



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

GASTÃO CERQUINHA DA FONSECA NETO

VULNERABILIDADE DA MACRODRENAGEM DO RIACHO CAVOUCO EM RECIFE
EM RESPOSTA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E À ABERTURA DAS COMPORTAS
DA BARRAGEM DE CARPINA

Recife

2018

GASTÃO CERQUINHA DA FONSECA NETO

VULNERABILIDADE DA MACRODRENAGEM DO RIACHO CAVOUÇO EM RECIFE
EM RESPOSTA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E À ABERTURA DAS COMPORTAS
DA BARRAGEM DE CARPINA

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos com ênfase em Recursos Hídricos

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

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

F727v Fonseca Neto, Gastão Cerquinha da.
Vulnerabilidade da macrodrenagem do riacho Cavouco em Recife em resposta às mudanças climáticas e à abertura das comportas da barragem de Carpina/ Gastão Cerquinha da Fonseca Neto - 2018.
85folhas, Il., e Tab.

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

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.
Inclui Referências Anexos e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Aumento do nível dos mares. 3. Drenagem urbana. 4. Hec-ras. 5. Inundações urbanas. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-376



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**VULNERABILIDADE DA MACRODRENAGEM DO RIACHO CAVOUCO EM
RECIFE EM RESPOSTA ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E À ABERTURA
DAS COMPORTAS DA BARRAGEM DE CARPINA**

defendida por

Gastão Cerquinha da Fonseca Neto

Considera o candidato APROVADO

Recife, 3 de setembro de 2018

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Leijdane Maria Maciel de Oliveira – UFPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva – UFPE
(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu guia. Ao professor e orientador, Prof. Jaime Cabral, por acreditar, apoiar e incentivar a realização deste trabalho. Aos meus pais e irmãos que desde cedo me ensinaram a importância dos estudos e me incentivaram de todas as formas. A minha noiva, Tatiane Guedes, que vivenciou todo o processo de construção deste trabalho, apoiando e incentivando. A todos que fazem o Grupo de Recursos Hídricos da UFPE – professores, pós-graduandos, graduandos e funcionários. Aos amigos Marcos Barbosa, Yuri Neves, Edinilson Castro, que contribuíram na formulação de ideias, solução de problemas e desenvolvimento de trabalhos ao longo da pós-graduação. À EMLURB – Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana, pela disponibilização do Cadastro dos Canais de Recife. Ao Engenheiro Civil Pedro Oliveira da Silva, que de forma sempre solícita, cedeu plantas e tabelas fundamentais para o trabalho, além de contribuir com discussões acerca dos modelos de simulação.

RESUMO

Recife possui diversos riachos espalhados pela sua planície, dentre eles encontra-se o riacho Cavouco, tributário do rio Capibaribe. O Cavouco atravessa duas importantes vias da Região Metropolitana do Recife, a rodovia BR-101 e a Av. Caxangá. Dada a proximidade com o mar, em geral, os riachos de Recife estão sujeitos à variabilidade diária do nível das marés. Estudos em todo o mundo têm observado que estão em curso mudanças no ciclo hidrológico natural. Dentre estas mudanças, espera-se um aumento na frequência de chuvas intensas em contraponto à redução das precipitações médias anuais e um aumento no nível médio dos mares. Regiões costeiras urbanas têm enfrentado inúmeras consequências catastróficas por causa de inundações. Em Recife, as características naturais, que incluem extensa rede de riachos e baixas cotas altimétricas, e a presença de ocupações às margens dos riachos agravam a situação da drenagem urbana. A fim de avaliar a vulnerabilidade da macrodrenagem em Recife foram utilizados os modelos hidrológico HEC-HMS e hidráulico HEC-RAS. Foram estudadas as características de cobertura do solo, a morfologia da bacia hidrográfica e as precipitações intensas. Com condições de contorno do modelo hidráulico adotamos a liberação de vazão pela barragem de Carpina e a variação do pico de maré para um cenário de mudanças climáticas simulados em escoamento unidimensional e regime permanente. A metodologia mostrou-se bastante satisfatória, permitindo estimar com precisão que áreas estão em maior ou menor situação de risco. Os resultados mostraram grandes variações no trecho próximo ao encontro com o Capibaribe, enquanto que as demais áreas não tiveram impactos significativos. Os efeitos devido a liberação da barragem de Carpina repercutiram em maiores danos, tendo o aumento do nível médio dos mares comprometido uma extensão menor do riacho. Concluiu-se que o aumento do nível médio dos mares influenciará nos níveis normais da macrodrenagem do riacho Cavouco, entretanto em regiões de cotas mais baixas. É fator chave, portanto, que os gestores proponham planos de médio e longo prazo a fim de proteger áreas com essas características dos efeitos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Aumento do nível dos mares. Drenagem urbana. Hec-ras. Inundações urbanas.

ABSTRACT

Recife has several streams scattered throughout its plain, among them is the Cavouco stream, tributary of the Capibaribe river. The Cavouco crosses two important thoroughfares of the Metropolitan Region of Recife, the highway BR-101 and Caxangá Avenue. Given the proximity to the sea, in general, the streams of Recife are subject to the daily variability of the level of the tides. Studies around the world have noted that changes are underway in the natural hydrological cycle. Among these changes, it is expected an increase in the frequency of intense rainfall as a counterpoint to the reduction of average annual rainfall and an increase in the average level of the seas. Urban coastal regions have faced countless catastrophic consequences because of floods. In Recife, the natural features, which include an extensive network of streams and low altimetric heights, and the presence of occupancies at the banks of the streams aggravate the situation of urban drainage. In order to evaluate the vulnerability of macrodrainage in Recife, the HEC-HMS and HEC-RAS hydrological models were used. The soil cover characteristics, the basin morphology and the intense rainfall were studied. With boundary conditions of the hydraulic model we adopted the discharge of the Carpina dam and the variation of the tide peak for a scenario of simulated climatic changes in one-dimensional flow and permanent regime. The methodology proved to be quite satisfactory, allowing to accurately estimate which areas are at greater or lesser risk. The results showed great variations in the period close to the meeting with Capibaribe, while the other areas did not have significant impacts. The effects due to the liberation of the Carpina dam resulted in greater damages, with the increase of the average level of the seas compromising a smaller extension of the creek. It was concluded that the increase in the average level of the seas will influence the normal levels of the macro-drainage of the Cavouco stream, however in regions with lower levels. It is therefore key that managers propose medium and long-term plans to protect areas with these characteristics from the effects of climate change.

Keywords: Sea level rise. Urban drainage. Hec-ras. Urban floods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Estuário comum do Recife	22
Figura 2 -	Alteração do nível da maré para os próximos 50 anos. Em vermelho a previsão de avanço do mar provocado pela elevação da maré até o final do século	23
Figura 3 -	Organograma resumo da metodologia	35
Figura 4 -	Cenários de previsão de aumento no nível médio dos mares, com estabilização no lançamento dos gases do efeito estufa (esq.) e com aumento nas emissões (dir.)	36
Figura 5 -	Esquema de correlação entre as cotas do Porto do Recife e IBGE	37
Figura 6 -	Imagem de satélite com destaque para o riacho Cavouco e principais vias	38
Figura 7 -	Trecho do Riacho Cavouco mostrando margens canalizadas, área gramada na calha expandida, passeio para pedestre e ciclovia	39
Figura 8 -	Trecho próximo à nascente do riacho Cavouco	39
Figura 9 -	Trecho próximo ao exutório do riacho Cavouco	40
Figura 10 -	Esquema das bacias de contribuição no ambiente do programa HEC-HMS	41
Figura 11 -	Precipitação em mm para o período de retorno de 5 anos em função do tempo em minutos	43
Figura 12 -	Esquema simplificado de etapas de delimitação de bacias hidrográficas no programa ArcGIS	46
Figura 13 -	Detalhe das camadas de drenagem, lotes, quadras e bacia de contribuição	47
Figura 14 -	Parcelas de contribuição separadas segundo critério de redes de microdrenagem	48
Figura 15 -	Total de sub-bacias após união das parcelas	48
Figura 16 -	Detalhe da classificação quanto a permeabilidade, sub-bacia 8	50

Figura 17 - Cenários de inundação para o modelo hidráulico em ambiente HEC-RAS	52
Figura 18 - Modelo geométrico do riacho Cavouco desenvolvido no HEC-RAS	53
Figura 19 - Efeito das etapas de aprimoramento do terreno no AutoCAD Civil 3D	54
Figura 20 - Perfil de elevação: rio Capibaribe em condições de mudanças climáticas	55
Figura 21 - Imagem de satélite com localização do Porto do Recife e exutório do riacho Cavouco	56
Figura 22 - Perfil de elevação: rio Capibaribe em condições normais de nível da maré	56
Figura 23 - Perfil de elevação: efeito da abertura das comportas em condições chuvosas	57
Figura 24 - Detalhe da Figura 23	58
Figura 25 - Perfil de elevação: análise do efeito do aumento do nível médio dos mares em condições chuvosas	59
Figura 26 - Perfil de elevação: detalhe da Figura 25	59
Figura 27 - Perfil de elevação: análise do efeito combinado do aumento do nível médio dos mares e abertura das comportas em condições chuvosas	60
Figura 28 - Perfil de elevação: detalhe da Figura 27	60
Figura 29 - Seção transversal 15 do modelo	61
Figura 30 - Perfil de elevação: detalhe da Figura 27	61
Figura 31 - Seção transversal 42 do modelo	62
Figura 32 - Seção transversal 52 do modelo	62
Figura 33 - Seção transversal 80 do modelo	62
Figura 34 - Seção transversal 92 do modelo	63
Figura 35 - Perfil de elevação: liberação de Carpina sem a influência da chuva	63
Figura 36 - Perfil de elevação: detalhe da Figura 35	64

Figura 37 - Perfil de elevação: aumento do nível dos mares sem a influência da chuva	64
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Informações hidrológicas para escolha da equação de chuva	42
Tabela 2 -	Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas	45
Tabela 3 -	Áreas de contribuição das sub-bacias	49
Tabela 4 -	Percentual de área impermeável para cada sub-bacia	50
Tabela 5 -	Condições de máxima maré no Porto do Recife com referência no zero do IBGE	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	INUNDAÇÕES URBANAS	17
3.2	VULNERABILIDADE CLIMÁTICA EM AMBIENTES COSTEIROS	18
3.3	RECIFE E O SISTEMA DE DRENAGEM.....	21
3.4	ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E DRENAGEM URBANA EM RECIFE .	23
3.5	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA	25
3.6	SISTEMAS DE MACRODRENAGEM	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	INFORMAÇÕES DE MARÉ	35
4.2	O RIACHO CAVOUÇO	37
4.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA	40
4.3.1	Modelo HEC-HMS	40
4.3.2	Processo de delimitação de bacias	45
4.3.3	Classificação não supervisionada	49
4.4	MODELAGEM HIDRÁULICA	51
4.4.1	Rio Capibaribe	51
4.4.2	Riacho Cavouco	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1	RIO CAPIBARIBE	55
5.2	RIACHO CAVOUÇO	57
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66
6.1	CONCLUSÕES	66
6.2	RECOMENDAÇÕES	67
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE A - HIDROGRAMAS RESULTANTES DO MODELO	
	HEC-HMS	75
	ANEXO A – SEÇÕES TRANSVERSAIS DO RIACHO CAVOUÇO.....	80

1 INTRODUÇÃO

Nos centros urbanos, os alagamentos estão diretamente associados à falha da infraestrutura de drenagem urbana, seja por erro de concepção, por falta de manutenção, por obsolescência ou pelo crescimento urbano desordenado. O crescimento populacional repercute em uma alta taxa de impermeabilização que, por sua vez, impede a infiltração das águas, provocando um aumento nos picos de vazões dos hidrogramas de escoamento superficial, ocasionando uma maior incidência de alagamentos nas cidades (TUCCI, 2002).

As cidades têm representado risco aos corpos d'água, visto que são fontes de poluição difusa, seja por sedimentos, provocados pela erosão, seja pelo lixo descartado pela população, ou ainda, pelo carreamento de resíduos de automóveis. A produção de sedimentos e resíduos sólidos provocam sérios problemas aos cursos d'água na macrodrenagem, com destaque para o assoreamento dos cursos d'água, comprometendo a permanência e sobrevivência da vida aquática e o mau funcionamento do sistema de microdrenagem, diminuindo a seção transversal do curso d'água e reduzindo a capacidade de escoamento. Outro fator relevante para a diminuição da capacidade de escoamento são as invasões das comunidades ribeirinhas. As enchentes causadas pelas ocupações das margens dos rios por comunidades ribeirinhas são enchentes naturais que ocorrem em rios de médio e grande porte, onde o rio extravasa do seu leito menor e ocupa o leito maior, onde as comunidades estão localizadas (TUCCI, 2007).

Outro fator importante que deve ser avaliado e que pode agravar, ainda mais, as inundações urbanas são as mudanças climáticas. Essas alterações no clima tinham causas ainda pouco estudadas, no entanto, as ações antrópicas têm desempenhado fator fundamental, produzindo efeitos de forma bastante acelerada, principalmente nas últimas décadas. De acordo com o quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas¹ da ONU (IPCC, sigla em inglês para

¹ É um órgão formado por cientistas de todo o mundo que faz avaliações periódicas sobre as mudanças climáticas. O IPCC é formado pela cooperação de dois órgãos da Organização das Nações Unidas (ONU): a Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Como resultado dos estudos, o IPCC já publicou cinco Relatórios de Avaliação (ou *Assessment Reports*, AR) em: 1990, 1995, 2001, 2007, e, o quinto, 2014. De cada relatório é feito um sumário para os tomadores de decisão (*Synthesis Report Summary for Policymakers* ou SPM).

Intergovernmental Panel on Climate Change), publicado em 2014, num cenário mundial, os riscos climáticos baseados em precipitações extremas e inundações costeiras, já são de moderado a alto, apresentando um alto índice de confiança na incerteza das previsões. Esses eventos, que já se mostram trágicos e desastrosos nas grandes capitais devido ao uso inadequado do solo e de técnicas pouco eficientes de drenagem, podem ser agravados em um cenário de ciclos hidrológicos alterados. Nesse contexto, a discussão acerca dos possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre o sistema de drenagem urbana auxilia na preparação das grandes cidades para enfrentar os desafios futuros (IPCC, 2014; MIGUEZ *et al.*, 2011).

Dentre estas mudanças, espera-se um aumento na frequência de chuvas intensas em contraponto à redução das precipitações médias anuais. Além disso, existe uma previsão de aumento do nível médio dos mares, que segundo o IPCC (2014) espera-se um aumento até 0,7 metros no nível médio dos mares para a região do litoral do Brasil, considerando um cenário crítico. É evidente o risco que as cidades litorâneas sofrem caso este cenário venha a se configurar. Hoje os maiores prejuízos à infraestrutura urbana decorrentes de inundações advêm de conjunções de fatores como maré alta e chuva, o que faz concentrar tais casos entre os meses de março e julho, época de maior precipitação. Entretanto, o aumento do nível médio dos mares pode intensificar esses casos causando graves consequências à população.

O aumento no nível médio dos mares é possível devido a alguns fatores que o aquecimento global ocasiona, como: o derretimento excessivo das calotas polares; o derretimento excessivo das grandes geleiras nas regiões onde ocorre precipitação intensa; o derretimento excessivo gelos acumulados nos cumes de montanhas; alterações (redução) nas correntes termoalinas; e, ainda, pelo efeito de dilatação térmica nos oceanos (CHURCH *et al.*, 2001).

Com a questão das mudanças climáticas, falhas na infraestrutura de drenagem também podem ser atribuídas ao agravamento dos eventos de chuva intensa e à restrição imposta pela maré no exutório do sistema. Na possibilidade de combinação entre tais variáveis climáticas, considerando a configuração de eventos hidrológicos para o futuro, os efeitos serão refletidos na abrangência espacial dos alagamentos, fazendo-os chegar a locais antes não alagáveis, aumentando as cotas de lâmina

d'água e os tempos de permanência (MIGUEZ *et al.*, 2011; SILVA JUNIOR; SILVA, 2016).

Esta situação fica mais agravada em cidades costeiras, como a cidade do Recife. O referido município concentra a maior parte da população da Região Metropolitana do Recife (RMR), está localizada em região de mata atlântica, com clima predominantemente quente e úmido, população estimada no ano de 2017 de 1.633.697 habitantes (IBGE, 2017), possuindo média pluviométrica anual de 2.307,5mm (FERREIRA, 2016). Fatores como o crescimento populacional não planejado, a geomorfologia, a impermeabilização do solo e os aterros contribuíram negativamente para a ocorrência dos alagamentos na área de planície da cidade (CABRAL; ALENCAR, 2005).

A rede de macrodrenagem da cidade é composta por diversos riachos espalhados em sua planície, dentre os quais encontra-se o riacho Cavouco, tributário do rio Capibaribe. Dada a proximidade com o mar, em geral, os riachos têm seus regimes de escoamento alterados pela variabilidade diária do nível das marés, de modo que poderá ocorrer os fenômenos de remanso e fluxo reverso (quando o rio Capibaribe, influenciado pelo mar, adentra o curso d'água). Uma demonstração desse comportamento pode ser identificada quando a maré se encontra influenciada pelo alinhamento da Lua e do Sol, denominada maré de sizígia. Nessa conformação, a maré atinge seu máximo fazendo com que alguns pontos da cidade tenham suas ruas alagadas, devido ao retorno da água do mar através dos canais e galerias de drenagem (CABRAL; ALENCAR, 2005).

É nessa realidade que, segundo PBMC (2016), o Recife é a 16ª cidade do mundo mais vulnerável às mudanças climáticas devido às suas características físicas e sociais, à alta densidade populacional do seu litoral, ao elevado índice de impermeabilização do solo e à sua baixa altitude. Dito isto, a cidade já começa a apresentar riscos oriundos do aumento do nível médio do mar (NMM), das precipitações e da sua temperatura média. Como consequência da elevação do NMM até 2100, prevê-se que a capital pernambucana poderá perder 33,7 km² do seu território (PBMC, 2016; RECIFE, 2017).

Além das atenuantes citadas, em 2011, populações ribeirinhas que viviam às margens do rio Capibaribe sofreram com inundações devido à abertura das comportas da barragem de Carpina. Naquela ocasião, o reservatório estava próximo a sua capacidade máxima e havia ainda a previsão de mais chuvas na região, diante disso, como forma de garantir a segurança contra um risco de rompimento da barragem, decidiu-se pela liberação de, aproximadamente, 700 m³/s para o rio Capibaribe, segundo autoridades locais (NE10, 2011). No mês anterior, as comportas já haviam sido abertas a fim de evitar inundações na PE-50 (PERNAMBUCO, 2011a). Em 2009 as comportas receberam reparos e foram abertas para teste, nesta ocasião houve um prévio aviso às populações que viviam às margens do rio Capibaribe, a fim de reduzir os transtornos dessa vazão (PERNAMBUCO, 2009).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho divide-se em três objetivos específicos.

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as consequências para a macrodrenagem do riacho Cavouco na planície do Recife em resposta a eventos de chuvas intensas, abertura ou fechamento das comportas de barragem de controle de cheias e impactos das marés de sizígia, prevendo cenário futuro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir modelo de propagação de vazão para análise do comportamento hidrológico frente às alterações no nível máximo da maré e mudanças nas condições de fluxo;
- Construir modelo hidrológico para estimativa do run-off pela rede de drenagem de acordo com estimativa de precipitações pluviométricas associadas a determinado tempo de retorno;
- Calcular a propagação de vazão ao longo da calha fluvial de riacho que contribui para o Capibaribe no município do Recife através do uso do software HEC-RAS com estimativa das cotas atingidas ao longo das áreas das margens do curso d'água.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tema aqui desenvolvido possui uma ampla aplicação na engenharia, resultando em diversos trabalhos em todo o mundo, e conseqüentemente, trazendo inúmeros benefícios à sociedade.

3.1 INUNDAÇÕES URBANAS

Enchente ou cheia é uma situação natural de transbordamento de água do leito principal dos cursos d'água, denominado leito menor, provocada, geralmente, por eventos de chuvas intensas e contínuas. A inundação urbana ocorre quando as águas dos rios e riachos extravasam do seu leito menor de escoamento para o seu leito maior e planícies de inundação que podem ter sido ocupados pela população para moradia, transporte, recreação, comércio, indústria, entre outros. Isto ocorre devido a um processo natural quando o solo não tem capacidade de infiltrar a água precipitada gerando escoamento superficial. O volume escoado atinge a planície de inundação quando supera a capacidade do leito menor. Eventos chuvosos dessa natureza ocorrem de forma aleatória em função dos processos climáticos locais e regionais (TUCCI, 2005).

Os problemas relacionados às inundações podem ser divididos em dois grupos: as inundações de áreas ribeirinhas e as inundações devido à urbanização (TUCCI, 2007). As inundações de áreas ribeirinhas ocorrem principalmente pelo processo natural de cheia do rio em eventos de grandes precipitações, elevando o nível d'água do rio que passa a escoar em sua calha secundária, com uma recorrência superior a 2 anos, aproximadamente. Quando essa calha secundária se encontra ocupada por habitações humanas há uma barreira para o escoamento das águas, levando a uma elevação ainda maior no nível d'água e a um aumento na frequência de extravasamento da calha principal do rio.

Conforme a cidade se desenvolve, há uma redução da cobertura vegetal e aumento da impermeabilização das superfícies, dificultando a infiltração da água e gerando um maior volume escoado. Essas alterações no uso do solo podem ser críticas, podendo chegar ao ponto em que a vazão de uma bacia urbanizada, atingir um pico de cheia até seis vezes maior do que o pico desta mesma bacia em condições naturais.

Um grande número de municípios brasileiros enfrenta problemas com enchentes devido, principalmente, à ineficiência, falta de planejamento e investimento no setor de drenagem urbana. Com a avanço da ocupação territorial sobre áreas sujeitas à inundação, a remoção e descaracterização da mata ciliar, o desmatamento em grande escala, o descarte irresponsável dos resíduos domiciliares sobre as encostas e nos cursos de água, a impermeabilização dos terrenos e obras locais de caráter imediatista os riscos de enchentes se tornam cada vez maiores (SEMADS, 2001).

3.2 VULNERABILIDADE CLIMÁTICA EM AMBIENTES COSTEIROS

A combinação de fatores naturais pode levar a consequências desastrosas ao ambiente urbano, tanto segundo aspectos sociais quanto relativo aos danos econômicos e financeiros. Com o desenvolvimento urbano originado em áreas próximas a cursos d'água, áreas naturalmente alagáveis sofreram extrema modificação. A ocupação de populações em regiões ribeirinhas agrava as condições de vulnerabilidade diante da intensificação de eventos hidrológicos extremos (TUCCI, 2007). O aumento da exposição humana aos eventos críticos, aliado à preocupação sobre as mudanças climáticas, desperta o interesse por melhor conhecimento dos eventos e das características ambientais e antrópicas que favorecem a ocorrência das catástrofes.

Segundo Alexander (2013), a vulnerabilidade representa o dano potencial incorrido por uma pessoa ou atividade que estão em risco. Corresponde a um conjunto de características, condições e processos resultantes de fatores físicos (relacionados ao uso e ocupação do solo), sociais, econômicos e ecológicos. Uma discussão mais abrangente, levantando diversos conceitos de vulnerabilidade pode ser encontrada em Wisner (2016).

Para as Nações Unidas (UNISDR, 2009), o risco é constituído pela probabilidade de consequências danosas ou perdas esperadas (ao indivíduo, à propriedade, aos bens de sustento próprio, interrupção de atividades econômicas e danos ambientais) resultantes de interações entre os perigos naturais ou induzidos pelo homem e as condições de vulnerabilidade/capacidade do sistema. O risco é motivado por condições naturais, tecnológicas e sociais, cujo resultado potencial é um

desastre. Como o resultado de fatores sociais, econômicos, políticos e culturais repercute na tomada de decisões, a vulnerabilidade é construída socialmente.

Cotas ligeiramente acima do nível do mar, alta densidade de riachos, populações pobres que vivem às margens dos riachos e convivem com os alagamentos frequentes, a alta especulação imobiliária sobre áreas destinadas à proteção ciliar, a gestão governamental incipiente a respeito dos rios urbanos e as abordagens técnicas tradicionais da prefeitura são os principais fatores de vulnerabilidade às inundações em Recife (CABRAL *et al.*, 2017).

As evidências acerca dos riscos aumentam a importância do engajamento das comunidades na compreensão das mudanças climáticas e necessidades de adaptação. É preciso acelerar os mecanismos de resiliência nas cidades, principalmente através dos formuladores de políticas que precisam entender a adaptação atual para planejar de forma abrangente e aplicar recursos de forma eficaz (GEORGESON *et al.*, 2016). As medidas de adaptação às mudanças climáticas adotadas no Brasil, em geral, consistem de medidas estruturais como a construção de diques, barragens de contenção de cheias, aumento no nível dos aterros e obras de drenagem urbana (MARENCO *et al.*, 2017).

As alterações climáticas possuem um papel fundamental na intensificação e aceleração do ciclo hidrológico, o que poderá aumentar a magnitude e a frequência de futuras inundações (KVOCKA; FALCONER; BRAY, 2015). Isso se dá devido à dois principais fatores: o aumento do nível médio dos mares e o aumento da ocorrência das chuvas intensas.

O nível global do mar tem crescido ao longo dos séculos 20 e 21 (IPCC, 2013; BURBRIDGE, 2011), e embora haja um desacordo acerca da taxa de crescimento devido aos diferentes cenários de emissões de gases do efeito estufa, esse aumento está quase certo e provavelmente irá acelerar durante o resto do século 21 (CHURCH; WHITE, 2011). As comunidades costeiras em ambientes geográficos de baixa altitude são especialmente vulneráveis aos perigos relacionados a esses aumentos. Apesar dos efeitos do aumento do nível dos mares serem diversos, inundações durante os picos de maré é a mais evidente e imediata consequência.

