou *Paired Data Manager* e/ou *Grid Data Manager*. O componente *Time-Series Data Manager* diz respeito a uma série de dados temporais (exemplo: vazão e precipitação), o componente *Paired Data Manager* se

refere a dados organizados em pares (exemplo: relação cota-vazão e coordenadas X-Y da seção transversal de um rio) e o componente *Grid Data Manager* consiste nos dados que são distribuídos em grades (exemplo: chuvas obtidas de radares). Esses dados são utilizados nas etapas 4 e 5;

- Etapa 4 – CRIAR BACIA HIDROGRÁFICA: Acessar a opção na Barra de Menu *Components > Basin Model Manager*. O usuário desenvolve o modelo da bacia e a configura (clizando com o botão esquerdo do mouse sobre a bacia no Explorador de Bacia Hidrográfica e acessando o Editor de Componentes), em seguida adiciona os Elementos Hidrológicos a bacia criada (acessando a Barra de Ferramentas) e por fim os configura e os conecta segundo a lógica do escoamento (clizando com o botão esquerdo do mouse sobre o elemento no Explorador de Bacia Hidrográfica ou na Área de Trabalho e acessando o Editor de Componentes). Se tiver disponível uma camada de mapa de fundo, adicioná-la antes dos Elementos Hidrológicos (clizando com o botão direito do mouse na Área de Trabalho e acessando a opção *background Layer*);
- Etapa 5 – CRIAR MODELO METEOROLÓGICO: Acessar a opção na Barra de Menu *Components > Meteorologic Model Manager*. Nessa etapa é definido o modelo que realizara o cálculo da precipitação;
- Etapa 6 – CONFIGURAR O TEMPO DE SIMULAÇÃO: Acessar a opção na Barra de Menu *Components > Control Specifications Manager*. Nessa etapa é definida a data e hora final, e o intervalo de tempo da simulação. Na data/hora do inicio e do fim da simulação, utilizar um valor maior que o adotado no modelo meteorológico para permitir que toda a bacia possa contribuir no exutório, possibilitando a análise da recessão;
- Etapa 7 – REALIZAR SIMULAÇÃO: Primeiramente cria-se a simulação acessando a opção na Barra de Menu *Compute > Create Compute > Simulation Run*. Em seguida é realizada a simulação que pode ser executada acessando a guia *Compute* no Explorador de Bacia Hidrográfica. Uma simulação executa a resposta da bacia, dada à entrada do modelo meteorológico e as especificações de período e intervalo de tempo. Todos os três Componentes são necessários para uma simulação ser executada;

- Etapa 8 – VISUALIZAR RESULTADOS: Os resultados podem ser acessados na guia *Results* do Explorador de Bacia Hidrográfica que estarão disponíveis desde que a simulação tenha sido computada com sucesso. Os resultados são apresentados em forma de gráficos e tabelas.

Para realizar a calibração e a validação do modelo de forma manual (ajuste por tentativa), são necessárias quatro etapas, apresentadas e descritas a seguir utilizando dados na Figura 7:

Figura 7 – Etapas para calibrar e validar um modelo de forma manual no HEC-HMS.



Fonte: O Autor (2019).

- Etapa 1 – CRIAR COMPONENTE DE DADOS OBSERVADOS: Acessar a opção na Barra de Menu *Components > Time-Series Data Manager* e em seguida, configurar e preencher o item criado conforme os dados de vazão foram observados;
- Etapa 2 – ACESSAR O ELEMENTO HIDROLÓGICO: No Explorador de Bacia Hidrográfica, clicar com o botão esquerdo do mouse no Elemento Hidrológico que representa o ponto onde os dados de vazão foram observados e em seguida, no Editor de Componentes, acessar *options* e em *observed flow* selecionar o item criado na Etapa 1;
- Etapa 3 – CALIBRAR: Ao realizar a simulação e consultar *Summary Table* nos resultados do Elemento Hidrológico que possui os dados observados, o modelo apresentara vários coeficientes como, o de Nash-Sutcliffe, que permitirá avaliar o desempenho do modelo. Dependendo do valor desses coeficientes, é realizado o ajuste, alterando-se o valor de parâmetros do

modelo e refazendo a simulação, até que os valores dos coeficientes se encontrem dentro de um intervalo desejado;

- Etapa 4 – VALIDAR: É selecionado outro evento e refeito as etapas 1 e 2. Em seguida, realiza-se uma simulação para avaliar o desempenho do modelo, de acordo com o coeficiente da Etapa 3 (exemplo: Nash-Sutcliffe).

### 3.5.2 Programa de Modelagem Hidrodinâmica HEC-RAS

O HEC-RAS (*River Analysis System*) na sua versão 5.0.3 é um programa gratuito que permite realizar cálculos hidráulicos em 1D, 2D e acoplado 1D/2D, com regime de escoamento permanente, quase não permanente e não-permanente. O modelo também permite analisar a qualidade da água, o transporte de sedimentos, e avaliar o efeito de estações de bombeamento e de estruturas transversais e/ou laterais ao fluxo, como açudes, barragens, vertedouros, comportas, diques, pontes e bueiros.

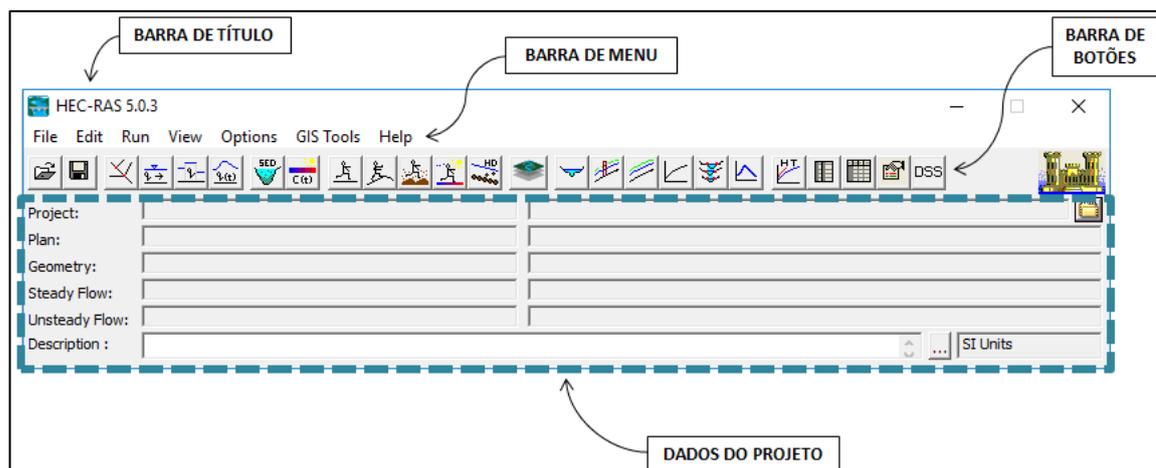
Na simulação em regime não permanente, o programa utiliza as equações de Saint-Venant para o fluxo em 1D e as equações bidimensionais de Águas Rasas ou as equações da Onda Difusa, para o fluxo 2D.

A discretização tanto espacial como temporal com fluxo em 1D não permanente é realizada utilizando o método das diferenças finitas.

Em relação ao fluxo em 2D, duas abordagens são possíveis. A primeira é em relação às equações da Onda Difusa, onde a discretização é realizada utilizando o método das diferenças finitas para o tempo e um esquema híbrido combinando os métodos das diferenças finitas e dos volumes finitos para a discretização do espaço. A segunda se refere à equação de Águas Rasas, onde na equação da quantidade de movimento é utilizada uma discretização que varia conforme o termo da equação, e na equação da continuidade utiliza-se o método dos volumes finitos.

A interface gráfica principal do programa pode ser dividida nas barras de título, menu e botões; e um painel chamado de Dados do Projeto. A Figura 8 apresenta a tela do programa com as suas subdivisões e em seguida são apresentadas as funções de cada uma:

Figura 8 – Interface gráfica principal do HEC-RAS.

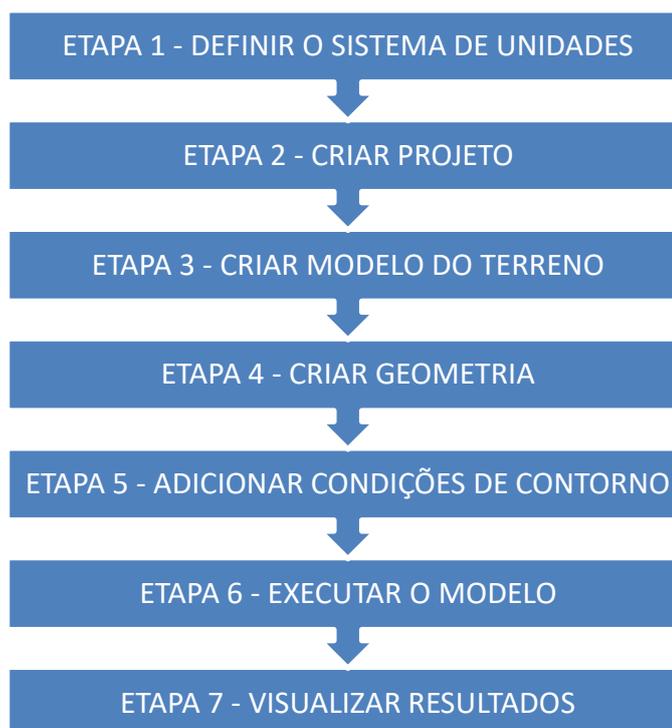


Fonte: O Autor (2019).

- Barra de Título: Exibe a versão utilizada do programa;
- Barra de Menu: Fornece as opções para utilização do programa. As opções são apresentadas como *File* (gerenciamento de arquivos), *Edit* (inserir e editar dados), *Run* (executar os cálculos hidráulicos), *View* (visualizar os resultados em forma de tabelas e gráficos), *Options* (alterar configuração do programa), *GIS Tools* (acessar o ambiente de mapas do programa); *Help* (suporte em relação aos recursos do programa);
- Barra de Botões: Fornece acesso rápido as opções utilizadas com mais frequência na Barra de Menu;
- Dados do Projeto: Apresenta os arquivos, descrição e sistema de unidades utilizado no projeto. Os arquivos podem ser do tipo *Project* (contém o título do projeto, o sistema de unidades do projeto, uma lista de todos os arquivos associados ao projeto e uma lista de variáveis padrão), *Plan* (contém uma combinação específica dos arquivos e opções de uma simulação), *Geometry* (contém todos os dados referentes à geometria), *Steady Flow* (contém dados de vazão e condições de contorno referentes o regime de escoamento permanente) e *Unsteady Flow* (contém as condições de contorno e condições iniciais de vazão/elevação para o regime de escoamento não permanente).

Para realizar uma simulação utilizando o HEC-RAS são necessárias sete etapas, apresentadas na Figura 9 e descritas logo em seguida:

Figura 9 – Etapas para realizar uma simulação no HEC-RAS.



Fonte: O Autor (2019).

- ETAPA 1 – DEFINIR O SISTEMA DE UNIDADES: Acessar *Options > Unit System (US Customary/SI)* na Barra de Menu e definir o sistema de unidades que será utilizado no projeto;
- ETAPA 2 – CRIAR PROJETO: Acessar a opção na Barra de Menu *File > New Project* e em seguida definir o diretório, o título e o nome do projeto. Nessa etapa é criado o arquivo *Project*;
- ETAPA 3 – CRIAR MODELO DO TERRENO: Acessar a opção na Barra de Menu *GIS Tools > RAS Mapper* ou o botão  na Barra de Botões. Nessa etapa é criado o modelo do terreno e configurada a projeção do projeto. É necessário criar um modelo de terreno antes de executar qualquer simulação que contenha áreas de fluxo 2D ou antes de visualizar qualquer resultado de mapeamento 1D, 2D ou acoplado 1D/2D. Vale a ressalva que a projeção deve ser configurada sempre que o objetivo do estudo for mapear resultados distribuídos espacialmente (por exemplo: mapeamento de inundação);
- ETAPA 4 – CRIAR GEOMETRIA: Acessar a opção na Barra de Menu *Edit > Geometric Data* ou o botão  na Barra de Botões. Nessa etapa é criado o arquivo *Geometry* e em seguida realiza-se a configuração da geometria do

projeto. Podem ser realizados estudos 1D, 2D ou acoplado 1D/2D. No fluxo em 1D é desenhado o sistema fluvial e em seguida são inseridas as seções transversais com suas características. Já no fluxo 2D utiliza-se um arquivo com o modelo do terreno e em seguida desenha-se uma malha sobre a área de interesse. No acoplamento 1D/2D realiza-se o mesmo procedimento descrito para cada dimensão e a conexão é feita utilizando *Lateral Structure(s)*. Além das configurações em relação à dimensão do sistema fluvial, nessa etapa também podem ser inseridas estações de bombeamento e estruturas transversais e/ou laterais ao fluxo, como açudes, barragens, vertedouros, comportas, diques, pontes e bueiros;

- ETAPA 5 – ADICIONAR CONDIÇÕES DE CONTORNO: Acessar a opção *Edit* na Barra de Menu ou os botões na Barra de Botões. Nessa etapa é criado o arquivo com as condições de contorno que são específicas para cada um dos três tipos de regime de escoamento (*Steady Flow* – Permanente, *Quasi Unsteady Flow* – Quase Não Permanente e *Unsteady Flow* – Não Permanente) e dos dois tipos de análises (*Water Quality* – Qualidade da Água e *Sediment* – Transporte de Sedimentos). O padrão do HEC-RAS é exibir no Painel de Dados apenas os arquivos do regime de escoamento *Steady Flow* e *Unsteady Flow*, no entanto, novas opções surgirão ao se criar os arquivos para as demais situações. As condições de contorno são necessárias para o programa realizar os cálculos na ETAPA 6 e a escolha vai depender do tipo de análise e dos dados disponíveis;
- ETAPA 6 – EXECUTAR O MODELO: Acessar a opção *Run* na Barra de Menu ou os botões na Barra de Botões. Nessa etapa é criado o arquivo *Plan*. A escolha da opção de execução vai depender do tipo de regime de escoamento/análise definida na ETAPA 5. O programa ao executar o modelo, realiza os cálculos hidráulicos combinando as condições de contorno do regime de escoamento/análise com a geometria e opções definidas no momento da execução;
- ETAPA 7 – VISUALIZAR OS RESULTADOS: Acessar os botões na Barra de Botões. O programa fornece

diversos tipos de resultados que podem ser visualizados em forma de tabelas, gráficos e mapas.

Para realizar uma modelagem tanto 2D como acoplada 1D/2D no HEC-RAS, são necessárias as seguintes etapas:

1. Definir o sistema de coordenadas que será utilizado no modelo, através do RAS Mapper. Isso normalmente é realizado selecionando um arquivo existente de projeção de um shapefile ESRI ou outros arquivos de mapeamento;
2. Desenvolver o modelo digital de terreno no RAS Mapper. O modelo do terreno é um pré-requisito para modelagem em 2D, já que é utilizado para estabelecer as propriedades geométricas e hidráulicas das células e faces. Tal modelo também é necessário para obter qualquer mapa de inundação no RAS-Mapper;
3. Construir uma tabela de classificação do terreno com o objetivo de estabelecer os coeficientes de Manning para as áreas de fluxo em 2D. Adicionalmente, o HEC-RAS possui a opção de o usuário desenhar polígonos que podem se sobrepor ao dados de classificação ou como zonas de calibração;
4. Adicionar outros mapas que ajudem na visualização da área, como fotos aéreas, locais de barramentos, rede de ruas, etc;
5. Através do editor geométrico, desenhar um polígono de contorno para cada área com fluxo bidimensional a ser modelada. Ou você pode importar as coordenadas X,Y de outras fontes;
6. Definir as “linhas de quebra” que interceptam a área 2D que possam ser uma barreira significativa para o fluxo: estruturas de contenção (levees), ruas, barreiras naturais (natural embankments), terreno alto que separa o canal da planície de inundação (ribanceira ou barranco do rio), estruturas hidráulicas, etc;
7. Utilizando o editor de Área 2D, criar uma malha computacional para cada Área de Fluxo 2D;

8. Editar a malha com o objetivo de melhorá-la, como: adicionar mais linhas de quebras; aumentar ou diminuir a densidade de células conforme necessário; adicionar, mover ou deletar o centro das células, conforme necessário;
9. Rodar pré-processador geométrico do RAS-Mapper para criar as tabelas de propriedades hidráulicas para as células e faces;
10. Conectar as Áreas de Fluxo 2D com os elementos hidráulicos 1D (rios, estruturas laterais, área de armazenamento) conforme necessário;
11. Adicionar quaisquer estruturas hidráulica necessária dentro da área de fluxo 2D;
12. Adicionar quaisquer condições de contorno e condições iniciais necessárias através do editor de fluxo não permanente;
13. Através do editor de simulação não-permanente, aplicar qualquer opção computacional e configuração necessária para as Áreas de Fluxo 2D;
14. Rode a simulação em regime não-permanente;
15. Revise os resultados 1D/2D no RAS Mapper, assim como os resultados para opção 1D.

