



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – RECURSOS HÍDRICOS**

**LÍDIO CAMPOS GIORDANI**

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA NO RIO**  
**MARANGUAPINHO MEDIANTE CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**FORTALEZA**

**2018**

LÍDIO CAMPOS GIORDANI

MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA NO RIO MARANGUAPINHO  
MEDIANTE CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Osny Enéas da Silva.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G421m Giordani, Lídio Campos.  
Modelagem hidrológica e hidráulica no rio Maranguapinho mediante cenário de mudanças climáticas /  
Lídio Campos Giordani. – 2018.  
110 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Osny Enéas da Silva.

1. Modelagem Hidrológica. 2. Modelagem Hidráulica. 3. Mudanças Climáticas. 4. Faixa de Inundação. I.  
Título.

CDD 627

---

LÍDIO CAMPOS GIORDANI

MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA NO RIO MARANGUAPINHO  
MEDIANTE CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 27/11/2018.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Francisco Osny Enéas da Silva. (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e por me manter com forças e com fé diante de todas as adversidades.

À minha família, mãe, pai e irmã, a base da minha vida, a quem devo absolutamente tudo que sou e que conquistei.

À Camilla, por todo carinho, amor, paciência, companheirismo e motivação diários.

Ao meu orientador e professor, Francisco Osny Enéas da Silva, pelo tempo e atenção concedidos durante a realização deste trabalho.

Aos professores José Nilson Bezerra Campos e José Roberto Gonçalves de Azevedo, pela disposição para participar desta banca examinadora.

À UFC, por ser minha casa e escola por todos esses anos.

A todo corpo docente do DEHA e também seus funcionários.

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste ciclo. Muito obrigado.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma modelagem hidrológica e hidráulica realizada no Rio Maranguapinho, localizado na região metropolitana de Fortaleza. Foram consideradas novas equações de chuva, calculadas para os cenários de mudanças climáticas RCP 4,5 e RCP 8,5, segundo o modelo de circulação global CESM1-CAM5. A modelagem hidrológica foi feita utilizando o software HEC-HMS, sendo adotados os métodos do SCS-CN, para cálculo das precipitações efetivas, o método do Hidrograma Unitário do SCS, para a geração do hidrograma de projeto, e o método de Muskingum-Cunge para a propagação da onda de cheia no rio. Além disso, consideraram-se a calha do rio dragada e a presença da barragem Maracanaú, a partir de dados referentes a estudos posteriores realizados pela FUNASA. Após determinação dos valores de vazão para os cenários pré-estabelecidos, fez-se uso do software HEC-RAS para o cálculo da altura da lâmina d'água do rio e a consequente faixa de inundação para três situações: a inicial, considerando os dados à época da execução do projeto de dragagem, com período de retorno de 20 anos; a primeira para o cenário RCP 4,5, com período de retorno de 50 anos; e a segunda para o cenário RCP 8,5, com período de retorno de 100 anos. Pôde-se perceber um grande aumento das faixas de inundação para as situações que consideram alterações no clima (cerca de 11 e 13 vezes maiores, respectivamente, em relação à situação inicial), gerando uma maior percepção da importância da pesquisa no tema de mudanças climáticas que visem aumentar a quantidade de políticas ambientais que retardem os impactos antrópicos.

**Palavras-chave:** Modelagem Hidrológica, Modelagem Hidráulica, Mudanças Climáticas, Faixa de Inundação.

## ABSTRACT

The present work presents a hydrological-hydraulic modeling performed in the Maranguapinho River, located in the metropolitan region of Fortaleza. New IDF equations were calculated for the climate change scenarios RCP 4,5 and RCP 8.5, according to the global circulation model CESM1-CAM5. HEC-HMS software was applied for hydrological modeling, and the following methods were used: SCS-CN loss method, to calculate the effective precipitation; SCS Unit Hydrograph method, to generate the hydrograph; and Muskingum-Cunge method, for flood routing in the river. In addition, we considered the dredging of the river and the presence of the Maracanaú dam, based on data from previous studies conducted by FUNASA. After determining the flow values for the pre-set scenarios, HEC-RAS software was used for determining the water surface level of the river, generating the flood range for three situations: the initial one, considering the data at the time of dredging project execution; the first for RCP 4,5 scenario, 50 years return period; the second for RCP 4,5 scenario, 100 years return period. It was possible to notice a great increase of the flood ranges for the first and second situations (about 11 and 13 times, respectively, compared to the initial situation), which creates a perception of the importance of research in climate change that aim to increase the amount of environmental policies that delay anthropic impacts.

**Keywords:** Hydrological Modeling, Hydraulic Modeling Climate Changes, Flood Zone.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Concentrações de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> (ppm) e nível do mar (m) (a); Forçantes Climáticas (W/m <sup>2</sup> ) devido a variações de GEE e área de camada de gelo (b); Temperatura (°C) (c).....	20
Figura 2:	Gráfico da quantidade de CO <sub>2</sub> atmosférico (em ppm) por tempo (em anos). Baseado em comparações de amostras de bolhas de ar aprisionadas em núcleos de gelo. ....	21
Figura 3:	Gráfico de índice de temperatura terra-oceano. Variação de temperatura (em °C) por tempo (em anos), de 1980 até os dias atuais .....	22
Figura 4:	Emissões históricas provenientes da queima combustíveis fósseis e indústrias (linha preta) e projeções de emissões (linhas coloridas) de acordo com os cenários RCPs. O gráfico apresenta a quantidade de CO <sub>2</sub> equivalente (em Gt, um bilhão de toneladas) por ano e traz o crescimento na temperatura no final do século XXI (média entre 2081-2100) com relação à média de 1850-1900. ....	25
Figura 5:	Leitos de um rio e planície de inundação. ....	30
Figura 6:	Diferentes situações do nível de água da calha de um rio em situações de chuva.....	30
Figura 7:	Separação da precipitação total em escoamento direto, retenção real e abstração inicial. ....	33
Figura 8:	Relação da intensidade da chuva com a vazão gerada. ....	37
Figura 9:	Processo chuva-deflúvio.....	38
Figura 10:	Esquema de um Hidrograma Unitário Triangular do método do SCS. ....	41
Figura 11:	Mapa de localização da Barragem Maracanaú. ....	47
Figura 12:	Perfil longitudinal do eixo da barragem, na região do vertedouro. ....	48
Figura 13:	Corte transversal da barragem, na região do vertedouro. ....	49
Figura 14:	Esquema no HEC-HMS da bacia hidrográfica de estudo, contendo barragem, sub-bacias, junções (representações dos exutórios) e trechos do rio.....	53
Figura 15:	Hidrogramas da sub-bacia B1, sendo o vermelho da situação sem barragem e o azul da situação com barragem (Q <sub>pico</sub> = 34,06 m <sup>3</sup> /s; TR = 20 anos).....	54
Figura 16:	Hidrogramas da sub-bacia B2 e da sub-bacia B1 somados. A linha cinza representa o hidrograma da sub-bacia B1 aplainado; a linha vermelha	

	representa o hidrograma da sub-bacia B2; e a linha azul representa o hidrograma-soma dos dois ( $Q_{\text{pico}} = 138,03 \text{ m}^3/\text{s}$ ; TR = 20 anos).....	55
Figura 17:	Hidrograma no exutório da sub-bacia B3, em azul ( $Q_{\text{pico}} = 207,23 \text{ m}^3/\text{s}$ ; TR = 20 anos). Este é o resultado da soma do hidrogramas da sub-bacia B3, em cinza, com o hidrograma que vem do trecho B2-B3, em vermelho. ....	56
Figura 18:	Curvas IDF dos 6 GCMs em comparação à curva IDF da AUMEF para o período de retorno de 50 anos.....	57
Figura 19:	Curvas IDF dos 6 GCMs em comparação à curva IDF da AUMEF para o período de retorno de 100 anos.....	58
Figura 20:	Curvas IDF da equação de chuva do modelo CESM1-CAM5, cenário RCP 4,5 para os períodos de retorno de 10 a 100 anos. ....	60
Figura 21:	Curvas IDF da equação de chuva do modelo CESM1-CAM5, cenário RCP 8,5 para os períodos de retorno de 10 a 100 anos. ....	61
Figura 22:	Modelo de bacia no HEC-HMS.....	64
Figura 23:	Gráfico Cota x Volume do reservatório formado pela barragem Maracanaú. ....	68
Figura 24:	Dados de cota-volume (elevation-storage) em forma de tabela no HEC-HMS. ....	68
Figura 25:	Dados de entrada da seção transversal em forma de tabela no HEC-HMS (seção-tipo 1). ....	69
Figura 26:	Gráfico da seção transversal no HEC-HMS (seção-tipo 1). ....	70
Figura 27:	Configuração de oito-pontos para a seção do rio no HEC-HMS.....	70
Figura 28:	Mapa do município de Fortaleza, dividido por bairros e regionais. ....	73
Figura 29:	Hietograma de projeto, sub-bacia B1, situação 1. ....	77
Figura 30:	Hietograma de projeto, sub-bacia B2, situação 1. ....	77
Figura 31:	Hietograma de projeto, sub-bacia B3, situação 1. ....	77
Figura 32:	Hietograma de projeto, sub-bacia B1, situação 2. ....	78
Figura 33:	Hietograma de projeto, sub-bacia B2, situação 2. ....	78
Figura 34:	Hietograma de projeto, sub-bacia B3, situação 2. ....	78
Figura 35:	Hietograma de projeto, sub-bacia B1, situação 3. ....	79
Figura 36:	Hietograma de projeto, sub-bacia B2, situação 3. ....	79
Figura 37:	Hietograma de projeto, sub-bacia B3, situação 3. ....	79
Figura 38:	Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B1.....	81
Figura 39:	Amortização do hidrograma de cheia da sub-bacia B1. ....	81

Figura 40: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B2.....	82
Figura 41: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B1-B2 e da sub-bacia B2.....	82
Figura 42: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B3.....	83
Figura 43: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B2-B3 e da sub-bacia B3.....	83
Figura 44: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B1.....	84
Figura 45: Amortização do hidrograma de cheia da sub-bacia B1. ....	85
Figura 46: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B2.....	85
Figura 47: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B1-B2 e da sub-bacia B2.....	86
Figura 48: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B3.....	86
Figura 49: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B2-B3 e da sub-bacia B3.....	87
Figura 50: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B1.....	88
Figura 51: Amortização do hidrograma de cheia da sub-bacia B1. ....	88
Figura 52: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B2.....	89
Figura 53: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B1-B2 e da sub-bacia B2.....	89
Figura 54: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B3.....	90
Figura 55: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B2-B3 e da sub-bacia B3.....	90
Figura 56: Faixa de inundação da situação 0, imagem de satélite. ....	93
Figura 57: Faixa de inundação da situação 0, mapa de ruas e avenidas. ....	93
Figura 58: Faixa de inundação da situação 1, imagem de satélite. ....	94
Figura 59: Faixa de inundação da situação 1, mapa de ruas e avenidas. ....	94
Figura 60: Faixa de inundação da situação 2, imagem de satélite. ....	95
Figura 61: Faixa de inundação da situação 2, mapa de ruas e avenidas. ....	95
Figura 62: Lâmina d'água na seção S-36, situação 0.....	97
Figura 63: Lâmina d'água na seção S-36, situação 1.....	98
Figura 64: Lâmina d'água na seção S-36, situação 2.....	98
Figura 65: Lâmina d'água na seção S-54, situação 0.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização dos possíveis cenários RCPs.....	24
Tabela 2: Principais danos decorrentes de inundações em áreas urbanas. ....	32
Tabela 3: Dados das sub-bacias para a modelagem no HEC-HMS. ....	65
Tabela 4: Dados da barragem para a modelagem no HEC-HMS.....	66
Tabela 5: Descrição dos trechos ( <i>reaches</i> ) dos rios.....	71
Tabela 6: Dados de precipitação calculados para as situações 1, 2 e 3, nas sub-bacias B1, B2 e B3. ....	75
Tabela 7: Valores de vazão de pico na bacia hidrográfica, situação 1. ....	84
Tabela 8: Valores de vazão de pico na bacia hidrográfica, situação 2. ....	87
Tabela 9: Valores de vazão de pico na bacia hidrográfica, situação 3. ....	91
Tabela 10: Área das faixas de inundação e fator comparativo. ....	92
Tabela 11: Áreas divididas em trechos, densidade demográfica dos trechos e população em risco.....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUMEF	Autarquia da Região Metropolitana de Fortaleza.
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CN	Curve Number
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GCM	General Circulation Model (Modelo de Circulação Global)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse Gases
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LID	Low Impact Development
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

PMF	Prefeitura Municipal de Fortaleza
PSARMF	Plano de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Fortaleza
RCP	Representative Concentration Pathways
RF	Radiative Forcing (Forçante Radioativa)
SCS	Soil Conservation Service
UFC	Universidade Federal do Ceará
USACE	United States Army Corps of Engineering

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1</b>	<b>Caracterização, contexto e objetivos</b> .....	16
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	17
<b>1.3</b>	<b>Organização do trabalho</b> .....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Mudanças Climáticas</b> .....	19
<b>2.2</b>	<b>Sistemas Urbanos no contexto de Mudanças Climáticas</b> .....	22
<b>2.3</b>	<b>Previsão de Cenários Futuros</b> .....	23
<b>2.3.1</b>	<i>Representative Concentration Pathways (RCPs)</i> .....	23
<b>2.3.2</b>	<i>Modelos de Circulação Global (General Circulation Models - GCMs)</i> .....	25
<b>2.4</b>	<b>Chuvas Intensas</b> .....	27
<b>2.4.1</b>	<i>Equação de Chuvas e Curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF)</i> .	27
<b>2.4.2</b>	<i>Enchente x Inundação</i> .....	29
<b>2.4.3</b>	<i>Danos provenientes de eventos de chuvas intensas</i> .....	31
<b>2.5</b>	<b>Cálculo de Precipitação Efetiva pelo método SCS-CN</b> .....	33
<b>2.6</b>	<b>Hidrograma</b> .....	37
<b>2.6.1</b>	<i>Conceito e definição</i> .....	37
<b>2.6.2</b>	<i>Hidrograma Unitário</i> .....	39
<b>2.6.3</b>	<i>Hidrograma Unitário do SCS</i> .....	39
<b>2.7</b>	<b>Dragagem</b> .....	43
<b>2.7.1</b>	<i>Conceito e definição</i> .....	43
<b>2.7.2</b>	<i>Projeto de Dragagem do rio Maranguapinho</i> .....	44
<b>2.8</b>	<b>Barragem</b> .....	45
<b>2.8.1</b>	<i>Conceito e definição</i> .....	45
<b>2.8.2</b>	<i>Projeto da Barragem Maracanaú</i> .....	45
<b>2.9</b>	<b>Modelagem e Simulação</b> .....	49
<b>2.9.1</b>	<i>Conceitos</i> .....	49
<b>2.9.2</b>	<i>HEC-HMS</i> .....	50
<b>2.9.3</b>	<i>HEC-RAS</i> .....	51
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	52
<b>3.1</b>	<b>Análise dos dados iniciais do Projeto de Dragagem do Maranguapinho</b> ...52	

3.1.1	<i>Esquema do Modelo da Bacia</i> .....	52
3.1.2	<i>Hidrogramas de projeto</i> .....	53
3.2	<b>Avaliação dos GCMs na geração de novas curvas IDF e equações de chuva.</b> .....	56
3.2.1	<i>Modelo CESM1-CAM5, cenário RCP 4,5</i> .....	60
3.2.2	<i>Modelo CESM1-CAM5, cenário RCP 8,5</i> .....	61
3.3	<b>Determinação de novos hietogramas de projeto pelo método dos Blocos Alternados</b> .....	62
3.4	<b>Modelagem no HEC-HMS</b> .....	63
3.4.1	<i>Modelo da Bacia</i> .....	63
3.4.2	<i>Modelo Meteorológico, Especificações de Controle e Dados de Séries Temporais</i> .....	66
3.4.3	<i>Dados em pares</i> .....	67
3.4.3.1	<i>Curva cota-volume (Elevation-Storage Function)</i> .....	67
3.4.3.2	<i>Seções transversais (Cross Sections)</i> .....	69
3.5	<b>Metodologia de estimativa de população atingida por inundação</b> .....	71
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	74
4.1	<b>Chuvas Intensas e Precipitação Total</b> .....	74
4.2	<b>Hietogramas de Projeto</b> .....	76
4.3	<b>Hidrogramas de Projeto</b> .....	80
4.3.1	<i>Situação 1: RCP 4,5 e T = 50 anos</i> .....	81
4.3.2	<i>Situação 2: RCP 4,5 e T = 100 anos</i> .....	84
4.3.3	<i>Situação 3: RCP 8,5 e T = 50 anos</i> .....	88
4.4	<b>Faixas de Inundação</b> .....	91
4.5	<b>Estimativa de população em risco</b> .....	96
4.6	<b>Altura da lâmina d'água</b> .....	97
5	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	100
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	102

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Caracterização, contexto e objetivos

A partir da Revolução Industrial, ocorreu um significativo aumento da emissão de dióxido de carbono, apesar de, à época, isso parecer ser irrelevante. Como consequência, o teor deste com outros gases vêm aumentando desde então, provocando o tão conhecido efeito estufa, que é um dos principais responsáveis pelas mudanças globais de clima. O aumento da concentração dos gases estufa vem gerando aumento na temperatura do planeta e prevê-se que tal aquecimento pode implicar em uma intensificação do ciclo hidrológico, o que necessariamente afeta o regime pluviométrico, com diversas repercussões, como disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas, qualidade das águas, volume de escoamento nos rios, ocorrência de secas e cheias, dentre outros (RAMOS, 2010).

Cenários de emissões e socioeconômicos são muito utilizados na pesquisa climática para prover descrições plausíveis sobre como o futuro pode evoluir com respeito a mudanças socioeconômicas, tecnológicas, energéticas, de uso e ocupação do solo e de emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos (VAN VUUREN et al., 2011). Dessa forma, é de extrema relevância entender de que forma essas mudanças podem modificar o regime hidrológico de determinados locais, a fim de prever seu comportamento.

Historicamente, com o intuito de explorar os benefícios oferecidos pelos rios, como transporte, lazer, abastecimento, entre outros, a sociedade sempre buscou se estabelecer em seus entornos. Todavia, o processo de ocupação muitas vezes ocorre sem o devido planejamento, o que leva às ocupações das planícies inundáveis e, conseqüentemente, à geração de grandes problemas socioeconômicos, em função da alta vulnerabilidade aos eventos de cheias e inundações. Em um nível global, as cidades também experimentam por processos naturais de aumento de áreas urbanas e crescimento de suas populações. Infelizmente, muitas vezes, não existe um crescimento proporcional dos equipamentos urbanos, fazendo com que as pessoas acabem por ocupar o espaço de maneira desordenada. A região metropolitana de Fortaleza não está fora desse contexto. A intensificação do processo de expansão da cidade, que começou por volta de 1970, atraiu um expressivo contingente populacional vindo do campo em busca de melhores condições de vida. Os que tinham poder aquisitivo ocuparam áreas melhores atendidas

por infraestrutura e serviços, enquanto que o restante acabou por ocupar áreas deterioradas, periferias, favelas e áreas impróprias à habitação, como margens de rios e lagoas (LOUREIRO, 2011).

Não raramente, esses locais acabam por sofrer em eventos chuvosos. Os impactos gerados por inundações em ambientes deste tipo consistem principalmente em perdas materiais, sociais, interrupção das atividades econômicas e perdas de vidas humanas (BLAINSKI et al., 2011). Segundo Mendes e Mendiondo (2007), as inundações são responsáveis por 53% das mortes causadas por catástrofes naturais no mundo. Berz (2000) afirma que prejuízos causados por inundações correspondem a 29% dos danos causados por catástrofes naturais em todo o mundo.

Dessa forma, é relevante a análise e compreensão dos regimes de chuva locais, no intuito de prevenir ao máximo situações extremas ou, ao menos, estar preparado para lidar com suas consequências. A maioria dos estudos sobre eventos extremos de precipitação sugerem que eles têm aumentado em frequência e intensidade durante o século XX. Os primeiros a documentarem essas alterações, segundo Groisman et al (2005), foram Iwashima e Yamamoto (1993), em um estudo com dados de estações do Japão e dos Estados Unidos. Por sua vez, Dore (2005) constatou, após uma revisão de literatura sobre mudança de padrões de precipitação, que em regiões onde a precipitação total aumentou provavelmente houve acentuados aumentos na intensidade da precipitação.

## **1.2 Objetivos**

Com base no exposto, o objetivo geral do presente trabalho é avaliar a resposta hidrológica do rio Maranguapinho, localizado cidade de Fortaleza/CE, a novas equações de chuva determinadas a partir de modelos de circulação global para cenários de mudanças climáticas.

Os objetivos específicos são:

- Selecionar novas equações de chuva para Fortaleza, correspondentes a cenários futuros sob condições de mudanças climáticas;
- Calcular novos valores de precipitação a partir dessas equações;

- Realizar uma modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio Maranguapinho para determinar valores de vazão referente às precipitações calculadas;
- Realizar uma modelagem hidráulica do Rio, para determinar a altura do nível da água e, dessa forma, estimar a faixa de inundação do evento de cheia;
- Fazer uma estimativa da população em risco devido à inundação.

### **1.3 Organização do trabalho**

A partir deste capítulo introdutório, este trabalho está dividido em mais quatro capítulos.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, que abrange conceitos relevantes e estudos técnicos e científicos relacionados à temática em questão.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada.

Os resultados obtidos e discussões acerca dos mesmos estão presentes no capítulo 4.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo e recomendações para novos trabalhos.

Na sequência, são listadas as referências bibliográficas citadas ao longo do texto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Mudanças Climáticas

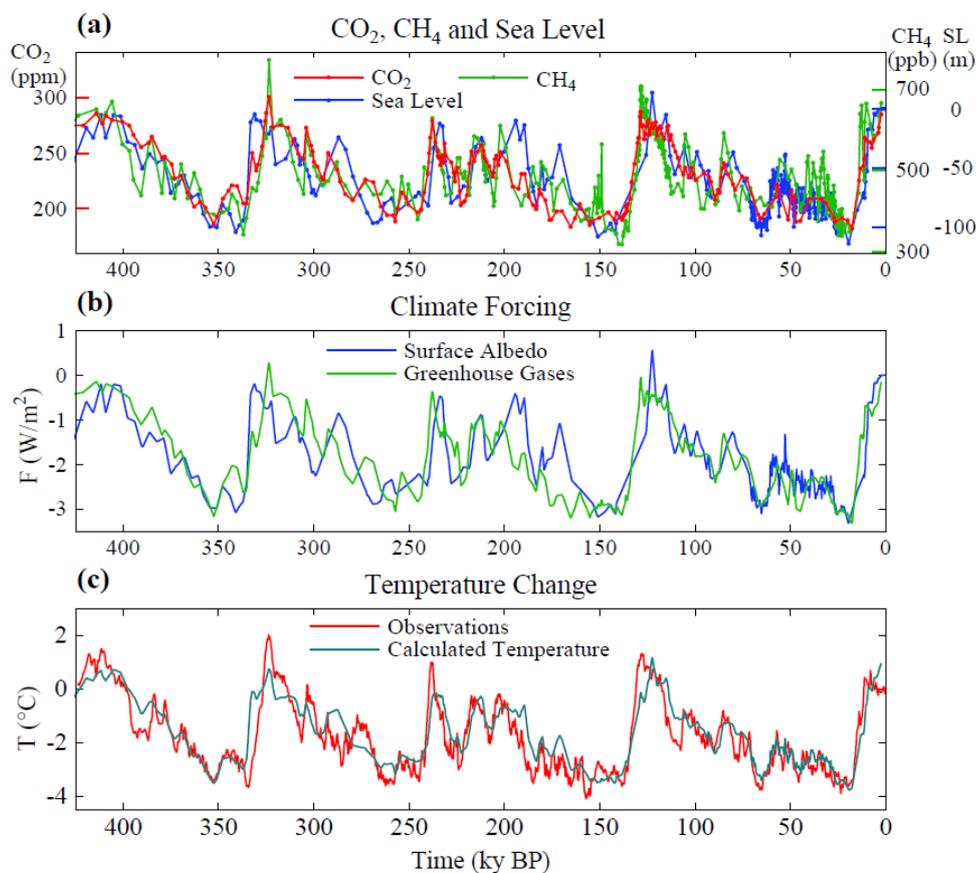
O termo mudança climática refere-se à alteração ou à variação do clima ao longo do tempo, em escala global ou local. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2004), mudança climática é uma variação a longo prazo, que seja estatisticamente significativa em relação a um dado parâmetro climático, como temperatura, precipitação, etc. Um cenário de alteração climática pode ser proveniente de processos naturais, seja do próprio planeta ou de forças externas, mas também de alterações antrópicas (UNISDR, 2009).

Uma das grandes questões que surgem quando se fala em mudanças climáticas é o porquê de a temperatura estar aumentando e qual é o peso das ações humanas em comparação aos processos naturais nesse aquecimento.

Segundo Nobre, Reid e Veiga (2012), o clima varia de maneira natural e ciclicamente. Podemos perceber esse fato ao avaliar o desenvolvimento da variação climática da Terra nos últimos 800 mil anos, conforme apresentado na figura 1, considerando o presente como o “0” (zero) no eixo horizontal.

Nos últimos 400 mil anos, ocorreram quatro diferentes ciclos, que são chamados de ciclos glaciais e interglaciais. No mais recente pico interglacial, onde nos encontramos hoje, a temperatura está mais alta cerca de 5°C a 6°C em relação ao pico do último período glacial, 20 mil anos atrás. Há 120 mil anos, houve um período interglacial no qual a temperatura média estava um pouco acima da temperatura atual. Dessa forma, pode-se perceber aquecimentos e resfriamentos naturais do planeta, independentemente de fatores antrópicos. A figura 1 mostra a evolução de alguns parâmetros, tais como temperatura, concentração de gases e forçantes radioativas, nos últimos 400 mil anos,

Figura 1: Concentrações de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (ppm) e nível do mar (m) (a); Forçantes Climáticas (W/m<sup>2</sup>) devido a variações de GEE e área de camada de gelo (b); Temperatura (°C) (c).



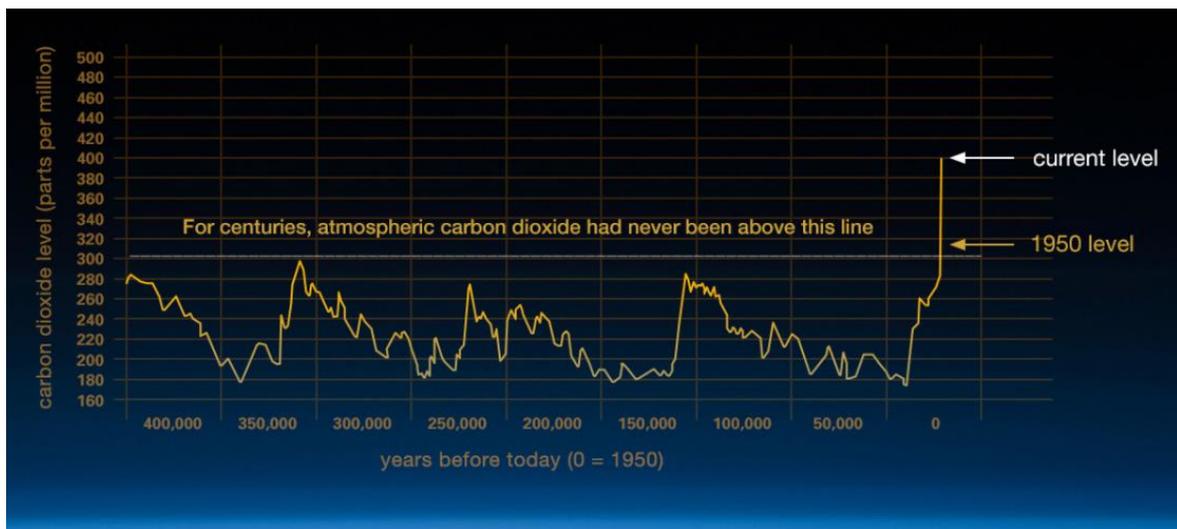
Fonte: Hansen et al. (2008).

Os avanços na ciência e a observação das mudanças de clima estão proporcionando um entendimento mais claro acerca do sistema climático da Terra, evidenciando que o clima é modificado tanto pela ação do homem quanto por fatores naturais. As implicações das mudanças climáticas não dependem apenas do sistema natural da Terra e de forçantes radioativas, mas também de como as pessoas reagem e se adaptam às mudanças de tecnologia, economia, estilo de vida e política (Moss, et al., 2010).

Entretanto, nos últimos 100 a 150 anos, a taxa de aumento de temperatura cresceu significativamente em relação ao que historicamente ocorria, cerca de 50 vezes maior do que o ciclo natural glacial-interglacial. Isto sugere que algo de diferente vem acontecendo para ocasionar esta mudança (NOBRE, REID e VEIGA, 2012). A figura 2 apresenta o

um gráfico da evolução da concentração de CO<sub>2</sub> nos últimos 400 mil anos, indicando ainda o aumento inesperado a partir do ano de 1950.

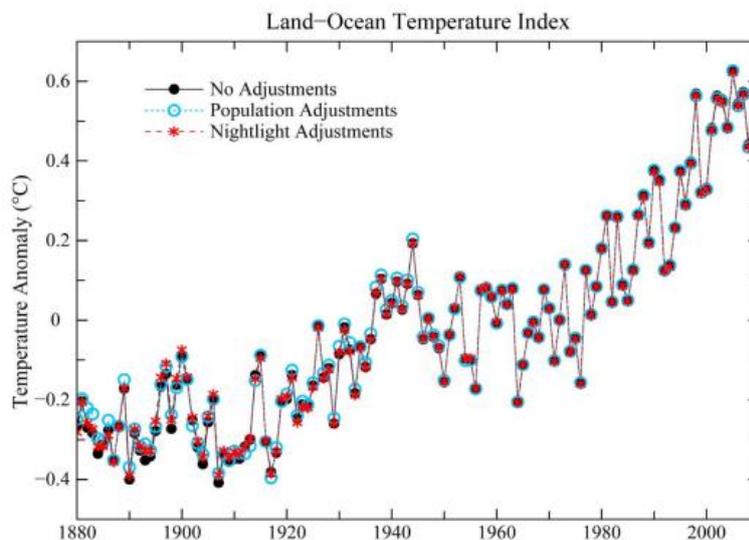
Figura 2: Gráfico da quantidade de CO<sub>2</sub> atmosférico (em ppm) por tempo (em anos). Baseado em comparações de amostras de bolhas de ar aprisionadas em núcleos de gelo.



Fonte: NASA (2018).

A figura 3 apresenta um gráfico de anomalia de temperatura desde 1880 até os dias atuais. Ele ilustra como a variação de temperatura está aumentando com o passar dos anos.

