

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO E
CONSTRUÇÃO**

**1° TEN MARCOS HENRIQUE DIÓGENES DE OLIVEIRA
MONIQUE VITAL DE LIMA**

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE CHEIAS EM CANAIS SOB INFLUÊNCIA DE
MARÉ**

**Rio de Janeiro
2018**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

**1° TEN MARCOS HENRIQUE DIÓGENES DE OLIVEIRA
MONIQUE VITAL DE LIMA**

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE CHEIAS EM CANAIS SOB
INFLUÊNCIA DE MARÉ**

Tese de Graduação apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a aprovação na referida disciplina.

Orientador: Prof. José Carlos César Amorim.
Co-orientador: Prof. Cap Paz.

Rio de Janeiro
2018

c2018

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha.

Rio de Janeiro - RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade dos autores e dos orientadores.

| | |
|------|---|
| 624 | Oliveira, Marcos Henrique Diógenes de |
| O48p | Propagação de ondas de cheias em canais sob influência de maré / Marcos Henrique Diógenes de Oliveira; Monique Vital de Lima; orientados por José Carlos Cesar Amorim; Igor da Silva Rocha Paz – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018. |
| | 77p. : il. |
| | Projeto de Fim de Curso (PFC) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018. |
| | 1. Curso de Engenharia de Fortificação e Construção – Projeto de Fim de Curso. 2. Inundações. I. Lima, Monique Vital de. II. Amorim, José Carlos Cesar. III. Paz, Igor da Silva Rocha. III. Instituto Militar de Engenharia. IV. Título. |

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

**1º TEN MARCOS HENRIQUE DIÓGENES DE OLIVEIRA
MONIQUE VITAL DE LIMA**

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE CHEIAS EM CANAIS SOB
INFLUÊNCIA DE MARÉ**

Tese de Graduação apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a aprovação na referida disciplina.

Orientadores: Prof. José Carlos César Amorim, D.Sc.
Prof. Igor da Silva Rocha Paz, D.Sc.

Aprovada em 11 de outubro de 2018 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. José Carlos César Amorim – D. Sc.do IME – Presidente



Prof. Igor da Silva Rocha Paz – D. Sc. do IME



Prof^a. Rebeca Montenegro Dias de Carvalho Saraiva – D. Sc. do IME



Prof. Renato Cancherini Lefone – D. Sc. do IME

Rio de Janeiro
2018

AGRADECIMENTOS

Queremos agradecer, em primeiro lugar, a Deus, que se mostrou criador, que foi criativo. Seu fôlego da vida foi o sustento e que trouxe a coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes em nossas vidas acadêmicas e no desenvolvimento desta monografia.

À nossas famílias, pelo apoio.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | INUNDAÇÕES | 15 |
| 2.1 | DEFINIÇÕES | 15 |
| 2.2 | INFLUÊNCIAS DA URBANIZAÇÃO | 16 |
| 2.3 | CONSEQUÊNCIAS DAS INUNDAÇÕES | 19 |
| 3 | BACIA DE ESTUDO | 21 |
| 3.1 | CARACTERÍSTICAS DA BACIA | 21 |
| 3.1.1 | TOPOGRAFIA | 22 |
| 3.1.2 | CLIMA | 22 |
| 3.1.3 | USO E OCUPAÇÃO | 23 |
| 4 | MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA..... | 24 |
| 5 | MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 5.1 | SOFTWARE UTILIZADO | 26 |
| 5.2 | DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS | 27 |
| 5.3 | COLETA DE DADOS DA BACIA | 29 |
| 5.4 | BACIA DE ESTUDO | 30 |
| 5.4.1 | PLANIALTIMETRIA E GEOMETRIA DO CANAL | 30 |
| 5.4.2 | PRECIPITAÇÃO | 30 |
| 5.4.3 | MARÉ | 31 |
| 5.5 | PROCESSO DE SELEÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA | 31 |
| 5.5.1 | DADOS DE ENTRADA | 31 |
| 6 | APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS HIDRODINÂMICOS | 33 |
| 6.1 | ESPECIFICAÇÕES DA BACIA | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1.1 DADOS GERAIS _____ | 33 |
| Dados da bacia | 33 |
| 6.1.2 PLANIALTIMETRIA E GEOMETRIA DO CANAL _____ | 35 |
| 6.1.3 PRECIPITAÇÃO _____ | 40 |
| 6.1.4 MARÉ _____ | 46 |
| 6.2 MODELAGEM HIDRAULICA _____ | 49 |
| 6.2.1 RESULTADOS CENÁRIO I - TEMPO DE RETORNOS _____ | 49 |
| 6.2.2 RESULTADOS CENÁRIO II - TEMPO DE RETORNOS + MARÉ MÉDIA ____ | 54 |
| 6.2.4 RESULTADOS CENÁRIO III - TEMPO DE RETORNOS + MARÉ ALTA ____ | 58 |
| 6.3 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS _____ | 62 |
| 7 CONCLUSÃO | 65 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 66 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| FIG. 2.1 – Representação de enchente e inundação (Amaral e Ribeiro, 2009) | 14 |
| FIG. 2.2 – A influência da urbanização no ciclo da água (AquaFluxus– Consultoria Ambiental de Recursos Hídricos, 2015). | 16 |
| FIG. 2.3 – Hidrograma de área urbanizada e não urbanizada (TUCCI, 1995). | 16 |
| FIG. 3.1 – Mapa de localização da bacia do Tucunduba (MATOS, 2011)..... | 19 |
| FIG. 3.2 – Balanço hídrico mensal de Belém de 1972 a 1990. (ROLIM, 1998). | 21 |
| FIG. 5.1 – Cenários de Estudo do Canal Tucunduba. (Autor, 2018). | 25 |
| FIG. 6.1 – Perfil do canal visto da seção 1 com vazão máxima do TR de 10 anos. (Autor, arquivo HEC-RAS, 2018) | 35 |
| FIG. 6.2 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018). | 35 |
| FIG. 6.3 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos. (Autor,arquivo do HEC-RAS, 2018). | 36 |
| FIG. 6.4 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos. (Autor,arquivo do HEC-RAS, 2018). | 36 |
| FIG. 6.5 – Sub-bacia do Tucunduba. (LEME ENGENHARIA, 2011)..... | 37 |
| FIG. 6.6 – Hietograma de Precipitação de TR de 10 anos. (LEME ENGENHARIA, 2011)..... | 44 |

| | |
|---|----|
| FIG. 6.7 – Hietograma de Precipitação de TR de 25 anos. (LEME ENGENHARIA, 2011)..... | 44 |
| FIG. 6.8 – Hietograma de Precipitação de TR de 25 anos. (LEME ENGENHARIA, 2011)..... | 44 |
| FIG. 6.9 – Hidrograma triangular SCS. (MELLO ET AL., 2007)..... | 45 |
| FIG. 6.10 – Hidrograma TR de 10 anos. (MARTINS, 2015)..... | 46 |
| FIG. 6.11 – Hidrograma TR de 25 anos. (MARTINS, 2015)..... | 47 |
| FIG. 6.12 – Hidrograma TR de 50 anos. (MARTINS, 2015)..... | 47 |
| FIG. 6.13 – Níveis d'água no Porto de Belém (MARINHA DO BRASIL, 2013)..... | 48 |
| FIG. 6.14 – Níveis d'água no Porto de Belém durante 48h (MARINHA DO BRASIL, 2013)..... | 48 |
| FIG. 6.15 – Perfil do canal com vazão máxima do TR de 10 anos. (Autor, arquivo HEC-RAS, 2018)..... | 50 |
| FIG. 6.16 – Perfil do canal com vazão máxima de TR 25 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 50 |
| FIG. 6.17 – Perfil do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 51 |
| FIG. 6.18– Perfil da seção 42 do canal com vazão máxima de TR 10 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 51 |
| FIG. 6.19 – Perfil da seção 42 do canal com vazão máxima de TR 50 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 52 |
| FIG. 6.20 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos, TR de 15 anos e TR de 50 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 52 |

| | |
|---|----|
| FIG. 6.21 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 54 |
| FIG. 6.22 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 55 |
| FIG. 6.23 – Gráfico de velocidade x distância ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 56 |
| FIG. 6.24 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 56 |
| FIG. 6.25 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 57 |
| FIG. 6.26 – Perfil de alturas ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 58 |
| FIG. 6.27 – Perfil de alturas ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 59 |
| FIG. 6.28 – Perfil de alturas ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 59 |
| FIG. 6.29 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 60 |
| FIG. 6.30 – Justificativa inundação unilateral perfil seção 3 no cenário III sob TR de 10 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 61 |
| FIG. 6.31 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 61 |
| FIG. 6.32 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018)..... | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TAB. 6.1 – Dados gerais da bacia do Tucunduba. (CODEM, 2013)..... | 34 |
| TAB. 6.2 – Áreas de rugosidade. (PESQUISA BIBLIOGRÁFICA, 2018)..... | 35 |
| TAB. 6.3 – Perfil geométrico do canal. (PESQUISA BIBLIOGRÁFICA,2018)..... | 36 |
| TAB. 6.4 – Resultados da relação IDF, em mm/h (LEME ENGENHARIA, 2018)..... | 41 |
| TAB. 6.5 – Precipitação Acumulada (MARTINS, 2015)..... | 43 |
| TAB. 6.6 – Valores de Picos dos Hidrogramas (MARTINS, 2015)..... | 46 |
| TAB. 6.7 – Marés máximas baixas e altas para os anos 2005/2012 (Autor, 2018)... | 47 |
| TAB. 6.8 – Variação de Marés baixas e altas para (CODEM, 2013)..... | 47 |
| TAB. 6.9 - Volume de inundações das seções nos cenários..... | 53 |
| TAB. 6.10 - Volume de transbordamento das seções e volumes totais dos cenários I a III..... | 63 |

RESUMO

Para a prevenção de inundações, em alguns canais, deve-se analisar além da precipitação e da drenagem urbana, a influência causada pelas marés.

Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos que as oscilações de nível d'água a jusante produzem no escoamento em um canal aberto. As mudanças analisadas, foram as causadas pelas influências das marés.

Para esse estudo Hidrodinâmico, foram realizadas modelagens computacionais na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, localizada em Belém do Pará, utilizando o software HEC-RAS.

Nesse programa, para fluxo instáveis, o procedimento utilizado são as resoluções das equações completas de Saint Venant, usando um método implícito de diferenças finitas com aproximações para ambas as derivações: temporal e espacial.

Como resultado da pesquisa, pretende-se utilizar as informações geradas para auxiliar na prevenção e na contenção de cheias sobre bacias urbanas de drenagem sob influência direta dos regimes de maré.

ABSTRACT

For the prevention of floods, in some channels, the influence caused by tides should be analyzed in addition to precipitation and urban drainage.

This work aims to analyze the effects of the water level oscillations downstream produce in the flow in an open channel. The changes analyzed were those caused by tidal influences.

For this hydrodynamic study, computational modeling was performed in the hydrographic basin of Igarapé Tucunduba, located in Belém do Pará, using HEC-RAS software.

In this program, for unstable flows, the procedure used is the resolutions of the complete equations of Saint Venant, using an implicit method of finite differences with approximations for both derivations: temporal and spatial.

As a result of the research, it is intended to use the information generated to assist in the prevention and containment of floods on urban drainage basins under the direct influence of tide regimes.

1 INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos naturais que ocorrem quando um leito natural recebe um volume de água superior ao que pode comportar resultando em transbordamentos. As causas mais comuns das inundações são as ocorrências de pluviosidade intensa e de pouca duração ou períodos de chuvas contínuas.

Os fatores naturais causadores de inundações estão relacionadas à forma da bacia hidrográfica, às características geográficas da região próxima a bacia, da altura da topografia e dos índices de pluviosidade do local.

Apesar de naturais, as inundações podem causar destruição da infraestrutura das cidades afetadas, perdas agrícolas, propagação de doenças, gerar desabrigados, feridos, mortos, entre outros danos econômicos e sociais.

A frequência e intensidade das inundações, são alteradas pelas modificações do uso e ocupação do solo devido, principalmente, à ocupação irregular de áreas marginais inundáveis nas áreas urbanas, como planícies fluviais, encostas e áreas de frágil equilíbrio ecológico. Além disso, esse processo tem se intensificado ao passo que progride a urbanização com alto índice de crescimento demográfico sem o devido planejamento urbano.

Neste contexto, a gestão das bacias e o controle das águas assumem papel relevante para a vida urbana. Dessa forma, é necessário o planejamento da drenagem urbana nas cidades.

O Brasil possui uma grande zona litorânea, em vista disso, é grande o número de bacias hidrográficas cujos trechos finais incluem a região de encontro do rio com o oceano. Ações do oceano podem ocasionar fenômenos hidrodinâmicos nesses rios. Então, é importante a sua análise, para a prevenção de inundações, os fenômenos de marés dos oceanos que podem influenciar o escoamento desses canais.

Diante disso, o objetivo desse trabalho é relacionar o resultado da análise dos efeitos das oscilações de nível impostas pelas marés, ao controle das inundações para tornar mais eficaz os sistemas de prevenção nos canais que estão sujeitos a influência de marés.

Para isso, foram feitas simulações hidráulicas utilizando o software HEC-RAS, para eventos extremos de vazão máxima do canal, para diferentes tempos de retorno

para a caracterização da capacidade de escoamento por parte das seções transversais do rio em uma passagem de onda de cheia.

2 INUNDAÇÕES

2.1 DEFINIÇÕES

Segundo TUCCI (2002), a inundação ocorre quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupa áreas nas quais a população utiliza para moradia, transporte (ruas, rodovias e passeios), recreação, comércio, indústria, entre outros.

Os rios possuem uma configuração natural que reflete o comportamento variável de suas águas frente às oscilações de vazão. Os cursos fluviais possuem um nível de escoamento de suas águas nos períodos de estiagem que se restringe ao leito vazante. O leito maior, por sua vez, recebe sazonalmente águas fluviais de transbordamento durante as inundações e se caracteriza por ser uma área que comumente possui ocupações antrópicas, o que pode gerar transtornos socioeconômicos e riscos à vida humana (CAJAZEIRO, 2012).

O maior leito do rio pode ser inundado total ou parcialmente durante os períodos de chuva, e as inundações podem abranger diferentes áreas marginais ao longo do tempo em função da intensidade das precipitações e da capacidade de escoamento da bacia.

Segundo GOERL e KOBAYAMA (2005), a diferença entre enchente e inundação, é que na inundação há o extravasamento da água que escoar no leito dos rios para as áreas marginais ao seu curso, o que pode ser observado na figura 2.1. As enchentes, entretanto, não são necessariamente calamidades, todos os rios possuem ocorrência de enchentes e uma área natural de inundação. Já o episódio de alagamento está associado às carências do sistema de drenagem que causa o acúmulo de água por certo período e tempo.



FIG. 2.1 – Representação de enchente e inundação (AMARAL E RIBEIRO, 2009).

2.2 INFLUÊNCIAS DA URBANIZAÇÃO

Áreas marginais a rios são historicamente regiões difusoras da ocupação de sociedades ao redor do mundo. Porém estas áreas são bastante suscetíveis aos riscos oriundos das condições de variabilidade no regime hidrológico local (PEDUZZI, 2009).

A urbanização ao longo das planícies fluviais é um processo histórico, fruto das facilidades geradas para a implantação de atividades agrícolas e para a utilização dos cursos fluviais como meio de transporte. Como resultado, desde cerca de quatro mil anos a humanidade convive com os riscos associados à localização de suas atividades e moradias no entorno de corpos hídricos (CAJAZEIRO, 2012).

Desses riscos, os mais preocupantes são as inundações, pois, elas são as causadoras dos maiores danos econômicos e sociais.

A ocorrência de inundações em períodos de chuvas intensas é um fenômeno natural e cíclico em uma bacia hidrográfica (SANTOS, 2010). Ainda assim, tais ocorrências acarretam danos às cidades, graças à ausência de planejamento urbano e ordenação da ocupação, o que acaba por permitir a ocupação de margens e áreas de inundação. Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual ocorrem as inundações. A ocupação da várzea pode ser para habitação, recreação, uso agrícola,

comercial ou industrial. Os problemas das enchentes e das erosões são de ordem mundial (CORDERO; MEDEIROS; TERAN, 1999).

Os principais impactos provocados pela urbanização, segundo TUCCI (1997), são a impermeabilização do solo, o aumento do escoamento superficial, redução da evapotranspiração, redução do escoamento subterrâneo e rebaixamento do lençol freático.

Segundo KONRAD (2003), as amplas modificações existentes no meio urbano que geram esses impactos são as construções de estradas, edifícios e casas, já que, elas frequentemente removem a cobertura vegetal e parte do solo e modificam a estrutura natural das cidades. Além disso, a redução da capacidade de absorção e infiltração de água no solo é acompanhada pelo aumento do escoamento superficial e de sua velocidade.

O progressivo aumento da impermeabilização dos solos causa mudanças no equilíbrio entre infiltração e escoamento, ocasionando o aumento do escoamento superficial que se dirige aos rios.

Na figura abaixo, temos a representação desse fenômeno, no qual, observa-se a diminuição das taxas de evapotranspiração, infiltração superficial e profunda a medida que se intensifica o processo de urbanização. Além disso, ocorre o aumento do escoamento superficial que contribui para o rápido aumento de vazão, o que favorece a ocorrência de inundações quando há chuvas.

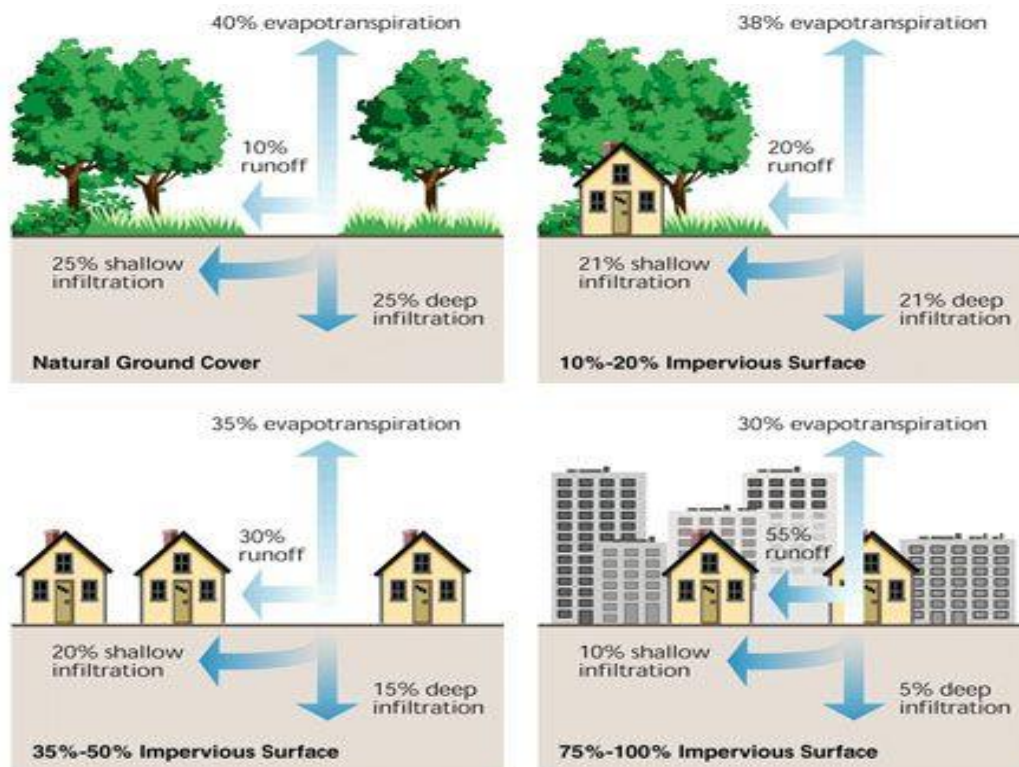


FIG. 2.2 – A influência da urbanização no ciclo da água (AquaFluxus– Consultoria Ambiental de Recursos Hídricos, 2015).

Na figura 2.2, tem-se representação da diferença entre os hidrogramas de cheia em áreas urbanizadas e não-urbanizadas.

