



INSTITUTO FEDERAL
Fluminense
Campus Macaé

MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

**USO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL MOHID LAND EM MANEJO DE ÁGUAS
PLUVIAIS DE BACIAS URBANAS SUBMETIDAS A CHUVAS INTENSAS**

MARCOS DA SILVA LOURENÇO

MACAÉ-RJ

2018

MARCOS DA SILVA LOURENÇO

USO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL MOHID LAND EM MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS
DE BACIAS URBANAS SUBMETIDAS A CHUVAS INTENSAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental.

Orientador: D.Sc. Jader Lugon Junior

Coorientadora: D.Sc. Maria Inês Paes Ferreira

MACAÉ-RJ

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L892u Lourenço, Marcos da Silva, 1958-.
 Uso do simulador computacional Mohid Land em manejo de águas
 pluviais de bacias urbanas submetidas a chuvas intensas /
 Marcos da Silva Lourenço. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.
 xiii, 50 f.: il. color.

 Orientador: Jader Lugon Junior, 1962-.
 Coorientadora: Maria Inês Paes Ferreira, 1962-.

 Dissertação (Mestrado). - Instituto Federal de Educação,
 Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em
 Engenharia Ambiental, Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.
 Inclui bibliografia.

 1. Águas pluviais - Rio de Janeiro (Estado). 2. Escoamento
 urbano - Rio de Janeiro (Estado). 3. Inundações - Rio de Janeiro
 (Estado). 4. Bacias hidrográficas urbana - Manejo. 5. MOHID
 (Programa de Computador). I. Lugon Junior, Jader, 1962-, orient.
 II. Ferreira, Maria Inês Paes, 1962-, coorient. III. Título.

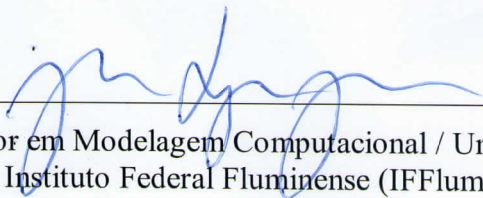
CDD 628.21098153

23.ed.

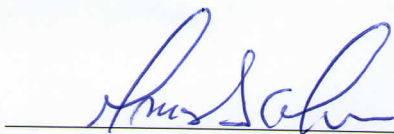
Dissertação intitulada **USO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL MOHID LAND EM MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS DE BACIAS URBANAS SUBMETIDAS A CHUVAS INTENSAS**, elaborada por **Marcos da Silva Lourenço** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental.

Aprovado em: 28 de setembro de 2018

Banca Examinadora:



Jader Lugon Junior, Doutor em Modelagem Computacional / Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador



Marcos Antônio Cruz Moreira, Doutor em Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



Francine de Almeida Kalas, Doutora em Modelagem Computacional / Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a meu pai Juarez das Graças Lourenço (*in memoriam*), reconhecido entre seus pares no meio profissional da Cartografia Nacional, como um dos maiores Aerofotogrametristas, tendo participado com amor e intensidade no desenvolvimento desta técnica no Brasil, desde os primórdios desta atividade aqui nos anos 1950 e até o fim de sua vida em 2018.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Nilma da Silva Lourenço (falecida durante este meu curso), por seu apoio incondicional durante todo tempo em que fizemos essa maravilhosa viagem juntos. Ela vive em mim.

Ao meu pai Juarez, o maior aerofotogrametrista do mundo (falecido recentemente), por seu apoio decisivo e sempre condicionado ao prosseguimento dos meus estudos. O que me conduziu à profissão de Engenheiro Civil na qual labuto com prazer porque a exerço por amor. Aqui vai nosso tributo a ele.

A minha mulher Niécia, pelo amor mútuo que desenvolvemos em nossa juventude e pela cumplicidade recíproca que inventamos nestas fases mais maduras.

Ao meu filho João, que através de sua vida tem me mostrado um conceito material de imortalidade. O que me apontou um novo rumo muito mais instigante para que eu siga em frente.

A toda minha família ancestral e descendentes em cujos membros reconheço a mim mesmo, talvez por isso mesmo os ame de graça. E a família da minha mulher que me adotou sem ressalvas quanto aos meus defeitos, da qual agradeço penhoradamente a todos com que temos convivido.

Às turmas da adolescência que com seus bons e maus exemplos ajudaram a sedimentar o meu caráter. Especialmente aos que se tornaram amigos para sempre, aos quais, para não citar todos, declaro minha gratidão nas identidades personalíssimas dos amigos Rosiel, por suas observações e conselhos fundamentais, Toninho e Zé da Carabú, fies companheiros de aventuras, que despreziosamente iniciaram minha alfabetização ecológica, o que me fez descobrir que observando a natureza dentro e fora da urbe é possível se sentir menos urbano e mais humano.

À todo Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do IFF que, no desempenho da nobre missão que escolheram, mostraram o amor com que nos fizeram conhecer os conceitos da ciência ambiental normal.

À minha Coorientadora Maria Inês Paes Ferreira, em cujo brilho do olhar se pode reconhecer o apreço pela excelência e o poder de transformação da sociedade pela sociedade com auxílio da ciência. Para além da gratidão, sua participação na minha vida acadêmica é uma honra que levo comigo para sempre.