### 3.6 HEC-DSSVue

De acordo com USACE (2009) o HEC-DSS (*Hydrologic Engineering Center's Data Storage System*) é um sistema de banco de dados que foi projetado para facilitar a recuperação e o armazenamento de dados, normalmente sequenciais, por usuários e programas.

Para visualizar, editar e manipular os dados dos arquivos HEC-DSS, foi desenvolvido o programa de interface gráfica HEC-DSSVue (*Data Storage System Visual Utility Engine*) (USACE, 2009).

O HEC-DSSVue é um programa gratuito desenvolvido em Java e atualmente se encontra na versão 2.0.1. A ferramenta possibilita plotar gráficos; fornece mais de cinquenta funções matemáticas para manipular os dados; e incorpora a linguagem de script padrão "Jython" que permite especificar a sequência de etapas de uma rotina e em seguida executá-la (USACE, 2009).

### 3.7 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

Ao realizar uma simulação hidráulica e/ou hidrológica, os modelos utilizam uma série de equações com diversos dados de entrada. Um das grandes limitações

na aplicação desses modelos é a necessidade de obtenção e manipulação de grandes quantidades de dados relacionados à variabilidade espacial dos parâmetros e variáveis.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com a sua capacidade de geração de bancos de dados espaciais e processamento das informações, é um recurso que possibilita eliminar esse impasse (MELO et al., 2008).

Com suas raízes históricas nas disciplinas de cartografia computacional e processamento digital de imagens, os SIG são uma ferramenta altamente difundida para a solução de problemas que dependem de avaliações espaciais precisas e eficientes (MARTIN et al., 2005; SUI e MAGGIO, 1999).

Goodchild, Haining e Wise (1992), identificaram três funções principais de uma ferramenta SIG no processo de modelagem:

- Pré-processamento de dados espaciais: o SIG é utilizado para gerar informações espaciais de entrada dos modelos;
- Suporte direto na modelagem: tarefas são executadas diretamente dentro do SIG, como ajustes e verificações;
- Pós-processamento: os resultados do modelo são trabalhados e visualizados dentro do SIG no seu contexto espacial.

Nyerges (1991) e Sui e Maggio (1999) sugerem que os SIG e os modelos podem ser integrados em três níveis de acoplamento, com diferentes estratégias de integração:

- Acoplamento livre: o modelo funciona desvinculado ao SIG, que é usado apenas para pré, pós-processamento e visualização de feições espaciais e/ou resultados;
- Acoplamento próximo ou rígido: o modelo funciona junto ao SIG, com todas as funções de geração, processamento e visualização funcionando através do SIG. Porém, a modelagem funciona de forma paralela, sendo o SIG necessário para que ela seja ativada (a interface do modelo é o SIG);
- Acoplamento pleno: as equações do modelo são programadas dentro do código do próprio SIG, ou uma estrutura de SIG é programada dentro do

próprio modelo. Esta forma de acoplamento possui, portanto, duas subdivisões.

O QGIS é um exemplo de aplicação SIG. A ferramenta é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) impulsionado por voluntários; possui uma interface agradável e fácil de usar, como também, conta com as vantagens de ser livre e possuir o código aberto. As suas funcionalidades estão em constante crescimento através de funções nativas e de complementos (QGIS, 2019).

### 3.8 PERFILAMENTO A LASER

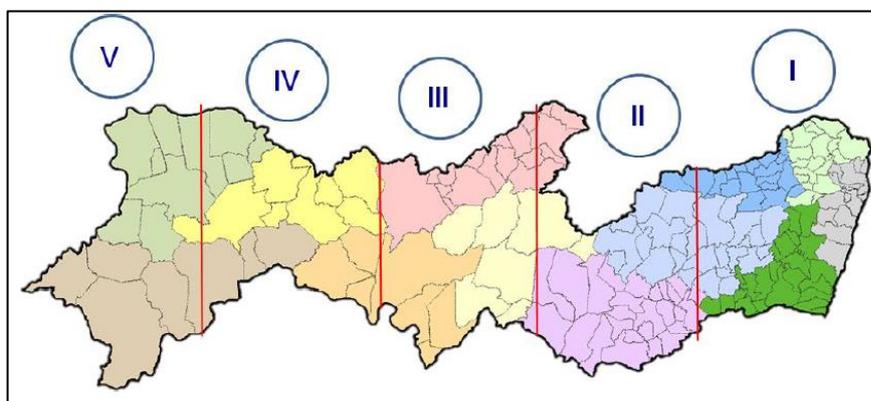
O perfilamento a laser também conhecido como *Light Detection and Ranging* (LIDAR) é uma tecnologia que permite a obtenção de informações altimétricas da superfície terrestre com alta precisão. O princípio básico do sistema de varredura a laser consiste na utilização de um feixe de laser que é emitido, com o auxílio de um espelho de varredura, em direção aos objetos. Este feixe é refletido ao atingir a superfície dos objetos, retornando um eco ao sistema. Este sistema é então encarregado de registrar o tempo decorrido entre a emissão e a captação do eco, permitindo a obtenção da distância entre o sensor e o objeto iluminado (GALVANIN e POZ, 2013).

O resultado do perfilamento a laser é uma nuvem de pontos cotados, distribuídos aleatoriamente sobre o terreno. É possível transformar a nuvem de pontos em Redes Triangulares Irregulares (TIN), onde cada ponto torna-se um vértice de um triângulo, ou a partir de métodos de interpolação, em grades regulares de pontos. Quando a transformação é realizada considerando todos os pontos obtidos no mapeamento, incluindo vegetação, edificações, pontes, barragens ou linhas de transmissão, o resultado proveniente é chamado de Modelo Digital de Elevação (MDE). Quando a nuvem de pontos é filtrada, através de algoritmos e ajustes manuais, para remoção destes elementos sobre a superfície do terreno dá-se o nome de Modelo Digital de Terreno (MDT) à interpolação dos pontos filtrados (BRANDALIZE, 2019; PETZOLD; REISS; STÖSSEL, 1999).

No estado de Pernambuco tem-se o Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) que foi iniciado no ano de 2014 e consiste no recobrimento do território pernambucano utilizando aerofotogrametria e perfilamento a laser (CIRILO et al., 2014b).

De acordo com Cirilo et al. (2014b) a captura de dados do PE3D foi realizada por sensores e câmeras instalados em oito aviões. O estado de Pernambuco foi subdividido em 12.962 folhas articuladas, que foram agrupadas em cinco blocos de mapeamento, conforme pode ser visualizado na Figura 10:

Figura 10 – Divisão do estado de Pernambuco em cinco blocos.



Fonte: Cirilo et al., (2014b).

Foram realizados dois mapeamentos, sendo um na escala de 1:5000 para todo o estado e o outro na escala de 1:1000 para as áreas urbanas das sedes de 26 municípios. As sedes municipais foram selecionadas em função do andamento de projetos para implantação ou ampliação de redes de abastecimento de água e/ou esgotamento sanitário. A Tabela 5 apresenta os produtos obtidos e as suas características técnicas:

Tabela 5 – Características técnicas dos produtos do PE3D.

Características	Escala 1:5000		Escala 1:1000	
	Ortofoto	Perfilamento Laser	Ortofoto	Perfilamento Laser
Extensão dos arquivos	.tif .tfw e .dwg	.xyz . xyzi e .tif	.tif .tfw e .dwg	.xyz . xyzi e .tif
Densidade de pontos	-	~ 1 ponto/m <sup>2</sup>	-	~ 4 pontos/m <sup>2</sup>
Resolução espacial	50 cm	1 m	12 cm	50 cm
Resolução radiométrica	8 bits	32 bits	8 bits	32 bits
Precisão planimétrica	~ 1 m	-	~ 25 cm	-
Precisão altimétrica (1)	-	25 cm	-	10 cm
Altura média de voo	4.800 m	2.800 m	700 m	700 m

Fonte: Adaptada de Alves (2017).

(1) A precisão altimétrica dos produtos 1:5000 tem como referência o MAPGEO 2010, enquanto os produtos 1:1000 são referenciados segundo Referências de Nível (RN's) do IBGE.

De acordo com Alves (2017) todos os produtos do PE3D estão referenciados no sistema de coordenadas projetadas SIRGAS 2000, nos fusos 24S ou 25S. Para cada uma das folhas do Pernambuco Tridimensional são disponibilizados conjuntos de seis produtos:

- ORTOFOTOS – Ortofotos digitais articuladas e disponibilizadas em formato GeoTIFF, com arquivo em formato CAD configurado para impressão em tamanho A1;
- MDE (ASCII) – Modelo Digital de Elevação apresentado em formato XYZI, com as coordenadas de todos os pontos coletados pelo laser e a intensidade de retorno do pulso laser, incluindo áreas com elevações como vegetação, edifícios, pontes;
- MDE (RASTER) – Modelo Digital de Elevação obtido através do MDE ASCII, apresentado em formato GeoTIFF e arquivo auxiliar TFW, com resolução espacial de 1m;
- MDT (ASCII) – Modelo Digital de Elevação apresentado em formato XYZ, com as coordenadas de todos os pontos coletados pelo laser, excluindo áreas com elevações como vegetação, edifícios, pontes;
- MDT (RASTER) – Modelo Digital de Terreno obtido através do MDT ASCII, apresentado em formato GeoTIFF e arquivo auxiliar TFW, com resolução espacial de 1m;
- MDE COMPOSIÇÃO – Imagem de composição das informações hipsométricas e intensidade de retorno do pulso laser com resolução espacial de 1m. Produto apresentado em formato GeoTIFF, arquivo auxiliar TFW e escala hipsométrica em formato PNG.

### 3.9 MAPAS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO

O perigo é um fenômeno natural que ocorre em épocas e região conhecidas que podem causar sérios danos nas áreas sob impacto. Assim, perigos naturais são processos ou fenômenos naturais que ocorrem na biosfera, podendo constituir um evento danoso e serem modificados pela atividade humana, tais como a degradação do ambiente e urbanização (UNDP, 2004).

Para se avaliar perigo de inundações, existem diversas metodologias propostas na literatura, como as propostas por Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016), Monte, Tschiedel e Goldenfum (2017), e Stephenson (2002).

Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016) desenvolveram 5 indicadores e desses eles empregam a média da profundidade da água e da velocidade para desenvolver o mapa de perigo. A análise é feita utilizando alguma ferramenta SIG para varrer os pixels das imagens e classificar as velocidades e profundidades segundo alguns limiares. Cada pixel é classificado como 1 (baixo), 2 (médio) e 3 (alto). Em seguida, calcula-se uma média dos resultados obtidos nessa classificação e se o valor da média for um número fracionado, o valor inteiro imediatamente acima é adotado. O resultado final da classificação é perigo alto (valor menor ou igual a 1), perigo médio (valor maior que 1 e menor ou igual a 2) e perigo alto (valor maior que 2 e menor ou igual a 3). A Tabela 6 apresenta os indicadores desenvolvidos por Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016):

Tabela 6 – Indicadores de perigo e seus limiares.

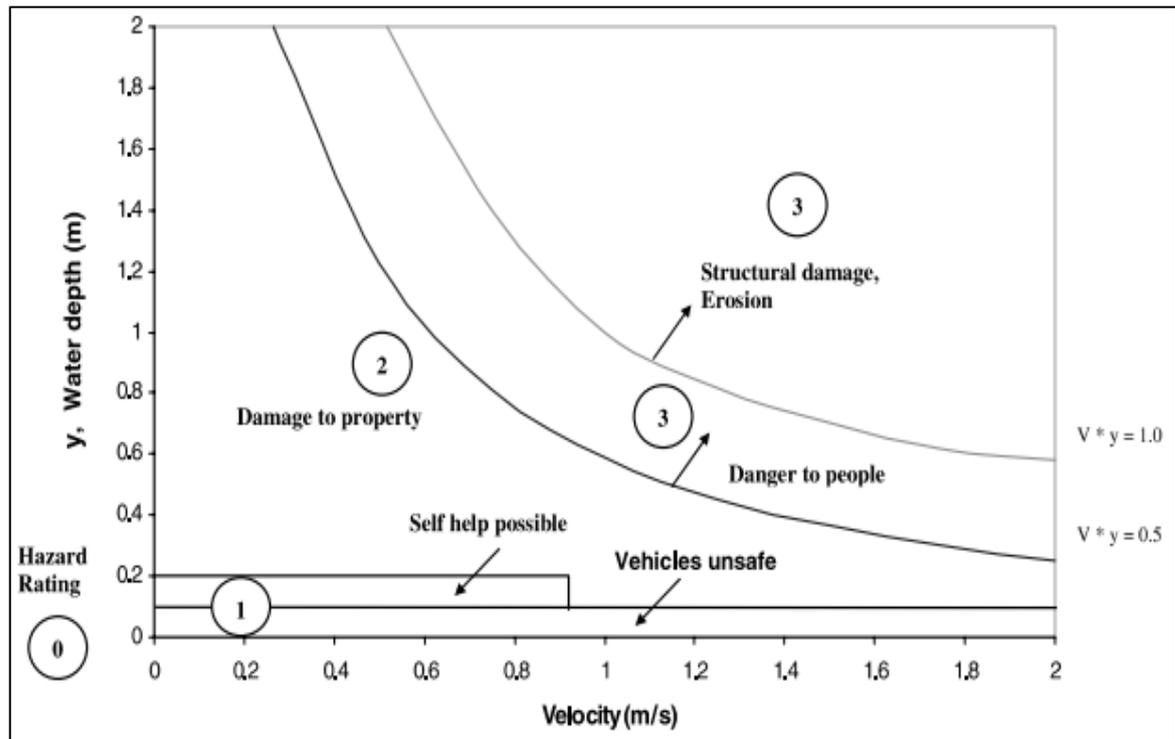
<b>Indicador</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Alto</b>
<i>Water depth</i> (m)	0 – 0,60	0,60 – 1,20	> 1,20
<i>Flow velocity</i> (m/s)	0 – 0,60	0,60 – 1,20	> 1,20
<i>Energy head</i> (m)	0 – 1,0	1,0 – 2,0	> 2,0
<i>Flow force</i> (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	0 – 1,0	1,0 – 2,0	> 2,0
<i>Intensity</i> (m <sup>2</sup> /s)	0 – 0,36	0,36 – 1,50	> 1,50

Fonte: Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016).

Monte, Tschiedel e Goldenfum (2017) utilizam a mesma metodologia proposta por Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016), no entanto, consideram uma média dos 5 indicadores apresentados na Tabela 6.

A metodologia de Stephenson (2002) é a única dessas três metodologias, que utilizou testes empíricos para determinar a classe de perigo. A metodologia proposta por Stephenson (2002) utiliza o diagrama apresentado na Figura 11:

Figura 11 – Diagrama de perigo de inundação.



Fonte: Stephenson (2002).