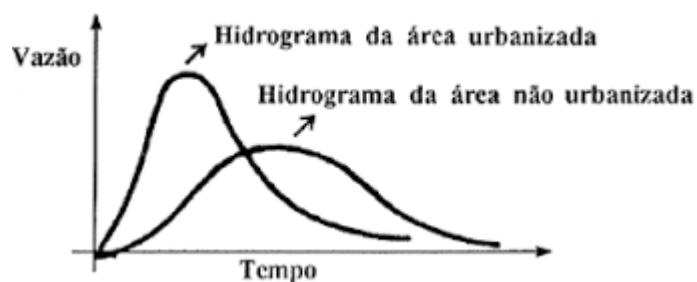


FIG. 2.3 – Hidrograma de área urbanizada e não urbanizada (TUCCI, 1995).

Desse modo, conclui-se a partir disso, que os hidrogramas relativos às áreas urbanizadas apresentam maiores vazões máximas, menores tempos de pico e menores tempos de duração.

2.3 CONSEQUÊNCIAS DAS INUNDAÇÕES

De acordo com o *INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION* (2009), estatísticas mundiais somam que metade dos desastres naturais estão relacionados às inundações, e que as perdas para um período entre 1994 a 2003 ultrapassaram a quantia dos US\$ 66 bilhões.

A maior parte do território brasileiro encontra-se nas áreas de baixas latitudes, entre o Equador e o Trópico de Capricórnio. Por essa razão, predominam os climas quentes e úmidos com médias pluviométricas de valores elevados.

No Brasil, as inundações têm provocado diversos danos e mortes. O Brasil é atualmente o sexto país do mundo que mais sofre com catástrofes climáticas, segundo a Organização das Nações Unidas (2011). Uma em cada três tragédias no Brasil é causada por inundações, foram mais de 10 mil registros oficiais de entre 1991 e 2010, segundo a Revista Brasileira de Geografia Física (2016).

Segundo a *SWISS REINSURANCE COMPANY* (2011), na última década, em média, 120 pessoas perderam a vida devido a inundações no Brasil por ano. E as perdas econômicas alcançaram cerca de 250 milhões de dólares. A população brasileira exposta ao risco de inundações provavelmente aumentará de 33 milhões de pessoas hoje, para 43 milhões em 2030. Estima-se que as perdas anuais aumentarão de 1,4 para 4 bilhões e dólares no mesmo período.

Segundo TUCCI (2008), o crescimento urbano ocorrido nas últimas décadas transformou o Brasil num país essencialmente urbano (83% de população urbana). O município de Belém (PA), por exemplo, cresceu com taxas médias de aproximadamente 3,6% ao ano entre 1980 e 2000 (FAURE, 2002).

A Região Norte possui a maior capacidade hídrica do país, segundo CASTRO (2003), e geralmente a densidade populacional é baixa (REBOUÇAS, 2002). Entretanto, a cidade de Belém, alvo no nosso estudo, segundo CASTRO (2003), possui a maior aglomeração urbana em toda a região amazônica. Na região conhecida como Grande Belém estão sendo registradas as maiores taxas de ocupação humana na Amazônia, nos últimos 20 anos.

Esse crescimento urbano, entretanto, não foi associado a um planejamento adequado de drenagem urbana, o que contribuiu para ocorrências de inundações,

causando prejuízos a população. É necessário um planejamento adequado dos sistemas de drenagem pluvial das cidades e um aperfeiçoamento dos projetos já implantados, buscando-se a preservação do ciclo hidrológico natural para a gestão sustentável das águas no meio urbano.

3 BACIA DE ESTUDO

3.1 CARACTERÍSTICAS DA BACIA

A Bacia do Tucunduba está localizada na parte sul da cidade de Belém, sendo delimitada pelas bacias do Murucutu, Una e Estrada Nova. Ocupa uma área total de 10,55 km², dos quais 5,75 km² (54,50%) são de área alagável e 4,80 km² (45,50%) de área não alagável. É composta de 14 canais que perfazem 14.175m de extensão (ALMEIDA, 2004).

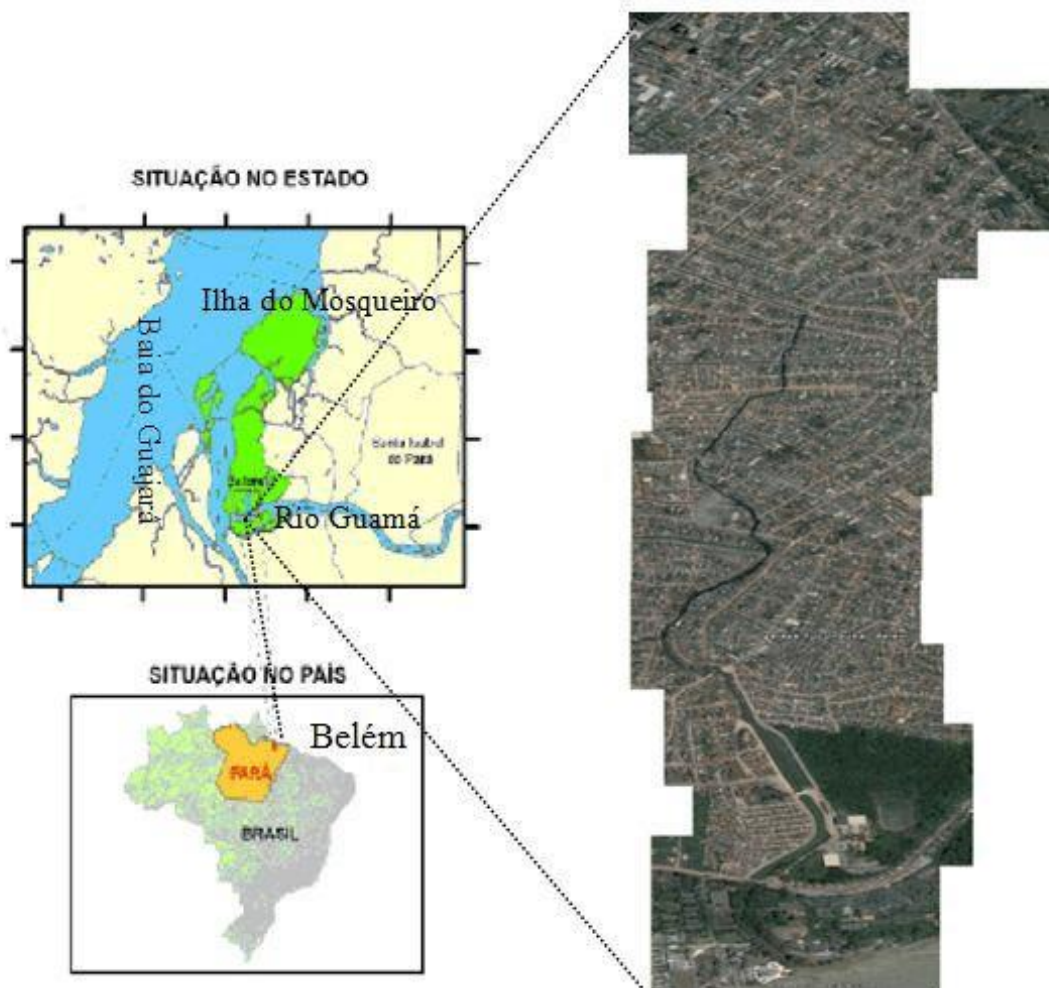


FIG. 3.1 – Mapa de localização da bacia do Tucunduba (MATOS, 2011).

A Bacia do Tucunduba é constituída pelos igarapés do Tucunduba, Lago Verde, Caraparu, Dois de Junho, Mundurucus, Gentil Bittencourt, Nina Ribeiro, Santa Cruz, Cipriano Santos, Vileta, União, Leal Martins e Angustura. O igarapé Tucunduba é o principal curso hídrico da bacia com 3.600 metros de extensão (AGUIAR, 2000).

3.1.1 TOPOGRAFIA

A área da pesquisa é uma bacia urbanizada que drena para o rio Guamá e este para a baía do Guajará. Esta baía está localizada numa região estuarina, ou seja, um ambiente fluvial com importante influência marinha, com oscilação típica de mesomaré com alcance médio de 3m. Os terrenos continentais adjacentes à baía, onde se situa a área de estudo, se dividem em duas unidades fisiográficas, Terra Firme e Várzeas (PARÁ, 2002).

A porção de Terra Firme que ocorre na área de estudo não possui grande amplitude topográfica em função de sua proximidade à área do estuário. Portanto, a bacia do Tucunduba possui baixa declividade com elevação variando de 0 a 3 metros na parte baixa da bacia e de 15 a 18 m na área de maior elevação (CACELA FILHO, 2007). Dessa forma, graças a pequena variação de altura o escoamento ocorre de maneira mais lenta.

3.1.2 CLIMA

Segundo NASCIMENTO (1995), Belém é uma das cidades mais chuvosas do Brasil, o clima é quente e úmido. A temperatura média varia entre 22 e 25°C. A umidade relativa do ar chega a 91% nos meses mais chuvosos. Sem estações climáticas definidas, possui dois períodos sazonais: chuvoso (dezembro a maio) e menos chuvoso (julho a novembro). A precipitação média anual varia entre 2.500 a 3.000 mm.

Na figura abaixo temos o balanço hídrico médio mensal no período de 1972 a 1990 do município de Belém, elaborado por ROLIM (1998) que utilizou o método de Thornthwaite-Mather, adotando uma capacidade de água disponível de 100 mm.

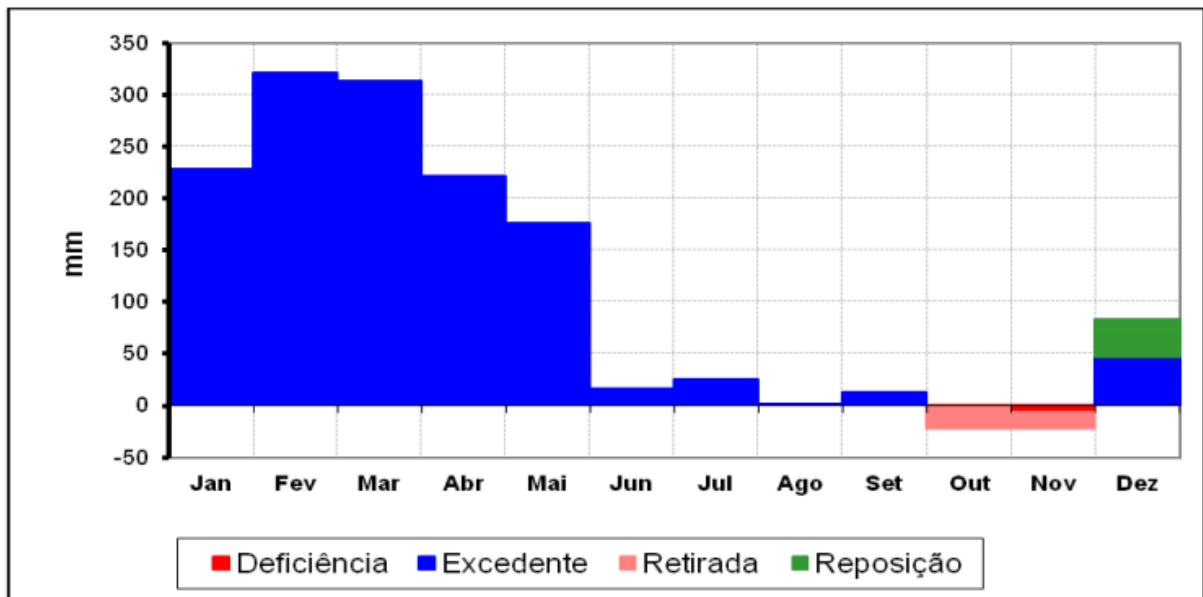


FIG. 3.2 – Balanço hídrico mensal de Belém de 1972 a 1990. (ROLIM, 1998).

Pode-se concluir, da figura 3.2, que ocorre excedente hídrico no município de Belém em grande parte do ano.

3.1.3 USO E OCUPAÇÃO

Conforme o IBGE/Censo 2000, a região do Tucunduba possui uma população de aproximadamente 161.500 habitantes. De maneira que, o bairro mais populoso da região é o Guamá e o Montese (Terra Firme) é o segundo mais populoso.

A ocupação desordenada caracteriza o Tucunduba como periferia de Belém, sendo habitado por uma camada social de baixo poder aquisitivo, onde existem níveis acentuados de pobreza, miséria e degradação ambiental (ALMEIDA, 2004).

As inundações e cheias são acontecimentos recorrentes nas áreas mais baixas da bacia, de modo que no decorrer dos anos tem causando destruições e perdas à população.

No igarapé Tucunduba a superpopulação agrava as inundações nas áreas alagáveis do local, o que altera o funcionamento natural da drenagem. Os aterros feitos com lixo, com caroços de açaí, cascas de castanha e serragens e a concentração de lixo no leito maior e menor do igarapé alteram a topografia e impedem o escoamento das águas das chuvas e das enchentes, e a drenagem de parte dos esgotos das terras mais altas, propiciando a formação de “lagos de quadra”. O desmatamento de suas margens, por sua vez, facilita a erosão e o consequente assoreamento do leito do igarapé, o que diminui a profundidade e a capacidade de contenção do volume d’água do igarapé (ALMEIDA, 2003).

4 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

O sistema de modelagem deve auxiliar no processo de tomada de decisões através da apresentação e análise de alternativas estratégicas de planejamento baseadas nos resultados das simulações. O sistema deve utilizar uma abordagem orientada a objetos, permitir a modularidade e o encapsulamento de informações e, de maneira mais adequada, possibilitar a expansão, a alteração e a inserção de outros modelos (COGERH, 2012).

A modelagem computacional tornou-se uma ferramenta essencial de diferentes áreas da Engenharia, especialmente em estudos relativos a projetos de gerenciamento hídrico. Além disso, é uma ferramenta que apresenta uma linguagem simples para a solução de um problema de difícil entendimento no modelo real.

Dessa forma, neste trabalho foram feitas simulações computacionais para um melhor entendimento dos efeitos causados em um canal fluvial pela influência do nível da maré considerando também a ocorrência de eventos de precipitações máximas.

Os escoamentos em canais de maré são bem representados por modelos matemáticos unidimensionais, obtidos através de equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento ao longo da seção transversal. As variáveis aplicadas nessas equações são a vazão, velocidade, profundidade e o nível d'água marítima.

Na simulação foram utilizadas as equações de Saint-Venant como solução, nas quais a análise do escoamento é realizada por meio do estudo da conservação de massa ou de volume e da quantidade de movimento e energia. Desta forma, os modelos hidrodinâmicos se utilizam de equações diferenciais que representam o movimento das águas nos rios e canais.

Nesse modelo, também é utilizado o método de diferenças finitas de quatro pontos. Com as condições de contorno, na entrada e saída do canal, é possível colocar estruturas de controle de nível, permitindo adicionar as regras de operação do canal. Este modelo possui também a possibilidade de representação digital do Terreno, possibilitando a visualização e a localização da área de inundação.

A modelagem utilizada, nesse trabalho, pode ser aplicada a escoamentos permanentes e não-permanentes. Para regime permanente, o procedimento básico é realizado com base na solução da equação de energia para uma dimensão. A equação do momento é utilizada em situações onde há uma variação rápida do nível d'água.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi escolhida a Bacia Hidrográfica do Tucunduba localizada em Belém-PA, porque ela apresenta recorrentes casos de inundações devido a problemas no sistema de drenagem urbana.

A seguinte metodologia tem a intenção de obter os volumes de cheia tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos, sob o efeito da variação da maré na jusante do canal Tucunduba.

5.1 SOFTWARE UTILIZADO

O programa escolhido para as simulações hidráulicas foi o HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), é um software, desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers*.

O software destina-se ao cálculo do escoamento com superfície livre em linhas de água naturais, ou seja, modela a hidráulica do fluxo de água através de rios naturais e outros canais. O programa inclui vários recursos de entrada de dados, componentes de análise hidráulica, recursos de armazenamento e gerenciamento de dados e recursos gráficos e de geração de relatórios.

O HEC-RAS permite performar o fluxo estável em uma dimensão e comportamento do fluxo instável com efeitos hidrodinâmicos em uma e duas dimensões, além de transporte de sedimentos, modelagem da temperatura da água e modelagem da qualidade geral da água, como o transporte de nutrientes e o seu destino.

O sistema do HEC-RAS contém quatro componentes de análise de um rio de uma dimensão são eles:

1. Cálculos da modelagem do perfil de uma superfície de água de fluxo constante;
2. Simulação de fluxo instável (Efeitos hidrodinâmicos em uma e duas dimensões);
3. Cálculos de sedimentos de contornos móveis;
4. Análises da qualidade de água.

Todo os quatro elementos utilizam a mesma representação de informações geométricas e a mesma rotina de cálculos geométricos e hidráulicos. Além das quatro componentes de análise de um rio o sistema contém vários recursos de design hidráulico que podem ser utilizados uma vez que os perfis da superfície da água são computados.

5.2 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Os canais de macrodrenagem devem ser dimensionados para suportar vazões criadas por tempestades com tempo de retorno maior ou igual a 50 anos. Dessa forma, nesse trabalho serão realizadas simulações para três TR's, 10, 25 e 50 anos.

Para um melhor entendimento do efeito das marés, serão analisados três possíveis cenários. Em todos os cenários serem analisados o efeito da vazão máxima de possível de chuva no canal, que será constante para todas as seções do canal. No primeiro cenário, será estudado apenas o efeito da vazão máxima de chuva no Canal de Tucunduba para o tempo de retorno de 10 anos, de 25 anos e de 50 anos. No segundo cenário, será estudado, além do efeito das vazões máximas, o efeito de maré média, entre a máxima e mínima possível, nos três tempos de retorno referidos. No terceiro e último cenário, serão analisadas as vazões máximas da chuva nos três tempos de retorno referidos junto com a influência da maré máxima possível (maré alta). Esses cenários estão esquematizados na figura 5.1.

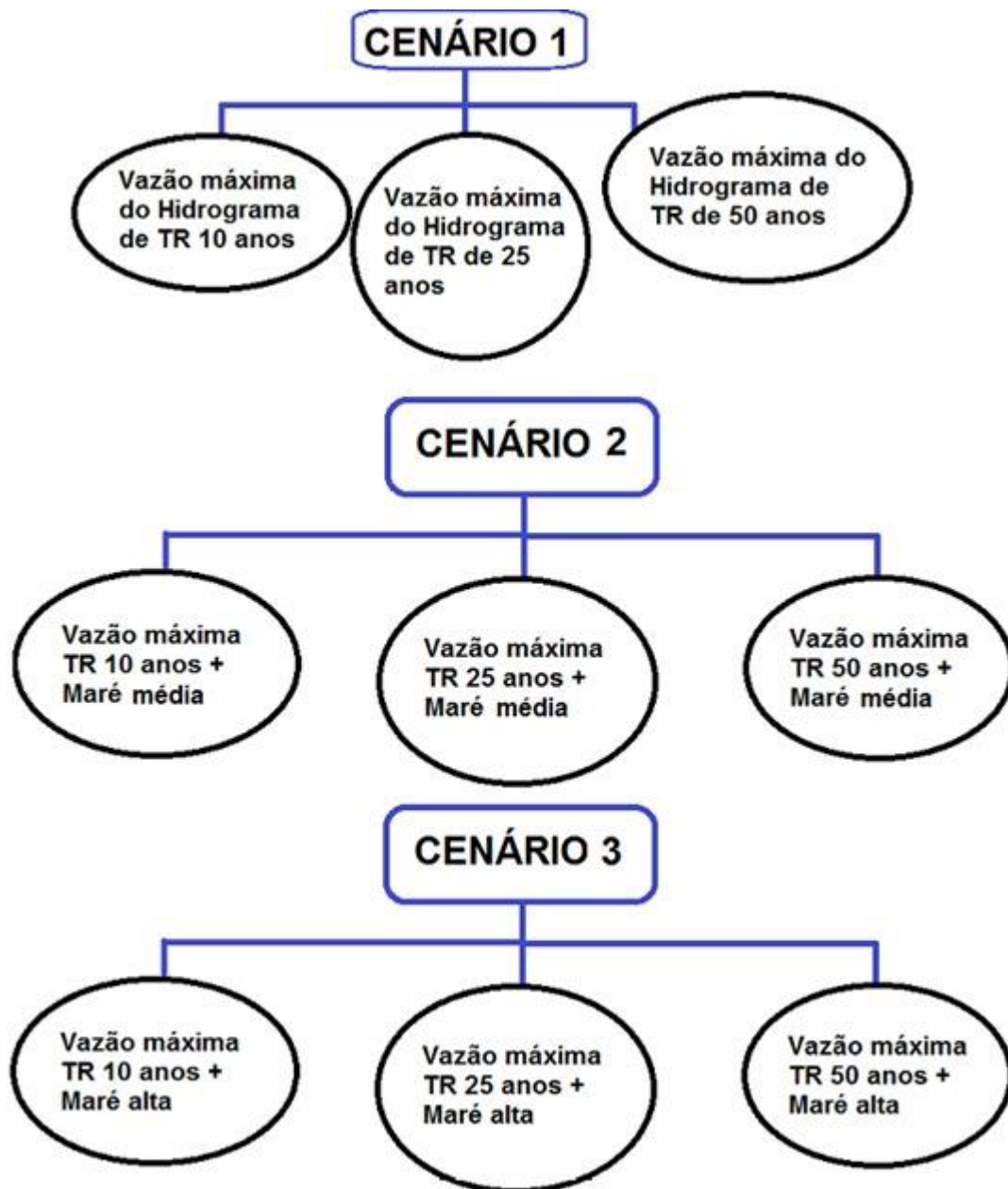


FIG. 5.1 – Cenários de Estudo do Canal Tucunduba. (Autor, 2018).