Finalmente ao meu Orientador Jader Lugon Jr, que logo na primeira hora apostou no potencial do meu desenvolvimento, viabilizando com seu gesto meu retorno aos estudos formais. E depois por sua dedicação, paciência, respeito e tato para me conduzir até o ponto em que conseguimos atingir.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do cálculo do Balanço Hídrico realizado pelo MOHID Land.	4
Figura 2 – Representação da planta topográfica do arruamento do bairro Chácara Marilea.....	5
Figura 3 – Imagem do MDT com rede natural de drenagem e limite da bacia de contribuição.....	5
Figura 4 – Imagem da bacia com a rede natural de drenagem e o uso atual do solo.....	6
Figura 5 – Imagem do momento de pico do escoamento da chuva (56 minutos) TR 10 anos, sem intervenção.....	6
Figura 6 – Imagem da configuração do novos canais projetados para minimizar os problemas de MAP.....	7
Figura 7 - Imagem do momento de pico do escoamento da chuva de projeto TR 10 anos.....	8
Figura 8 - Imagem do momento de pico do escoamento da chuva de projeto TR 20 anos.....	8
Figura 9 - Imagem do momento de pico do escoamento da chuva de projeto TR 50 anos.....	9
Figura 10 - Gráfico Vazão (m ³) x Tempo (segundos) no exutório do canal projetado, TR 10 anos.....	10
Figura 11 - Gráfico Vazão (m ³) x Tempo (segundos) no exutório do canal projetado, TR 20 anos.....	10
Figura 12 - Gráfico Vazão (m ³) x Tempo (segundos) no exutório do canal projetado, TR 50 anos.....	11
Figura 13 – Divisão das UHPs da RH-VIII: UHP VIII-a1 (bacia do rio Macaé); UHP VIII-a (bacia do rio Imboassica) e UHP VIII-b (bacia do rio das Ostras)	16
Figura 14 - Imagem do arquivo dwg extraído da PCD 1: 2000, com os pontos cotados (preto), canais principais identificados (cian) e arruamento (laranja), permitindo identificar pontes e bueiros.....	18
Figura 15 - Projeto com a base topográfica do modelo criada no MOHID GIS.....	22

Figura 16 - Construída com o ferramental do Mohid Land para representar a geometria do projeto.....	24
Figura 17 - Representação do modelo da bacia do rio Macaé: limites, MDT (translúcido), área urbana e sinalização das seções de produção das séries temporais das vazões.....	26
Figura 18 - Hidrógrafa da vazão na seção à montante da área urbana produzida por chuva de projeto TR de 10 anos, aplicada em toda a bacia do rio Macaé e simulada pelo Mohid Land.....	26
Figura 19 - Fotos tomadas pelo autor em 10/03/2018 às 12:45 h, no local de medida da lâmina d'água sobre a soleira da Ponte do Capote, Linha Verde na entrada do Bairro Santo Antônio.....	29
Figura 20 - Fotos tomadas pelo autor em 10/03/2018 às 13:14 h no local de medida da diferença de nível entre o NA do rio Macaé e peitoril do guarda corpo da ponte da Linha Azul, Macaé-Niterói.....	29
Figura 21 - Fotos tomadas às 13:27 h, medida da diferença de nível entre o NA do canal Três Pontes e a soleira do guarda corpo da ponte da Linha Verde, sentido Cavaleiros. Vista da planície inundada.....	30
Figura 22 - Fotos tomadas pelo autor em 10/03/2018 às 13:56 h, no local de medida da marca atingida pela pico da cheia por volta da 0:00 h de 10/03/2018.....	30
Figura 23 – Gráfico da elevação do nível d'água x tempo nos pontos da entrada do rio a montante da área urbana e no exutório, causado apenas pela maré astronômica em período de quadratura.....	31
Figura 24 – Gráfico elevação do nível d'água x tempo nos pontos da entrada do rio a montante da área urbana e no exutório, causado apenas pela maré astronômica em período de sizígia...	32
Figura 25 – Gráfico comparativo das elevações do nível do Canal Capote durante o escoamento da cheia (TR 10 anos) em maré de quadratura (vermelho) ou maré sizígia (azul).	33
Figura 26 – Gráfico comparativo das elevações do nível d'água na seção RIO MACAÉ LINHA AZUL durante o escoamento da cheia (TR 10 anos) em maré de quadratura (vermelho) ou maré sizígia (azul).....	34

Figura 27 - Gráfico comparativo das elevações do nível d'água na seção RIO MACAÉ FOZ durante o escoamento da cheia (TR 10 anos) em maré de quadratura (vermelho) ou maré sizígia (azul).....	35
Figura 28 - Fotos tomadas pelo autor em 08/05/2018 (CAPOTE a esquerda e 3 PONTES a direita)	37
Figura 29 - Gráfico produzido pelo simulador relacionado tempo x elevação devido à maré astronômica, para estação CAPOTE na condição de estiagem reinante na segunda campanha.....	37
Figura 30 - Zoom da região do gráfico da estação CAPOTE no entorno do momento em que ocorreu a medição da segunda campanha (08/05/2018 às 14:30 h)	37
Figura 31 - Zoom da região do gráfico da estação TRÊS PONTES no entorno do momento que em ocorreu a medição da segunda campanha (08/05/2018 às 14:40 h)	38
Figura 32 - Hidrógrafa tempo x nível, calculada pelo simulador para estação CAPOTE, consignando o valor de 1,1452 m de elevação do nível d'água às 12:50 h do dia 10/03/2018.....	39
Figura 33 - Hidrógrafa tempo x nível calculada pelo simulador para estação TRÊS PONTES, consignando o valor de 1,1462 m de elevação do nível d'água às 13:30 h do dia 10/03/2018.....	39
Figura 34 - Representando os setores onde a rede de drenagem deve ser corrigida em relação à posição do percurso do Canal Capote e do ponto de deságue do canal Virgem Santa no rio Macaé.....	41
Figura 35 - Imagem do pico do alagamento ocorrido em 10/03/2018 as 16:00 h, com a localização das manchas e suas alturas respectivas com efeito translúcido sobre a imagem real da cidade.....	42
Figura 36 - Imagens comparativas das manchas de alagamento máximas e alturas das lâminas d'água, representadas à esquerda em escala hipsométrica, conforme a condição do deságue.	43
Figura 37 - Gráfico relacionando as elevações do nível d'água no período simulado, em 4 estações de medida de variáveis de estado simulando o evento real em comparação com a ausência de chuva.....	44