Perdas potenciais totais decorrentes de inundações estão aumentando rapidamente nas principais cidades costeiras em todo o mundo (HALLEGATTE *et al.*, 2013), inclusive afetando seriamente as populações do Brasil (ECLAC, 2011). Ao longo da costa atlântica da América Central e do Sul, o aumento do nível dos mares entre 1950 e 2008 variou de cerca de 2 a 7 mm/ano (MAGRIN *et al.*, 2014).

Em relatório elaborado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) espera-se um aumento de 0,5 a 0,7 metros no nível médio dos mares para a região do litoral do Brasil para um período entre 2081 e 2100, o que provocaria inúmeras consequências para populações litorâneas. Este estudo foi baseado em séries históricas entre os anos de 1986 e 2005 (IPCC, 2014).

A partir das projeções climáticas estabelecidas por estudos acadêmicos e relatórios de agências especializadas em cenários de mudança do clima, alguns estudos foram desenvolvidos no intuito de avaliar os impactos hidrológicos destas tendências nos ambientes costeiros fortemente urbanizados.

No tocante ao aumento do nível médio do mar, Blankspoor, Dasgupta e Laplante (2014) avaliaram o impacto deste fenômeno em 86 países em desenvolvimento, considerando um cenário crítico de elevação de 1,00 m. O referido autor concluiu que, em média, 68% das regiões costeiras desses países apresentam riscos de inundação em detrimento da subida do nível dos mares. Para a Região Metropolitana do Recife (RMR), Costa *et al.* (2010) avaliaram os efeitos no local considerando o mesmo cenário crítico (aumento de 1,00 m). A análise indicou que 81,8% das construções urbanas, que se encontram a menos de 30 m da linha de costa e em terrenos abaixo de 5 m, deverão ser rapidamente atingidos pela mudança no nível do mar atual. Dentre as áreas propensas à inundação, em ambos os cenários, os autores chamam atenção para o Recife Antigo, que é um importante centro econômico e administrativo da cidade e possui grande valor histórico e cultural.

Ainda dentro desse contexto, Fraile-Jurado *et al.* (2017) aplicaram um método probabilístico para riscos de inundação devido ao aumento do nível dos mares para a costa de El Puerto de Santa María, na província de Cádiz, no sudoeste da Espanha. Os resultados mostraram que não se espera que uma grande área seja exposta à inundação, independentemente do cenário usado devido à sua posição elevada. No

entanto, as áreas baixas que cercam a região possuem uma alta probabilidade de inundação durante a maré alta, o que poderia dificultar as comunicações por terra e isolar espaços habitados.

No tocante às mudanças no regime hidrológico em áreas urbanas, as evidências de alterações climáticas em eventos extremos de chuva têm sido observadas em todo o mundo (ARNONE *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2014; FORESTIERI *et al.*, 2017), conduzindo também, os diversos estudos que analisam os efeitos das alterações climáticas nos processos hidrológicos em bacias (FRANCIPANE *et al.*, 2015; LIUZZO *et al.*, 2015; PUMO *et al.*, 2016; VIOLA *et al.*, 2016). A expectativa de aumento da temperatura global levará a mudanças significativas no ciclo da água. Em alguns casos, pode haver uma redução na precipitação média anual, e principalmente, um aumento na ocorrência de chuvas intensas.

Ainda neste contexto, Peleg *et al.* (2015) avaliaram o impacto projetado das mudanças climáticas no regime hidrológico para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5 (estabilização e continuidade das emissões gasosas, respectivamente), concluindo que a precipitação média anual em bacias médias do Mediterrâneo Oriental, em Israel, é projetada para ser reduzida em 15% e 18%, respectivamente. Na Dinamarca, Arnbjerg-Nielsen (2012) afirma que é provável um aumento das intensidades de chuva na ordem de 10 a 50% para os próximos 100 anos, a depender do tempo de retorno. Essa mesma tendência de aumento das precipitações intensas também é identificada por Kaspersen *et al.* (2017) em quatro cidades da Europa, onde espera-se que ao final do século 21, haverá incrementos de 10 a 30% para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

3.3 RECIFE E O SISTEMA DE DRENAGEM

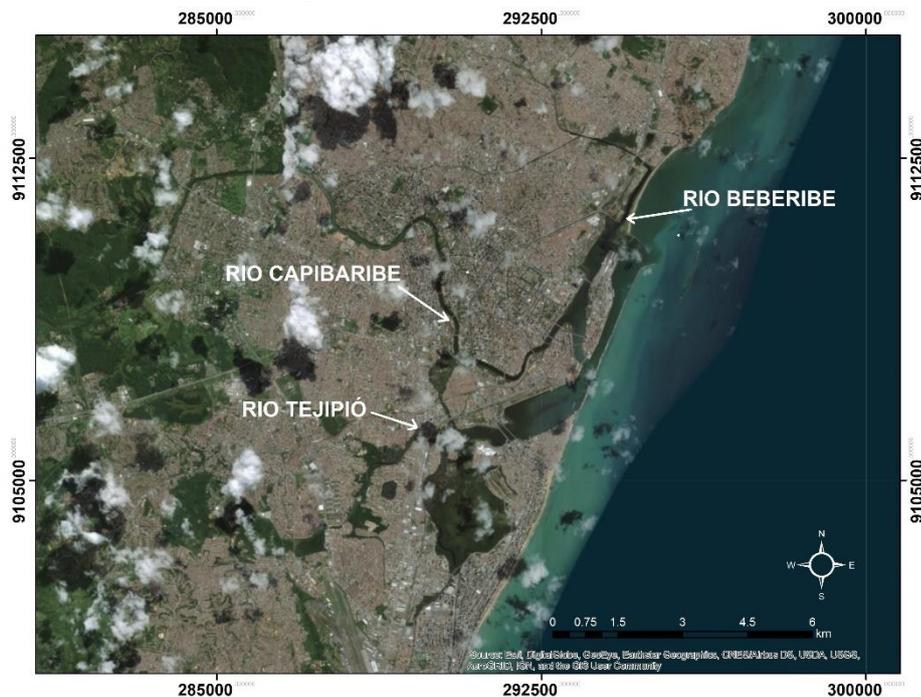
O Recife é uma cidade litorânea, localizada na Região Nordeste do Brasil, fortemente urbanizada e constantemente acometida por alagamentos. Possui uma área de 218,50 km² e uma população estimada em 2017 de 1.633.967 hab. É caracterizada com alta densidade populacional do litoral, um percentual elevado de impermeabilização do solo e baixas altitudes da região costeira, entre 2 e 4 m. O clima é predominantemente quente, com temperatura média de 25°C, precipitação média

anual de 2.307,5 mm (FERREIRA, 2016), período das chuvas concentrado entre março e agosto, e umidade relativa média anual de 80% (IBGE, 2017; PERNAMBUCO, 2011; RECIFE, 2017).

A cidade conta com um sistema de drenagem natural que envolve um conjunto de bacias hidrográficas denominado por “Estuário Comum do Recife”, que é formado pelas desembocaduras dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejiú (Figura 1). São áreas de planície costeira com alta probabilidade de sofrer inundações diante da elevação do nível do mar (SILVA JUNIOR; SILVA, 2016).

De acordo com Preuss *et al.* (2011), o Recife possui peculiaridades geográficas que devem ser consideradas para a sustentabilidade do seu sistema de drenagem. As baixas cotas de seu território em relação ao nível do mar, áreas planas, lençol freático próximo à superfície e aflorante na estação chuvosa, influência dos níveis das marés, são características naturais que dificultam a drenagem das águas pluviais na cidade. Além disso, o sistema de drenagem do Recife também é prejudicado devido à canalização dos riachos urbanos e às ocupações irregulares de suas margens, alta taxa de impermeabilização do solo, destino inadequado dos resíduos sólidos e falta de saneamento.

Figura 1 - Estuário comum do Recife.



Além das linhas de drenagem natural, o sistema de macrodrenagem da cidade é composto por 99 canais, totalizando 133 km de extensão (média de 0,60 km de canal por km²). Cerca de 63% da extensão total da rede de canais têm seção hidráulica revestida. O sistema de microdrenagem, composta em sua maioria por galerias e canaletas, possui uma extensão aproximada de 1.558 km (EMLURB, 2017).

Com esse cenário, o Recife possui, atualmente, 159 pontos de alagamentos catalogados como os mais críticos pela EMLURB. É válido ressaltar que boa parte desses pontos de alagamentos mapeados estão concentrados no sistema viário da cidade, prejudicando bastante a mobilidade urbana em dias de chuvas.

3.4 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E DRENAGEM URBANA EM RECIFE

Nas últimas décadas, o Recife vem sendo afetado pelos impactos provocados com a mudança do clima. De acordo com Harari *et al.* (2008 apud PBMC, 2016), o nível do mar na costa pernambucana aumentou 5,6 mm/ano no período de 1946 e 1988, o que corresponde a uma elevação de 24 cm em 42 anos. Em algumas áreas da cidade já ocorre alagamentos durante as preamares, com marés de 2,70 m, sem chuvas. É válido ressaltar que, conforme as previsões de maré do Porto do Recife (Tábua de Marés), desenvolvidas pela DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação, a ocorrência de marés de 2,70m tem aumentado nos últimos anos.

Figura 2 - Alteração do nível da maré para os próximos 50 anos. Em vermelho a previsão de avanço do mar provocado pela elevação da maré até o final do século.



Fonte: Alcoforado, 2006

Alcoforado (2006), delimitou na linha de costa de Recife a localização correspondente a média das marés desde a década de 50 e comparou com os efeitos previstos para os próximos 100 anos provocados pelas mudanças climáticas (Figura 2).

O comportamento do nível do mar em relação aos sistemas de drenagem é fator determinante para a eficiência do seu desempenho na ocorrência dos eventos extremos de precipitação. Isso porque durante as preamares, haverá uma diminuição na diferença de altitude entre a área a ser drenada e o local para onde a água irá fluir, deixando o sistema mais lento, sobretudo, nos locais onde a drenagem for feita por gravidade. Essa situação deixará o sistema mais vulnerável à ocorrência de falhas estruturais, hidráulicas e ambientais, comprometendo a vida útil da infraestrutura de drenagem (SILVA JUNIOR; SILVA, 2014, 2016).

No tocante às chuvas intensas, sabe-se que para o dimensionamento de um sistema de drenagem urbana, um dos fatores importantes é a chuva de projeto. Geralmente ela é obtida através da equação IDF (intensidade, duração e frequência) da região. No Recife, em meados da década de 80, foi elaborada a equação IDF da RMR (Região Metropolitana do Recife) no âmbito do Plano Diretor de Macrodrenagem da RMR, desenvolvido pela ACQUA-PLAN/FIDEM. Na elaboração da equação foram utilizados os pluviogramas do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, contemplando 15 anos de dados da estação Olinda (1926-1933, 1936, 1937, 1939, 1941-1943, 1954) e 10 anos da estação Curado (1960, 1961, 1963, 1970, 1970-1976). Com essa referência, é provável afirmar que grande parte do sistema de drenagem do Recife foi dimensionado a partir da citada equação. Em 2016, no âmbito do Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Recife (PDDR), foi definida uma nova equação IDF para a cidade, a partir das precipitações máximas anuais obtidas em três postos pluviométricos (Recife/Caxangá, Recife/Curado e Recife/Várzea), abrangendo uma série histórica de 85 anos (1927-2011).

Silva Junior e Silva (2016) compararam as intensidades de chuva calculadas pelas equações IDF da ACQUA-PLAN/FIDEM (1985) e da EMLURB (2016). Foi verificado que as intensidades de chuva para durações menores (5, 10, 15 e 30 min.) chegam a ser 34% superiores com a equação IDF mais recente, considerando os períodos de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos. Ainda segundo os autores, o aumento nas

intensidades de chuva, aliado ao desenvolvimento urbanístico, gera vazões incrementais no escoamento superficial que poderão comprometer a eficiência dos sistemas de drenagem. Numa análise feita para o bairro da Soledade, considerando apenas o efeito das intensidades de chuva, os autores observaram que haveria aumento de 18% das tubulações com problema de sobrecarga, para eventos com recorrência de 2 anos (SILVA JÚNIOR, 2015; SILVA JUNIOR; SILVA; CABRAL, 2017). Para Ramos (2010), as diferenças nas intensidades de chuva se devem, provavelmente, ao período da série de dados utilizados e à possíveis alterações no regime de chuvas, ambos influenciados pelo efeito das mudanças climáticas. Por isso, existe a necessidade de revisões periódicas e atualizações de equações de chuvas, a fim de evitar os subdimensionamentos de obras hidráulicas.

3.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

Tradicionalmente, na avaliação do desempenho de sistemas de drenagem urbana para diferentes situações de funcionamento utiliza-se um modelo com um componente hidrológico para simular o escoamento no ambiente de captação urbana, e um componente hidrodinâmico para simular o fluxo no próprio sistema de drenagem. Combinar modelos de chuva-vazão e hidrodinâmico permite estimar a eficiência na redução da vazão após a construção de estruturas de controle de cheias (GÜL; HARMANCIOGLU; GÜL, 2010), o delineamento de áreas inundadas provocadas por eventos hidrológicos de variados tempos de retorno e pela urbanização (ROMALI; YUSOP; ISMAIL, 2018; NANÍA *et al.*, 2015), bem como a caracterização do regime de cheias de um rio (RIBEIRO NETO *et al.*, 2015).

Um dos objetivos do estudo de um sistema hidrológico é estudar a operação do sistema e prever suas saídas. Um modelo hidrológico é uma aproximação do sistema real onde suas entradas e saídas são variáveis hidrológicas mesuráveis e sua estrutura é um conjunto de equações que conectam a entrada com a saída (CHOW, 1988). O modelo hidrológico pode ser considerado como uma ferramenta desenvolvida para simular o comportamento de uma bacia hidrográfica, gerando um hidrograma de escoamento superficial (saída do modelo) correspondente a uma precipitação estudada (entrada do modelo). A partir do modelo hidrológico é possível simular o comportamento da bacia hidrológica estudada, perante precipitações de

projeto, com diferentes durações e frequências, e prever condições futuras e/ou simular situações hipotéticas no intuito de avaliar riscos.

Os modelos hidrológicos podem ser determinísticos ou estocásticos. Um modelo estocástico considera que uma ou mais das suas variáveis são determinadas em uma distribuição estatística. Chow (1988) resume o conceito de modelo estocástico com sendo um modelo em que as saídas são pelo menos parcialmente aleatórias. A partir dessas definições pode se definir como modelo determinístico um modelo que não considera aleatoriedade, ou seja, para cada entrada é associada sempre a mesma saída.

Um modelo determinístico pode ser concentrado, considerando o espaço como um ponto único sem dimensões ou distribuído quando considera que as variáveis hidrológicas ocorrem em vários pontos do espaço tendo assim as variáveis do modelo como funções espaciais. Os modelos estocásticos se classificam como independentes do espaço e correlacionados com o espaço, de acordo com a influência que variáveis aleatórias tenham em diferentes pontos do espaço (CHOW, 1988).

Com relação ao tempo, os modelos determinísticos podem ser com fluxo permanente (ou constante), caso o fluxo não varie com o tempo ou com o fluxo não-permanente (ou variável) caso o fluxo possa variar ao longo do tempo. Os modelos estocásticos têm sempre as saídas variando no tempo e são classificados como independentes do tempo, quando representa um evento hidrográfico indiferentemente de outro evento, e correlacionado com o tempo, quando um evento hidrográfico pode influenciar o evento seguinte.

Modelos chuva-vazão representam matematicamente as complexas inter-relações entre os vários fenômenos físicos que compõe o ciclo hidrológico, ou seja, são modelos que tentam reproduzir as fases do ciclo hidrológico entre a precipitação e vazão. O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada de água entre a superfície terrestre e a atmosfera, balanceado em escala global e impulsionado pela energia solar associada à gravidade e à rotação da terra.

As leis físicas que regem o escoamento em um curso d'água são o Princípio da Conservação da Massa, ou Princípio da Continuidade do Volume, o Princípio da Conservação da Energia e o Princípio de Conservação do Momento, ou Princípio da

Conservação da Quantidade de Movimento. Essas leis são expressas matematicamente na forma de equações diferenciais parciais, as quais, quando descritas nas três dimensões do espaço, são chamadas de equações de Navier-Stokes e constituem o modelo matemático geral para o escoamento de fluidos.

Como o escoamento em rios ocorre em uma direção preponderante, essas equações tridimensionais podem ser simplificadas em um sistema de equações unidimensionais, conhecido como equações de Saint-Venant (CUNGE *et al.*, 1980).

Quando aplicado em um volume de controle, representado por um trecho da calha do rio, compreendido entre duas seções consecutivas, o princípio da conservação da massa diz que a diferença entre o volume de água afluente à seção de montante e o volume efluente no trecho, num dado intervalo de tempo, corresponde exatamente à variação de água dentro desse trecho, durante o mesmo intervalo de tempo. Sendo assim, a equação da continuidade, como é conhecida a formulação matemática para o princípio da conservação da massa, pode ser escrita como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

Onde: Q = vazão (m³/s);

A = área molhada da seção transversal (m²);

t = variável independente relativa ao tempo (s);

x = variável independente relativa à direção do escoamento (m); e

q_L = vazão lateral por unidade de comprimento, que entra ou sai do trecho considerado, no intervalo de tempo.

Já o princípio da conservação da quantidade de movimento, quando aplicado ao mesmo volume de controle, diz que a variação da quantidade de movimento do volume de controle, por unidade de tempo, é igual ao somatório de todas as forças externas que atuam nesse volume. Este princípio traduz a aplicação da segunda Lei de Newton. Considerando que as forças externas atuantes sejam as forças de contato (Pressão e Atrito) e a força de campo (Gravidade), tem-se a equação dinâmica, como é conhecida a formulação matemática para o princípio da conservação da quantidade de movimento, escrita como:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_o - S_f) \quad (2)$$

Onde:

v = velocidade média do escoamento (m/s);

h = profundidade do escoamento (m);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

t = variável independente relativa ao tempo (s);

x = variável independente relativa à direção do escoamento (m);

S_0 = declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m); e

S_f = declividade da linha de energia (m/m).

Modelos que utilizam as equações acima são conhecidos como Modelos Hidrodinâmicos Completos. Isso significa empregar a equação da continuidade e da quantidade de movimento com todos os seus termos (gravidade, atrito, pressão e inércia). Este tipo de modelo requer soluções numéricas mais sofisticadas para as equações diferenciais. Suas vantagens são uma maior precisão e uma melhor representação física do modelo, permitindo simular modificações do sistema adotado, bem como variações mais importantes na velocidade de escoamento.

Modelos de Onda Cinemática utilizam as equações da continuidade distribuída e a expressão simplificada da equação do momento. Basicamente a principal simplificação deste modelo é adotar a declividade da linha de energia igual à declividade do fundo do rio, desprezando os termos de pressão e aceleração, particularizando a equação dinâmica para o caso de escoamento uniforme.

Os modelos hidrodinâmicos são as ferramentas mais utilizadas para simular enchentes detalhadas. A entrada de modelos hidrodinâmicos pode ser manipulada para investigar o impacto de mudanças em condições iniciais, condições de contorno ou para explicar a interferência de estruturas hidráulicas como pontes, bueiros e diques. Diferentemente das versões 2D, as versões 1D são incapazes de simular a difusão lateral da onda de inundação. No entanto, a depender da resolução e da extensão da área de estudo, o trabalho se torna computacionalmente intensivos. Os modelos 2D geralmente são considerados inviáveis em áreas maiores que 1000 km²

quando a resolução requerida é inferior a 10 m, alternativamente, mesmo em áreas pequenas, mas com múltiplas simulações pode ser inviável (TENG *et al.*, 2017).

O USACE (1993) (Corpo de Engenheiros do Exército Americano) recomenda que o uso de um modelo de escoamento hidrodinâmico deve ser usado no lugar de um modelo com escoamento permanente quando:

- Mudanças rápidas ocorrem na vazão. Um exemplo importante é a modelagem de ruptura de barragem. Independentemente da declividade da calha, análise hidrodinâmica deve ser utilizada para todos os hidrogramas com variações bruscas;
- Rios e canais que têm declividade pequena. Um modelo hidrodinâmico deve ser utilizado para todos os córregos onde a declividade for inferior a 0,00038 metros por metro. Para esses casos a vazão de pico não ocorre simultaneamente com o nível máximo do escoamento. Além disso o armazenamento em calha pode ser bastante significativo nesses casos dificultando a determinação dos níveis d'água máximos. Nas calhas com declividade entre 0,00038 e 0,00095, a necessidade de um modelo hidrodinâmico depende dos objetivos do estudo, sendo que a entrada de um tributário importante ou a existência de remanso na condição de contorno de jusante pode exigir a utilização de um modelo hidrodinâmico. Para calhas com declividade superior a 0,00095 metros por metro, a análise de fluxo permanente é geralmente suficiente;
- Redes onde o escoamento é dividido. Para redes de escoamento, quando o escoamento se divide em duas calhas e se reencontra, o uso de modelos hidrodinâmicos deve ser sempre considerado para escoamentos subcríticos.

Modelos 1D são modelos com escoamento confinado em uma calha, com uma direção preferencial, modelados com as equações de Saint-Venant. Modelos com escoamento em mais de uma direção, que podem ser modelos Quasi-2D ou modelos 2D, não tem uma direção preferencial de escoamento. Sempre que o nível d'água extravasa a calha principal do rio e passa ocupar as planícies de inundação, passando a escoar segundo a topografia dessas, os modelos que permitem o escoamento em

apenas uma direção passam a ser ineficientes em representar o escoamento (CUNGE, 1980).

Segundo o USACE (1993), a escolha do processo de modelagem adotado para um estudo hidráulico deve se basear em vários fatores, incluindo:

- O objetivo principal do estudo: O processo de modelagem escolhido deve refletir as exigências e objetivos do estudo. A escolha do tipo do processo de modelagem necessário para atender os objetivos do estudo pode não ser evidente enquanto o modelador não possui experiência nos problemas e/ou fenômenos que serão modelados e tem uma visão geral das possíveis soluções a serem implantadas;

- O nível de detalhamento necessário: O nível de detalhamento do estudo se relaciona profundamente com o tipo de modelagem que deve ser usado no estudo. Estudos mais abrangentes e com um menor grau de detalhamento, como um estudo de viabilidade, aceitam modelos mais simplificados. Estudos mais detalhados requerem modelos mais precisos, logo não muito simplificados;

- Como se pode classificar o escoamento estudado: a classificação do tipo de escoamento estudado tem uma grande importância para o tipo de modelo a ser aplicado. Para o estudo de um rio no período de estiagem, quando às vezes o escoamento pode ser classificado como permanente, um modelo de escoamento permanente pode ser suficiente, enquanto o estudo da passagem de uma onda de cheia, um escoamento não permanente, geralmente requer um modelo hidrodinâmico;

- A disponibilidade dos dados necessários: A quantidade e o tipo dos dados disponíveis também desempenham um papel importante na seleção do modelo. Modelos de escoamento permanente podem ser calibrados apenas com marcas dos níveis d'água máximos, enquanto modelos hidrodinâmicos e modelos Quasi-2D algumas vezes exigem os dados de um hidrograma inteiro para a calibração, além de mais experiência do modelador. A necessidade de modelos mais complexos muitas vezes ocorre em situações em que falta dados para a calibração destes. Embora o nível de confiabilidade possa sofrer com a pouca ou nenhuma calibragem, um modelador experiente e com um conhecimento profundo da física do fenômeno de interesse é capaz de avaliar as mudanças e/ou diferenças entre os cenários estudados com o modelo, mesmo sem uma precisão absoluta dos resultados. Se essa

precisão é fundamental no estudo, é necessário organizar um processo de coleta de dados paralelo ao processo de modelagem;

- A disponibilidade de tempo e recursos disponíveis para o projeto: processos de modelagem mais complexos geralmente apresentam resultados mais precisos, mas necessitam de mais tempo e geralmente também mais dinheiro para serem elaborados. Assim a escolha do processo de modelagem deve considerar o tempo e recursos disponíveis para o estudo. Nos modelos de escoamento permanente é considerado que o escoamento não varia no tempo, logo as grandezas do escoamento não variam na mesma seção ao longo do tempo, variam apenas de uma seção para outra seção. Como o modelo adotado foi o unidimensional é necessário que o usuário disponha tanto de dados das seções transversais do riacho, que o usuário defina o regime de escoamento bem como os valores para cada cenário em estudo.

3.6 MODELOS DE MACRODRENAGEM

Um dos programas mais utilizados na modelagem de sistemas hídricos é o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) que significa Centro de Engenharia Hidrológica e Sistema de Análise Fluvial. O HEC-RAS é uma ferramenta desenvolvida pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE), que pode ser combinada com a plataforma HEC-HMS para simulações hidrológicas desenvolvida pelo mesmo grupo. O HEC-RAS emprega a análise de inundações em 1D e 2D, tanto em condições de fluxo permanente como não-permanente. Nestes modelos, são necessárias duas condições de contorno, de montante geralmente através de uma vazão imposta, e de jusante com informações de altura do nível d'água ou inclinação da curva de energia que na maioria dos casos pode ser considerada a declividade da linha d'água.