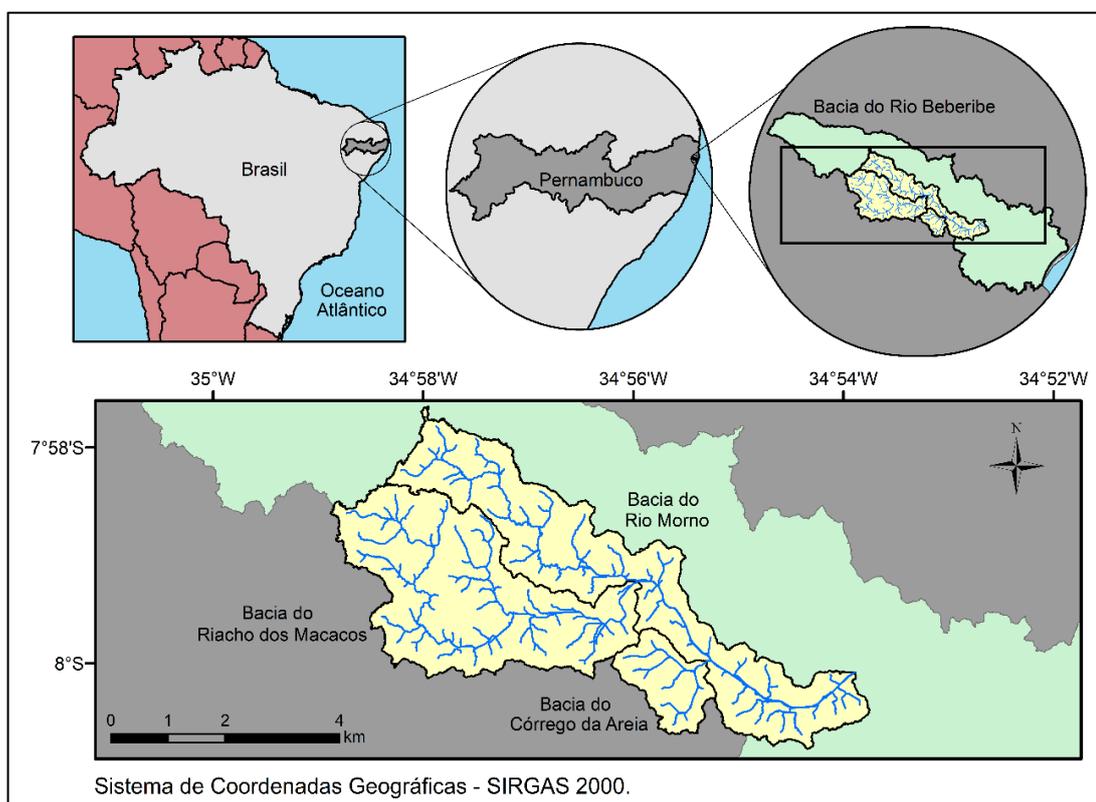
## 4 METODOLOGIA

Nesse item serão apresentados aspectos metodológicos referentes a presente pesquisa.

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Morno está localizada no estado de Pernambuco – BR e possui uma área total de aproximadamente 21,97km<sup>2</sup>, sendo considerada o principal contribuinte para com o rio Beberibe. A Figura 12 apresenta a localização da bacia do rio Morno:

Figura 12 – Localização da bacia do rio Morno.



Fonte: O Autor (2019).

Conforme pode ser observado na Figura 12, a bacia do rio Morno possui duas bacias que somam vazões no seu rio: a bacia do Córrego da Areia e a bacia do Riacho dos Macacos. A bacia do Córrego da Areia possui uma área de 1,80km<sup>2</sup> e o seu rio se encontra com o rio Morno no bairro Brejo de Beberibe. Já a bacia do Riacho dos Macacos possui uma área de 9,98km<sup>2</sup> e o encontro entre os rios se dá imediatamente a jusante da BR-101.

Do ponto de vista hídrico, a bacia do rio Morno pode ser dividida em duas áreas, uma localizada a montante da BR-101 com 15,53 km<sup>2</sup> de área praticamente não urbanizada e a outra a jusante da BR-101, com 6,44 km<sup>2</sup> de área praticamente urbanizada.

O rio Morno possui uma extensão de aproximadamente 12km e na zona urbana é cercado pelos bairros Passarinho, Brejo da Guabiraba, Brejo de Beberibe, Dois Unidos, Linha do Tiro e por fim, o bairro Beberibe, local onde se encontra com o rio Beberibe, conforme apresentado na Figura 13:

Figura 13 – Encontro dos rios Beberibe e Morno.



Fonte: Adaptada de PE3D (2019).

Ao longo do rio é possível observar diversas ocupações ribeirinhas que durante a estação chuvosa frequentemente sofrem inundações. Além disso, observam-se situações como assoreamento e lançamento de esgoto e resíduo sólido na calha do rio, que podem potencializar os perigos ocasionados pelas inundações às pessoas, bem como, comprometer a função hidrológica natural do rio. A Figura 14 apresenta alguns dos problemas observados ao longo do rio Morno:

Figura 14 – Problemas observados no rio Morno.

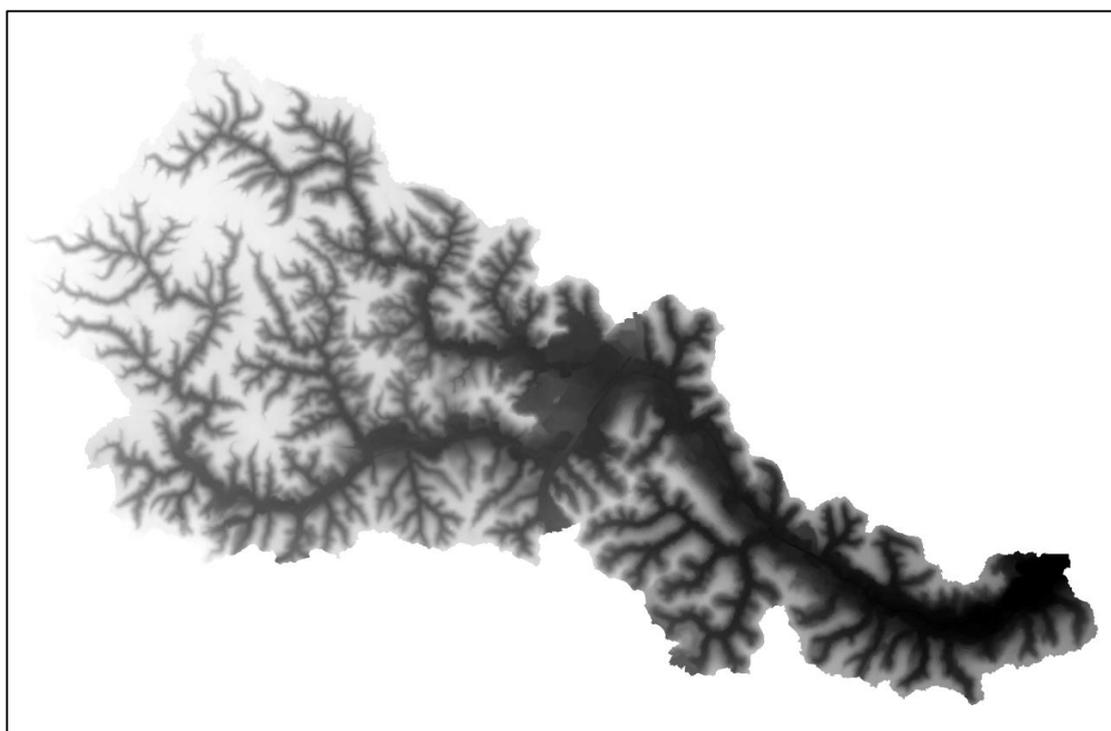


Fonte: EMLURB (2018).



obtidos por meio da técnica de perfilamento a laser com escala 1:5000 disponibilizadas pelo projeto PE3D. Essas imagens foram processadas utilizando a ferramenta externa TauDEM (Versão 5.3.7) no QGIS (Versão 2.16.3). A Figura 16 apresenta o MDT utilizado na modelagem:

Figura 16 – MDT utilizado na modelagem.



Fonte: PE3D (2019).

A porcentagem de área impermeável em cada bacia foi obtida através de classificação supervisionada utilizando o complemento dzetsaka (Versão 2.5.3) do QGIS (Versão 2.16.3). Já os valores dos parâmetros CN da bacia e o coeficiente de Manning do rio foram definidos nas etapas de calibração e validação do modelo.

A calibração e a validação foram realizadas no HEC-HMS através de ajuste por tentativa utilizando o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe. Apesar de a ferramenta possibilitar o ajuste por otimização, decidiu-se fazer por tentativa com o objetivo de obter um melhor entendimento do comportamento da bacia diante diversos valores dos parâmetros.

No que diz respeito à precipitação, foram utilizadas 11 Plataformas de Coleta de Dados (PCD's) que fornecem dados a cada 10 minutos, disponíveis em CEMADEN (2019). A Tabela 7 apresenta os dados dessas 11 PCD's e a Figura 17 apresenta a sua distribuição espacial:

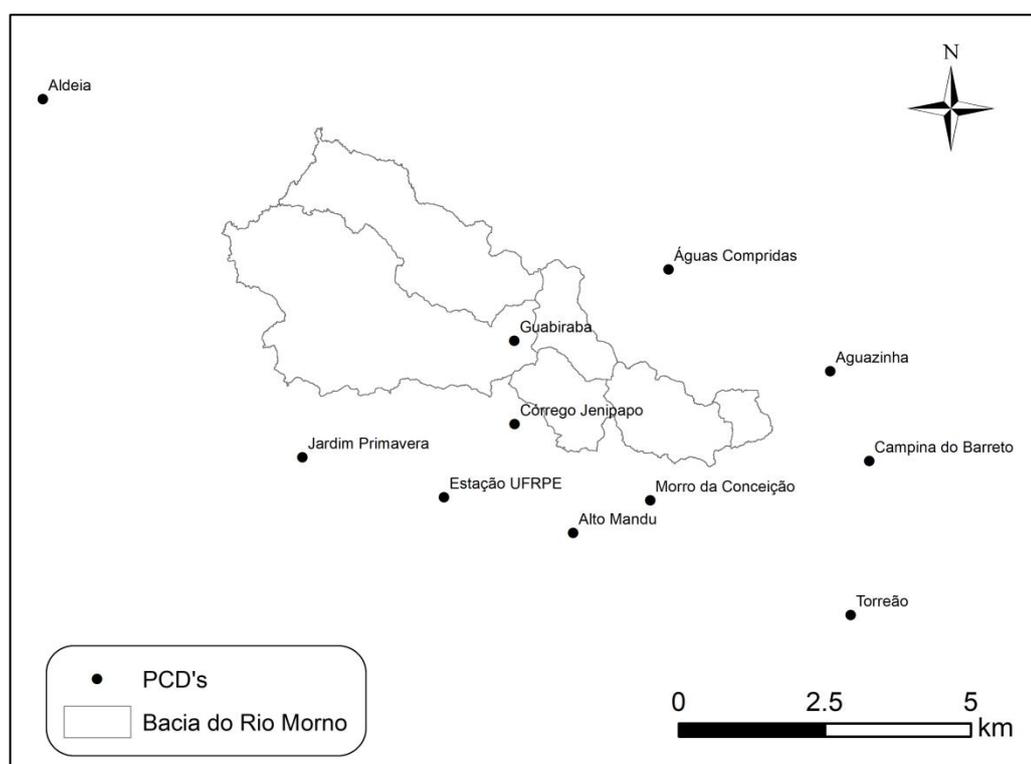
Tabela 7 – Dados das PCD'S utilizadas no modelo.

Município	Código da Estação	Nome da Estação	Longitude	Latitude	(1) Total Precipitado
CAMARAGIBE	260345406A	Aldeia	-35,009	-7,956	102,33 mm
OLINDA	260960001A	Águas Compridas	-34,912	-7,983	161,89 mm
OLINDA	260960002A	Aguazinha	-34,887	-7,999	196,52 mm
RECIFE	261160610A	Alto Mandu	-34,927	-8,024	127,52 mm
RECIFE	261160614A	Campina do Barreto	-34,881	-8,013	154,88 mm
RECIFE	261160608A	Córrego Jenipapo	-34,936	-8,007	133,65 mm
RECIFE	261160603A	Estação UFRPE	-34,947	-8,018	129,21 mm
RECIFE	261160612A	Guabiraba	-34,936	-7,994	139,81 mm
CAMARAGIBE	260345404A	Jardim Primavera	-34,969	-8,012	118,57 mm
RECIFE	261160613A	Morro da Conceição	-34,915	-8,019	136,82 mm
RECIFE	261160618A	Torreão	-34,884	-8,037	161,47 mm

Fonte: CEMADEN (2019).

(1) Total precipitado no período de simulação.

Figura 17 – Distribuição espacial das PCD's utilizadas no modelo.



Fonte: O Autor (2019).

Os dados de precipitação e vazão utilizados foram salvos em um arquivo de banco de dados do tipo HEC-DSS utilizando o HEC-DSSVue (Versão 2.0.1). Vale a

ressalva que o HEC-HMS, salva os seus resultados em arquivos HEC-DSS, que podem ser lidos pelo HEC-RAS, permitindo assim uma integração de forma ágil e eficiente entre as ferramentas.

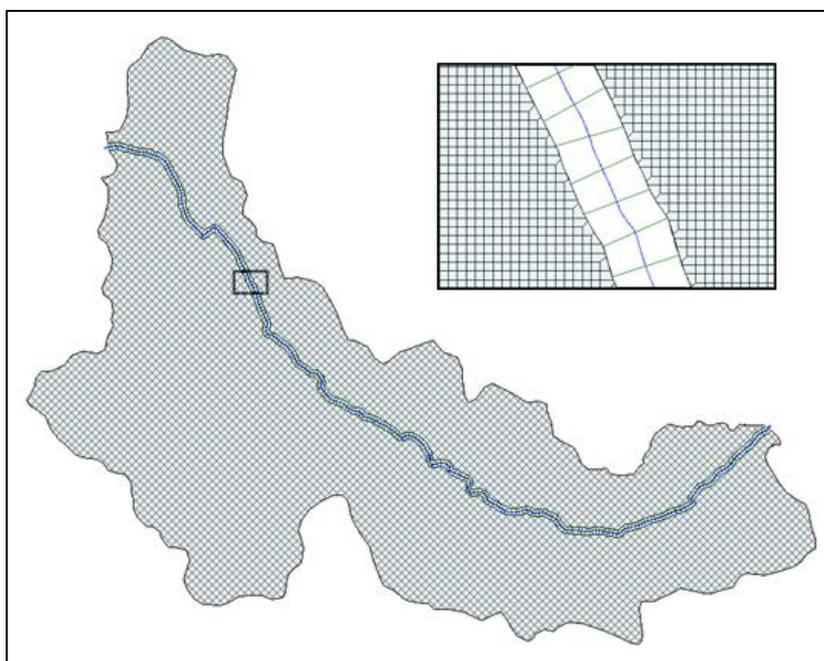
#### 4.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrodinâmica foi realizada no programa de modelagem HEC-RAS (Versão 5.0.3), utilizado o acoplamento 1D/2D em regime transiente. No fluxo 1D foi utilizada as equações de Saint-Venant e no 2D as equações da Onda Difusa de Águas Rasas.

As condições de contorno selecionadas foram do tipo *Flow Hydrograph* (vazão de entrada na extremidade de montante), *Uniform Lateral Inflow* (contribuição lateral das bacias ao longo de várias seções), *Lateral Inflow Hydr.* (contribuição lateral em uma seção específica) e *Normal Depth* (inclinação da linha de energia utilizada na extremidade de jusante). Nas três primeiras condições de contorno, foram adicionados os arquivos HEC-DSS com os hidrogramas gerados no HEC-HMS. Para com a inclinação da linha de energia, considerou-se a inclinação do fundo do canal, que foi 0,003.

A bacia foi configurada em 1 rio, 262 seções transversais, 2 malhas e 14 estruturas laterais. A Figura 18 apresenta o esquema desenvolvido no HEC-RAS:

Figura 18 – Esquema desenvolvido no HEC-RAS.



Fonte: O Autor (2019).