Figura 38 – Gráfico com as elevações de nível d’água nas mesmas estações da simulação de referencia, com a bacia submetida a vazão decorrente de chuva extrema TR 20 anos e maré de sizígia.....	45
Figura 39 – Comparação do nível d’água na seção Capote variando-se as profundidades na foz do Rio Macaé	46

LISTA DE TABELAS

Tabela1 – Dados tomados nas campanhas para medida das diferenças de nível d’água observadas entre os eventos de cheia e estiagem.....	36
Tabela2 – Valores calculados pelo simulador nos cenários da situação de cheia e de estiagem	40
Tabela3 – Apresentando as diferenças de nível entre as condições de cheia e estiagem verificas em campo e as obtidas com as simulações e respectivos afastamentos entre o simulado e a realidade.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CERHI - Conselho Estadual de Recursos Hídricos

CN - Curva Number

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

DNOS – Departamento Nacional de Obras de Saneamento

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FGV – Fundação Getúlio Vargas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFF – Instituto Federal Fluminense

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

IST – Instituto Superior Técnico

MAP - Manejo de Água Pluviais

MARETEC - Marine and Environmental Technology Research Center

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDT - Modelo Digital do Terreno

MDT_ND - Modelo Digital do Terreno Sem Depressões

MGH – Modelo de Grande Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS

NA – nível d'água

NOAA – National Oceanic Atmospheric Administration

PB - Plano de Bacia

PCD – Planta Cadastral Digital

PPEA - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

PRH - Plano de Recursos Hídricos

REA - Reunião de Estudos Ambientais

RH - Região Hidrográfica

RMPG - Rede Maregráfica Permanente para Geodésia

RN – Referência de Nível

SCS - Soil Service Conservation

SEA - Secretaria de Estado do Ambiente

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

TR - Tempo de Recorrência

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UHP - Unidade Hidrográfica de Planejamento

UTM - Universal Transverse Mercator

USO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL MOHID LAND EM MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS DE BACIAS URBANAS SUBMETIDAS A CHUVAS INTENSAS

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho uma abordagem metodológica para quantificar cheias em áreas urbanas de relevo plano por meio do simulador computacional de base física Mohid Land. Com o emprego de pesquisa exploratória acerca das potencialidades e limitações do simulador Mohid Land como ferramenta de construção, execução e análise de modelos hidrodinâmicos de escoamento de chuvas, verificou-se sua aptidão para processar os elementos característicos do problema e sua adequação aos protocolos pré-definidos pela Ciência Normal. Assim sendo, implementaram-se modelos hidrodinâmicos computacionais visando contribuir com metodologia aplicável às soluções requeridas em Manejo de Água Pluviais (MAP) de trechos de bacias hidrográficas em áreas urbanas e estuarinas submetidas a chuvas intensas, e onde o escoamento é afetado pela variação de maré. Apresentam-se dois artigos com estudos de caso, nos quais o método foi aplicado em áreas urbanas da Região Hidrográfica VIII (RH VIII) do estado do Rio de Janeiro. Intitulado: “Uso do Simulador Computacional Mohid Land em Manejo de Águas Pluviais de Bacias Urbanas Submetidas a Chuvas Intensas”, o primeiro artigo descreve a aplicação do método, com vistas à definição de seções de canais suficientes para o escoamento das chuvas num trecho de bairro implantado na planície de inundação adjacente ao rio das Ostras, apresentando-se os resultados alcançados. Intitulado: “Avaliação Quantitativa das Manchas de Alagamento na Área Urbana de Macaé Durante as Cheias do Rio”, o segundo artigo descreve os trabalhos para a delimitação e quantificação de lâminas d’água dos alagamentos recorrentes na área urbana de Macaé. O método permitiu a determinação de vazões máximas, estado dos níveis d’água das seções da rede de macro drenagem, localização das manchas de alagamento, as respectivas alturas de lâminas d’água e seu tempo de permanência, bem como a influência da variação da maré no escoamento da cheia. Os resultados apresentados podem subsidiar o desenvolvimento dos trabalhos necessários ao cumprimento das metas relacionadas com o controle de cheias do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé / Ostras (PRH Macaé/Ostras, 2014). A metodologia poderá ser aplicada em outras áreas urbanas implantadas em regiões estuarinas.