A simulação do cenário 1 com tempo de recorrência de 10 anos, corresponde a situação mais favorável ao canal, por representar a menor onda de cheia com os níveis mais baixos de maré. Enquanto, a simulação do cenário 3 com tempo de recorrência de 50 anos é a mais desfavorável e tem o intuito de verificar a capacidade de armazenamento do canal.

5.3 COLETA DE DADOS DA BACIA

Os dados essenciais para esse trabalho foram obtidos por meio da pesquisa do histórico de projetos e estudos desenvolvidos para bacia hidrográfica do Tucunduba. Esses dados foram: aspectos gerais da bacia, dados pluviométricos, níveis de marés horários, base cartográfica, cotas do terreno, condições de ocupação do solo e geometria dos canais Tucunduba e União.

As principais fontes utilizadas para coleta de dados foram os seguintes documentos:

- ❖ Projeto Básico do Sistema de Macrodrenagem da Bacia do Tucunduba, (Estacon Engenharia S/A);
- ❖ Análise de risco e plano de ação para a continuidade e conclusão das obras de macrodrenagem da bacia do Tucunduba e serviços complementares (Montenegro Engenharia Ltda);
- ❖ Estudo da infraestrutura de saneamento atual e projetada e de seus impactos na urbanização da bacia do Tucunduba-Belém-PA (GPHS/UFPA);
- ❖ Projeto do Sistema Macrodrenagem da Bacia do Tucunduba (LEME Engenharia);
- ❖ Urbanização do igarapé Tucunduba, gestão de rios urbanos (Melhores Práticas Caixa);
- ❖ Base de mapas cartográficos, hidrográficos e de lotes (CODEM/PMB).
- ❖ Projeto de Macrodrenagem da Bacia da Estrada Nova, Sub's 1,2,3 e 4 (SESAN/PMB).

As análises citadas acima foram cedidas pela Secretaria Municipal de Saneamento – SESAN, Secretaria Estadual de Integração Regional, Desenvolvimento Urbano e Metropolitano – SEIDURB e Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém – CODEM.

5.4 BACIA DE ESTUDO

5.4.1 PLANIALTIMETRIA E GEOMETRIA DO CANAL

As características planialtimétrica da bacia do Tucunduba foram obtidas no estudo da LEME Engenharia. E para a geometria do canal foram considerados os dados das seções transversais e dos perfis longitudinais, fornecidos pela Prefeitura de Belém do Projeto Macrodrenagem da Bacia do Tucunduba.

Na modelagem computacional, serão considerados três aspectos de dados no sistema geométrico do canal Tucunduba:

1. Extensão dos canais Tucunduba e União, cotas dos perfis longitudinais de fundo e das bordas dos canais.

2. Seções transversais com estaqueamento de 100 em 100 m no trecho, Rio Guamá – Canal vileta (Tucunduba), e 40 em 40 m no trecho Canal vileta – Rua Mauriti (canal união).

3. A partir da berma do canal foi considerado um raio de 60 m para ambas às margens (esquerda e direita). Tal superfície foi considerada nesse estudo como Planície e/ou área limítrofe de inundação. A determinação da altimetria de tal planície teve como base os níveis das vias marginais projetadas.

Os dados altimétricos e geométricos serão utilizados como entrada (inputs) para o modelo hidrodinâmico.

5.4.2 PRECIPITAÇÃO

De acordo com Santiago (2011) e Tavares (2008), as tempestades na região de Belém duram normalmente menos que 12 horas. Dessa forma, foi determinado que a chuva desse estudo tenha duração de 12 horas consecutivas, considerando um evento tempestade de longa duração, ainda segundo Santiago (2011) e Tavares

(2008), baseados em registros históricos, chuvas de longa duração são determinantes para ocorrência de inundações em Belém.

Os dados de vazão máxima do canal foram obtidos em pesquisa bibliográfica, baseada na modelagem computacional de MARTINS (2015). Na qual, utilizou-se o software IPHS1 e os dados da análise estatística dos hietogramas de precipitação feita por LEME Engenharia (2011).

5.4.3 MARÉ

A ocorrência das estações chuvosas junto com o período de cheia do Rio Guamá, tem levado ao agravamento das inundações ao longo do Igarapé Tucunduba em função do remanso ocasionado pela entrada das águas de maré altas no canal. Então, foram pesquisados dados da MARINHA DO BRASIL das previsões de marés altas e baixas entre 2005 e 2012 no porto de Belém.

5.5 PROCESSO DE SELEÇÃO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O canal de Tucunduba tem uma natureza oscilante em seu volume devido justamente a variação da maré em sua jusante, exigindo assim um modelo hidrodinâmico instável para um eventual estudo hidráulico que venha acontecer no Igarapé.

5.5.1 DADOS DE ENTRADA

Para a construção do sistema de simulação do canal de Tucunbuda no HAC-RAS, é necessário o estabelecimento de condições iniciais. Elas são:

Dados geométricos: consiste no estabelecimento do sistema topológico do rio, com inserção dos dados das seções transversais, comprimento dos trechos. Além dos coeficientes de perda de energia (perdas por atrito, contração e expansão). Dados das Estruturas hidráulicas e geométricos são inseridos nessa etapa: sistema esquemático do rio, geometria das seções transversais e comprimento dos trechos.

Dados hidráulicos: inserção dos coeficientes de perda de energia e coeficiente de rugosidade de Manning (n). O trecho do fluxo foi separado em três áreas, fundo do canal principal com revestimento natural, paredes do canal Principal em concreto e planície de Inundação superfície das vias marginais.

Dados de escoamento: Condição de contorno à montante obtido por um conjunto de hidrogramas, representando o evento tempestade, criado sinteticamente pelo modelo hidrológico. Uma série cronológica de níveis d'água foi inserida como condição de contorno à jusante, localizada na seção transversal mais à jusante na foz do Tucunduba

As condições de contorno são necessárias para estabelecer do início ao fim da superfície de água do rio (Montante e Jusante). O início da superfície de água é necessário para o programa iniciar os cálculos. No regime subcrítico as condições de contorno são somente necessárias nas extremidades a jusante do sistema fluvial. Se um regime supercrítico for ser calculado as condições de contorno são necessárias somente nas extremidades a montante do sistema fluvial. Se um regime misto está sendo adotado, então as condições de contorno devem ser informadas em todas as extremidades do sistema fluvial.

Para o regime de escoamento, os cálculos de perfis de um corte de seção começam com as condições iniciais assumidas ou conhecidas e prosseguem para a jusante com o regime subcrítico ou para a montante para o regime supercrítico. O regime (subcrítico, supercrítico ou misto) é especificada na janela de análises do regime de escoamento constante que aparece para o usuário do HEC-RAS.

6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS HIDRODINÂMICOS

6.1 ESPECIFICAÇÕES DA BACIA

6.1.1 DADOS GERAIS

O principal curso d'água da bacia do igarapé Tucunduba, tem extensão aproximada de 3.900 m, com 13 canais de drenagem afluentes com um total de 12 km de extensão, 5,70 km estão retificados e 6,30 km em leito natural.

Nessa bacia ocorreram duas obras de macrodrenagem. Na primeira, no trecho entre o Rio Guamá e a Rua São Domingos foi feita a e ampliação da calha do canal e revestimento do talude com cobertura natural, a fim de preservar a várzea do canal para comportar a entrada da maré e preservar a navegabilidade. A segunda, ocorreu no trecho entre a Rua São Domingos e Travessa Vileta, no qual houve o estreitamento da calha do canal e revestimento dos taludes em concreto com fundo natural.

Na tabela 6.1 temos as informações das características gerais da bacia.

TAB. 6.1 – Dados gerais da bacia do Tucunduba. (CODEM, 2013).

| DADOS DA BACIA | |
|------------------------------------|---------|
| Área de contribuição (ha) | 961,39 |
| Área de várzea (ha) | 575,00 |
| Igarapé Tucunduba (m) | 3.900 |
| Trecho do Tucunduba retificado (m) | 2.685 |
| Trecho do Tucunduba natural (m) | 1.215 |
| Canais Contribuintes (m) | |
| Caraparu (natural) | 920 |
| Vera Cruz (natural) | 990 |
| Mundurucus (natural/retificado) | 470/240 |

| | |
|---|---------|
| Gentil Bittencourt (retificado) | 1.480 |
| Cipriano Santos (retificado) | 1.150 |
| União (retificado) | 580 |
| Vileta (retificado) | 500 |
| José Leal Martins (retificado) | 820 |
| Timbó (retificado) | 270 |
| Angustura (retificado) | 385 |
| Condições de montante – Vileta | |
| Revestimento | Natural |
| NA normal (m) | 4,19 |
| Nível Borda Esquerda (m) | 5,45 |
| Nível Borda Direita (m) | 5,38 |
| Largura Média Boca (m) | 12,00 |
| Largura Média Fundo (m) | 10,00 |
| Profundidade média (m) | 0,89 |
| Condições de jusante – Rio Guamá | |
| Revestimento | Natural |
| NA normal (m) | 1,60 |
| Nível Borda Esquerda (m) | 0,00 |
| Nível Borda Direita (m) | 3.20 |
| Largura Média Boca (m) | 25,00 |
| Largura Média Fundo (m) | 20,00 |
| Profundidade média (m) | 3,30 |
| Dados de maré – Confluência | |
| Pico maré sizígia (m) maximorum | 3,36 |
| Pico maré de quadratura (m) mínima | -0,1 |

Foram consideradas as diferenças de rugosidade entre o fundo natural do canal, a superfície do canal feita de concreto e a região da planície de inundação na lateral do canal. Os coeficientes de Manning adotados para cada superfície foram retirados do Manual do Hec-Ras e estão apresentados na TAB. 6.2:

TAB. 6.2 – Áreas de rugosidade. (PESQUISA BIBLIOGRÁFICA, 2018).

| Tipo de área | Coefficiente de rugosidade (n) |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| Fundo do canal principal – natural | 0,04 |
| Paredes do canal principal-concreto | 0,025 |
| Planície de inundação urbana | 0,045 |

6.1.2 PLANIALTIMETRIA E GEOMETRIA DO CANAL

O programa será alimentado pelos dados geométricos do canal de Tucunduba. Para a determinação da geometria do canal, forneceu-se os dados do perfil transversal do canal que no caso em estudo trata-se de um perfil trapezoidal, o perfil longitudinal com os respectivos valores de nível das margens esquerda e direita e o nível de fundo do canal em cada uma das sessões analisadas ao longo do comprimento do canal de Tucunduba.

Na tabela 6.3, tem-se Perfil geométrico do canal Tucunduba, obtido do estaqueamento descrito na metodologia.

TAB. 6.3 – Perfil geométrico do canal Tucunduba. (PESQUISA BIBLIOGRÁFICA, 2018)

| Estacas (m) | | | | Perfil longitudinal (m) | | | Perfil transversal (m) | |
|-------------|---------------|-------|--------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----|
| Seções | Lado Esquerdo | Canal | Lado direito | Nível fundo | Nível margem direita | Nível margem esquerda | B | b |
| 0 | 0 | 0 | 0 | -1,76 | 3,4 | 3,2 | 30 | 20 |
| 1 | 50 | 50 | 50 | -1,66 | 3,42 | 3,22 | 30 | 20 |
| 2 | 50 | 50 | 50 | -1,656 | 3,43 | 3,24 | 30 | 20 |
| 3 | 100 | 100 | 100 | -1,553 | 3,47 | 3,29 | 30 | 20 |
| 4 | 100 | 100 | 100 | -1,449 | 3,5 | 3,33 | 30 | 20 |
| 5 | 100 | 100 | 100 | -1,346 | 3,53 | 3,38 | 30 | 20 |
| 6 | 100 | 100 | 100 | -1,242 | 3,57 | 3,42 | 30 | 20 |
| 7 | 100 | 100 | 100 | -1,239 | 3,6 | 3,47 | 30 | 20 |
| 8 | 100 | 100 | 100 | -1,035 | 3,64 | 3,51 | 30 | 20 |
| 9 | 100 | 100 | 100 | -0,932 | 3,67 | 3,56 | 30 | 20 |

| Estacas (m) | | | | Perfil longitudinal (m) | | | Perfil transversal (m) | |
|-------------|-----|-----|-----|-------------------------|-------|-------|------------------------|----|
| 10 | 100 | 100 | 100 | -0,828 | 3,7 | 3,6 | 30 | 20 |
| 11 | 100 | 100 | 100 | -0,725 | 3,74 | 3,65 | 30 | 20 |
| 12 | 100 | 100 | 100 | -0,621 | 3,77 | 3,69 | 30 | 20 |
| 13 | 100 | 100 | 100 | -0,518 | 3,8 | 3,74 | 30 | 20 |
| 14 | 100 | 100 | 100 | -0,414 | 3,84 | 3,78 | 30 | 20 |
| 15 | 100 | 100 | 100 | -0,311 | 3,87 | 3,83 | 30 | 20 |
| 16 | 100 | 100 | 100 | -0,207 | 3,91 | 3,87 | 30 | 20 |
| 17 | 100 | 100 | 100 | -0,104 | 3,94 | 3,92 | 30 | 20 |
| 18 | 100 | 100 | 100 | 0 | 3,97 | 3,96 | 30 | 20 |
| 19 | 100 | 100 | 100 | 0,083 | 4,006 | 4,006 | 30 | 20 |
| 20 | 100 | 100 | 100 | 0,167 | 4,012 | 4,012 | 30 | 20 |
| 21 | 100 | 100 | 100 | 0,257 | 4,018 | 4,018 | 30 | 20 |
| 22 | 100 | 100 | 100 | 0,351 | 4,024 | 4,024 | 30 | 20 |
| 23 | 100 | 100 | 100 | 0,445 | 4,03 | 4,03 | 30 | 20 |
| 24 | 100 | 100 | 100 | 0,539 | 4,036 | 4,036 | 30 | 20 |
| 25 | 100 | 100 | 100 | 0,633 | 4,042 | 4,042 | 30 | 20 |
| 26 | 100 | 100 | 100 | 0,728 | 4,048 | 4,048 | 30 | 20 |
| 27 | 100 | 100 | 100 | 0,824 | 4,054 | 4,054 | 30 | 20 |
| 28 | 100 | 100 | 100 | 0,92 | 4,06 | 4,06 | 30 | 20 |
| 29 | 100 | 100 | 100 | 1,016 | 4,066 | 4,066 | 30 | 20 |
| 30 | 100 | 100 | 100 | 1,111 | 4,072 | 4,072 | 30 | 20 |
| 31 | 100 | 100 | 100 | 1,207 | 4,078 | 4,078 | 30 | 20 |
| 32 | 100 | 100 | 100 | 1,302 | 4,084 | 4,084 | 30 | 20 |
| 33 | 100 | 100 | 100 | 1,397 | 4,09 | 4,09 | 30 | 20 |
| 34 | 100 | 100 | 100 | 1,493 | 4,096 | 4,096 | 30 | 20 |
| 35 | 100 | 100 | 100 | 1,588 | 4,102 | 4,102 | 30 | 20 |
| 36 | 100 | 100 | 100 | 1,684 | 4,108 | 4,108 | 30 | 20 |
| 37 | 100 | 100 | 100 | 1,76 | 4,114 | 4,114 | 30 | 20 |
| 38 | 100 | 100 | 100 | 1,76 | 4,112 | 4,112 | 30 | 20 |
| 39 | 100 | 100 | 100 | 1,76 | 4,126 | 4,126 | 6 | 3 |
| 40 | 100 | 100 | 100 | 1,76 | 4,13 | 4,13 | 6 | 3 |
| 41 | 40 | 40 | 40 | 2,3 | 3,8 | 3,8 | 6 | 3 |
| 42 | 40 | 40 | 40 | 1,8 | 3,9 | 3,9 | 6 | 3 |
| 43 | 40 | 40 | 40 | 1,72 | 4,05 | 4,05 | 6 | 3 |
| 44 | 40 | 40 | 40 | 2,75 | 4,55 | 4,55 | 6 | 3 |
| 45 | 40 | 40 | 40 | 2,7 | 4,5 | 4,5 | 6 | 3 |
| 46 | 40 | 40 | 40 | 3 | 4,85 | 4,85 | 6 | 3 |
| 47 | 40 | 40 | 40 | - | - | - | 6 | 3 |
| 48 | 40 | 40 | 40 | 3,19 | 4,3 | 4,3 | 6 | 3 |
| 49 | 40 | 40 | 40 | 3,18 | 4,65 | 4,65 | 6 | 3 |
| 50 | 40 | 40 | 40 | 3,195 | 4,87 | 4,87 | 6 | 3 |
| 51 | 40 | 40 | 40 | 3,2 | 4,87 | 4,87 | 6 | 3 |

| Estacas (m) | | | | Perfil longitudinal (m) | | | Perfil transversal (m) | |
|-------------|----|----|----|-------------------------|------|------|------------------------|---|
| 52 | 40 | 40 | 40 | 3,22 | 4,65 | 4,65 | 6 | 3 |
| 53 | 40 | 40 | 40 | 3,65 | 4,9 | 4,9 | 6 | 3 |

Nas FIG. 6.1 e 6.2 tem-se as representa uma seção transversal da região de maior e menor área, respectivamente, do canal.