As seções foram obtidas utilizando os dados dos MDT's gerados a partir de imagens de perfilamento a laser com escala 1:5000 disponibilizadas pelo projeto PE3D. Esses dados laser não contém informação do nível d'água do rio, dessa forma, decidiu-se determinar a profundidade das seções utilizando dados de seções transversais (ANEXO A - PLANTA CHAVE E SEÇÕES DO RIO MORNO) fornecidos pela Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB). O espaçamento entre as seções foi adotado de 20m e a determinação do limite entre o rio e a planície de inundação foi realizada utilizando as seções transversais da EMLURB, bem como, imagens do GOOGLE EARTH (2019). Vale a ressalva que nesse estudo não foram consideradas as pontes existentes ao longo do rio.

Para representar a planície de inundação também foram utilizadas imagens de perfilamento a laser com escala 1:5000 disponibilizadas pelo projeto PE3D. As duas malhas foram discretizadas em 158.979 e 67.812 células, com espaçamentos  $DX = 5$  e  $DY = 5$ .

O intervalo de simulação adotado foi de 20 segundos. Esse intervalo foi adotado buscando-se obter a estabilidade do modelo e a ausência de erros na simulação.

O tempo total de simulação foi de 37 minutos e 26 segundos, divididos em: 4 minutos e 1 segundo para completar a geometria; 3 segundos para o pré-processamento da geometria; 29 minutos e 33 segundos para os cálculos do fluxo não permanente; 2 segundos para escrever os resultados no arquivo DSS; 3 minutos e 44 segundos na etapa de pós-processamento; e 3 segundos para computar os mapas.

## 5 RESULTADOS

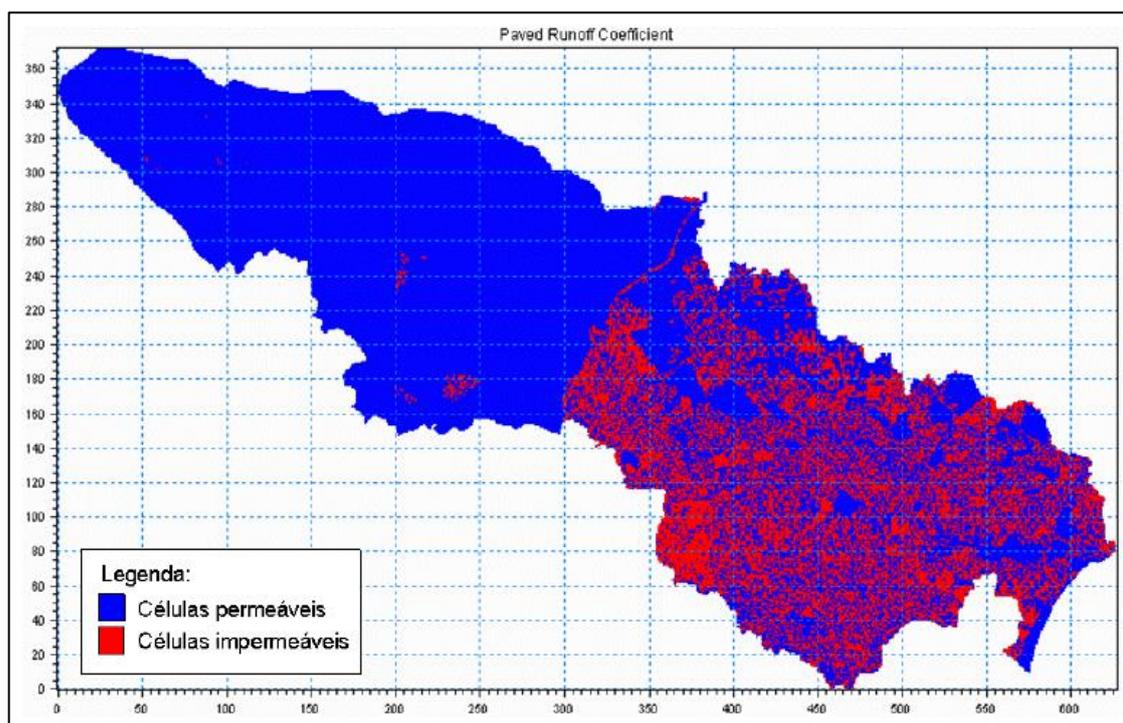
Nesse item serão apresentados os resultados obtidos na presente pesquisa.

### 5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Após realizar várias pesquisas, foi verificado que não existem estações fluviométricas para a área de estudo, tornando-se um impasse para a sua calibração e validação. Como solução, decidiu-se utilizar o trabalho de Góes (2009). Nesse trabalho a autora apresenta diversas medições de nível e traça a curva-chave para diversos afluentes da Bacia do rio Beberibe. Um dos pontos de medição está localizado próximo ao exutório da bacia do rio Morno, com coordenadas de aproximadamente  $34^{\circ}54'12,27''W$ ,  $8^{\circ}0'22,64''S$ , não possuindo influência da maré.

Buscando ser o mais fidedigno possível, foi utilizada a imagem de um mapa com as áreas permeáveis e impermeáveis da bacia hidrográfica do rio Beberibe, disponível no trabalho da autora. Essa imagem foi georreferenciada e em seguida foi aplicado o processo de classificação supervisionada apenas para a área de interesse (bacia do rio morno). A Figura 19 apresenta as informações de área permeável e impermeável disponível no trabalho da autora:

Figura 19 - Células permeáveis e impermeáveis da bacia hidrográfica do rio Beberibe.



Fonte: Góes (2009).

A Tabela 8 apresenta a porcentagem de área impermeável para cada bacia hidrográfica do modelo:

Tabela 8 – Percentual de área impermeável de cada bacia hidrográfica.

Bacia Hidrográfica	Área Impermeável (%)
(1) BRM1	1,32
(1) BRM2	43,11
(1) BRM3	49,50
(1) BRM4	60,18
Riacho dos Macacos	7,24
Córrego da Areia	58,28

Fonte: O Autor (2019).

(1) O termo BRM indica que são subdivisões da Bacia do Rio Morno.

Apesar dos valores apresentados na Tabela 8 (utilizados na calibração e validação do modelo) se referirem a uma imagem antiga, foi decidido utilizá-los na simulação da presente pesquisa. Essa escolha foi feita, pois ao comparar ortofotos do ano de 2016 com a imagem antiga, pouca diferença foi observada.

A calibração e a validação foram realizadas ajustando os parâmetros CN da bacia e o coeficiente de Manning do rio, buscando obter um bom coeficiente de eficiência do modelo e não fugir da realidade. Na adoção do CN foi aplicada a metodologia de Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) para relacionar o tipo de solo do local, obtido em IBGE e EMBRAPA (2001), com o grupo hidrológico da metodologia do SCS. O tipo de solo do local é o Argissolo Vermelho-Amarelo que pertence ao Grupo Hidrológico C. No que se refere ao coeficiente de Manning do rio, tomou-se como base valores apresentados em Azevedo Netto e Fernández (2015). Em cada simulação era avaliado o comportamento estatístico do modelo através coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe. As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores dos parâmetros adotados após a calibração e a validação:

Tabela 9 – Parâmetros dos rios após calibração e validação.

Trechos	Comprimento (m)	Declividade (m/m)	(2) Coeficiente de Manning
(1) RM1	2218	0,003	0,100
(1) RM2	2425	0,003	0,100
(1) RM3	844	0,003	0,100

Fonte: O Autor (2019).

(1) O termo RM indica que os trechos são referentes ao Rio Morno.

(2) Parâmetro definido após calibração e validação.

Tabela 10 – Parâmetros das bacias após calibração e validação.

Bacia Hidrográfica	Área Total (km <sup>2</sup> )	(2) CN	Lag Time (min)
(1) BRM1	5,55	70	67,34
(1) BRM2	1,61	58	22,87
(1) BRM3	2,41	58	23,38
(1) BRM4	0,63	58	11,72
Riacho dos Macacos	9,98	80	93,44
Córrego da Areia	1,80	59	20,90

Fonte: O Autor (2019).

(1) O termo BRM indica que são subdivisões da Bacia do Rio Morno.

(2) Parâmetro definido após calibração e validação.

A Tabela 11 apresenta os valores do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe para as etapas de calibração e validação:

Tabela 11 – Coeficientes de Eficiência Nash-Sutcliffe após calibração e validação do modelo.

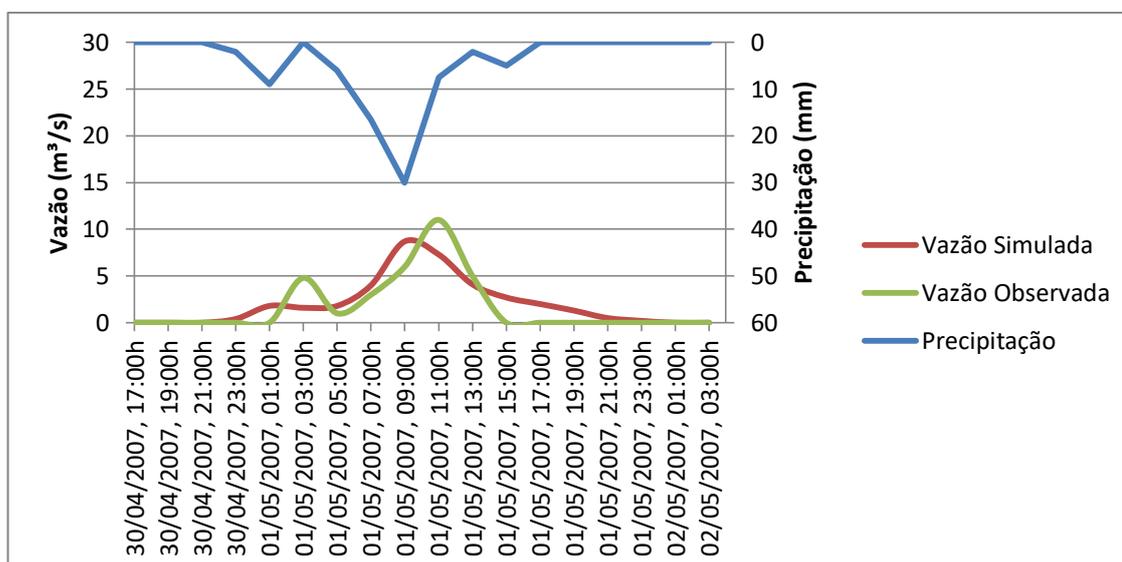
Eventos	Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliffe
Evento 1 (Calibração)	0,66
Evento 2 (Validação)	0,52

Fonte: O Autor (2019).

Ao consultar os coeficientes de eficiência Nash-Sutcliffe apresentados na Tabela 11, é possível afirmar que o modelo possui um desempenho aceitável, pois de acordo com Silva et al. (2008), essa é a classificação para quando os valores desse coeficiente se encontram entre 0,36 e 0,75.

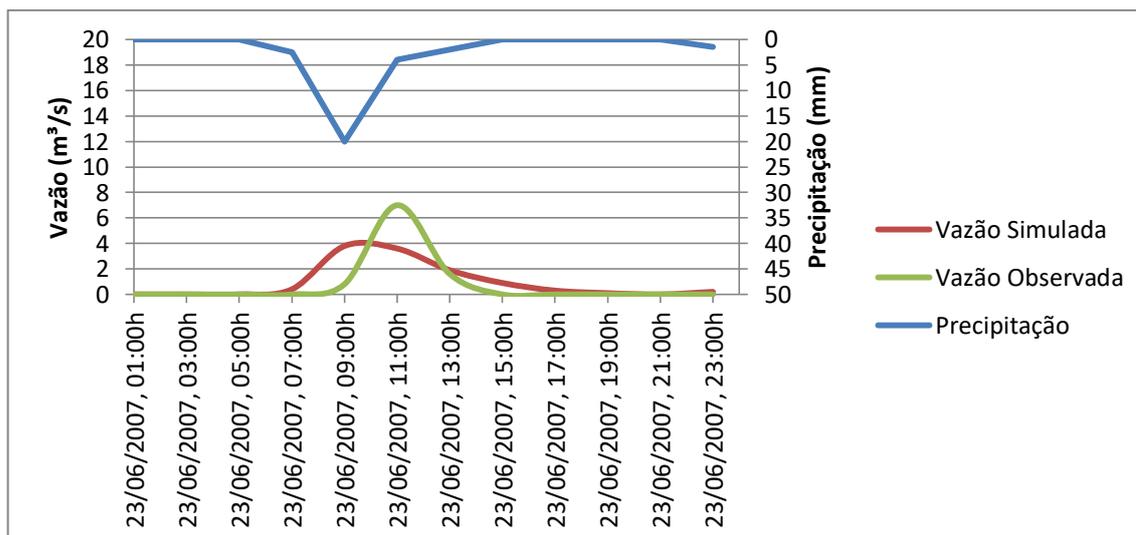
As Figuras 20 e 21 apresentam os dados de chuva e vazão obtidos nas etapas de calibração e validação do modelo, respectivamente:

Figura 20 – Dados de chuva e vazão obtidos na calibração.



Fonte: Autor (2019).

Figura 21 – Dados de chuva e vazão obtidos na validação.



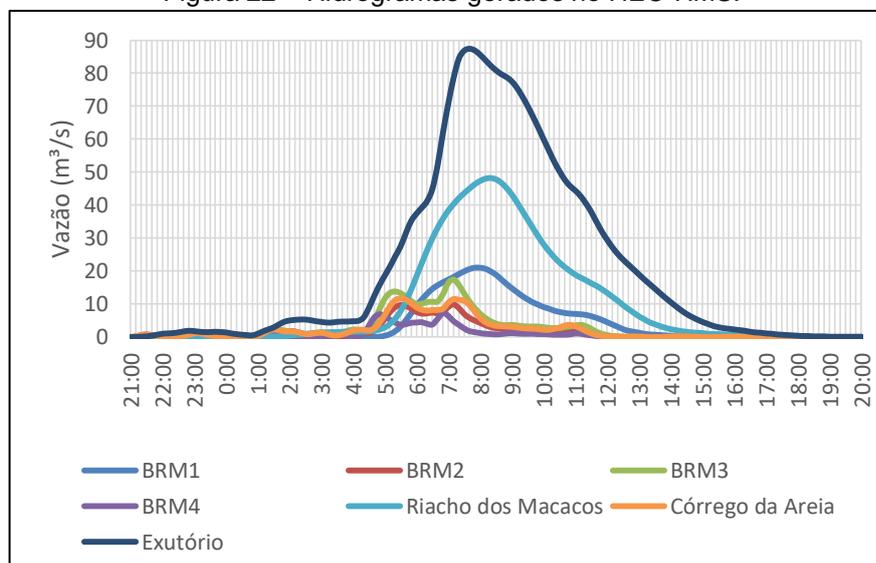
Fonte: Autor (2019).

Os dados de chuva foram obtidos pela autora utilizando apenas uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD), que está localizada em Olinda, nas proximidades da foz do rio Beberibe. Na calibração e validação realizada na presente pesquisa, o cálculo de precipitação foi realizado utilizando o *Specified Hyetograph*, no HEC-HMS.

## 5.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Na modelagem hidrológica foram gerados os hidrogramas de cada bacia e o hidrograma no exutório, conforme apresentado na Figura 22:

Figura 22 – Hidrogramas gerados no HEC-HMS.



Fonte: O Autor (2019).

Ao analisar a Figura 22 é possível inferir que a bacia que mais contribui é a do Riacho dos Macacos, o que não é novidade, pois apesar de possuir apenas 7,24% de área impermeável, se trata da bacia que possui maior área de contribuição. Ao contrário da bacia Riacho dos Macacos, tem-se a BRM4 com menor área de contribuição, mas com pico de vazão próximo aos da bacia BRM2 e Córrego da Areia. Também se observa que apesar da área de contribuição da bacia BRM1 ser maior (aproximadamente 2 vezes) que a BRM3, as duas geraram vazões de pico bem próximas, o que pode ser explicado pela alta taxa de impermeabilização da bacia BRM3.

Em termos quantitativos, a Tabela 12 apresenta os volumes precipitados, escoados e de perdas ocorridos em cada bacia:

Tabela 12 – Volume precipitado, escoado e de perdas ocorrido em cada bacia.