Palavras Chave: Cheias urbanas. Estuários. Drenagem

USE OF MOHID LAND COMPUTER SIMULATOR IN THE MANAGEMENT OF URBAN RAIN WATER SUBJECTED TO HEAVY RAIN

ABSTRACT

This paper presents a methodological approach to quantify floods in urban areas of flat terrain using the Mohid Land physical-based computer simulator. Through an exploratory research of the potentialities and limitations of the Mohid Land simulator as a tool of construction, execution and analysis of hydrodynamic models of rainfall flow, it was verified its aptitude to process the characteristic elements of the problem and its adequacy to the predefined protocols by Normal Science. Therefore, computational hydrodynamic models were implemented in order to contribute with methodology applicable to the solutions required in Rainwater Management of stretches of river basins in urban and estuarine areas submitted to intense rains, and where the flow is affected by the variation of tide. It is presented two articles with case studies where the method was applied in urban areas of Hydrographic Region VIII (RH VIII) of the State of Rio de Janeiro. The first, entitled "Use of the Mohid Land Computational Simulator in Handling Rain Waters in Urban Basins subjected to Heavy Rainfall", describes the application of the method for the definition of sufficient sections of channels for the drainage of rain in an implanted neighborhood in the floodplain adjacent to the Ostras River, presenting the achieved results. The second article entitled "Quantitative Assessment of Flooding Stains in the Urban Area of Macaé during the Floods of the River", describes the works for the delimitation and quantification of water depths of the recurrent floods in the urban area of Macaé. The method allowed the determination of maximum flows, state of water levels of sections of the macro drainage network, location of flood spots, their respective heights of water depths and their residence time, as well as the influence of tide variation in the flood's flow. The presented results can subsidize the development of the works to fulfill the goals related to the control of floods of the Water Resources Plan of the Hydrographic Region Macaé. The methodology may be applied in other urban areas implanted in estuarine regions.

Keywords: *Urban floods. Estuaries. Drainage*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVITURAS E SIGLAS.....	ix
RESUMO	xi
<i>ABSTRACT</i>	xii
SUMÁRIO	xiii
APRESENTAÇÃO	1
ARTIGO CIENTÍFICO 1	3
ARTIGO CIENTÍFICO 2	13
RESUMO	13
<i>ABSTRACT</i>	14
1. INTRODUÇÃO	15
2. METODOLOGIA	16
2.1. Análise dos Relatórios do PRH RH-VIII	16
2.2. Estudos Pré-existentes de Cheias na Área do Projeto	18
2.3. Simulador Mohid Land.....	19
2.4. Base Topográfica.....	20
2.5. Construção do Projeto de Simulação Computacional	21
2.6. Vazão forçante	25
2.7. Maré forçante	27
2.8. Propriedades da simulação.....	27
2.9. Testes e ajustes do modelo computacional construído.....	28
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
3.1. Variação dos níveis de maré na rede de canais da região do projeto	31
3.2. Influência dos níveis de maré no escoamento da chuva extrema	33
3.3. Avaliação da qualidade da predição do modelo desenvolvido	35
3.4. Quantificação e espacialização das manchas de alagamento.....	42
3.5. Simulação de cenários alternativos	44
4. CONCLUSÃO	47
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO	50

APRESENTAÇÃO

Relações de causa e efeito conduzem à constatação de que problemas de manejo de águas pluviais em áreas estuarinas são consequência de opções econômicas, como as relatadas por Santos (1993), que no passado eram associadas à necessidade da implantação de portos. Estuários são áreas vocacionadas para instalação desse tipo de atividade, que tem a propriedade de atrair populações para seu entorno (ALFREDINI, 2005). O que induziu à formação de núcleos urbanos nessas áreas.

Devido à expansão e adensamento da urbanização, muitas vezes sem considerar questões básicas de infraestrutura urbana, eventualmente populações menos favorecidas ocuparam loteamentos locados nos setores mais baixos dessas cidades (VIEIRA, 1993). E periodicamente essas populações são vitimadas quando chuvas extremas precipitadas na bacia de contribuição demandam as regiões estuarinas (TUCCI, 2002).

Os problemas ali instalados quanto ao escoamento das águas pluviais estão associados às baixas declividades existentes entre a altitude do local ocupado e o nível do mar (MARÇAL *et al.*, 2015), para onde naturalmente as águas pluviais tem que fluir.

Os avanços em Tecnologia da Informação das últimas décadas tem impulsionado a aplicação de simulações computacionais na pesquisa de soluções de problemas ambientais em geral. Consequentemente a pesquisa de solução para Manejo de Águas Pluviais (MAP) se beneficia com o desenvolvimento dessas novas ferramentas, marcadamente por aplicações em grandes bacias hidrográficas. Aplicações em áreas estuarinas formadas em planícies fluvio marinhas geralmente esbarram no problema da descrição suficientemente detalhada dos relevos essencialmente plano que formam essas regiões (MOORE *et al.*, 1993; AMARAL *et al.*, 2004; FGV, 2004; IBGE, 2009; SILVA, PAZ 2013; VILAS BOAS *et al.*, 2016; TAVAREZ, 2017).

Assim sendo, essa pesquisa de dissertação de Mestrado Profissional se desenvolveu para avaliação da adequação de técnicas de aplicações de simulação computacional ao escoamento de chuvas em apoio aos estudos e projetos de intervenções em áreas urbanizadas implantadas em setores planos e próximos do nível do mar.

Constata-se que os tratamentos matemáticos para calcular as posições relativas das parcelas de águas pluviais em circulação na bacia hidrográfica utilizados em modelos computacionais de base física, são fortemente fundamentados em relações geométricas (BRAUNSCHWEIG *et al.*, 2010). Tanto as Plantas Cadastrais Digitais (PCD) de áreas urbanas na escala 1: 2000 como levantamentos topográficos convencionais de trechos urbanizados de bacias hidrográficas possivelmente podem

suprir a necessidade de uma base topográfica com resolução suficiente para a modelagem computacional do escoamento de chuva extrema em área urbana implantadas em planícies estuarinas.