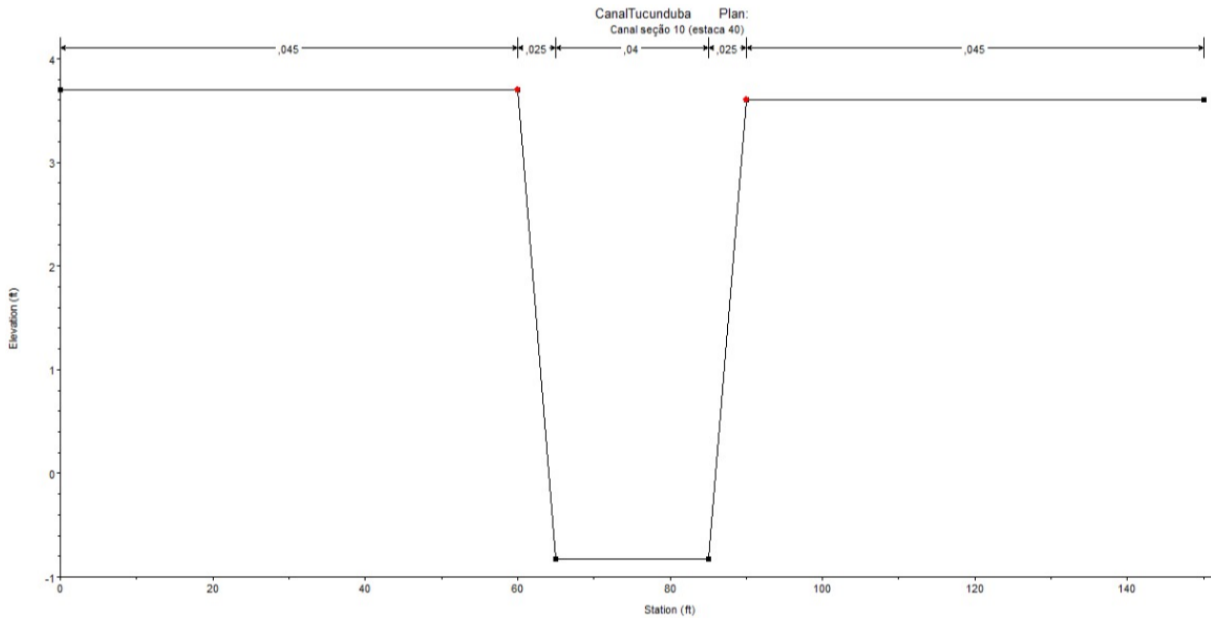


FIG. 6.1 – Seção transversal da seção 10. (Autor, arquivo HEC-RAS, 2018).

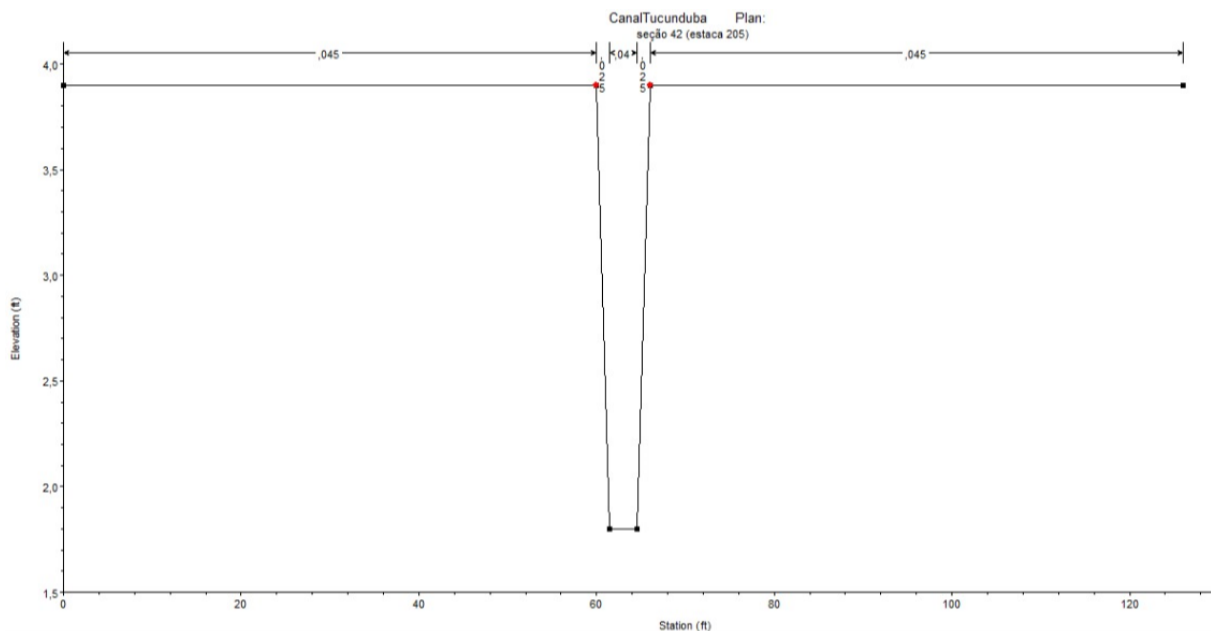


FIG. 6.2 – Seção transversal da seção 42. (Autor, arquivo HEC-RAS, 2018).

Nas Figuras 6.3 tem-se o esquema estaqueamento das seções Tucunduba e União.

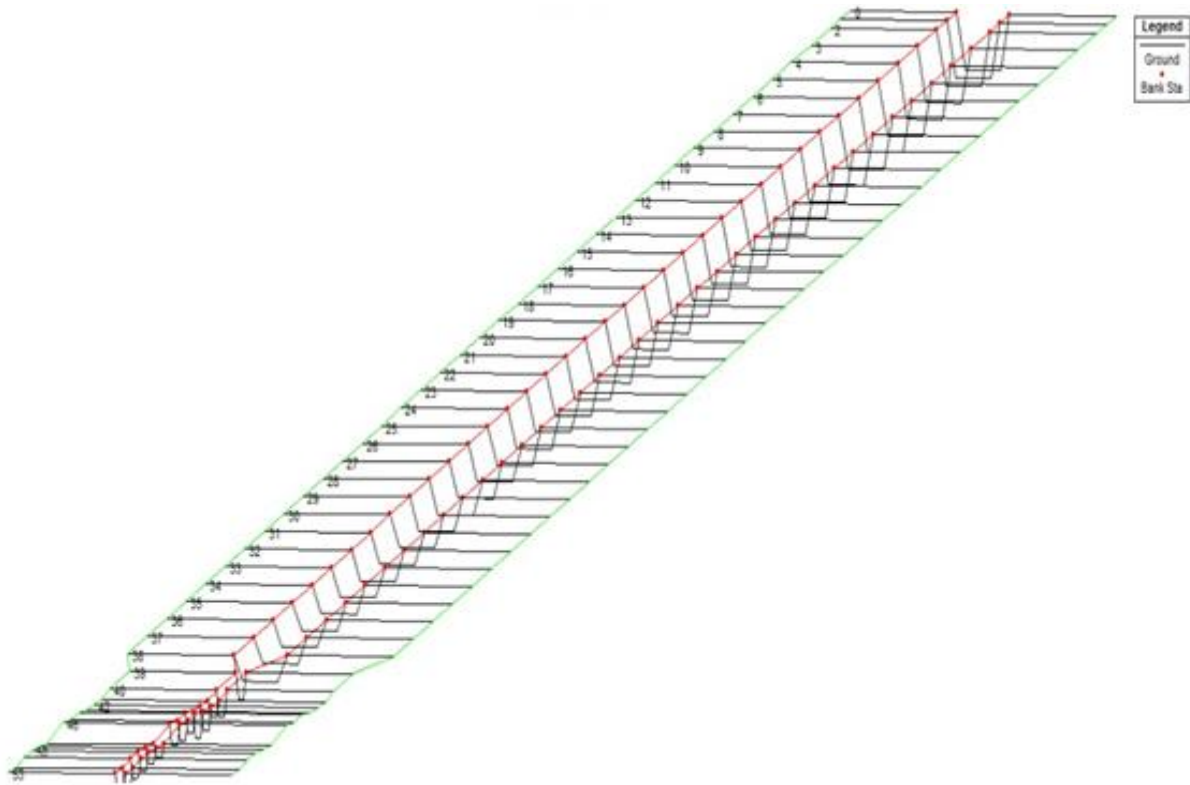


FIG. 6.3 – Esquema estaqueamento das seções. (Autor, arquivo HEC-RAS, 2018).

A FIG. 6.4 apresenta o perfil longitudinal do canal Tucunduba e união, com projeção das seções numeradas em toda extensão do canal.

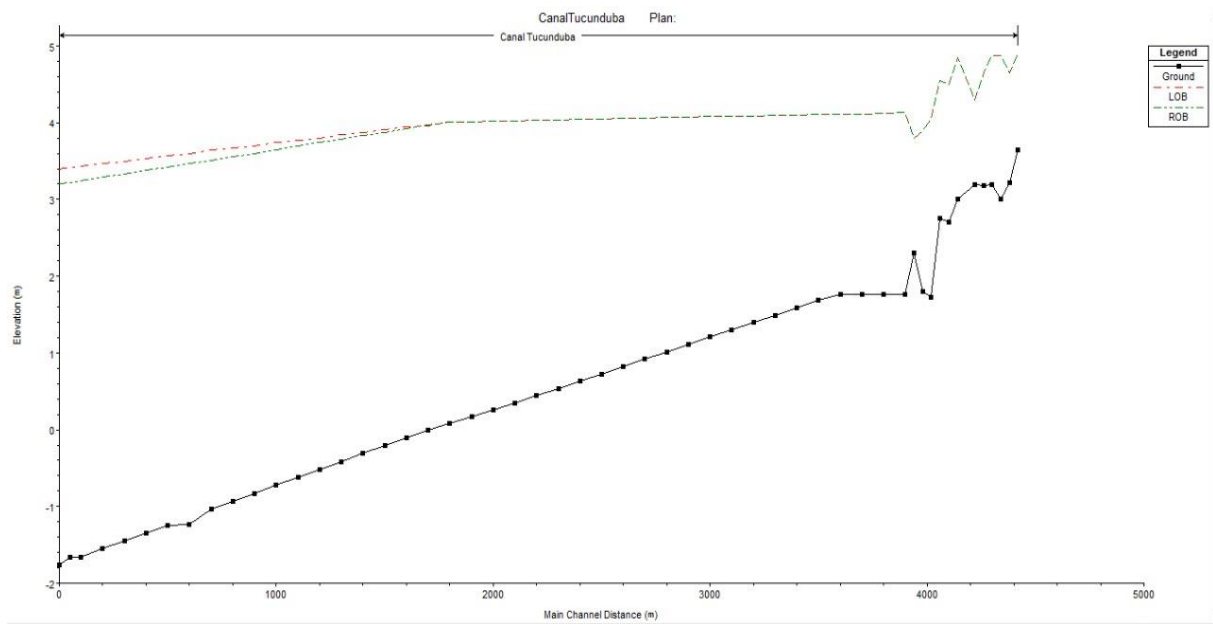


FIG. 6.4 – Perfil Longitudinal. (Autor, arquivo HEC-RAS, 2018).

Na planialtimetria, utilizou-se a divisão da bacia do Tucunduba em vinte sub-bacias. Conforme a FIG. 6.5.

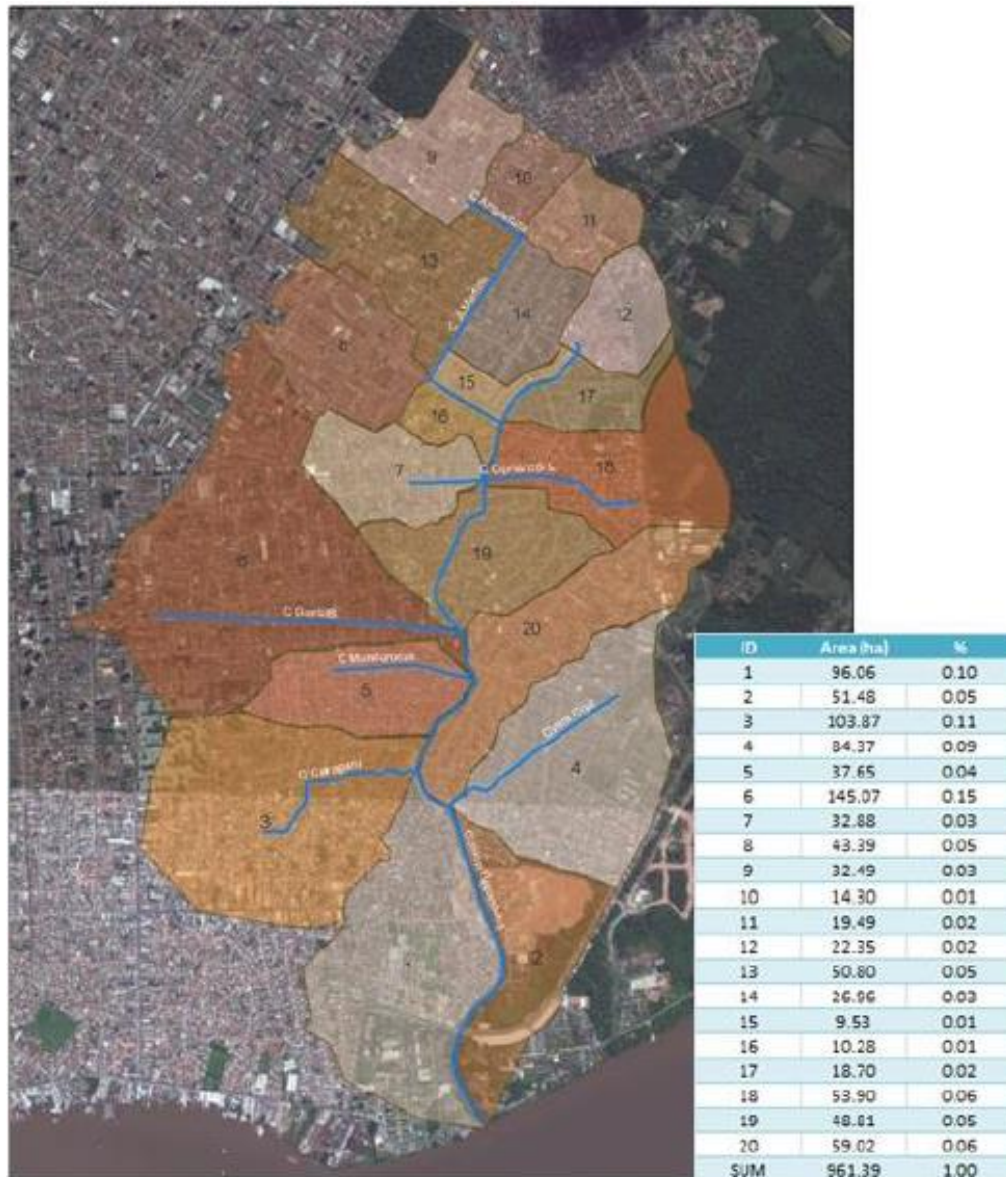


FIG. 6.5 – Sub-bacia do Tucunduba. (LEME ENGENHARIA, 2011, apud MARTINS, 2015).

6.1.3 PRECIPITAÇÃO

Do projeto de macrodrenagem da bacia do Tucunduba da LEME (2011) obteve-se os hietogramas. Neste, foram consideradas precipitações diárias para Mosqueiro e Belém, além de precipitação por hora para Belém (de janeiro 2003 a julho 2012). O tempo adotado para duração das tormentas foi de 12 horas.

Os hietogramas foram baseados na relação Intensidade-Duração-Frequência - IDF da Prefeitura Municipal de Belém. Na qual, para cada duração são selecionadas as precipitações máximas anuais nos dados do pluviografo, em seguida, para cada série de valor máximos ajusta-se uma distribuição teórica de probabilidade.

Dessa forma, obteve-se a EQ 6.1:

$$i = \frac{2300.TR^{0,20}}{(t+20)^{0,91}} \quad (\text{EQ. 6.1})$$

Em que, i é a intensidade da precipitação em mm/h, TR o período de retorno em anos e t a duração em minutos.

A relação IDF foi aplicada a durações e períodos de retorno diferentes e produziu intensidades das precipitações pluviométricas, conforme a TAB. 6.4.

TAB. 6.4 – Resultados da relação IDF, em mm/h (LEME ENGENHARIA, 2011 apud MARTINS, 2015)

| Duração (minutos) | Período de retorno 10 anos | Período de retorno 25 anos | Período de retorno 50 anos |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 20 | 8,9 | 10,7 | 12,3 |
| 600 | 10,5 | 12,6 | 14,5 |
| 540 | 11,5 | 13,8 | 15,9 |
| 480 | 12,8 | 15,3 | 17,6 |
| 420 | 14,3 | 17,2 | 19,8 |
| 360 | 16,4 | 19,7 | 22,6 |
| 300 | 19,1 | 23 | 26,4 |
| 240 | 23,1 | 27,8 | 31,9 |
| 180 | 29,4 | 35,3 | 40,5 |
| 120 | 40,6 | 48,8 | 56 |
| 60 | 67,6 | 81,2 | 93,3 |

Nas FIG. 6.6, 6.7 e 6.8, temos os hietogramas para os TR's 10, 25 e 50 anos, respectivamente.

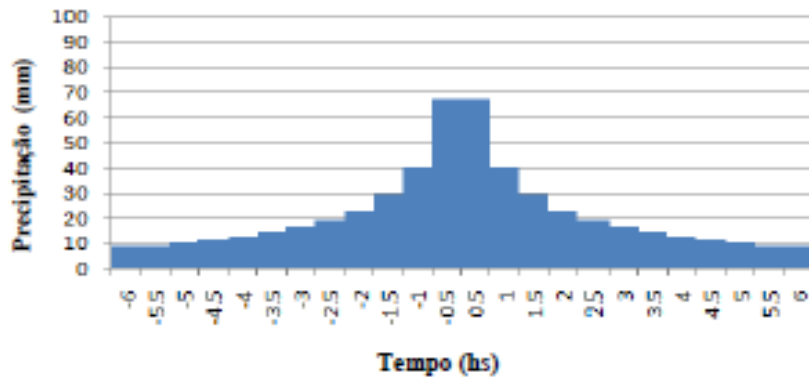


FIG. 6.6 – Hietograma de Precipitação de TR de 10 anos. (LEME ENGENHARIA, 2011 apud MARTINS, 2015).

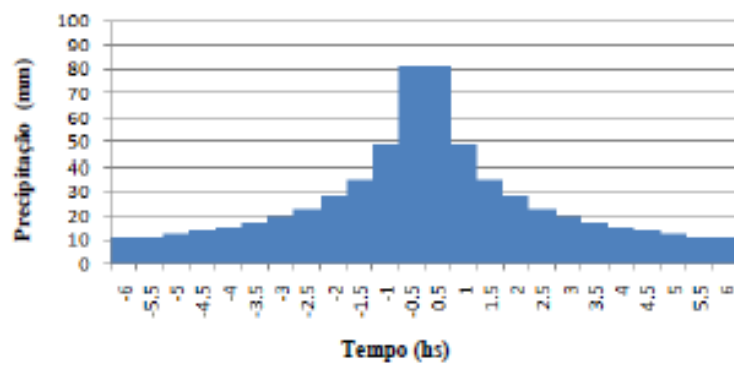


FIG. 6.7 – Hietograma de Precipitação de TR de 25 anos. (LEME ENGENHARIA, 2011 apud MARTINS, 2015).

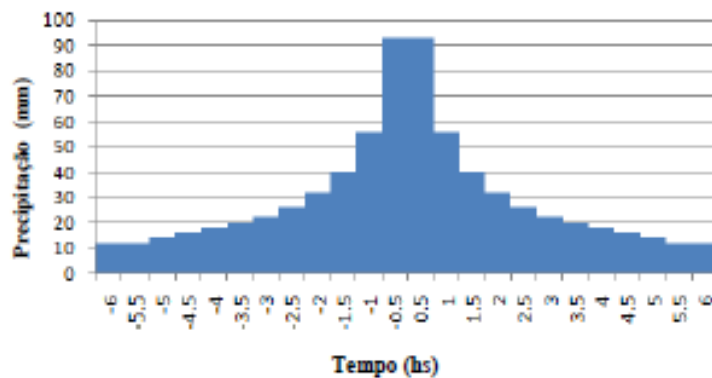


FIG. 6.8 – Hietograma de Precipitação de TR de 25 anos. (LEME ENGENHARIA, 2011 apud MARTINS, 2015).

Os dados desses hietogramas foram utilizados como dados de entrada no software IPHS1, que aplicou o modelo chuva-vazão Hidrograma triangular do SCS por MARTINS (2015).

O hidrograma triangular proposto pelo SCS é considerado um triângulo, onde a área do triângulo é o volume precipitado e os elementos que o compõe são basicamente a vazão de pico e o tempo de pico, que estão representados na FIG.6.9.