Indrawan e Siregar (2018) utilizaram ambos os programas, HEC-RAS e HEC-HMS, para calcular a vulnerabilidade da zona urbana às enchentes do rio Deli, na Indonésia. Khalfallaha e Saidia (2018), também utilizaram o HEC-RAS para previsão de enchentes no rio Mejerda, Tunísia. Masood e Takeuchi (2012) avaliaram o risco de inundação da Grande Dacca, Bangladesh, através do desenvolvimento de um mapa de risco de inundação através de simulação hidrodinâmica 1D com base em dados de

modelo digital de elevação (MDE) e observações de campo. Timbadiya *et al.* (2014a, b) aplicaram com sucesso o modelo 1D HEC-RAS para previsão do hidrograma na parte baixa do Rio Tapi, Índia, sob as condições de fluxo não permanente.

ShahiriParsa *et al.* (2016) estudaram o HEC-RAS 1D e para avaliar e prever a profundidade da inundação e a extensão espacial da inundação na planície de inundação em rio da Malásia.

Fijko, Zelenáková e Alkhalaf (2016) utilizaram o HEC-RAS para modelar um canal aberto visando a avaliação dos riscos de inundação. Da mesma forma, Romali, Yusop e Ismail (2018) simularam cinco modelos para identificar as áreas de risco para os diferentes tempos de retorno, utilizando o HEC-RAS.

Batista (2015) utilizou o HEC-RAS para simular eventos em regime permanente de picos de vazão para classificação de indicadores de risco no município de Cabo de Santo Agostinho, em Pernambuco, inserido na bacia do rio Pirapama.

Dantas (2012) utilizou o HEC-RAS para fins de previsão e controle de inundações em meio urbano, com suporte de informações espaciais de alta resolução para o planejamento territorial, com foco na proteção das cidades. O trabalho foi desenvolvido na região do rio Una, em Pernambuco.

Rios (2015) utilizou o HEC-RAS para estudo sobre a capacidade de suporte de córregos urbanos sujeitos a processos erosivos, embasada na identificação da vazão máxima limite, sem extravasamento do canal, como parâmetro determinante da tensão de arraste e dos processos de produção, transporte e deposição de sedimentos no Córrego Samambaia, localizado na Cidade de Goiânia, Capital do Estado de Goiás.

Alcoforado (2006) realizou uma pesquisa montada com base de dados georeferenciada em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) e levantamento em campo de todas as informações do ambiente físico de 43 corpos d'água, sendo 3 rios e 40 canais, ao todo foram levantadas 334 seções transversais. Agrupados em 23 sub-bacias, esses corpos d'água foram para a análise hidrológica e análise de uso e ocupação do solo. O trabalho tratou da macrodrenagem de regiões urbanas, densamente ocupadas, com elevado índice pluviométrico e sujeitas à

influência de marés. Foram comparadas metodologias de análise do escoamento em redes complexas de rios urbanos com uso dos programas computacionais da “família” MIKE, desenvolvidos pelo Danish Hydraulic Institute, avaliando os ganhos resultantes do uso de informações espaciais de alta resolução. A bacia do rio Beberibe e a parte da bacia do rio Capibaribe inserida na Região Metropolitana de Recife, no estado de Pernambuco, foram utilizadas como estudo de caso.

De forma semelhante, Góes (2009) realizou modelagem hidrológico-hidrodinâmica de sistemas fluviais complexo em áreas urbanas da bacia hidrográfica do rio Beberibe. Seu estudo permitiu avaliar que o uso do modelo MIKE SHE/MIKE 11 se configura em uma ferramenta eficaz na cooperação para delimitação e proteção de áreas de risco de enchentes.

Outra grande possibilidade de aplicação se dá para a liberação de vazões pela abertura de comportas em barragens. Patel *et al.* (2017) realizaram um estudo sobre a liberação de vazão por barragem a montante da cidade de Surat na Índia. Ele aplica o modelo hidrodinâmico 1D combinado com 2D com informações de 2 mil seções do rio e com a utilização de topografia com curvas de intervalo de 0,5 m, e modelos digitais do terreno (MDT) de 30 m e 90 m. Como condições de contorno foram admitidos o nível do mar à jusante e liberação de vazão pela barragem à montante através de um regime não-permanente. Finalmente, avalia a construção de diques após o evento de cheia. Khattak *et al.* (2016) apresentou o trabalho mostrando a aplicação de HEC-RAS em combinação com o ArcGIS, para desenvolver mapas de planície de inundação para parte do rio Kabul no Paquistão com vazão de barragem como condição de montante. Timbadiya, Patel e Porey (2014b), em seu trabalho, utilizaram a maré do mar Arábico como condição de jusante para o seu modelo 1D de inundação.

A utilização de modelo bidimensional requer a disponibilidade de um modelo digital de terreno para as simulações. Para isso, ter um modelo com boa resolução espacial é um fator muito positivo na previsão de inundações. Vozinaki *et al.* (2017) realizam algumas simulações comparando diferentes resoluções de terreno e demonstraram que as simulações 1D HEC-RAS e combinadas 1D / 2D HEC-RAS com resolução de 1m apresentaram um desempenho melhor do que o processo de calibração e verificação dos modelos com resolução de 5 m DEM.

Fraile-Jurado e Ojeda-Zuñjar (2013) fizeram uma discussão sobre a acurácia de modelos de terreno na modelagem de áreas de inundação. Os resultados mostraram uma superestimação de 72% nas áreas inundadas derivadas de MDE de baixa resolução quando comparados com MDE LIDAR de alta resolução. Isso demonstra que a precisão vertical do DEM é uma variável crítica na medição significativa dos impactos do aumento do nível do mar.

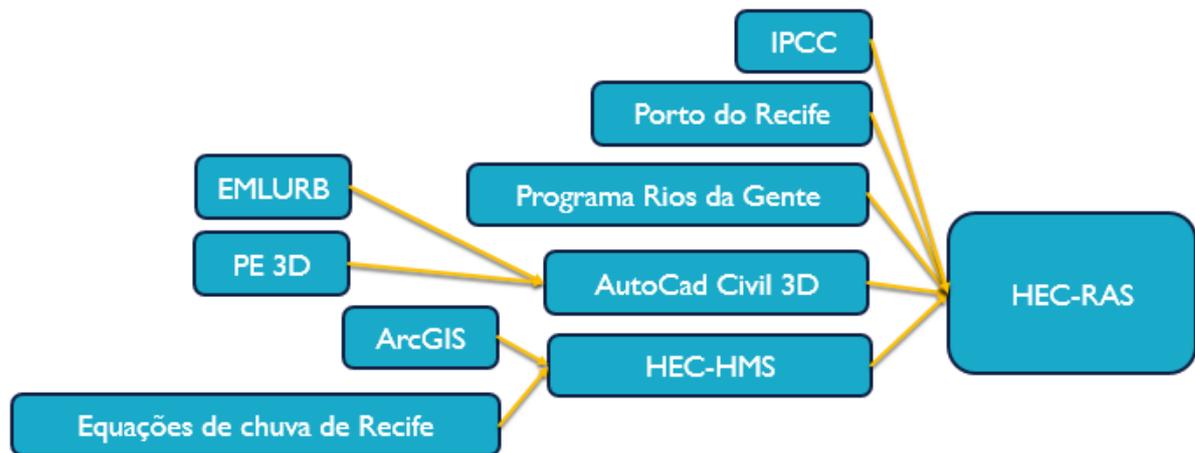
A tecnologia LIDAR possui mais de 30 anos (GUENTHER,1985) e já foi empregado em diversos programas para reconhecimento de terreno. Pulsos de laser são transmitidos através de um conjunto de ótica e scanner a partir de um avião. Uma unidade receptora, também localizada aeronave, coleta a energia de retorno da interação dos pulsos de laser com a superfície na área pesquisada. O pulso de laser recebido é registrado como uma função do tempo, e o posicionamento da medição do laser é calculado usando informações como posicionamento e atitude da aeronave, ângulo de varredura e tempo do pulso transmitido (PE'ERI; LONG, 2011).

Em Pernambuco, um programa do Governo do Estado, denominado "Pernambuco Tridimensional" realizou o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território pernambucano com precisão altimétrica melhor que 25 cm e resolução espacial de 1,00 m. Exclusivamente para 26 municípios, segundo critérios de população, localização geográfica e a necessidade de base cartográfica para desenvolvimento de projetos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, a precisão altimétrica é melhor que 10 cm e resolução espacial de 0,5 m (PERNAMBUCO, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia pode ser dividida nas etapas expressas no organograma da Figura 3. A estimativa de aumento do nível médio dos mares levou em conta os dados do IPCC, que por sua vez foram correlacionados com as previsões de maré do Porto do Recife. Dados de batimetria do rio Capibaribe serviram de entrada para uma primeira simulação no programa HEC-RAS, estimando a cota do nível d'água na saída do riacho Cavouco. Informações das seções transversais disponibilizadas pela EMLURB junto aos dados do terreno pelo PE3D possibilitaram a obtenção das seções completas (calha e margens) do riacho Cavouco, tendo pré-tratamento através do programa AutoCad Civil 3D. Características morfológicas da bacia foram processadas no programa ArcGIS. Ainda, junto a um estudo analítico das equações de chuva de Recife e obtenção da chuva de projeto, geraram informações para a modelagem hidrológica no programa HEC-HMS. A partir das etapas supracitadas, foi possível construir o modelo hidráulico no programa HEC-RAS, foco do presente estudo. Cada tópico será adiante elucidado de maneira detalhada.

Figura 3 - Organograma resumo da metodologia



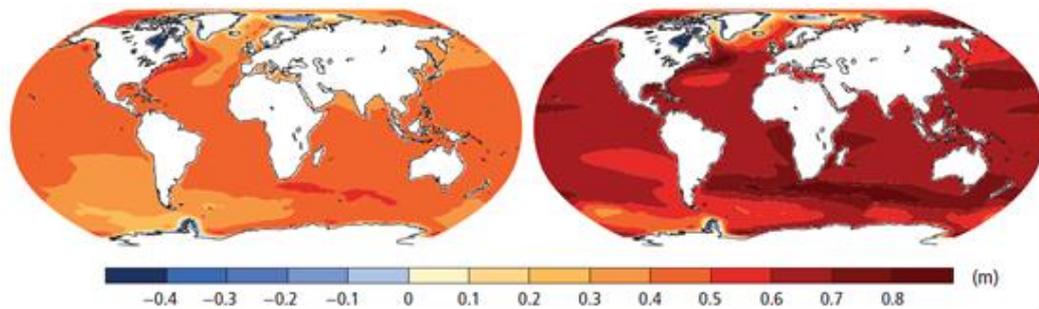
Fonte: o Autor, 2018.

4.1 INFORMAÇÕES DE MARÉ

Em um primeiro momento, recolheu-se dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) para compreender qual a previsão de aumento de nível do mar na costa de Recife. No IPCC foram postas projeções para o aumento do nível do mar que ocorrerão durante o século 21, devido ao aquecimento global, impulsionadas por alterações climatológicas do passado, o nível do mar

continuará a subir, mesmo que o lançamento de gases do efeito estufa estabilizem. Verificou-se que a média global de aumento do nível do mar tem subido e que a previsão para a costa nordeste do Brasil aumente até 0,7 metros até 2100 (Figura 4).

Figura 4 - Cenários de previsão de aumento no nível médio dos mares, com estabilização no lançamento dos gases do efeito estufa (esq.) e com aumento nas emissões (dir.).

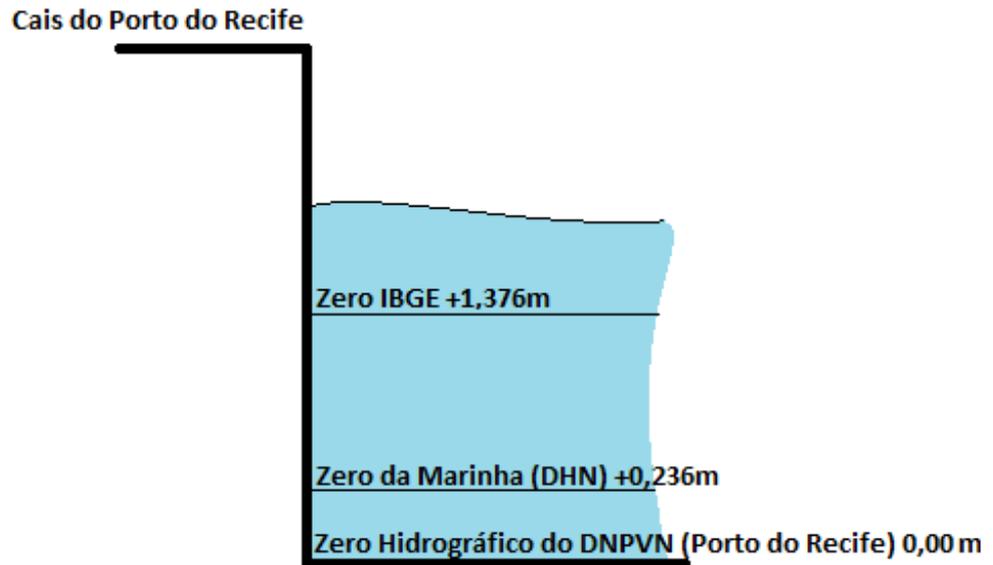


Fonte: IPCC, 2014

Em seguida, buscou-se informações da previsão da maré da estação do Porto do Recife para analisar em conjunto, com os dados de aumento do nível do mar, as alterações para o final do século. A tábua de marés apresenta grande variedade ao longo do dia, podendo na lua cheia chegar a 2,7 metros. As marés são obtidas em relação ao Zero do Porto do Recife (DNPVN – Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis) e representam uma cota com diferença de 0,236 m em relação ao Zero da Marinha (DHN – Diretoria de Hidrovia e Navegação) e 1,14 m em relação ao zero hidrográfico do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (Figura 5).

Ao ajustar, portanto, as cotas de maré, passando a adotar como referência o “Zero do IBGE”, a cota será de 2,70 m menos 1,14 m, menos 0,236 m, resultando em 1,324 m, que para fins de praticidade adotaremos 1,3 m. Na ocasião de aumento 0,7 m de acordo com as informações do IPCC, a cota passaria, então, para 2,0 m.

Figura 5 - Esquema de correlação entre as cotas do Porto do Recife e IBGE.

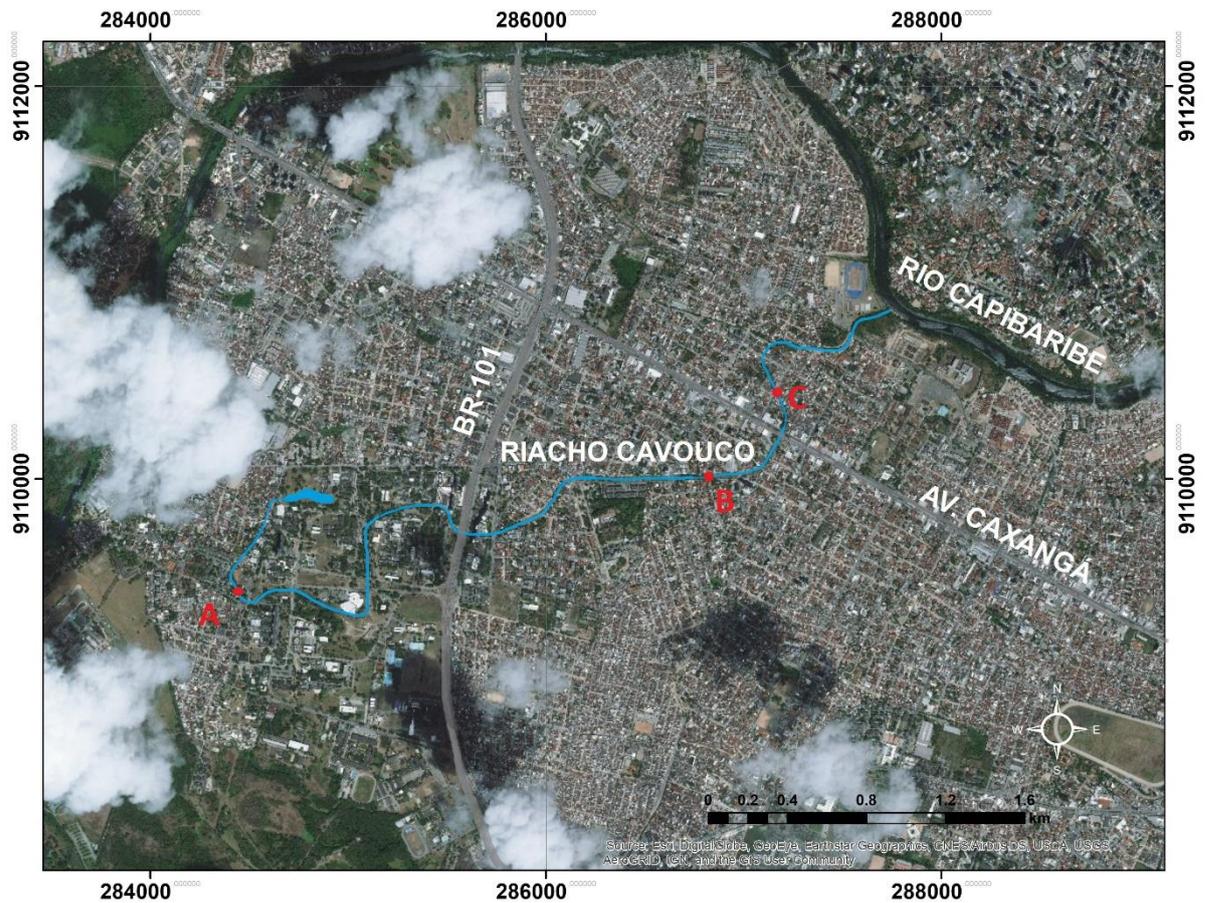


Fonte: Vasconcelos e Bezerra, 2000.

4.2 O RIACHO CAVOUÇO

O Cavouco, tributário do rio Capibaribe, possui uma extensão de aproximadamente 5,3 km e ao longo de seu curso atravessa duas importantes vias para a Região Metropolitana do Recife: a BR-101 e a Av. Caxangá (Figura 6). Seu curso natural encontra-se bastante modificado sendo sua maior parte canalizada com revestimento artificial. Em alguns trechos há a presença de ocupações ribeirinhas irregulares, que comprometem a proteção ciliar do riacho. O trecho mais crítico de ocupações ribeirinhas irregulares possui uma extensão aproximada de 600 metros (sem revestimento) e encontra-se próximo do exutório do sistema, à aproximadamente 500 metros de distância.

Figura 6 - Imagem de satélite com destaque para o riacho Cavouco e principais vias.



Fonte: o Autor, 2018.

A Figura 7, correspondente ao ponto B na Figura 6, mostra o trecho do riacho Cavouco em trecho canalizado com talude inclinado nas margens, recoberto com grama e algumas árvores. O fato do trecho gramado ser inclinado possibilita uma seção transversal maior por ocasião das chuvas mais intensas e reduz o risco de ocupações por moradias de pessoas sem teto. As árvores na passarela e na margem gramada possibilitam uma boa sombra para a população e não impedem a visão do espelho d'água.

Figura 7 - Trecho do Riacho Cavouco mostrando margens canalizadas, área gramada na calha expandida, passeio para pedestre e ciclovia.



Fonte: o Autor, 2013.

A Figura 8, correspondente ao ponto A na figura 6, mostra trecho do riacho Cavouco próximo à nascente. Nesse trecho de aproximadamente 800 m o riacho encontra-se densamente ocupado por moradias que descartam os esgotos domésticos diretamente no corpo d'água. Essa região é alvo de inundações frequentes, comprometendo a qualidade de vida das pessoas que ali residem e a função hidrológica natural do riacho.

Figura 8 - Trecho próximo à nascente do riacho Cavouco.



Fonte: o Autor, 2013.

Outro trecho também comprometido e que representa um alto risco fica localizado próximo ao rio Capibaribe (Figura 9), correspondente ao ponto C da Figura 6. Nesse local, a ocupação das casas forma um “canal artificial” reduzindo a

capacidade de escoamento da seção. O risco é ainda maior devido aos resíduos sólidos que são descartados à margem do canal. Na imagem é ainda possível observar a altura da ponte construída pelos próprios moradores na tentativa de superar os níveis máximos de cheia já registrados, e como há pouco desnível entre a cota da ponte e o nível do piso das casas.

Figura 9 - Trecho próximo ao exutório do riacho Cavouco.



Fonte: o Autor, 2013.

4.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

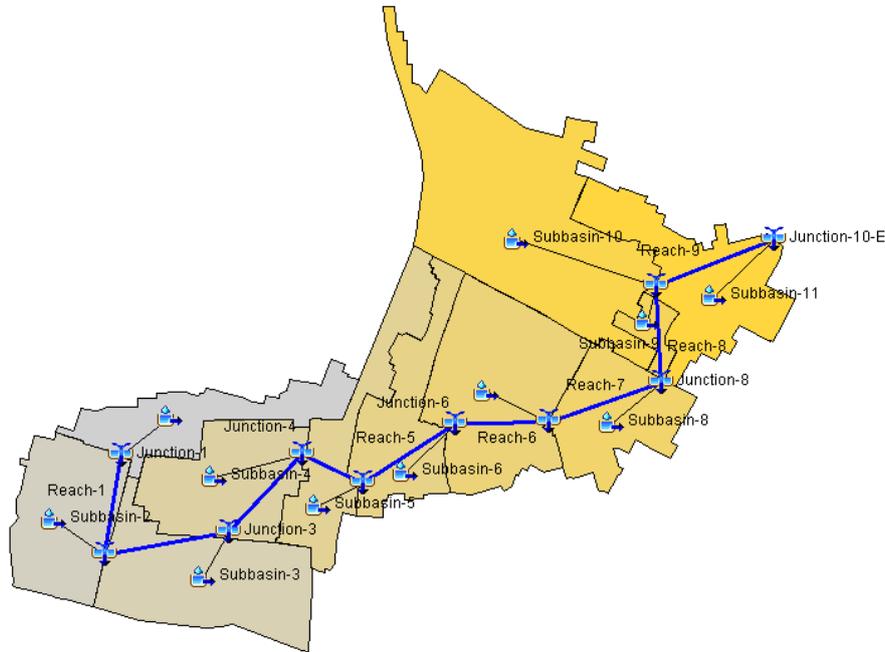
4.3.1 Modelo HEC-HMS

Inicialmente, com auxílio do programa ArcGIS e dados de topografia a laser obtidos do programa Pernambuco Tridimensional (PERNAMBUCO, 2018), foram delimitadas e caracterizadas as sub-bacias de drenagem do riacho Cavouco. As informações obtidas, apoiadas por imagens de satélite e equações de chuva da região, forneceram suporte a modelagem hidrológica.

Para obter as vazões de cada sub-bacia, foi utilizado o programa HEC-HMS, desenvolvidos pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (US Army Corps of Engineers-USACE). A transformação da chuva em vazão foi realizada através do método do Hidrograma Unitário do SCS (Soil Conservation Service), considerando uma chuva com tempo de recorrência de 5 anos uniformemente distribuída sobre a bacia. O método das perdas adotado foi o Curva Número do SCS e o tempo de concentração de cada sub-bacia foi obtido pela fórmula de Carter, recomendado por

Silveira (2005). A Figura 8 apresenta o layout da montagem do modelo hidrológico no programa HEC-HMS.

Figura 10 - Esquema das bacias de contribuição no ambiente do programa HEC-HMS.



Fonte: o Autor, 2018.

O HEC-HMS solicita que o usuário entre com as informações de precipitação, que por sua vez, podem ser obtidas das equações de chuva intensa. Dessa forma, foi informado os valores das alturas pluviométricas para determinado tempo de retorno, que para fins de escolha da equação utilizou-se 10 anos. Acqua-Plan (1 e 2) (FIDEM, 1980), Emcibra (3) (1978) e Ramos e Azevedo (4) (2010) desenvolveram as principais equações de chuva para Recife.

$$i_1 = \frac{456,768 \cdot (T - 1,5)^{0,117} \cdot (1 - 4,54 \cdot 10^{-21} \cdot t^8)}{(t + 6)^{0,5811}} \quad (3)$$

Fonte: Acqua-Plan, FIDEM, 1980

$$i_2 = \frac{72,153 \cdot (T - 1,75)^{0,173}}{(t + 1)^{0,74926}} \quad (4)$$

Fonte: Acqua-Plan, FIDEM, 1980

$$i = \frac{335,47 \cdot T^{0,218}}{(t + 4)^{0,539}} \quad (5)$$

Fonte: Emcibra, 1978

$$i = \frac{1423,97 \cdot T^{0,1124}}{(t + 21)^{0,7721}} \quad (6)$$

Fonte: Ramos e Azevedo, 2010

A equação escolhida foi a que apresentou maior valor de intensidade de chuva, para a mesma duração de chuva e tempo de retorno (Tabela 1). As durações dos eventos foram tomadas como iguais ao tempo de concentração obtido pela equação de Kirpich I, portanto 174,19 min (ou 180 min).