<b>Bacia Hidrográfica</b>	<b>Precipitação (1000 m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume de perdas (1000 m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume escoado (1000 m<sup>3</sup>)</b>
(1) BRM1	728,1	418,2	309,9
(1) BRM2	230,2	95,3	134,9
(1) BRM3	347,2	127,2	220,0
(1) BRM4	105,1	28,3	76,9
Riacho dos Macacos	1311,7	500,5	811,2
Córrego da Areia	247,5	75,1	172,4
Exutório	-	-	1721,6

Fonte: O Autor (2019).

(1) O termo BRM indica que são subdivisões da Bacia do Rio Morno.

Ao consultar a Tabela 12 é possível verificar que a variação espacial da precipitação também colaborou para que a bacia Riacho dos Macacos fosse a que contribuísse em maior volume. Também se observa que apesar do pico de vazão da bacia BRM4 ser próximo aos da bacia BRM2 e Córrego da Areia; e o da bacia BRM3 ser próximo ao da bacia BRM1; os volumes escoados são bem diferentes. O volume escoado na bacia BRM4 corresponde a 57,01% e 44,60% do volume escoado das bacias BRM2 e Córrego da Areia, respectivamente; e o volume escoado na bacia BRM3 corresponde a 70,99% do volume escoado na bacia BRM1.

As bacias BRM2, BRM3 e BMR4 se referem aos trechos urbanizados onde ocorrem os alagamentos na bacia do rio Morno e juntas correspondem a 25,08% do volume escoado no exutório da bacia do rio Morno, enquanto as bacias BRM1 (trecho não urbanizado da bacia do rio Morno) e riacho dos Macacos, localizadas a montante das áreas onde ocorrem os alagamentos na bacia do rio Morno,

contribuem com 65,12% do volume escoado no exutório. Com base nessa análise, uma possível solução para reduzir os picos de vazão e, conseqüentemente, os alagamentos, seria instalar um reservatório de retenção/detenção no exutório das bacias BRM1 e Riacho dos Macacos.

No que diz respeito ao volume de perdas, as bacias BRM1 e Riacho dos Macacos apresentaram os maiores valores e quando somadas correspondem a 53,36% do volume escoado no exutório da bacia do rio Morno. Essas são também as bacias com maiores áreas e menores percentuais de área impermeável, a saber: BRM1 possui área total de 5,55 km<sup>2</sup>, com 1,32% de área impermeável; Riacho dos Macacos possui área total de 9,98 km<sup>2</sup> com 7,24% de área impermeável. Essa constatação serve de alerta para os potenciais problemas que chuvas intensas podem ocasionar, caso esses locais ampliem o processo de urbanização sem o devido planejamento.

Analisando o hidrograma do exutório da bacia do rio Morno é possível verificar uma vazão de pico igual a 87,4 m<sup>3</sup>/s e um volume de escoamento superficial igual a 1721,6 (1000 m<sup>3</sup>), reflete a importância da bacia do rio Morno como afluente do rio Beberibe. Vale a ressalva que se trata da bacia menos urbanizada e com maior área de contribuição para com o rio Beberibe.

### 5.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Na modelagem hidrodinâmica, foi possível observar que o evento resultou em uma área de inundação de ~ 0,723 km<sup>2</sup>, envolvendo em sua grande maioria, áreas com edificações, conforme pode ser observado na Figura 23:

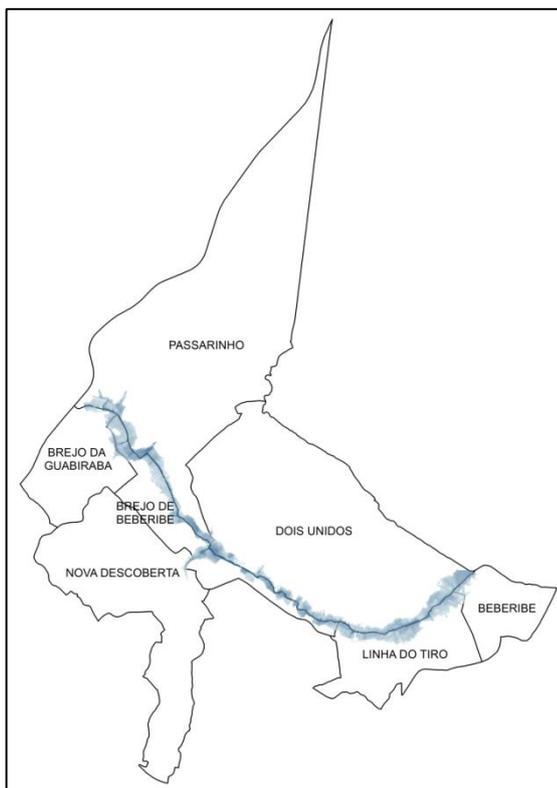
Figura 23 – Área atingida pela inundação.



Fonte: O Autor (2019).

A água extravasou ao longo de toda a calha e os bairros afetados pela inundação foram Passarinho, Brejo da Guabiraba, Brejo de Beberibe, Dois Unidos, Nova Descoberta, Linha do Tiro e Beberibe, conforme apresentado na Figura 24:

Figura 24 – Bairros afetados pela inundação.



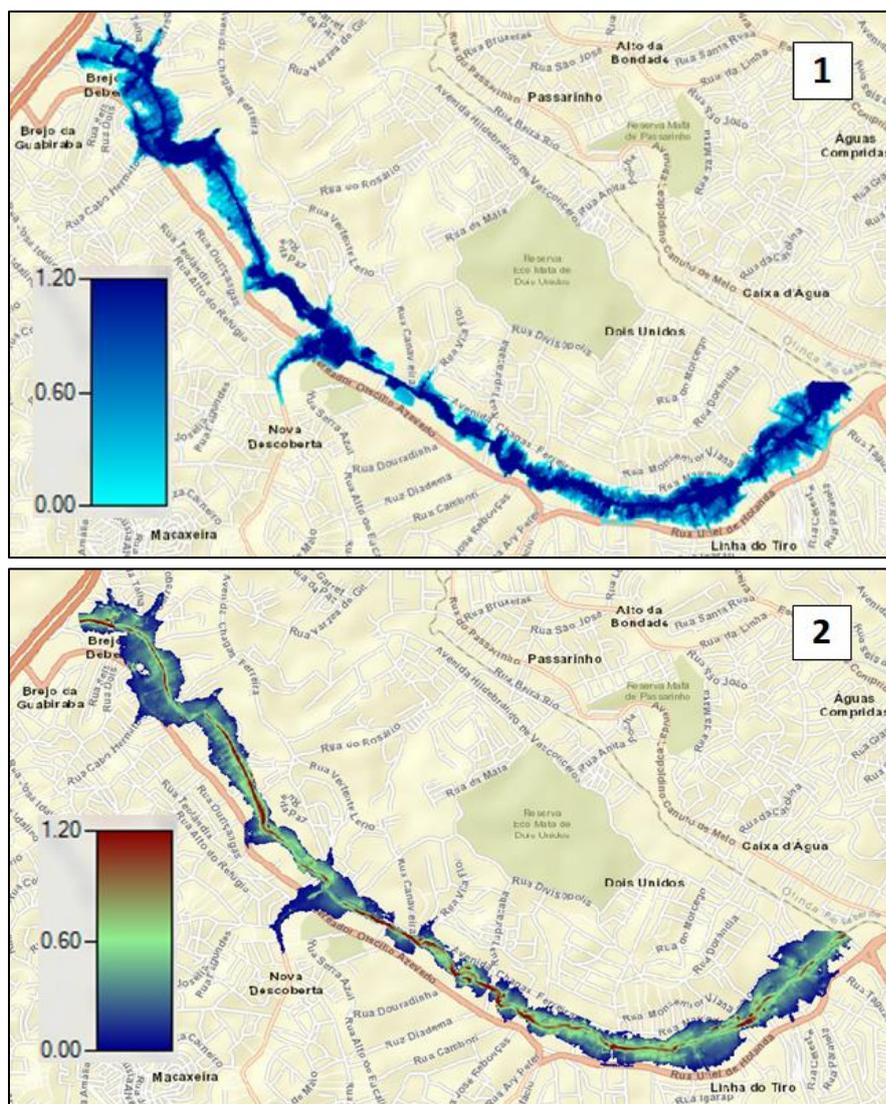
Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 24, a mancha de inundação que vai desde os bairros Brejo da Guabiraba e Passarinho até o bairro Beberibe (exutório da bacia), teve os seus comprimentos laterais entre os bairros Passarinho e Brejo da Guabiraba de ~ 400m; entre os bairros Brejo de Beberibe e Passarinho de ~ 280m; entre os bairros Brejo de Beberibe e Dois Unidos de ~ 210m; entre os bairros Linha do Tiro e Dois Unidos de ~ 260m. Vale a ressalva que o maior comprimento lateral da mancha de inundação (entre os bairros Passarinho e Brejo da Guabiraba) ocorreu próximo ao início do bairro Brejo de Beberibe e que o bairro Brejo da Guabiraba foi um dos menos afetados pela inundação. Os outros bairros menos afetados foram Nova Descoberta e Beberibe. O bairro onde a inundação atingiu o maior comprimento longitudinal foi o Brejo de Beberibe com comprimento de ~ 3,3km.

No tocante ao perigo ocasionado pelo evento, foram analisados os indicadores velocidade da água, profundidade da água, intensidade, força do

escoamento e energia específica, com os limiares estabelecidos por Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016). A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para os indicadores profundidade da água e velocidade:

Figura 25 – Resultados dos indicadores de perigo: (1) profundidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo (m); (2) velocidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo (m/s).



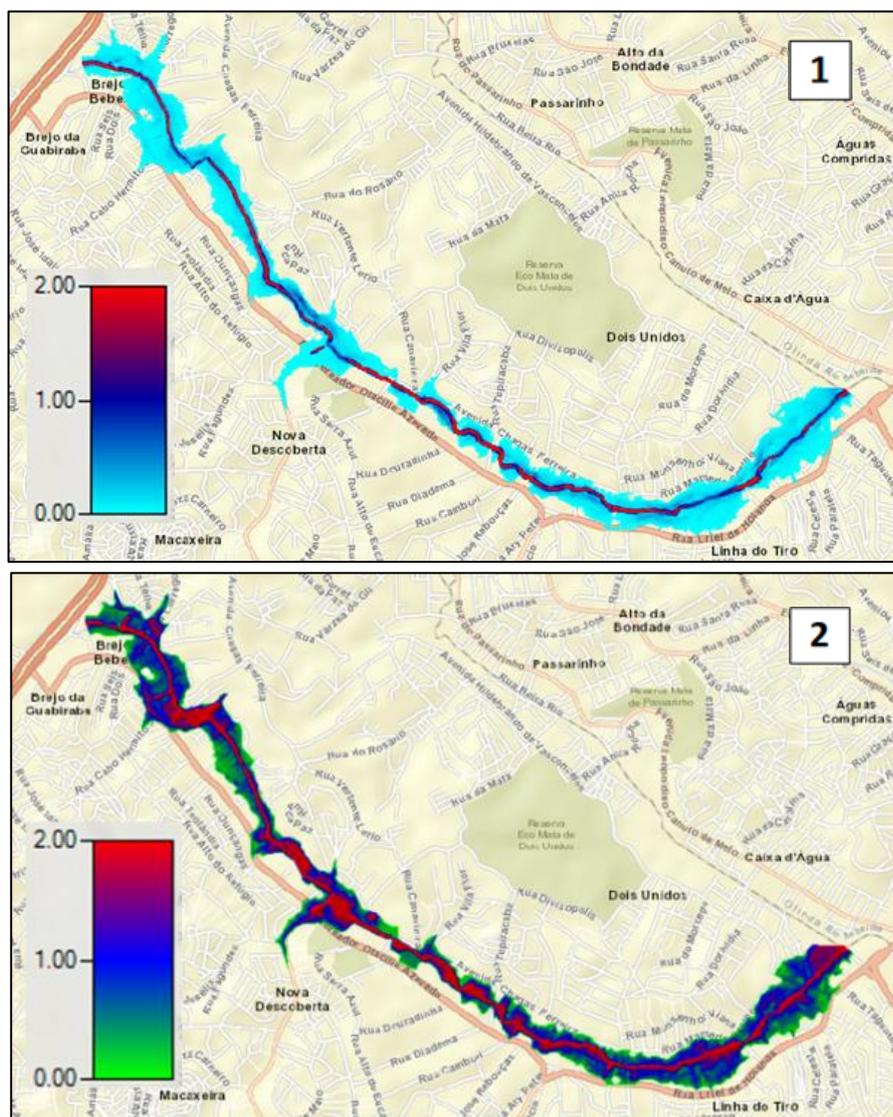
Fonte: O Autor (2019).

Consultando a Figura 25 (1) e (2), verifica-se que o perigo ocasionado pela profundidade da água foi predominantemente de médio a alto e o ocasionado pela velocidade da água variou de baixo a médio, com perigo alto em trechos ao longo da calha do rio. De acordo com Wright (2008) inundações com profundidade da água maior que 0,60m ou velocidade de fluxo acima de 1,2 m/s representam perigo definitivo para as pessoas. Apesar de profundidades da água abaixo de 0,60m ser

classificada como perigo baixo, não significa que essas áreas devam ser ignoradas, pois dependendo das características de cada pessoa e da superfície de contato, pequenas lâminas podem eliminar o atrito pessoa-superfície, ocasionando o escorregamento das pessoas (ROTAVA; MENDIONDO; SOUZA, 2013). De acordo com Vieira et al. (2018), na ocorrência de velocidades de aproximadamente 1,5 m/s e alturas de escoamento menor que 0,1 m uma pessoa pode estar susceptível a deslizar.

A Figura 26 apresenta o resultado referente aos indicadores força do escoamento e energia específica:

Figura 26 – Resultados dos indicadores de perigo: (1) força máxima do fluxo de água em todos os locais, independente do tempo ( $m^3/s^2$ ); (2) energia específica máxima da água em todos os locais, independente do tempo (m).

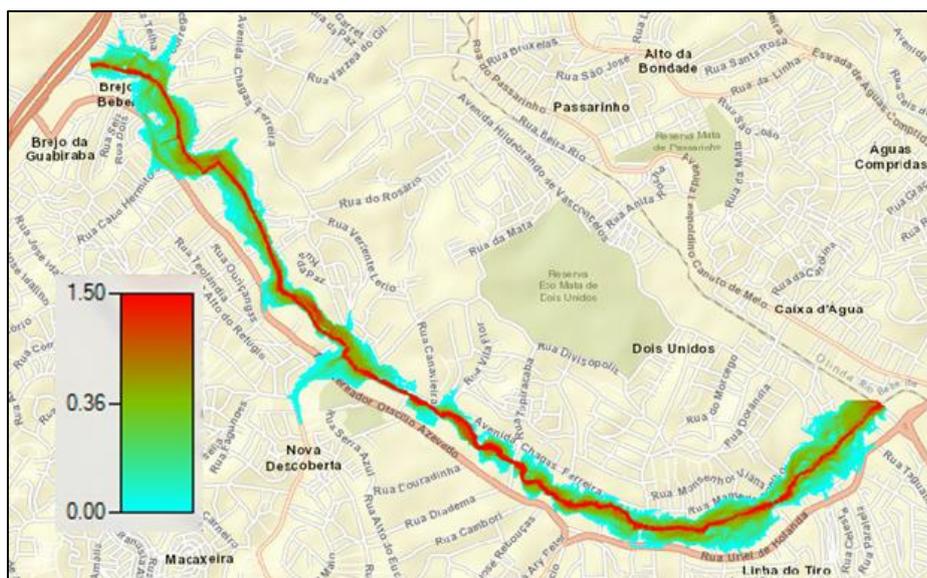


Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 26 (1) e (2), é possível observar que a força do fluxo de água, em geral, apresenta um perigo baixo, sendo constatado perigo médio em poucas áreas da planície de inundação e perigo alto ao longo de diversos trechos da calha. Na análise da energia específica, é possível afirmar que o perigo variou de médio a alto, em quase toda a mancha de inundação. Segundo Kreibich et al. (2009), 2m de energia específica e  $2 \text{ m}^3/\text{s}^2$  de força do fluxo, representam um aumento significativo do perigo.