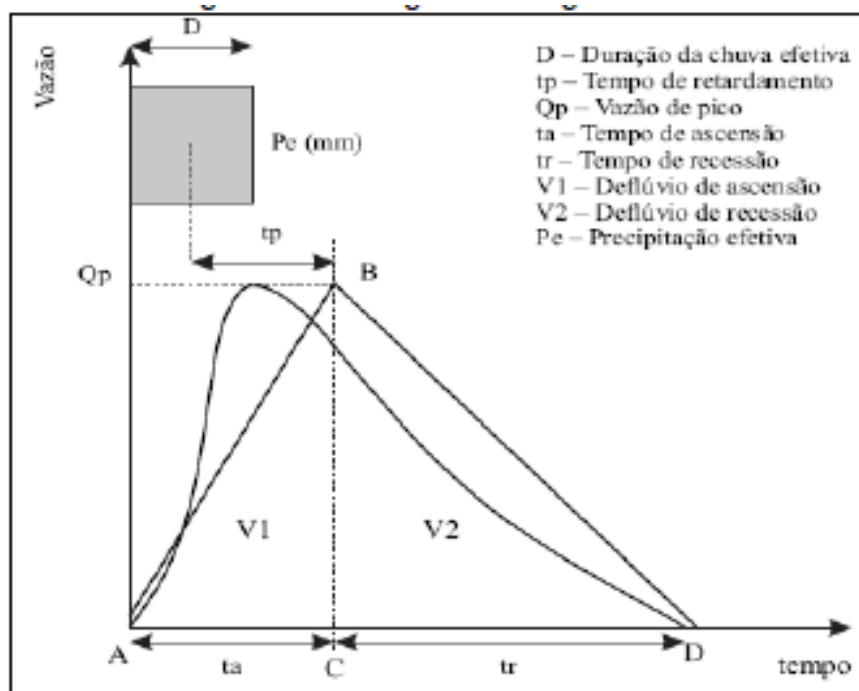


FIG. 6.9 – Hidrograma triangular SCS. (MELLO ET AL., 2007).

Nesse programa, foi inserida a precipitação acumulada, conforme a TAB. 6.5.

TAB. 6.5 – Precipitação Acumulada (MARTINS, 2015)

| Duração (h) | Precipitação Acumulada (mm) | | |
|-------------|-----------------------------|-------|-------|
| | TR 10 | TR25 | TR 50 |
| 1 | 37 | 44 | 52 |
| 2 | 70 | 84 | 98 |
| 3 | 97 | 119 | 137 |
| 4 | 117 | 144 | 166 |
| 5 | 134 | 164 | 191 |
| 6 | 147 | 181 | 210 |
| 7 | 157 | 193 | 223 |
| 8 | 163 | 200 | 231 |
| 9 | 167 | 205,5 | 237,5 |
| 10 | 170 | 209,5 | 242,5 |
| 11 | 172 | 212,5 | 246,5 |
| 12 | 173 | 214,5 | 249,5 |

Dessa forma, obteve-se na saída do programa os hidrogramas com vazões geradas para chuvas com TR's 10, 25 e 50 anos. Representados pelas FIG. 6.10, 6.11 e 6.12.

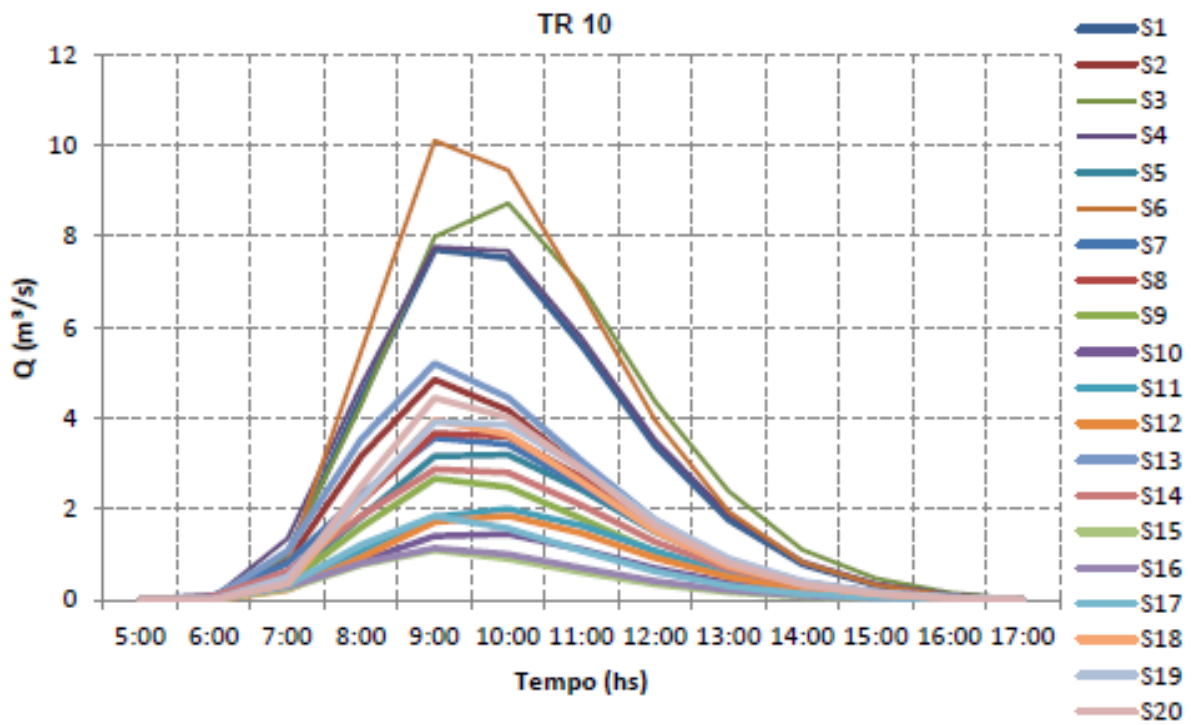


FIG. 6.10 – Hidrograma TR de 10 anos. (MARTINS, 2015).

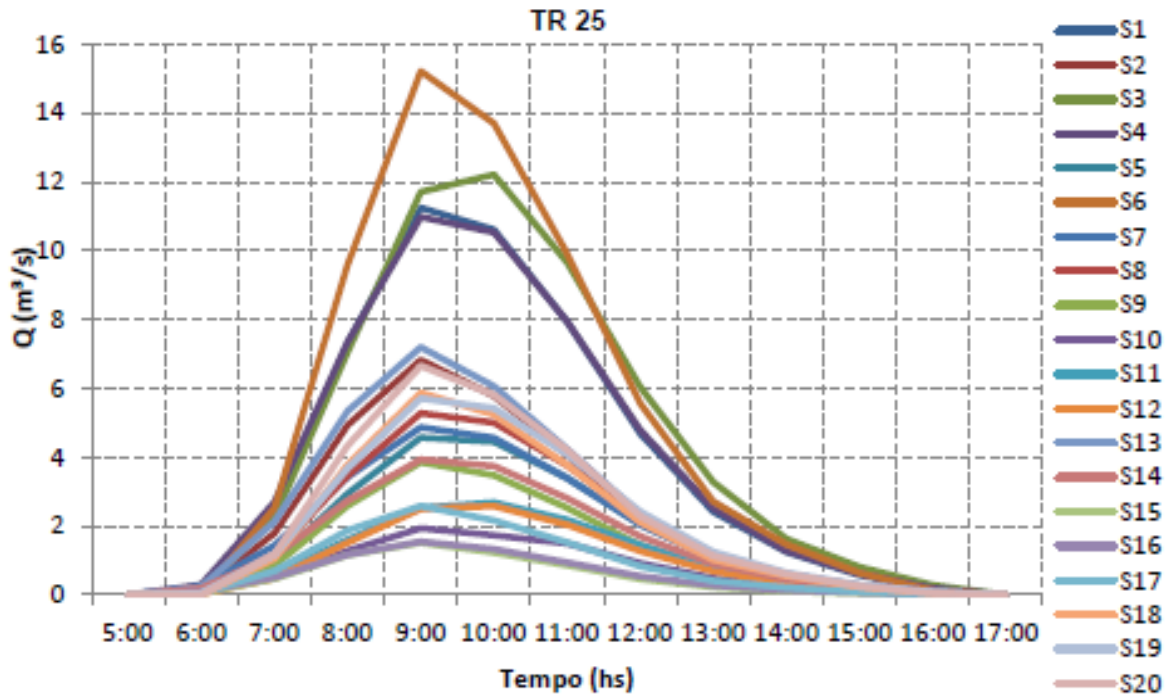


FIG. 6.11 – Hidrograma TR de 25 anos. (MARTINS, 2015).

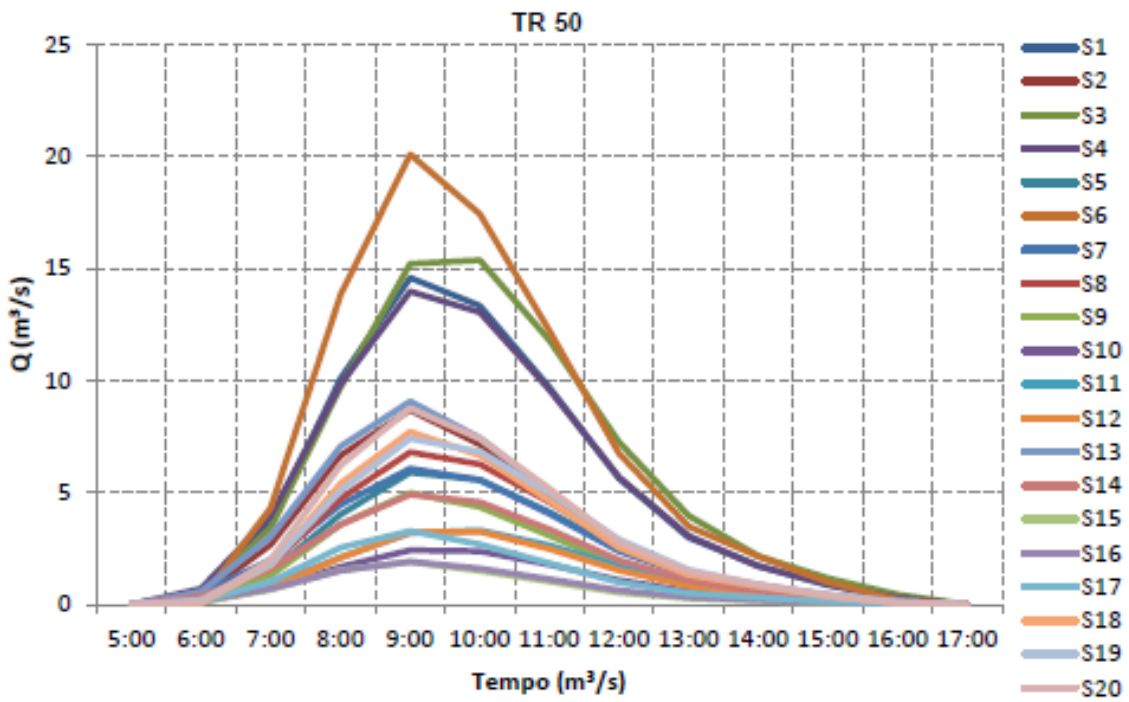


FIG. 6.12 – Hidrograma TR de 50 anos. (MARTINS, 2015).

Os valores das vazões de picos dos hidrogramas são apresentados na TAB. 6.6.

TAB.A 6.6 – Valores de Picos dos Hidrogramas (MARTINS, 2015)

| Sub-Bacia | T10 | T25 | T50 |
|-----------|------|-------|-------|
| 1 | 7,71 | 11,25 | 15,58 |
| 2 | 4,84 | 6,83 | 8,69 |
| 3 | 8,72 | 12,21 | 15,36 |
| 4 | 7,77 | 10,98 | 13,97 |
| 5 | 3,19 | 4,57 | 5,9 |
| 6 | 10,1 | 15,22 | 20,08 |
| 7 | 3,56 | 4,87 | 6,07 |
| 8 | 3,67 | 3,47 | 6,79 |
| 9 | 2,67 | 3,86 | 4,98 |
| 10 | 1,45 | 1,94 | 2,43 |
| 11 | 1,82 | 2,69 | 3,2 |
| 12 | 1,85 | 2,59 | 3,25 |
| 13 | 5,2 | 7,2 | 9,06 |
| 14 | 2,87 | 3,94 | 4,91 |
| 15 | 1,09 | 1,52 | 1,91 |
| 16 | 1,14 | 1,55 | 1,92 |
| 17 | 1,84 | 2,59 | 3,29 |
| 18 | 3,95 | 5,88 | 7,71 |
| 19 | 3,91 | 5,71 | 7,4 |
| 20 | 4,44 | 6,66 | 8,75 |

Dessa forma, observa-se que as vazões máximas ocorrem na sub-bacia 6, medindo 10,1 m³/s; 15,22 m³/s e 20,08 m³/s, para os respectivos tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos. Essas vazões máximas serão utilizadas como dados de entrada, no software HEC-RAS, para todas as sub-bacia, para ser analisada situação mais crítica do canal.

6.1.4 MARÉ

Segundo dados da MARINHA DO BRASIL, tem-se na FIG. 6.13 a representação das previsões dos níveis de maré alta e baixa no porto de Belém, no período de 2005 a 2012.

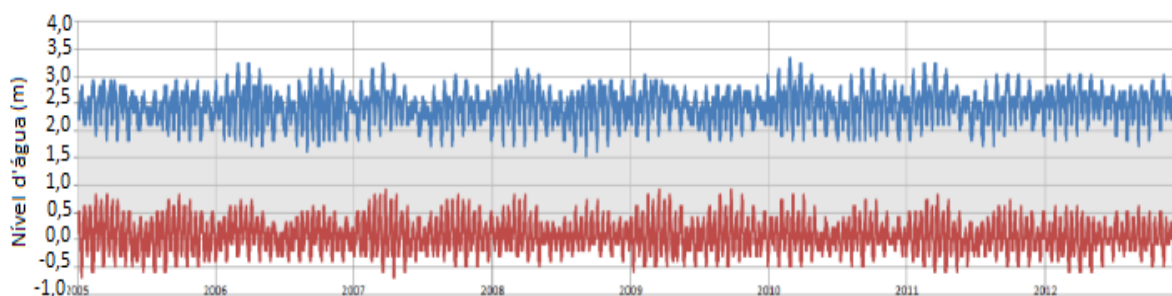


FIG. 6.13 – Níveis d'água no Porto de Belém (MARINHA DO BRASIL, 2013 apud MARTINS, 2015).

Os dados da FIG.6.12 foram postos na TAB. 6.7.

TAB. 6.7 – Marés máximas baixas e altas para os anos 2005 a 2012 (Autor, 2018)

| Ano | Maré alta máxima (m) | Maré baixa mínima (m) |
|------|----------------------|-----------------------|
| 2005 | 3.00 | -0.60 |
| 2006 | 3.20 | -0.60 |
| 2007 | 3.40 | -0.50 |
| 2008 | 3.00 | -0.60 |
| 2009 | 3.10 | -0.50 |
| 2010 | 3.20 | -0.90 |
| 2011 | 3.20 | -0.40 |
| 2012 | 2.90 | -0.70 |

Pode-se concluir, que as marés máximas baixas e altas com o passar do tempo não variam significativamente, pois a máxima variação foi de 40 cm e 30 cm para a alta e a baixa, respectivamente. Então, pode-se utilizar os dados históricos de maré com um nível de segurança admissível.

Os níveis da maré coletados pelo CODEM em 2014 estão representados na TAB. 6.8; Tais dados foram utilizados para a construção do gráfico de influência da Maré a jusante do Canal.

TAB. 6.8 – Variação de Marés baixas e altas para (CODEM, 2013)

| Tempo (h) | Maré Alta (m) | Maré Baixa (m) |
|-----------|---------------|----------------|
| 04:00 | 0.28 | 1.715 |
| 05:00 | 0.19 | 1.87 |
| 06:00 | 0.07 | 1.895 |
| 07:00 | -0.05 | 1.92 |
| 08:00 | -0.1 | 1.785 |
| 09:00 | -0.215 | 1.65 |
| 10:00 | -0.28 | 1.385 |
| 11:00 | 1.255 | 1.12 |
| 12:00 | 2.79 | 0.86 |
| 13:00 | 3.03 | 0.6 |
| 14:00 | 3.27 | 0.41 |
| 15:00 | 3.315 | 0.22 |
| 16:00 | 3.36 | 0.11 |
| 17:00 | 3.185 | 0 |
| 18:00 | 3.01 | -0.05 |
| 19:00 | 2.65 | -0.1 |
| 20:00 | 2.29 | -0.1 |
| 21:00 | 1.815 | -0.1 |
| 22:00 | 1.34 | -0.05 |
| 23:00 | 1.045 | 0 |
| 00:00 | 0.75 | 0.31 |
| 01:00 | 0.55 | 0.62 |
| 02:00 | 0.35 | 0.95 |
| 03:00 | 0.245 | 1.28 |
| 04:00 | 0.14 | 1.49 |

Na FIG.6.14, temos a série cronológica histórica de níveis d'água no decorrer de 48h, fornecida pela Marinha do Brasil.

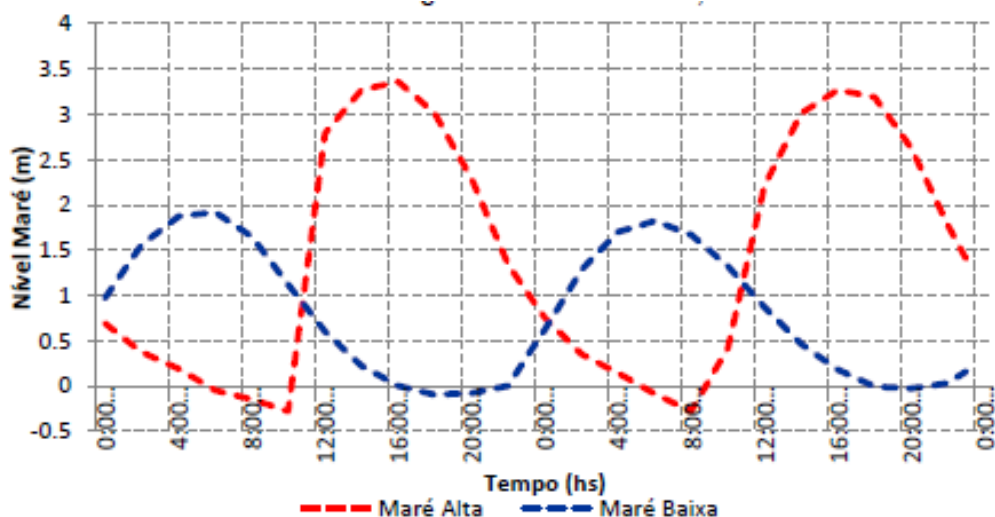


FIG. 6.14 – Níveis d'água no Porto de Belém durante 48h (MARINHA DO BRASIL, 2013 apud MARTINS, 2015).

Dessa forma, pelos dados da tabela anterior, o maior nível d'água adotado para o cenário de maré alta das seguintes simulações foi 3,4m e ocorre próximos às 16:00 na maré alta, o menor nível d'água de maré baixa é de -0,25m e ocorre próximos às 8:00. Assim, a maré média adotada foi calculada pela média aritmética entre os valores de máximo e mínimo da maré e encontrou-se 1,575m.

6.2 MODELAGEM HIDRAULICA

Para os resultados obtidos utilizou-se os dados apresentados anteriormente sob a geometria do canal Tuncunduba. Tais resultados foram divididos conforme os cenários I, II e III já citados.

Além disso, o regime considerado é o subcrítico. Desta forma, pelo tamanho pequeno das seções e o regime subcrítico, segundo o manual do Hec Ras os coeficientes de expansão e contração são respectivamente 0,3 e 0,1. Dados que foram utilizados na simulação dos cenários.

6.2.1 RESULTADOS CENÁRIO I - TEMPO DE RETORNOS

Para o cenário I analisou-se a vazão máxima dos Tempo de Retorno (TR) de 10 anos, 25 anos e 50 anos da região sob o canal de Tucunduba. Nessa simulação foram consideradas as vazões máximas da sub bacia 6 que são 10,1 m³/s; 15,22 m³/s e 20,08 m³/s respectivamente para os TRs de 10 anos, 25anos e 50 anos. O regime considerado foi o regime subcrítico devido a velocidade lenta no canal.

A seguir, ilustramos na FIG. 6.15 o perfil do canal sob a vazão máxima do TR de 10 anos. Como se pode ser analisado pela figura este quadro já apresenta algumas áreas de inundação presente na área mais estreita do canal.