Partindo-se dessa hipótese, construíram-se dois modelos de escoamento de chuvas extremas usando-se o simulador computacional Mohid Land. Um deles baseado em planta topográfica convencional de trecho de bairro implantado na planície de inundação do rio das Ostras. Os procedimentos para execução dessa modelagem, seus resultados e conclusões são apresentados no Artigo 1 deste relatório de dissertação. O outro modelo foi construído com base na PCD 1: 2 000 da área urbana de Macaé – RJ, com o qual foi possível a comparação das elevações de níveis d'água medidas no campo durante uma cheia real, ocorrida na cidade em março de 2018, com os valores simulados. Este caso está descrito no Artigo 2.

Os resultados desses trabalhos são apresentados por meio de Modelos Digitais do Terreno (MDT) e da Rede de Drenagem, de gráficos representativos dos valores assumidos pelas variáveis de estado durante os períodos simulados, assim como em figuras, tabelas e fotografias, que ilustram as análises efetuadas durante o desenvolvimento dos projetos de simulação dos eventos naturais.

Graças às simulações foi possível determinar a melhor configuração de estruturas de meso e macrodrenagem capazes de apontar soluções para alagamentos no bairro de Rio das Ostras. Com o modelo do escoamento de Macaé determinaram-se as magnitudes das manchas de alagamento recorrentes na área urbana de Macaé, as elevações máximas dos níveis d'água de várias seções durante os picos de cheias em diversos cenários de intensidades de chuvas e marés, bem como em cenários alternativos de intervenções estruturais.

Os resultados produzidos indicam a viabilidade técnica de aplicação da simulação computacional com uso do *software* Mohid Land, como ferramenta de análise do escoamento de chuvas extremas em bacias urbanas de regiões planas e próximas ao nível do mar. Considerando-se a complexidade da rede de canais e das características essencialmente planas do relevo, no caso estudado em Macaé, conclui-se também que a técnica pode ser aplicada em qualquer bacia hidrográfica.

ARTIGO CIENTÍFICO 1



USO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL MOHID LAND EM MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS DE BACIAS URBANAS SUBMETIDAS A CHUVAS INTENSAS^A

Marcos da Silva Lourenço¹, Jader Lugon Júnior², Maria Inês Paes Ferreira³

^{1,2 e 3} Instituto Federal Fluminense - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, e-mail: ¹lourenco2003@yahoo.com.br; ²jlugonjr@gmail.com; ³ines_paes@yahoo.com.br

Palavras-chave: Alagamentos; Simulação; MOHID Land

Resumo

Neste trabalho relata-se a aplicação de metodologia para tratamento do problema de Manejo de Águas Pluviais (MAP) de bacias urbanas submetidas a chuvas intensas com auxílio de simulação computacional. Pretende-se mostrar que o método permite a análise desse tipo de problema, mesmo em áreas estuarinas de relevos aplainados. A mesma abordagem poderá ser aplicada em qualquer bacia hidrográfica, em apoio à análise de soluções de MAP. Com base no levantamento topográfico convencional do arruamento de um bairro implantado parcialmente na planície de inundação do rio das Ostras, e da adoção de chuva de projeto efetiva, com 10 anos de tempo de recorrência (TR), desenvolveu-se o modelo hidrodinâmico do escoamento da mesma, através do simulador computacional MOHID Land. Assim, foi possível a avaliação das capacidades de canais alternativos para escoamento dessa chuva até o leito do rio, minimizando os alagamentos nas áreas mais baixas do bairro em questão. As coordenadas X, Y e Z dos pontos que descrevem a geometria do arruamento do bairro são formatadas para a inteligência do simulador, que constrói o Modelo Digital do Terreno (MDT) e a rede natural de drenagem onde se aplica a chuva para qual se pretende simular o escoamento antevendo-se suas consequências. Analisando-se as posições e tempos de permanência das manchas de inundação, pode-se planejar as posições de canais com seções mínimas capazes de minorar o problema. Uma vez determinada a solução mais econômica, pode-se aplicar os instrumentos de gestão do desenvolvimento urbano, preconizados pela Lei nº 10.257/2001 (Estatuto das Cidades), para apropriação do uso do solo da faixa de domínio do canal projetado pelo poder público, em benefício de toda a sociedade, sem onerar nem o proprietário dessa faixa, nem o erário municipal. No caso estudado, verificou-se que as vazões máximas do escoamento das chuvas de projeto com TR 10, 20 e 50 anos, no exutório, são respectivamente: 3,83 m³, 5,0 m³ e 6,5 m³ e que, com o alargamento e aprofundamento de canal existente e seu prolongamento para o interior do bairro, consegue-se limitar a 15 cm a lâmina d'água máxima das manchas de alagamentos em áreas críticas, com tempos de permanência de alguns minutos. A melhor solução alcançada até agora indicou a ampliação da largura do canal existente de 8 para 9 metros e a profundidade de 1,2 para 1,8 metros. Os resultados das simulações indicaram que a lâmina d'água no canal principal se limitou a 1,66 metros, o que indica uma folga de 0,14 m para chuva com TR 50 anos. Ajustes nas geometrias dos canais ainda podem ser analisados com vistas à eliminação total do problema. Ainda assim, os resultados alcançados já permitem indicar seções de projeto para os canais e a definição pelo poder público municipal de cotas de soleiras mínimas para os diversos trechos conforme se verificam as lâminas d'água de alagamentos decorrentes do escoamento de chuvas extremas com maiores TR. Também permitem o estudo de soluções pontuais para os locais onde alguma mancha de alagamento ainda prevalece.