Figura 3: Gráfico de índice de temperatura terra-oceano. Variação de temperatura (em °C) por tempo (em anos), de 1980 até os dias atuais



Fonte: Hansen et al (2010).

Devido às mudanças climáticas, o aumento no volume e intensidade das precipitações podem ocasionar fortes impactos nos corpos hídricos e nos sistemas de drenagem urbana atuais. Dos fatores relacionados a inundações urbanas, além da mudança no clima, pode-se citar também a alternância de climas extremos, uma vez que ambos desempenham um papel de extrema relevância no que se refere a problemas com a água, sua disponibilidade e variabilidade (ESLAMIAN, 2014). Outrossim, em muitos locais, por conta do aumento da temperatura, ocorre uma diminuição na capacidade de retenção de água da atmosfera, gerando chuvas mais intensas (PHILLIP, 2011).

## 2.2 Sistemas Urbanos no contexto de Mudanças Climáticas

Mudanças climáticas futuras podem ter impactos significantes no ciclo da água urbana. Uma das grandes ameaças devido a um possível desequilíbrio climático é o aumento das taxas de precipitação, aumentando o número de áreas de risco de alagamento (ESLAMIAN, 2014).

Sistemas de drenagem urbana são desenvolvidos para suportar eventos de chuva com um determinado período de retorno, por exemplo, 5, 10 ou 25 anos, a depender do local onde

se está projetando o sistema e de como é seu regime de chuvas (PARKINSON e MARK, 2005). Consequentemente, dado um sistema já projetado, os locais que começarem a ser expostos a eventos de chuva mais extremos certamente ficarão subdimensionados e terão sua performance de captação de água reduzida, o que pode causar sérios prejuízos relacionados a alagamentos (SPEIGHT, 2006).

### **2.3 Previsão de Cenários Futuros**

Existem muitas incertezas nas tentativas de prever e antecipar respostas às mudanças climáticas; para tanto, faz-se necessário o uso de cenários futuros, no sentido de explorar as possíveis consequências de diferentes opções de resposta (MOSS et al., 2010).

Cenários socioeconômicos e de emissão de gases são usados largamente em pesquisas climáticas no sentido de fornecer descrições plausíveis de como o futuro pode se apresentar, dado o grande número de variáveis possíveis, como aspectos socioeconômicos, mudanças tecnológicas, exploração de matrizes energéticas, uso do solo, emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos (VAN VUUREN et al., 2011).

A necessidade de novos cenários fez com que o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) solicitasse à comunidade científica o desenvolvimento dos mesmos, para fins de futuras avaliações de clima (IPCC, 2007). O IPCC também decidiu que tais cenários não deveriam ser criados como parte do relatório por eles, deixando isto a cargo da comunidade científica.

#### **2.3.1 *Representative Concentration Pathways (RCPs)***

Assim, foi desenvolvido um conjunto de cenários, considerando emissão e concentração de gases, além de uso do solo. Estes foram chamados de Representative Concentration Pathways (RCPs). Os RCPs projetam os valores de Forçantes Radioativas (RFs) para o futuro (2100), tendo como base as possíveis alterações dos agentes promotores das mudanças climáticas, principalmente o gás carbônico, CO<sub>2</sub> (VAN VUUREN et al., 2011).

Foram selecionados, dentre vários, quatro cenários de mudanças climáticas para o futuro, conforme consta na tabela 1. São eles: RCP 2,6; RCP 4,5; RCP 6 e RCP 8,5. O número associado ao RCP é o valor da RF (SABÓIA, 2016).

Tabela 1: Caracterização dos possíveis cenários RCPs.

Cenário	Descrição	Concentração equivalente de CO <sub>2</sub>
RCP 8,5	Crescimento da RF até 8,5 W/m <sup>2</sup> até 2100.	1370 ppm
RCP 6,0	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 6 W/m <sup>2</sup> .	850 ppm
RCP 4,5	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 4,5 W/m <sup>2</sup> .	650 ppm
RCP 2,6	Antes de 2100, ocorre o pico da RF de 3,0 W/m <sup>2</sup> . Então, ocorre o declínio, até a estabilização de 2,6 W/m <sup>2</sup> em 2100.	490 ppm

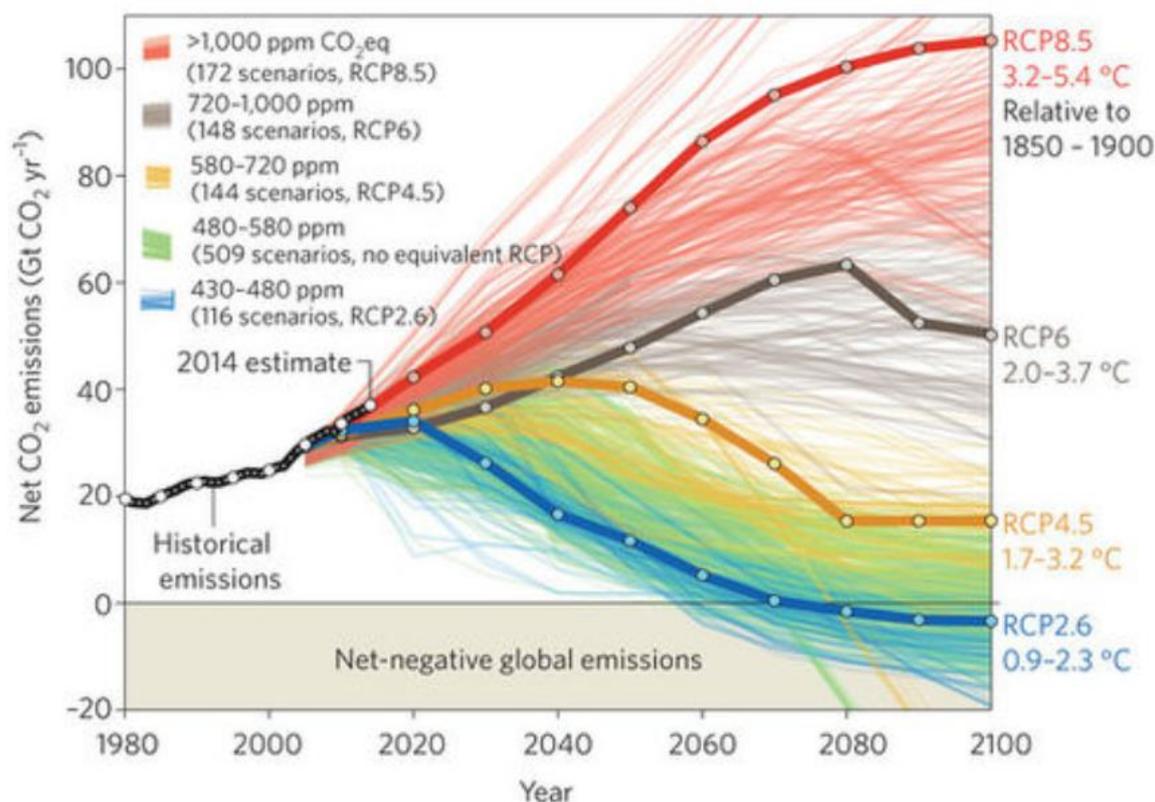
Fonte: Sabóia (2016).

Os quatro RCPs selecionados são considerados representativos, incluindo:

- um cenário de RF baixa (RCP 2,6), considerando que existirão políticas ambientais mais restritivas;
- dois cenários de estabilização média (RCPs 4,5 e 6,0), associados a taxas moderadas de emissão de poluentes e gases estufa e a uma quantidade razoável de políticas ambientais;
- e um cenário mais crítico, com RF alta (RCP 8,5), admitindo que praticamente não serão adotadas medidas sustentáveis (VAN VUUREN et al., 2011).

A figura 4 apresenta diversas projeções de emissões líquidas de CO<sub>2</sub> em relação ao tempo, a partir de 1980 até 2100. Pode-se visualizar como essas projeções se relacionam com os cenários RCP estabelecidos na tabela 1.

Figura 4: Emissões históricas provenientes da queima combustíveis fósseis e indústrias (linha preta) e projeções de emissões (linhas coloridas) de acordo com os cenários RCPs. O gráfico apresenta a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente (em Gt, um bilhão de toneladas) por ano e traz o crescimento na temperatura no final do século XXI (média entre 2081-2100) com relação à média de 1850-1900.



Fonte: Fuss et al (2014).

### 2.3.2 Modelos de Circulação Global (General Circulation Models - GCMs)

Os Modelos de Circulação Global, GCMs, são simulações baseadas em modelos matemáticos hidrodinâmicos, que tem o intuito de recriar os processos químicos e físicos que impulsionam o clima da Terra (NOAA, 2017).

Ao final da década de 60, o Laboratório de Fluidodinâmica Geofísica do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, Administração Oceano-Atmosférica Nacional) desenvolveu o primeiro modelo de circulação de clima geral que combinava processos

oceânicos e atmosféricos. Os cientistas conseguiram entender e testar a interação entre os dois meios, avaliando como isso influenciava o clima global.

Em setembro de 2008, houve uma reunião envolvendo os 20 grupos de pesquisadores que desenvolvem modelos de previsão climática no mundo todo (SABÓIA, 2016). Neste encontro, os pesquisadores decidiram articular um novo conjunto de experimentos de modelos climáticos coordenados. Tais experimentos fazem parte da quinta fase do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project*, Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados), que fomenta um vasto estudo amplo para analisar os mecanismos responsáveis pelas diferenças dos modelos climáticos, examinar a qualidade da previsão climática, averiguar as capacidades de projeção de sistemas em escala de tempo decadais e estabelecer motivos a partir dos quais modelos climáticos semelhantes produzem resultados significativamente diferentes (TAYLOR STOUFFER e MEEHL, 2012).

Há um grande número de GCMs, advindos de diversos centros de pesquisa ao redor do mundo, que podem apresentar os mais variados níveis de precisão. Eles são capazes de prever mudanças na atmosfera causadas pelas substâncias responsáveis pelo aquecimento global, principalmente pelos gases causadores do efeito estufa (SCHARDONG, SRIVASTAV e SIMONOVIC, 2014b).

Os estudos relativos ao CMIP5 disponibilizaram várias projeções de precipitação geradas pelos GCMs, que são capazes de fazer uma simulação dos processos atmosféricos, avaliando as condições climáticas atuais e futuras, incorporando expectativas de mudança na precipitação a partir de alterações no clima (SABÓIA, 2016).

Os GCMs são, hoje, as ferramentas mais indicadas para aferir as respostas do sistema climático global ao aumento da concentração dos gases do efeito estufa (IPCC, 2007).

## 2.4 Chuvas Intensas

### 2.4.1 Equação de Chuvas e Curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

Para diversos estudos hidrológicos, deve-se determinar a chuva de maior intensidade que se pode esperar que ocorra com uma dada frequência. A utilização prática desses dados requer que se estabeleça uma relação analítica entre as grandezas características de uma precipitação, quais sejam a intensidade, a duração e a frequência (STUDART, 2015).

A partir de registros de pluviógrafos, estabelecendo-se para cada duração de chuva as máximas intensidades, obtém-se uma equação de chuva, que se apresenta no seguinte formato:

$$i = \frac{C}{(t + t_0)^n} \quad (2.1)$$

Onde:

$i$  – intensidade da precipitação (mm/h);

$T$  – período de retorno (anos);

$t$  – duração da chuva (min);

$k$ ,  $m$ ,  $t_0$  e  $n$  – parâmetros empíricos específicos de cada localidade.

Entretanto, muitos autores procuram relacionar o parâmetro  $C$  com o período de retorno,  $T_r$ , através de uma equação do tipo:

$$C = k \cdot T^m \quad (2.2)$$

Combinando as equações 2.1 e 2.2, obtém-se:

$$i = \frac{k \cdot T^m}{(t + t_0)^n} \quad (2.3)$$

Para a determinação dos parâmetros da equação 2.3, lançam-se em coordenadas logarítmicas as séries das intensidades médias máximas ( $i$ ) em função do intervalo de

duração,  $t$ , unindo-se os valores com o mesmo período de retorno,  $T$ , obtém-se uma família de curvas paralelas (VILLELA & MATTOS, 1975).

Analisando essas curvas verifica-se que, para cada período de retorno determinado, a intensidade decresce à medida que o intervalo de duração cresce, e que a família de curvas apresenta uma curvatura finita com concavidade voltada para baixo. Daí, marcando-se como abcissas não as durações, mas estas acrescidas de uma constante convenientemente escolhida, consegue-se gerar uma série de pontos que se ligam através de uma reta, aproximadamente. Por meio de tentativas, o valor que, somado à duração,  $t$ , melhor ajustar os pontos segundo uma reta, deve ser tomado como a constante,  $t_0$ .

As curvas intensidade-duração são assim transformadas em retas paralelas, tendo por equação geral:

$$\log i = \log C - n \log(t + t_0) \quad (2.4)$$

Os parâmetros angular,  $n$ , e linear,  $\log C$ , podem ser determinados pelo método dos mínimos quadrados. Observa-se que  $\log C$  varia com o período de retorno,  $T_r$ . Lançando-se os valores desse parâmetro em função de  $T_r$ , em coordenadas logarítmicas, pode-se também determinar os parâmetros  $k$  e  $m$ , através do método dos mínimos quadrados:

$$\log C = \log K + m \log(T_r) \quad (2.5)$$

Uma vez determinados todos os parâmetros, pode-se reescrever a equação de chuva de maneira completa, que representa a relação intensidade-duração-frequência, válida apenas para a região onde se coletaram os dados (VILLELA & MATTOS, 1975).

Entretanto, um cenário de mudanças climáticas causa impacto direto nos eventos de chuvas máximas, o que certamente causará mudanças nas curvas IDF, fazendo com que as mesmas tenham que ser atualizadas (SCHARDONG, SRIVASTAV, & SIMONOVIC, 2014a).

Dessa forma, essas curvas IDF, baseadas em dados históricos observacionais, podem estar subestimando ou superestimando dados pluviométricos utilizados no projeto de obras hidráulicas (HASSANZADEH, NAZEMI e ELSHORBAGY, 2014).

Portanto, é de extrema importância fazer a atualização de curvas IDF baseadas em projeções futuras dos GCMs, com o intuito de antecipar as consequências de possíveis e prováveis mudanças climáticas futuras (SABÓIA, 2016).

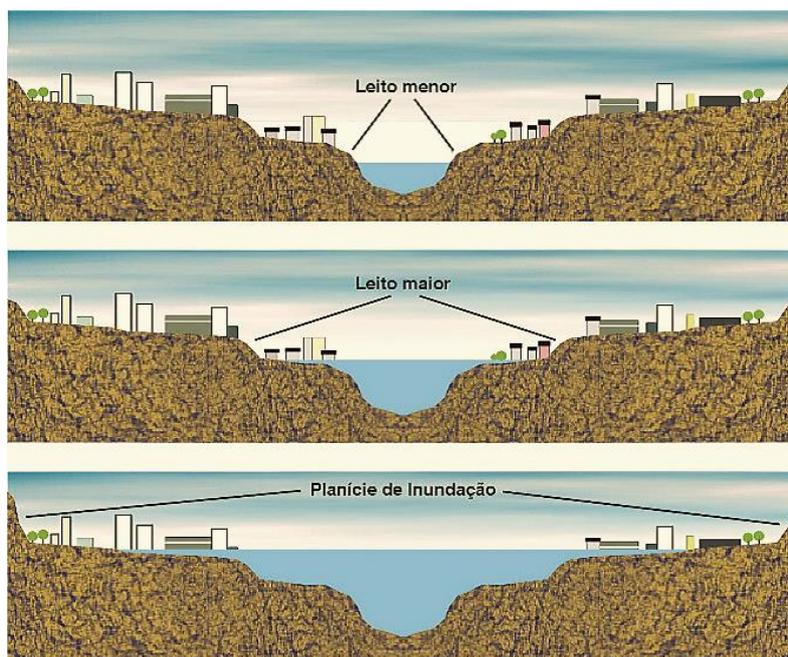
#### **2.4.2 *Enchente x Inundação***

Enchente é a elevação temporária, devido a um acréscimo de descarga, do nível da água normal, de forma que as águas deixam de ser limitadas pela calha principal do rio e extravasam para as áreas laterais. Já a inundação representa o transbordamento das águas de um curso d'água, além do leito maior do rio, atingindo a planície de inundação ou área de várzea. (LICCO e DOWELL, 2015). Podem-se observar, na figura 5, os leitos do rio; na figura 6 são apresentadas as situações normal, de enchente e de inundação, para a calha de um dado rio.

É importante compreender, dessa forma, que as enchentes dos rios são fenômenos naturais, que ocorrem com frequência variável. Sendo assim, o leito maior do rio, quando ocupado, faz com que a enchente, natural, se transforme em inundação, gerando perdas humanas e patrimoniais (MMA, 2018).

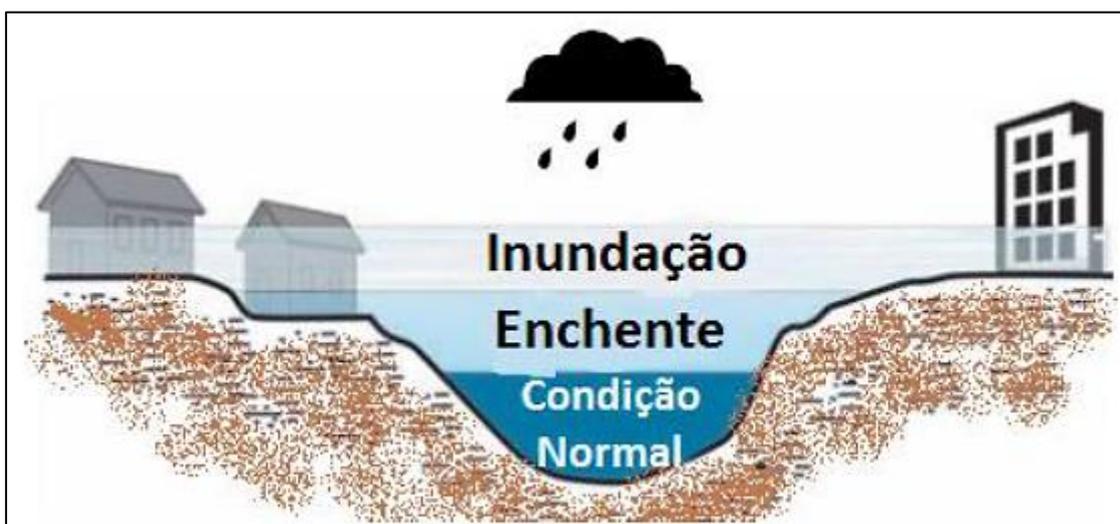
Na busca pela preservação do ciclo hidrológico natural, a partir da redução do escoamento superficial adicional gerado, foi criado, na década de 80, o conceito de LID (*Low-Impact Development*, Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto). O LID consiste no conjunto de estratégias de manejo de águas, principalmente pluviais; através de planejamento multidisciplinar integrado a práticas de tratamento (SOUZA, CRUZ e TUCCI, 2012). Desse modo, privilegiam-se formas de uso e ocupação que contemplem o controle da erosão, permeabilidade do solo, reservação, infiltração e utilização das águas pluviais nos próprios lotes.

Figura 5: Leitões de um rio e planície de inundação.



Fonte: Alves (2014).

Figura 6: Diferentes situações do nível de água da calha de um rio em situações de chuva.



Fonte: IPT (2007).

### ***2.4.3 Danos provenientes de eventos de chuvas intensas***

É pertinente salientar que há diversos impactos negativos advindos das inundações, que são maximizados devido ao processo de urbanização e adensamento, comum em zonas urbanas. Além disso, as características socioeconômicas da comunidade exposta, o padrão de uso e ocupação do solo, a intensidade da precipitação e as características da cheia definem a magnitude dos danos da inundação nas áreas atingidas.

Os danos causados por inundações podem ser classificados como tangíveis e intangíveis, e diretos ou indiretos. Os tangíveis são aqueles passíveis de mensuração em termos monetários, normalmente estimados por meio dos preços de mercado; os intangíveis relacionam-se a bens de difícil quantificação, como o valor da vida humana, bens de valor histórico/arqueológico e/ou de objetos de valor sentimental. Os danos diretos são aqueles que resultam do contato físico de bens e pessoas com a água de inundação; os indiretos são, por sua vez, decorrentes dos danos diretos, como interrupções e perturbações das atividades sociais e econômicas (CANÇADO, 2009). A tabela 2 exemplifica os tipos de danos citados.

Tabela 2: Principais danos decorrentes de inundações em áreas urbanas.

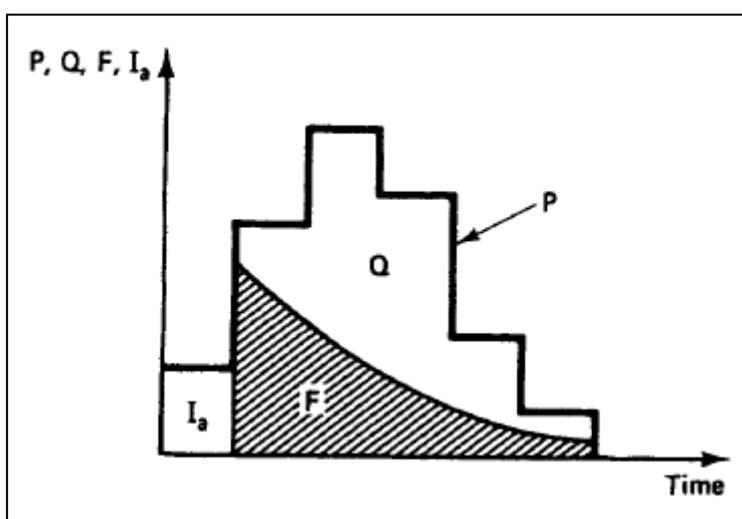
<b>Danos Diretos</b>	<b>Danos Indiretos</b>
Danos físicos aos domicílios: construção e conteúdo das residências.	Custos de limpeza, alojamento e medicamentos. Realocação do tempo e dos gastos na reconstrução. Perda de renda.
Danos físicos ao comércio e serviços: construção e conteúdo (mobiliário, estoques, mercadorias em exposição, etc.).	Lucros cessantes, perda de informações e base de dados. Custos adicionais de criação de novas rotinas operacionais pelas empresas. Efeitos multiplicadores dos danos nos setores econômicos interconectados.
<b>Danos Tangíveis</b>	
Danos físicos aos equipamentos e plantas industriais.	Interrupção da produção, perda de produção, receita e, quando for o caso, de exportação. Efeitos multiplicadores dos danos nos setores econômicos interconectados.
Danos físicos à infraestrutura	Perturbações, paralisações e congestionamento nos serviços, custos adicionais de transporte, efeitos multiplicadores dos danos sobre outras áreas.
<b>Danos Intangíveis</b>	
Ferimentos e perda de vida humana.	Estados psicológicos de stress e ansiedade.
Doenças pelo contato com a água, como resfriados e infecções.	Danos de longo prazo à saúde.
Perda de objetos de valor sentimental.	Falta de motivação para o trabalho.
Perda de patrimônio histórico ou cultural.	Inconvenientes de interrupção e perturbações nas atividades econômicas, meios de transporte e comunicação.
Perda de animais de estimação.	Perturbação no cotidiano dos moradores.

Fonte: Cançado (2009).

## 2.5 Cálculo de Precipitação Efetiva pelo método SCS-CN

Uma das maneiras mais conhecidas e utilizadas para determinar um hietograma de projeto, calculando a precipitação efetiva a partir da precipitação total em um dado local, é através do uso do método do Soil Conservation Service (1985). Neste modelo, a precipitação total (P) é separada em três componentes: escoamento direto (Q), infiltração real (F) e abstração inicial ( $I_a$ ). Isso é mostrado esquematicamente na figura 7. Note-se que o escoamento direto é equivalente à precipitação efetiva, isto é, a parcela de água precipitada que se transforma em escoamento.

Figura 7: Separação da precipitação total em escoamento direto, retenção real e abstração inicial.



Fonte: McCuen (1998).

Sendo assim, conceitualmente, assume-se uma relação entre P, Q,  $I_a$  e F:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (2.6)$$

Onde S é a retenção potencial máxima.

A retenção,  $S$ , pode ser considerada uma função de cinco fatores: uso da terra, interceptação, infiltração, armazenamento em depressões e umidade antecedente. Da mesma forma, a abstração inicial,  $I_a$ , também depende desses elementos do ciclo hidrológico. Evidências empíricas indicaram que esses dois componentes estão relacionados pela seguinte equação (MCCUEN, 1998):

$$I_a = 0,2 S \quad (2.7)$$

Tem-se, ainda, que a infiltração é a precipitação total, descontando-se as abstrações iniciais e o escoamento direto, de forma que:

$$F = (P - I_a) - Q \quad (2.8)$$

Sendo assim, substituindo as equações 2.7 e 2.8 na equação 2.6, vem:

$$\begin{aligned} \frac{(P - 0,2 S) - Q}{S} &= \frac{Q}{P - 0,2 S} \\ Q S &= (P - 0,2 S)^2 - Q (P - 0,2 S) \\ Q S + Q (P - 0,2 S) &= (P - 0,2 S)^2 \\ Q(P + 0,8 S) &= (P - 0,2 S)^2 \\ Q &= \frac{(P - 0,2 S)^2}{(P + 0,8 S)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

É válido notar que  $Q$  e  $P$  têm a mesma unidade e podem ser entendidos como um volume de água. Além disso, uma vez consideradas as abstrações iniciais como  $I_a = 0,2 S$ , fica evidente que, para a equação acima ser válida, a precipitação total tem que ser maior que  $0,2 S$ , ou seja:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - 0,2 S)^2}{(P + 0,8 S)}, & \text{se } P \geq 0,2 S \\ 0, & \text{se } P < 0,2 S \end{cases} \quad (2.10)$$

Para tanto, é necessário fazer a estimativa do valor de S. Nesse contexto, o SCS (1985) define o parâmetro número de curva (*curve number*), CN, que depende do tipo de solo, condições de uso e ocupação do solo e da umidade antecedente. São discriminados quatro grupos hidrológicos de solos e três condições de umidade antecedente do solo:

- Grupo A – Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas, e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
  - Grupo B – Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que a camada superior.
  - Grupo C – Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2 m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
  - Grupo D – Solos argilosos (30 – 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável, ou horizonte de seixos rolados.
- 
- CONDIÇÃO I – Solos secos – As chuvas, nos últimos cinco dias, não ultrapassaram 15 mm.
  - CONDIÇÃO II – Situação média na época das cheias – As chuvas, nos últimos cinco dias, totalizaram de 15 a 40 mm.
  - CONDIÇÃO III – Solo úmido (próximo da saturação) - As chuvas, nos últimos cinco dias, foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

Conforme os manuais do SCS (1985), o parâmetro curva-número, CN, é uma transformação de S (com S em mm):

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \quad (2.11)$$

Em termos práticos, utiliza-se o contrário, sendo a retenção S calculada com base nos valores de CN determinados para a área específica em estudo (SINGH et al., 2008), de tal sorte que:

$$\begin{aligned} CN &= \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \\ CN &= \frac{25400}{254 + S} \\ 254 + S &= \frac{25400}{CN} \\ S &= \frac{25400}{CN} - 254 \end{aligned} \quad (2.12)$$

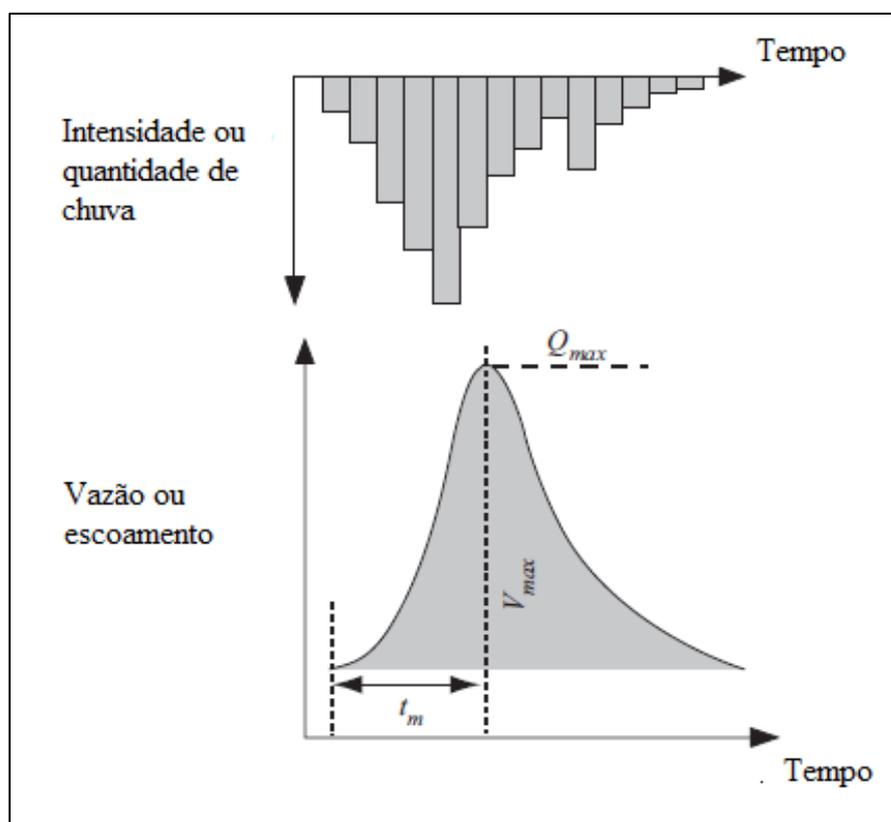
O modelo SCS-CN é um modelo usado para simular o escoamento da chuva com base na precipitação, isto é, existem um valor de entrada de precipitação e um valor de saída de escoamento. O modelo não leva em consideração o tempo, o gradiente de declividade na bacia, a variação espacial e temporal da infiltração. Além disso, a divisão de solos em grupos hidráulicos é, de certo modo, grosseira e a definição de umidade antecedente condição não é quantitativa (XIAO et al., 2011). Essas desvantagens do modelo SCS-CN excluem sua aplicação para algumas finalidades, mas por outro lado garantem a simplicidade do modelo e uma boa estimativa do escoamento superficial (PONCE e HAWKINGS, 1996).

## 2.6 Hidrograma

### 2.6.1 Conceito e definição

A análise do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica geralmente se dá através do estudo da resposta hidrológica do sistema a um impulso, que é a precipitação (MUSY e HIGY, 2011). Essa resposta é medida pela observação da quantidade de água que escoar, seja direta ou indiretamente. De maneira simples, uma dada chuva gera um vazão de escoamento ao longo da bacia, como mostra a figura 8. O gráfico da vazão ou das variações de vazão com relação ao tempo é o que chamamos de hidrograma (WILKEN, 1978).

Figura 8: Relação da intensidade da chuva com a vazão gerada.