A Figura 27 apresenta o resultado do indicador intensidade:

Figura 27 – Resultado do indicador de perigo intensidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).



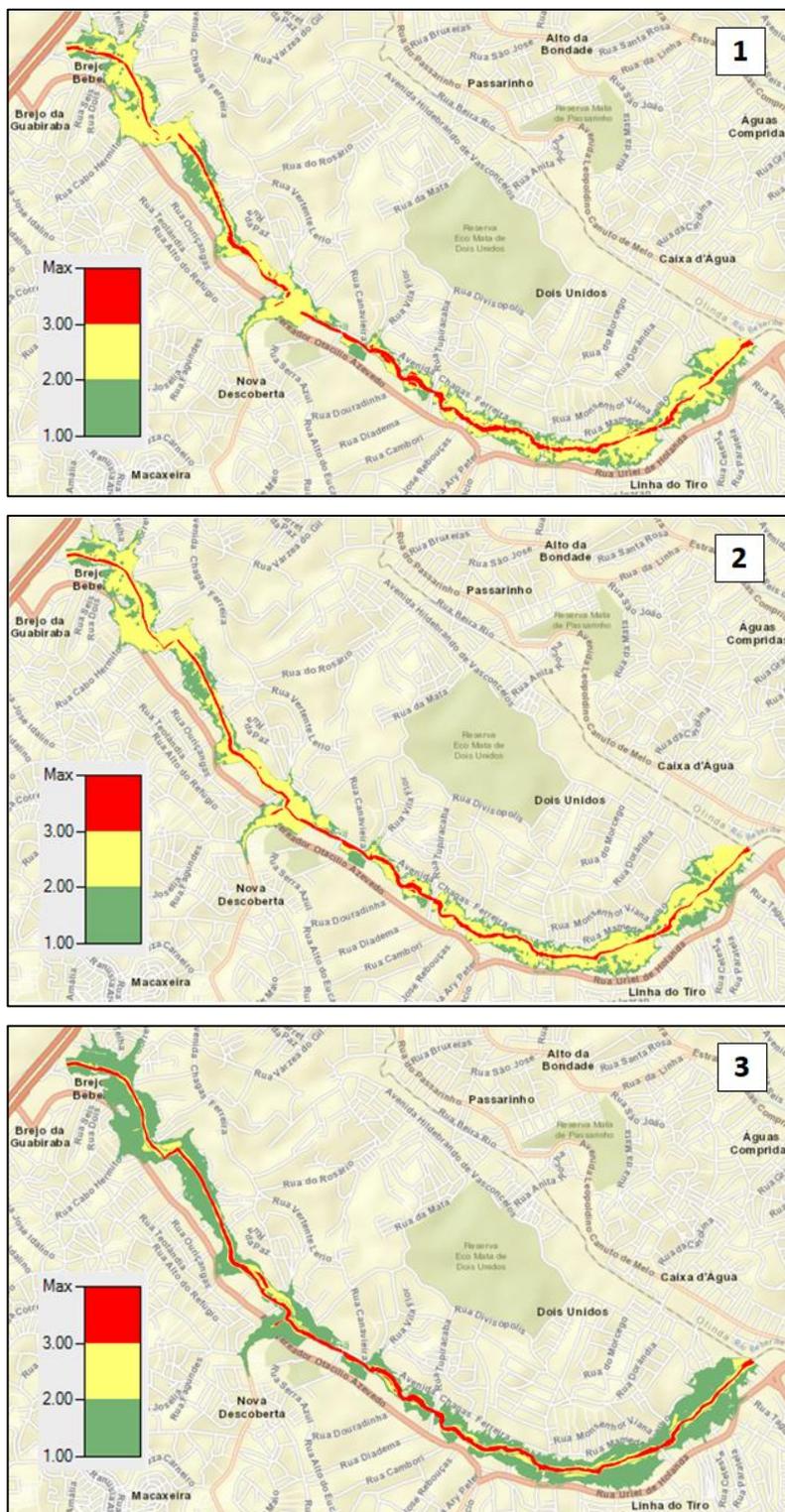
Fonte: O Autor (2019).

Analisando a Figura 27, nota-se que o perigo médio se apresentou em grande parte da planície de inundação, sendo o perigo alto observado ao longo de toda a calha do rio. Segundo Kreibich et al. (2009), o valor de  $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$  para a intensidade, representa um aumento significativo do perigo. Stephenson (2002) considera esse indicador como o índice de perigo e de acordo com o autor valores menores que  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  representam danos as propriedades, veiculos inseguros e possibilidade de auto ajuda; valores maiores ou iguais a  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  e menores que  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  representam perigo para as pessoas; e valores maiores que  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  incluem danos estruturais e erosão.

Além dos indicadores de perigo, foram gerados mapas dos índices de perigo utilizando três metodologias diferentes desenvolvidas por Ribeiro Neto, Batista e

Coutinho (2016), Monte, Tschiedel e Goldenfum (2017), e Stephenson (2002). A Figura 28 apresenta os mapas com os índices de perigo obtidos:

Figura 28 – Mapas dos índices de Perigo: (1) metodologia proposta por Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016); (2) metodologia proposta por Monte, Tschiedel e Goldenfum (2017); e (3) metodologia proposta por Stephenson (2002).



Fonte: O Autor (2019).

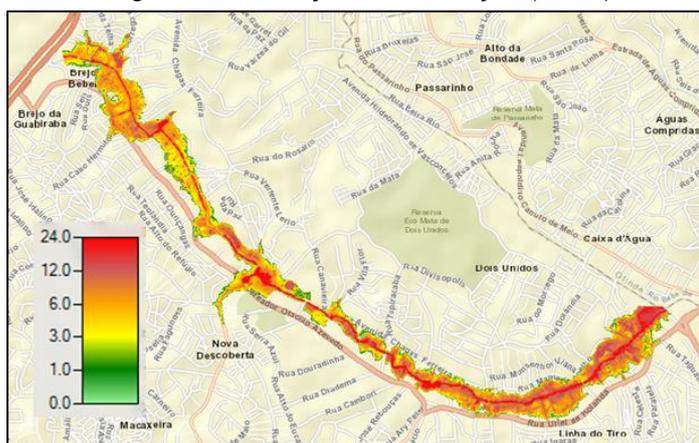
Ao analisar a Figura 28, é possível perceber que os resultados obtidos pelas metodologias de Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016) e de Monte, Tschiedel e Goldenfum (2017), foram semelhantes. Nas Figuras 28 (1) e (2), verifica-se a predominância de perigo médio ao longo de praticamente toda a área de inundação e que a diferença praticamente está no perigo alto de alguns trechos da calha do rio. Vale lembrar que as duas metodologias utilizam uma média dos indicadores. Enquanto Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016) utilizam os indicadores profundidade e velocidade da água; Monte, Tschiedel e Goldenfum (2017) utilizam os cinco indicadores apresentados nas Figuras 25, 26 e 27.

No que diz respeito ao resultado obtido utilizando a metodologia de Stephenson (2002), observa-se uma grande diferença quando comparado aos resultados obtidos pelas outras duas metodologias. Na Figura 28 (3) observa-se perigo alto ao longo de toda a calha do rio e perigo baixo em quase todos os locais atingidos pela inundação. A metodologia de Stephenson (2002) é a única das metodologias apresentadas aqui, que utilizou testes empíricos para determinar a classe de perigo. Essa metodologia é adotada por várias organizações de gerenciamento de inundação, como Minnesota nos Estados Unidos da América e New South Wales na Austrália.

Apesar das diferenças obtidas, recomenda-se que o órgão gestor utilize os três mapas. Para a área de perigo alto, utilizar o mapa obtido com a metodologia de Stephenson (2002), e para as áreas de perigo baixo e médio, utilizar os mapas obtidos pelas metodologias de Ribeiro Neto, Batista e Coutinho (2016) e de Monte, Tschiedel e Goldenfum (2017).

Uma análise importante que os modelos com regime de escoamento transiente permitem, é a da variação temporal da inundação. Com base nessa informação os órgãos gestores conseguem tomar boas decisões, como identificar, com base no tempo decorrido desde o início do evento, os locais prioritários de atuação. No que se refere à duração da inundação das áreas afetadas, tem-se os resultados apresentados na Figura 29:

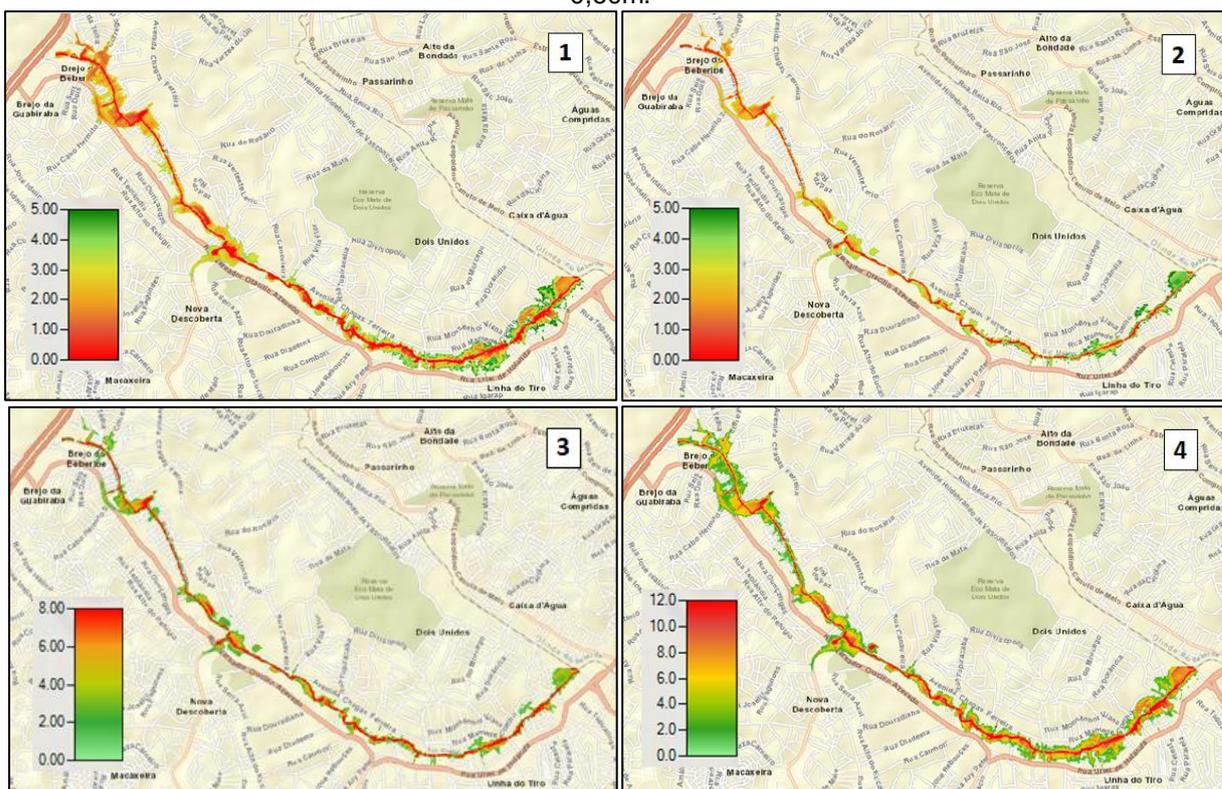
Figura 29 – Duração da inundação (horas).



Fonte: O Autor (2019).

A partir da Figura 29 é possível perceber que boa parte das áreas permaneceram inundadas por períodos variando entre 6h e 12h, sendo os bairros Linha do Tiro e Dois Unidos (localizados próximo ao exutório) os mais prejudicados. A Figura 30 apresenta o tempo decorrido para a profundidade da água atingir e recuar aos limiares do indicador de perigo profundidade da água (0,6m e 1,2m):

Figura 30 – Tempo decorrido em horas para: (1) inundação atingir o limiar de 0,60m; (2) inundação atingir limiar de 1,20m; (3) inundação recuar para limiar de 1,20m; e (4) inundação recuar para limiar 0,60m.

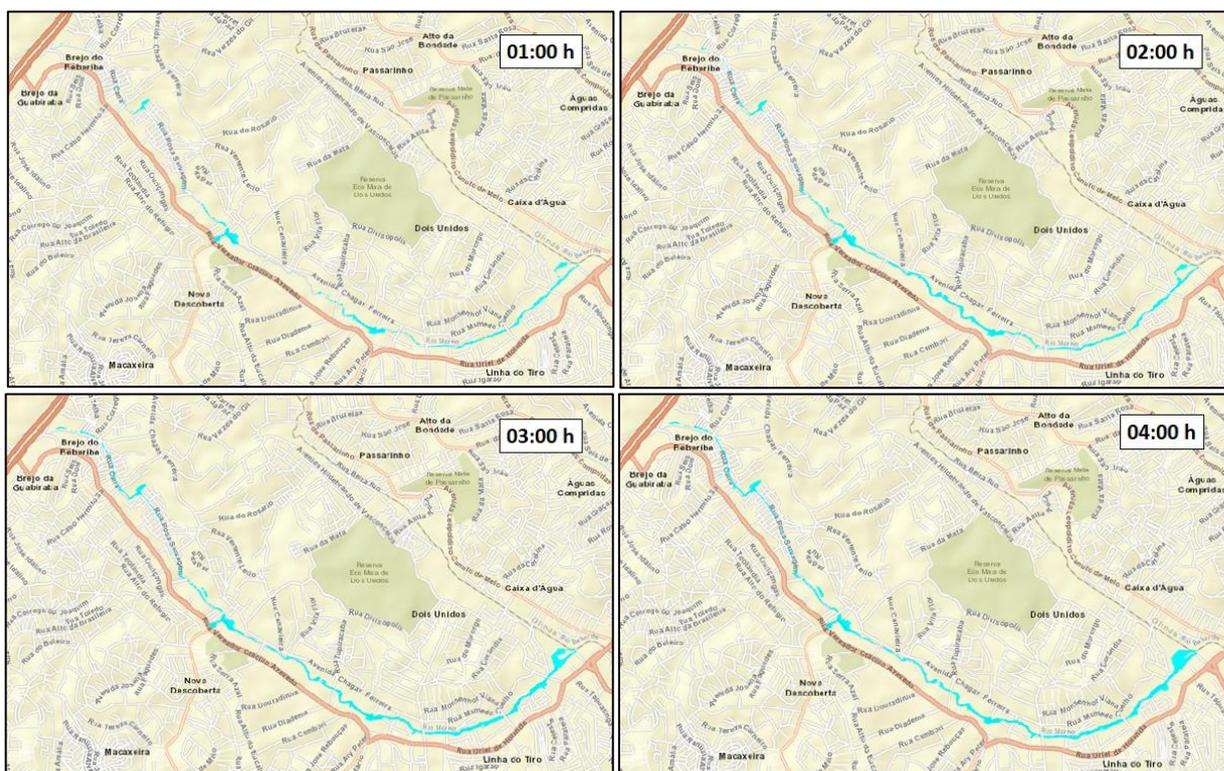


Fonte: O Autor (2019).

A contagem dos tempos para atingir os limiares de 0,6m e 1,2m apresentados na Figura 30 (1) e (2), foi realizada a partir do momento em que iniciou a inundação (05:00h da manhã). Analisando a Figura 30 (1) é possível verificar que a profundidade da água no trecho mais a montante levou um tempo menor que o trecho a jusante para atingir a profundidade de 0,6m. Na análise da Figura 30 (2) observa-se que o trecho a montante possui uma grande área que atinge a profundidade de 1,20m, localizada em uma curva brusca e que o trecho a jusante possui poucas áreas em que a água atinge essa profundidade e as que atingem, levam de 3h a 5h. Na Figura 30 (3) observa-se que as poucas áreas em que a profundidade da água atingiu 1,20m, permaneceram com essa lâmina, na maioria da área inundada, por períodos de até 4h. Na Figura 30 (4) verifica-se que no trecho a montante a lâmina-d'água recua mais rapidamente que no trecho a jusante, ao limiar de 1,2m.