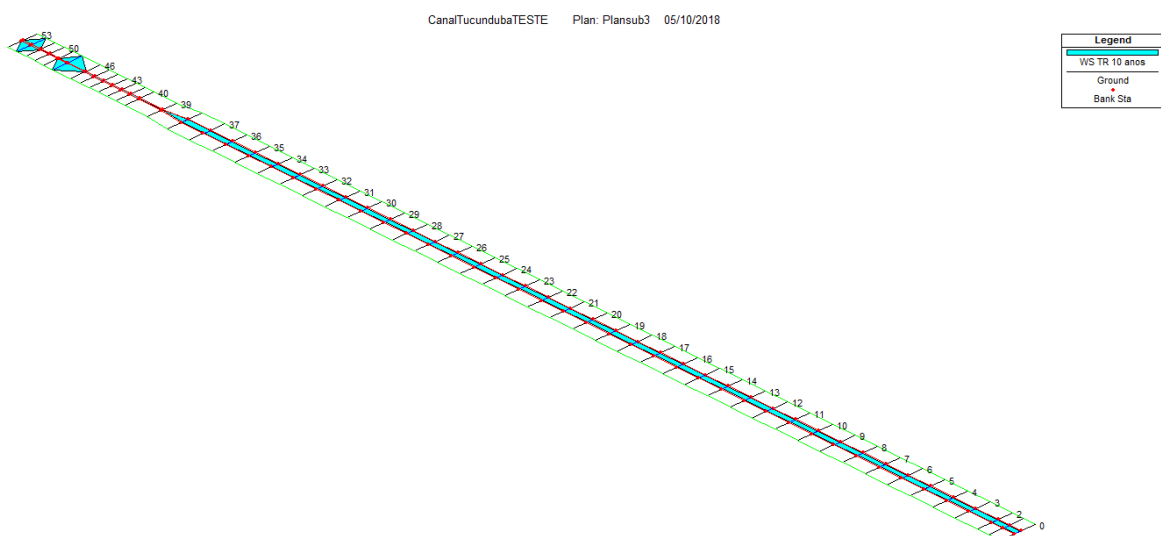


FIG. 6.15 – Perfil do canal com vazão máxima do TR de 10 anos. (Autor, arquivo HEC-RAS, 2018).

No mesmo tipo de imagem produzido para os TRs de 25 anos e de 50 anos pode-se analisar visualmente um aumento das áreas de inundação. Como representado a seguir pelas Fig. 6.16 e 6.17:

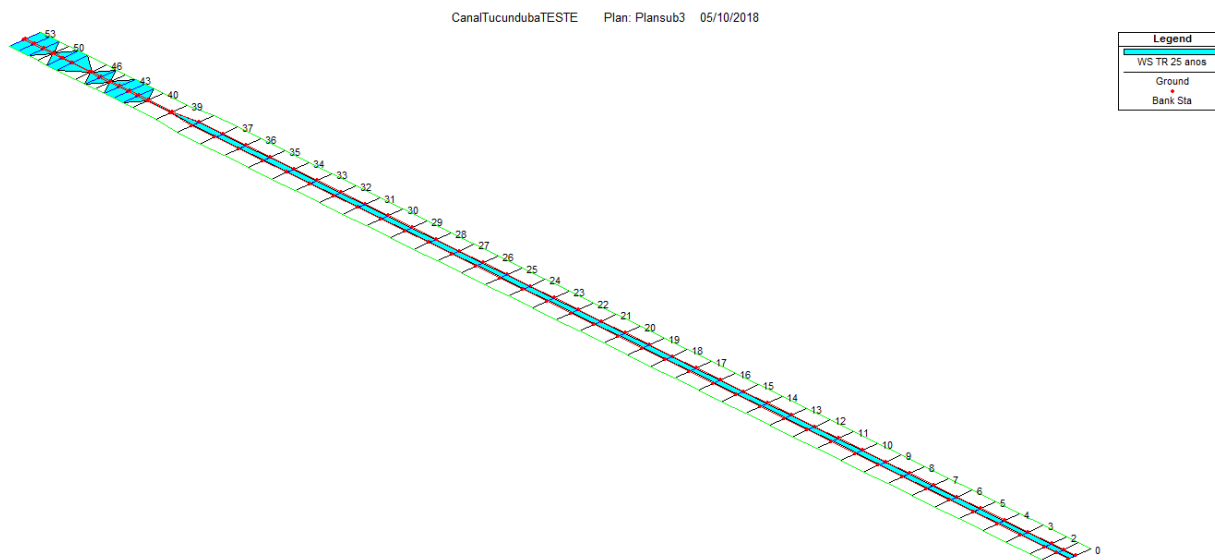


FIG. 6.16 – Perfil do canal com vazão máxima de TR 25 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

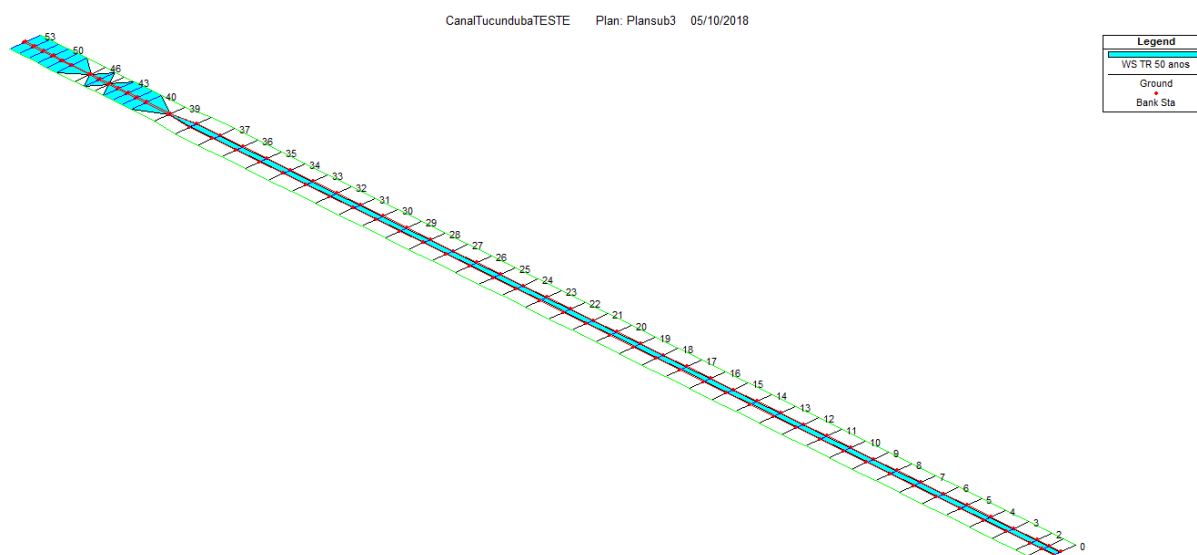


FIG. 6.17 – Perfil do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

A seção 42 foi tomada como exemplificação da inundação que ocorre quando se compara o TR de 10 anos com o TR de 50 anos, como ilustrado na FIG. 6.4 e FIG. 6.5:

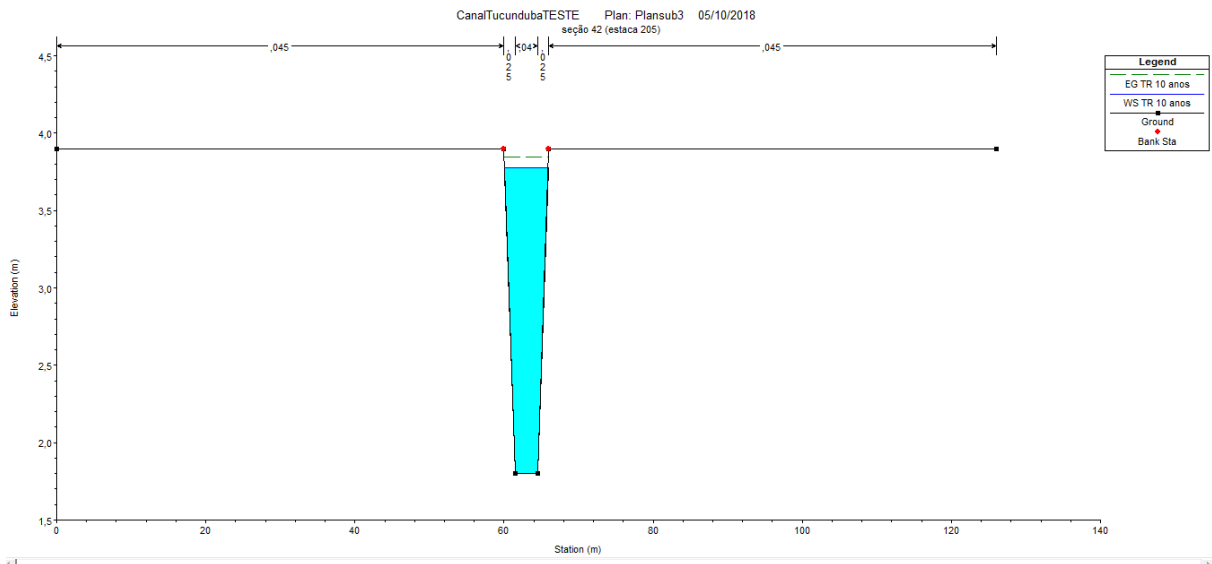


FIG. 6.18– Perfil da seção 42 do canal com vazão máxima de TR 10 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

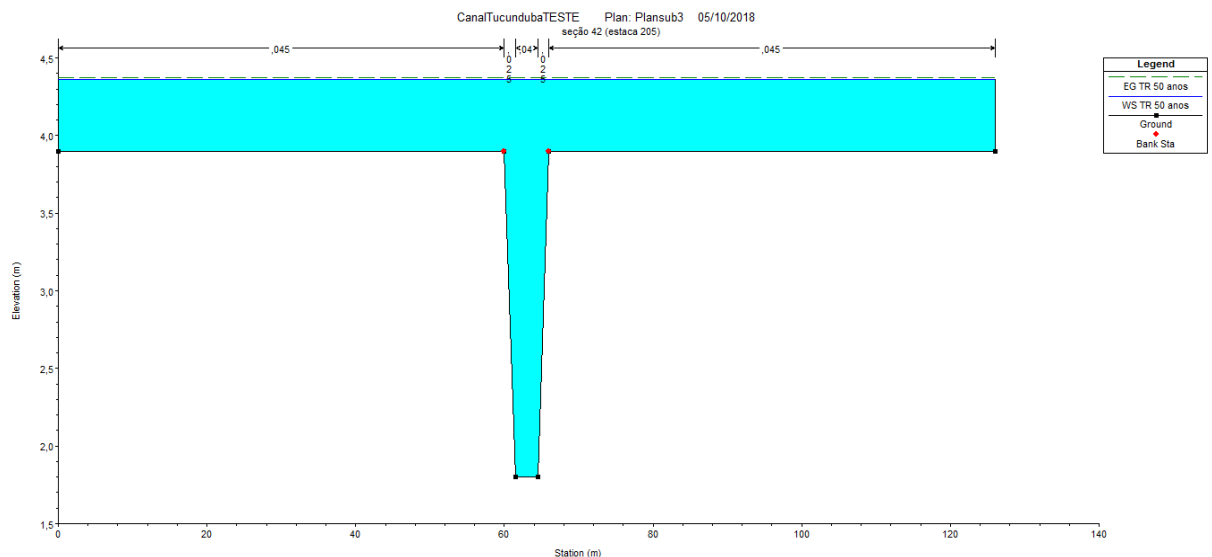


FIG. 6.19 – Perfil da seção 42 do canal com vazão máxima de TR 50 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

A comparação entre os resultados dos TR's de 10, 25 e 50 anos em níveis da superfície de água foram explicitados na FIG.6.6 num corte de perfil longitudinal do canal Tucunduba. Neste corte pode-se verificar a linha do nível de água em cada um dos TR's e o nível da margem do canal.

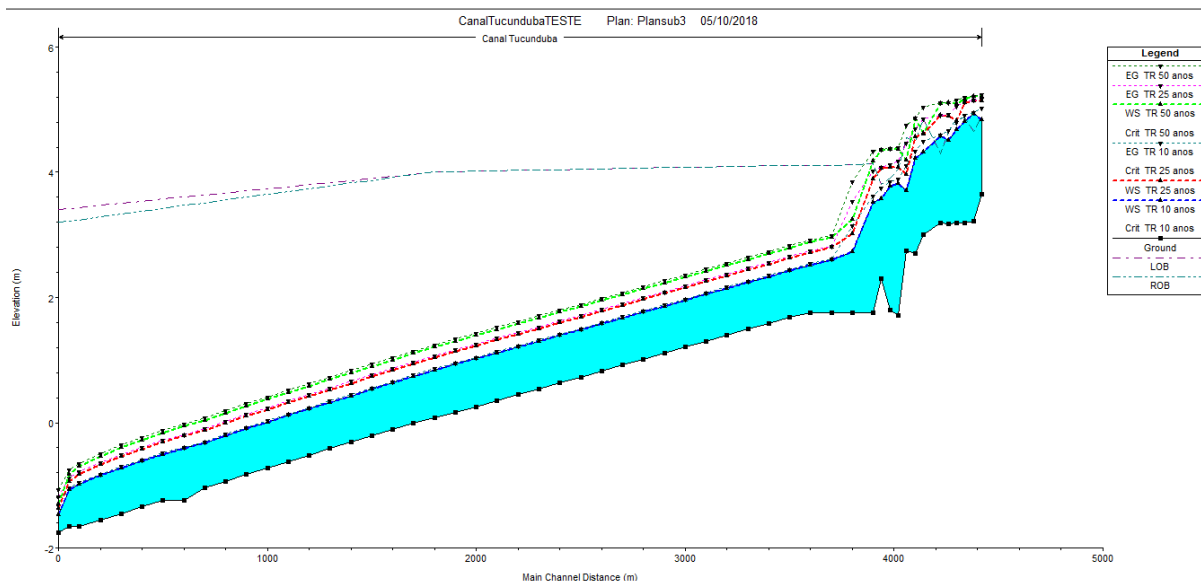


FIG. 6.20 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos, TR de 15 anos e TR de 50 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

Para uma melhor análise adotou-se uma metodologia de comparação do volume de transbordamento de água em cada uma das seções. O cálculo foi feito com o auxílio dos resultados da simulação do software HEC-RAS que reproduz na saída de dados de cada seção um volume acumulativo de transbordamento.

As seções mais críticas e passíveis de transbordamento aparecem na tabela abaixo, se não houve transbordamento nessa seção a palavra NÃO estará presente ao invés do volume. E nas seções onde houve o transbordamento de água colocou-se o volume de água correspondente em m^3 . Desta forma, estimou-se o volume de transbordamento nas seções e calculou-se o volume de inundação total em m^3 mostrados na tabela a seguir:

TAB. 6.9 - Volume de inundações das seções e volumes totais nos TR's de 10,25 e 50 anos.

| CENÁRIO I | | | |
|--|------------|------------|------------|
| Seções | TR 10 ANOS | TR 25 ANOS | TR 50 ANOS |
| 40 | NÃO | NÃO | 280 |
| 41 | NÃO | 620 | 1460 |
| 42 | NÃO | 1060 | 2460 |
| 43 | NÃO | 500 | 1860 |
| 44 | NÃO | NÃO | NÃO |
| 45 | NÃO | 200 | 1600 |
| 46 | NÃO | NÃO | NÃO |
| 48 | 1340 | 2900 | 4700 |
| 49 | NÃO | 2040 | 3000 |
| 50 | 2060 | NÃO | 1640 |
| 51 | NÃO | 1180 | 1300 |
| 52 | NÃO | 1740 | 2060 |
| 53 | NÃO | 1760 | 2100 |
| VOLUME DE INUDAÇÃO TOTAL (m ³) | 3400 | 12000 | 22460 |

6.2.2 RESULTADOS CENÁRIO II - TEMPO DE RETORNOS + MARÉ MÉDIA

O cenário II foi considerado as vazões máximas dos TR's de 10, 25 e 50 anos sob a condição à jusante de Maré média que para este caso foi adotado o valor de 1,575m. Tal valor foi obtido pela média aritmética entre a maré baixa mínima de 0,25 m e a maré alta de 3,4 m considerada neste trabalho.

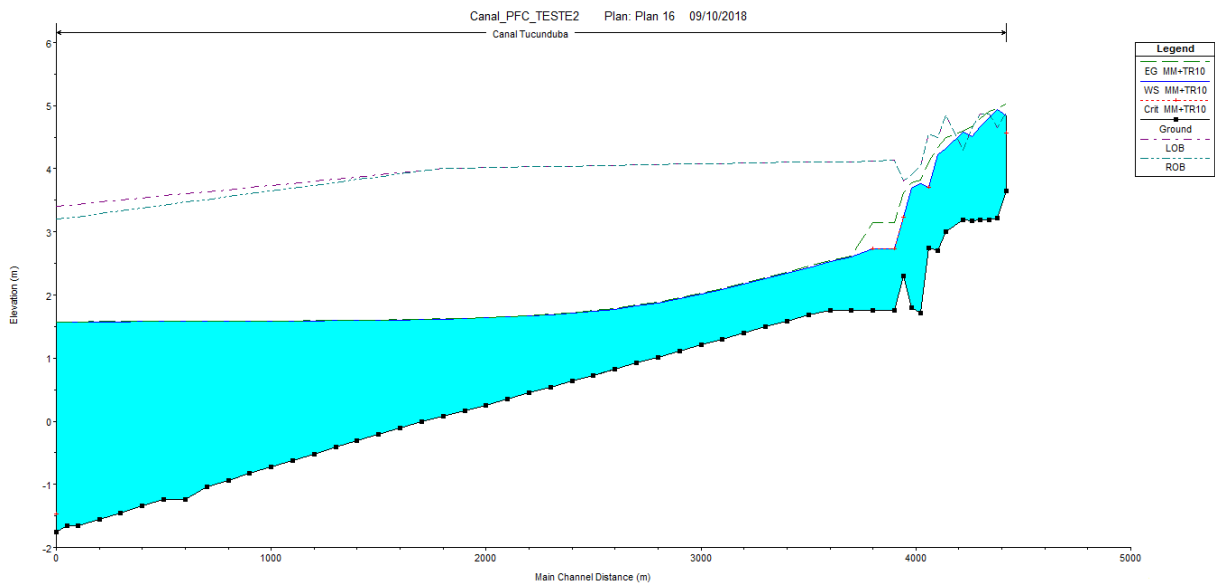


FIG. 6.21 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

Como pode-se observar na FIG. 6.21, dada acima, a maré média tem uma influência considerável sobre o canal impedindo que o fluxo da água percorra naturalmente sobre a declividade dele, provocando assim uma área de remanso de médio nível de água em relação as margens do canal na região mais próxima à jusante.