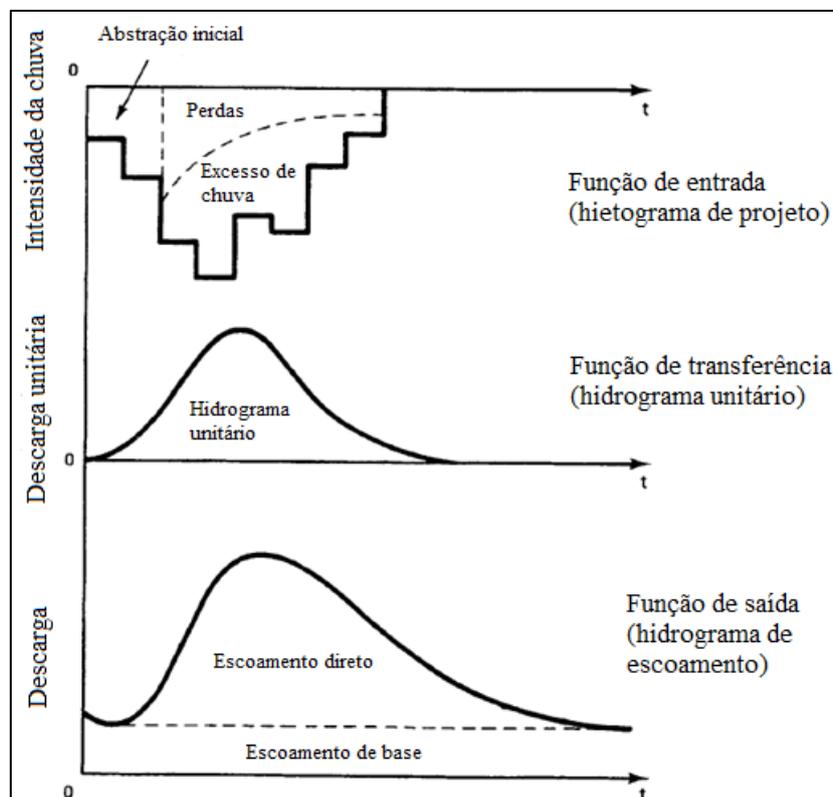


Fonte: Musy e Higy (2011).

Segundo McCuen (1998), pode-se fazer a análise conceitual de um hidrograma da seguinte maneira: separação do hietograma de chuva em três partes, separação do

hidrograma em duas partes, identificação do hidrograma unitário como uma função de transferência. A figura 9 ilustra estes conceitos.

Figura 9: Processo chuva-deflúvio.



Fonte: Adaptado de McCuen (1998).

Assim, o hietograma é composto de: abstrações iniciais (*initial abstraction*), que são as perdas antes do início do escoamento direto; o excesso de chuva (*rainfall excess*) é a fração da precipitação que é convertida em escoamento direto; e as perdas (*losses*), que é a fração da precipitação que se perde depois do início do escoamento direto.

O hidrograma de escoamento, por sua vez, divide-se em: escoamento direto (*direct runoff*), relacionado com o excesso de chuva; e escoamento de base (*baseflow*), resultante de um acúmulo de água na bacia, que pode ser da chuva em análise ou de chuvas anteriores, de forma que pode existir mesmo que a chuva atual ainda não tenha ocorrido.

Por fim, a função de transferência (*transfer function*) ou hidrograma unitário (*unit hydrograph*) é uma função que transforma o excesso de chuva em escoamento direto.

### 2.6.2 Hidrograma Unitário

Proposto originalmente por Sherman (1932), o desenvolvimento do conceito de hidrograma unitário (HU) facilitou o estudo da hidrologia, pois se apresentou como uma ferramenta de fácil utilização para a transformação da chuva em vazão. Sua versatilidade encontra-se em suposições simplificadas de que a bacia hidrográfica se comporta como um sistema linear, de forma que as chuvas complexas são divididas em chuvas simples. Assim, conhecendo-se os hidrogramas resultantes das chuvas simples, determina-se o hidrograma da chuva complexa total através da superposição de efeitos (TUCCI, 1993).

### 2.6.3 Hidrograma Unitário do SCS

O hidrograma unitário do SCS é um tipo de hidrograma unitário sintético no qual a vazão se expressa por uma relação entre a vazão total,  $q$ , e a vazão de pico,  $q_p$ , e o tempo se expressa por uma relação entre o tempo de duração da chuva,  $t$ , e o tempo de ocorrência do pico no hidrograma unitário,  $t_p$ .

Com base na revisão de um grande número de hidrogramas unitários (SCS, 1985), sugere-se que o tempo de recessão,  $t_r$ , do hidrograma seja aproximado como 67% maior que o tempo de pico,  $t_p$ .

$$t_r = 1,67 t_p \quad (2.13)$$

Isso é o mesmo que dizer que, neste tipo de hidrograma, considera-se que 37,5% do volume total de escoamento se dá antes da vazão de pico, quer dizer:

$$t_p = 37,5\% \text{ de } t_b$$

$$t_p = 0,375 t_b \quad (2.14)$$

Onde  $t_b$  é o tempo de base, que é a soma do tempo de pico com o tempo de recessão do hidrograma. Assim, a partir da equação 2.14, temos:

$$\begin{aligned}
 t_p &= 0,375 t_b \\
 t_p &= 0,375 (t_p + t_r) \\
 2,67 t_p &= t_p + t_r \\
 t_r &= 1,67 t_p
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Além disso, outro estudo (SCS, 1985) de diversos hidrogramas unitários de muitas bacias rurais grandes e pequenas indica que o tempo de retardo (lag time),  $t_{lag}$ , pode ser aproximado como 60% do tempo de concentração,  $t_c$ , da bacia.

$$t_{lag} = 0,6 t_c \tag{2.16}$$

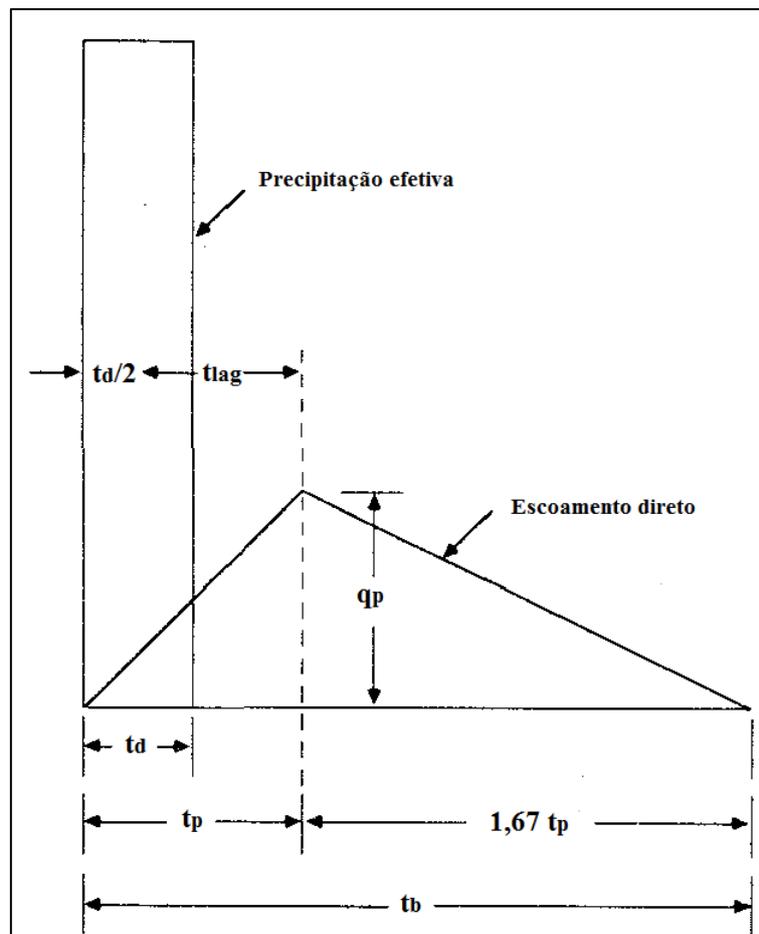
Recomenda-se também adotar o tempo de duração da precipitação efetiva,  $t_d$ , como 20% do tempo de concentração da bacia.

$$t_d = 0,2 t_c \tag{2.17}$$

Também, pode-se verificar, na figura 10, a seguinte relação:

$$t_p = 0,5 t_d + t_{lag} \tag{2.18}$$

Figura 10: Esquema de um Hidrograma Unitário Triangular do método do SCS.



Fonte: Adaptado de Chow, Maidment e Mays (1994).

O volume total abaixo do hidrograma triangular unitário equivale à precipitação efetiva e é calculado da seguinte forma:

$$Q = \frac{q_p t_b}{2}$$

$$q_p = \frac{2 Q}{t_b}$$

$$q_p = \frac{2 Q}{2,67 t_p} \quad (2.19)$$

Sendo  $Q$  em milímetros (mm) e  $t_b$  em horas (h). Assim, a vazão de pico é dada em mm/h.

Tome-se a equação 2.19 e considere a precipitação efetiva,  $Q = 1 \text{ mm}$ . Convertendo a vazão de pico de  $\text{mm/h}$  para  $\text{m}^3/\text{s}$ , adicionando para isso a área da bacia hidrográfica,  $A$ , em  $\text{km}^2$ , finalmente tem-se:

$$q_p = \frac{2 (1 \text{ mm}) (A \text{ km}^2)}{2,67 (t_p \text{ h})} \frac{10^{-3} \text{ m}}{1 \text{ mm}} \frac{10^6 \text{ m}^2}{\text{km}^2} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$q_p = \frac{0,208 A}{t_p} \quad (2.20)$$

Onde:

$q_p$ : vazão de pico ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$A$ : área de bacia ( $\text{km}^2$ );

$t_p$ : tempo de pico (h).

Essa é a equação base para a determinação do hidrograma triangular unitário.

Para determinar o gráfico da vazão em relação ao tempo, faz-se uso de duas relações. A primeira representa uma função linear crescente, do ponto  $(0,0)$  ao ponto  $(t_p, q_p)$ .; a segunda representa uma função linear decrescente, do ponto  $(t_p, q_p)$  ao ponto  $(t_b, 0)$ .

Desta maneira, a primeira função vale:

$$\frac{q_p - 0}{t_p - 0} = \frac{q - 0}{t - 0}$$

$$\frac{q_p}{t_p} = \frac{q}{t}$$

$$q = \frac{q_p}{t_p} t \quad (2.21)$$

Analogamente, a segunda função vale:

$$\frac{0 - q_p}{t_b - t_p} = \frac{0 - q}{t_b - t}$$

$$\begin{aligned}\frac{q_p}{t_b - t_p} &= \frac{q}{t_b - t} \\ \frac{q_p}{t_b - t_p} (t_b - t) &= q \\ q &= \frac{q_p}{t_b - t_p} t_b - \frac{q_p}{t_b - t_p} t\end{aligned}\tag{2.22}$$

## 2.7 Dragagem

### 2.7.1 Conceito e definição

A dragagem consiste na escavação subaquática e retirada de sedimentos e pedras para o alargamento de canais em rios, portos e baías, garantindo melhoria nas condições de escoamento e também na navegabilidade de navios e barcos com segurança. Também se realiza o processo de dragagem na construção de diques e preparação para pontes. Em outros casos, como citam Goes Filho (2004) e Ferreira (2016), ela é utilizada para a remediação, com o propósito de limpar e recuperar áreas que tenham sedimentos contaminados e exploração mineral, diamantes e recursos marinhos de valor comercial tais como alguns tipos de moluscos.

A dragagem também pode ser definida como um processo de realocação de sedimentos e solos com objetivo de construção, aprofundamento e manutenção de vias aquáticas, de infraestrutura de transporte, de aterros e de recuperação de solos (GOES FILHO, 2004).

A dragagem, realizada para a limpeza, desobstrução, remoção, derrocamento ou escavação de material do fundo de rios, lagos, mares, baías e canais, removendo rochas e sedimentos, para lançamento em local de despejo (CASTRO e ALMEIDA, 2012) é uma necessidade não somente para implantação, aprofundamento ou manutenção, mas também para a remediação, que tem como propósito limpar e recuperar áreas com sedimentos contaminados (GOES FILHO, 2004), que, no entanto, gera conflitos.

Desde seu início, e durante séculos, os resíduos de dragagem foram dispostos de forma aleatória, muitas vezes em áreas em que prejudicavam seriamente o meio ambiente, sem que houvesse maiores questionamentos a respeito. A preocupação com a gestão adequada do material dragado só passou a aparecer, realmente, a partir dos últimos 30 anos. Configurando essa tendência, a Conferência de Estocolmo, realizada em 1972, deu

origem às regulamentações internacionais de depósito dos materiais dragados em áreas marítimas.

### ***2.7.2 Projeto de Dragagem do rio Maranguapinho***

O estudo realizado nesta dissertação tomou como base o Projeto Básico de Dragagem no rio Maranguapinho (FUNASA, 2008a), elaborado no âmbito do Plano de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Fortaleza, PSARMF. O projeto de dragagem do rio Maranguapinho deve ser considerado como uma obra complementar à construção da Barragem Maracanaú, necessária para o Manejo de Águas Pluviais na bacia hidrográfica do mesmo rio. O objetivo principal foi minimizar os efeitos adversos das enchentes do rio que afetavam diretamente mais de 12.000 famílias que habitavam suas margens e áreas de entorno.

O rio Maranguapinho apresentava uma calha fluvial bastante assoreada pelo transporte de sedimentos oriundo das erosões que ocorriam e ocorrem naturalmente ao longo de sua bacia hidrográfica e planície de inundação. O rio sofria intensamente, principalmente no seu médio curso, com a exploração da atividade mineradora clandestina. A retirada de areia para fins de construção civil era feita de forma predatória, com desbancamento do leito do rio atingindo extensas áreas.

Além disso, é importante lembrar que o transporte de sedimentos é realizado pelo fluxo natural do rio Maranguapinho, que existe essencialmente durante a quadra invernososa. Durante a época da estiagem, devido à inexistência de fluxo de base permanente, não ocorre transporte de sedimentos ao longo do rio de maneira considerável.

A principal justificativa ao projeto de dragagem do rio Maranguapinho, conforme já mencionado, consistiu na redução da faixa de inundação durante os episódios de cheia. A ideia básica era de aumentar a capacidade do rio de transporte de vazão de água, para evento de chuvas intensas, reduzindo o nível máximo de água e evitando o transbordamento da calha natural do rio.

## **2.8 Barragem**

### **2.8.1 Conceito e definição**

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2002), uma barragem é uma estrutura construída transversalmente a um rio ou talvegue com a finalidade de obter a elevação do seu nível d' água ou de criar um reservatório de acumulação. Similarmente, a Comissão Internacional de Grandes Barragens (2008) define que uma barragem é uma barreira ou estrutura que cruza córregos, rios ou canais para confinar e assim controlar o fluxo da água. Elas podem variar em tamanho: de pequenos maciços de terra a enormes estruturas de concreto, a depender de sua finalidade.

Segundo Silva (2017), há vários séculos as barragens proporcionam vários benefícios à sociedade com seus diversos usos, sendo essenciais para o desenvolvimento da economia de um país. Podem-se construir barragens para abastecimento de cidades, irrigação, produção de energia elétrica, controle de cheias, recreação, defesa de incêndios, navegação fluvial e, também, para fins múltiplos (VELOSA, 2009). Usualmente, sua construção requer a realocação de vilas, casas, fazendas, estradas, ferrovias e serviços públicos, da área a ser inundada pelo barramento para áreas de elevação maior, acima do nível do reservatório, ou a jusante do mesmo.

As barragens são concebidas, projetadas, construídas e operadas tendo como principal objetivo o aproveitamento e a gestão dos recursos hídricos, que se constitui em um problema da maior importância neste século XXI. Para tanto, por força cada vez mais crescente da sociedade, do estabelecimento de legislações e normas, estas obras têm de funcionar com segurança e com uma condição de risco mínimo (FONTENELLE, 2007).

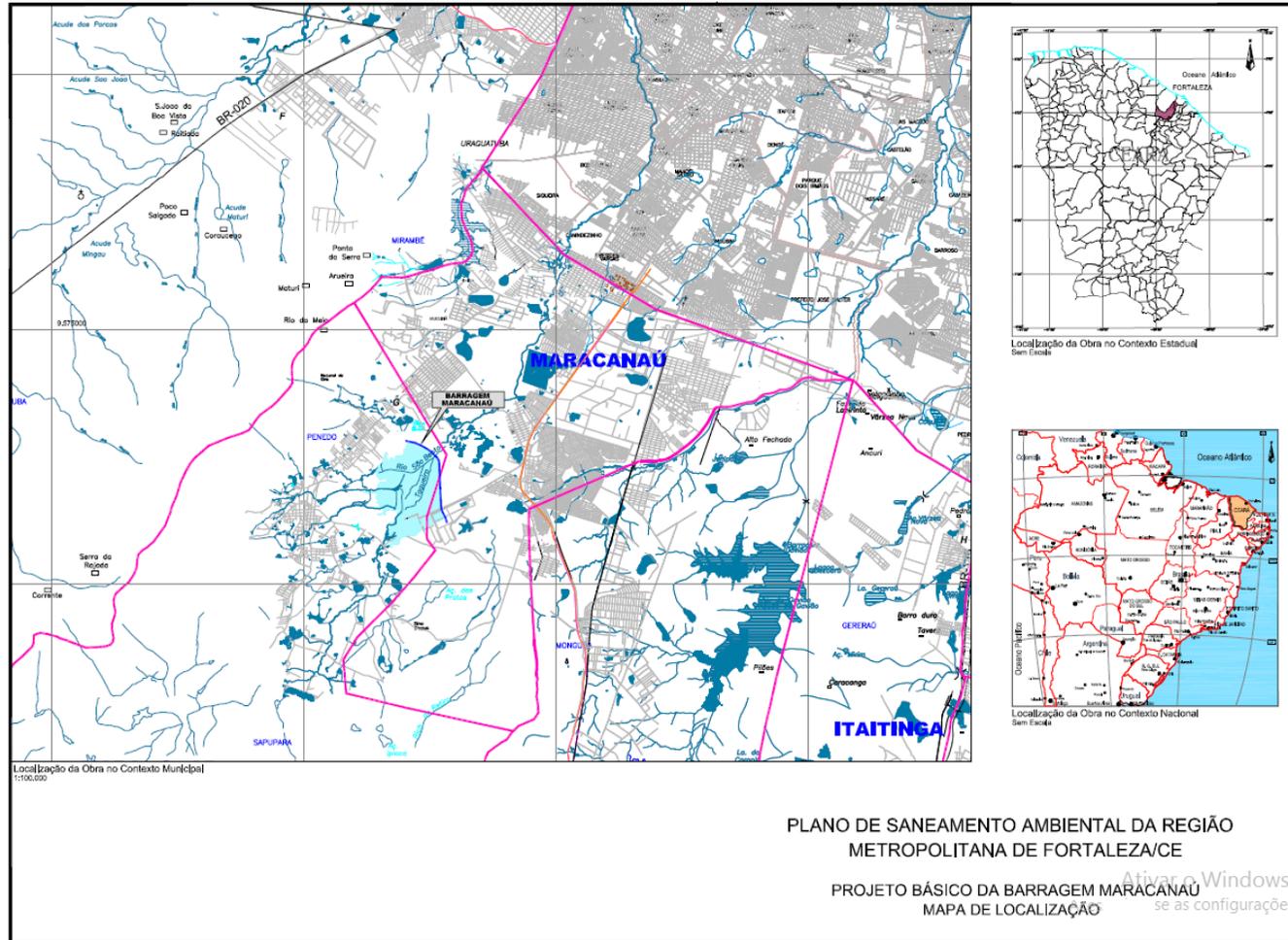
### **2.8.2 Projeto da Barragem Maracanaú**

O projeto da barragem Maracanaú é relativo aos estudos realizados pela Funasa (2008b), no âmbito do Plano de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Fortaleza (PSARMF), realizado em 2008. A finalidade da construção da Barragem Maracanaú é a contenção das cheias do rio Maranguapinho e, conseqüentemente, minoração dos impactos das inundações nas comunidades ribeirinhas, que são constantemente desabrigadas nos períodos chuvosos. Para a locação do reservatório de magnitude

necessária, foi estudado um trecho do rio Maranguapinho, situado em zona de menor ocupação urbana, preferencialmente a montante do Anel Viário e da CE-251, sendo esta última a ligação entre a CE- 065 e a CE-060, passando pela cidade de Maracanaú. O reservatório deveria controlar uma área significativa da bacia e, portanto, não poderia ser situado muito próximo das nascentes, além de preservar a infraestrutura viária existente, representada pela CE-251, CE- 065, e via de contorno de Maranguape. A figura 11 mostra a localização da barragem construída, no contexto local, estadual e nacional. O ponto de cruzamento do eixo da barragem com o rio Maranguapinho apresenta as coordenadas E 538.940 e N 9.571.305 Para a escolha deste local, foi analisado, dentro da expectativa volumétrica do reservatório, se as águas do reservatório atingiriam os bairros periféricos da zona urbana da cidade de Maranguape e o aterro sanitário de Maracanaú, concluindo-se que ambos os aspectos seriam preservados.

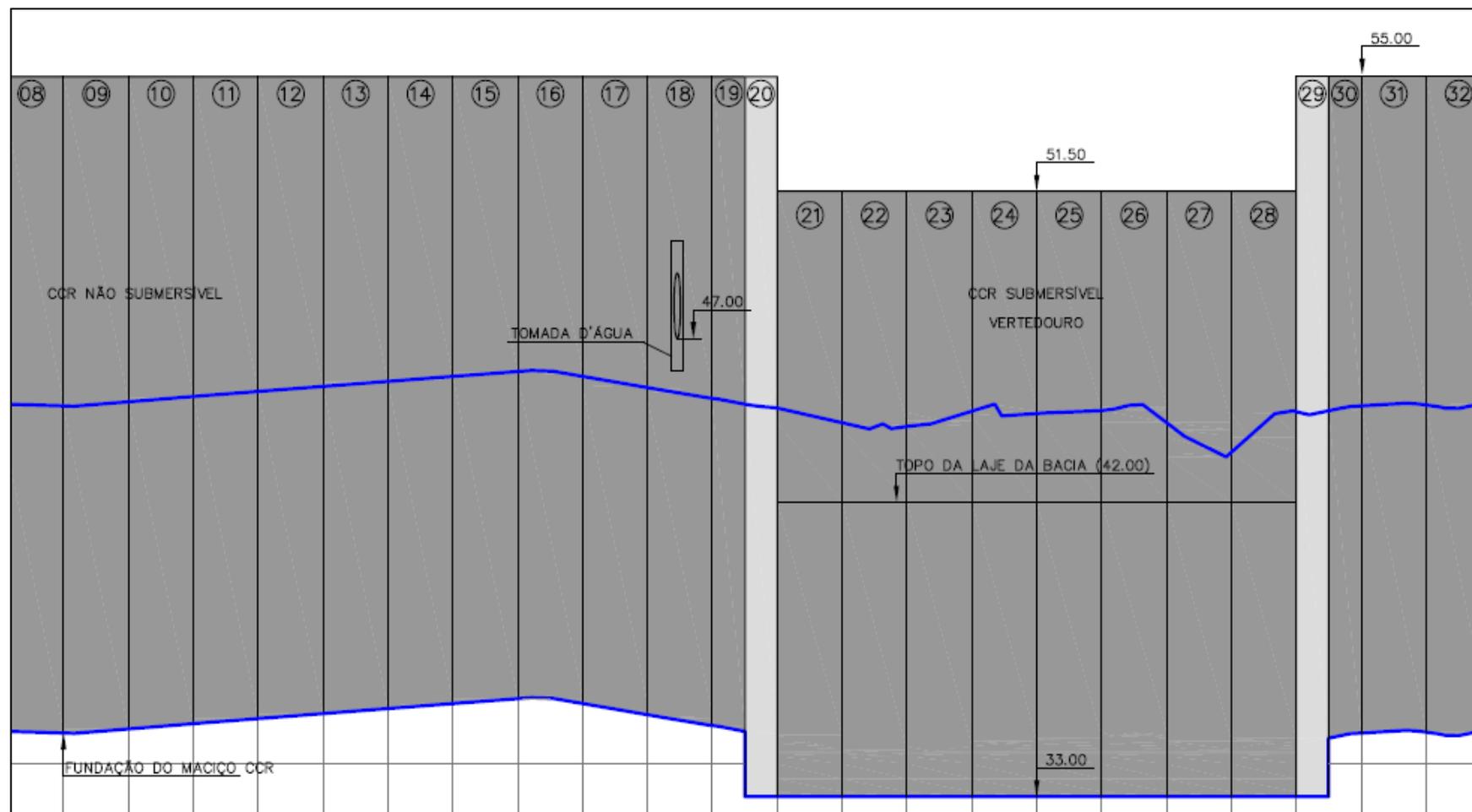
A figura 12, logo em seguida, apresenta o perfil longitudinal pelo eixo da barragem, na seção principal, construída em CCR, onde se localiza o vertedouro. A figura 13, por sua vez, mostra um corte transversal na mesma região.

Figura 11: Mapa de localização da Barragem Maracanaú.



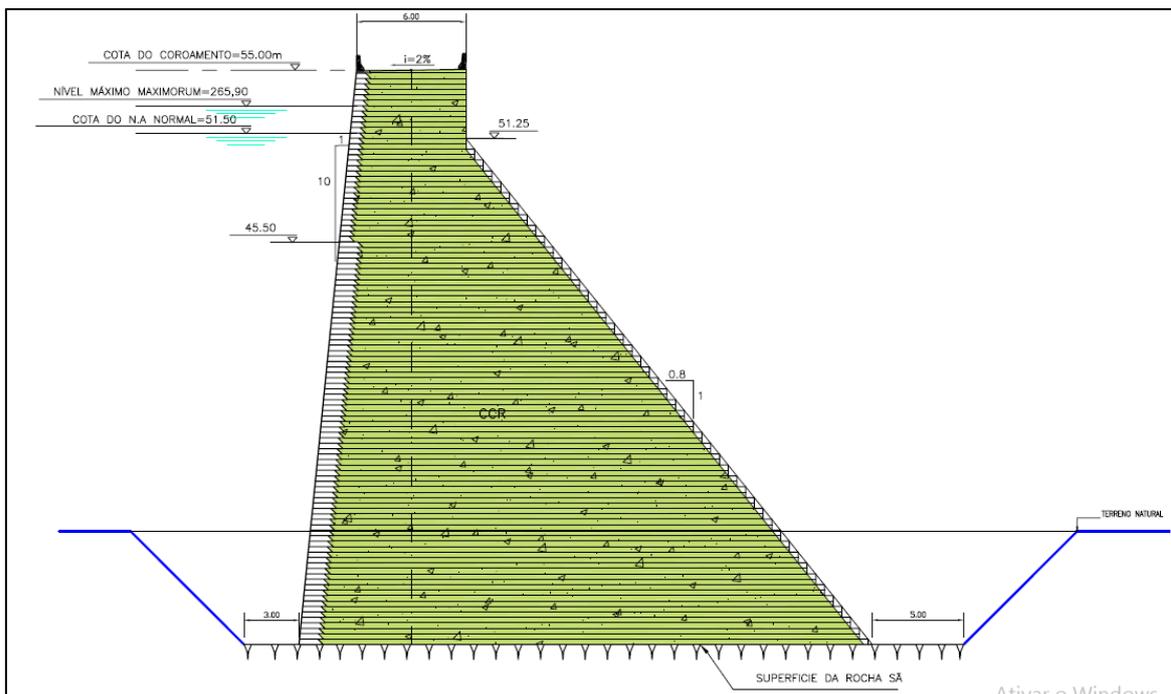
Fonte: Funasa (2008b).

Figura 12: Perfil longitudinal do eixo da barragem, na região do vertedouro.



Fonte: Funasa (2008b).

Figura 13: Corte transversal da barragem, na região do vertedouro.



Fonte: Funasa (2008b).

## 2.9 Modelagem e Simulação

### 2.9.1 Conceitos

Um modelo pode ser definido como um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou sobre o comportamento de um sistema físico, e através do qual se procura explicar ou prever, mediante conceitos científicos, as propriedades de um sistema (CAMPOS, 2009).

Para Lima (2011) a modelagem é definida como uma série de procedimentos que objetivam representar a realidade de forma mais simples. Ela surge da percepção dos fenômenos naturais pelo homem, que busca compreendê-los, a fim de interferir ou não no seu processo.

Por sua vez, a simulação de um sistema, segundo Campos (2009), consiste em avaliar qual teria sido seu comportamento, se determinados impulsos tivessem ocorrido e se determinadas regras de operação tivessem sido obedecidas. Em outras palavras, o autor explica o termo simulação como a descrição do comportamento de um sistema em comparação com outros sistemas. Outros autores, como Bazzo e Pereira (2013),

descrevem a simulação como o processo de análise de um protótipo, ou seja, o primeiro exemplar de um produto, que vai sendo testado e aprimorado, submetido a ambientes físicos reais.

Assim, compreende-se que a previsão de fenômenos naturais é de suma importância, visto que por vezes seus efeitos adversos podem gerar grandes impactos sociais e econômicos. Frente a isso, a modelagem numérica se apresenta como uma das possíveis ferramentas com grande potencial para se estudar, mensurar e minimizar os impactos causados pela variação no volume pluviométrico precipitado e conseqüentemente do volume escoado superficialmente (SANTOS, 2016).

Nesse contexto, por volta da década de 50, começa a nascer a modelagem hidrológica, inicialmente baseada em equações do tipo chuva-vazão, que tentavam prever os efeitos da precipitação sobre uma bacia (TUCCI, 2005). Com o passar do tempo, além do aumento do potencial tecnológico, surgiram novos entendimentos sobre a importância da gestão de recursos hídricos, e assim novas agências e institutos de pesquisas começaram a criar e aprimorar modelos para simular de forma cada vez mais precisa os processos hidrológicos.

### **2.9.2 HEC-HMS**

Desenvolvido pelo USACE, o HEC-HMS é um software que desenvolve modelos computacionais para simular processos hidrológicos. Ele é considerado referência mundial para estudos e projetos neste tema, pois é gratuito, possui uma fácil operacionalidade, além de apresentar uma grande quantidade de métodos e parâmetros na formulação de modelos, o que garante um excelente detalhamento das características existentes em uma bacia hidrográfica (USACE, 2015).

No processamento do HEC-HMS, inicialmente, são inseridos os dados físicos da bacia e os dados hidrológicos, que são distribuídos logicamente dentro dos componentes estruturais do programa, como gerenciador de modelo de bacia, gerenciador de modelo meteorológico, gerenciador de especificações de controle, gerenciador de dados de séries temporais, gerenciador de dados em pares e gerenciador de dados em grade, conforme explica Campos (2009). Também são selecionados os métodos para o cálculo das perdas, transformação chuva-vazão, composição do escoamento de base, propagação em rios,

dentre outros, considerando-se os parâmetros envolvidos em cada um deles, como a área, o tempo de concentração, tempo de resposta, rugosidade, etc. (SANTOS, 2016)

Assim, o HEC-HMS pode ser utilizado em diversas situações, sendo aplicável a grandes e pequenas bacias hidrográficas. Os resultados produzidos pelo modelo podem ser adotados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de vazões, impactos da urbanização, projetos de reservatórios, redução das perdas associadas a inundações, planejamento de sistemas de previsão e alerta, entre outras aplicações.