A-Este artigo foi publicado no formato indicado pelos organizadores, nos Anais da 8ª Reunião de Estudos Ambientais (8ª REA) realizada em maio de 2018 em Porto Alegre - RS.

Introdução

Tucci (2002) e Souza *et al.* (2013), apontam as causas dos sistemas deficientes para drenagem urbana e suas consequências para a sociedade. São circunstâncias institucionais e tecnológicas que acarretam a desordem da situação atual de muitas regiões urbanizadas. Ocorre que tais deficiências podem ser enfrentadas com os instrumentos legais produzidos mais recentemente, tais como a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 - Lei das Águas (BRASIL, 1997) e o Estatuto das Cidades (BRASIL, 2001). No aspecto tecnológico, o estágio atual da evolução da informática permite a abordagem do problema de MAP através de modelos hidrodinâmicos de base física. Esta abordagem viabiliza maior segurança, flexibilidade, rapidez e economia nas análises de cenários alternativos de soluções de MAP (RODRIGUES E LUGON JÚNIOR, 2012).

O simulador MOHID (Water Modelling System®) vem sendo desenvolvido desde 1985 por equipes de colaboradores do Marine and Environmental Technology Research Center (MARETEC), pertencente ao Instituto Superior Técnico (IST) da Escola de Engenharia da Universidade Técnica de Lisboa, tendo a cooperação da empresa Hidromod Ltda. Em 2000 inicia-se o desenvolvimento do MOHID Land com um modelo 1D-Soil que se expande para incluir outros processos de Bacias Hidrográficas, tais como: aquífero, rio, escoamento superficial e o crescimento da vegetação (MARETEC, 2012).

A simulação do escoamento da chuva é feita através do modelo hidrodinâmico esquematizado na figura 1, onde a parcela de água precipitada a cada intervalo de tempo de discretização da chuva, acarreta um balanço hídrico parcial calculado através das formas desenvolvidas: da Equação de Richard (equação 1) e das Equações de Saint-Venant (equações 2 e 3). Estas são aplicadas simultaneamente a cada intervalo de tempo e representam respectivamente:

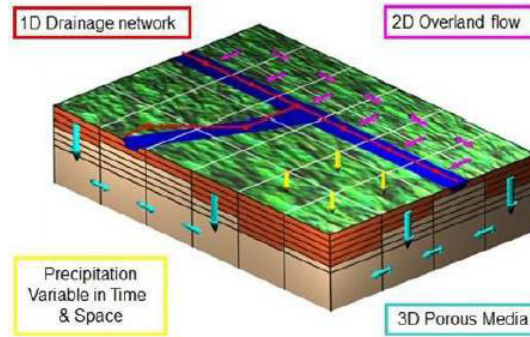


Figura 1: Representação esquemática do cálculo do Balanço Hídrico realizado pelo MOHID Land.

(Adaptada de Braunschweig *et al.* por Telles, 2014)

As setas azuis na Figura 1 representam a percolação da água dentro do meio poroso e fisicamente são descritas pela Equação 1 a seguir:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -K(\theta) \left[\frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\partial z}{\partial x_i} \right] \quad (1)$$

Onde: θ (m^3/m^3) é a umidade do solo; t (s) é o tempo; $K(\theta)$ (m/s) é o coeficiente de permeabilidade em função de θ ; h (m) é a altura da coluna d'água; x_i e z (m) são coordenadas (LEITAO *et al.*, 2015)

As setas de cor magenta na Figura 1 representam as parcelas do escoamento superficial da água em cada célula nas quais a bacia foi discretizada e fisicamente são descritas pela Equação 2 a seguir:

$$Q = \frac{AR_h^{\frac{2}{3}}}{n} \sqrt{S_0} \quad (2)$$

Onde: Q (m^3/s) é a vazão; A (m^2) é a área molhada; R_h (m) é o raio hidráulico; S_0 (m/m) é a declividade entre as células contribuinte e receptora; n ($\text{m}^{-1/3}/\text{s}$) é coeficiente de Manning (TELLES, 2014).

Os traços vermelhos na Figura 1 representam a circulação da água nos canais e fisicamente são descritas pela Equação 3 a seguir:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q^2}{A} \right] + gA \left[\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q^2 n^2}{A^2 R_h^{4/3}} \right] = 0 \quad (3)$$

Onde: Q (m^3/s) é a vazão; t (s) é o tempo; A (m^2) é a área molhada; x (m) é o comprimento do trecho do canal; g (m/s^2) é a aceleração da gravidade; H (m) é a altura da coluna d'água; n ($\text{m}^{-1/3}/\text{s}$) é coeficiente de Manning; R_h (m) é o raio hidráulico (RODRIGUES E LUGON JÚNIOR, 2012).

As setas amarelas na Figura 1 representam a chuva que demanda a bacia conforme definida pelo analista.

O sistema pode receber a descrição do relevo da bacia através da importação direta de arquivos texto das coordenadas X, Y e Z, extraídos de plantas no formato DWG, tanto topográficas como de Plantas Cadastrais Digitais (PCD) 1:2000 de áreas urbanas elaboradas por Aerolevantamentos. Dado a resolução e precisão dessas plantas, os MDT resultantes desses dados são ideais para as análises técnicas de MAP das áreas urbanas (BRASIL, 1984).