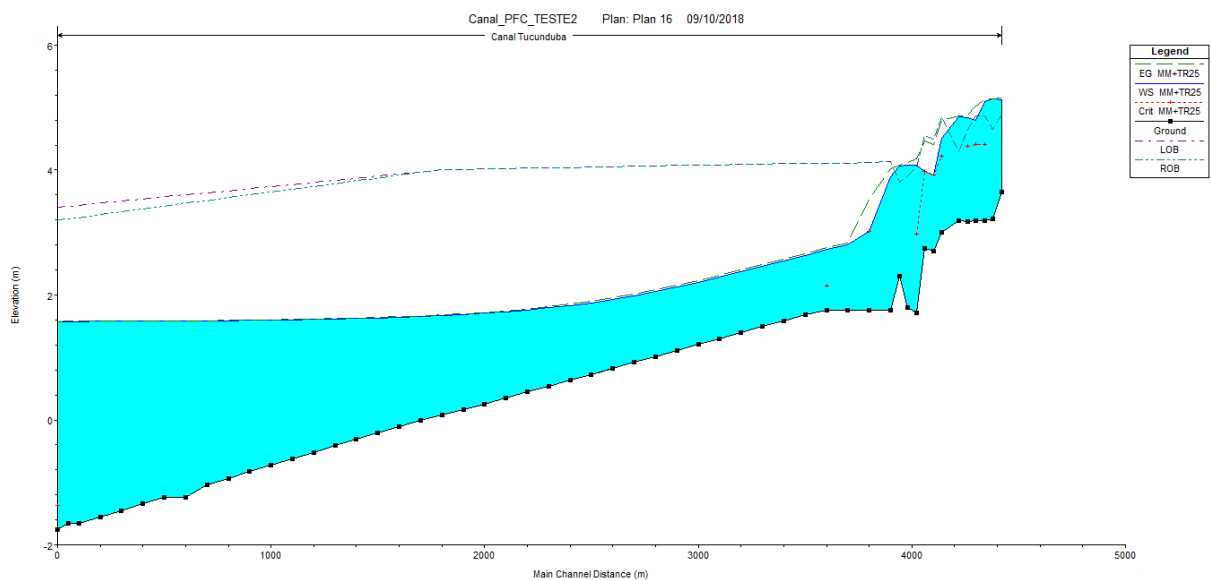


FIG. 6.22 – Perfil de profundidades ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

Os efeitos de remanso na jusante do canal persistem sobre o cenário II sob vazão de TR 25 anos, ocorrendo assim leves alterações em relação ao cenário II e TR de 10 anos, como o aumento do nível de água nas seções e formação de uma leve curva do nível de água entre os pontos 2400m e 3600m da extensão do canal. Tal curva é justificada pela resistência da "parede de água" formada pela maré média ao fluxo do TR 25 anos.

Para o cenário II e TR de 50 anos, ocorre um assentamento da curva de água que é justificado pelo aumento da vazão máxima entre os cenários maré média + TR 25 anos e maré média + TR 50 anos, onde o fluxo da montante à jusante ganha força em relação a maré média, resultando assim num agitação do remanso anteriormente formado a jusante.

Nas FIG. 6.23, 6.24 e 6.25 pode-se observar a evolução das áreas de transbordamento de água no decorrer em que se aumenta a vazão a montante do canal devido aos TR's de 10, 25 e 50 anos respectivamente.

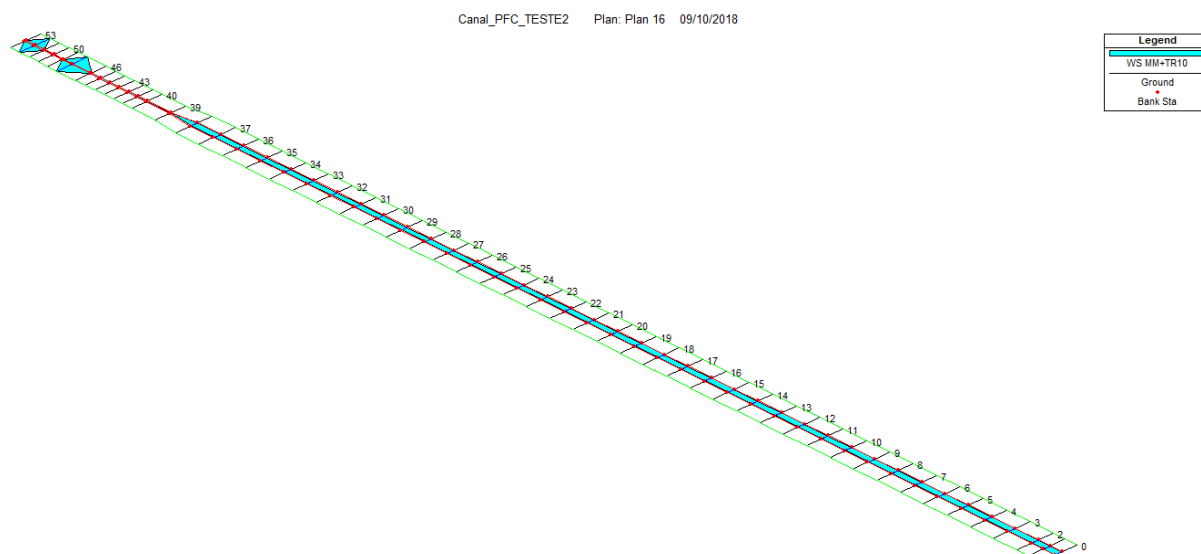


FIG. 6.23 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

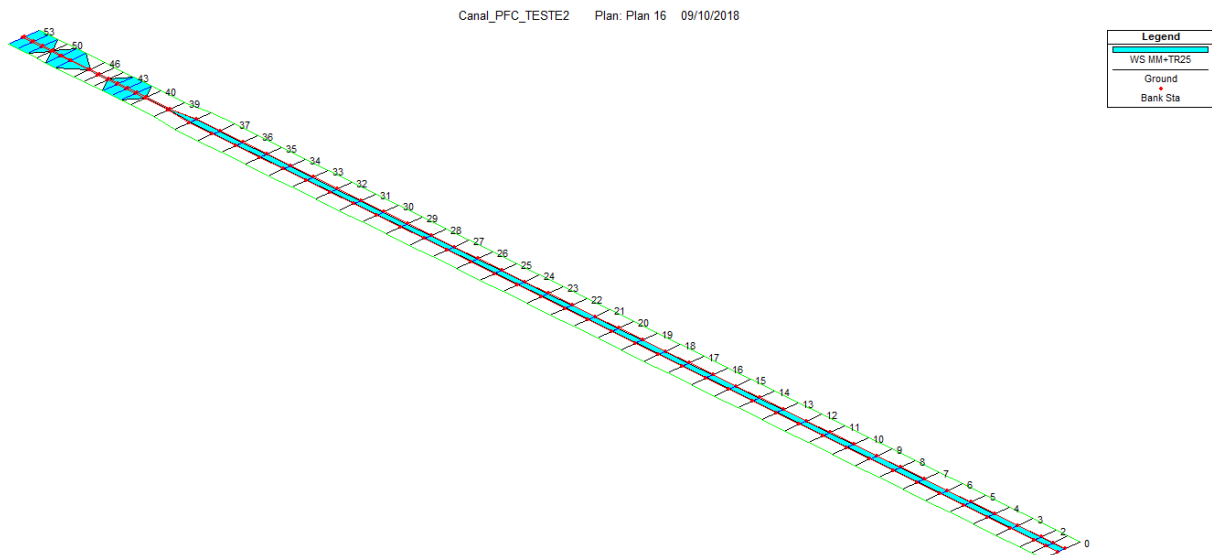


FIG. 6.24 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

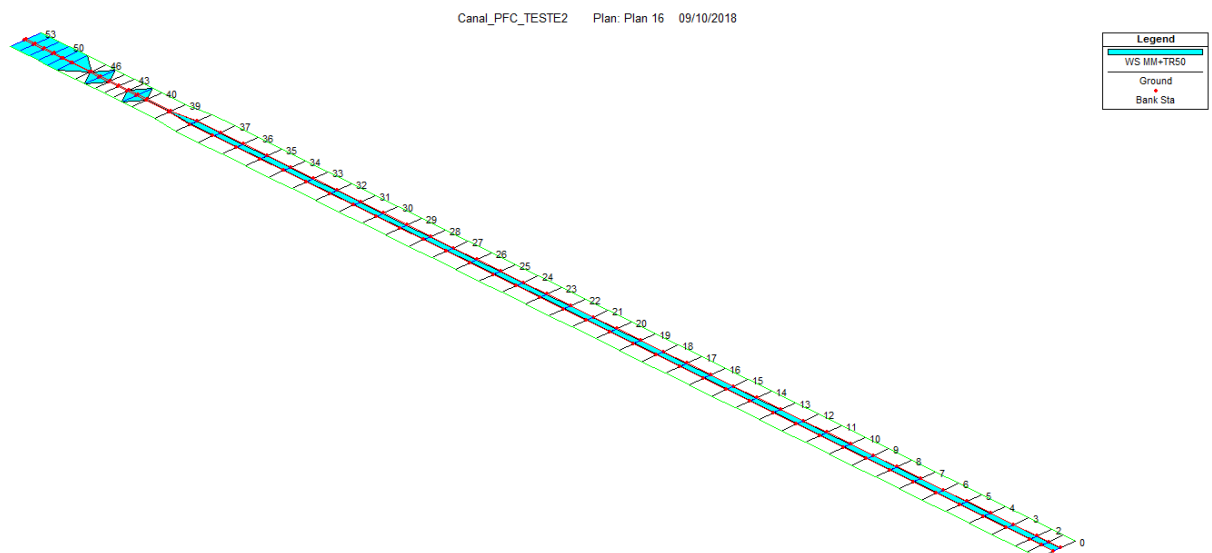


FIG. 6.25 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos e maré média. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

O resultado do aumento da área de transbordamento assim como o aumento do número de seções inundadas em resposta ao gradual crescimento da vazão máxima dos TR's está entre os resultados esperado para a vista do canal.

6.2.4 RESULTADOS CENÁRIO III - TEMPO DE RETORNOS + MARÉ ALTA

O cenário III é a condição de maré alta de 3,4 m a jusante com as vazões máximas dos TR's de 10, 25 e 50 anos a montante.

No cenário III sob a vazão máxima de TR de 10 anos, obteve-se o perfil de alturas ao longo do canal Tucunduba mostrada na FIG. 6.26. Nesta figura, pode-se observar a formação de uma grande região de remanso onde ocorre o impedimento do escoamento segundo a declividade natural do canal. Tal região de remanso é provocada pela presença da maré alta correspondente à altura de 3,4 m a jusante do canal.

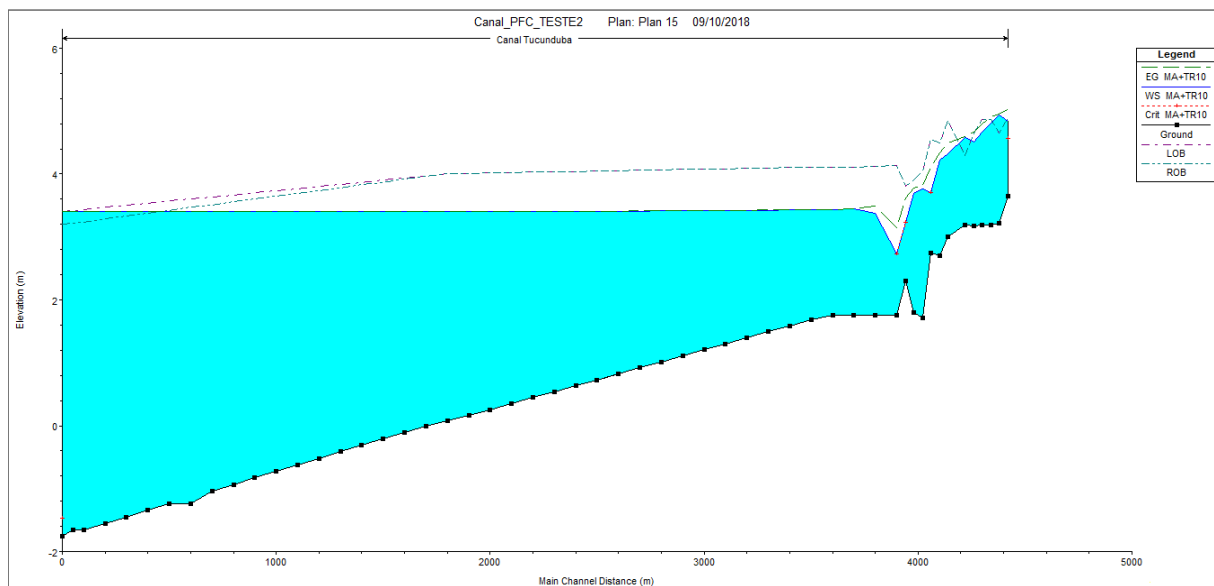


FIG. 6.26 – Perfil de alturas ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

Além disso, observa-se um ressalto hidráulico que ocorre na seção onde há um aumento de altura considerado brusco se comparado ao restante da declividade do canal, provocando assim a diminuição da área de seção por onde escorrerá o fluxo de água. Conclui-se que as alterações da geometria do canal tanto na variação da seção maior para a menor, como a variação de altura do canal resultam na modificação da velocidade de escoamento.

Além disso, pode-se observar que a baixa velocidade a montante do canal acompanha as características da região de remanso observadas na FIG. 6.26 do perfil de alturas do cenário em questão.

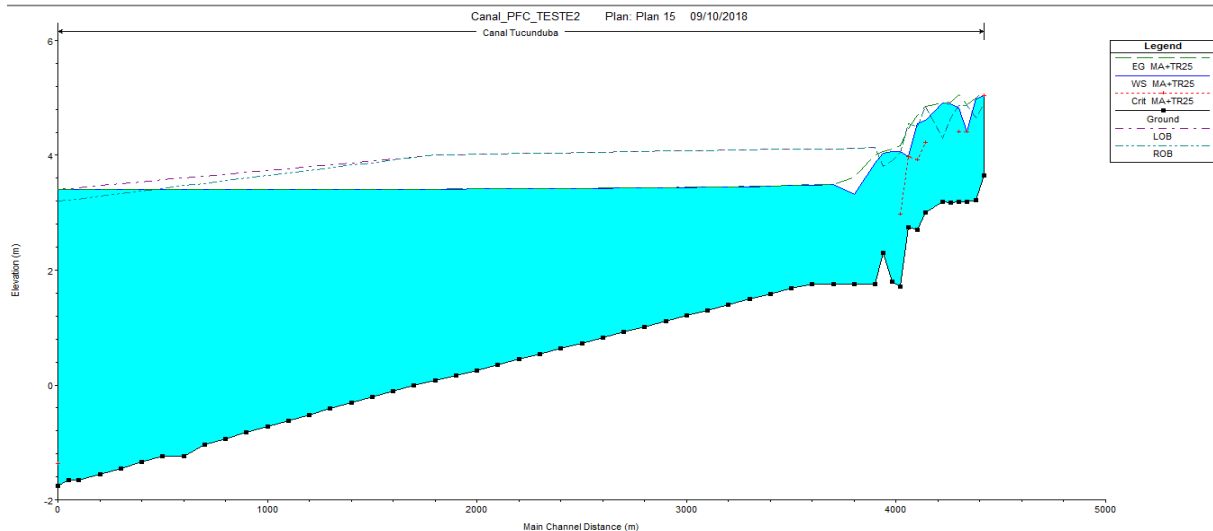


FIG. 6.27 – Perfil de alturas ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

Na FIG. 6.27, observa-se o aumento natural da linha da superfície de água e o aumento da região de remanso onde a altura do nível de vai provocando a ocorrência de um transbordamento ainda maior que o cenário de maré alta com o de TR 10 anos.

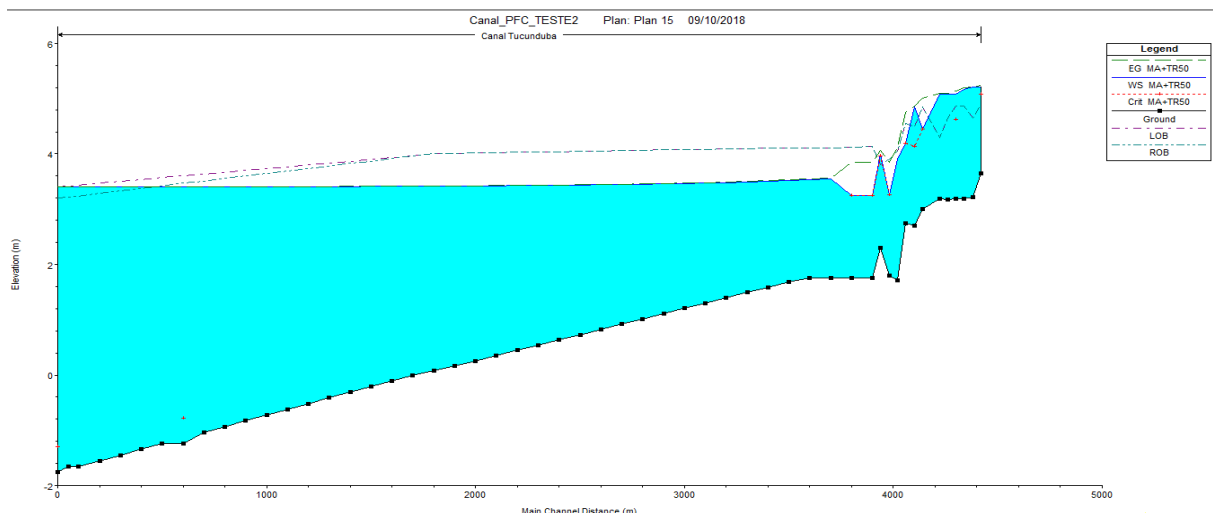


FIG. 6.28 – Perfil de alturas ao longo do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

Na última simulação operou-se a situação mais crítica de efeito da maré alta a jusante e a ocorrência da vazão máxima do TR de 50 anos a montante. Tal cenário proporcionou tanto uma enorme região de remanso quanto a visualização de ressaltos hidráulicos mais acentuados que os observados no cenário de maré alta e TR de 10 anos.

Na comparação entre as áreas de transbordamento nota-se uma mudança em relação aos outros cenários, como a aparição de novas áreas de transbordamento a jusante do canal devido principalmente a maré alta de 3,4 m.

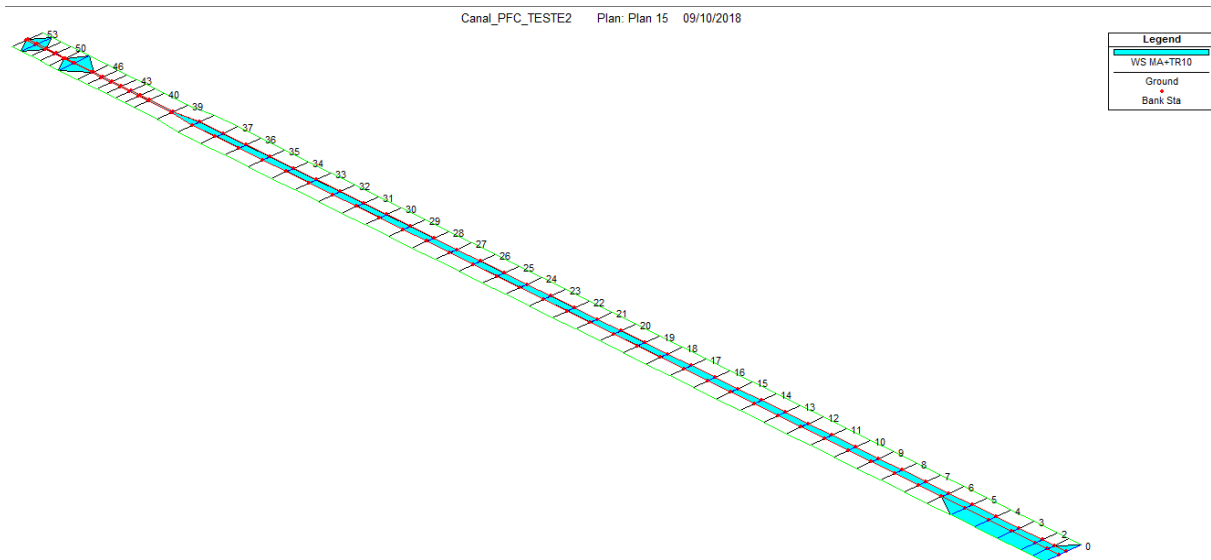


FIG. 6.29 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 10 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

Como analisado na FIG.6.29 há uma inundação das se oes de 0 a 6 onde o lado esquerdo da geometria sofre um maior volume de inunda o que o lado esdireito do canal. A diferença neste volume se dá devido a diferença de altura entre as margens esquerda e direita nessas se oes, como pode ser observada na FIG. 6. 30 dada abaixo.