Em relação a variação temporal da mancha de inundação, foi realizada uma análise dela iniciando e com intervalo de 1:00h, conforme pode ser visualizado nas Figuras 31, 32 e 33:

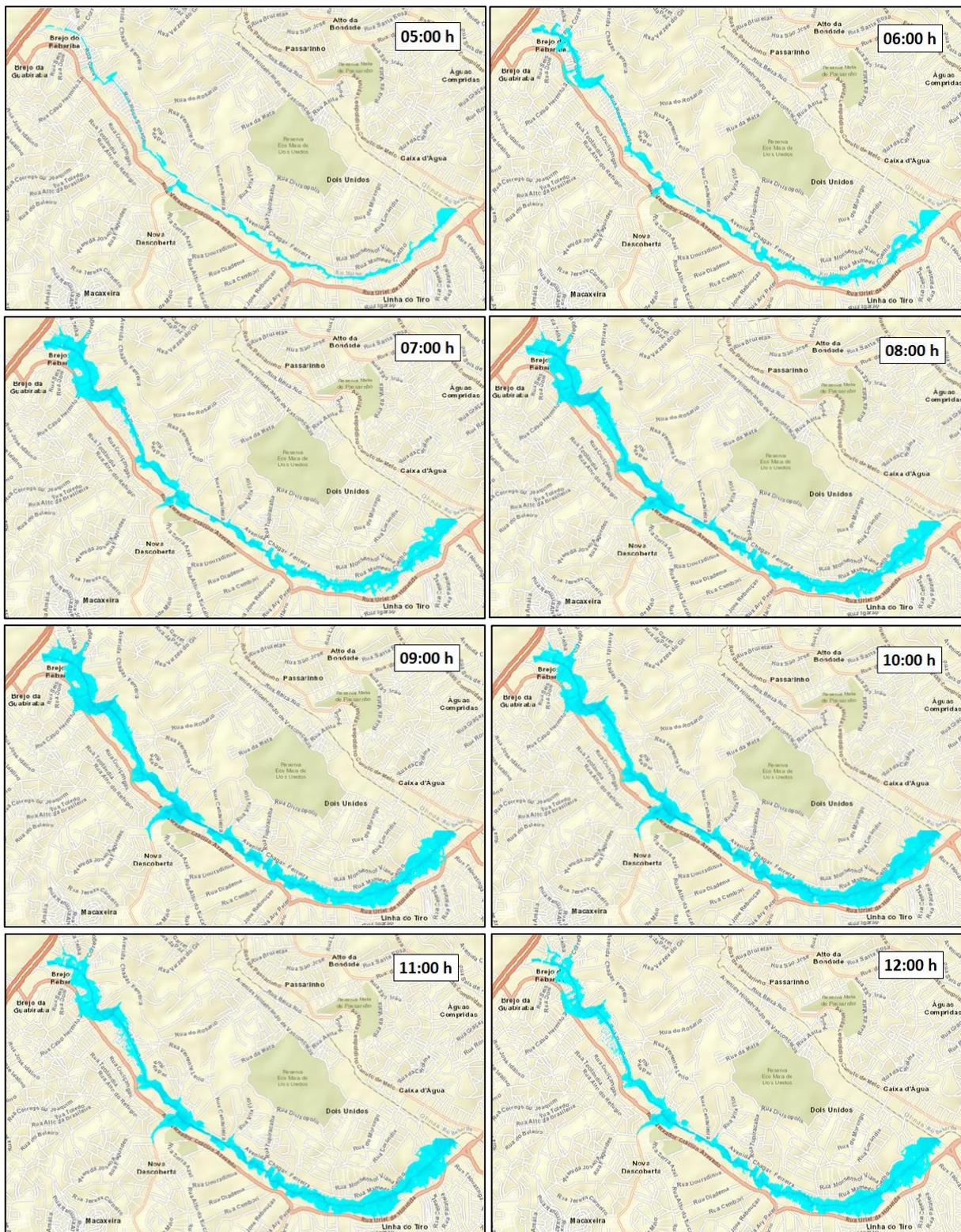
Figura 31 – Variação da mancha de inundação de 01:00h até 04:00h.



Fonte: O Autor (2019).

Analisando a Figura 31 verifica-se que até às 04:00h a mancha de inundação não ocasionou grandes impactos.

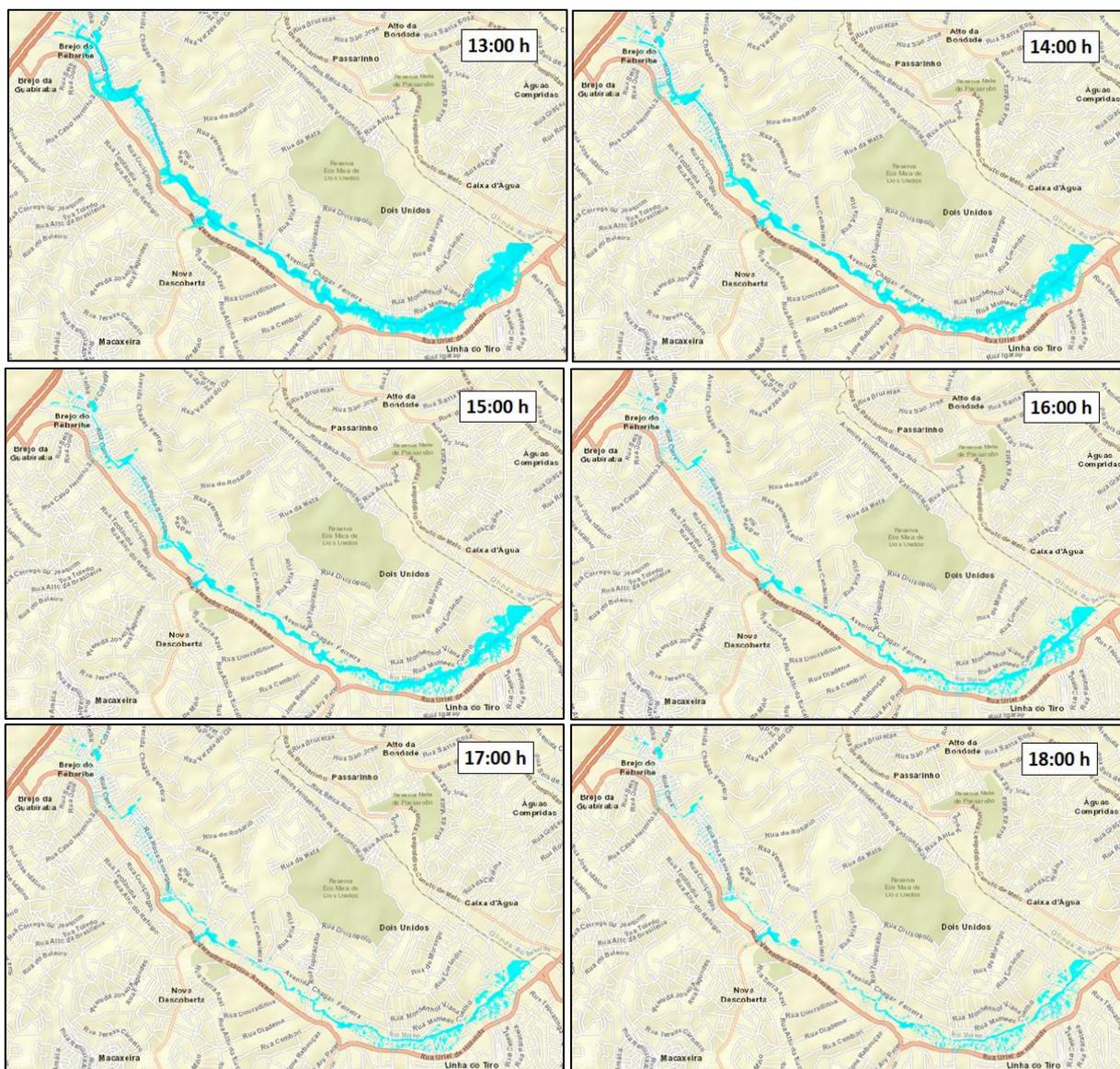
Figura 32 – Variação da mancha de inundação de 05:00h até 12:00h.



Fonte: O Autor (2019).

Analisando a Figura 32 verifica-se que às 05:00h, a mancha de inundação já tem começado a atingir bairros localizados a jusante. Às 06:00h a mancha de inundação está bem mais visível e já atinge os demais bairros. Às 08:00h a mancha já tem atingido o seu limite que se mantém praticamente constante até às 10:00h. A partir das 11:00h já é possível observar a mancha sumindo nas áreas a montante.

Figura 33 – Variação da mancha de inundação de 13:00h até 18:00h.



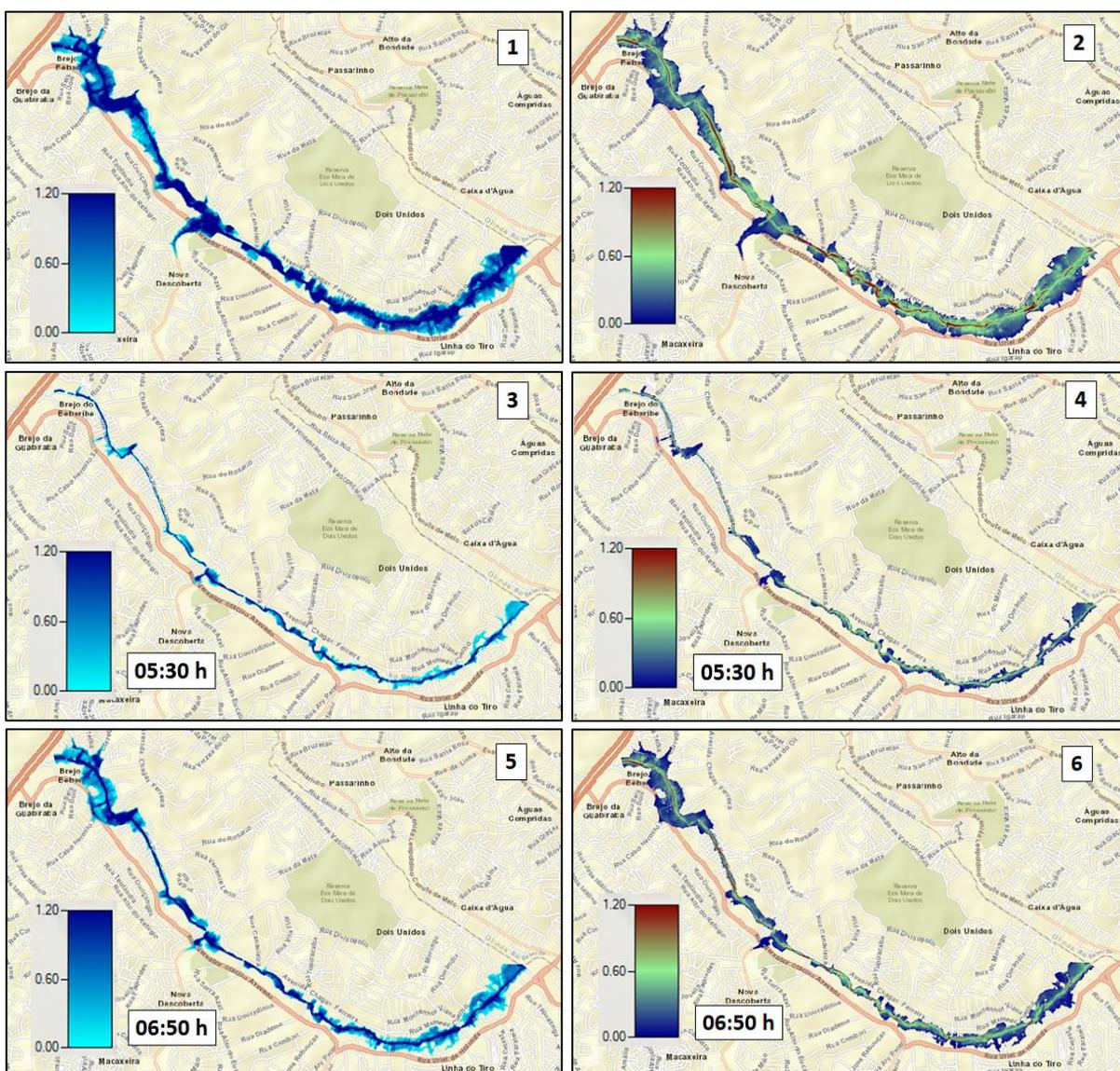
Fonte: O Autor (2019).

Analisando a Figura 33 observa-se que às 14:00h parte da mancha já tem sumido nas áreas a jusante. Também é possível observar que às 15h a mancha já não oferece mais perigo para as regiões montante, enquanto nas regiões a jusante

ela permanece. Às 17:00h a mancha praticamente já não atinge mais nenhum bairro.

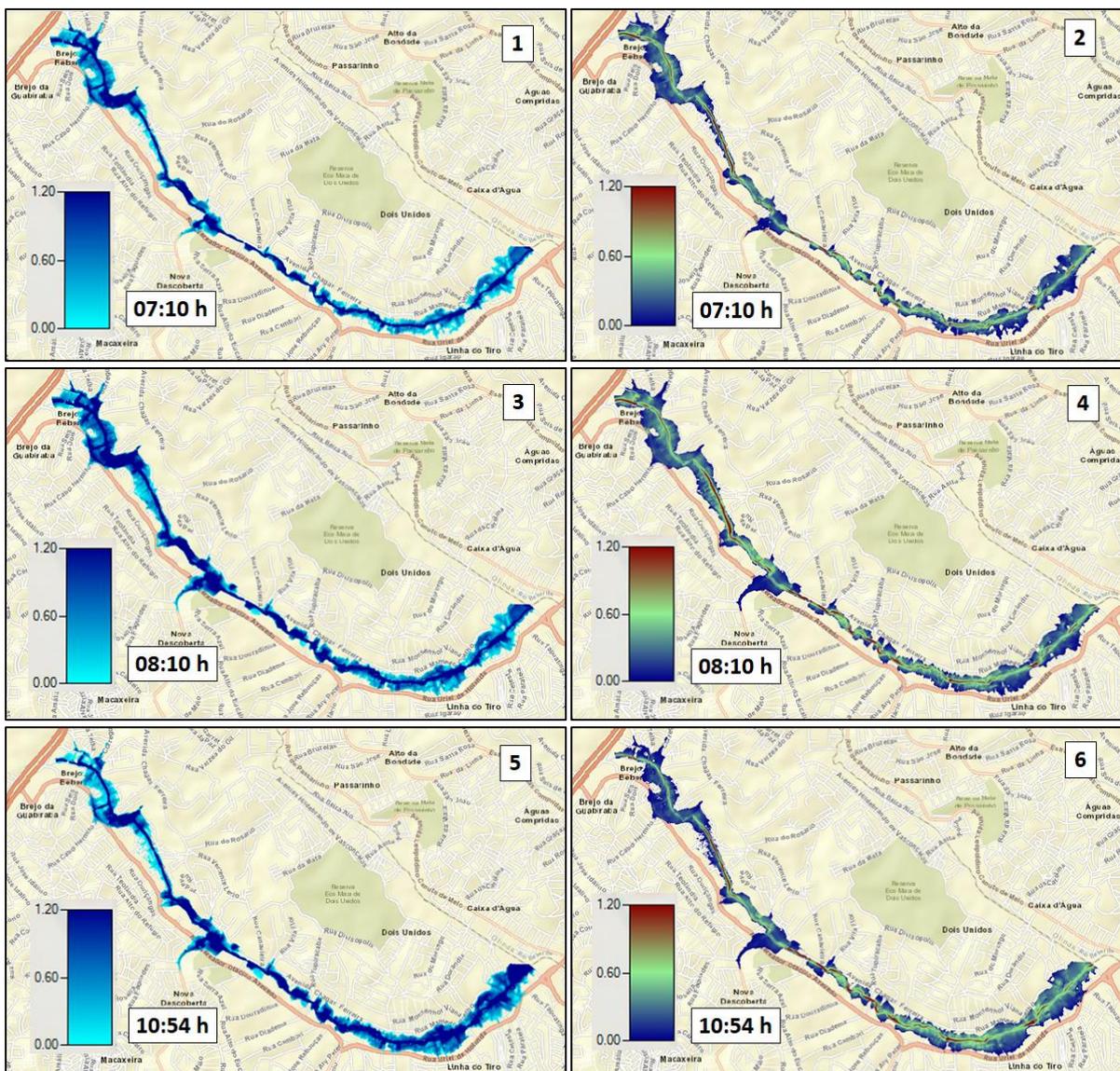
Uma ultima análise realizada foi comparar a profundidade e a velocidade gerada pela vazão de pico de cada hidrograma, com a profundidade e velocidade máxima gerada em toda bacia, independentemente do tempo. As Figuras 34 e 35 apresentam esses resultados:

Figura 34 – Mapas: (1) profundidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo; (2) velocidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo; (3) profundidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma Córrego da Areia; (4) velocidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma Córrego da Areia; (5) profundidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma BRM4; (6) velocidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma BRM4.