### **2.9.3 HEC-RAS**

O software HEC-RAS, também desenvolvido pelo USACE, constitui uma importante ferramenta utilizada para a modelagem hidráulica unidimensional de canais, considerando regime permanente ou não permanente. O modelo permite a simulação dos perfis de nível d'água de seções transversais de um curso de rio e pode ser aplicado para: avaliar diversas singularidades, tais como ressaltos hidráulicos, expansões e contrações do fluxo, confluências de rios e estuários; efeito de estruturas hidráulicas como pontes, bueiros e galerias; e delimitar as áreas de inundação de rios (USACE, 2016a).

A modelagem de inundações no ambiente urbano por vezes pode ser considerada uma tarefa difícil, devido a diversos fatores, como a presença de muitos obstáculos, o armazenamento de água nos edifícios ou a complexidade da geometria da cidade. No entanto, Mignot, Paquier e Haider (2006) enfatizam que, se a intensidade da chuva é suficientemente forte e o domínio é uma zona urbana densa, pode-se assumir que a maior parte do escoamento ocorre pelas ruas e junções.

O mapeamento das zonas inundáveis de um rio, associado a diferentes chuvas de projeto, tem grande importância no planejamento urbano e na gestão de bacias hidrográficas. Além de identificar as futuras áreas sujeitas a inundações, os mapas também são úteis em operações de salvamento e socorro relacionados com as inundações (PASSAMANI, 2016).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Análise dos dados iniciais do Projeto de Dragagem do rio Maranguapinho

##### 3.1.1 Esquema do Modelo da Bacia

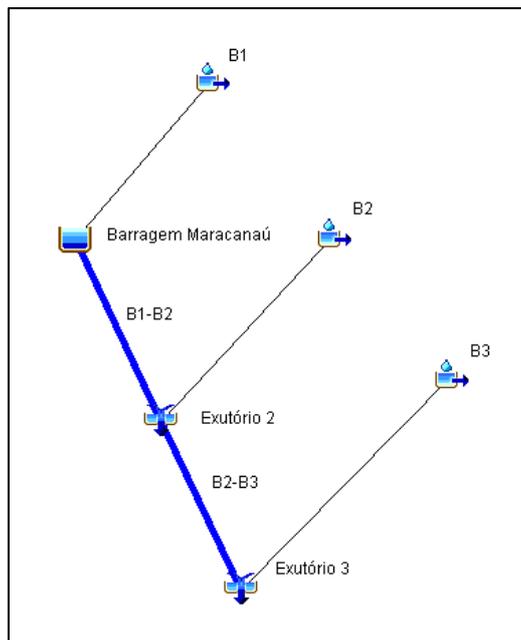
Tendo como base o Projeto de Dragagem do rio Maranguapinho (2008a), o ponto inicial da modelagem hidrológica foi dividir a bacia hidrográfica principal, de maneira a determinar sub-bacias de contribuição para a vazão do rio. Assim, decidiu-se por adotar três locais estratégicos como exutórios das sub-bacias, determinando assim três sub-bacias. Avaliou-se que um número maior de sub-bacias poderia distorcer os hidrogramas de propagação e complicar a modelagem como um todo, sem ganhos relevantes para a análise pretendida.

Assim, os três exutórios de controle foram determinados:

- Sub-bacia B1 (Açude Maracanaú): área de 117,738 km<sup>2</sup> e tempo de concentração de 2,72 horas (163,2 min);
- *Sub-bacia B2 (Bairro do Canindezinho)*: área de 35,006 km<sup>2</sup> e tempo de concentração de 4,38 horas (262,8 min) em função da baixa declividade dos terrenos da bacia;
- *Sub-bacia B3 (Antônio Bezerra a montante da avenida Mister Hull)*: área de 41,146 km<sup>2</sup> e tempo de concentração de 4 horas (240 min).

Em seguida, foi montado o esquema hidrológico da bacia no HEC-HMS, conforme mostra a figura 14. A sub-bacia B1 contribui para o primeiro exutório, que corresponde ao ponto “Barragem Maracanaú”; em seguida, o trecho do rio B1-B2 direciona a vazão do primeiro exutório ao segundo, “Exutório 2”; este mesmo ponto recebe a contribuição da sub-bacia B2; a partir desse ponto, a vazão segue pelo trecho B2-B3 até o ponto “Exutório-3”, onde se soma à vazão de contribuição da sub-bacia B3, seguindo, doravante, até o final do rio.

Figura 14: Esquema no HEC-HMS da bacia hidrográfica de estudo, contendo barragem, sub-bacias, junções (representações dos exutórios) e trechos do rio.



Fonte: Funasa (2008a).

Os pontos de exutório apresentados coincidem com os seguintes trechos de dragagem selecionados:

- o exutório da bacia B1, que coincide com o ponto “Barragem Maracanaú”, corresponde ao RS 24297,29, definido pela seção S-117;
- o exutório da bacia B2 corresponde ao RS 13908,63, definido pela seção S-60;
- e o exutório da bacia B3 corresponde ao RS 4854,39, definido pela seção S-13.

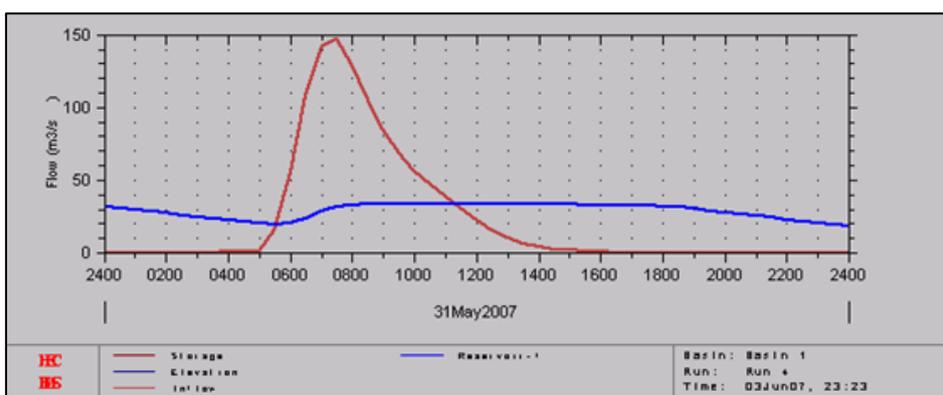
### 3.1.2 Hidrogramas de projeto

Uma vez determinado o esquema do projeto, foram determinados os hidrogramas para as sub-bacias da área de estudo. Inicialmente, selecionou-se para a modelagem o período de retorno  $T = 20$  anos, tendo em vista que é um valor razoável dentro do contexto de estudos hidrológicos e permite uma boa avaliação dos efeitos das cheias mais frequentes na região. As cheias de maior período de retorno são consideradas somente num segundo

momento, onde vão-se observar exatamente os efeitos extremos de chuvas mais intensas e de menor probabilidade de acontecer.

Na figura 15 a seguir, aparecem os resultados para a sub-bacia B1, que é a vazão atuante no trecho B1-B2. Nesse gráfico, pode-se ver o efeito causado pela presença da Barragem Maracanaú, que atenua o pico da vazão de cheia.

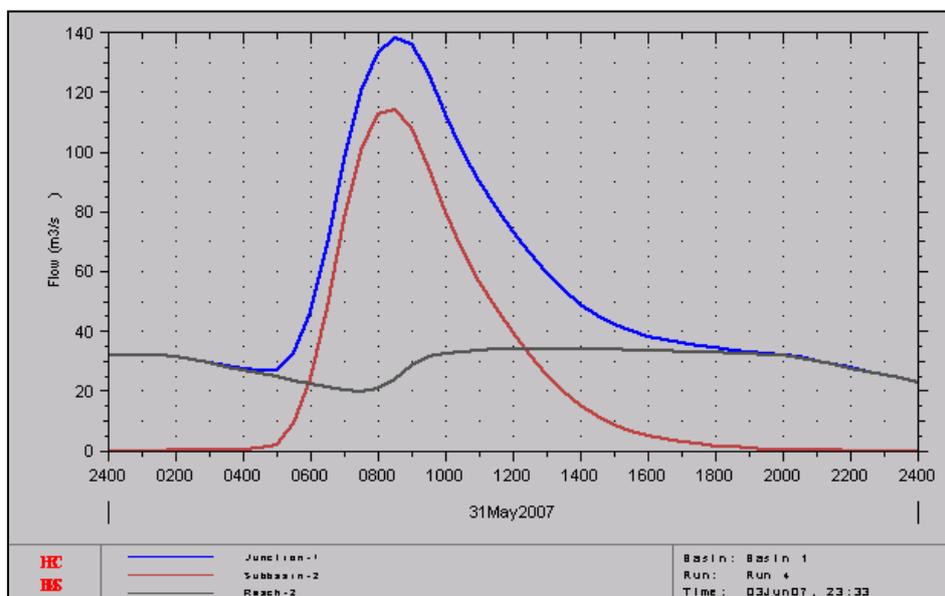
Figura 15: Hidrogramas da sub-bacia B1, sendo o vermelho da situação sem barragem e o azul da situação com barragem ( $Q_{\text{pico}} = 34,06 \text{ m}^3/\text{s}$ ; TR = 20 anos).



Fonte: Funasa (2008a).

Em seguida, na figura 16, é apresentado o hidrograma no exutório da sub-bacia B2, resultante da soma dos hidrogramas singulares das sub-bacias B1 e B2. Perceba-se que o hidrograma advindo da sub-bacia B1 é o mesmo que passa pelo trecho B1-B2 e está considerando o efeito da barragem, percebido na linha cinza, e é praticamente idêntico ao hidrograma em azul da figura 15.

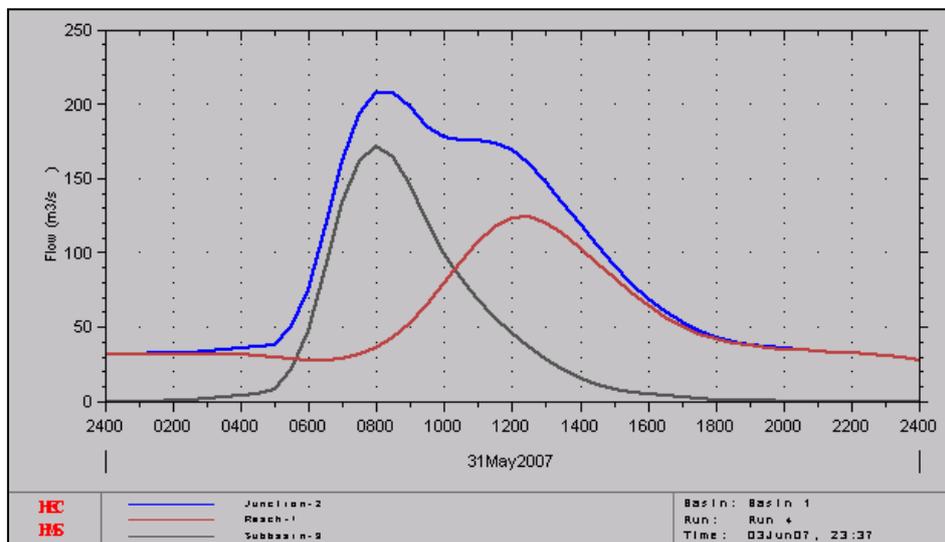
Figura 16: Hidrogramas da sub-bacia B2 e da sub-bacia B1 somados. A linha cinza representa o hidrograma da sub-bacia B1 aplainado; a linha vermelha representa o hidrograma da sub-bacia B2; e a linha azul representa o hidrograma-soma dos dois ( $Q_{\text{pico}} = 138,03 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $\text{TR} = 20 \text{ anos}$ ).



Fonte: Funasa (2008a).

Finalmente, a figura 17 mostra o hidrograma no exutório da sub-bacia B3, considerando a união do hidrograma da onda de cheia que vem pelo trecho B2-B3 e do hidrograma da própria sub-bacia B3.

Figura 17: Hidrograma no exutório da sub-bacia B3, em azul ( $Q_{\text{pico}} = 207,23 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $TR = 20$  anos). Este é o resultado da soma do hidrogramas da sub-bacia B3, em cinza, com o hidrograma que vem do trecho B2-B3, em vermelho.



Fonte: Funasa (2008a).

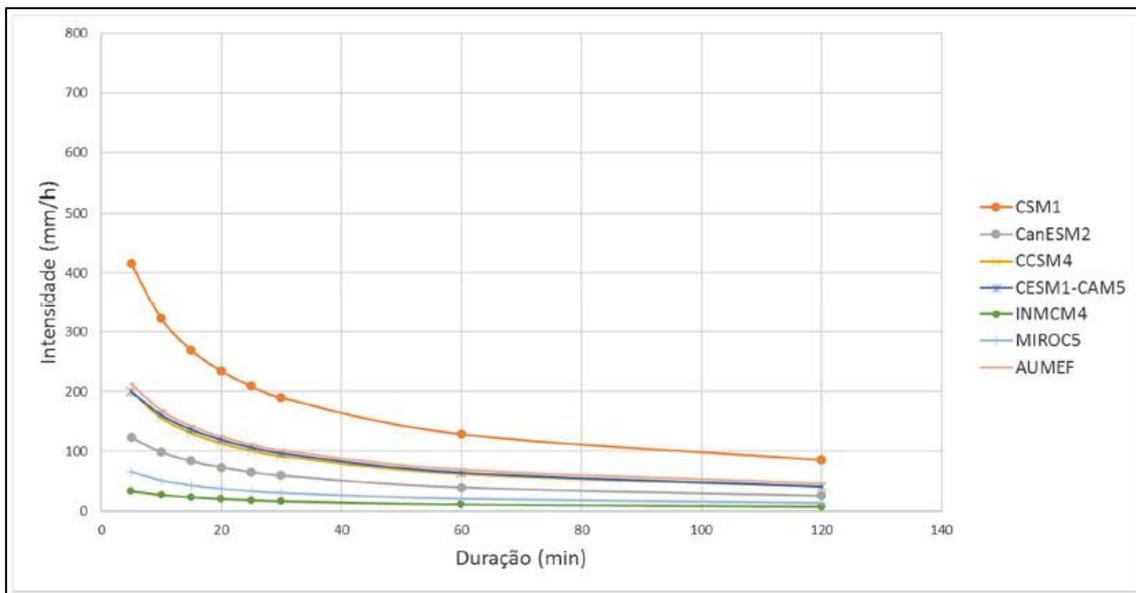
Nas figuras 15, 16 e 17, o hidrograma-resultante sempre é aquele destacado em azul e é a ele que se referem os valores de vazão de pico,  $Q_{\text{pico}}$ , e de período de retorno,  $TR$ , indicados nas legendas de cada figura.

As vazões de pico apresentadas aqui são os valores considerados como vazões de pico na modelagem no HEC-RAS, para a situação inicial.

### 3.2 Avaliação dos GCMs na geração de novas curvas IDF e equações de chuva.

Buscando verificar a precisão do método das relações das durações utilizado em seu estudo e, assim, encontrar os modelos que mais se adequassem à realidade da região de estudo, Sabóia calculou equações IDF dos seis GCMs avaliados, tomando como base a série histórica de 1970 – 1999 e comparada à equação oficial da Autarquia da Região Metropolitana de Fortaleza, AUMEF, como pode ser visto nas figuras 18 e 19 a seguir (SABÓIA, 2016).

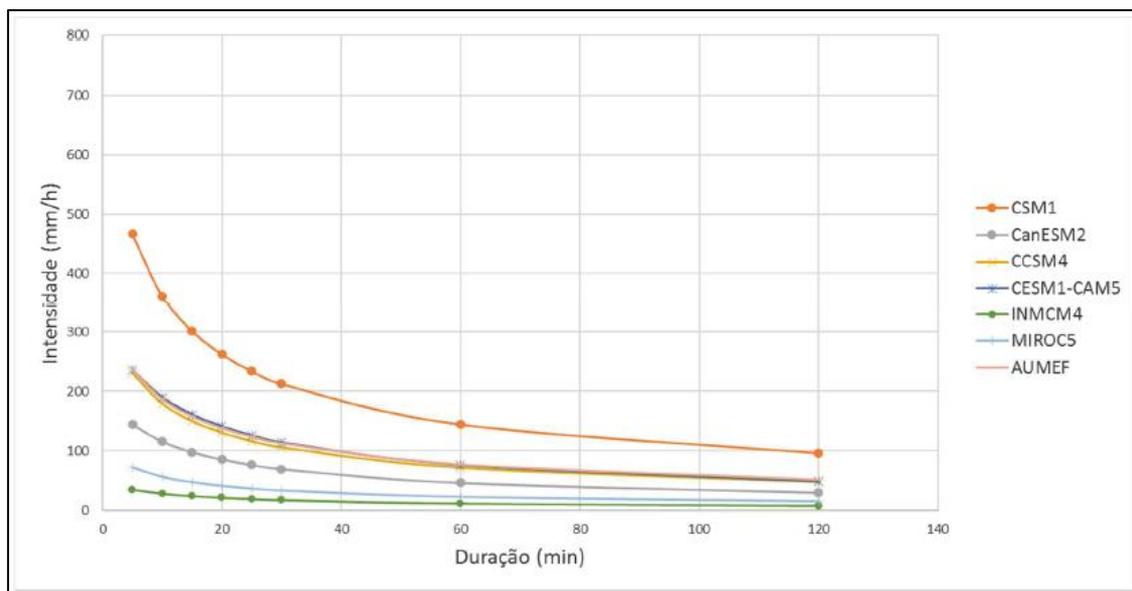
Figura 18: Curvas IDF dos 6 GCMs em comparação à curva IDF da AUMEF para o período de retorno de 50 anos.



Fonte: Sabóia (2016).

Analisando a figura 18, verifica-se que os modelos CESM1-CAM5 e CCSM4 apresentaram resultados mais satisfatórios, uma vez que suas curvas IDF são as que mais se aproximam da equação da AUMEF (erros médios de 6% e 9%, respectivamente).

Figura 19: Curvas IDF dos 6 GCMs em comparação à curva IDF da AUMEF para o período de retorno de 100 anos.



Fonte: Sabóia (2016).

Analisando a figura 19, chega-se à mesma conclusão, verificando-se novamente a maior proximidade das curvas IDF dos modelos CESM1-CAM5 e CCSM4 com relação à equação da AUMEF (erros médios de, aproximadamente, 0% e 6%, respectivamente).

Em seguida, após aplicação do método da correspondência dos quantis equidistantes (SRIVASTAV, SCHARDONG, e SIMONOVIC, 2015), foram determinadas novas equações IDF para a cidade de Fortaleza, projetadas para os seis modelos GCM, mediante cenários de mudança climática RCP 4,5 e RCP 8,5 (SABÓIA, 2016).

Os seis modelos GCM analisados no estudo feito por Sabóia geraram dados de precipitação muito divergentes, mostrando que o estudo da previsão climática ainda é impreciso. Nesse mesmo estudo, o autor avaliou os custos de implantação de sistemas de drenagem mediante os cenários de mudanças climáticas, onde se percebeu a grande variação nos valores a depender da curva IDF adotada para o dimensionamento. Dessa forma, utilizaram-se diferentes critérios de tomada de decisão para determinar as melhores situações, dentre os 13 cenários possíveis, sendo eles: equação oficial (AUMEF) e seis modelos GCM, cada qual com dois cenários de mudanças, RCP 4,5 e RCP 8,5 (SABÓIA, 2016). Com base nos resultados, após aplicação dos métodos de

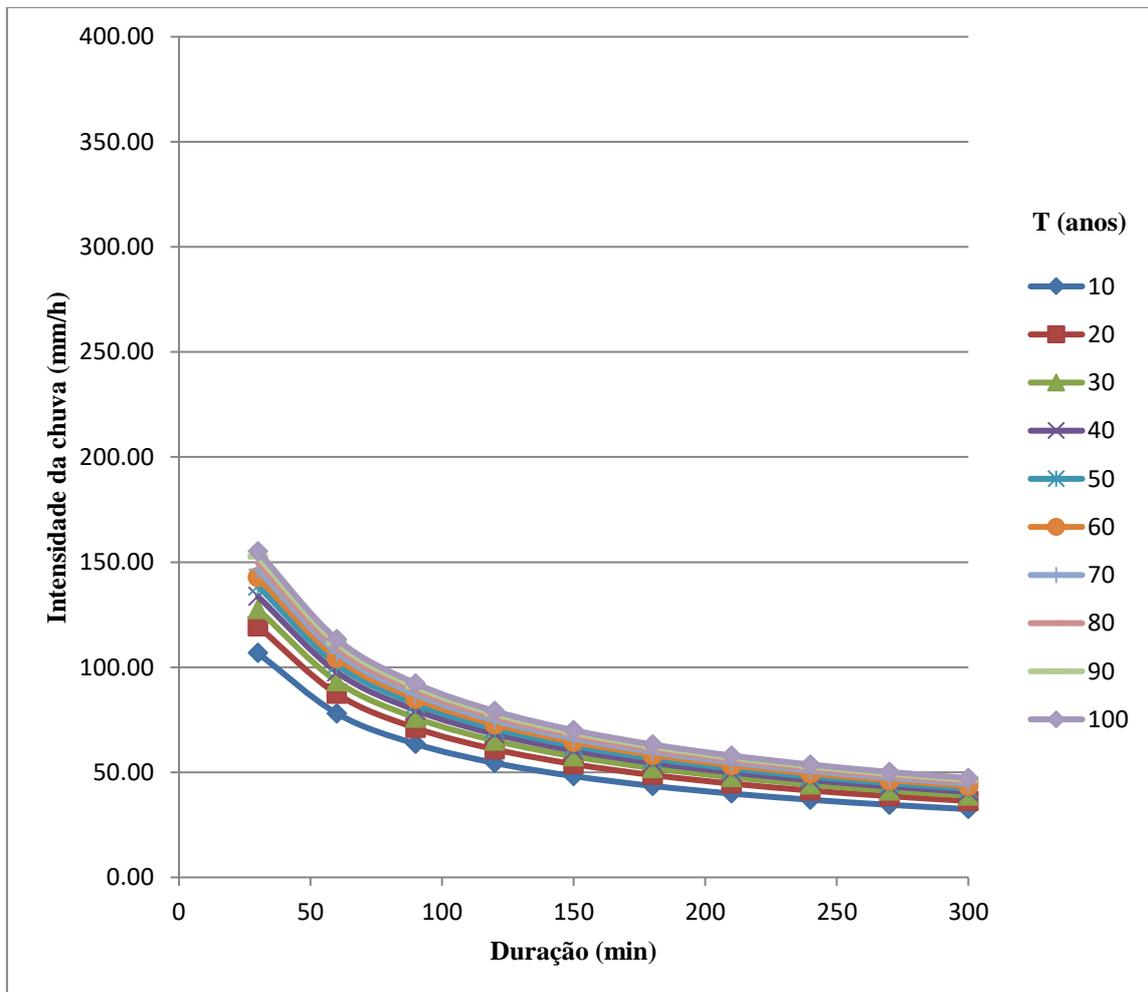
tomada de decisão, dentre os 13 cenários possíveis, foram escolhidos quatro. Destes, um indicou que se deve admitir um grande aumento na intensidade de precipitação de chuvas máximas de Fortaleza, criando uma situação mais pessimista e onerosa, do ponto de vista de custo de projetos de drenagem. Este cenário se baseia na equação do modelo CESM1-CAM5 (RCP 8,5). Além disso, saliente-se que este mesmo modelo foi o que apresentou resultados de maior concordância quando comparado à equação da AUMEF, na análise de precisão apresentada.

Ainda assim, é de extrema importância que seja considerado um cenário razoável e não tão extremo, que possa avaliar uma situação mais provável de acontecer. Dessa forma, foram consideradas duas possibilidades para o cálculo da chuva intensa: o cenário RCP 4,5 e o cenário RCP 8,5, ambos gerados pelo modelo CESM1-CAM5. Essas escolhas visam apresentar resultados sob duas óticas: a primeira tende a mostrar valores mais perto do possível, já que o cenário RCP 4,5 apresenta mais cautela, considera as variações climáticas naturais e a adoção de algumas medidas de controle de poluição por GEE; a segunda tende a mostrar valores mais extremos, uma vez que o cenário RCP 8,5 considera um cenário mais crítico, sem adoção de medidas de controle de poluição, permitindo resultados mais expressivos.

### 3.2.1 Modelo CESM1-CAM5, cenário RCP 4,5

$$i = \frac{736,9068 \cdot T^{0,1624}}{(t + 14,4142)^{0,6079}} \quad (3.1)$$

Figura 20: Curvas IDF da equação de chuva do modelo CESM1-CAM5, cenário RCP 4,5 para os períodos de retorno de 10 a 100 anos.

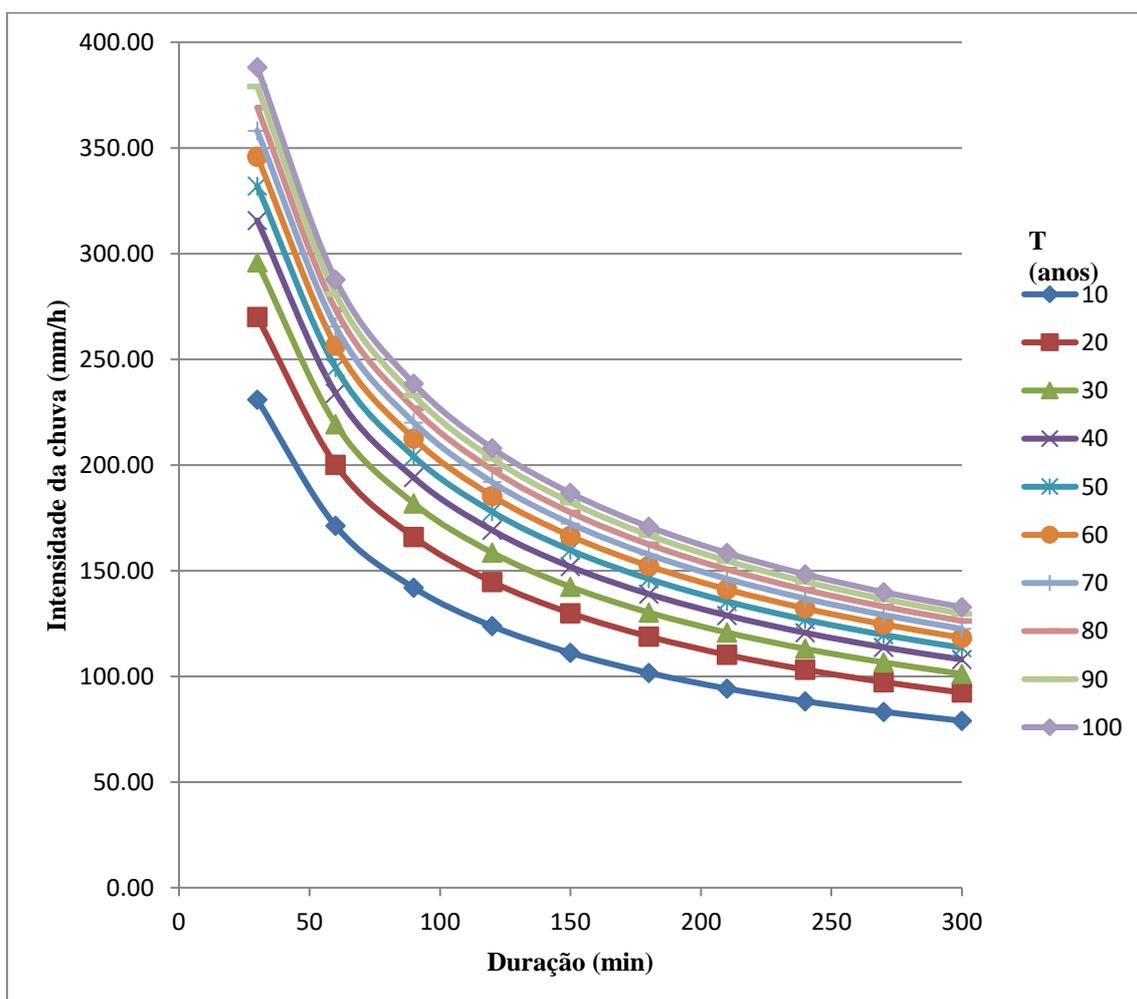


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Modelo CESM1-CAM5, cenário RCP 8,5

$$i = \frac{876,0093 \cdot T^{0,2255}}{(t + 7,6045)^{0,5107}} \quad (3.2)$$

Figura 21: Curvas IDF da equação de chuva do modelo CESM1-CAM5, cenário RCP 8,5 para os períodos de retorno de 10 a 100 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira mais clara, através da visualização dos gráficos apresentados, podem-se perceber as diferenças nas intensidades das chuvas dos cenários escolhidos. As curvas IDF do cenário RCP 4,5 variam, aproximadamente, entre 30 e 155 mm/h, enquanto que as curvas IDF do cenário RCP 8,5 variam entre 80 e 380 mm/h. Além disso, para o cenário

RCP 4,5, percebe-se pouca variação entre curvas subsequentes, gerando uma amplitude de variação de intensidade menor. Para o cenário RCP 8,5, essa variação é pouco maior, diminuindo à medida que o período de retorno aumenta.

Para este estudo, decidiu-se trabalhar com quatro situações, a saber:

- Situação 0: condições originais de projeto, à época da realização da dragagem do rio (FUNASA, 2008a) e da construção da barragem (FUNASA, 2008b), período de retorno  $T = 20$  anos;
- Situação 1: RCP 4,5 e período de retorno  $T = 50$  anos;
- Situação 2: RCP 4,5 e período de retorno  $T = 100$  anos;
- Situação 3: RCP 8,5 e período de retorno  $T = 50$  anos.

Pretende-se, dessa forma, fazer um estudo comparativo entre a situação 0, projetada inicialmente, e as situações 1, 2 e 3, que vão sugerir cenários de alterações climáticas, conforme já explicado.

### **3.3 Determinação de novos hietogramas de projeto pelo método dos Blocos Alternados**

De posse dos dados de precipitação calculados, é necessário saber de que maneira a chuva se distribui ao longo do tempo. Para este trabalho, foi utilizado o método dos Blocos Alternados, que pode ser encontrado descrito por Campos (2009) e também por Tucci, Porto e Barros (1995).