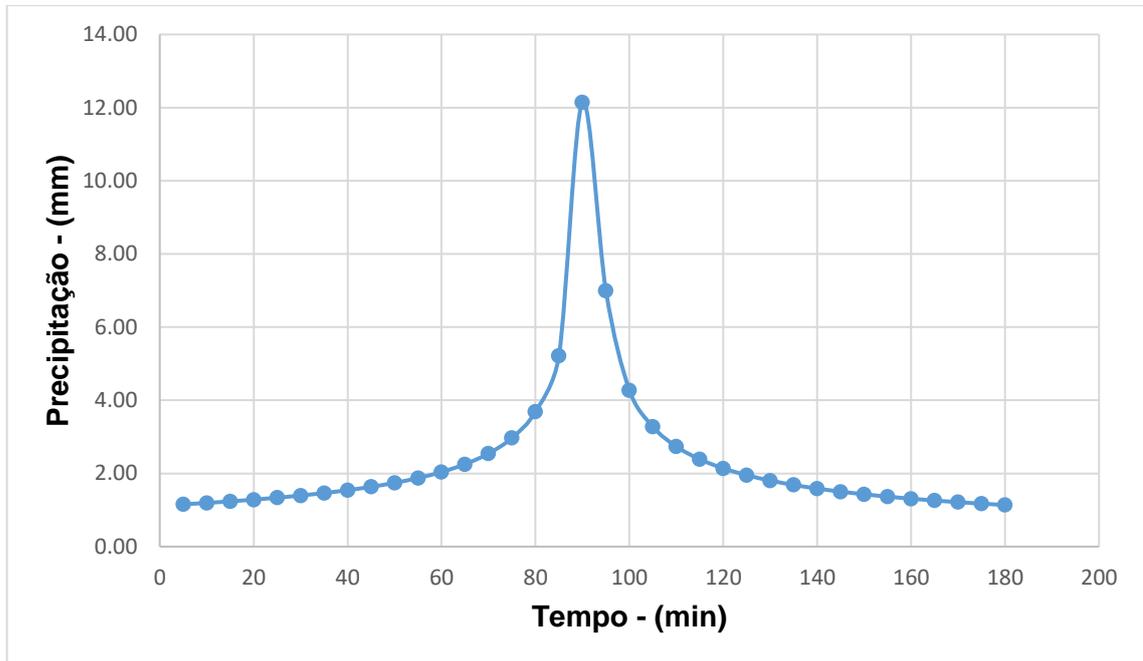
Tabela 1 - Informações hidrológicas para escolha da equação de chuva.

Cavouco		
TR	10 anos	
td	174,19 min	
Emcibra	i=	33,92 mm/h
Acqua1	i=	28,57 mm/h
Acqua2	i=	21,67 mm/h
Ramos	i=	31,44 mm/h

Fonte: o Autor, 2018.

Em seguida, através do Método dos Blocos Alternados, foi gerado o hietograma da Figura 11 com o uso do programa Microsoft Office Excel.

Figura 11 - Precipitação em mm para o período de retorno de 5 anos em função do tempo em minutos.



Fonte: o Autor, 2018.

O método do SCS engloba informações relativas à precipitação e ao componente solo-vegetação, considerando o tipo, o uso, a umidade inicial e a condição hidrológica do solo. O método baseia-se na determinação da parte da precipitação que gera escoamento superficial, a precipitação efetiva. A precipitação efetiva é a parcela da chuva total que escoam superficialmente, dando origem às cheias em bacias de pequeno e médio porte. Os principais fenômenos que atuam na separação do escoamento superficial são a interceptação vegetal, a retenção em depressões do terreno e a infiltração, que é quem desempenha papel mais relevante, especialmente em pequenas bacias. De acordo com o método, a lâmina escoada durante uma chuva é dada por:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (7)$$

(quando $P > I_a$; $Q=0$ se $P \leq 0$)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (8)$$

- Q é a lâmina escoada ou volume escoado dividido pela área da bacia (m^3/s);
- P é a precipitação durante o evento (mm);
- I_a é uma estimativa das perdas iniciais da água, dado por $I_a = S/5$; e
- S é um parâmetro que depende da capacidade de infiltração e armazenamento do solo

O método do SCS tem como premissa a razão entre o volume infiltrado e a capacidade de infiltração como sendo diretamente proporcional à razão entre a chuva excedente e a precipitação total. Os valores do CN (Número de Curva) podem ser encontrados nas tabelas fornecidas pelo NRCS (Natural Resources Conservation Service, que significa Serviço de Conservação dos Recursos Naturais, antes conhecido como SCS) que é função do uso e cobertura do solo, classificação hidrológica e condição antecedente de umidade (Tabela 2).

O CN é estabelecido em uma escala de 1 a 100, variando desde uma cobertura completamente permeável (limite inferior) até uma cobertura muito impermeável (limite superior). A escolha depende do tipo de solo, sendo classificado em quatro grupos:

Solo A: solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila;

Solo B: solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que do tipo A e com permeabilidade superior à média;

Solo C: solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo;

Solo D: solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Tabela 2 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Espaços abertos, parques, cemitérios com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Espaços abertos, parques, cemitérios com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais com lotes de área < 500m ² ou 65% impermeável	77	85	90	92
Ruas asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Ruas com paralelepípedos	76	85	89	91
Ruas de terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci, 1997.

Considerando as condições de cobertura atuais da bacia do riacho Cavouco de amplas áreas de relva, principalmente na região em que atravessa o campus da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco), o baixo índice de áreas industriais e comerciais, bem como um solo com características que se aproximam do tipo C, adotou-se o valor de CN como 80.

4.3.2 Processo de delimitação de bacias

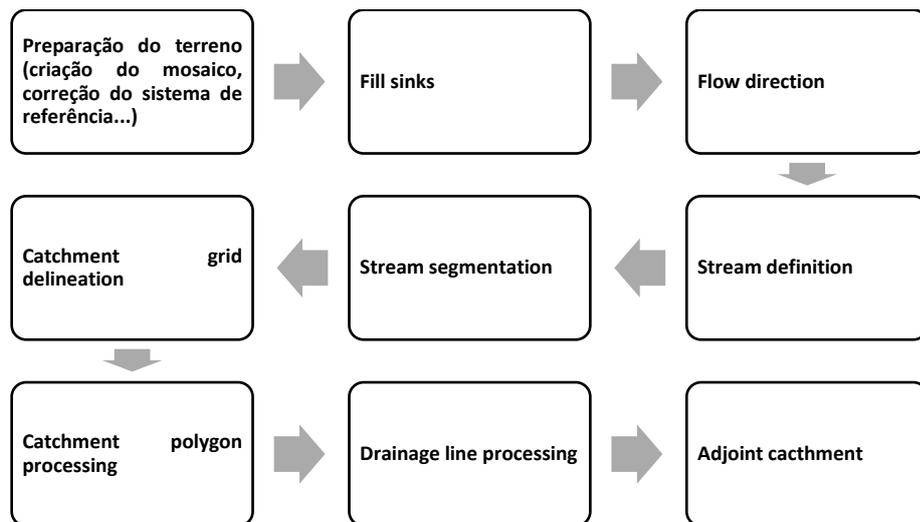
Simplificadamente, o processo de delimitação de bacias consiste em se obter uma carta topográfica de curvas de nível onde se marcam os pontos mais altos, ligando-os a fim de formar os divisores de bacia. Apesar de serem etapas fáceis, este processo acaba sendo cansativo e impreciso a medida que se aumentam a extensão e a quantidade de bacias para delimitar, além de ter o nível de dificuldade aumentado a medida que a topografia da região fica plana.

A fim de tentar suprir este problema, é possível a utilização de programas de geoprocessamento como o ArcGIS. O ArcGIS é composto por vários softwares SIG (Sistemas de Informações Geográficas) produzidos pela ESRI. Ele fornece muitas ferramentas no processamento e manipulação de dados geográficos. Os softwares são: ArcCatalog, ArcToolBox, ArcReader, ArcScene, ArcGlobe e ArcMap. Alguns dos formatos reconhecidos pelo ArcGIS são: Shapefile (polígono, linha, ponto), layer (.lyr), base de dados (.mdb), tabela (.dbf), MDX e TIN. O programa ArcGis possibilita, em uma de suas aplicações, que o usuário siga uma sequência de etapas para a delimitação automática das bacias e traçado da malha hidrográfica (Figura 12).

Entretanto, em sua segunda etapa (“Fill sinks”), o programa realiza um preenchimento de depressões existentes no terreno que no caso de áreas urbanas, marcadas por estruturas como pontes, apresenta algumas dificuldades à precisão na delimitação. Isso se dá porque o processo identifica a região à montante da ponte como uma depressão, elevando os valores de cota altimétrica de toda a área, conseqüentemente falseando o resultado, seja da delimitação quanto do traçado da malha hidrográfica.

Embora para bacias em rurais e bacias que possuam poucas áreas planas esse problema seja menos identificado, para a nossa região de estudo que abrange integralmente uma bacia de baixa declividade e com inúmeros obstáculos artificiais, torna-se fundamental um método que aborde de forma mais precisa as áreas que contribuem para o sistema de drenagem.

Figura 12 - Esquema simplificado de etapas de delimitação de bacias hidrográficas no programa ArcGIS.



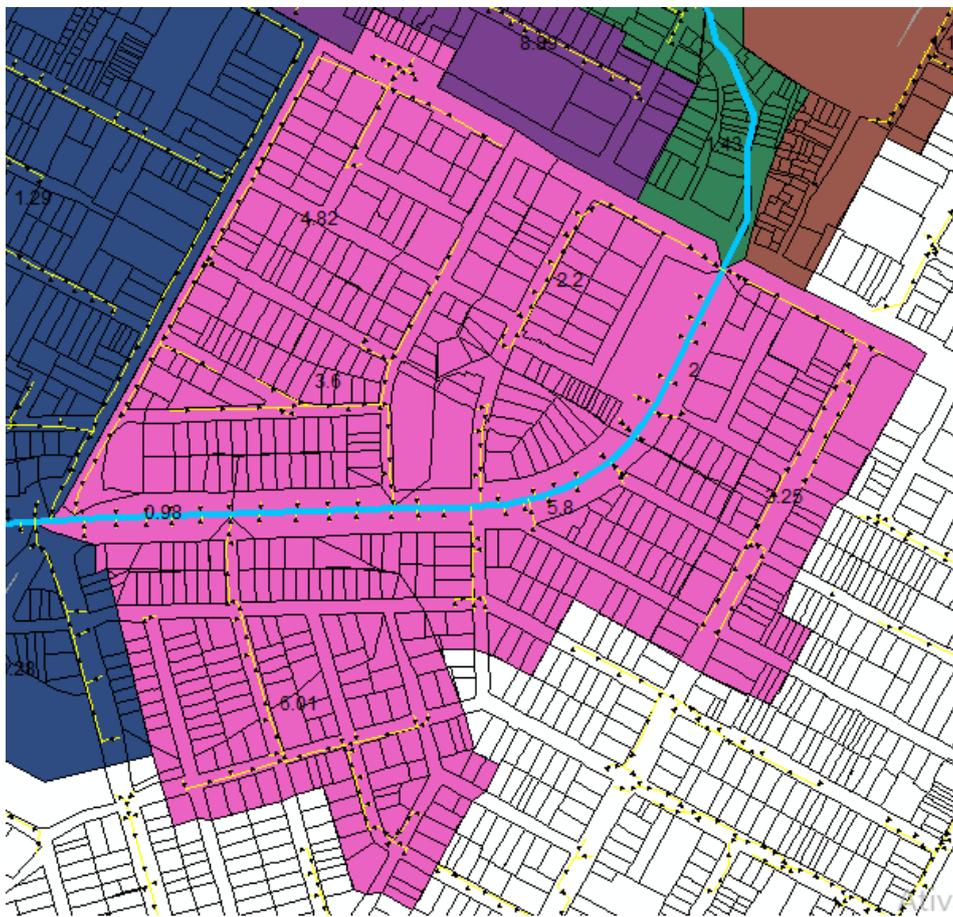
Fonte: o Autor, 2018.

A metodologia aplicada foi a delimitação de bacias por meio de informações da rede de microdrenagem existente. A rede de microdrenagem foi disponibilizada pela EMLURB, produto de cadastramento da rede para realização do Plano Diretor de Drenagem Urbana. Através dela e com auxílio de informações geográficas dos lotes e quadras da cidade do Recife foi possível delimitar a bacia segundo as contribuições

dos lotes, declividades dos logradouros, posição das estruturas de captação e direcionamento das galerias.

A Figura 13 mostra um trecho do riacho Cavouco e as galerias de drenagem que conduzem as águas de escoamento superficial para a macrodrenagem. É possível perceber que em áreas urbanas planas os limites da bacia hidrográfica não seguem um traçado regular. A topografia nesse caso passa a ser coadjuvante, já que trechos de galerias podem atravessar um talvegue sem forçar a declividade.

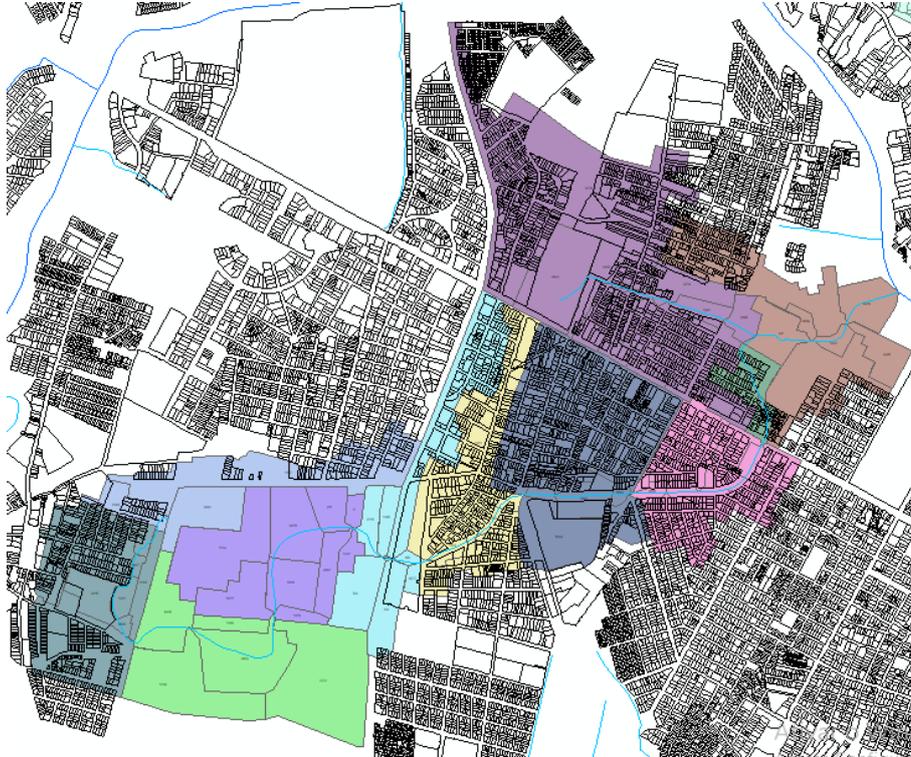
Figura 13 - Detalhe das camadas de drenagem, lotes, quadras e bacia de contribuição.



Fonte: o Autor, 2018.

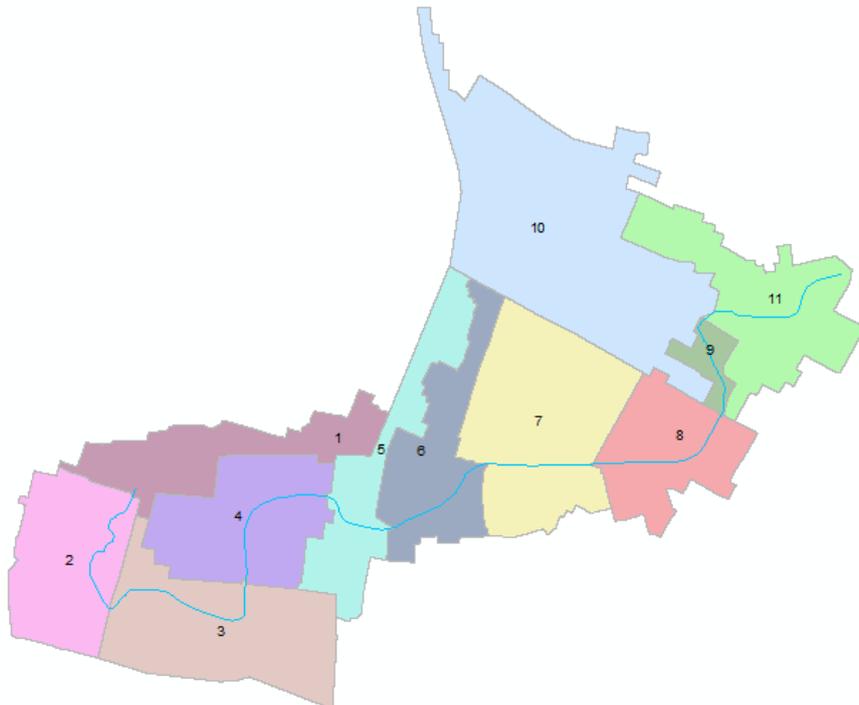
Neste trabalho, inicialmente foi feita a identificação de todas as galerias que chegam ao riacho Cavouco e sua respectiva bacia de contribuição. A etapa apresentada na Figura 14, mostra que há inúmeras parcelas. Portanto, para fins práticos, optou-se por unir as parcelas em sub-bacias maiores. As sub-bacias foram numeradas de 1 a 11 (Figura 15), totalizando as áreas apresentadas na Tabela 3.

Figura 14 - Parcelas de contribuição separadas segundo critério de redes de microdrenagem.



Fonte: o Autor, 2018.

Figura 15 -Total de sub-bacias após união das parcelas.



Fonte: o Autor, 2018.

Tabela 3 - Áreas de contribuição das sub-bacias.

Sub-bacias	Área (km²)
1	0,277
2	0,348
3	0,470
4	0,366
5	0,297
6	0,301
7	0,542
8	0,286
9	0,057
10	0,916
11	0,403

Fonte: o Autor, 2018.

4.3.3 Classificação não supervisionada

A modelagem hidrológica depende de informações da permeabilidade das sub-bacias e para esta demanda foi aplicada a metodologia de classificação não supervisionada do programa ArcGIS. As imagens foram obtidas de ortofotos aéreas datadas de 2013 e disponibilizadas pela Prefeitura do Recife.

Inicialmente, há uma classificação segundo a concordância dos pixels e as características das bandas que compõem a imagem, resultando em uma malha com trinta classificações diferentes. É possível, através da análise visual, unir diferentes classes com características de permeabilidade semelhantes. O resultado é uma malha com duas cores, uma para área impermeável e outra para área permeável (Figura 16), onde é possível observar as ruas, lotes e áreas verdes.

Figura 16 - Detalhe da classificação quanto a permeabilidade, sub-bacia 8.



Fonte: o Autor, 2018.

O percentual total de área impermeável em cada sub-bacia está representado na Tabela 4.

Tabela 4 - Percentual de área impermeável para cada sub-bacia.

Sub-bacias	Área Impermeável (%)
1	59%
2	65%
3	40%
4	53%
5	67%
6	63%
7	66%
8	71%
9	35%
10	65%
11	64%

Fonte: o Autor, 2018.

4.4 MODELAGEM HIDRÁULICA

4.4.1 Rio Capibaribe

Através do software HEC-RAS, efetuou-se a modelagem hidráulica, para estimar as potenciais catástrofes para diferentes cenários. A avaliação de danos por inundações pode ser obtida contabilizando os efeitos de uma inundação em termos de área ocupada atingida. Na maioria das vezes, o dano é avaliado por meio de funções de dano descrevendo a relação que ocorre entre o dano e as características hidráulicas da inundação como velocidade e profundidade.

As seções para o rio Capibaribe foram tomadas com base em relatório de dragagem do programa "Rios da Gente" do Governo do Estado de Pernambuco (PERNAMBUCO, 2013), desde seu exutório, no Porto do Recife, até 1 km acima do encontro com o riacho Cavouco.

As oscilações de nível na conexão com o riacho provocado pelas variações de maré (Tabela 5) e vazão foram transferidas para um segundo modelo contendo o riacho Cavouco, na forma de condição de contorno. As vazões do rio Capibaribe, foram consideradas como sendo de 700 m³/s, valor atribuído no caso de abertura das comportas da Barragem de Carpina, e em condições normais foi estimado o valor de 100 m³/s.

Tabela 5 - Condições de máxima maré no Porto do Recife com referência no zero do IBGE.

Cota para cenário atual	1,30 m
Cota para cenário futuro	2,00 m

Fonte: o Autor, 2018.

4.4.2 Riacho Cavouco

A bacia do riacho Cavouco foi totalmente representada pelo modelo hidrodinâmico, desde a nascente, sendo os processos hidrológicos internalizados por este modelo. A modelagem do riacho Caiara, afluente do Cavouco, utilizou o recurso de modelagem hidrológica não sendo, portanto, modelado de forma hidráulica.

Os hidrogramas resultantes da modelagem hidrológica no HEC-HMS (Apêndice) apresentaram um pico de vazão para diversos pontos do riacho, cada uma dessas informações foi utilizada para determinar cenários de máxima cheia. A Figura

17 apresenta as diversas configurações de cenários na modelagem hidráulica. Quando consideramos que não ocorre chuva foi atribuído o valor mínimo de 1 m³/s, apenas para fins de simulação.

Figura 17 - Cenários de inundação para o modelo hidráulico em ambiente HEC-RAS.

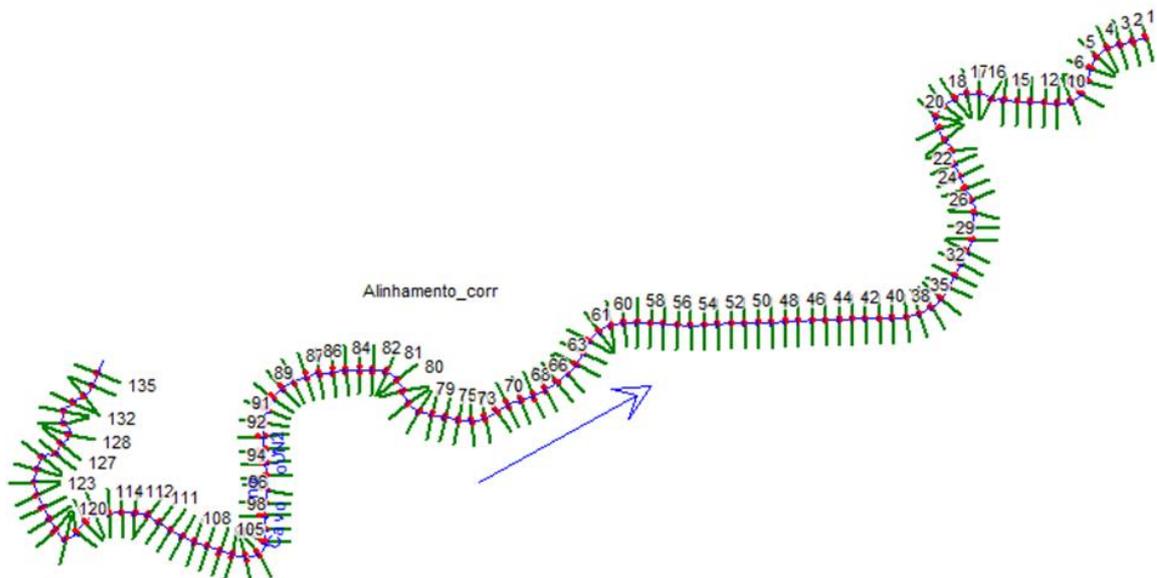
Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates							
River	Reach	RS	PF 1	PF 2	PF 3	PF 4	PF 5	PF 6	PF 7	
1	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	135	4.154	4.154	4.154	4.154	1	1	1
2	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	118	8.829	8.829	8.829	8.829	1	1	1
3	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	98	14.518	14.518	14.518	14.518	1	1	1
4	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	81	17.547	17.547	17.547	17.547	1	1	1
5	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	71	21.883	21.883	21.883	21.883	1	1	1
6	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	59	24.264	24.264	24.264	24.264	1	1	1
7	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	46	31.868	31.868	31.868	31.868	1	1	1
8	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	30	36.38	36.38	36.38	36.38	1	1	1
9	CavoucoUN2	Alinhamento_corr	14	49.837	49.837	49.837	49.837	1	1	1

Fonte: o Autor, 2018.

Os cenários PF1 ao PF4 simulam comportamentos em condições chuvosas, sendo PF1 para o aumento do nível médio dos mares, o PF2 para a abertura das comportas da barragem de Carpina e PF3 para o efeito combinado. O cenário PF4 considera apenas o efeito das chuvas na propagação de vazão. Os cenários PF5 ao PF7 não consideram a ocorrência da chuva, mas apenas a liberação em Carpina (PF6) e o aumento da maré provocado pelas mudanças climáticas (PF7). O cenário PF5 por sua vez simula apenas os efeitos das condições de maré atuais.

Ao todo foram 135 seções transversais a cada 40 m, com 150 m de largura, aproximadamente. A Figura 18 mostra o ambiente geométrico do programa, onde a seção 1 representa o encontro com o rio Capibaribe e a seção 135, o ponto mais a montante.

Figura 18 - Modelo geométrico do riacho Cavouco desenvolvido no HEC-RAS.



Fonte: o Autor, 2018.

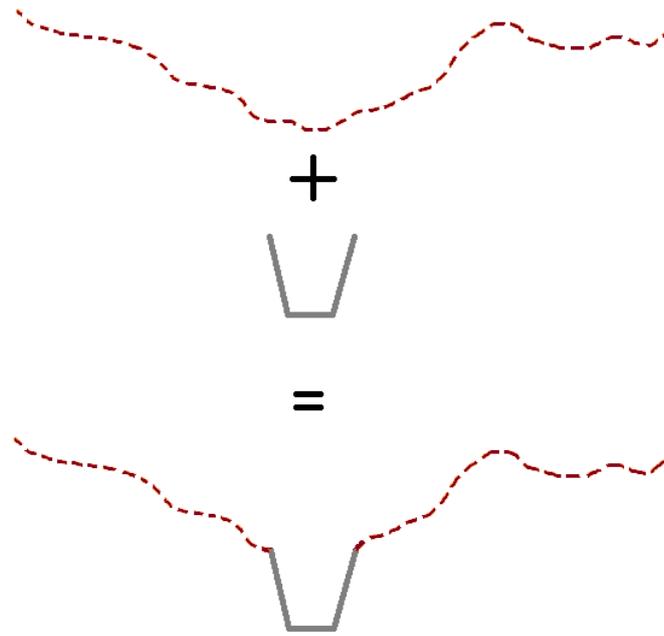
As seções transversais dos riachos Cavouco foram obtidas de informações concedidas pela Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB), órgão, dentre outras atribuições, responsável pela manutenção nos canais da cidade do Recife. Ao todo, foram levantadas 30 seções (Anexo A), sendo que para nosso estudo foram selecionadas 9 seções mais representativas (seções 2, 5, 10, 11, 12, 14, 16, 20 e 26) em seus respectivos trechos segundo critérios de semelhança após visitas de campo.