Metodologia

Selecionou-se o bairro Chácara Marilea do Município de Rio das Ostras – RJ, que sofre com alagamentos recorrentes devido à sua localização, com parte ocupando a planície de inundação do rio que dá nome ao município, e do qual dispúnhamos de levantamento topográfico convencional, realizado com finalidade de estudos de soluções para o problema (figura 2). Sua localização tem seu centro nas coordenadas geográficas Lat.: -22,50°; Long.: - 41,93°. Através do comando “list” do AutoCad, extraímos as coordenadas (UTM SAD 69) dos pontos levantados, as formatamos e adicionamos em projeto no MOHID Land para que o sistema construísse o MDT, a rede natural de drenagem e a delimitação da área de contribuição da bacia (figura 3). O relevo é representado por hipsometria.

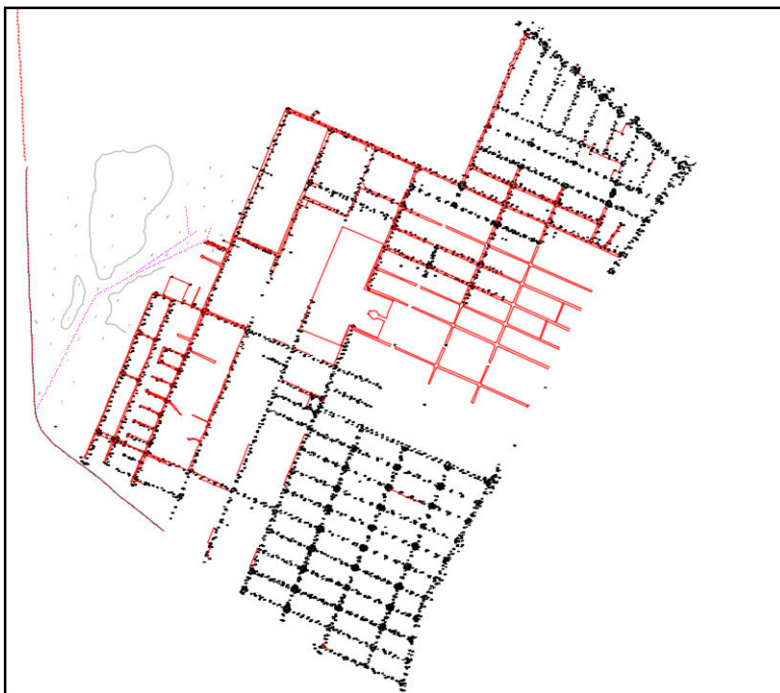


Figura 2: Representação da planta topográfica do arruamento do bairro Chácara Marilea.

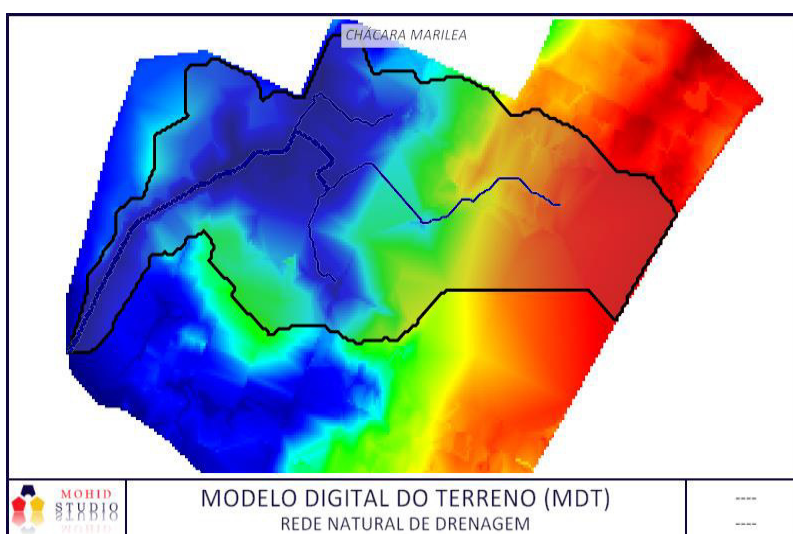


Figura 3: Imagem do MDT com rede natural de drenagem e limite da bacia de contribuição.

Adicionamos a imagem Google da região, a qual o MOHID recebe automaticamente, e onde omitimos o MDT para permitir a visualização dos caminhos preferências da água em relação ao uso atual do solo (figura 4). Dessa forma é possível delinear caminhos alternativos para canais de drenagem em áreas desocupadas.