Esta metodologia é uma dos mais simples e mais utilizados na utilização de hietogramas de projeto a partir de curvas IDF (CAMPOS, 2009). Ela consiste em estabelecer um número conveniente de intervalos de tempo de mesma duração, baseados numa chuva de duração total,  $t_{total}$ , igual a:

$$t_{total} = n \Delta t \quad (3.3)$$

Onde:

$n$  = número de intervalos de tempo (adimensional)

$\Delta t$  = duração do intervalo (horas ou minutos)

Com isso, calcula-se as intensidades das chuvas para as durações  $1\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ , até  $n\Delta t$ , a partir das equações IDF selecionadas. Em seguida, determina-se a precipitação total para cada intervalo de tempo, multiplicando a intensidade da chuva por sua duração. Dessa forma, obtêm-se valores de chuva acumulados, onde a primeira chuva equivale ao tempo  $\Delta t$ , a segunda ao tempo  $2\Delta t$  e assim por diante.

A partir daí, são formados blocos de chuva: o bloco 1 é a chuva total para a duração  $\Delta t$ ; o bloco 2 é obtido a partir da subtração da chuva total de duração  $2\Delta t$  da chuva de duração  $\Delta t$ ; o bloco 3 é obtido a partir da subtração da chuva total de duração  $3\Delta t$  da chuva de duração  $2\Delta t$ ; assim segue até o último bloco,  $n$ .

Finalmente, devem-se posicionar os blocos ao longo do tempo. A ideia básica é colocar os blocos de maiores valores no centro e ir distribuindo o restante de maneira decrescente, alternando os lados para que se possa uniformizar o máximo possível as taxas de aumento e decréscimo de precipitação. Se  $n$  for ímpar, o bloco 1 é colocado na posição central,  $(n+1)/2$ , e os blocos seguintes vão-se alternando, uma vez à direita, outra vez à esquerda. Se  $n$  for par, o bloco 1 é colocado na posição  $n/2$  e os blocos seguintes vão se alternando, uma vez à direita, outra vez à esquerda.

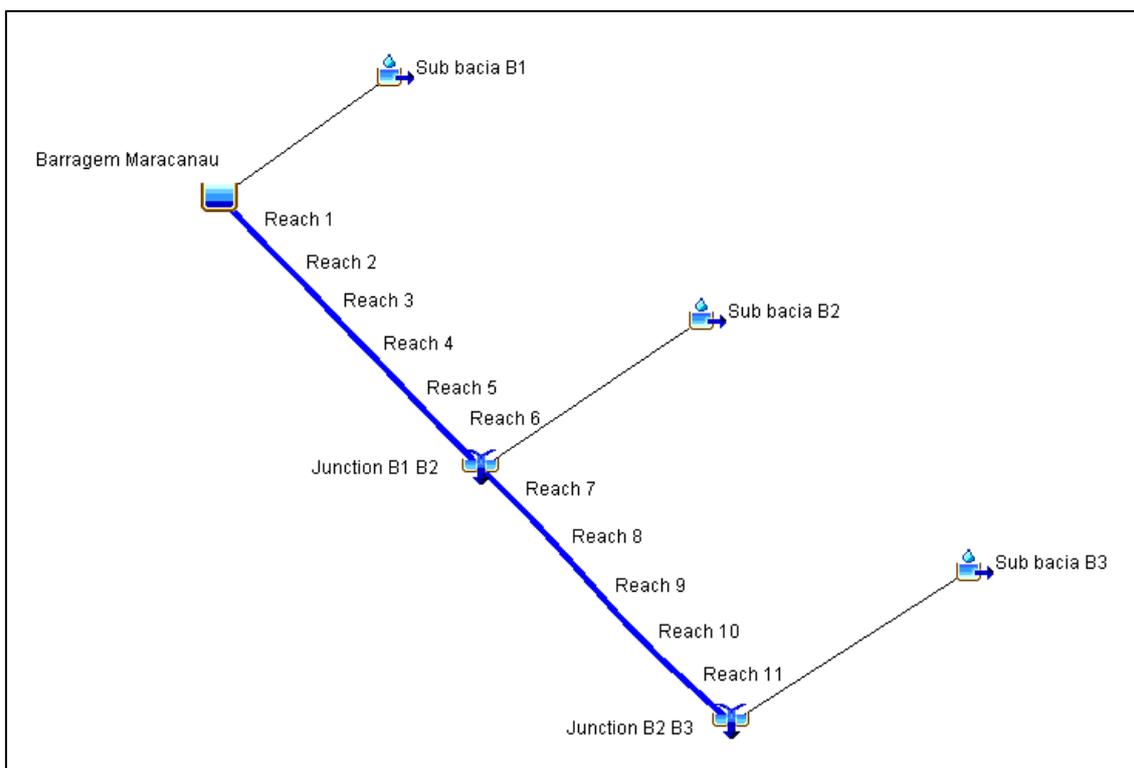
Os hietogramas calculados aqui serviram como dados de entrada de precipitação para o modelo HEC-HMS.

### **3.4 Modelagem no HEC-HMS**

#### **3.4.1 Modelo da Bacia**

O primeiro passo para a modelagem foi gerar um novo modelo de bacia no HEC-HMS. Para tanto, tomou-se o modelo base apresentado na figura 14. A partir dele, o modelo de bacia foi redesenhado, conforme apresentado na figura 22, com uma modificação apenas na divisão dos trechos originais em diversos sub-trechos, a fim de modelar de maneira mais precisa a propagação da onda de cheia.

Figura 22: Modelo de bacia no HEC-HMS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, foram determinados os parâmetros de modelagem de cada uma das sub-bacias. A tabela 3 apresenta um resumo desses valores, como área, método de perdas e método de transformação de hidrograma unitário. Os valores apresentados foram calculados segundo os métodos descritos nos itens 2.5 e 2.6 do presente trabalho.

Tabela 3: Dados das sub-bacias para a modelagem no HEC-HMS.

	Variável	Sub-Bacia	Sub-Bacia	Sub-Bacia	Unidade
		B1	B2	B3	
Área	A	117,74	35,06	41,14	km <sup>2</sup>
Método de perdas: SCS-CN					
Abstrações iniciais	I <sub>a</sub>	16,93	13,50	12,7	mm
Número de curva (curve number)	CN	75	79	80	-
Impermeabilidade	i	1,0	3,0	15,0	%
Método de transformação: HU-SCS					
Tipo de gráfico: Padrão (PRF484)					
Tempo de retardo	t <sub>lag</sub>	98	158	144	min

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de impermeabilidade foram retirados do Projeto de Dragagem do rio Maranguapinho (FUNASA, 2008a) e representam uma taxa adicional de impermeabilidade de sub-bacia, que não entra no cálculo de perdas e gera necessariamente escoamento direto (USACE, 2016b).

Também foram inseridos no programa os dados relativos à barragem Maracanaú, apresentados na tabela 4. Essas informações foram obtidas do Projeto da Barragem Maracanaú (FUNASA, 2008b). É válido pontuar que, para este estudo, considerar-se-á a barragem como tendo sua função original de contenção de cheias, o que implica numa condição inicial de armazenamento nulo, ou seja, cota mínima de armazenamento.

Tabela 4: Dados da barragem para a modelagem no HEC-HMS.

Barragem Maracanaú		
	Valor	Unidade
Método de armazenamento: Cota x Volume		
Elevação Inicial	42	m
Vertedouro retangular		
Direção: principal		
Cota da soleira	51,5	m
Comprimento	160	m
Coefficiente ( $M^{0.5}/S$ )	2,2	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4.2 Modelo Meteorológico, Especificações de Controle e Dados de Séries Temporais

Neste ponto, o HEC-HMS solicita um modelo meteorológico para cada sub-bacia pré-determinada pelo usuário. Em outras palavras, ele associa os dados de séries temporais (no caso deste trabalho, dados de precipitação) com as sub-bacias determinadas anteriormente. Essa associação é controlada pelo componente especificações de controle, que basicamente descreve o início e o final da simulação, e o intervalo de tempo que será usado para as medições.

Dessa forma, foram determinados os modelos meteorológicos, as especificações de controle e os dados de precipitação:

- Os modelos meteorológicos utilizados na simulação serão três: o primeiro, considerando um cenário RCP 4,5 e um período de retorno de 50 anos; o segundo, considerando um cenário RCP 4,5 e um período de retorno de 100 anos; e o terceiro, considerando um cenário RCP 8,5 e um período de retorno de 50 anos.
- As especificações de controle são arbitrárias e ficam a critério do usuário. No caso, deste trabalho, considerou-se o período das 00:00 de 01 de janeiro de 2000 às 18:00 de 01 de janeiro de 2000, com intervalo de tempo de 15 minutos.

- Os dados de precipitação são os hietogramas calculados através do método descrito no item 3.3, relativos aos cenários de mudanças climáticas pré-estabelecidos.

### 3.4.3 Dados em pares

Os “dados em pares” são diversos tipos de dados de entrada para diversas aplicações e utilizações em modelagens hidrológicas. Neste trabalho, foram utilizados dois tipos: curva cota-volume e seções transversais.

#### 3.4.3.1 Curva cota-volume (*Elevation-Storage Function*)

A curva cota-volume é uma função que relaciona o volume armazenado no reservatório à cota do nível de armazenamento. A seguir, na figura 23, é apresentado o gráfico da curva cota-volume do reservatório, também obtido do Projeto da Barragem Maracanaú (FUNASA, 2008b). Os dados obtidos só faziam referência até o volume na cota 54. Dessa forma, foi gerada uma linha de tendência polinomial de 3º grau para estimar o valor da cota 55.

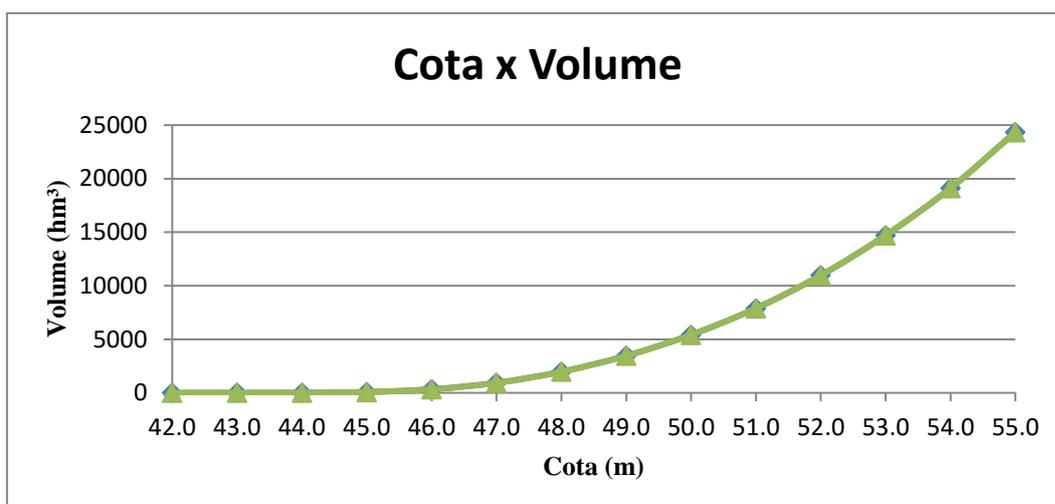
$$V = 10,563c^3 - 1310,1c^2 + 53965c - 738095 \quad (3.4)$$

Onde:

V = volume armazenado (hm<sup>3</sup>); e

c = cota (m).

Figura 23: Gráfico Cota x Volume do reservatório formado pela barragem Maracanaú.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, os dados foram inseridos no HEC-HMS, conforme mostra a figura 24, em forma de tabela.

Figura 24: Dados de cota-volume (elevation-storage) em forma de tabela no HEC-HMS.

Paired Data		Table	Graph
Elevation (M)	Storage (1000 M3)		
42.0	0.000		
43.0	0.808		
44.0	10.459		
45.0	74.541		
46.0	332.289		
47.0	935.380		
48.0	1971.278		
49.0	3456.966		
50.0	5415.392		
51.0	7895.446		
52.0	10972.151		
53.0	14720.020		
54.0	19114.248		
55.0	24346.631		

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4.3.2 Seções transversais (Cross Sections)

As seções transversais são tipos de dados que fornecem o formato das diferentes seções transversais do rio. Este tipo de dado foi necessário para o cálculo da propagação da onda de cheia através do método Muskingum-Cunge.

Para o caso de canais projetados, a seção transversal do canal é única, o que facilita a entrada de dados. Entretanto, para canais naturais, como é o caso do rio Maranguapinho, a seção varia a todo o momento. Dessa forma, considerou-se o rio principal como dividido em 11 trechos, no sentido de aperfeiçoar a modelagem, tentando passar para o software as variações mais relevantes nas seções do rio. As diferentes seções-tipo do rio, que foram retiradas do Projeto de Dragagem do rio Maranguapinho (FUNASA, 2008a). Foram selecionadas seções representativas, considerando a aproximação de que o rio teria 11 trechos de características iguais.

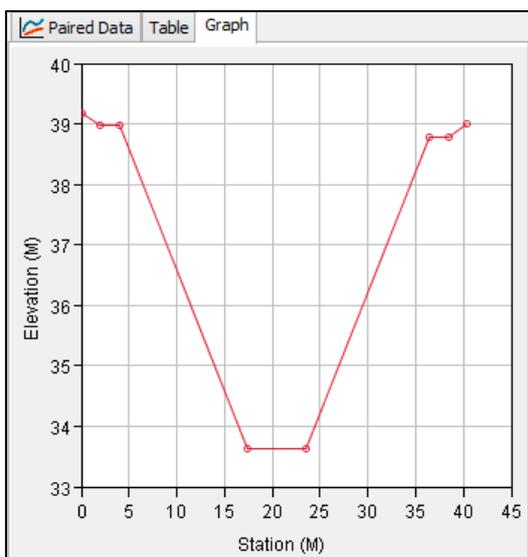
A título de exemplo, apresenta-se a seguir a seção-tipo 1, referente ao trecho 1 do rio. As figuras 25 e 26 a seguir mostram o método de entrada dos dados e o formato da seção, respectivamente.

Figura 25: Dados de entrada da seção transversal em forma de tabela no HEC-HMS (seção-tipo 1).

Paired Data		Table	Graph
Station (M)	Elevation (M)		
0.00	39.18		
2.00	38.98		
4.00	38.98		
17.40	33.62		
23.50	33.62		
36.43	38.79		
38.43	38.79		
40.43	38.99		

Fonte: Elaborado pelo autor.

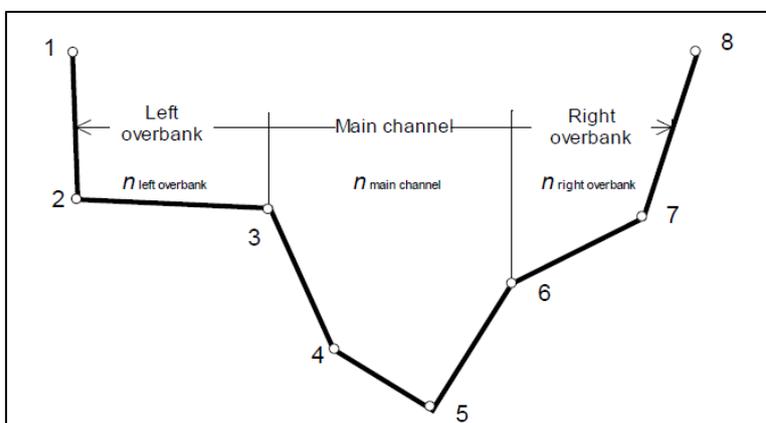
Figura 26: Gráfico da seção transversal no HEC-HMS (seção-tipo 1).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados foram inseridos através da configuração de oito pontos (8-point cross section configuration), que consegue representar da melhor forma as seções do rio em estudo. Conforme mostra a figura 27, a seção é dividida, nesse caso, em três partes: o canal principal e os leitos esquerdo e direito. Com base no Projeto de Dragagem do rio Maranguapinho (2008a), foram adotados, para todas as seções os mesmos valores do coeficiente  $n$ , sendo  $n = 0,03$  para o canal principal e  $n = 0,2$  para os leitos esquerdo e direito.

Figura 27: Configuração de oito-pontos para a seção do rio no HEC-HMS.



Fonte: USACE (2000).

A tabela 5 a seguir descreve as características dos trechos adotados para a modelagem, assim como suas características, tais quais quantidade de seções por trecho, seção representativa, comprimento e declividade.

Tabela 5: Descrição dos trechos (*reaches*) dos rios.

		Seção inicial e final (RS)	Quantidade de seções	Seção representativa	Comprimento (m)	Declividade (m/m)
Barragem Maracanaú - Junction B1 B2	Trecho 1	24297-21733	17	22865	2564	0.001424
	Trecho 2	21733-17928	17	18712	3805	0.002321
	Trecho 3	17928-16525	8	17041	1403	0.001589
	Trecho 4	16525-15876	4	16027	649	0.001387
	Trecho 5	15876-14716	7	15448	1160	0.001845
	Trecho 6	14716-13908	5	14353	808	0.000730
Junção B1 B2 - Junção B2 B3	Trecho 7	13908-11086	15	11086	2822	0.002048
	Trecho 8	11086 - 9415	9	9415	1671	0.002005
	Trecho 9	9415-7747	8	7747	1668	0.001906
	Trecho 10	7747-5951	9	5951	1796	0.001537
	Trecho 11	5951-4854	6	4854	1097	0.000328

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5 Metodologia de estimativa de população atingida por inundação

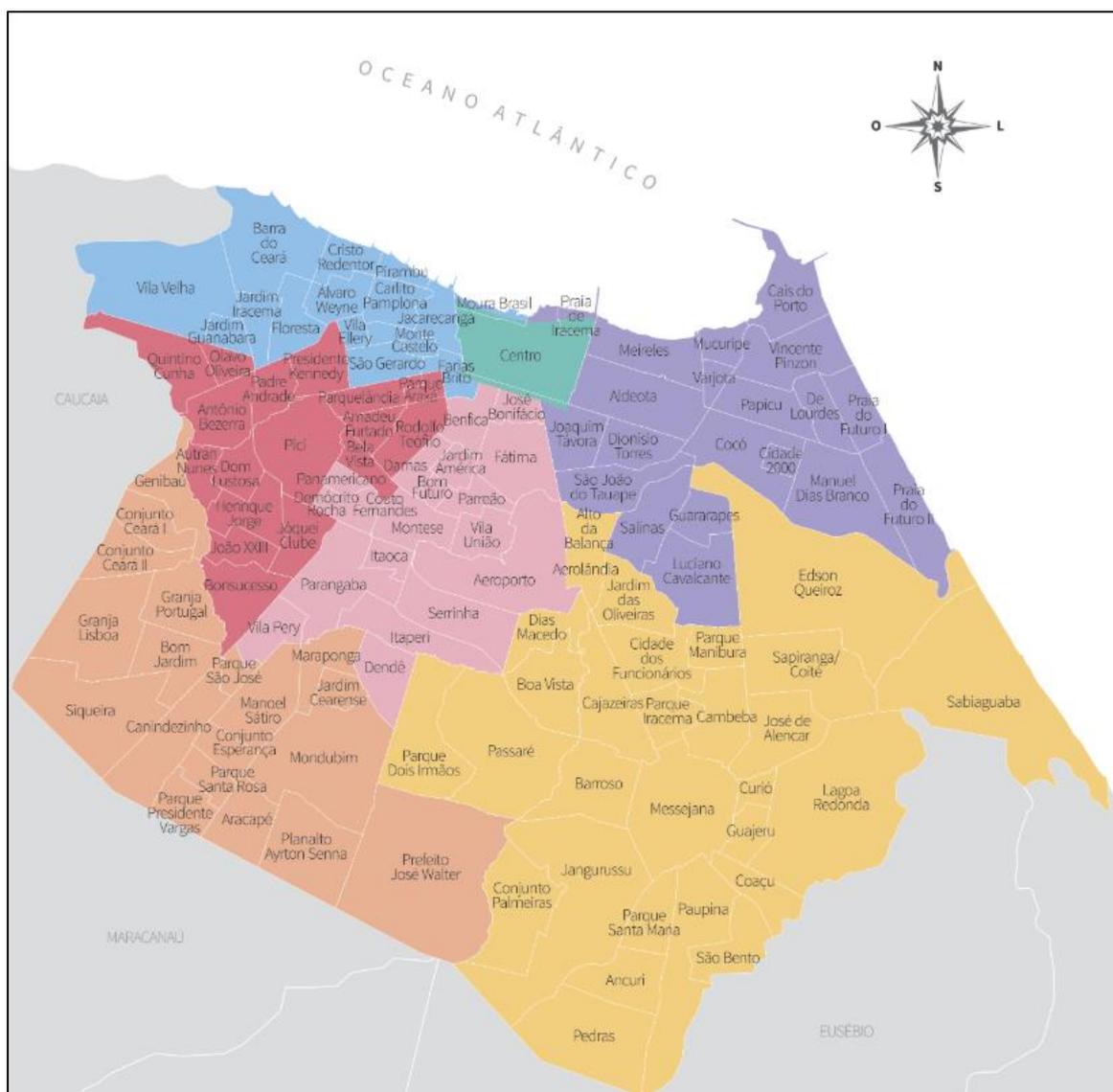
A estimativa da população atingida pela inundação considerou o cálculo da área inundada e a densidade demográfica dos bairros que o evento possivelmente pode atingir. A seguir, são listados os bairros do município de Fortaleza e que se localizam às margens do rio Maranguapinho: Conjunto Esperança, Canindezinho, Manoel Sátiro, Parque São José, Bom Jardim, Granja Portugal, Bonsucesso, Conjunto Ceará I, Conjunto Ceará II, João XXIII, Henrique Jorge, Genibaú, Dom Lustosa, Autran Nunes, Antônio Bezerra e Quintino Cunha. A figura 28 apresenta o mapa da cidade de Fortaleza, onde podem ser encontrados os bairros mencionados.

Sendo assim, considerando as possíveis variações de densidade demográfica, a região marginal ao rio foi dividida em três trechos distintos. Para cada um deles, foi calculada uma densidade demográfica média, mediante os valores determinados pela PMF (2007). Estes valores eram referentes ao ano 2000; logo, foi feita uma estimativa para o ano de 2018, considerando o crescimento populacional esperado segundo o IBGE (2017). Os trechos delimitados e os valores de densidade demográfica média são:

- Trecho A: começando próximo à Av. Quarto Anel Viário e terminando na Av. General Osório de Paiva; abrange os bairros Conjunto Esperança, Canindezinho e Parque São José (o bairro Manoel Sátiro não foi incluso, pois não havia dados referentes a ele). Densidade demográfica média A: 13659,39 hab/km<sup>2</sup>.
- Trecho B: começando na Av. General Osório de Paiva e terminando na Av. Senador Fernandes Távora; abrange os bairros Bom Jardim, Granja Portugal, Bonsucesso, Conjunto Ceará I, Conjunto Ceará II, João XXIII, Henrique Jorge e Genibaú. Densidade demográfica média B: 16201,44 hab/km<sup>2</sup>.
- Trecho C: começando na Av. Senador Fernandes Távora e terminando pouco depois da Av. Mister Hull; abrange os bairros Dom Lustosa, Autran Nunes, Antônio Bezerra e Quintino Cunha. Densidade demográfica média C: 16356,27 hab/km<sup>2</sup>.

Uma vez de posse dos valores de área das faixas de inundação para cada trecho, calcula-se a quantidade estimada de pessoas atingidas, multiplicando-se a área delimitada pelo valor da densidade demográfica.

Figura 28: Mapa do município de Fortaleza, dividido por bairros e regionais.



Fonte: SEUMA (2018)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Chuvas Intensas e Precipitação Total

Seguindo a metodologia descrita no item 3.2, foram calculadas as chuvas intensas e precipitações totais de projeto para as sub-bacias B1, B2 e B3. Para isso, foram utilizados os tempos de duração das chuvas iguais aos tempos de concentração das sub-bacias e os diferentes períodos de retorno, conforme descrito para as situações 1, 2 e 3. Os valores calculados são apresentados na tabela 6.

O tempo de duração das chuvas foi adotado como um valor próximo dos tempos de concentração das bacias. Isso foi feito de forma a gerar valores que tivessem um divisor comum inteiro, para facilitar a modelagem no HEC-HMS, que solicita um intervalo de duração fixo para as medições. Isso explica as pequenas diferenças entre  $t$  e  $t_c$ :

Sub-bacia B1: 1,1%

Sub-bacia B2: 2,6%

Sub-bacia B3: 0%

Perceba-se também que, quanto maior a duração da chuva, menor a sua intensidade. Isso explica as diferentes intensidades de chuva para as sub-bacias B1, B2 e B3, uma vez que se considerou que cada sub-bacia seria submetida a uma duração de chuva igual ao seu tempo de concentração. Também é interessante notar que as diferenças de intensidade acabam se compensando, quando se multiplica o valor da intensidade pelo valor da duração da chuva, gerando valores de precipitação total parecidos. As diferenças máximas percentuais das intensidades e das precipitações totais são, respectivamente:

Situação 1: 24,4% e 19,1%

Situação 2: 24,4% e 19,1%

Situação 3: 21,5% e 22,1%

Tabela 6: Dados de precipitação calculados para as situações 1, 2 e 3, nas sub-bacias B1, B2 e B3.

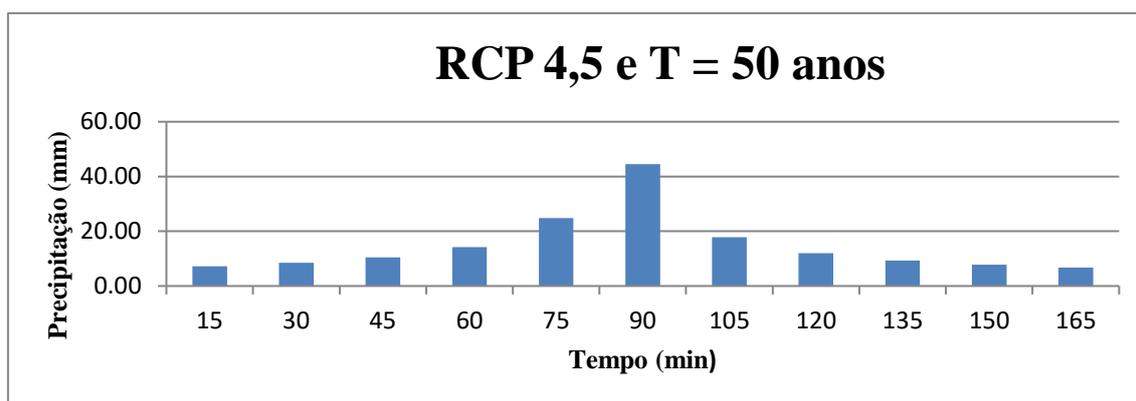
		Sub-Bacia B1	Sub-Bacia B2	Sub-Bacia B3	
Situação 1: RCP 4,5 e T = 50 anos					
Parâmetros	Variável	Valor			Unidade
Tempo de concentração	$t_c$	163,2	262,8	240	min
Tempo de duração da chuva intensa	$t$	165	270	240	min
Período de retorno	$T$	50	50	50	anos
Intensidade da chuva	$i$	59,32	44,83	47,97	mm/h
Precipitação total	$P$	163,13	201,73	191,88	mm
Situação 2: RCP 4,5 e T = 100 anos					
Parâmetros	Variável	Valor			Unidade
Tempo de concentração	$t_c$	163,2	262,8	240	min
Tempo de duração da chuva intensa	$t$	165	270	240	min
Período de retorno	$T$	100	100	100	anos
Intensidade da chuva	$i$	66,39	50,17	53,69	mm/h
Precipitação total	$P$	182,57	225,77	214,76	mm
Situação 3: RCP 8,5 e T = 50 anos					
Parâmetros	Variável	Valor			Unidade
Tempo de concentração	$t_c$	163,2	262,8	240	min
Tempo de duração da chuva intensa	$t$	165	270	240	min
Período de retorno	$T$	50	50	50	anos
Intensidade da chuva	$i$	152,46	119,61	126,80	mm/h
Precipitação total	$P$	419,27	538,25	507,22	mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

## **4.2 Hietogramas de Projeto**

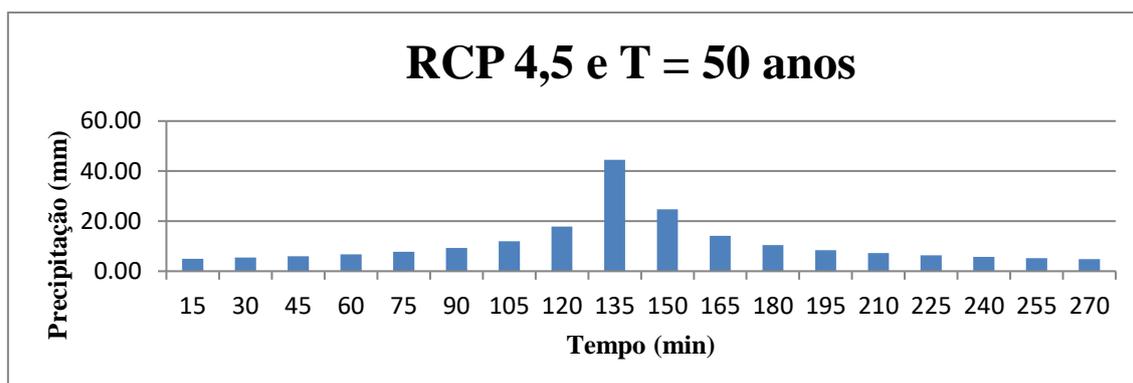
De posse dos valores de precipitação total, foram determinados os hietogramas de projeto, com base no método dos blocos alternados, descrito no item 3.3. O intervalo de tempo considerado para os blocos foi de 15 minutos. O número de intervalos depende da duração de cada chuva, para as diferentes sub-bacias. Assim, a sub-bacia B1 foi dividida em 11 blocos, totalizando os 165 minutos de duração, a sub-bacia B2 foi dividida em 18 blocos, totalizando os 270 minutos de duração; e a sub-bacia B3 foi dividida em 16 blocos, totalizando os 240 minutos de duração. Os hietogramas resultantes são apresentados a seguir.

Figura 29: Hietograma de projeto, sub-bacia B1, situação 1.



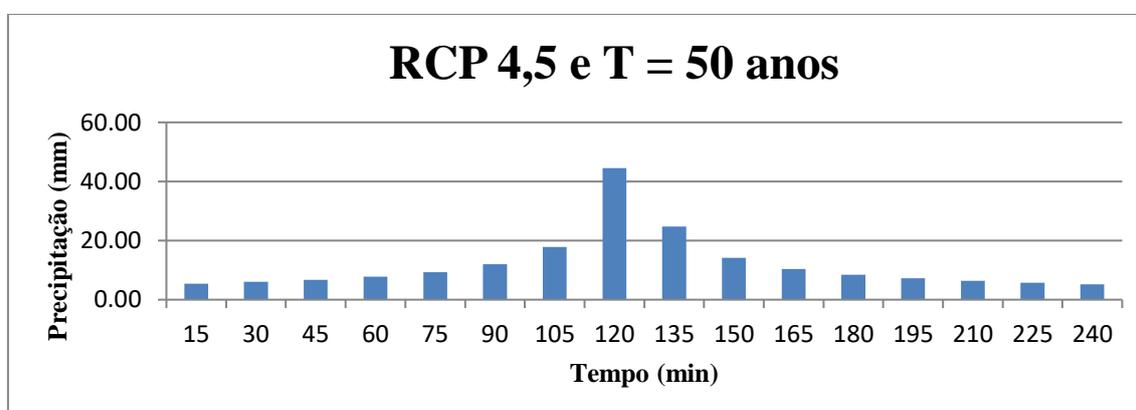
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30: Hietograma de projeto, sub-bacia B2, situação 1.