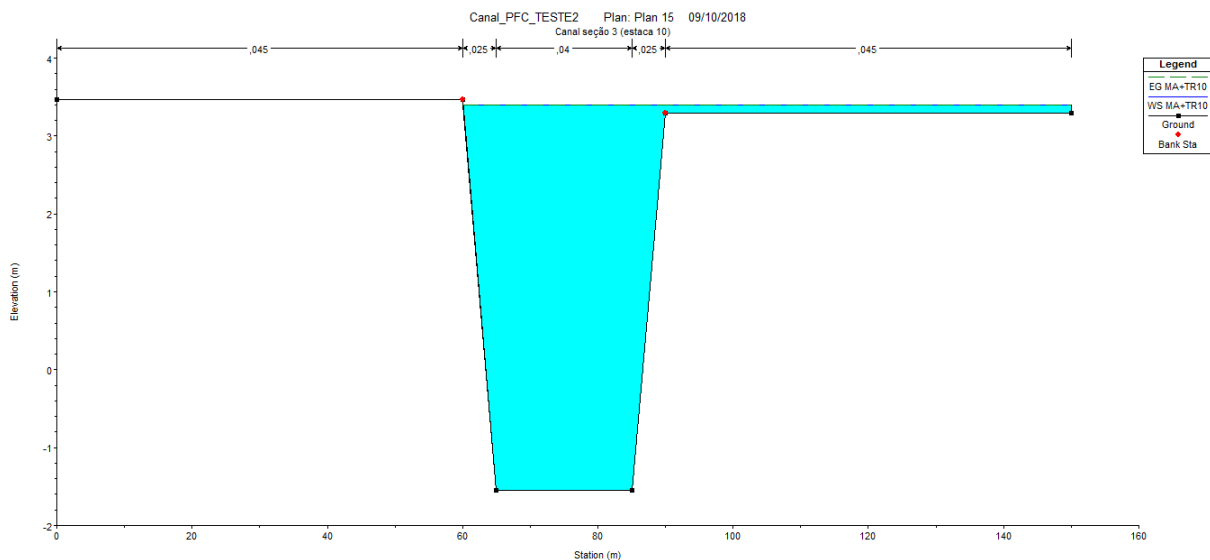


FIG. 6.30 – Justificativa inundação unilateral perfil seção 3 no cenário III sob TR de 10 anos. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

Nas FIG 6.31 e 6.32 seguem a evolução das áreas de transbordamento com o aumento gradual da vazão máxima referentes aos TR's de 25 e de 50 anos.

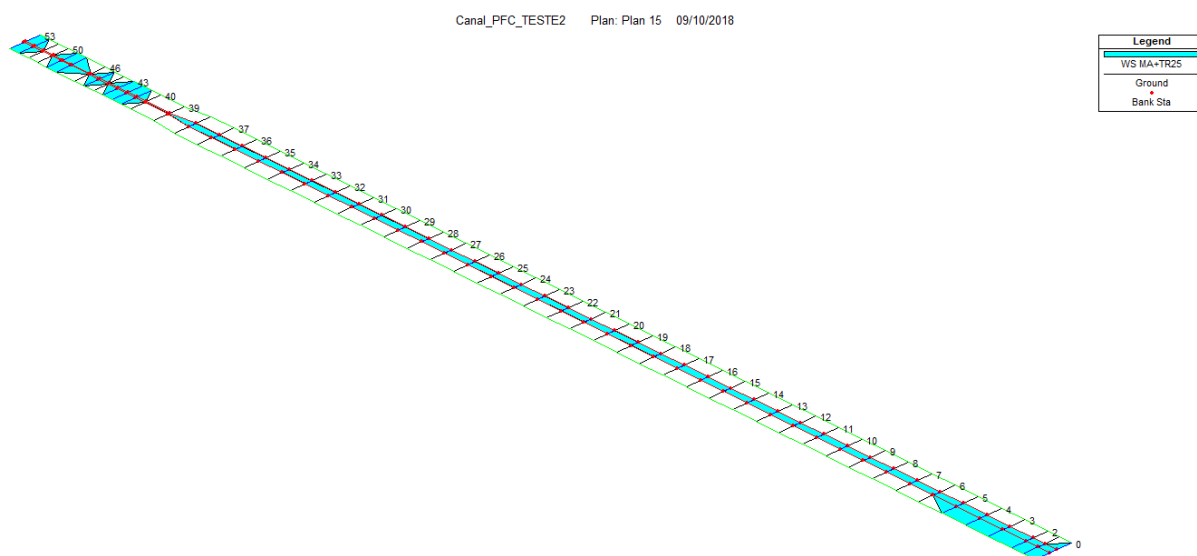


FIG. 6.31 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 25 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

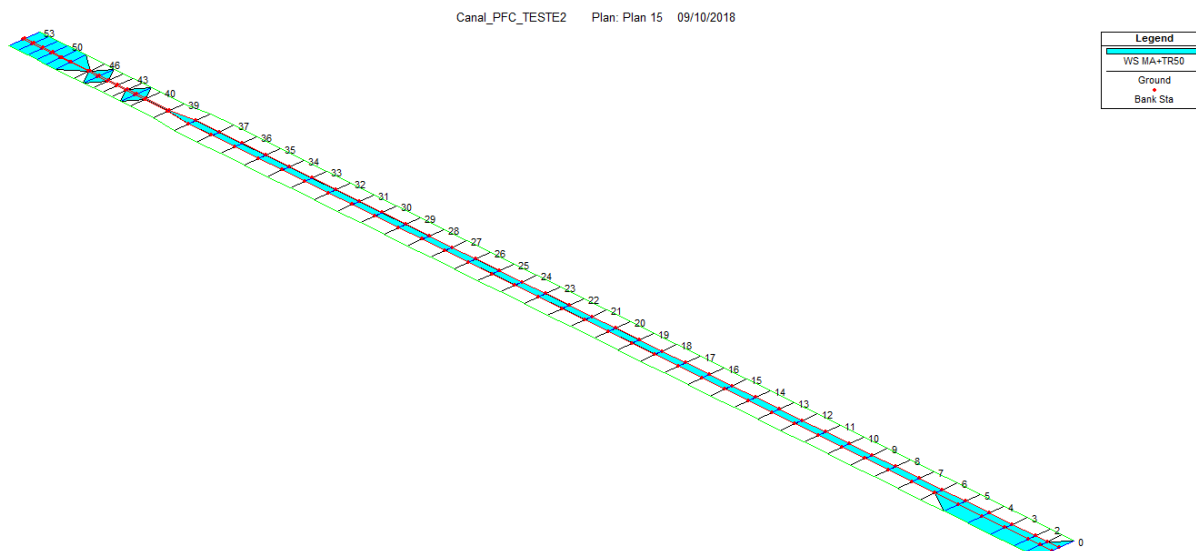


FIG. 6.32 – Vista do canal Tucunduba com vazão máxima de TR 50 anos e maré alta. (Autor, arquivo do HEC-RAS, 2018).

6.3 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS

Para a quantificação dos cenários efetuou-se o cálculo do volume de transbordamento de cada uma das seções do canal. Com o auxílio do HEC-RAS que calcula o volume acumulado em cada seção do canal podemos estimar os volumes de transbordo tomando como base o volume de água a esquerda e a direita do canal, ou seja, o volume que atinge a região de transbordo do canal que para a simulação foi considerada de 60 m para cada um dos lados do mesmo.

A tabela TAB. 6.10 apresenta desta forma os volumes excedentes nas seções críticas onde houve transbordamento em alguma das 9 situações analisadas.

TAB. 6.10 - Volume de transbordamento das seções e volumes totais dos cenários I a III.

| VOLUMES DE TRANSBORDAMENTO (m ³) | | | | | | | | | |
|--|-----------|-------|-------|------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| Seções | CENÁRIO I | | | CENÁRIO II | | | CENÁRIO III | | |
| | TR 10 | TR 25 | TR 50 | MA+TR10 | MA+TR25 | MA+TR50 | MA+TR10 | MA+TR25 | MA+TR50 |
| 0 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO |
| 1 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | 570 | 570 | 570 |
| 2 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | 510 | 510 | 510 |
| 3 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | 810 | 810 | 820 |
| 4 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | 540 | 550 | 540 |
| 5 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | 280 | 270 | 280 |
| 6 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | 60 | 70 | 70 |
| 7 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO |
| 39 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO |
| 40 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO |
| 41 | NÃO | NÃO | 480 | NÃO | 690 | 480 | NÃO | 580 | 480 |
| 42 | NÃO | 360 | NÃO | NÃO | 1160 | NÃO | NÃO | 1050 | NÃO |
| 43 | NÃO | 400 | NÃO | NÃO | 620 | NÃO | NÃO | 540 | NÃO |
| 44 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO |
| 45 | NÃO | 520 | 1300 | NÃO | NÃO | 1350 | NÃO | 180 | 1340 |
| 46 | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | NÃO | 860 | NÃO | NÃO | NÃO |
| 48 | 1340 | 2680 | 4620 | 1540 | 3050 | 4150 | 1550 | 3390 | 4970 |
| 49 | NÃO | 2040 | 1920 | NÃO | 1840 | 3040 | NÃO | 2110 | 3040 |
| 50 | 2060 | NÃO | 2560 | NÃO | NÃO | 1620 | NÃO | NÃO | 1620 |
| 51 | NÃO | NÃO | 1240 | NÃO | 1040 | 1320 | NÃO | NÃO | 1320 |
| 52 | NÃO | 1380 | 2040 | 2080 | 1790 | 2150 | 2360 | 1380 | 2140 |
| 53 | NÃO | 1120 | 2080 | NÃO | 1720 | 2140 | NÃO | 1120 | 2430 |
| VOLUMES TOTAIS | 3400 | 8500 | 16240 | 3620 | 11910 | 17110 | 6680 | 13130 | 20130 |

Quando se compara os TRs de 10 anos em todos os cenários, nota-se uma similaridade no valor de volume de transbordamento nos cenários I e II. Tal resultado era devidamente esperado pois o volume de água dentro do canal sofre um aumento gradual do cenário I para o cenário II. Ou seja, o volume de água dentro do canal do cenário I é menor que do cenário II.

Ainda no TR 10 anos de todos os cenários, o extrapolamento de maior volume de transbordo para o cenário III é devido a maré alta que a jusante do canal provoca um transbordamento nas seções 1 a 6 que nos cenários I e II não sofrem este fenômeno.

Vale ressaltar que o método de análise de volumes adotado está sujeito a restrições devido a sua limitação de se afastar das margens do canal em apenas 60m. Desta forma, existem volumes de transbordamentos que não foram considerados por estarem fora dessa região e portanto não foram calculados pelo software HEC-RAS e também não entraram na estimativa considerada acima.

Quando se compara os TRs de 25 anos em todos os cenários, tem-se um gradual aumento do volume de transbordamento quando se vai do cenário I para o cenário III. Tal perspectiva é resultado do aumento de volume de água dentro do canal que não somente aumenta o volume de transbordo como também da quantidade de seções onde ocorrem transbordamento.

Para os cenários com TRs de 50 anos, além do aumento gradual dentro dos cenários de I a III. Ressalta-se a grande diferença de volume entre tais situações e as anteriormente analisadas. Além do volume dentro do canal destas situações ser maior, obteve-se um aumento significativo das seções de transbordamento dos cenários I a III com TR de 50 anos em comparação aos outros.

Na perspectiva de maré alta e sem maré, nota-se uma influência considerável da maré sobre o canal Tucunduba, pois considerando o TR de 10 anos o volume de transbordo na maré alta é 96,47% maior que o volume de transbordo dos mesmos TR de 10 anos sem maré.

Para a o TR de 25 anos e maré alta o volume de transbordo é 54,47% maior que o cenário de TR de 25 anos sem. E para o TR de 50 anos e maré alta obteve-se um aumento de 23,95% no volume de transbordo em realção ao cenário de TR 50 asem maré. Indicando assim, em todos os cenários, uma influência significativa da maré no aumento do volume de transbordamento do canal de Tucunduba.

7 CONCLUSÃO

Os cenários apresentados são os principais cenários de risco de inundação por transbordo das margens do canal.

Desses resultados, pode-se concluir que a ocorrência da maré junto com tempestades máximas é um fator determinante nos altos níveis d'água no canal e de extravasamento de volume na borda, que podem causar inundações.

Dos resultados, observa-se que em todas os cenários a entrada da maré no canal provoca uma barragem hídrica para o escoamento, o que ocasiona remansos, altos níveis d'água a montante e extravasamento da borda.

Há ocorrência de extravasamento de volumes do canal sem a presença da maré, o que torna a maré um dos quadros mais desfavoráveis do canal e um dos agravantes causadores de inundações.

O cenário II ocorre com maior frequência porque ele está relacionado a maré baixa, enquanto o cenário IV representa a situação crítica do canal com grandes riscos de inundações na região.

Para a recomendação de trabalhos futuros, sugere-se uma calibração do modelo de análise de volumes e da geografia da região do canal por meio de software de mapeamento que trabalhariam como auxiliares do software HEC-RAS.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, S. A.; **Degradação Sócio-Ambiental: Um estudo sobre a população residente na proximidade da foz do igarapé Tucunduba.** 45p. Monografia de Curso de Especialização – Universidade Federal do Pará – Pará, 2000.
- AQUAFLUXUS - CONSULTORIA AMBIENTAL EM RECURSOS HÍDRICOS. **Como Podemos Ajudar?** Disponível em: <<http://aquafluxus.com.br>>. Acesso em: 15 de julho 2018.
- ALMEIDA, F. M.; **Estudo Comparativo da Qualidade da Água Subterrânea das Bacias do Tucunduba e Paracuri.** 51p. Trabalho de Bolsa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq – Universidade Federal do Pará – Pará, 2003.
- ALMEIDA, F. M.; MATTA, M. A. S.; DIAS, E. R. F.; BANDEIRA, I. C. N.; PRADO, J. B.; FIGUEIREDO, A. B. **Estudos Hidrogeológicos da Bacia Hidrográfica Dotucunduba-Belém/PA, Como Base Para Uma Proposta Alternativa de Abastecimento de Água.** 13º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas Pará, 2004.
- AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. **Desastres Naturais: Conhecer Para Prevenir.** Publicação do Instituto Geológico de São Paulo, v.05, pp. 39-52, 2009.
- BOAS, L. V. **Estudo das Cotas de Inundação em Canais Urbanos de Sub-Bacias Hidrográficas em Áreas Estuarinas, Sob Efeito de Marés e Chuvas Localizadas.** 92p. Dissertação de Pós-Graduação – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – Rio de Janeiro, 2016.
- CACELA FILHO, F. C. O.; SILVA, A. P. S.; BARP, A. R. B.; COSTA, L. E. C. **Modelagem da Bacia Hidrográfica Urbana Utilizando o Watershed Modeling System (WMS).** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 21-26 abril 2007, Florianópolis. Anais ... São José dos Campos: INPE, pp. 3303-3310, 2007.
- CAJAZEIRO, J. M.D. **Análise da Susceptibilidade à Formação de Inundações nas Bacias e Áreas de Contribuição do Ribeirão Arrudas e Córrego da Onça em Termos de Índices Morfométricos e Impermeabilização.** 104p. Dissertação de Pós-Graduação – Universidade Federal de Minas Gerais – Minas Gerais, 2012.
- CASTRO, E. Geopolítica da água e novos dilemas a propósito da Amazônia e seus recursos naturais. In: ARAGON, L. E.; CLUSENER-GODT, M. (Orgs.). **Problemática do Uso Local e Global da Água da Amazônia.** Belém: NAEA, 2003. pp. 334.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará. **Termo de Referência Para Elaboração dos Estudos de Requalificação das Ações de Gerenciamento da Alocação de Água nas Bacias Hidrográficas do Acaraú e**

- Coreaú e Controle de Cheias nas Bacias do Jaguaribe, Acaraú e Coreaú.** 2012.
- CORDERO, A.; MEDEIROS, P. A.; TERAN, A. L. **Medidas de Controle de Cheias e Erosões.** Centro de Operação do Sistema de Alerta. Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, Brasil, 1999. Disponível em: <http://ceops.furb.br/index.php/publicacoes/artigos/doc_details/5-metodos-controle-cheias1999> Acesso em: 17 de junho de 2018.
- DAGHIGH, Y.; HOSSEINI, A.; JAVAHERI, N. **Simulating of Unsteady Flow in Tidal Zones.** Disponível em: < https://izw.baw.de/publikationen/dresdner-wasserbauliche-mitteilungen/0/09_Heft_32_Simulating_of_Unsteady_Flow_Tidal_Zones.pdf > Acesso em: 26 de setembro 2018.
- FIGUEIREDO, A. B. de; MATTA, M. A. da S.; ALMEIDA, F. M. de; DIAS, E. R. F.; COSTA, F. R. **Fundamentos Básicos para Exploração de Água Subterrânea na Bacia do Tucunduba.** 12º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas Pará, 2002.
- GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M. **Considerações Sobre as Inundações no Brasil.** 16º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Paraíba, 2005.
- IBGE. **Censo Demográfico 2010.** Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/aglomerados_ubnormais/tabelas_pdf/tab2.pdf> Acesso em: 18 de junho de 2018.
- ISLAM M.S., SWAPAN, M. S.H., HAQUE S.M. **Disaster Risk Index: How Far Should it Take Account of Local Attributes?.** International journal of Disaster Risk Reduction, v.03, pp. 76-87, 2013.
- JORDEN, V. **Investigações Sobre a Influência da Maré em Canais Fluviais.** 65p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina – Santa Catarina, 1998.
- KONRAD, C.P.; **Effects of Urban Development on Floods.** U.S. Geological Survey. Washington, 2003.
- MARQUES, E. T. A.; OLIVEIRA, L. J. **Mudanças Climáticas no Nordeste Brasileiro e Refugiados Ambientais.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.09, pp. 965-984, 2016.
- MARTINS, V. C. D. **Avaliação de Sistemas de Prevenção e Contenção de Inundações em Bacia de Drenagem Urbana.** 150p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará – Pará, 2015.
- MATOS, F. C.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. **Análise Temporal da Expansão Urbana no Entorno do Igarapé Tucunduba.** Revista Biociências, v. 17, p. 7-16, 2011.

- MELO, E. F.; **Considerações Sobre a Hidráulica de Canais Fluviais e de Canais de Maré**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.03, pp 95-107, 1998.
- NASCIMENTO, C. C. **Clima e Morfologia Urbana de Belém**. 160p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará – Belém, 1995.
- ONU BRASIL. **Brasil Entre os Mais Afetados Pelos Desastres Climáticos em 2011, Alerta ONU**. Disponível em:< <https://nacoesunidas.org/brasil-entre-os-mais-afetados-pelos-desastres-climaticos-em-2011-alerta-onu/> > Acesso em: 17 de junho de 2018.
- PARÁ. Governo do Estado. **Plano Diretor de Mineração em Áreas Urbanas: Região Metropolitana de Belém**. Belém: IBGE, pp.157, 2002.
- PEDUZZI P.; DAO H.; HEROLD D.; E MOUTON M. **Assessing Global Exposure and Vulnerability Towards Natural Hazards: The Disaster Risk Index**. Natural Hazards and Earth System Science, v.09, pp.1149-1159, 2009.
- REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. **Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 12º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas Pará, 2002.
- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. **Planilhas no Ambiente EXCEL Para os Cálculos de Balanços Hídricos: Normal, Sequencial, de Cultura e de Produtividade Real e Potencial**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 06, pp. 133-137, 1998.
- SANTOS, L. C. C. **Estimativa de Vazões Máximas de Projeto por Modelos Determinísticos e Probabilísticos**. 92p. Dissertação de Mestrado – Instituto Federal Fluminense – Espírito Santo, 2010.
- SWISS REINSURANCE COMPANY – SWISS RE. **Flood Risk in Brazil: Prevention, Adaptation and Insurance**. Disponível em: < http://media.swissre.com/documents/pub_Flood_risk_Brazil_full_study.pdf > Acesso em: 16 de julho 2018.
- TARGA, M. dos S.; BATISTA, G. T.; DINIZ, H. D.; DIAS, N. W.; MATOS, F. C. **Urbanização e Escoamento Superficial na Bacia Hidrográfica do Igarapé Tucunduba**. Revista Ambiente e Água, v. 7, pp.120-142, 2012.
- TUCCI, C. E. M. **Gerenciamento da Drenagem Urbana**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 07, pp. 5-27, 2002.
- TUCCI, C. E. M. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 02, pp. 5-12, 1997.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem Urbana: Gerenciamento, Simulação, Controle**. Porto Alegre: ABRH, v. 05, pp 278-345, 1995.