Para a análise realizada tomou-se como base o escoamento permanente ao longo do canal, sendo os picos dos hidrogramas de entrada nas seções posicionados de maneira a ficar o mais próximo possível das conexões entre riacho e galeria afluyente. Para melhor representação geométrica, foi utilizado, para tratamento e desenho das seções, o programa AutoCad Civil 3D, permitindo posteriormente a exportação para o HEC-RAS.

O Civil 3D estabelece as seguintes etapas até o momento em que as informações são exportadas para o HEC-RAS: importação das informações do terreno; traçado do alinhamento, que corresponde ao talvegue do riacho; traçado do corredor; criação da superfície do corredor; junção da superfície do corredor com o

terreno; seções transversais; e alinhamentos de margem esquerda e direita. A técnica é necessária para que seja possível aprimorar o modelo digital do terreno com informações mais precisas. A Figura 19 mostra uma seção transversal antes e depois das etapas com aprofundamento da calha para concordar com as condições reais.

Figura 19 - Efeito das etapas de aprimoramento do terreno no AutoCAD Civil 3D.



Fonte: o Autor, 2018.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados consistem do produto gerado na modelagem hidráulica do programa HEC-RAS expressos por perfis longitudinais e seções transversais.

5.1 RIO CAPIBARIBE

Após a construção do modelo hidráulico simplificado do rio Capibaribe, foi possível obter os dados que serviram de entrada para o modelo do riacho Cavouco. As informações de interesse são os níveis máximos de cota que a superfície d'água atinge no encontro com o riacho.

A Figura 20 apresenta o perfil longitudinal para um cenário futuro de aumento no nível dos mares em duas situações, com abertura (WS PF 2) e sem a abertura (WS PF 1) das comportas de Carpina. A origem do eixo das abscissas corresponde a localização do Porto do Recife, local de referência para as previsões das oscilações de maré. Já a posição 8000 (m) representa a localização da junção Cavouco-Capibaribe. A Figura 21 mostra a posição relativa entre o Porto do Recife e exutório do riacho Cavouco. Os resultados apresentaram um aumento de 2,05 m para 3,37 m na junção devido aos efeitos de abertura das comportas de Carpina em condições de mudanças climáticas.

Figura 20 - Perfil de elevação: rio Capibaribe em condições de mudanças climáticas.

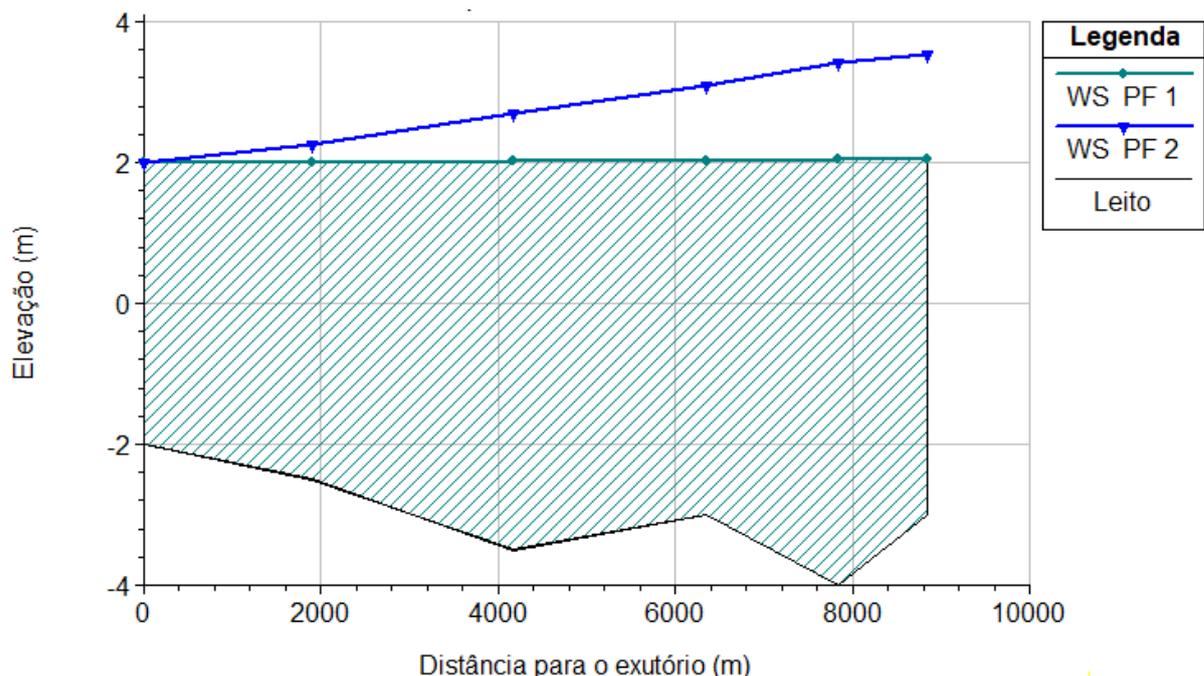


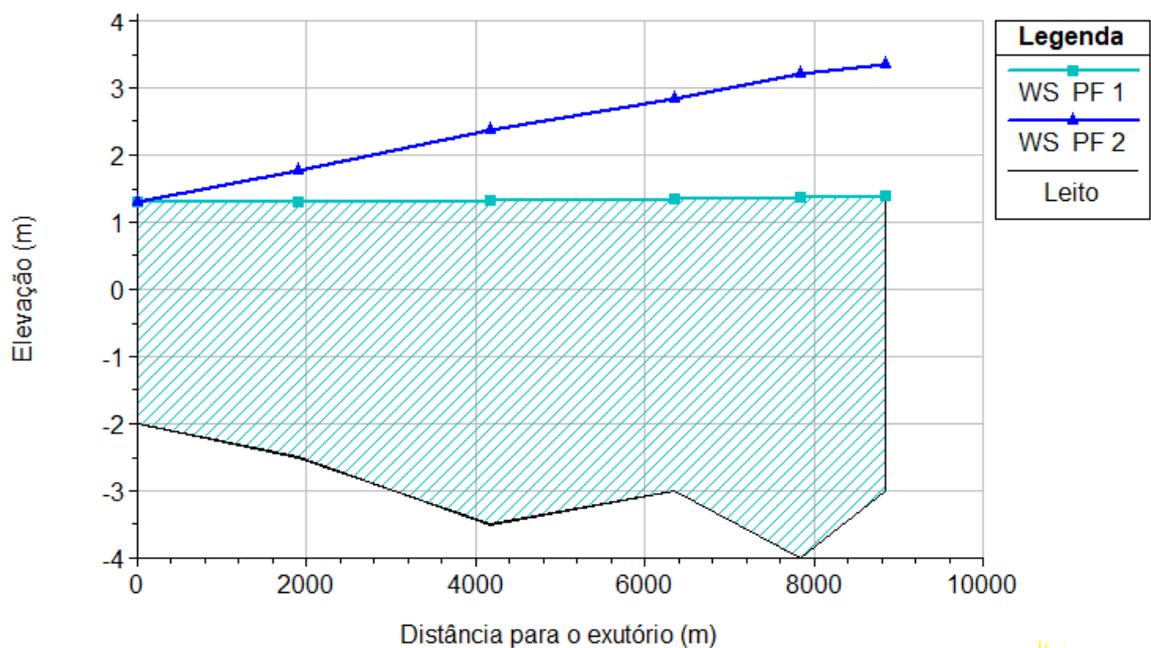
Figura 21 - Imagem de satélite com localização do Porto do Recife e exutório do riacho Cavouco.



Fonte: o Autor, 2018.

A Figura 22 apresenta o perfil longitudinal para um cenário atual de máxima maré em situações de abertura (WS PF 2) e fechamento (WS PF 1) das comportas de Carpina. Os resultados apresentaram um aumento de 1,38 m para 3,20 m na junção devido aos efeitos de abertura das comportas de Carpina em normais de nível máximo da maré.

Figura 22 - Perfil de elevação: rio Capibaribe em condições normais de nível da maré.



Cabe destacar que o estudo utilizando a barragem de Carpina é uma hipótese escolhida por apresentar um evento já registrado, entretanto este mesmo comportamento e riscos advindos podem ser ampliados para as barragens de Goitá e Tapacurá, ambas localizadas à montante da cidade do Recife. Como apresentado por Patel *et al.* (2017) e Khattak *et al.* (2016), barragens representam um alto risco devido a capacidade de danos provocados diante de falhas ou eventos hidrológicos extremos.

Além disso, o aumento provocado pelas mudanças climáticas aqui representado foi de 0,7 m, acompanhando as previsões do IPCC (2014). Cenários mais danosos podem ser depreendidos se pensarmos o modelo com as condições impostas por Costa *et al.* (2010) e por Blankspoor, Dasgupta e Laplante (2014), cujo valor utilizado foi de 1,0 m.

5.2 RIACHO CAVOUCO

Em uma primeira análise, pode-se perceber um aumento expressivo de regiões alagadas, caracterizado pela elevação do nível d'água em relação à linha de margem. Estende-se por 760 m desde o exutório do riacho Cavouco até a seção transversal 20 (número na vertical), devido aos efeitos da liberação de vazão por Carpina (Figura 22). A Figura 24 amplia a região, mostrando como o nível d'água supera a margem.

Figura 23 - Perfil de elevação: efeito da abertura das comportas em condições chuvosas.

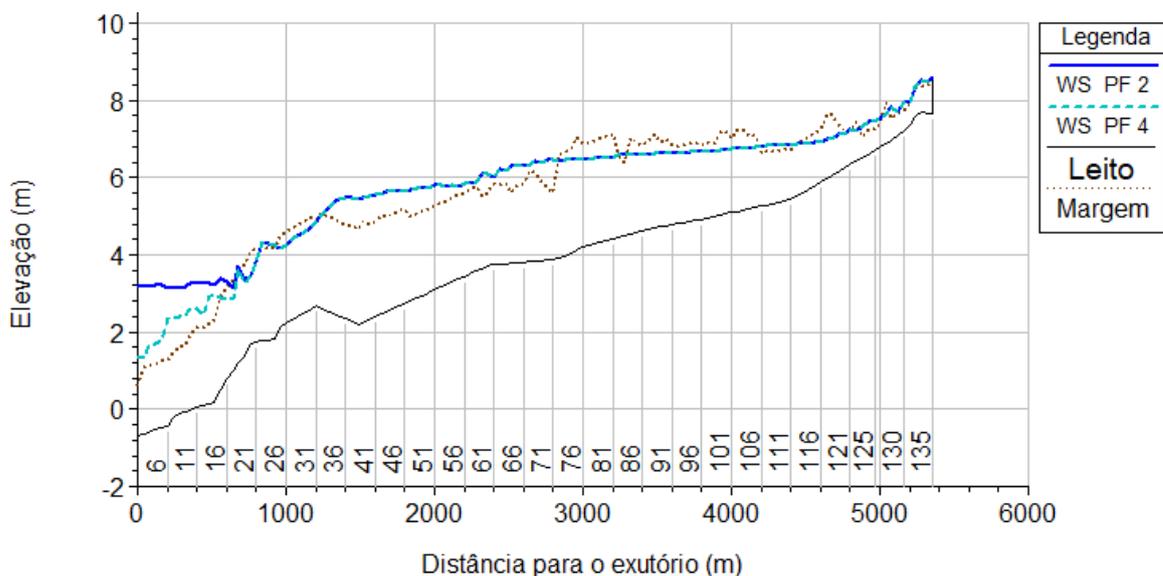
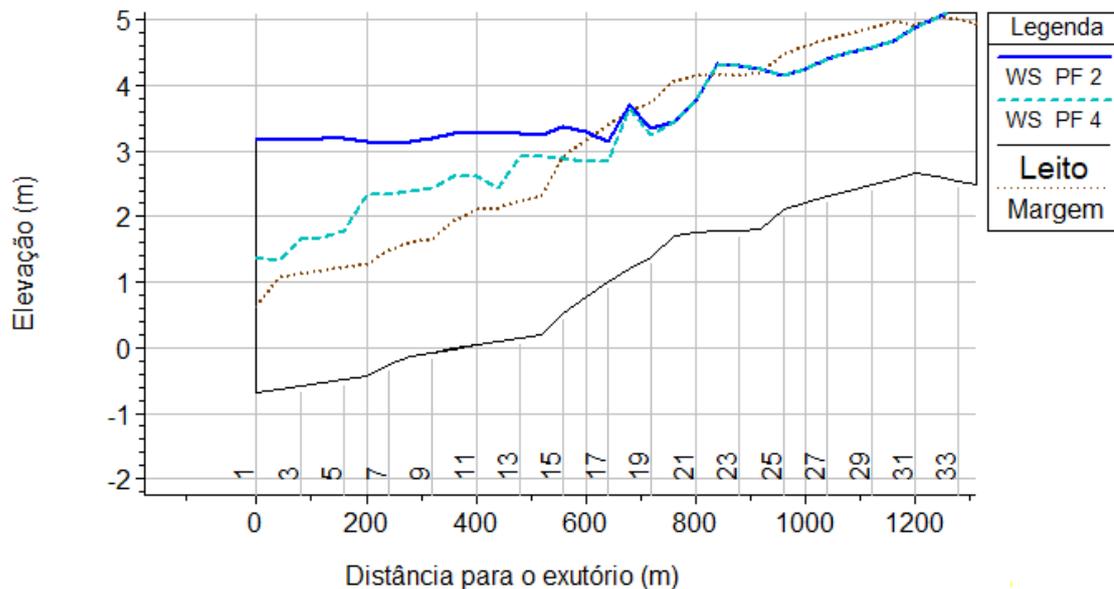


Figura 24 - Detalhe da Figura 23.



O perfil apresentado na Figura 25, onde considera-se o aumento do nível dos mares, demonstra um efeito de menor magnitude, tendo o aumento repercutido por uma extensão de 160 m (ver detalhe na Figura 26). Esses resultados mostram características distintas dos danos provocados. Se por um lado, o dano provocado pela abertura da comporta das barragens de Carpina possui uma extensão maior, por outro possui uma menor probabilidade de ocorrência. O aumento do nível médio dos mares, no entanto, terá uma interferência frequente nestas regiões, apesar da menor extensão.

Podemos perceber, que apesar do aumento no nível dos mares representar um fator significativo para as regiões costeiras, o riacho Cavouco, por se tratar de um curso d'água mais afastado do encontro com o mar, recebe uma menor influência dessa variação. As regiões, como podemos visualizar, mais distantes do rio Capibaribe sofrem pouca interferência na maior parte do escoamento. Os resultados mostraram que não se espera que uma grande área seja exposta à inundação, tendo em vista que a linha de cheia em condições chuvosas, em sua maior parte, não sofre alteração devido ao aumento dos níveis no exutório. Entretanto, as áreas baixas até 3 m possuem um alto risco de inundação durante a maré alta, e até 4 m quando há a liberação da vazão por Carpina corroborando com os estudos de Costa *et al.* (2010) e Fraile-Jurado *et al.* (2017).

Figura 25 - Perfil de elevação: análise do efeito do aumento do nível médio dos mares em condições chuvosas.

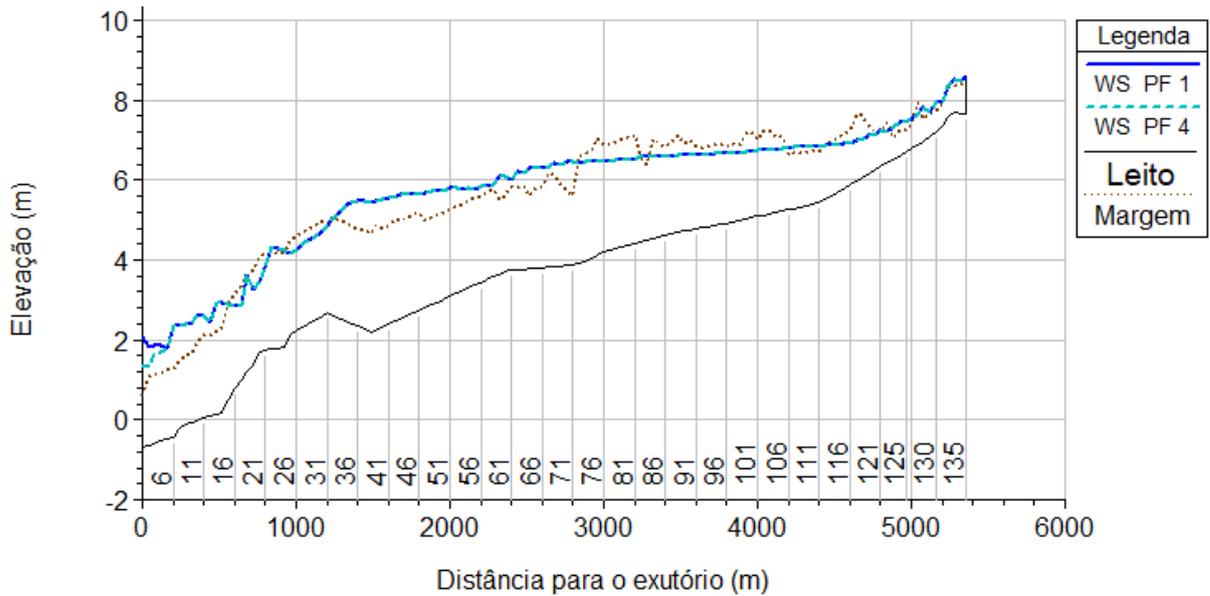
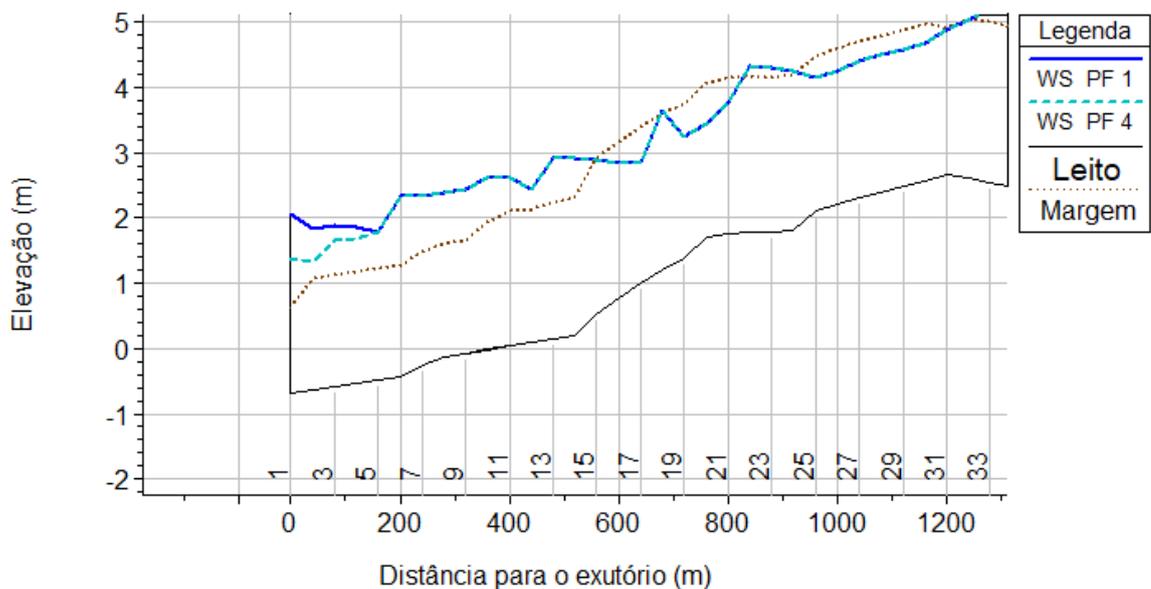


Figura 26 - Perfil de elevação: detalhe da Figura 25.



O modelo combinado de aumento do nível dos mares e abertura das comportas de Carpina (Figura 27) gera um resultado semelhante ao de liberação de vazão sem aumento do nível dos mares. Uma região de aproximadamente 760 m de extensão tem seus níveis elevados, intensificando os danos provocados pelos alagamentos (Figura 28).

Figura 27 - Perfil de elevação: análise do efeito combinado do aumento do nível médio dos mares e abertura das comportas em condições chuvosas.

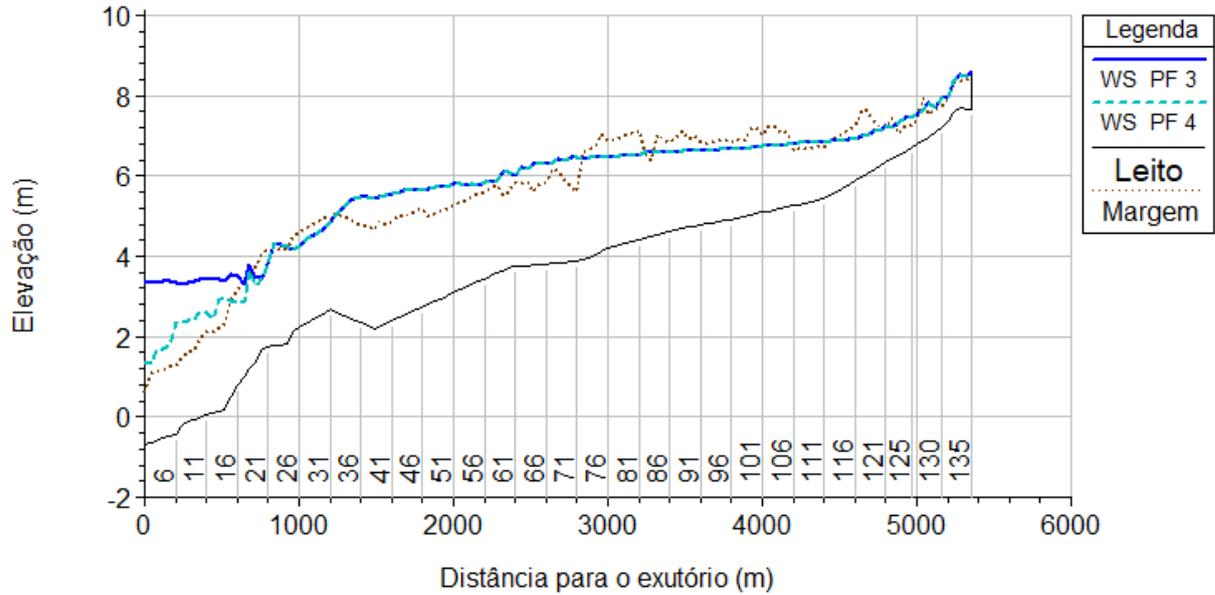
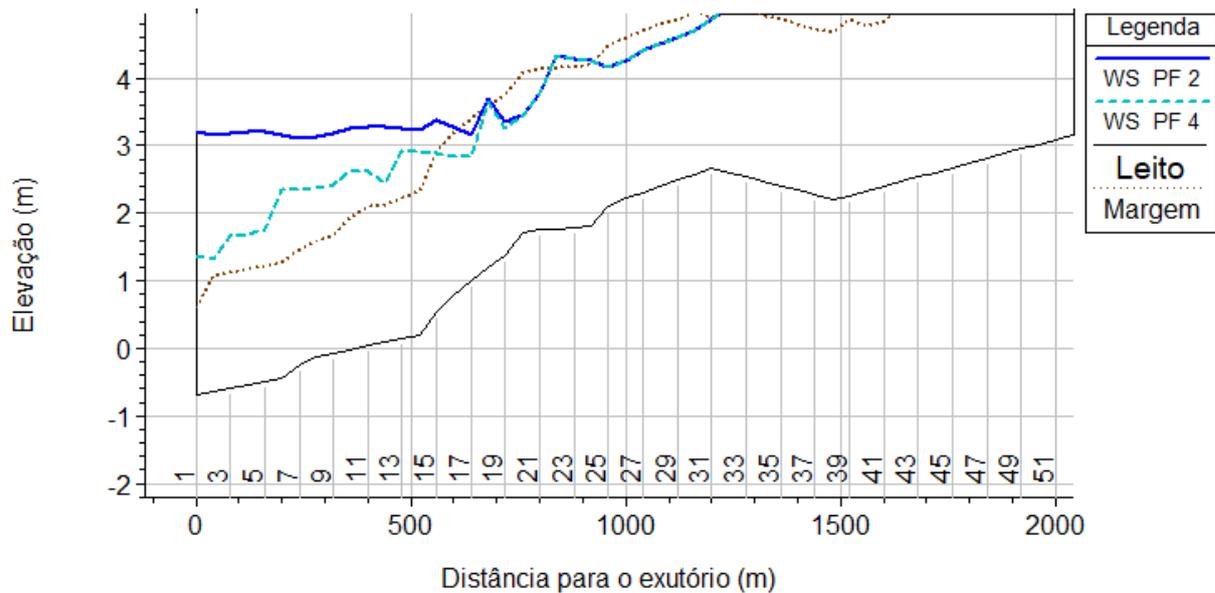
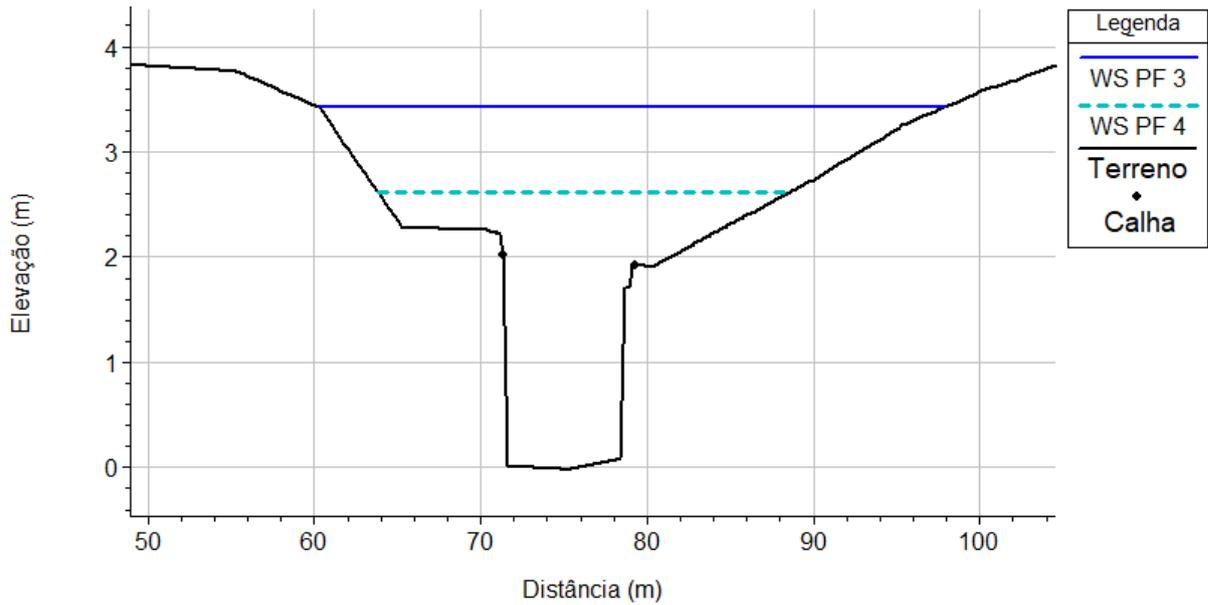


Figura 28 - Perfil de elevação: detalhe da Figura 27.