Fonte: O Autor (2019).

Figura 35 – Mapas: (1) profundidade da água quando atingida a vazão máxima dos hidrogramas BRM2 e BRM3; (2) velocidade da água quando atingida a vazão máxima dos hidrogramas BRM2 e BRM3; (3) profundidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma J1; (4) velocidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma J1; (5) profundidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma no exutório; (6) velocidade da água quando atingida a vazão máxima do hidrograma no exutório.



Fonte: O Autor (2019).

O tempo de ascensão do hidrograma no exutório utilizado para obter os resultados apresentados em (5) e (6) da Figura 35, foi obtido no HEC-RAS, tendo em vista que o tempo calculado no HEC-HMS utiliza métodos simplificados para analisar a propagação de vazão. O hidrograma J1 utilizado para obter os resultados (3) e (4) da Figura 35, se refere à soma dos hidrogramas gerados pelas bacias Riacho dos Macacos e BRM1.

Ao comparar (1) profundidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo e (2) velocidade máxima da água em todos os locais, independente do tempo, da Figura 34 com os demais resultados tanto da Figura 34 como da Figura 35, é possível afirmar que para a bacia em estudo, nem sempre a vazão de pico representará a pior situação, ressaltando a importância em se avaliar o comportamento da inundação ao longo do tempo.

## 6 CONCLUSÕES

A partir do apresentado e discutido no trabalho é possível concluir que:

- Hidrologicamente a bacia do rio morno pode ser dividida em duas bacias, uma urbanizada (onde ocorre a inundação) e outra não urbanizada (localizada a montante de onde ocorre a inundação). O volume da bacia do Riacho dos Macacos (também localizada a montante de onde ocorrem a inundação) mais o volume produzido pela parte não urbanizada da bacia do rio morno correspondem a 65,12% do volume escoado no exutório. Uma possível solução para problema seria instalar um reservatório de detenção/retenção nas proximidades da BR-101, local onde o Riacho dos Macacos se encontra com o rio Morno;
- O volume de perdas na parte não urbanizada da bacia do rio Morno mais o volume de perdas da bacia Riacho dos Macacos, corresponde a 53,36% do volume escoado no exutório da bacia do rio Morno. Essas são também as bacias com maiores áreas e menores percentuais de área impermeável, a saber: BRM1 possui área total de 5,55 km<sup>2</sup>, com 1,32% de área impermeável; Riacho dos Macacos possui área total de 9,98 km<sup>2</sup> com 7,24% de área impermeável. Essa constatação serve de alerta para os potenciais problemas que chuvas intensas podem ocasionar, caso esses locais passem por um processo de urbanização sem o devido planejamento;
- O local onde a mancha de inundação atingiu maior comprimento lateral foi a montante da bacia entre os bairros Passarinho e Brejo da Guabiraba, próximo ao início do bairro Brejo de Beberibe. A mancha atingida nesse local foi de ~ 400m;
- Na análise dos indicadores de perigo, a profundidade variou predominantemente de perigo médio a alto, a velocidade variou de perigo baixo a médio, a força apresentou perigo predominantemente baixo, a intensidade variou de perigo baixo a médio e a energia específica variou de perigo médio a alto;
- No desenvolvimento de mapas com índice de perigo foram obtidos três mapas, onde um deles apresentou bastante diferença. No entanto, utilizando os três mapas para analisar a pior situação, verifica-se que ao longo de toda a

calha o perigo é alto e nos locais onde a mancha de inundação atingiu o perigo é predominantemente médio;

- Grande parte das áreas atingidas permaneceram inundadas por períodos que variavam entre 6h e 12h, sendo os bairros Linha do Tiro e Dois Unidos (localizados próximo ao exutório) os mais prejudicados;
- As áreas a jusante são as primeiras a sofrerem os impactos da inundação, como também são as que permanecem mais tempo inundadas. No entanto, as áreas a montante levam um tempo menor para atingir os limiares de profundidade da água (0,6m e 1,2m);
- A vazão de pico dessa bacia não representa a pior situação de inundação, ressaltando a importância em se avaliar o escoamento ao longo do tempo.

Espera-se com esse trabalho poder contribuir com os órgãos gestores na adoção de medidas estruturais e/ou não estruturais para esse local, tendo em vista que se trata de uma bacia que frequentemente enfrenta diversos problemas de inundação.

## REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J.A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 87, n. 1-2, p.45-59, out. 1986.
- ALVES, F. H. B. **Sistema de previsão de enchentes**: integração de modelos de previsão de chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica. 2017. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- ARDUINO, G.; REGGIANI, P.; TODINI, E. Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. **Hydrology And Earth System Sciences**, [s.l.], v. 9, n. 4, p.280-284, 2005.
- APEL, H.; THIEKEN, A. H.; MERZ, B.; BLÖSCHL, G. A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 38, n. 1-2, p.79-100, maio 2006.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632 p.
- BEVEN, K. Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 105, n. 1-2, p.157-172, jan. 1989.
- BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a laser**: Comparação com Métodos Fotogramétricos. ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S/A. Curitiba/PR. Disponível em: <[www.lidar.com.br/arquivos/brandalizeperf.pdf](http://www.lidar.com.br/arquivos/brandalizeperf.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2019.

BREBBIA, C. A.; TELLES, J. C. F.; WROBEL, L. C. **Boundary Element Techniques: Theory and Application in Engineering**. [S.l.]: Springer Verlag, 1984, 464 p.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; GRISON, F.; MOTA, A. A.; KOBAYAMA, M.; CHAFFE, P. L. B. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 127, p.103-113, fev. 2019.

BHUIYAN, M. J. A. N.; DUTTA, D. Analysis of flood vulnerability and assessment of the impacts in coastal zones of Bangladesh due to potential sea-level rise. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 61, n. 2, p.729-743, dez. 2011.

CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A.V. (2005). **Recife e a convivência com as águas**, in: “Gestão do Território e Manejo Integrado das ÁGUAS urbanas”, Ministério das Cidades. Brasília – DF.

CABRAL, J. J. S. P. Simulação computacional de água subterrânea utilizando métodos de elementos de contorno. **Águas Subterrâneas**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.11-36, dez. 1996.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/EXPRESSÃO GRÁFICA, 2009. 166 p.

CEMADEN. Disponível em: <<https://www.cemaden.gov.br>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

CIRILO, J. A.; BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; MASCARENHAS, F. C. B.; CANALI, G. V.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Hidráulica aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2014a. 627p.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 07, n. 04, p.755-763, 2014b.

COUTINHO, A. P.; LASSABATERE, L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; JARAMILLO, R. A.; CABRAL, J. J. S. P. Hydraulic characterization and hydrological behaviour of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil. **Hydrological Processes**, [s.l.], p.4242-4254, 2016.

GAYATHRI, K. D.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, [s.l.], v. 4, p.1001-1007, 2015.

DUTTA, D.; TENG, J.; VAZE, J.; LERAT, J.; HUGHES, J.; MARVANEK, S. Storage-based approaches to build floodplain inundation modelling capability in river system models for water resources planning and accounting. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 504, p.12-28, nov. 2013.

DUTTA, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin. **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 20, n. 6, p.1365-1384, 2006.

EMLURB. **Fotos do rio Morno**. 2018. 2 fotografias.

GALLEGOS, H. A.; SCHUBERT, J. E.; SANDERS, B. F. Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California. **Advances In Water Resources**, [s.l.], v. 32, n. 8, p.1323-1335, ago. 2009.

GALVANIN, E. A. S.; POZ, A. P. D. SISTEMA LIDAR E MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DE DADOS. **Revista de Geografia (UFPE)**, [s.l.], v. 30, n. 01, p.91-102, 2013.

GÓES, V. C. **Simulação hidrológico - hidrodinâmica integrada ao geoprocessamento para avaliação da macrodrenagem em centros urbanos**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. 2007. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Matemática, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2007.

GOODCHILD, M.; HAINING, R.; WISE, S. Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities. **International Journal Of Geographical Information Systems**, [s.l.], v. 6, n. 5, p.407-423, set. 1992.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <<http://earth.google.com>>. Acesso em: 04 fev. 2019.

HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E.; VAN MULLEM, J. A. **Curve Number Hydrology: State of the Practice**. 2. ed. [s.l.]: ASCE/EWRI, 2009. 106 p.

IBGE; EMBRAPA (Rio de Janeiro, RJ). **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro, 2001. 1 Mapa. Escala 1:5.000.000.

KARIM, F.; DUTTA, D.; MARVANEK, S.; PETHERAM, C.; TICEHURST, C.; LERATA, J.; KIM, S.; YANG, A. Assessing the impacts of climate change and dams on floodplain inundation and wetland connectivity in the wet-dry tropics of northern Australia. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 522, p.80-94, mar. 2015.

KREIBICH, H.; PIROTH, K.; SEIFERT, I.; MAIWALD, H.; KUNERT, U.; SCHWARZ, J.; MERZ, B.; THIEKEN, A. H. Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? **Natural Hazards And Earth System Science**, [s.l.], v. 9, n. 5, p.1679-1692, 14 out. 2009.

LIU, Q.; QIN, Y.; ZHANG, Y.; LI, Z. A coupled 1D - 2D hydrodynamic model for flood simulation in flood detention basin. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 75, n. 2, p.1303-1325, set. 2015.

MARRIOTT, S. Textural analysis and modelling of a flood deposit: River severn, U.K.. **Earth Surface Processes And Landforms**, [s.l.], v. 17, n. 7, p.687-697, nov. 1992.

MARTIN, P. H.; LEBOEUF, E. J.; DOBBINS, J. P.; DANIEL, E. B.; ABKOWITZ, M. D. INTERFACING GIS WITH WATER RESOURCE MODELS: A STATE-OF-THE-ART REVIEW. **Journal Of The American Water Resources Association**, [s.l.], v. 41, n. 6, p.1471-1487, dez. 2005.

MELO, H. A.; CUNHA, J. E. B. L.; NÓBREGA, R. L. B.; RUFINO, I. A. A.; GALVÃO, C. O. MODELOS HIDROLÓGICOS E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG): integração possível. In: IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador. **Anais...** Salvador: ABRH, 2008.

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 14, n. 4, p.147-165, dez. 2014.

MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. Review article "Assessment of economic flood damage". **Natural Hazards And Earth System Science**, [s.l.], v. 10, n. 8, p.1697-1724, ago. 2010.

MONTE, B. E. O.; TSCHIEDEL, A, F.; GOLDENFUM, J, A. ÍNDICE DE RISCO APLICADO A POTENCIAL ROMPIMENTO DE BARRAGEM POR SIMULAÇÕES 1D E 2D. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Brasília. **Anais...** Brasília, 2017. p. 1 - 8.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.282-290, abr. 1970.

NYERGES, T. L. Geographic Information Abstractions: Conceptual Clarity for Geographic Modeling. **Environment And Planning A: Economy and Space**, [s.l.], v. 23, n. 10, p.1483-1499, out. 1991.

PE3D. Disponível em: < <http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

PETZOLD, B.; REISS, P.; STÖSSEL, W. Laser scanning - surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. **ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, [s.l.], v. 54, n. 2-3, p.95-104, jul. 1999.

PIZZUTO, J. E. Sediment diffusion during overbank flows. **Sedimentology**, [s.l.], v. 34, n. 2, p.301-317, abr. 1987.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519p.

QGIS. Disponível em: <<https://www.qgis.org/>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.377-390, abr. 2016.

ROSMAN, P. C. C. Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental. In: SILVA, R. C. V. et al. (Comp.). **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5**. Rio de Janeiro: ABRH, 2001. Cap. 1, p. 1-161.

ROTAVA, J.; MENDIONDO, E. M.; SOUZA, V, C, B. SIMULAÇÃO DE INSTABILIDADE HUMANA EM INUNDAÇÕES: PRIMEIRAS CONSIDERAÇÕES. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de

conservação do solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 10, n. 4, p.05-18, out/dez. 2005.

SILVA, F. E. O. **Avaliação de métodos de propagação de vazões em cursos d'água naturais com ênfase em aspectos da geomorfologia fluvial**. 2006. 265 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 12, n. 3, p.258-265, jun. 2008.

SILVA, P. O.; CABRAL, J. J. S. P. Atenuação de Picos de Vazão em Área Problema: Estudo Comparativo de Reservatórios de Detenção em Lote, em Logradouros e em Grande Área da Bacia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 19, n. 2, p.7-18, 2014.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R.; CABRAL, J. J. S. P. Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife - PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 22, p.1-12, 2017.

SUI, D. Z.; MAGGIO, R.C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. **Computers, Environment And Urban Systems**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.33-51, jan. 1999.

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.423-428, dez. 2002.

SZYMKIEWICZ, R. **Numerical Modeling in Open Channel Hydraulics**. Dordrecht: Springer, 2010. 417 p.

TENG, J.; JAKEMAN, A. J.; VAZE, J.; CROKE, B. F. W.; DUTTA, D.; KIM, S. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 90, p.201-216, abr. 2017.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 680 p.

UNDP – United Nations Development Programme. **Reducing disaster risk: a challenge for development**. New York, USA: UNDP, 2004. 169 p.

USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS**: Technical Reference Manual. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, Califórnia, EUA, 2000. 145 p.

USACE. **HEC Data Storage System Visual Utility Engine HEC-DSSVue**: User's Manual. Version 2.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2009. 490 p.

USACE. **River Analysis System HEC-RAS**: Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2016a. 547 p.

USACE. **River Analysis System HEC-RAS**: User's Manual. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2016b. 962 p.

USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS**: User's Manual. Version 4.2. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2016c. 612 p.

VAZE, J.; VINEY, N.; STENSON, M.; RENZULLO, L.; DIJK, A. V.; DUTTA, D.; CROSBIE, R.; LERAT, J.; PENTON, D.; VLEESHOUWER, J.; PEETERS, L.; TENG, J.; KIM, S.; HUGHES, J.; DAWES, W.; ZHANG, Y.; LEIGHTON, B.; PERRAUD, J. M.; JOEHNK, K.; YANG, A.; WANG, B.; FROST, A.; ELMAHDI, A.; SMITH, A.;

DAAMEN, C.; The Australian Water Resource Assessment Modelling System (AWRA). In: 20th International Congress on Modelling and Simulation, 2013, Adelaide. Adelaide, 2013. p. 1 - 6.

VIEIRA, L, M, S.; FONTES, A. S.; SIMÕES, A, L, A.; CONCEIÇÃO, M, P, S. ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS DE CORPOS HUMANOS NA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO A JUSANTE DA BARRAGEM DE SANTA HELENA- BA DECORRENTE DE SUA RUPTURA HIPOTÉTICA. In: XII Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2018, Maceió. **Anais...** Maceió: ABRH, 2018.

WRIGHT, J. M. **Floodplain Management: Principles and Current Practices.** Knoxville: The University of Tennessee, 2008.

WROBEL, L. C. Introdução aos métodos numéricos. In: SILVA, R. V. et al. (Comp.). **Métodos numéricos em recursos hídricos.** Rio de Janeiro: ABRH, 1989. Cap. 1. p. 1-81.