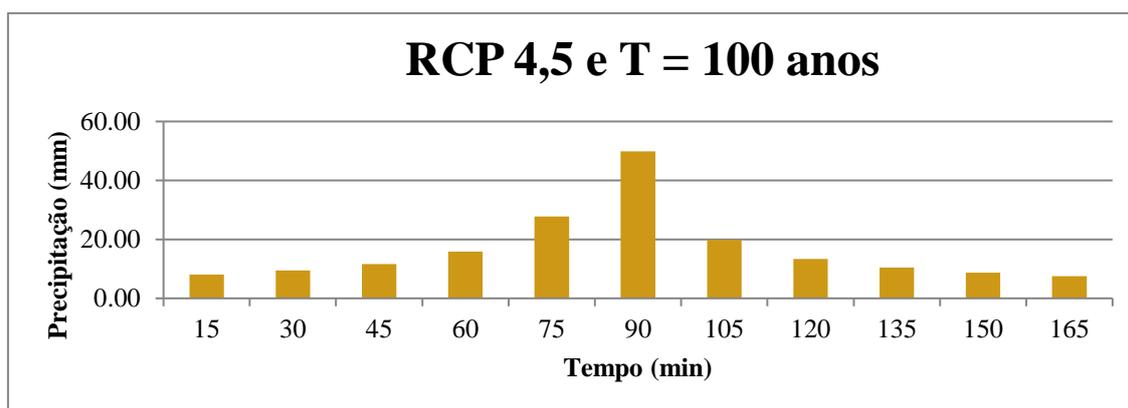
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31: Hietograma de projeto, sub-bacia B3, situação 1.



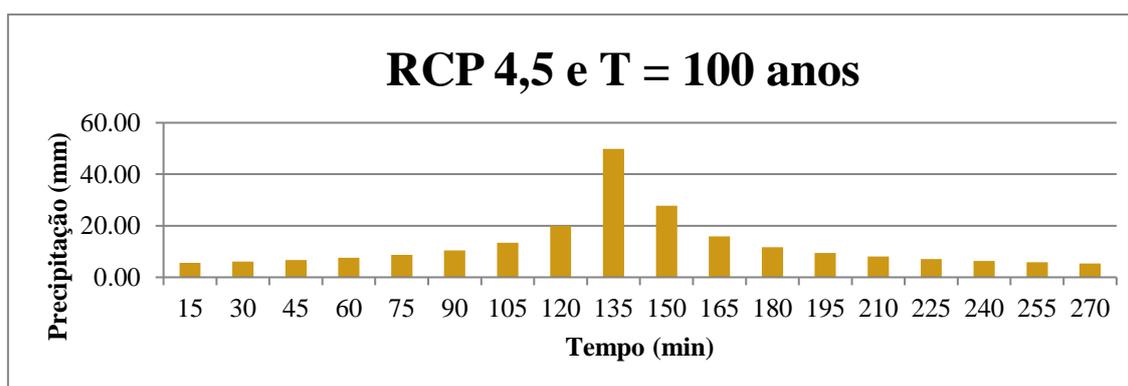
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32: Hietograma de projeto, sub-bacia B1, situação 2.



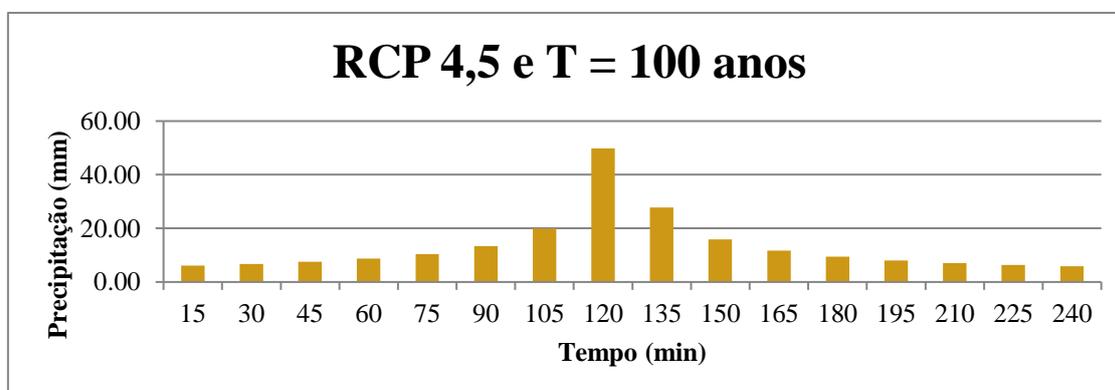
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33: Hietograma de projeto, sub-bacia B2, situação 2.



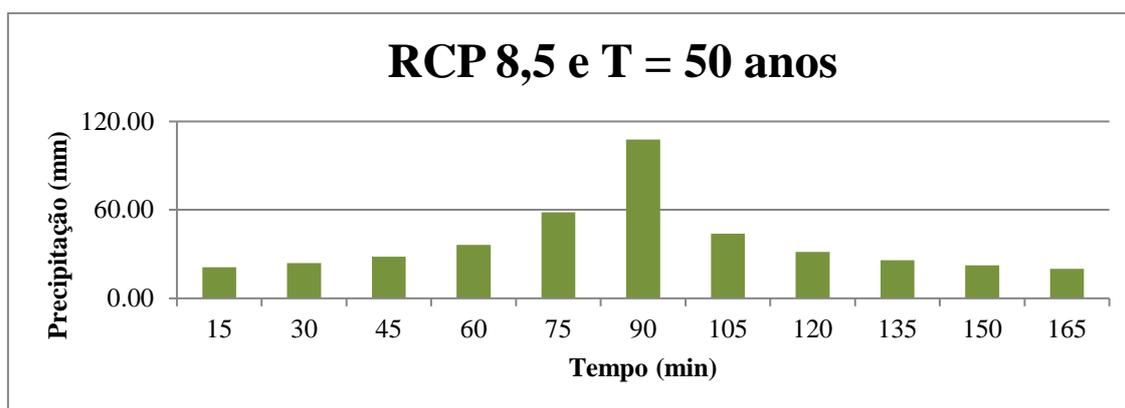
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34: Hietograma de projeto, sub-bacia B3, situação 2.



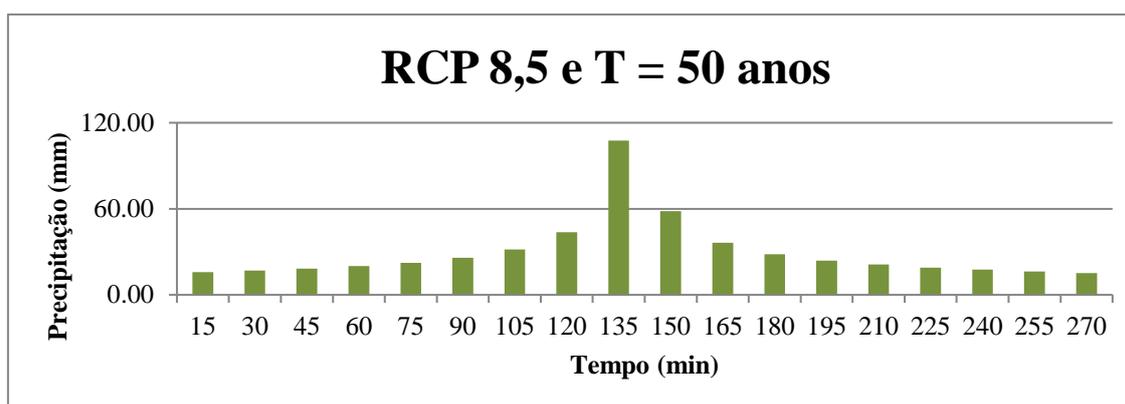
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35: Hietograma de projeto, sub-bacia B1, situação 3.



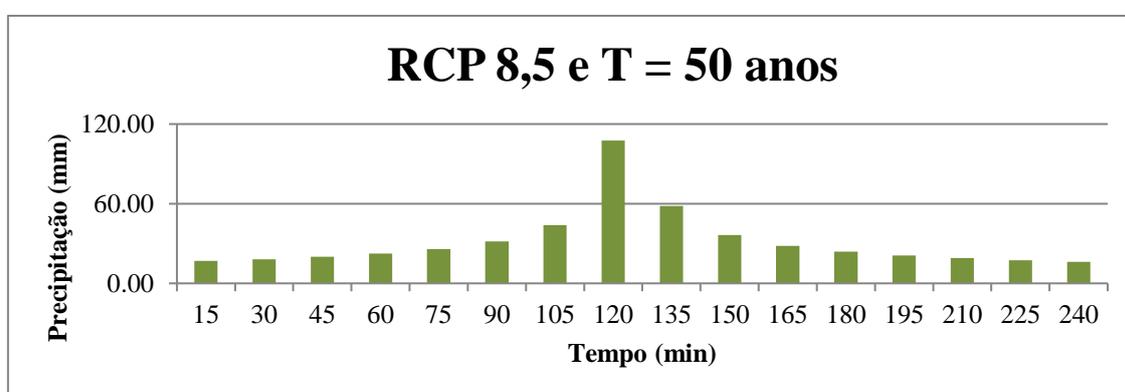
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36: Hietograma de projeto, sub-bacia B2, situação 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37: Hietograma de projeto, sub-bacia B3, situação 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se verificar que há uma variação muito pequena entre os picos de precipitação (referente aos blocos centrais do hietograma) nas situações 1 e 2, sendo 44,52 mm para a situação 1 e 49,82 mm para a situação 2. Isso já havia sido apontado pela análise das curvas IDF no item 3.2, onde ficava evidenciado que havia pouca diferença entre as curvas de diferentes períodos de retorno, no cenário RCP 4,5.

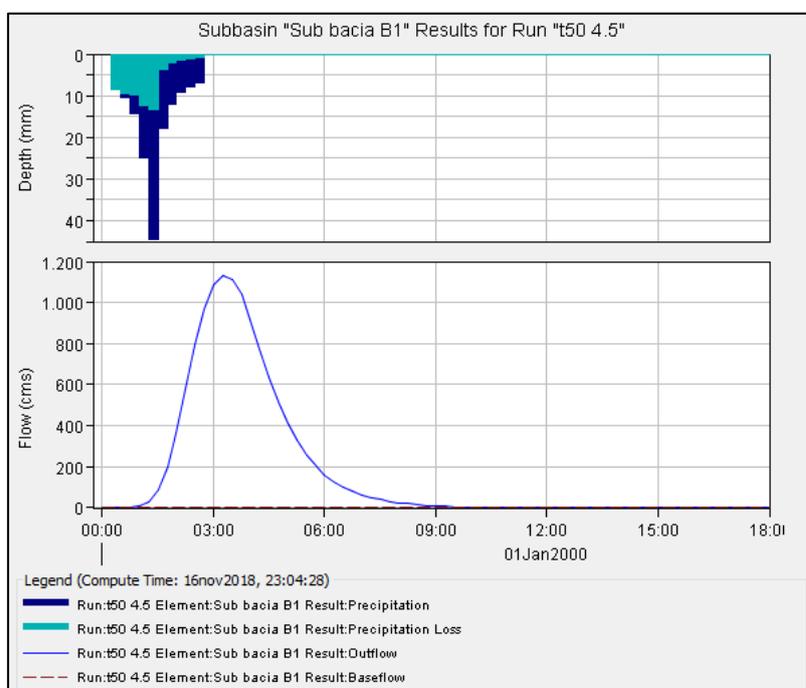
Entretanto, quando comparados esses valores ao valor calculado para a situação 3, (cenário RCP 8,5), percebe-se um aumento considerável. Considerando  $T = 50$  anos, podemos comparar as situações 1 e 3, tendo o bloco central de precipitação da situação 3 apresentado um valor 2,4 vezes maior que o da situação 1. Isso indica que podemos esperar, analogamente, valores de vazão também bem mais elevados para a situação 3.

### **4.3 Hidrogramas de Projeto**

Uma vez calculados os hietogramas de projeto, estes foram inseridos no HEC-HMS, juntamente com os demais parâmetros de modelo de bacia, modelo meteorológico, especificações de controle, dados de séries temporais e dados em pares, apresentados nos itens 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3.

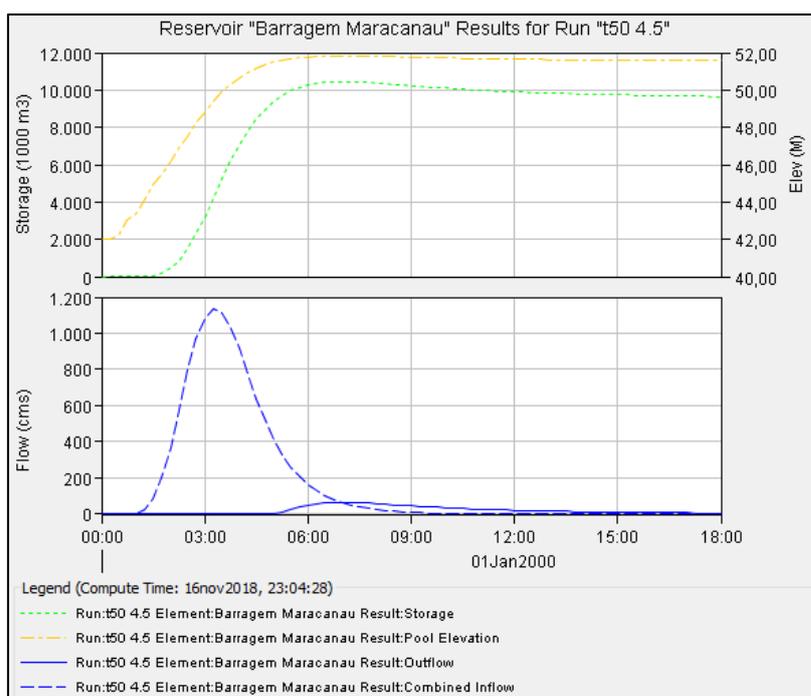
### 4.3.1 Situação 1: RCP 4,5 e $T = 50$ anos

Figura 38: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B1.



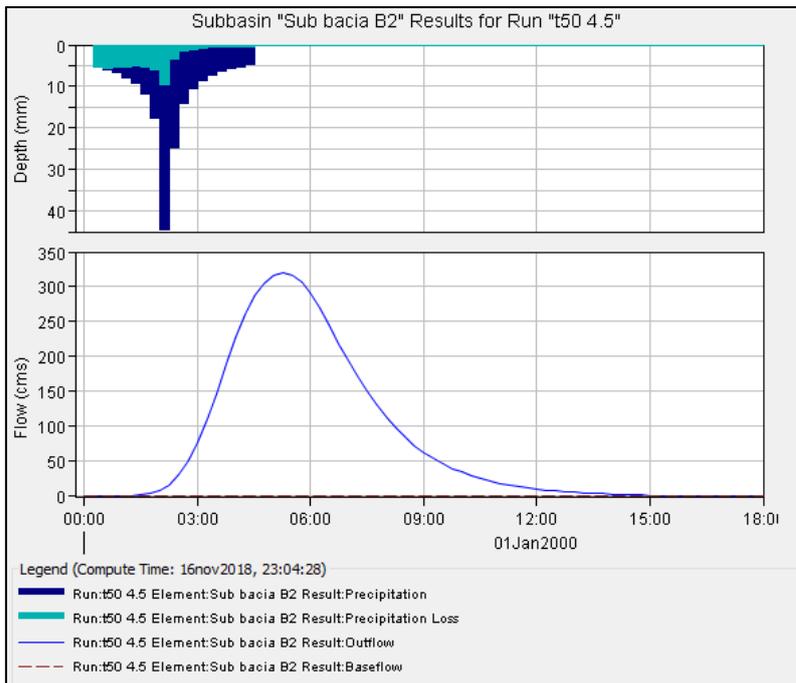
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39: Amortização do hidrograma de cheia da sub-bacia B1.



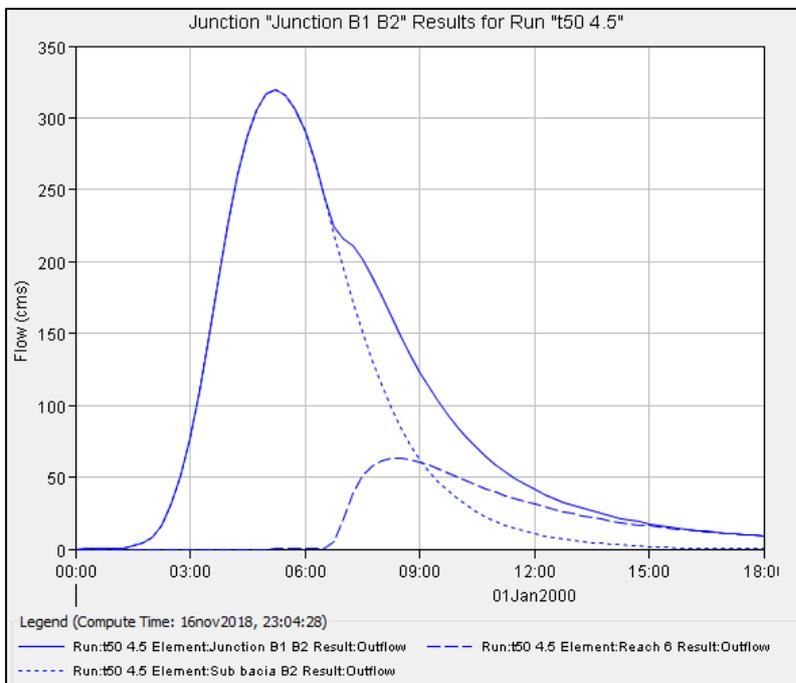
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B2.



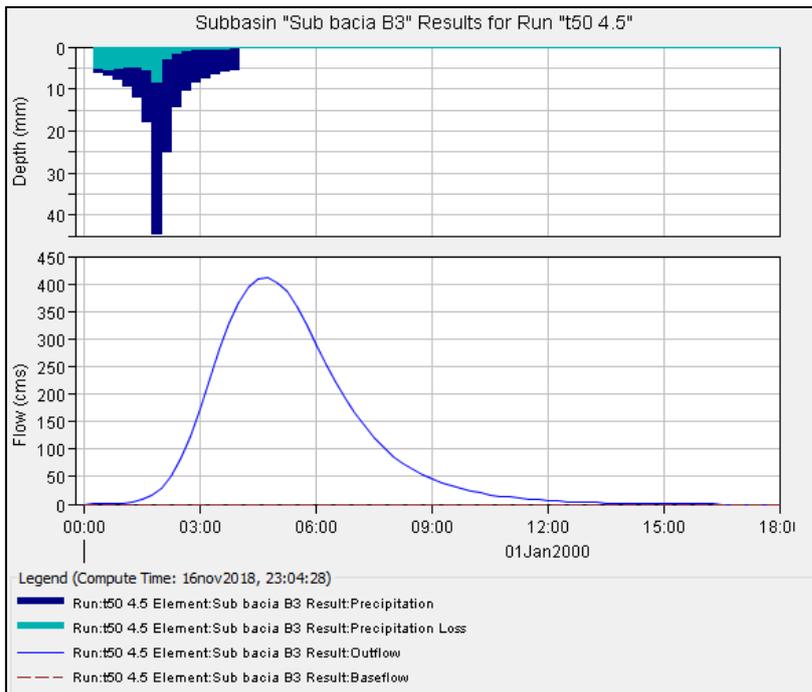
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B1-B2 e da sub-bacia B2.



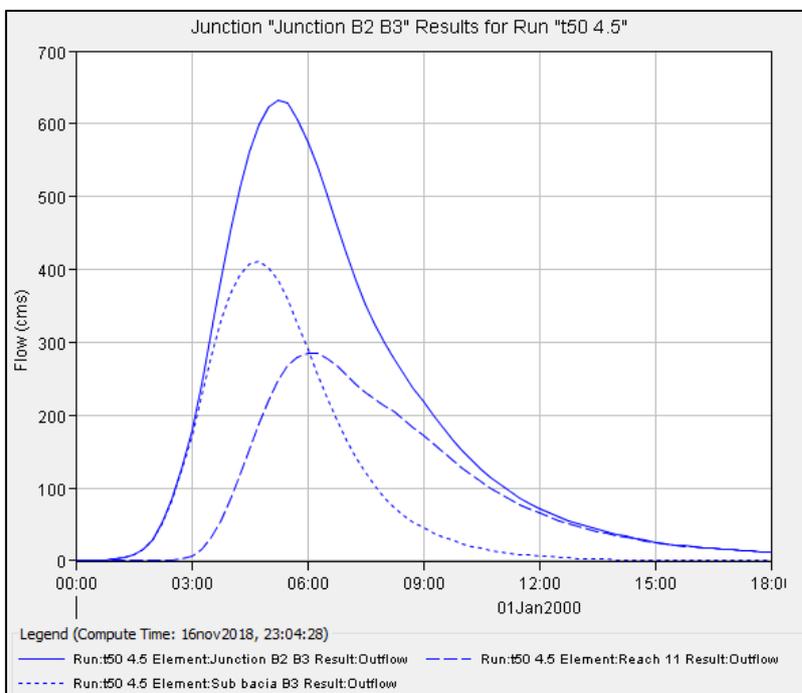
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B2-B3 e da sub-bacia B3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

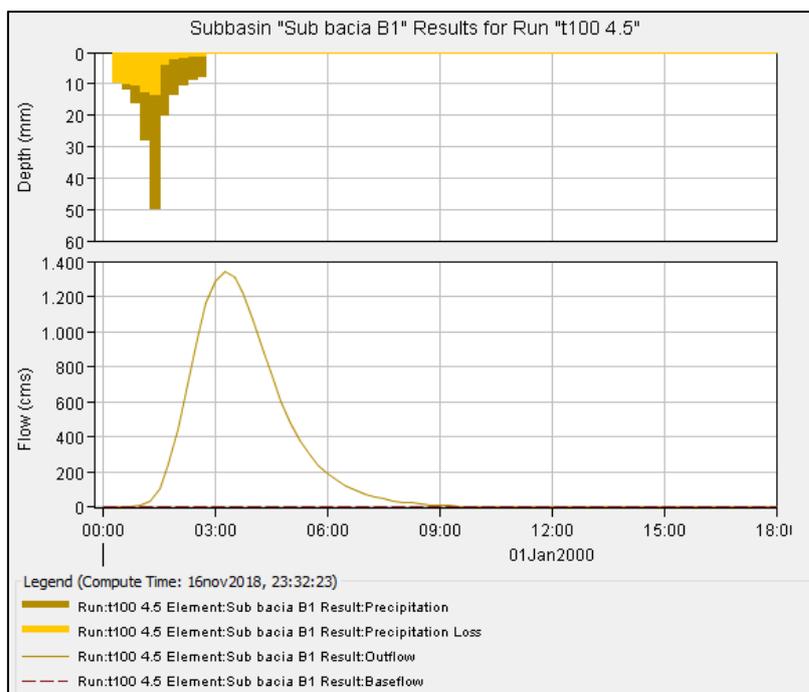
Tabela 7: Valores de vazão de pico na bacia hidrográfica, situação 1.

Situação 1: RCP 4,5 e T = 50 anos		
Elemento hidrológico	Vazão de pico, $q_p$	Unidade
Sub bacia B1	1133,30	$m^3/s$
Barragem Maracanaú	65,70	$m^3/s$
Sub bacia B2	320,00	$m^3/s$
Junction B1 B2	320,00	$m^3/s$
Sub bacia B3	410,50	$m^3/s$
Junction B2 B3	632,90	$m^3/s$

Fonte: Elaborado pelo autor.

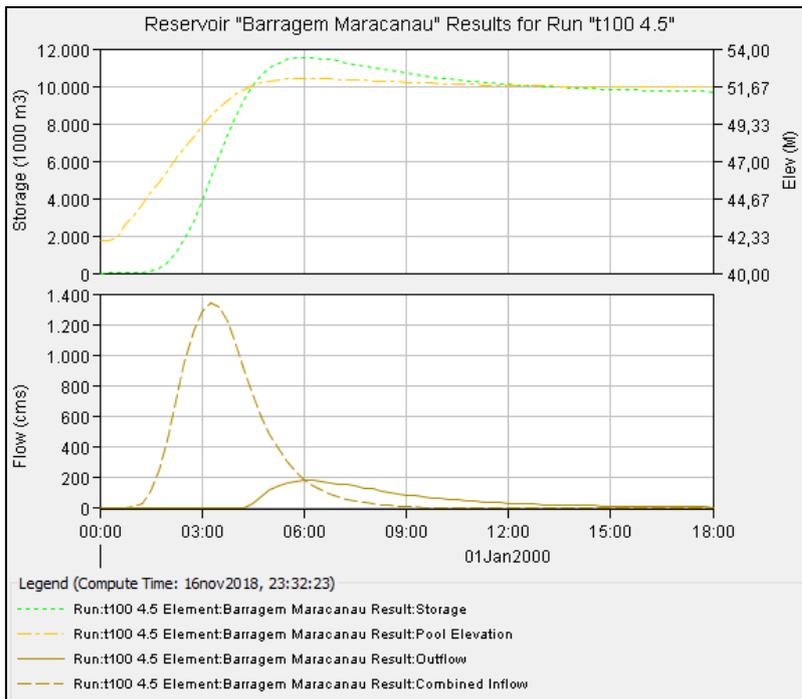
#### 4.3.2 Situação 2: RCP 4,5 e T = 100 anos

Figura 44: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B1.



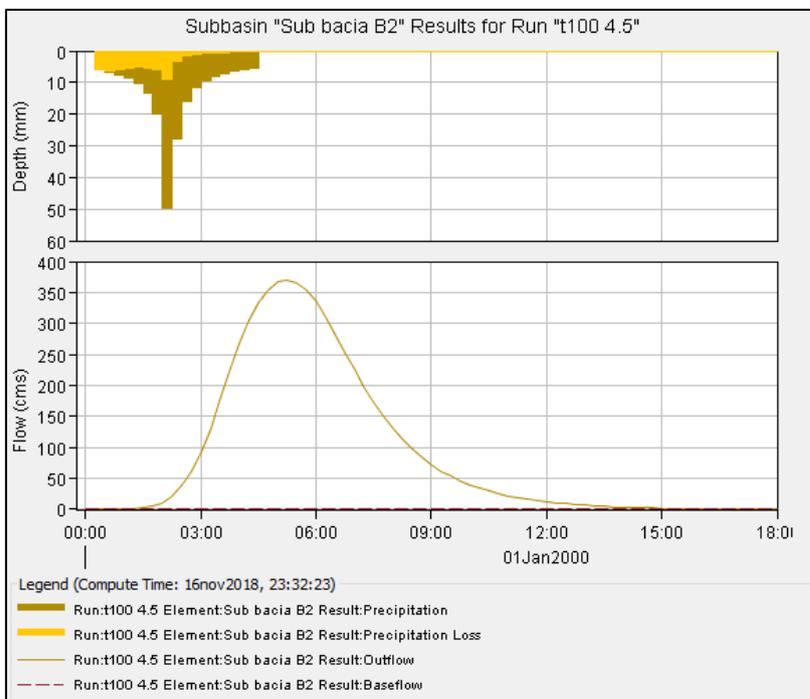
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45: Amortização do hidrograma de cheia da sub-bacia B1.



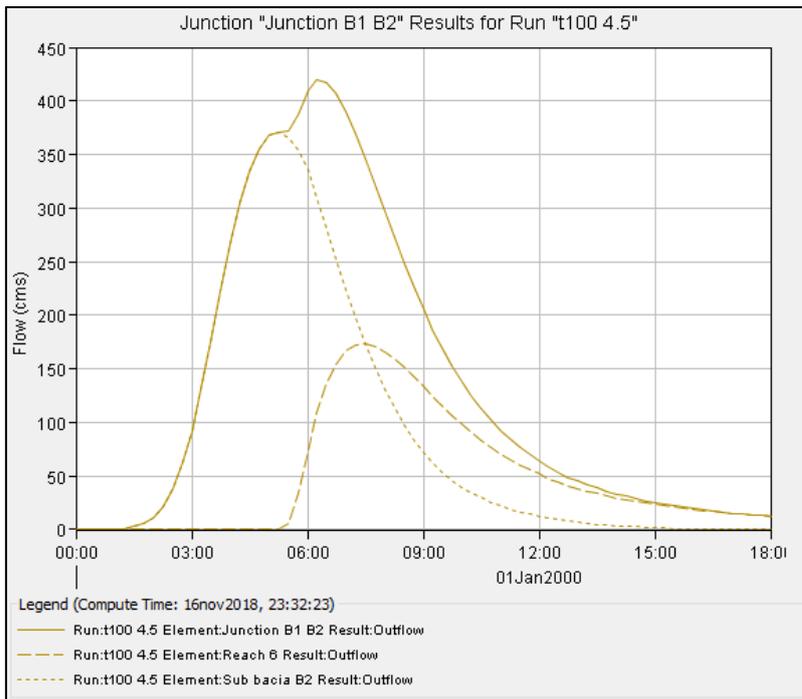
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B2.



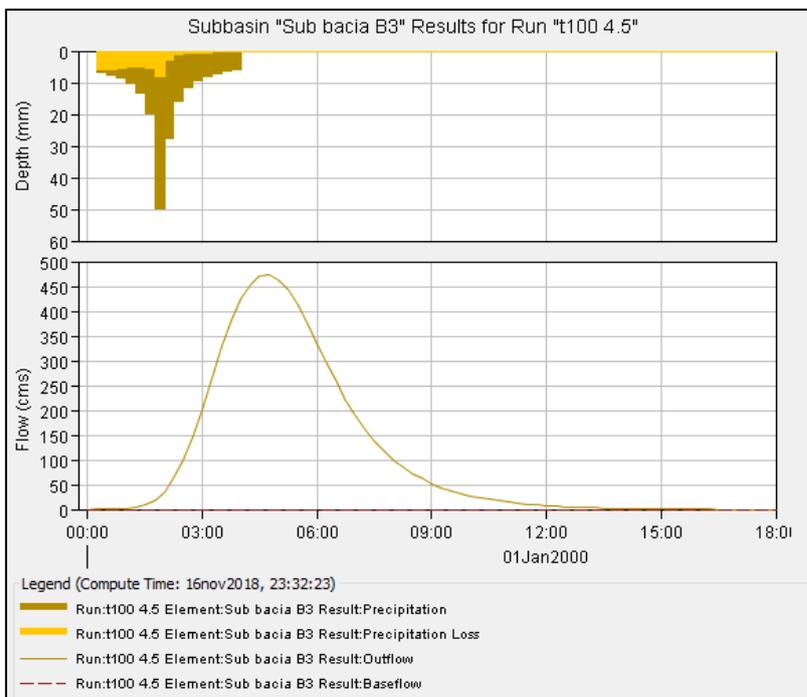
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B1-B2 e da sub-bacia B2.