Na seção transversal 15 do modelo (Figura 28), incluída nesta região, pode-se visualizar que a chuva de projeto (WS PF4) extrapola os limites da calha em 0,69 m. Já com o efeito combinado de Carpina e o aumento do nível dos mares (WS PF3) o nível máximo d'água ultrapassa em 1,50 m, por sua vez a largura superficial da água na seção aumenta em 14 m aproximadamente, o que demonstra a extensão dos danos provocados quando há a conjunção desses fatores.

Figura 29 - Seção transversal 15 do modelo.



A Figura 30 apresenta duas regiões, sendo uma onde ocorrem alagamentos (quando a superfície d'água supera a linha de margem, entre as seções 32 e 72) e a outra com resultados satisfatórios de escoamento (quando a linha de margem fica acima da linha d'água, entre as seções 72 e 105). A primeira parte como as seções 42 e 52 (Figuras 31 e 32) e a segunda como as seções 80 e 92 (Figuras 33 e 34).

Figura 30 - Perfil de elevação: detalhe da Figura 27.

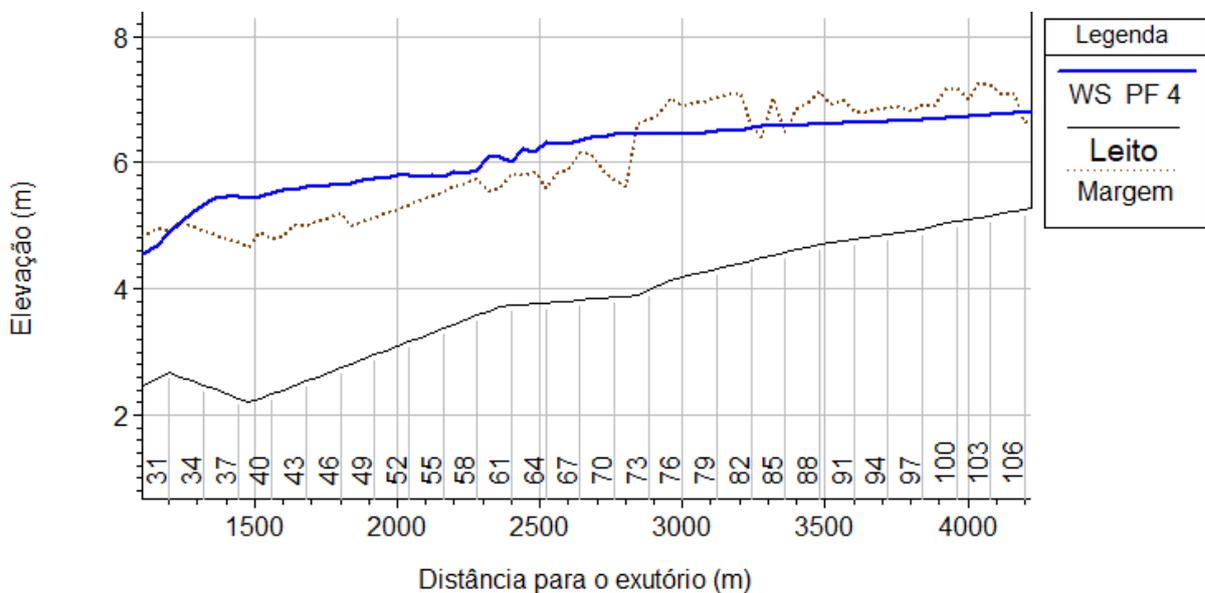


Figura 31 - Seção transversal 42 do modelo.

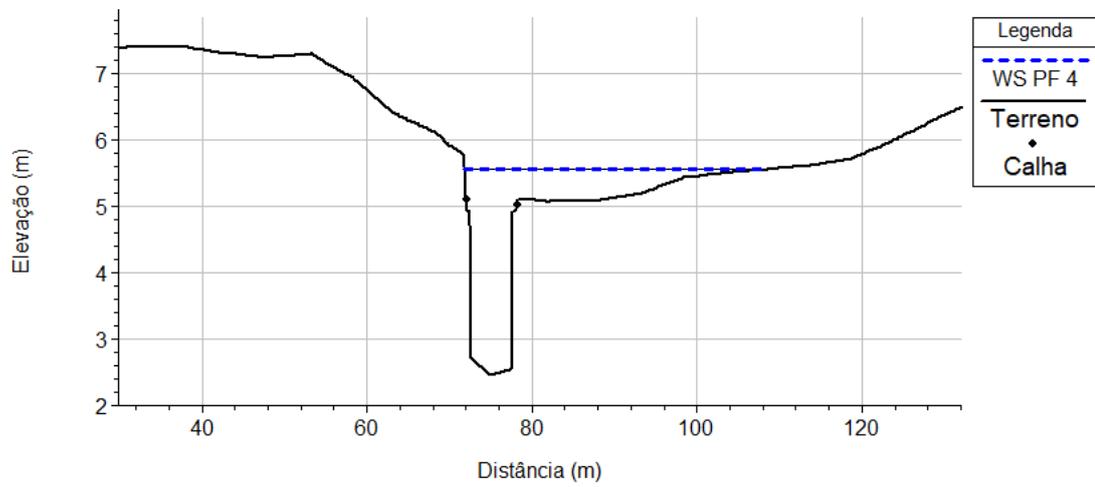


Figura 32 - Seção transversal 52 do modelo.

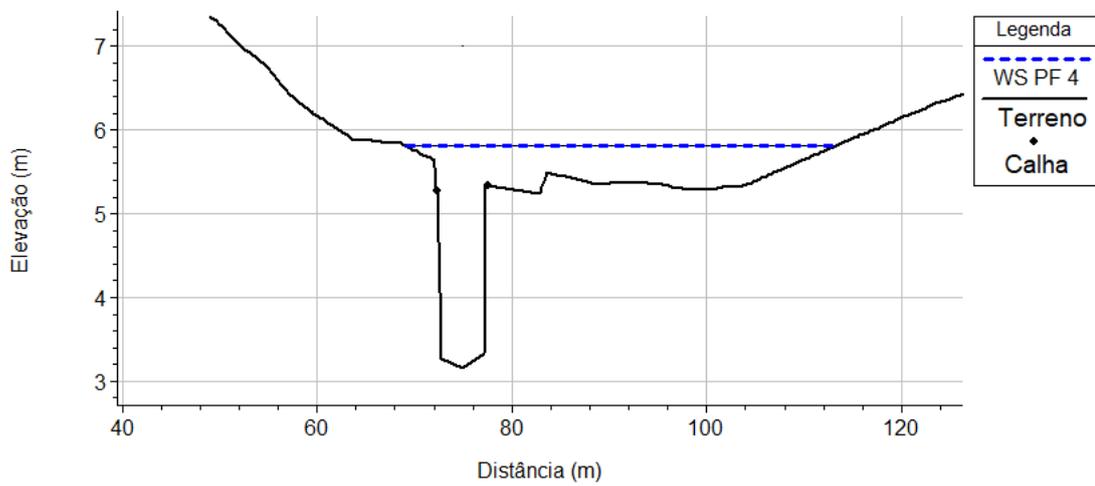


Figura 33 - Seção transversal 80 do modelo.

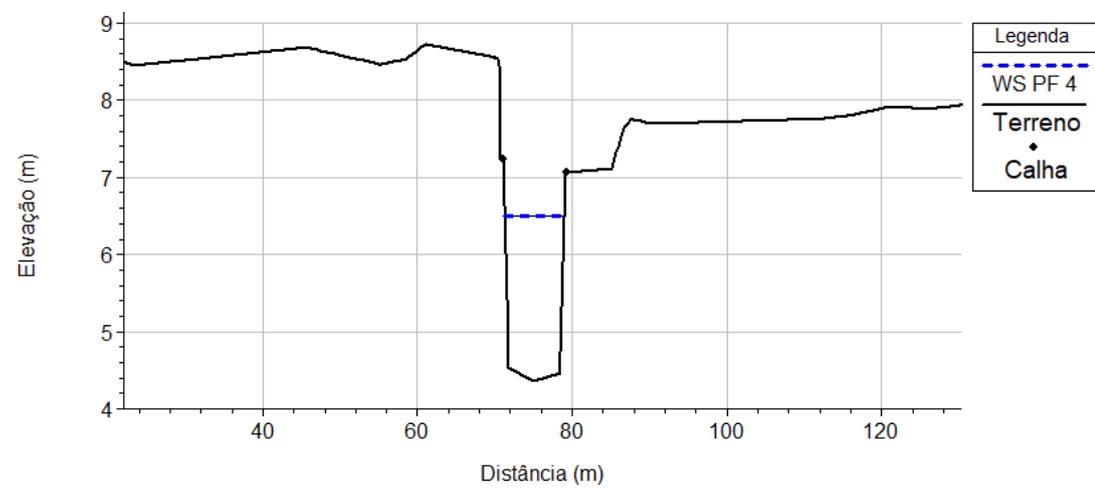
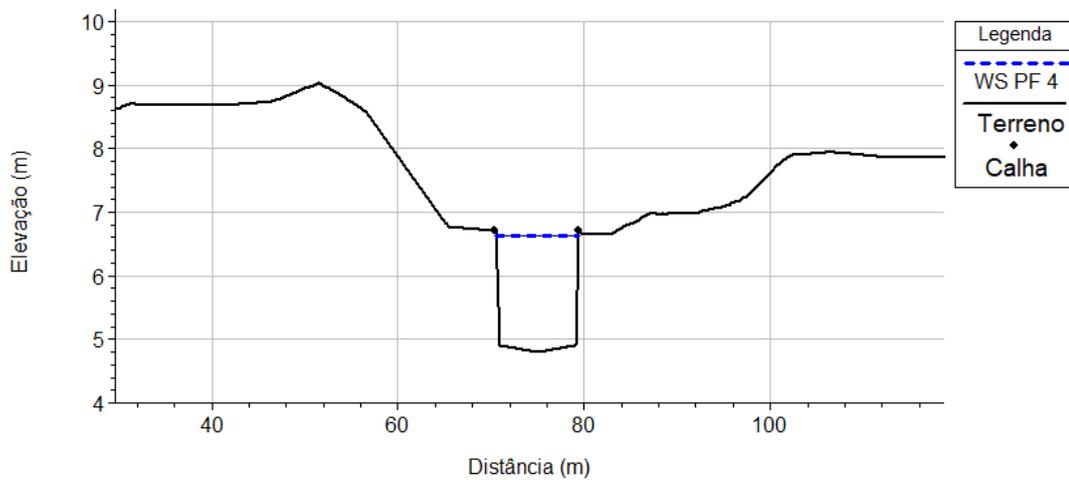


Figura 34 - Seção transversal 92 do modelo.



Mesmo em um cenário sem chuvas, a liberação de vazão da barragem (WS PF 6) provoca alagamentos na região próxima ao exutório, entre as seções 1 e 16, onde as cotas são mais baixas (Figura 35). É possível perceber, que na região próxima à seção 16 a linha máxima da água supera a linha que marca o limite da calha em 600 m (Figura 36).

Para uma condição de aumento do nível dos mares, o mesmo acontece até a seção 11, correspondendo a 400 m (Figura 37).

Figura 35 - Perfil de elevação: liberação de Carpina sem a influência da chuva.

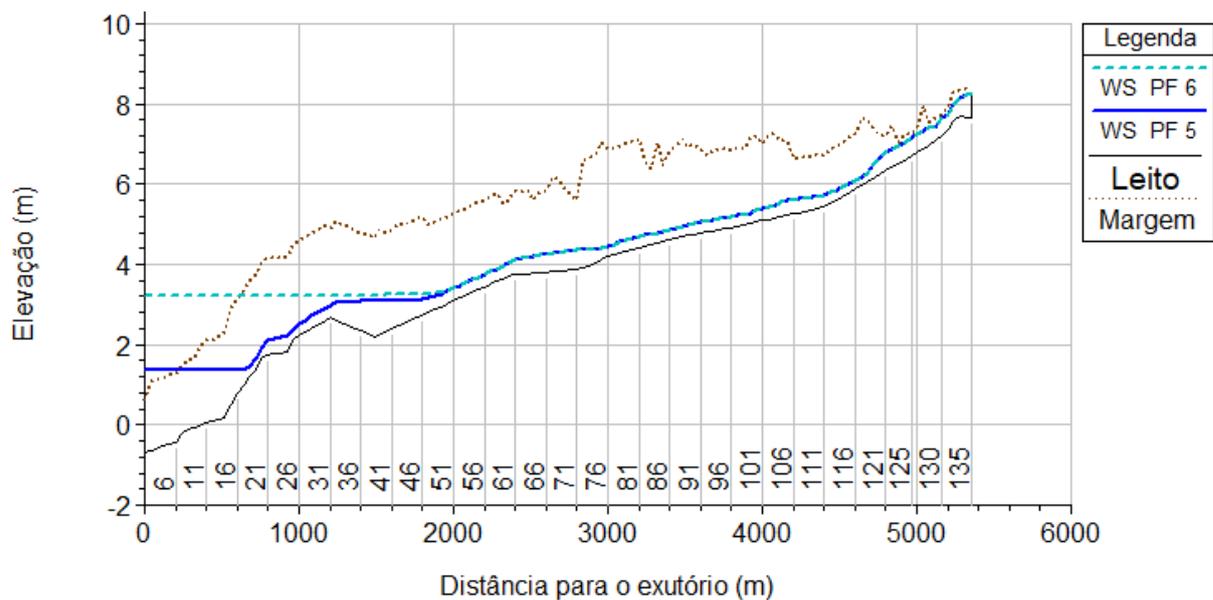


Figura 36 - Perfil de elevação: detalhe da Figura 35.

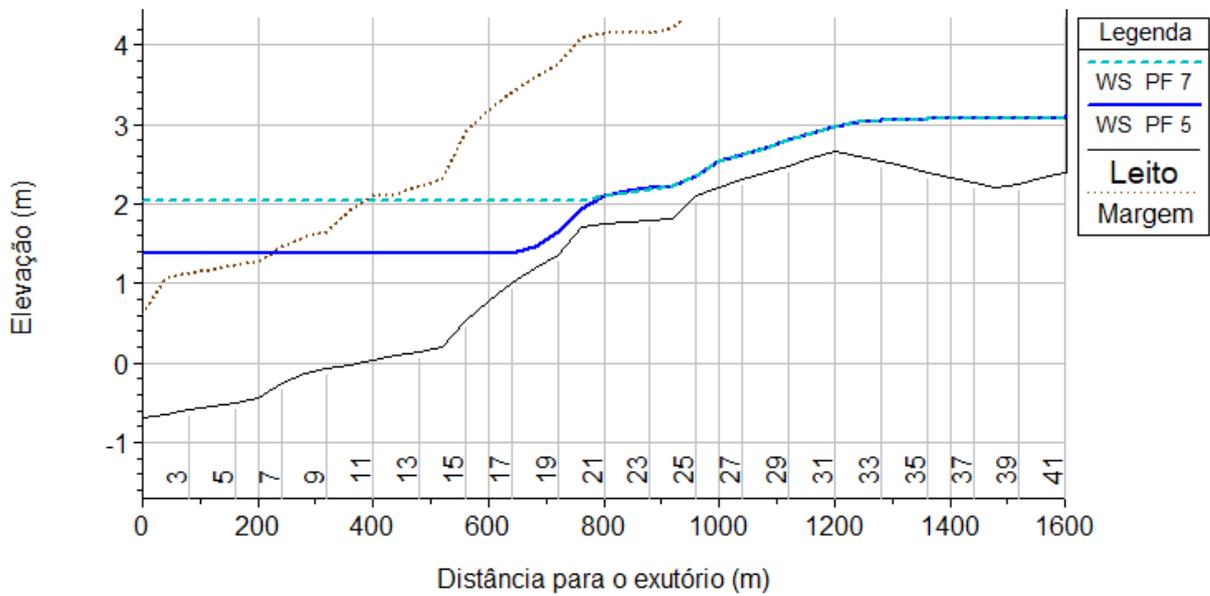
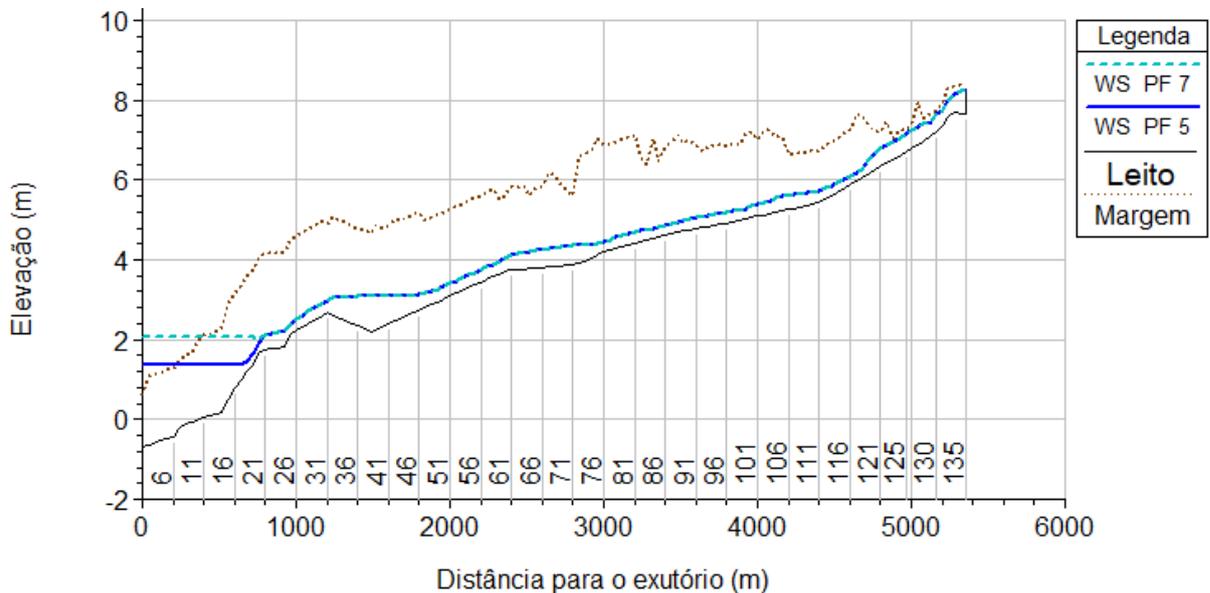


Figura 37 - Perfil de elevação: aumento do nível dos mares sem a influência da chuva.



Em uma análise minuciosa dos hidrogramas gerados pelo programa HEC-HMS e os resultados da propagação no canal (Apêndice), é possível inferir que há uma superestimação da vazão. Tal fato, apesar de não comprometer a avaliação qualitativa dos estudos de vulnerabilidade para o presente trabalho, pode estar relacionado ao acréscimo de vazão provocado pela ampliação das áreas de contribuição em relação à um modelo cuja delimitação de bacia tenha sido baseada apenas na topografia do terreno. Cabe ressaltar que as formulações disponíveis para o tempo de concentração

em áreas urbanas (SILVEIRA, 2005) possuem variáveis obtidas segundo características naturais da bacia e não segundo as conformações das redes de galerias. Outra hipótese é que a equação de chuva utilizada superestima as intensidades, tendo em vista que Silva Junior e Silva (2016) também evidenciaram esse comportamento para determinadas equações.

Apesar do modelo não ter apresentado grandes riscos às principais vias que cortam o riacho, provavelmente, devido aos altos aterros (MARENGO *et al.*, 2017) e aprofundamentos na calha (CABRAL *et al.*, 2017), outras de menor fluxo de veículos apresentaram alagamentos consideráveis. Dessa forma, na ocorrência dos cenários aqui estudados, estas vias estariam intransitáveis, direcionando o fluxo para as principais vias, ou até mesmo isolando áreas, a depender da conformação das vias, como observado também por Fraile-Jurado *et al.* (2017).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após a análise da metodologia utilizada e resultados obtidos deste trabalho, é possível chegar às seguintes conclusões e recomendações.

6.1 CONCLUSÕES

Dada a proximidade com o mar, em geral, os riachos de Recife estão sujeitos à variabilidade diária do nível das marés. O riacho Cavouco está mais sujeito a essa influência na região próxima ao encontro com o rio Capibaribe. Os primeiros 760 m mostraram-se mais vulneráveis aos impactos das enchentes. Confirmando-se os estudos acerca do aumento no nível médio dos mares e o aumento na frequência de chuvas intensas, esta região necessitará de plano específico a fim de amenizar os danos.

Agravando este cenário, a previsão de aumento do nível médio dos mares contribui ainda mais para a vulnerabilidade do atual sistema de macrodrenagem. Os efeitos provocados apenas deste aumento, mesmo sem a ocorrência de chuvas, impactam uma extensão de 400 m, aproximadamente, do riacho Cavouco. Um cenário para aumentos de até 1 m a extensão dos danos será ainda maior. As características naturais de baixas cotas altimétricas, e a presença de ocupações às margens dos riachos também agravam a situação da macrodrenagem em Recife.

As características de permeabilidade obtidas através da classificação não supervisionada atenderam à proposta do modelo hidrológico, gerando resultados precisos, ao comparar visualmente com as condições existentes. A morfologia da bacia hidrográfica urbana obtida através das características das redes de galerias de águas pluviais mostrou-se um estudo bastante promissor, necessitando ainda alguns ajustes, em parte relacionados ao cálculo do tempo de concentração.

O estudo das precipitações intensas auxiliados por equações de chuvas intensas deve ser visto com cuidado, as diferenças nos valores de intensidade pluviométrica de uma para outra podem ser expressivas, principalmente para pequenas durações de chuva.

A condição de contorno do modelo, considerando a abertura das comportas da barragem de Carpina configura apenas um exemplo, e pode também ser estendido a

outras barragens de controle de cheias localizadas a montante do rio Capibaribe, como as barragens de Goitá e Tapacurá.

Apesar de não utilizar as equações completas da modelagem de sistemas hídricos, o modelo em regime permanente mostrou-se bastante satisfatório para os objetivos do presente trabalho. Apresentou relativa rapidez na inserção dos dados de entrada, não apresentou instabilidades e o tempo de cálculo computacional foi aceitável.

O modelo digital de terreno de alta resolução mostrou-se bastante útil para representar as regiões de margens da calha do riacho. Entretanto, um cuidado adicional deve ser tomado pelo modelador: ao manipular este material alguns programas podem reduzir sua resolução, dependendo de qual processo for usado e que tipo de extensão adicional é criada durante as etapas de pré-processamento.

O uso de modelos hidrológicos combinados com hidráulicos são bastante comuns na avaliação de áreas de risco devido aos bons resultados apresentados diante da complexidade de um sistema hídrico natural. Mais uma vez os modelos hidrológico HEC-HMS e hidráulico HEC-RAS mostraram-se satisfatórios ao permitir cumprir com o objetivo geral deste trabalho na avaliação das consequências para a macrodrenagem do riacho Cavouco na planície do Recife em resposta a eventos de chuvas intensas, abertura ou fechamento das comportas de barragem de controle de cheias e impactos das marés de sizígia, prevendo cenário futuro.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Um estudo mais aprofundado da metodologia de delimitação de bacias por redes, comparando formas diferentes de delimitação de bacias pode ser feito posteriormente, a fim de estudar os diferentes hidrogramas gerados.

Oscilações diárias de maré e hidrogramas de fluxo variado podem ser posteriormente abordados como condições de contorno em um estudo estocástico com aplicação do modelo hidrodinâmico de regime não permanente, fim de compreender melhor a dimensão da probabilidade de inundações.

REFERÊNCIAS

- ALCOFORADO, R. G. (2006) **Simulação hidráulico-hidrológica do escoamento em redes complexas de rios urbanos: suporte de informações espaciais de alta resolução**. Tese (Doutorado) / Roberta Guedes Alcoforado. – Recife: O Autor, 2006
- ALEXANDER, D. (2013). **Vulnerability**. In: K. Penuel, M. Statler, & R. Hagen (Eds.), *Encyclopedia of Crisis Management* (pp. 980–983). Thousand Oaks, CA: SAGE.
- ARNBJERG-NIELSEN, K. (2012). Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. **Urban Water Journal**, vol. 9, n. 2, pp. 57–65.
- ARNONE, E.; PUMO, D.; VIOLA, F.; NOTO, L. V.; LA LOGGIA, G. (2013). Rainfall statistics changes in Sicily. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 17, pp. 2449-2458.
- BATISTA, L. F. D. R. (2015). **Estudo de indicadores de risco de inundação no município do Cabo de Santo Agostinho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015, 91p.
- BLANKESPOOR, B.; DASGUPTA, S.; LAPLANTE, B. (2014). Sea-Level Rise and Coastal Wetlands. **Ambio**, 43(8) , pp. 996–1005.
- BURBRIDGE P. (2011). **Global change and the coastal challenge**. In: CoastNet (ed) *Littoral (2010) adapting to global change at the coast: leadership, innovation and investment*. EDP Sciences, London.
- CABRAL, J.J.S.P.; ALENCAR, A.V. (2005). **Recife e a convivência com as águas**. In: *Gestão do Território e Manejo Integrado das ÁGUAS urbanas*, Ministério das Cidades. Brasília – DF.
- CABRAL, J. J. S. P.; FONSECA NETO, G. C.; CABRAL, P. L.; MARTINIANO, R. A. L., MONTEIRO, P. B C L; BRAGA, R. A. P. (2017). **Avanços e desafios para a revitalização de rios urbanos em recife: o caso do riacho Parnamirim**. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis-SC, 2017.
- CHOW, V. T.; MAIDMENI, D. R.; MAYS, L. W.. (1988) **Applied Hydrology**. Berkshire, Uk: Mcgraw-hill Book Co (uk), 1988. 572 p.
- CHURCH J. A.; WHITE N. J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. **Surv Geophys**, 32, pp. 585–602.
- CHURCH , J. A.; GREGORY, J. M.; HUYBRECHTS, P.; KUHN, M.; LAMBECK, K.; NHUAN, M. T.; QIN, D.; WOODWORTH P. L. (2001). **Changes in sea level. Climate Change, 2001**. In: HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. I. (eds), *The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 639–694.

COSTA, M. B. S. F.; MALLMANN, D. L. B.; PONTES, P. M.; ARAÚJO, M. (2010). Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the Metropolitan Center of Recife, Northeast Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, 5 (2), pp. 341-349.

CUNGE, J.A.; HOLLY Jr., F.M.; VERWEY, A. **Practical Aspects of Computational River Hydraulics**. London, England: Pitman Advanced Publishing Program, 1980. 420p.

DANTAS, C. E. de O. (2012). **Previsão e Controle de Inundações em Meio Urbano com Suporte de Informações Espaciais de Alta Resolução**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012, 221 p.

EMCIBRA S.A. ENGENHARIA DE CONSULTORIA (1978). **Plano Diretor de Drenagem Urbana para a Cidade do Recife**, disponível impresso na EMLURB, Recife.

ECLAC (2011). **Effects of climate change on the coast of latin america and the caribbean: dynamics, trends and climate variability**. In: The Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), The Spanish Climate Change Office under the Ministry of Agriculture, Food and Environment of the Government of Spain, and the Environmental Hydraulics Institute of Cantabria University, ECLAC, Santiago de Chile, Chile, 263 p.

EMLURB (2016). **Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Recife**. In: Conselho da Cidade do Recife. Apresentação em Seminário. Recife, Março de 2018.

FERREIRA, F.F. (2016). **Climatologia da precipitação na cidade do Recife**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC. Foz do Iguaçu-PR.

FIDEM (1985). **Plano Diretor de Macrodrenagem da Região Metropolitana do Recife**, disponível na EMLURB, Recife.

FIJKO, R.; ZELENÁKOVÁ, M.; ALKHALAF, I. (2016). Flood risk modelling of stuliansky stream in Iopúchov village, Slovakia, **Int. J. of Safety and Security Eng.**, vol. 6, n. 3, pp. 529-537.

FORESTIERI, A. E.; ARNONE, S.; BLENKINSOP, L. V.; NOTO, H. F. (2017). The impact of climate change on extreme precipitation in Sicily. **Hydrological Processes**, 32, pp. 332– 348.

FRAILE-JURADO, P.; ÁLVAREZ-FRANCOSO, J. I.; GUIADO-PINTADO, E.; SÁNCHEZ-CARNERO, N.; OJEDA-ZÚJAR, J.; LEATHERMAN, S. P. (2017). Mapping inundation probability due to increasing sea level rise along El Puerto de Santa María (SW Spain). **Natural Hazards**, 87 (2), pp. 581-598.

FRAILE-JURADO, P.; OJEDA-ZU´JAR, J. (2013). The importance of the vertical accuracy of digital elevation models in gauging inundation by sea level rise along the Valdelagrana beach and marshes, Bay of Ca´diz, SW Spain. **Geo-Mar Lett**, 33, pp. 225–230.

- FRANCIPANE, A.; FATICHI, S.; IVANOV, V. Y.; NOTO, L. V. (2015). Stochastic assessment of climate impacts on hydrology and geomorphology of semiarid headwater basins using a physically based model, **J. Geophys. Res. Earth Surf.**, 120, pp. 507–533.
- GEORGESON, L.; MASLIN, M.; POESSINOUW, M.; HOWARD, S. (2016) Adaptation Responses to Climate Change Differ between Global Megacities. **Nature Climate Change**, 6, pp. 584-588.
- GÓES, V. C. (2009) **Simulação hidráulico-hidrológica integrada ao geoprocessamento para avaliação da macrodrenagem em centros urbanos**. Tese (Doutorado)/ Valéria Camboim Góes. – Recife: O Autor, 2006
- GUENTHER, G.C., (1985). Airborne Laser Hydrography: System Design and Performance Factors. National Oceanic and Atmospheric Administration Professional Paper Series, **National Ocean Service** 1, 385 p.
- GÜL, G. O.; HARMANCIOGLU, N.; GÜL, A. (2010). A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures. **Natural Hazards**, v. 54, n. 2, p. 245-260.
- HALLEGATTE, S.; GREEN, C.; NICHOLLS, R. J.; CORFEE-MORLOT, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. **Nature Climate Change**, 3, pp. 802-806.
- IBGE (2017). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativa populacional 2017**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 jun. de 2018.
- INDRAWAN, I; SIREGAR, R I. (2018). Analysis of flood vulnerability in urban area; a case study in deli watershed. **Journal of Physics Conference Series**, 978, p. 1-6.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2013). **Climate change 2013: The Physical Science Basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY, p. 1535
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014). **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- KASPERSEN, P. S.; RAVN, N. H.; ARNBJERG-NIELSEN, K., MADSEN, H.; DREWS, M. (2017). Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 21, pp. 4131–4147.
- KHATTAK, M. S.; ANWAR, F.; SAEED, T. U.; SHARIF, M.; SHERAZ, K.; AHMED, A. (2016). Floodplain mapping using HECRAS and ArcGIS: a case study of Kabul River. **Arab J Sci Eng**, 41, pp. 1375-1390.

KHALFALLAHA, C. B.; SAIDIA, S. (2018). Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS - GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. **Journal of African Earth Sciences**, vol. 142, pp. 44-51.

KVOCKA, D.; FALCONER, R.A.; BRAY, M. (2015). Appropriate model use for predicting elevations and inundation extent for extreme flood events. **Natural Hazards**, 79, pp. 1791–1808.

LIUZZO, L.; NOTO, L.; ARNONE, E.; CARACCILO, D.; LA LOGGIA, G. (2015). Modifications in Water Resources Availability Under Climate Changes: A Case Study in a Sicilian Basin. **Water Resour Manage**, 29, pp. 1117-1135.

MAGRIN, G. O.; MARENGO, J. A.; BOULANGER, J. P.; BUCKERIDGE, M.S.; CASTELLANOS, E.; POVEDA, G.; SCARANO, F. R.; VICUÑA, S. (2014). **Central and South America**. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, pp. 1499-1566.

MARENGO, J.; MULLER-KARGER, F.; PELLING, M.; REYNOLDS, C. J.; MERRILL, S. B.; NUNES, L. H.; PATERSON, S., GRAY, A. J., LOCKMAN, J. T., KARTEZ, J., MOREIRA, F. A., GRECO, R., HARARI, J., SOUZA, C. R. G., ALVES, L. M., HOSOKAWA, E. K.; TABUCHI, E. K. (2017). An Integrated Framework to Analyze Local Decision Making and Adaptation to Sea Level Rise in Coastal Regions in Selsey (UK), Broward County (USA), and Santos (Brazil). **American Journal of Climate Change**, 6, pp. 403-424.

MASOOD, M.; TAKEUCHI, K. (2012). Assessment of flood hazard, vulnerability and risk of mid-eastern Dhaka using DEM and 1D hydrodynamic model. **Natural Hazards**, vol. 61, n. 2, pp. 757–770.

MIGUEZ, M. G., FERNANDES, L. C., AZEVEDO, J. P. S., MAGALHÃES, L. P. C. (2011). **Vulnerabilidades da infraestrutura de drenagem urbana e os efeitos das mudanças climáticas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. In: *Megacidades, vulnerabilidades e mudanças climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, 329p.

NANÍA, L. S.; LEÓN, A. S.; GARCÍA, M. H. (2015). Hydrologic-Hydraulic Model for Simulating Dual Drainage and Flooding in Urban Areas: Application to a Catchment in the Metropolitan Area of Chicago. **Journal of Hydrologic Engineering**, p. 51-56.

NE10 (2011). Comporta da barragem de carpina é aberta para liberar águas retidas. Disponível em: <http://ne10.uol.com.br/canal/interior/zona-da-mata/noticia/2011/05/05/comporta-da-barragem-de-carpina-e-aberta-para-liberar-aguas-retidas-270052.php>

PATEL, D. P.; RAMIREZ, J. A.; SRIVASTAVA, P. K.; BRAY, M.; HAN, D. (2017). Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5. **Nat Hazards**, 89, pp. 93–130.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (2016). **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas**: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.

[Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p.

PE'ERI, S.; LONG, B. (2011). LIDAR technology applied in coastal studies and management. **J Coast Res Spec.**, 62, pp. 1–5.

PERNAMBUCO (2009). Barragem de Carpina passa por teste de funcionamento de comporta. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). Disponível em: http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=133:barragem-de-carpina-passa-por-teste-de-funcionamento-de-comporta&catid=1:latest-news&Itemid=72

PERNAMBUCO (2011a). Comporta da Barragem de Carpina é aberta para evitar inundação na PE-50. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). Disponível em: http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=256:comporta-da-barragem-de-carpina-e-aberta-para-evitar-inundacao-na-pe-50&catid=1:latest-news&Itemid=72

PERNAMBUCO (2011b). Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Plano Estadual de Mudanças Climáticas**. Recife, 2011, 94 p.

PERNAMBUCO (2013). Relatório Secretaria das Cidades do Governo de Pernambuco. **Projeto executivo de dragagem de manutenção e recomposição da calha natural dos rios Capibaribe e Beberibe**. Recife, 2013, 75p.

PERNAMBUCO (2018). Programa Pernambuco Tridimensional. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/> Acessado em: 20 de julho de 2018.

PELEG, N.; SHAMIR, E.; GEORGAKAKOS, K. P.; MORIN, E. (2015). A framework for assessing hydrological regime sensitivity to climate change in a convective rainfall environment: a case study of two medium-sized eastern Mediterranean catchments, Israel. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 19, pp. 567-581.

PREUSS, S. L. C.; SILVA, A. A.; BRAGA, R. A. P.; CABRAL, J. J. S. P. (2011). **Adequação Estrutural e Ambiental para a Drenagem Urbana Sustentável: o caso do Recife, Pernambuco**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió-AL, 2011.

PUMO, D.; CARACCILOLO, D.; VIOLA, F.; NOTO, L. V. (2016). Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins. **Science of the Total Environment**, 542 (Part A), pp. 76-92.

RAMOS, A. M. (2010). **Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010, 179p.

RAMOS, A. M.; AZEVEDO, J. R. G. (2010). **Nova equação de chuvas intensas para a cidade de Recife-Pernambuco**. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza/Ceará, xx p.

RECIFE (2017). **Relatório de avaliação da pegada de carbono e pegada hídrica da cidade do Recife**. Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente da cidade do Recife, 2017. 71 p.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. DE O.; SILVA, E. R. (2015). Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **RBRH**, v. 20, n. 2, pp. 394-403.

RIOS, F. P. (2015). **Capacidade de suporte de cursos d'água urbanos sob a perspectiva técnica e epistemológica da Engenharia**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015, 108p.

ROMALI, N. S.; YUSOP, Z.; ISMAIL, A. Z. (2018). Application of hec-ras and arc gis for floodplain mapping in Segamat town, Malaysia. **International Journal of GEOMATE**, 14, pp.125-131.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – SEMADS (Brasil), 2001, ENCHENTES NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: Uma Abordagem Geral. Rio de Janeiro: Projeto Planágua Semads / Gtz de Cooperação Técnica Brasil – Alemanha.

SHAHIRIPARSA, A.; NOORI, M.; HEYDARI, M.; RASHIDI, M. (2016). Floodplain zoning simulation by using HEC-RAS and CCHE2D models in the Sungai Maka River. **Air, Soil and Water Res.**, 9, pp. 55-62.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R. (2016). Impacts of urbanization and climate change in the drainage system of Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, pp. 2034-2053.

SILVA JUNIOR, M. A. B., SILVA, S. R., 2014. Drenagem Urbana: O dia em que o Recife parou. **Revista Construir Nordeste**, 71, pp. 39 - 39.

SILVA JUNIOR, M. A. B. (2015). **Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 154p.

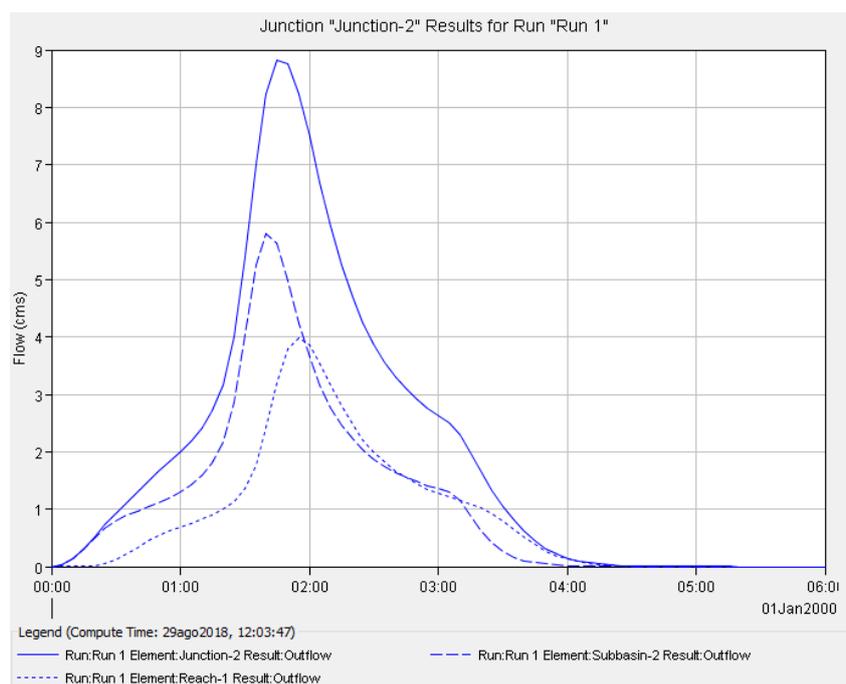
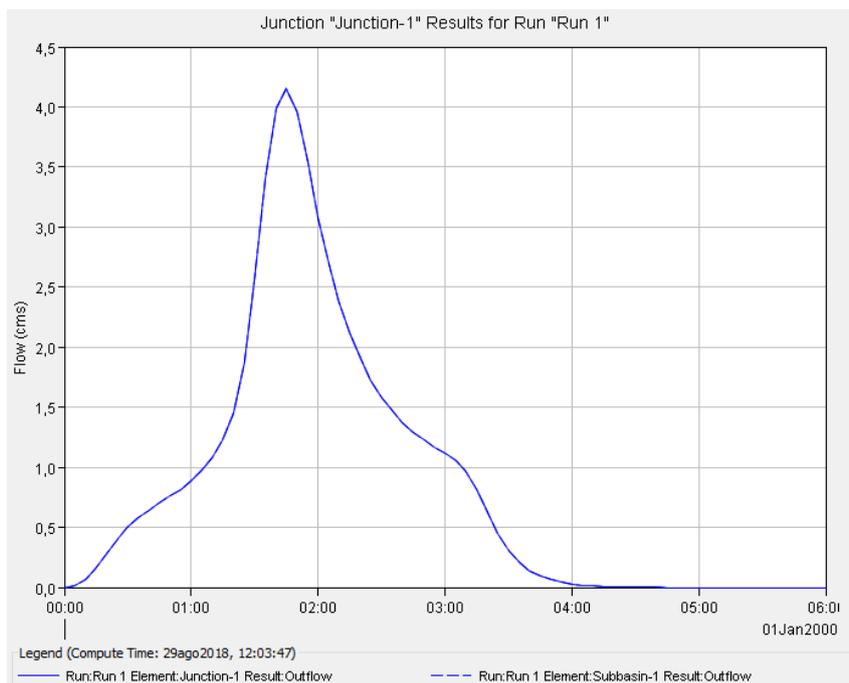
SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R.; CABRAL, J. J. S. P. (2017). Compensatory alternatives for flooding control in urban areas with tidal influence in Recife - PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, e19, pp. 1 – 12.

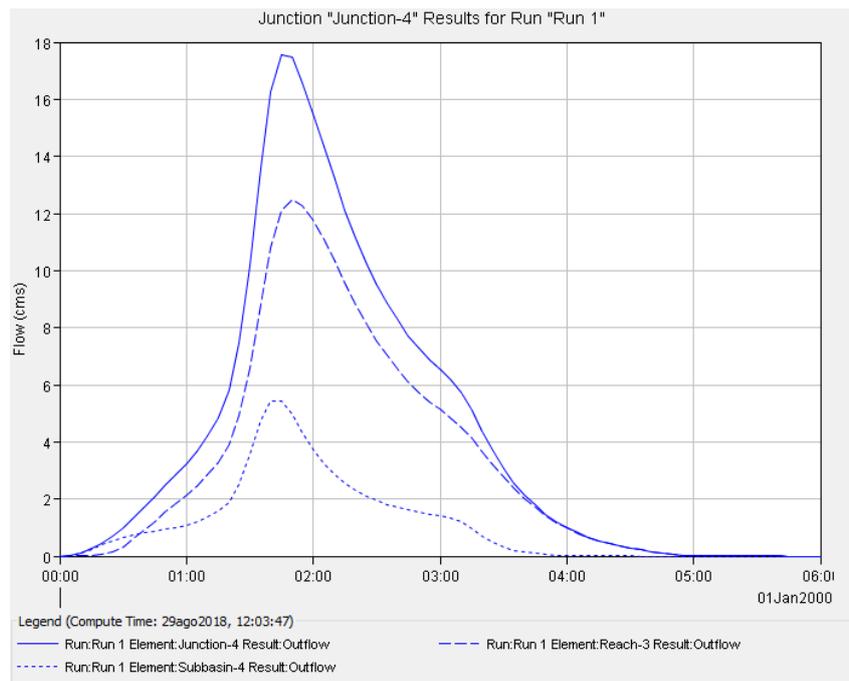
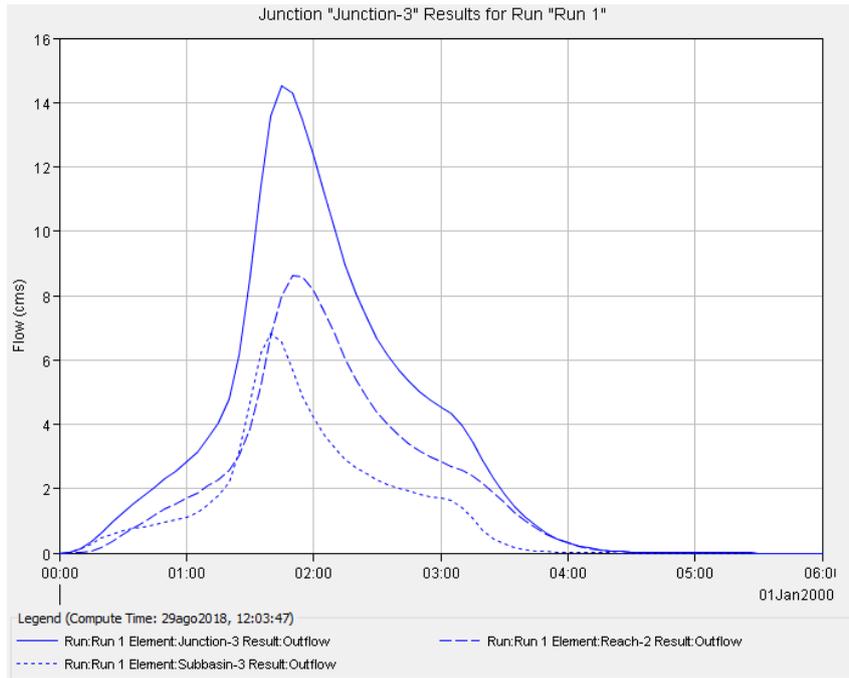
SILVEIRA, A. L. L. (2005). Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 10, pp. 5-23

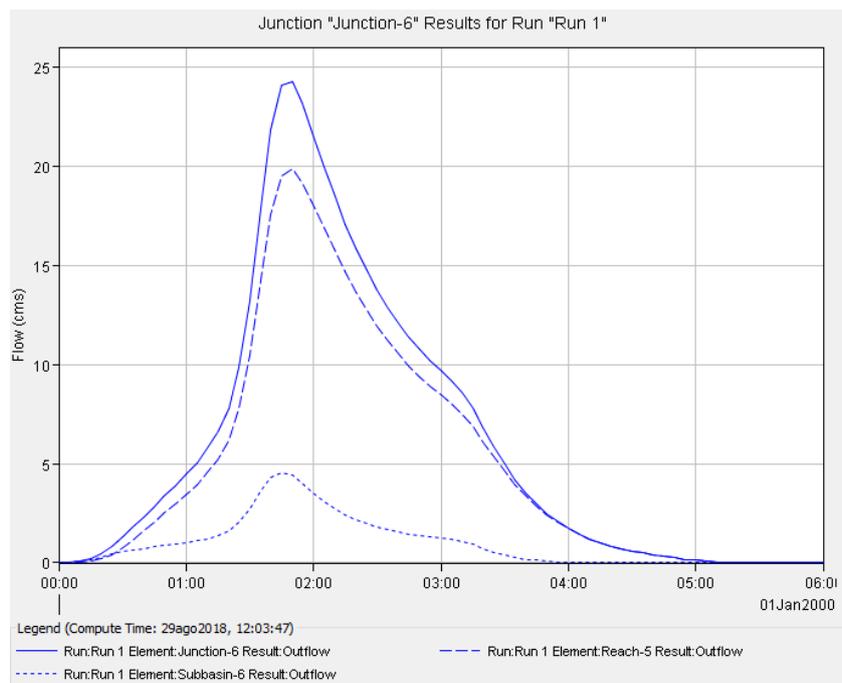
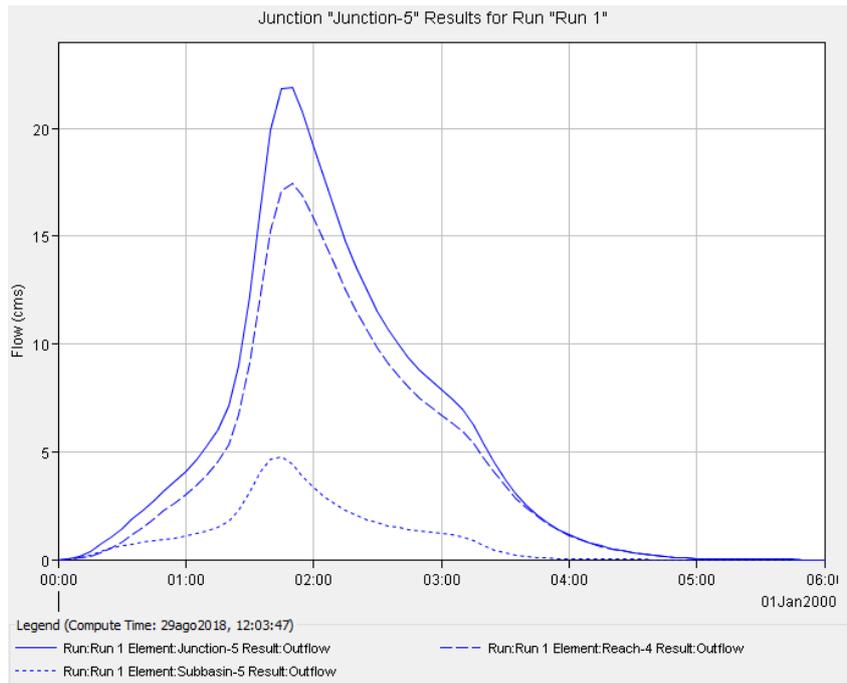
TENG, J., JAKEMAN, A. J., VAZE, J., CROKE, B. F., DUTTA, D., & KIM, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, 90, pp. 201-216.