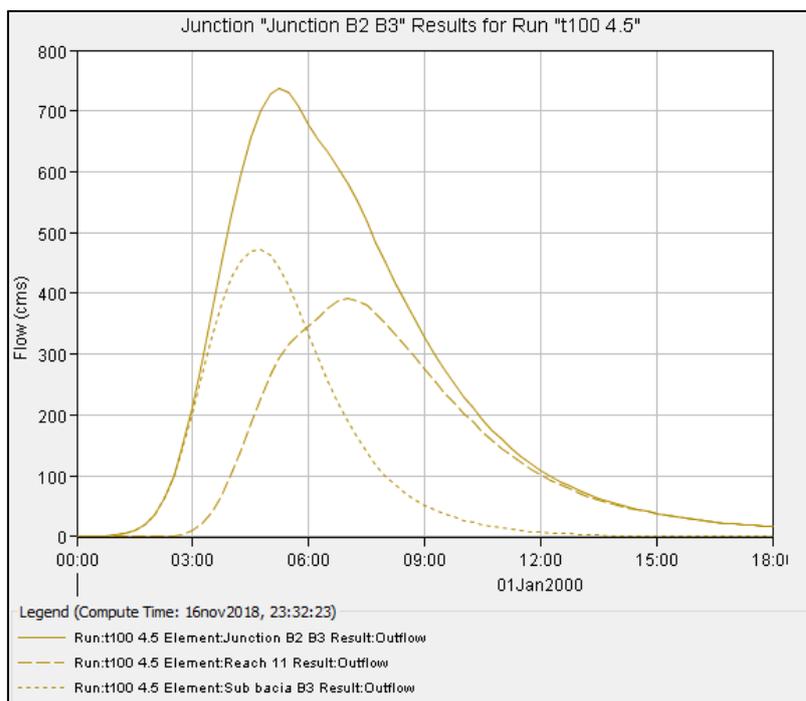
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B2-B3 e da sub-bacia B3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

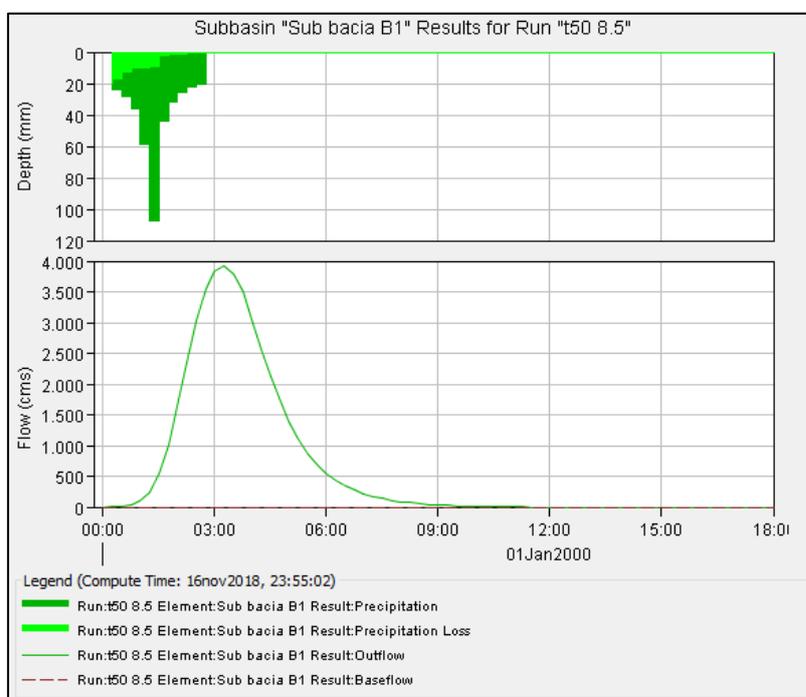
Tabela 8: Valores de vazão de pico an bacia hidrográfica, situação 2.

Situação 2: RCP 4,5 e T = 100 anos		
Elemento hidrológico	Vazão de pico, $q_p$	Unidade
Sub bacia B1	1338,9	m <sup>3</sup> /s
Barragem Maracanaú	183,2	m <sup>3</sup> /s
Sub bacia B2	370,7	m <sup>3</sup> /s
Junction B1 B2	419,3	m <sup>3</sup> /s
Sub bacia B3	472,8	m <sup>3</sup> /s
Junction B2 B3	737,9	m <sup>3</sup> /s

Fonte: Elaborado pelo autor.

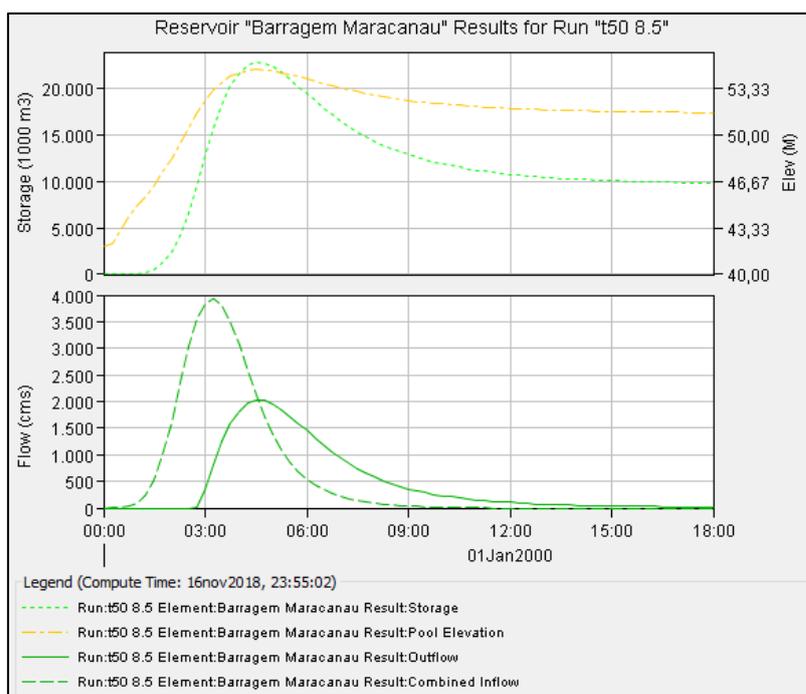
### 4.3.3 Situação 3: RCP 8,5 e $T = 50$ anos

Figura 50: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B1.



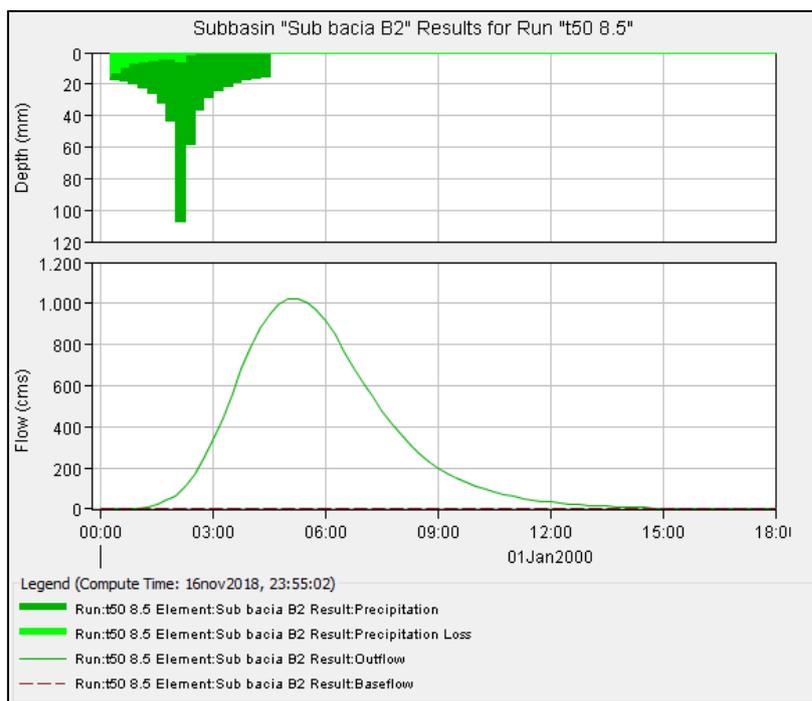
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 Amortização do hidrograma de cheia da sub-bacia B1.



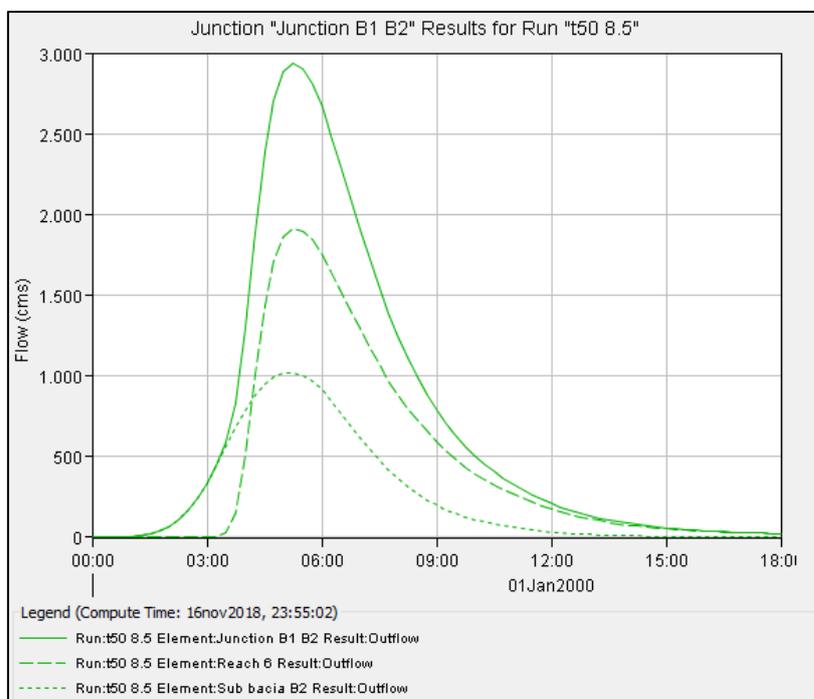
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B2.



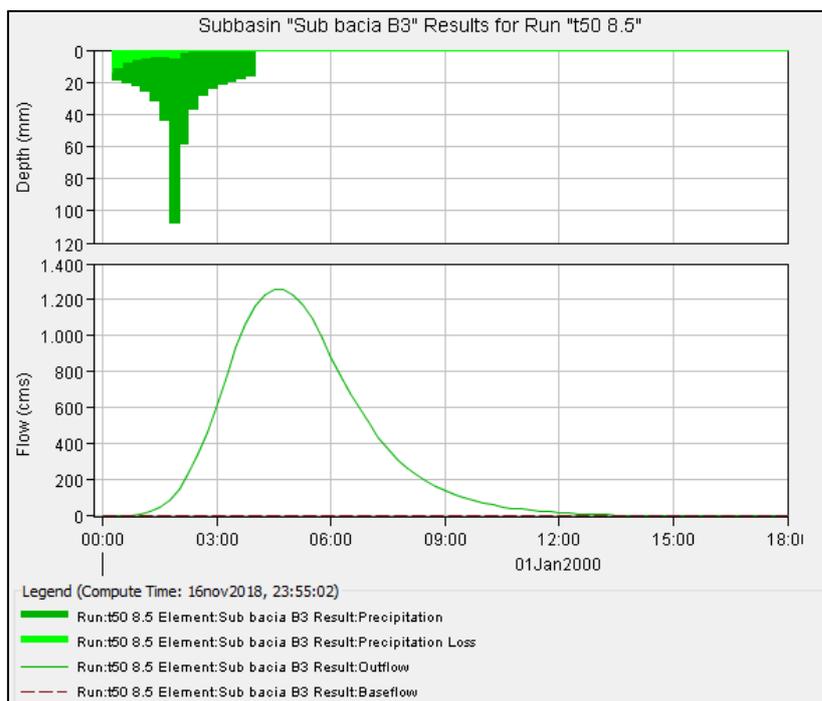
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B1-B2 e da sub-bacia B2.



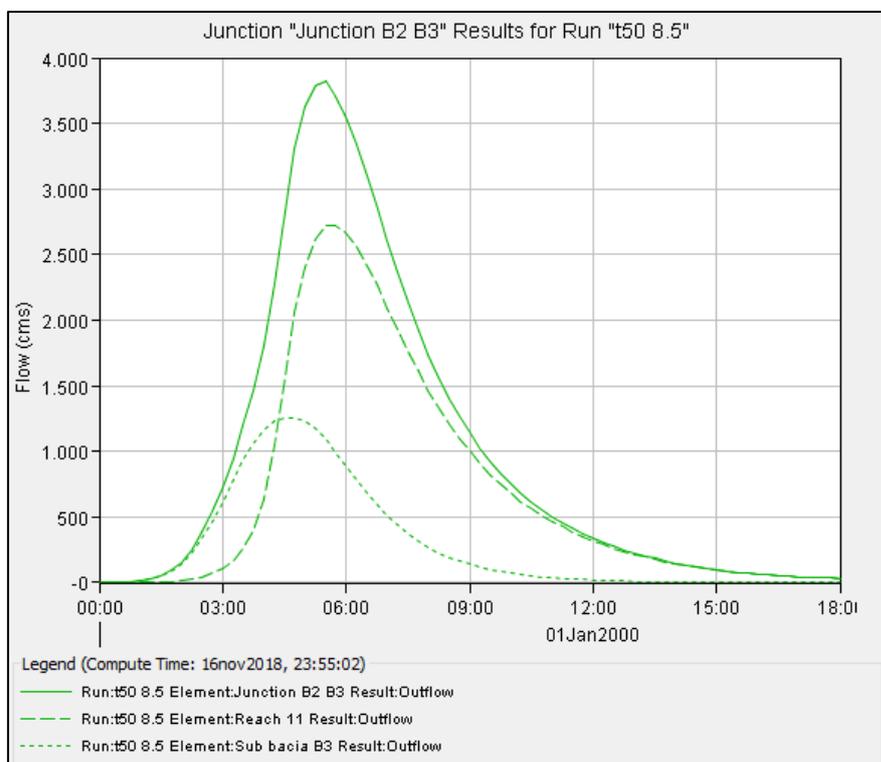
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54: Hietograma e respectivo hidrograma de cheia da sub-bacia B3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55: Sobreposição dos hidrogramas do trecho B2-B3 e da sub-bacia B3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9: Valores de vazão de pico na bacia hidrográfica, situação 3.

Situação 3: RCP 8,5 e T = 50 anos		
Elemento hidrológico	Vazão de pico, $q_p$	Unidade
Sub bacia B1	3924,8	m <sup>3</sup> /s
Barragem Maracanaú	2031,6	m <sup>3</sup> /s
Sub bacia B2	1021,4	m <sup>3</sup> /s
Junction B1 B2	2936,1	m <sup>3</sup> /s
Sub bacia B3	1260,7	m <sup>3</sup> /s
Junction B2 B3	3819,2	m <sup>3</sup> /s

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Faixas de Inundação

Finalmente, a partir dos valores de pico constantes nas tabelas 7, 8 e 9 do item 4.3, pode-se rodar o modelo hidráulico no HEC-RAS, inserindo os novos valores de vazão na aba *Edit* → *Steady Flow Data*.

De posse dos valores apresentados, decidiu-se simular o escoamento no rio conforme as vazões de pico calculadas apenas pelo cenário RCP 4,5, para os períodos de retorno  $T = 50$  e  $100$  anos. Isso se deve ao fato de as vazões geradas pelo cenário RCP 8.5 terem assumido valores altíssimos, o que certamente não produziria uma modelagem satisfatória, tendo em vista a limitação das medições realizadas nas seções transversais do rio e dos dados topográficos existentes. Dessa forma, serão comparadas a situação 0, referente ao projeto original, e as situações 1 e 2, calculadas com os valores obtidos no item anterior. As figuras 56 e 57 mostram a faixa de inundação da situação 0; as figuras 58 e 59 mostram a faixa de inundação da situação 1; e as figuras 60 e 61 mostram a faixa de inundação da situação 2.

A seguir, a tabela 10 mostra os valores calculados das áreas de inundação para as situações 0, 1 e 2. A tabela apresenta também um fator comparativo entre as áreas,

considerando como base comparativa a situação 0, a situação 1 e a situação 2, respectivamente.

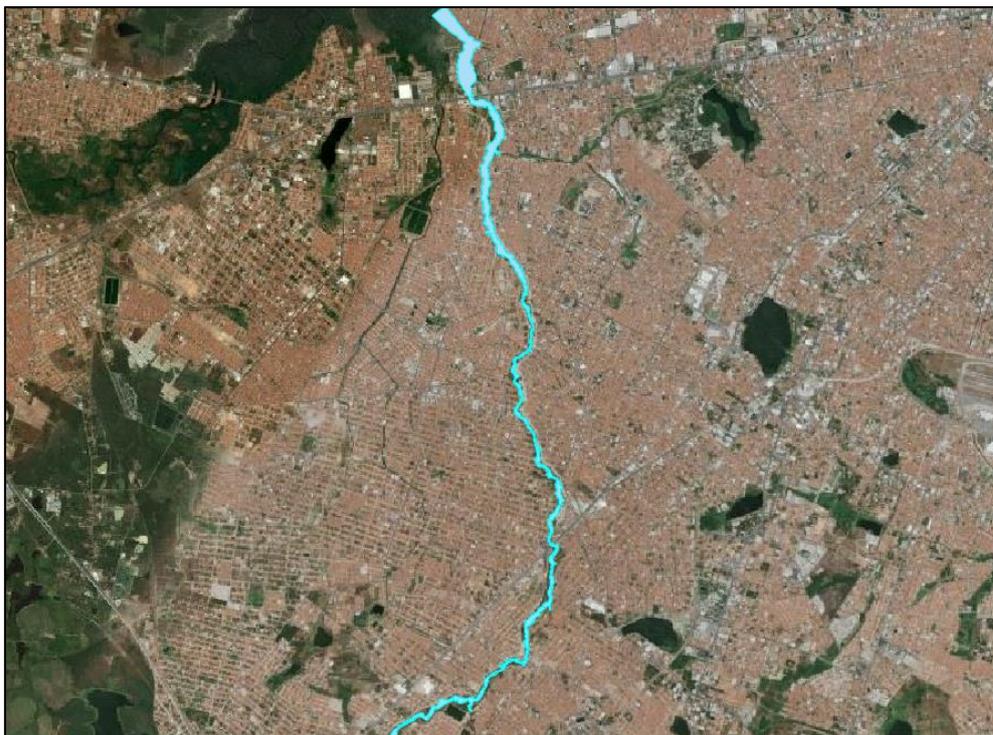
Tabela 10: Área das faixas de inundação e fator comparativo.

Faixa de Inundação	Área			
	inundada (km <sup>2</sup> )	A/A <sub>0</sub>	A/A <sub>1</sub>	A/A <sub>2</sub>
Situação 0	0,71	1	0,09	0,08
Situação 1	7,75	10,92	1	0,86
Situação 2	9,02	12,70	1,16	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

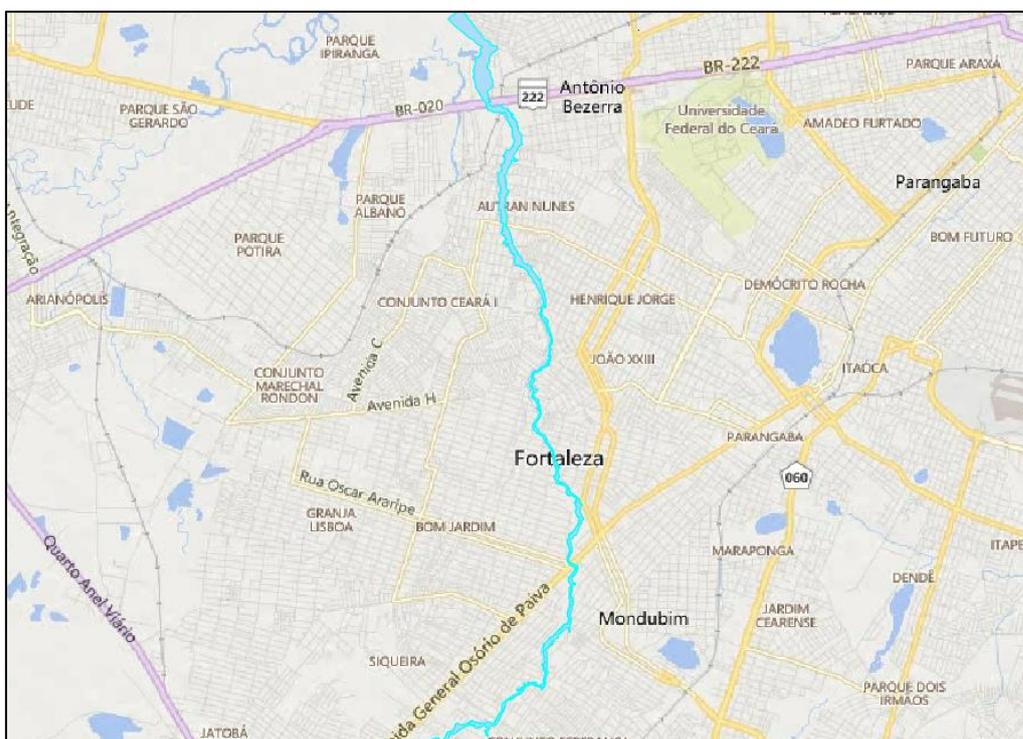
Pode-se visualizar que a área inundada da situação 1 é cerca de 11 vezes maior que a da situação 0, enquanto que a área inundada da situação 2 é quase 13 vezes maior. A diferença entre as áreas inundadas das situações 1 e 2, por sua vez, mesmo com um considerável aumento no período de retorno (de 50 para 100 anos), não é tão grande assim, sendo a da situação 2 apenas 16% maior que a da situação 1.

Figura 56: Faixa de inundação da situação 0, imagem de satélite.



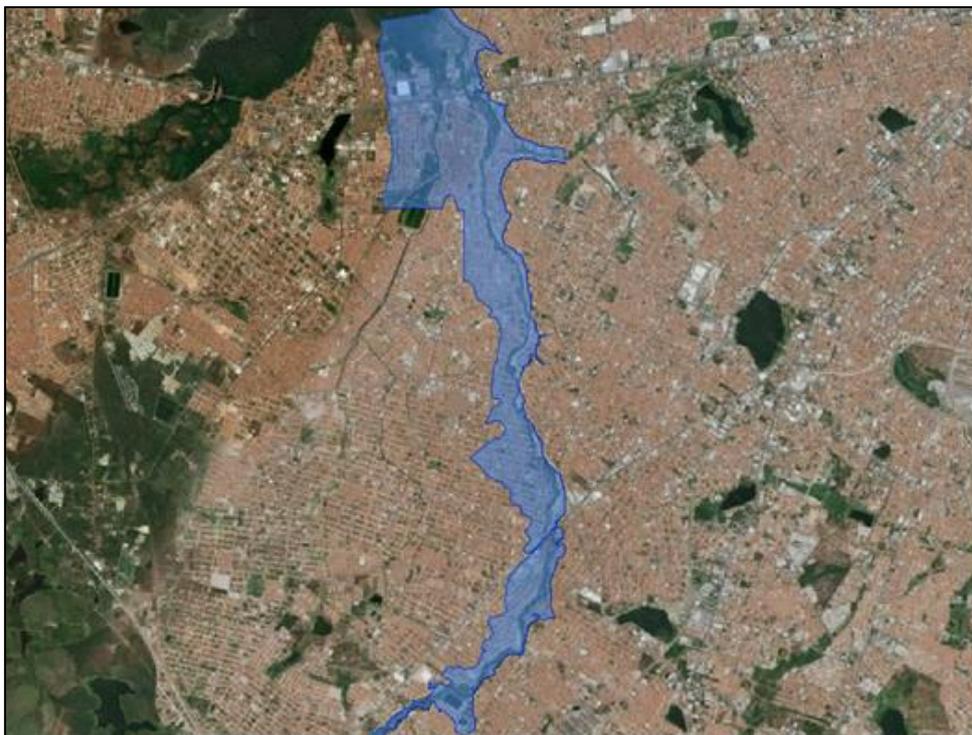
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57: Faixa de inundação da situação 0, mapa de ruas e avenidas.



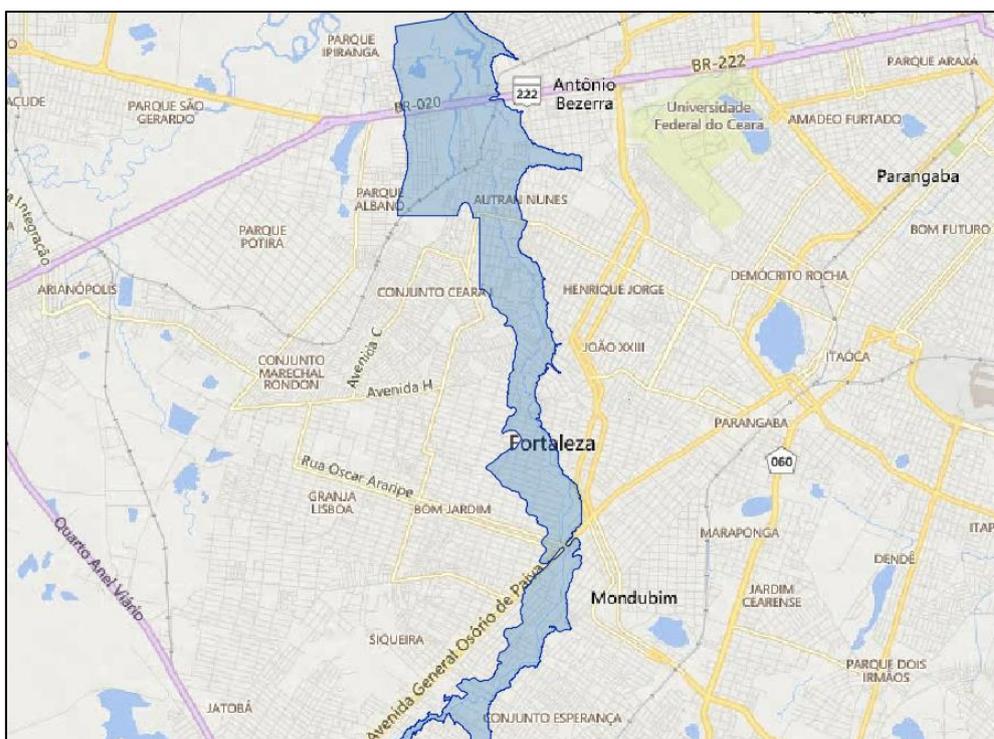
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58: Faixa de inundação da situação 1, imagem de satélite.



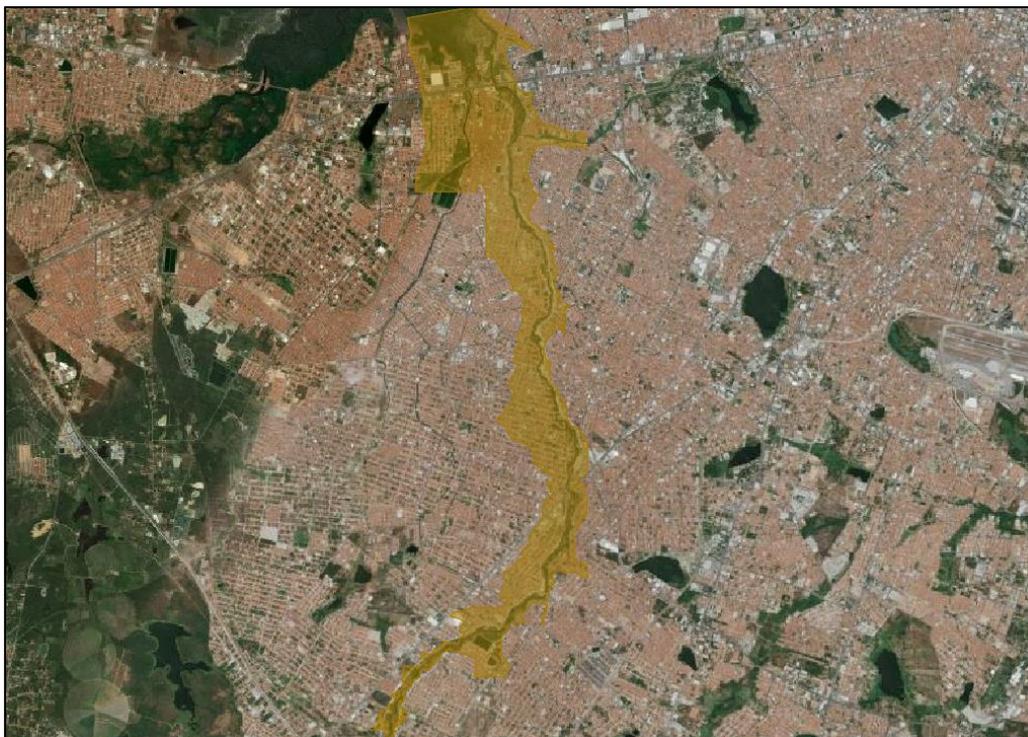
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59: Faixa de inundação da situação 1, mapa de ruas e avenidas.