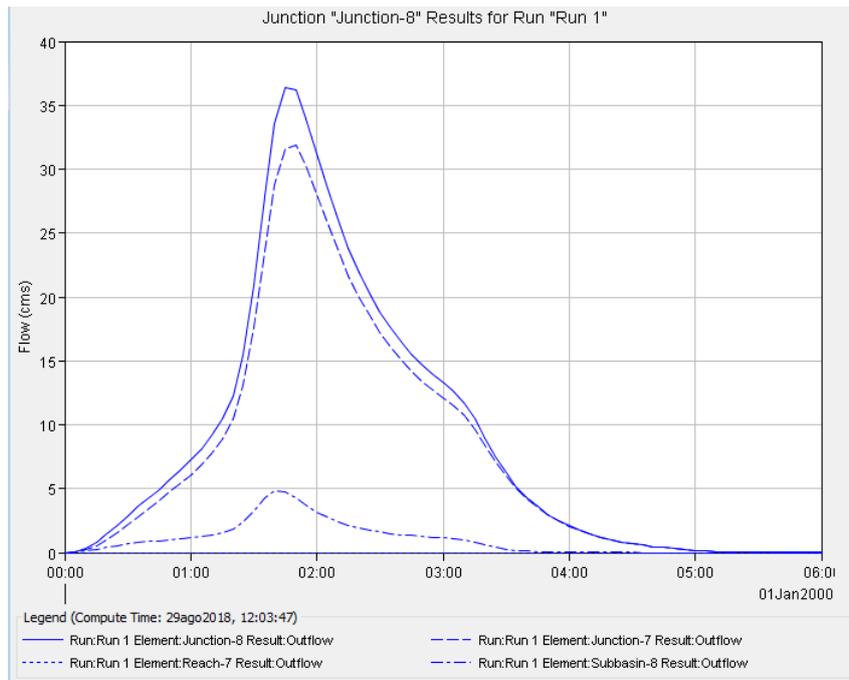
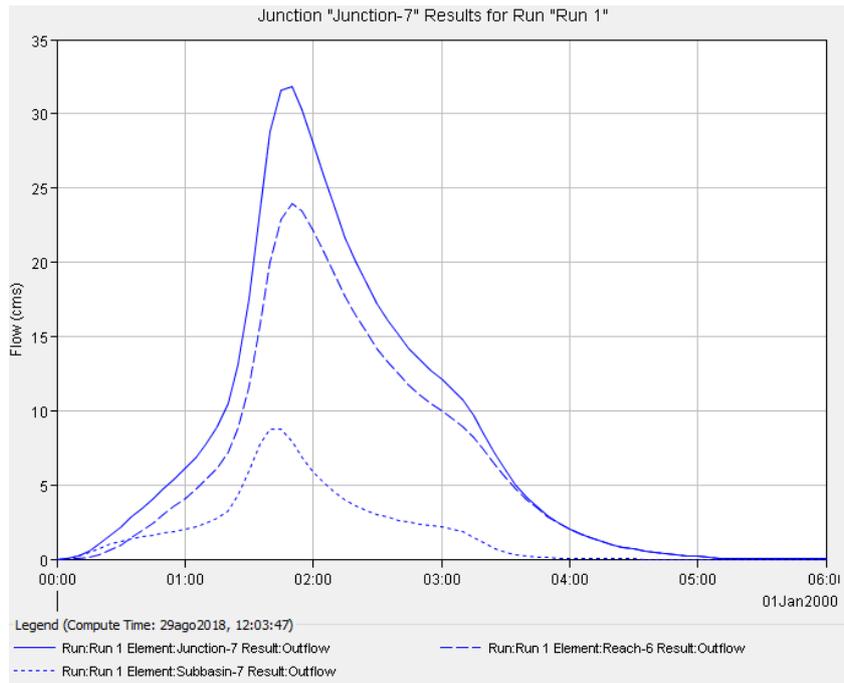
TIMBADIYA, P.; PATEL, P.; POREY, P. (2014a). A 1D–2D coupled hydrodynamic model for river flood prediction in a coastal urban floodplain. **J Hydrol Eng**, 20: 05014017.

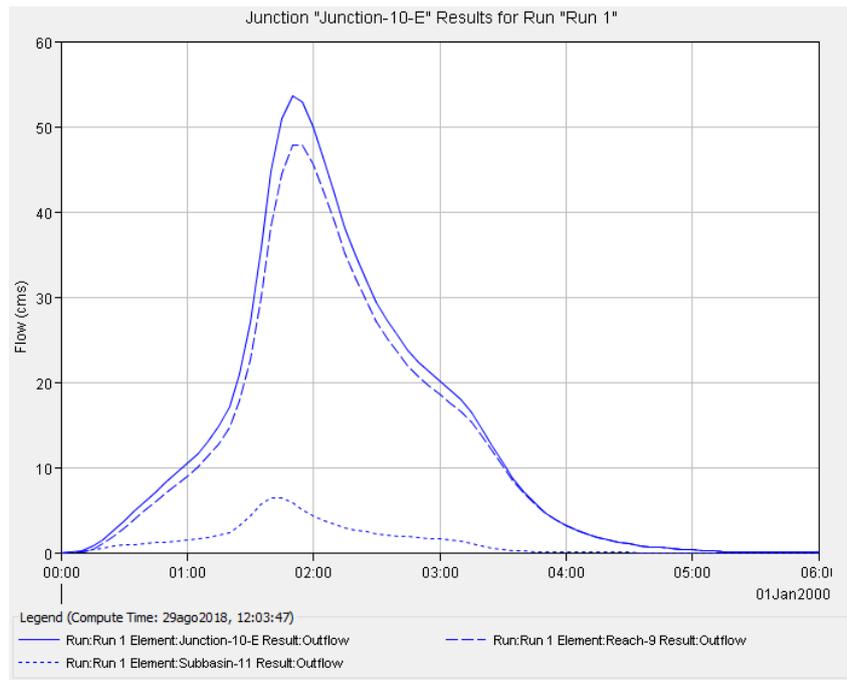
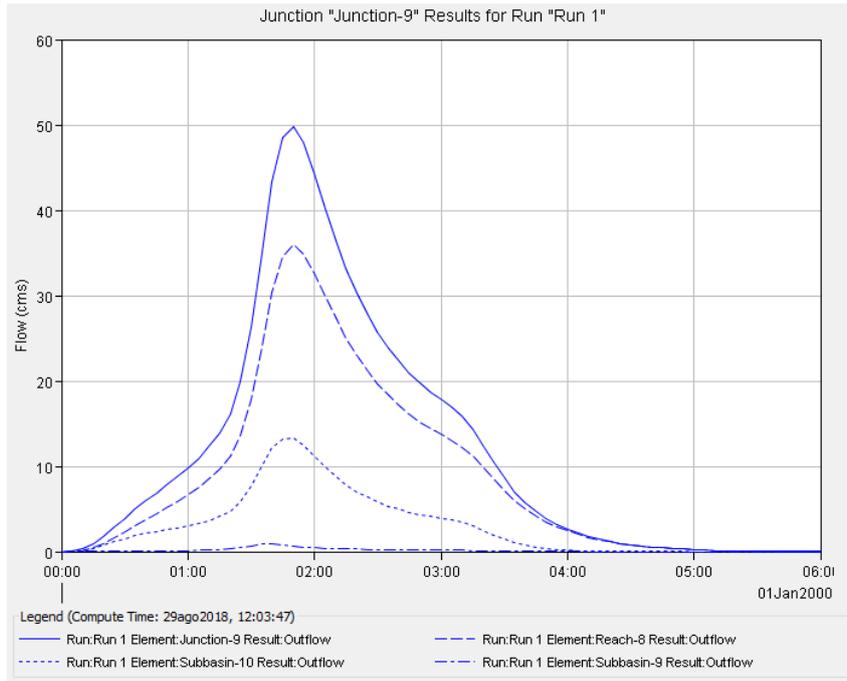
- TIMBADIYA, P.; PATEL, P.; POREY, P. (2014b). One-dimensional hydrodynamic modelling of flooding and stage hydrographs in the lower Tapi River in India. **Curr Sci**, 105, pp. 708–716.
- TUCCI, C. E. M., (org.) (1997), Hidrologia: ciência e aplicação 2ed. /Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1997. Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4.
- TUCCI, C. E. M., (2002), Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 7 n 1, pp.5-27
- TUCCI, C. E. M., (2005), **Gestão das Águas Pluviais Urbanas**: Saneamento para todos, Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, Ministério das Cidades.
- TUCCI, C.E.M., (2007), **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA
- UNISDR. Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives. United Nations. Genebra, Suíça, maio de 2009. 457p.
- USACE (1993). **River Hydraulics: ENGINEER MANUAL**. Washington, Dc: Department Of The Army/U.S. Army Corps Of Engineers.
- VASCONCELOS, R. F. A.; BEZERRA, O. G. (org.) (2000). Atlas ambiental do Recife. Prefeitura da Cidade do Recife/ Secretaria de Planejamento, Urbanismo e Meio Ambiente. Recife
- VIOLA, F.; FRANCIANE, A.; CARACCILO, D.; PUMO, D.; LA LOGGIA, G.; NOTO, L. V. (2016). Coevolution of hydrological components under climate change scenarios in Mediterranean area. **Science of the Total Environment**, 544, pp. 515-524.
- VOZINAKI, A-EK; MORIANOU, G.G.; ALEXAKIS, D.D.; TSANIS, I.K. (2017). Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: a case study of the Koiliaris basin. **Greece Hydrol Sci J**, 62, pp. 642–656.
- WANG, X.; YANG, X.; LIU, T.; LI, F.; GAO, R.; DUAN, L.; LUO, Y. (2014). Trend and extreme occurrence of precipitation in a mid-latitude Eurasian steppe watershed at various time scales. **Hydrological Processes**, 28 (22), pp. 5547-5560.
- WISNER, B. (2016). Vulnerability as concept, model, metric, and tool. Oxford Research Encyclopedia, Natural Hazard Science. Disponível em: <http://naturalhazardscience.oxfordre.com> Acessado em: 24 Jul. 2017.

APÊNDICE A - HIDROGRAMAS RESULTANTES DO MODELO HEC-HMS

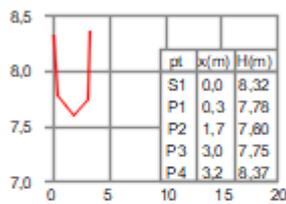
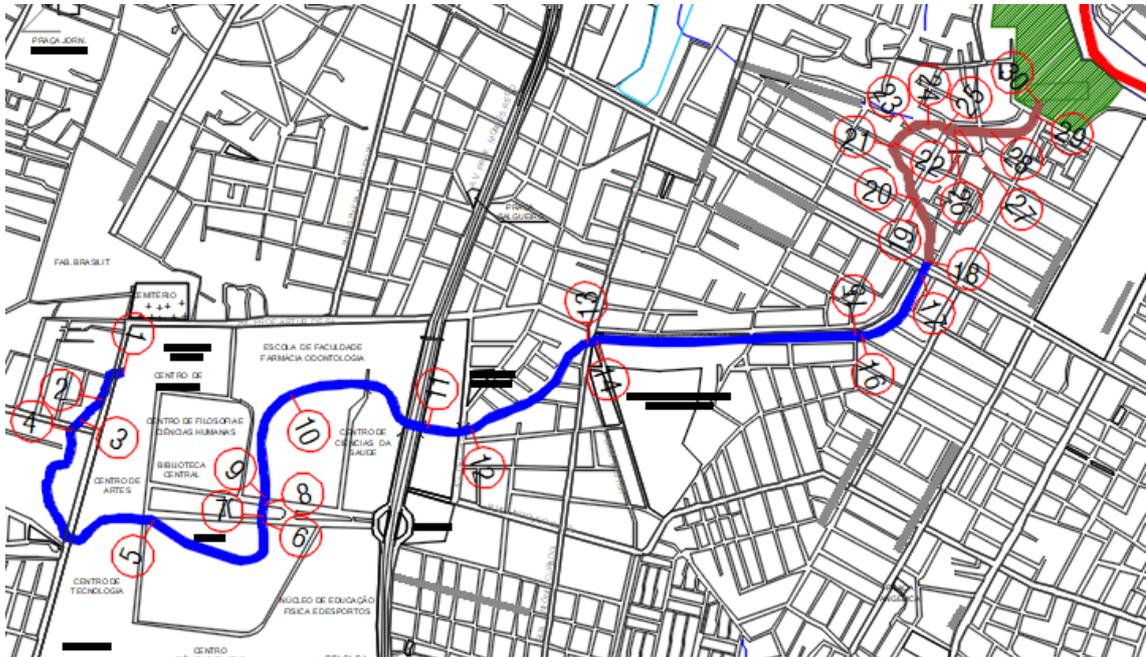






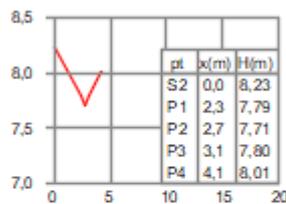


ANEXO A – SEÇÕES TRANSVERSAIS DO RIACHO CAVOUÇO



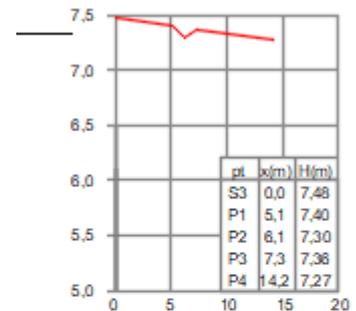
SEÇÃO 1

H=1:500 V=1:500



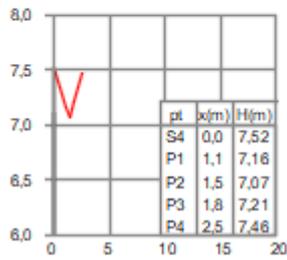
SEÇÃO 2

H=1:500 V=1:500



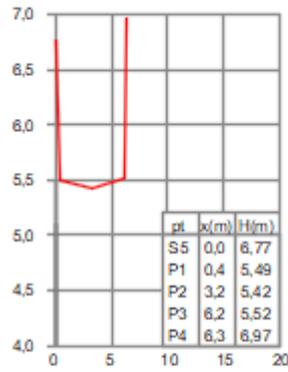
SEÇÃO 3

H=1:500 V=1:500



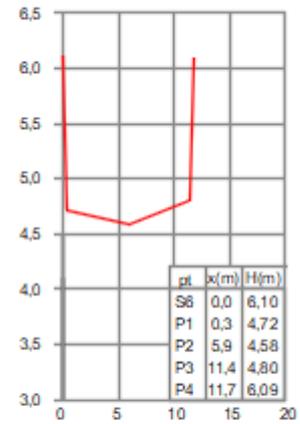
SEÇÃO 4

H=1:200 V=1:200



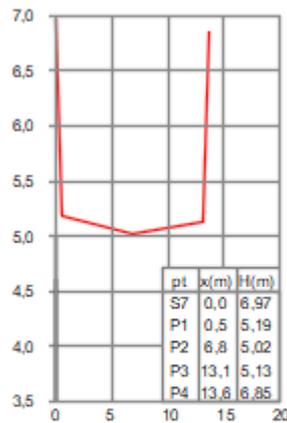
SEÇÃO 5

H=1:200 V=1:200



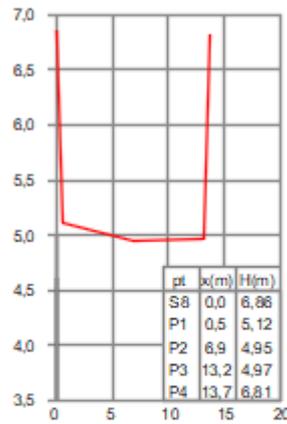
SEÇÃO 6

H=1:200 V=1:200



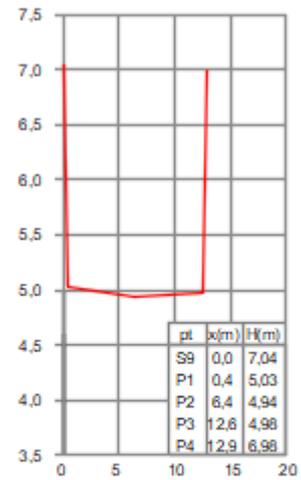
SEÇÃO 7

H=1:200 V=1:200



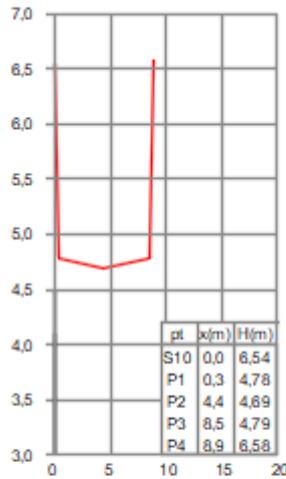
SEÇÃO 8

H=1:200 V=1:200



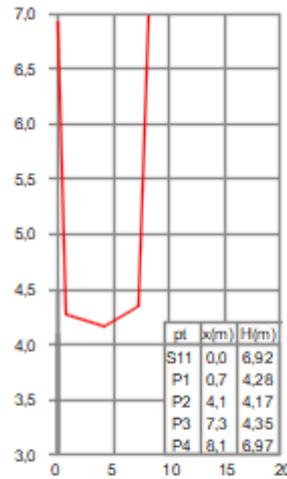
SEÇÃO 9

H=1:200 V=1:200



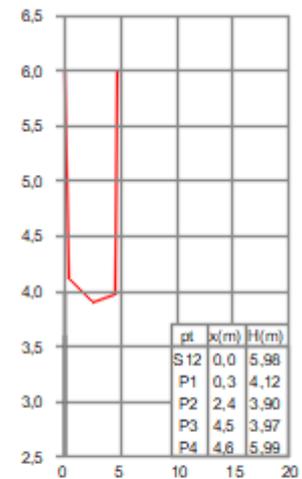
SEÇÃO 10

H=1:500 V=1:50



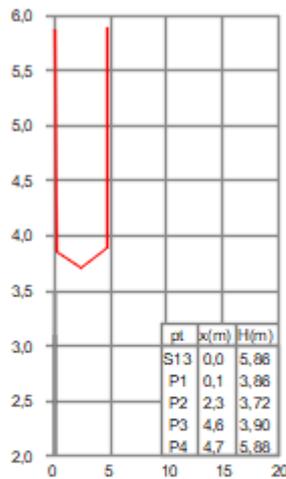
SEÇÃO 11

H=1:500 V=1:50



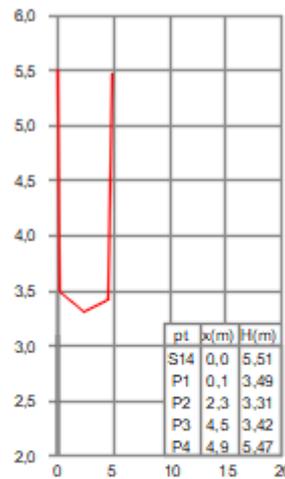
SEÇÃO 12

H=1:500 V=1:50



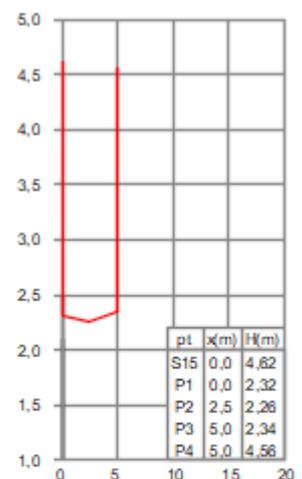
SEÇÃO 13

H=1:500 V=1:50



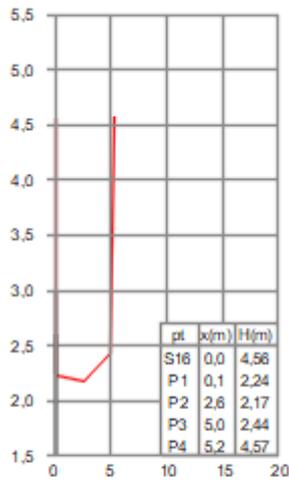
SEÇÃO 14

H=1:500 V=1:50



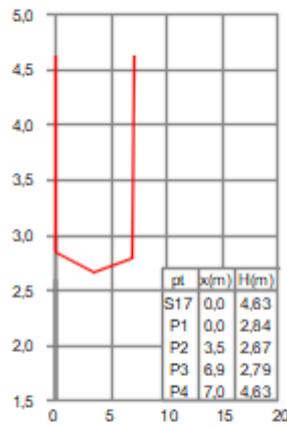
SEÇÃO 15

H=1:500 V=1:50



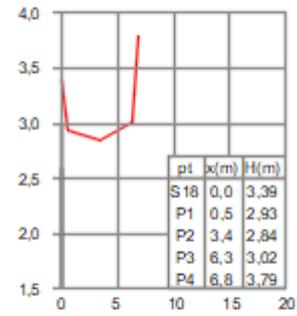
SEÇÃO 16

H=1:500 V=1:50



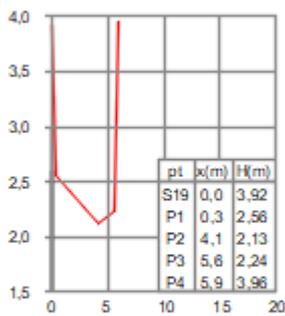
SEÇÃO 17

H=1:500 V=1:50



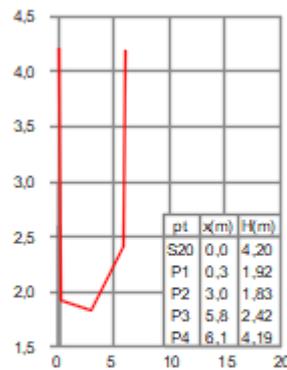
SEÇÃO 18

H=1:500 V=1:50



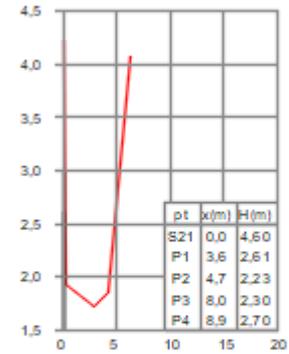
SEÇÃO 19

H=1:500 V=1:50



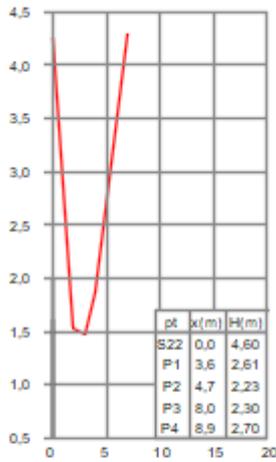
SEÇÃO 20

H=1:500 V=1:50



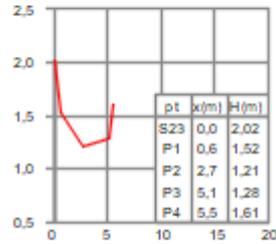
SEÇÃO 21

H=1:500 V=1:50



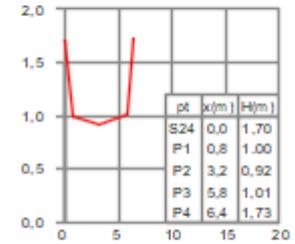
SEÇÃO 22

H=1:500 V=1:50



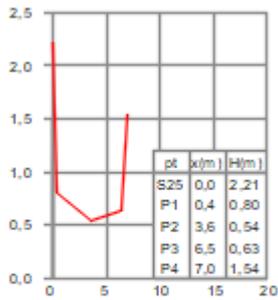
SEÇÃO 23

H=1:500 V=1:50



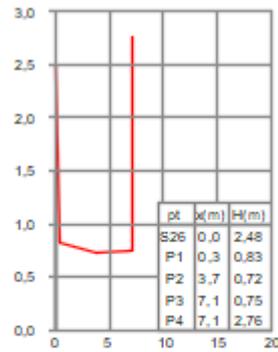
SEÇÃO 24

H=1:500 V=1:50



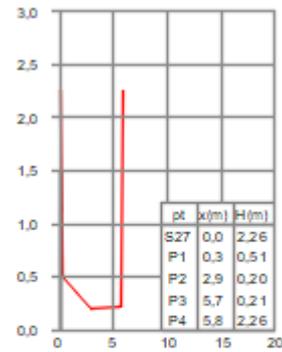
SEÇÃO 25

H=1:500 V=1:50



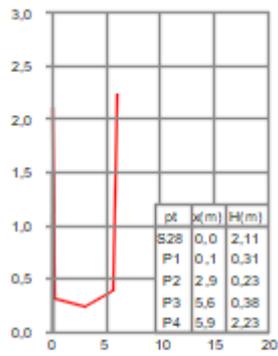
SEÇÃO 26

H=1:500 V=1:50



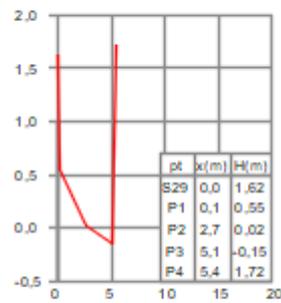
SEÇÃO 27

H=1:500 V=1:50



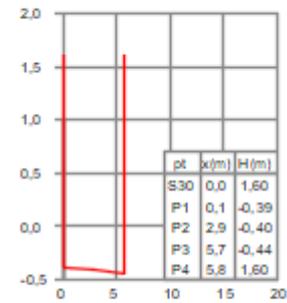
SEÇÃO 28

H=1,50 V=1,50



SEÇÃO 29

H=1,50 V=1,50



SEÇÃO 30

H=1,50 V=1,50