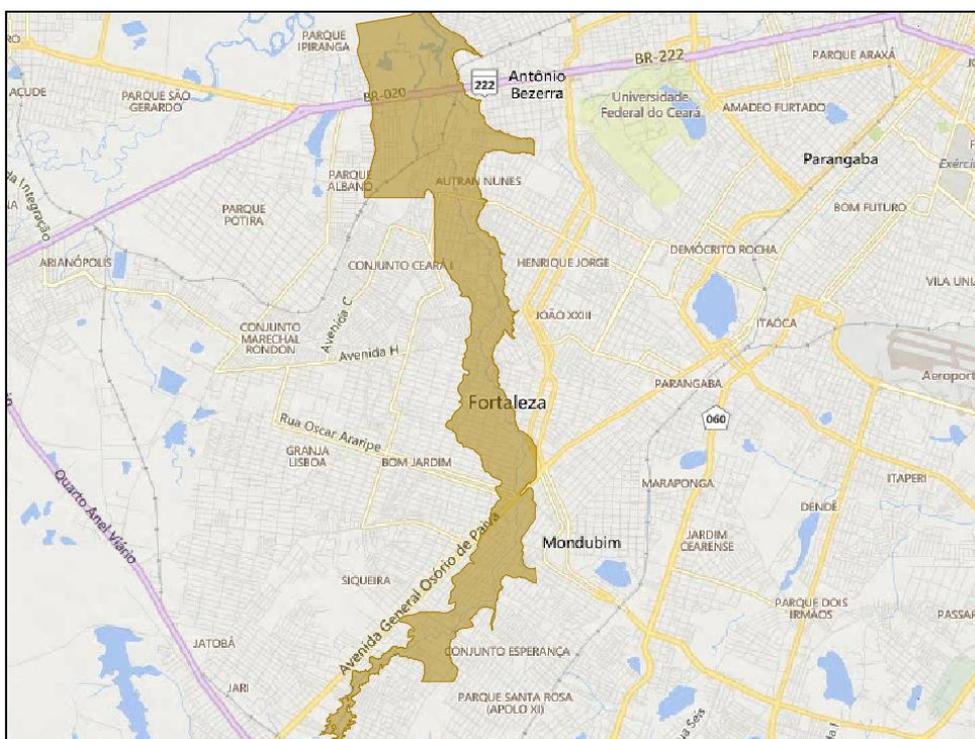
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 60: Faixa de inundação da situação 2, imagem de satélite.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61: Faixa de inundação da situação 2, mapa de ruas e avenidas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Estimativa de população em risco

Seguindo a metodologia descrita no item 3.5, dividiram-se as áreas de inundação das situações 1 e 2, calculadas no item 4.4, em três áreas cada, referentes aos trechos A, B e C. Em seguida, foi estimado o número de pessoas em risco para cada situação. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 11.

Tabela 11: Áreas divididas em trechos, densidade demográfica dos trechos e população em risco.

	Situação 1	Situação 2	Unidade
Área inundada total	7,75	9,02	km <sup>2</sup>
Área A	1,41	2,02	km <sup>2</sup>
Área B	2,54	2,99	km <sup>2</sup>
Área C	3,79	4,01	km <sup>2</sup>
Densidade demográfica, trecho A	13659,39		hab/km <sup>2</sup>
Densidade demográfica, trecho B	16201,44		hab/km <sup>2</sup>
Densidade demográfica, trecho C	16356,27		hab/km <sup>2</sup>
População em risco	122402	141623	hab

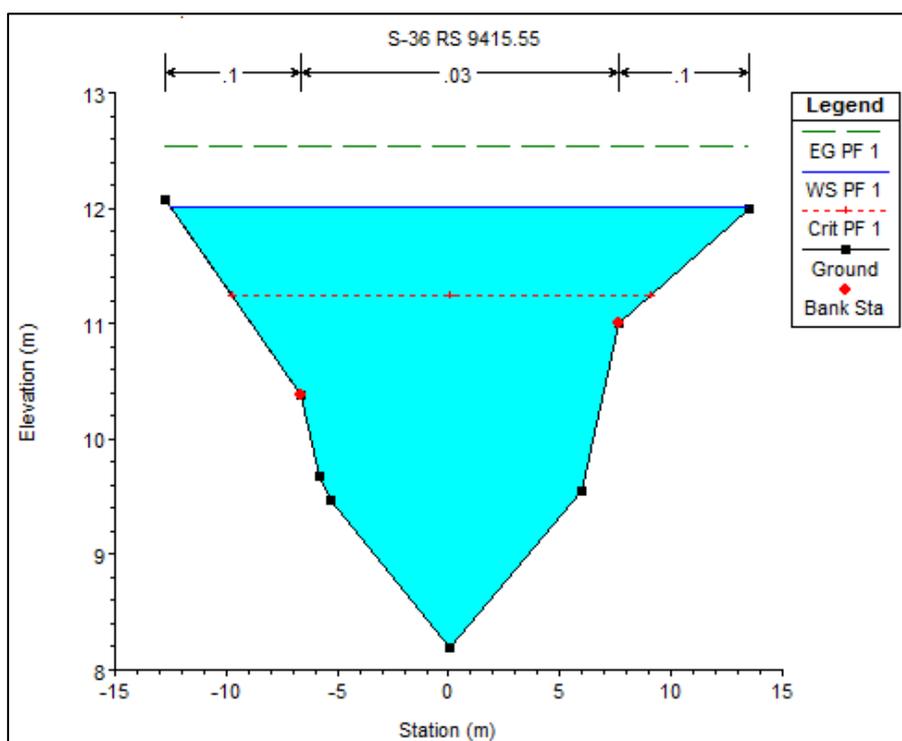
Fonte: Elaborado pelo autor.

A área inundada total da situação 2 é 16,4% maior que a área inundada total da situação 1, enquanto que a população em risco na situação 2 é 15,7% maior que a população em risco. Pode-se visualizar, nesse caso, uma relação muito íntima entre a taxa de aumento de área inundada e a taxa de aumento de população em risco. Com efeito, faz sentido, uma vez que se consideraram 3 trechos de densidade demográfica constante. Caso se considerasse uma densidade demográfica constante para toda a região, os valores seriam exatamente os mesmos. Dessa forma fica claro que, quanto maior a diversidade de trechos de densidades demográficas distintas, maior a chance de esses valores não serem tão semelhantes entre si.

#### 4.6 Altura da lâmina d'água

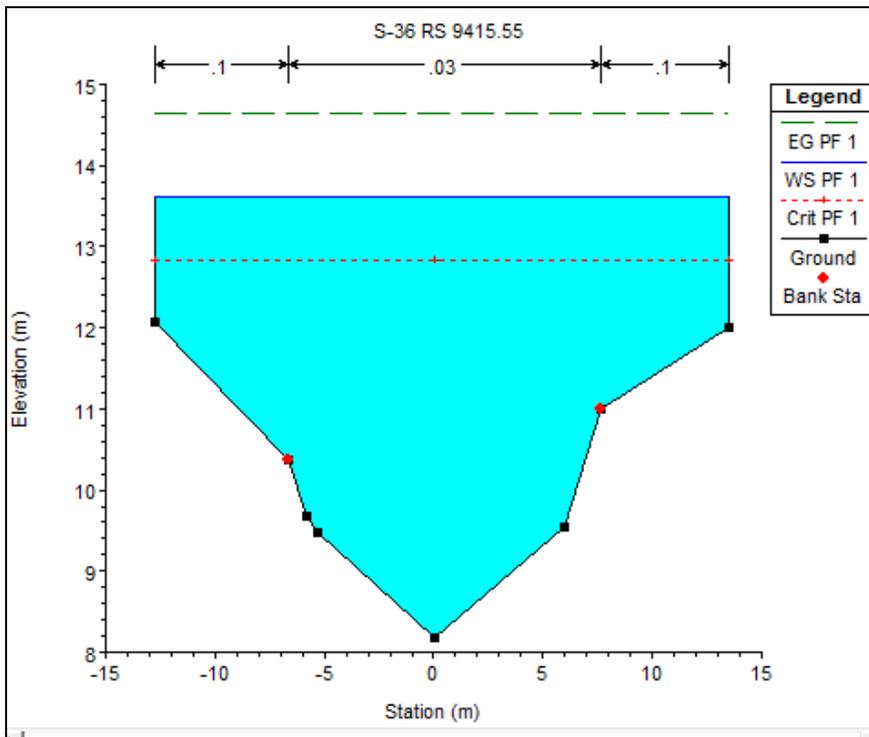
Na modelagem das situações 1 e 2, verificou-se a ocorrência de lâminas d'água superiores às da situação 0. Entretanto, é importante notar que a topografia medida em campo fora calculada somente até determinado limite, considerando os parâmetros do projeto original, situação 0. Desse modo, em algumas seções do rio, a superfície da água calculada pelo modelo ultrapassava o valor da topografia medida. Nesses casos, o HEC-RAS extrapola o avanço da lâmina d'água como uma linha reta perpendicular para cima, como se verifica, por exemplo, nas figuras 62, 63 e 64, comparando a mesma seção (S-36) para ambas as situações. Essa extrapolação faz com que a altura máxima de água seja superestimada e, conseqüentemente, a faixa de inundação também o seja.

Figura 62: Lâmina d'água na seção S-36, situação 0.



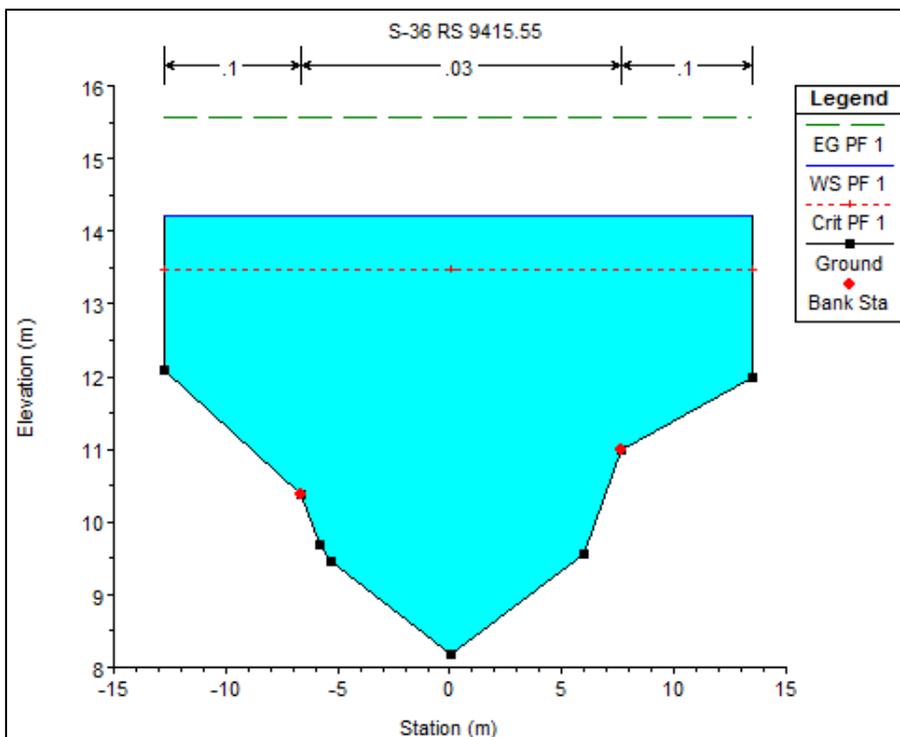
Fonte: Funasa (2008a).

Figura 63: Lâmina d'água na seção S-36, situação 1.



Fonte: Adaptado de Funasa (2008a).

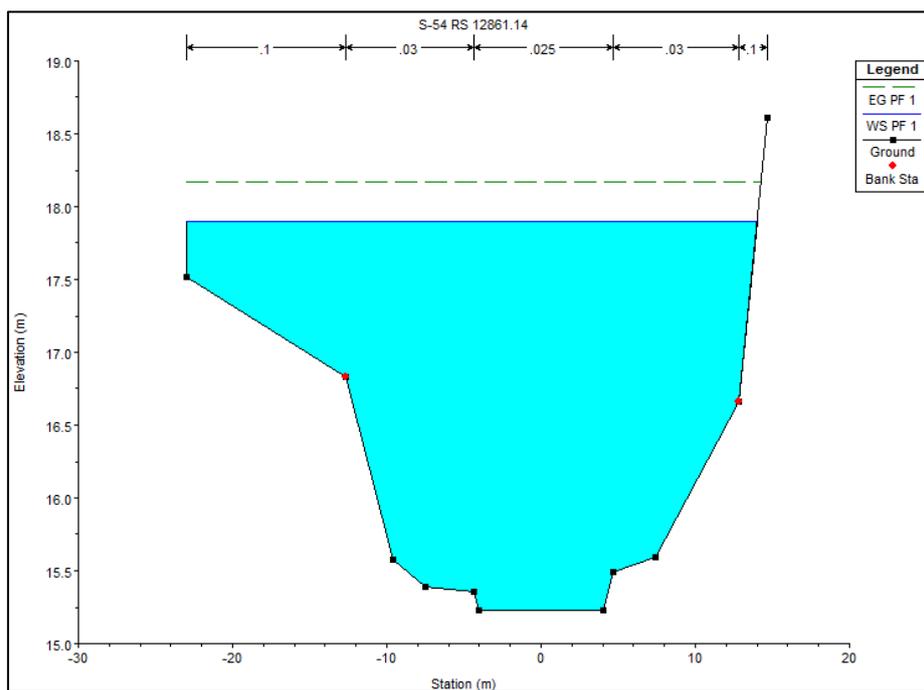
Figura 64: Lâmina d'água na seção S-36, situação 2.



Fonte: Adaptado de Funasa (2008a).

Todavia, tal empecilho também ocorre na situação 0, quando, mesmo com menores valores de vazão, a lâmina d'água invariavelmente supera as cotas medidas, como pode ser visto no lado esquerdo da seção S-54, figura 65. Logo, fica clara a importância da consistência dos dados altimétricos nesse tipo de projeto, uma vez que a extrapolação da faixa de inundação, apesar de a favor da segurança, é completamente indesejável.

Figura 65: Lâmina d'água na seção S-54, situação 0.



Fonte: Funasa (2008a).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A faixa de inundação da situação 0 foi delimitada da seção S-117 (RS: 24297.29) até a seção S-6 (RS:2570.70), o que compreende basicamente todo o traçado do rio, desde a desembocadura da barragem até a foz. A faixa de inundação das situações 1 e 2 foram delimitadas da seção S-76 (RS: 16525.62) até a seção S6 (RS: 2570.70). Considerando o trecho da situação 0 como o rio completo (100%), a faixa de inundação das situações 1 e 2 são referentes a um trecho do rio que equivale a 63% do rio total. Isso ocorreu devido ao fato de a topografia medida transversalmente ao longo do rio estar limitada a poucos metros de amplitude, abrangendo não muito mais do que a calha natural do rio. Dessa forma, para vazões pequenas, como na situação 0, foi possível estimar a faixa de inundação com precisão. Entretanto, para vazões mais altas, como nas situações 1 e 2, a medição da faixa de inundação carece de mais dados topográficos. Essa falta de dados pôde, felizmente, ser suprida a partir da seção S-76, aproximadamente, pois dali em diante havia dados adicionais de curvas de nível. Ainda assim, esses dados de curvas de nível possuíam falhas em algumas regiões, o que diminuiu a precisão da faixa demarcada. Tal fato pode ser percebido em alguns trechos da faixa de inundação das situações 1 e 2, onde foram demarcadas linhas praticamente retas, por não haver a topografia completa.

Após a análise da área das faixas de inundação, constante no item 4.4, ficam claras as grandes diferenças ocasionadas pela mudança das vazões de projeto, que são consequência direta dos novos valores de precipitação gerados pela equação de chuva mediante cenário de mudança climática, RCP 4,5. É importante lembrar que sequer se prosseguiu com a modelagem para os valores de vazão calculados para o cenário RCP 8,5, quando se viu que estes se mostravam muito superiores quando comparados à situação 1. Outros estudos (SABÓIA, 2016) chegaram a conclusões parecidas acerca do aumento de vazões escoadas para cenários de mudanças climáticas: aumento de 87,68% para o modelo CESM1-CAM5 e cenário RCP 4,5; e aumento de 459,89% para o mesmo modelo e cenário RCP 8,5.

O cenário RCP 4.5 é considerado brando e extremamente possível, para o ano de aproximadamente 2100, tendo em vista que considera uma estabilidade em no máximo 4.5 W/m<sup>2</sup> na forçante radioativa, mediante adoções de controle ambientais por parte das entidades responsáveis. Nesse sentido, estes resultados mostram a relevância de estudos

com a temática de mudanças climáticas, bem como a importância de se manter e até mesmo aumentar a quantidade de políticas ambientais que visem retardar as alterações climáticas antrópicas.

Outro ponto que merece destaque é a percepção da importância da barragem Maracanaú para o município de Fortaleza. Considerando a barragem operando em sua condição ótima, ou seja, volume de armazenamento nulo no início da modelagem, ela conseguiu diminuir a vazão de pico em 94,2% para a situação 1; 86,3% para a situação 2; e 48,2% para a situação 3. Isso faz com que o volume de água escoado seja muito menor, diminuindo assim a área de inundada.

A vantagem da aplicação do software HEC-HMS se dá pela possibilidade de adotar diferentes combinações de métodos para representação dos processos hidrológicos (interceptação, infiltração, escoamento direto), além de possuir uma precisão razoável (FELDMAN, 2000). Estudos posteriores podem avaliar diferentes resultados para a modelagem para modificações dos métodos, como tipo de hidrograma unitário, método de propagação de cheias, dentre outros, como também considerar efeitos que não foram contabilizados no presente estudo, como taxa de evaporação, escoamento de base, etc.

Lembrando que a dragagem realizada é atribuída às condições iniciais do projeto, poderia ser objeto de novos trabalhos a modelagem sedimentológica, aferindo o nível de reassoreamento do rio, através de estimativas de erosão na bacia e do transporte de sedimentos ao longo do rio.

É válido notar que a bacia do rio Maranguapinho localiza-se em uma região litorânea, com sua foz desaguando no oceano atlântico, de forma que, uma vez coincidindo a ocorrência de fenômenos pluviométricos intensos com situações de maré alta, o escoamento superficial pode ser dificultado de maneira significativa, aumentando a quantidade de áreas suscetíveis à inundação (ALMEIDA, 2012). Assim sendo, seria interessante a realização de estudos que promovessem esta análise, averiguando se o efeito de maré poderia influenciar o escoamento superficial na bacia.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. Q. **Riscos Ambientais e Vulnerabilidade nas Cidades Brasileiras:** conceitos, metodologias e aplicações. Cultura Acadêmica Editora, São Paulo, 2012.

ALVES, J. A **Engenharia nos ensina:** alagamento, enchente ou inundação? 2014. Disponível em: <<http://aengenharianosensina.blogspot.com.br/2014/01/foi-alagamento-enchente-ou-inundacao.html>>. Acesso em 27 mar. 2018.

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. **Introdução à Engenharia** Conceitos, Ferramentas e Comportamentos. 4. ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 2013.

BERZ, Gerhard. Flood disasters: lessons from the past - worries for the future. **Proceedings of The Ice: Water and Maritime Engineering**, v. 148, n. 1, p.57-58, mar. 2001.

BLAINSKI, E., SILVEIRA, F., CONCEIÇÃO, G., GARBOSSA, L.; VIANNA, L. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 24, n. 1, p.65-70, mar. 2011.

CAMPOS, J. N. **Lições em modelos e simulação hidrológica.** 1. ed., 166 p., Fortaleza, ASTEF/Expressão Gráfica, 2009.

CANÇADO, Vanessa Lucena. **Consequências Econômicas das Inundações e Vulnerabilidade: Desenvolvimento de metodologia para avaliação do impacto nos domicílios e na cidade.** 2009. 417 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/245D.PDF>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

CASTRO, Silvia Machado de; ALMEIDA, Josimar Ribeiro de. Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p.519-534, dez. 2012

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrologia Aplicada.** Bogotá, McGraw-Hill, 1994.

CIGB, Comissão Internacional de Grandes Barragens. **As barragens e a água do mundo**. Editora CIGB/ICOLD, 2008. Disponível em: <[http://www.cbdb.org.br/publicacoes/DAMS\\_AND\\_THE\\_WORLDS\\_WATER\\_traduc\\_ao.pdf](http://www.cbdb.org.br/publicacoes/DAMS_AND_THE_WORLDS_WATER_traduc_ao.pdf)>. Acesso em 29 dez. 2018.

DORE, Mohammed H. I. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? **Environment International**, v. 31, n. 8, p.1167-1181, out. 2005.

ESLAMIAN, S. **Handbook of Engineering Hydrology: Modeling Climate Change and Variability**. v. II, CRC Press - Taylor and Francis Group, 2014.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic Modeling System (HEC-HMS): Technical Reference Manual**. Devis, 2000.

FERREIRA, Aline Nogueira. **Efeitos da dragagem sobre a qualidade da água e estrutura da assembleia fitoplanctônica em dois ambientes costeiros tropicais da Baía de Todos os Santos**. 2016. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geologia - Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21568>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

FONTENELLE, Alexandre de Sousa. **Proposta Metodológica de Avaliação de Riscos em Barragens do Nordeste Brasileiro: Estudo de Caso: Barragens do Estado do Ceará**. 2007. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil - Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16340>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. **Projeto Básico de Dragagem do Rio Maranguapinho: Fase III, Tomo I, Plano de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Fortaleza (PSARMF)**, 2008a.

FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. **Projeto Básico da Barragem Maracanaú: Fase III, Tomo I, Plano de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Fortaleza (PSARMF)**, 2008b.

FUSS, Sabine; CANADELL, Josep G.; PETERS, Glen Philip; TAVONI, M.; ANDREW, Robbie; CIAIS, Philippe; JACKSON, Robert B.; JONES, Chris D.; KRAXNER, Florian; NAKICENOVIC, Nebojsa; LE QUÉRÉ, Corinne; RAUPACH, Michael R.; SHARIFI,

Ayyoob; SMITH, Pete; YAMAGATA, Yyoshiki. Betting on negative emissions. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 10, p.850-853, 21 set. 2014.

GOES FILHO, Hildebrando de Araújo. **Dragagem e Gestão dos Sedimentos**. 2004. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp084052.pdf>> Acesso em: 26 dez. 2018.

GROISMAN, P. Y., KNIGHT, R. W., EASTERLING, D. R.; KARL, T. R. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. **Journal of Climate**, v. 18, n. 9, p.1326-1350, mai. 2005.

HANSEN, J., RUEDY, R., SATO, M.; LO, K. Global Surface Temperature Change. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 4, 14 dez. 2010.

HANSEN, J.; SATO, M.; KHARECHA, P.; BEERLING, D.; BERNER, R.; MASSON-DELMOTTE, V.; PAGANI, M.; RAYMO, M.; ROYER, D.; ZACHOS, J C. Target Atmospheric CO<sub>2</sub>: Where Should Humanity Aim? **The Open Atmospheric Science Journal**, v. 2, n. 1, p.217-231, 5 nov. 2008.

HASSANZADEH, Elmira; NAZEMI, Alireza; ELSHORBAGY, Amin. Quantile-Based Downscaling of Precipitation Using Genetic Programming: Application to IDF Curves in Saskatoon. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 5, p.943-955, mai. 2014.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Portal do IBGE**, 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>> Acesso em: 19 nov. 2018.

IPCC. **16 Years of Scientific Assessment in Support of the Climate Convention**, 2004. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/pdf/10th-anniversary/anniversary-brochure.pdf>> Acesso em: 13 abr. 2018.

IPCC. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. 22 p., Bruxelas, 2007.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 176 p.,

Brasília, 2007. Disponível em: < <http://bibspi.planejamento.gov.br/handle/iditem/185>> Acesso em: 29 dez. 2018.

IWASHIMA, T. e YAMAMOTO, R. A statistical analysis of the extreme events: Long-term trend of heavy daily precipitation. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 72, n. 5, p. 637-640, out. 1993.

LICCO, Eduardo Antonio; DOWELL, Silvia Ferreira Mac. Alagamentos, Enchentes Enxurradas e Inundações: digressões sobre seus impactos sócio econômicos e governança. **Iniciação - Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística**. Edição Temática em Sustentabilidade, São Paulo, v. 5, n. 3, p.160-174, dez. 2015.

LIMA, Letícia Santos de. **Implementação de um Modelo Hidrológico Distribuído na Plataforma de Modelagem Dinâmica Ego**. 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/MPBB-8JPPT4>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

LOUREIRO, Caroline Vitor. **A vulnerabilidade como indicador de qualidade ambiental em área do baixo curso dos rios Maranguapinho e Ceará/CE: subsídios para o zoneamento ambiental**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/7605>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

MCCUEN, Richard H. **Hydrologic Analyses and Design**. Nova Jersey, Pearson Education, 2. ed., 814 p., 1998.

MENDIONDO, Eduardo; MENDES, Heloisa. Histórico da Expansão Urbana e Incidência de Inundações: O Caso da Bacia do Gregório, São Carlos - SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p.17-27, 2007.

MIGNOT, E.; PAQUIER, A.; HAIDER, S. Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations. **Journal of Hydrology**, v. 327, n. 1-2, p.186-199, jul. 2006.

Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília, 2002. Disponível em: < <http://www.mi.gov.br/seguranca-e-inspecao-de-barragens>> Acesso em: 29 dez. 2018.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Controle de Inundações**. 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/aguas-urbanas/control-de-inunda%C3%A7%C3%B5es>> Acesso em: 9 abr. 2018.

MOSS, Richard H.; EDMONDS, Jae A.; Hibbard, Kathy A.; MANNING, Martin R.; ROSE, Steven K.; VAN VUUREN, Detlef P.; CARTER, Timothy R.; EMORI, Seita; KAINUMA, Mikiko; KRAM, Tom; MEEHL, Gerald A.; MITCHELL, John F. B.; NAKICENOVIC, Nebojsa; RIAHI, Keywan; SMITH, Steven J.; STOUFFER, Ronald J.; THOMSON, Allison M.; WEYANT, John P.; WILBANKS, Thomas J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p.747-756, 11 fev. 2010.

MUSY, André; HIGY, Christophe. **Hydrology**: a science of nature. CRC Press - Taylor and Francis Group, English Edition, 346 p., 2011.

NASA, The National Aeronautics and Space Administration. **Climate Change**: How do we know? 2018. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/evidence/>> Acesso em: 15 mar. 2018.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. **A Model Based on Ocean and Atmosphere Interactions**. 2017. Disponível em: <[https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate\\_model/](https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/)> Acesso em: 26 mar. 2018.

NOBRE, C.; REID, J.; VEIGA, A. S. **Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas**. Rede Clima/INPE, 44 p., 2012.

PARKINSON, J.; MARK, O. **Urban Stormwater Management in Developing Countries**. Londres, The International Water Association (IWA) Publishing, 222 p., 2005.

PASSAMANI, Fernanda Caliman. **Análise da macrodrenagem de uma bacia costeira com auxílio de modelagem hidrológica e hidráulica**. 2016. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/jspui/handle/10/9519>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

PHILLIP, R. **Kit de Treinamento SWITCH**: Gestão Integrada das Águas na Cidade do Futuro. Módulo 4 – Manejo de Águas Pluviais: Explorando opções. São Paulo, 1. ed, 2011.

PMF, Prefeitura Municipal de Fortaleza. Base de Dados: Laboratório de Estudos de População (LEPOP) 2007. Disponível em: <[http://www.uece.br/basededados/index.php?option=com\\_content&view=article&id=34:populacao-populacao-area-e-densidade-demografica-por-bairros-fortaleza-2000&catid=1:cattabpopulacao&Itemid=7](http://www.uece.br/basededados/index.php?option=com_content&view=article&id=34:populacao-populacao-area-e-densidade-demografica-por-bairros-fortaleza-2000&catid=1:cattabpopulacao&Itemid=7)> Acesso em: 19 nov. 2018.

PONCE, V. M. e HAWKINGS, R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1, n.1, p. 11-19, janeiro de 1996.

RAMOS, Alessandra Maria. **Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade**. 2010. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5111>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

SABÓIA, Marcos Abílio de Medeiros. **Estratégia Robusta para a Gestão de Drenagem Urbana em Cenário de Mudança do Clima**. 2016. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil - Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/21176/1/2016\\_tese\\_mamsaboia.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/21176/1/2016_tese_mamsaboia.pdf)>. Acesso em: 26 dez. 2018.

SANTOS, André Gonçalo dos. **Acoplamento do modelo atmosférico WRF ao modelo hidrológico SCS/HMS para a previsão de cheias na bacia do Paraíba do Meio em Alagoas**. 2016. 132 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil - Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/21101>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

SRIVASTAV, Roshan K.; SCHARDONG, Andre; SIMONOVIC, Slobodan P.. Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves under Climate Change. **Water Resources Management**, v. 28, n. 9, p.2539-2562, mai. 2014.

SCHARDONG, Andre; SRIVASTAV, Roshan; SIMONOVIC, Slobodan. Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p.176-185, 2014.

SCS, Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook**. Washington, 1985.

SEUMA, Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente de Fortaleza. **Mapa de Fortaleza**. 2018. Disponível em: <<http://www.anuariooceara.com.br/mapa-de-fortaleza>> Acesso em: 19 nov. 2018.

SHERMAN, L. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, v. 108, p. 501-505, 1932.

SILVA, Julierme Siriano da. **Modelo multicritério de apoio à decisão para classificação de risco em barragens**. 2017. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/538>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

SINGH, P.; BHUNYA, P.; MISHRA, S.; CHAUBE, U. A sediment graph model based on SCS-CN method. **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 1, p. 244–255, 2008.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. e TUCCI, C. E. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.17, n.2, p. 9-18, 2012.

SPEIGHT, L. **Analysis of the Causes of Flood Risk in Urban Areas**. The University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne, 2006.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC., S. P. **Computerized Tool for the Development of Intensity-Duration-Frequency Curves under a Changing Climate**. London, Ontario, Canada. The University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering Manual Técnico, v. 1, 2015.

STUDART, T. M. **Apostila de Hidrologia Aplicada**. 2015. Disponível em: <<http://www.deha.ufc.br/ticianana>> Acesso em: 14 mai. 2018.

TAYLOR, K. E., STOUFFER, R. J. e MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, 464 p., abr. 2012.

TUCCI, C. E. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 2. ed., 939 p., 1993.

TUCCI, C. E. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 2. ed., 678 p., 2005.

TUCCI, C., PORTO, R.; BARROS, M. **Drenagem urbana**. Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 1. ed., 1995.

UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction**. Gênova, 2009. Disponível em: <<https://www.unisdr.org/we/inform/publications/7817>> Acesso em: 29 dez. 2018.

USACE, The United States Army Corps of Engineers. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual**. Davis, 2000.

USACE, The United States Army Corps of Engineers. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Applications Guide**. Davis, 2015.

USACE, The United States Army Corps of Engineers. **HEC-RAS River Analysis System: Applications Guide**. Davis, 2016a.

USACE, The United States Army Corps of Engineers. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual**. Davis, 2016b.

VAN VUUREN, Detlef; EDMONDS, James A.; KAINUMA, M.; RIAHI, Keywan; THOMSON, Allison M.; HIBBARD, Kathleen A.; HURTT, George; KRAM, Tom; KREY, Volker; LAMARQUE, Jean-Francois; MASUI, Toshihiko; MEINHAUSEN, Malte; NAKICENOVIC, Nebojsa; SMITH, Steven J.; ROSE, Steven K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 5-31, 2011.

VELOSA, João Miguel Nunes Baptista Cima de. **Os efeitos das grandes barragens no desenvolvimento socioeconômico local**. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: <[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139416786/Tese\\_1.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139416786/Tese_1.pdf)>. Acesso em: 26 dez. 2018.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill, 245 p., 1975.

WILKEN, Paulo Sampaio. **Engenharia de Drenagem Superficial**. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 478 p., 1978.

XIAO, Bo; WANG, Qing-Hai; FAN, Jun; HAN, Feng-Peng; DAI, Quan-Hou. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity. **Pedosphere**, v. 21, n. 6, p. 738-749, 2011.