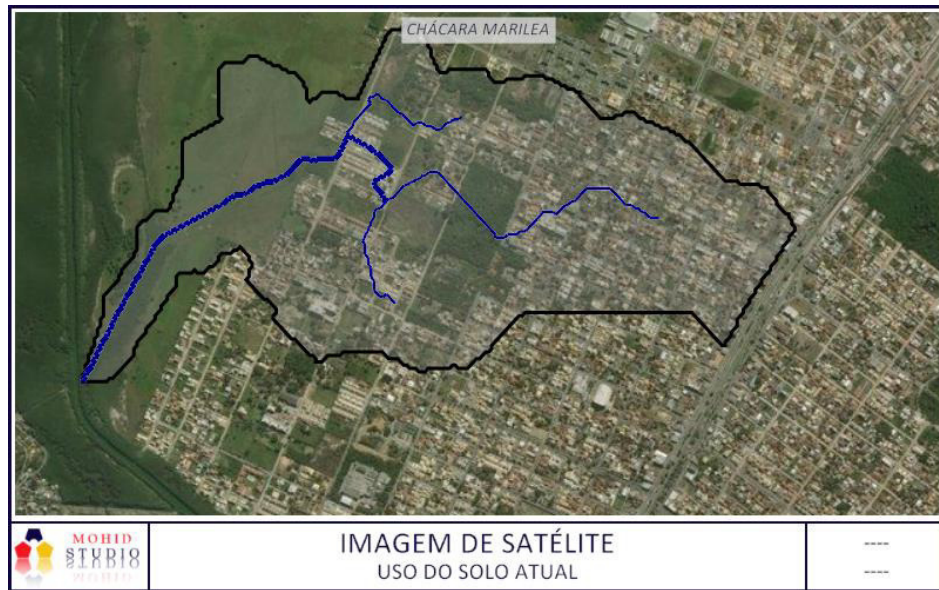


Figura 4: Imagem da bacia com a rede natural de drenagem e o uso atual do solo.

No projeto assim arranjado, indicamos ao sistema as dimensões do canal principal e do secundário próximos da realidade atual, respectivamente (8 x 1,2) m e (0,60 x 0,60) m, configuramos o tempo de simulação, a posição de medidas da vazão no exutório, a simplificação do modelo por desconsideração do meio poroso, daí a adoção da chuva efetiva, ou seja, a parcela que escoar superficialmente, tal como no clássico método do Soil Conservation Service (SCS), o coeficiente de Manning dos canais = 0,030 (canais sem revestimento) e da bacia considerada impermeável = 0,017, este último coerente com o escoamento para os canais em superfícies urbanas revestidas. Vários outros parâmetros foram definidos com as opções default do sistema.

Estimamos a chuva de projeto com TR 10 anos, através da equação de chuva de Cabo Frio: $I = \frac{697 TR^{0,184}}{(t+6)^{0,756}}$, desenvolvida da original de Pfafestterter (1982). Verificamos que os valores calculados de alturas de chuvas x tempo ficaram bastante próximos dos valores consignados nos gráficos originais de Pfafestterter (1982). Separamos a chuva excedente, adotando-se Curva Number (CN) = 88 e 30% de área permeável, conforme preconizado para aquela região no Plano Diretor de Drenagem Urbana de Rio das Ostras. Aplicamos essa chuva na bacia em análise para verificar o comportamento do escoamento no cenário atual, sem intervenções. O simulador MOHID gerou as imagens do escoamento a cada 7 minutos após o início da chuva (figura 5).

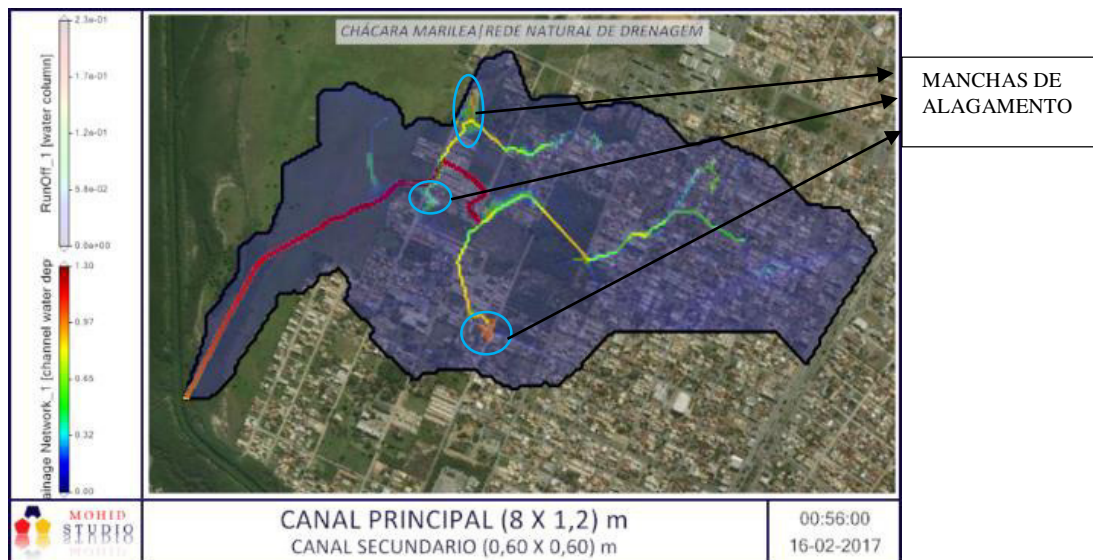


Figura 5: Imagem do momento de pico do escoamento da chuva (56 minutos) TR 10 anos, sem intervenção.

Observa-se as alturas das lâminas d'água presentes nas células a cada intervalo do tempo, através das escalas de cores construídas e apresentadas pelo simulador MOHID no lado esquerdo da figura 5. Analisando-se a distribuição das cores pela bacia em estudo conclui-se que os canais transbordariam, 10 cm o principal e 37 cm o secundário, e ocorreriam alagamentos com lâminas da ordem de 23 cm. Tais resultados são compatíveis com o que se observa historicamente na área e representam convenientemente o problema para qual se demanda uma solução. Inclusive,

devido à ausência de sistemas de drenagem naquela região, as lâminas d'água permanecem por longo tempo. Apresenta-se a figura 5a com as imagens das escalas de cores, ampliadas e horizontalizadas, com as lâminas d'água nos canais e nas superfícies da bacia de contribuição, com as quais se pode quantificar as amplitudes do problema.

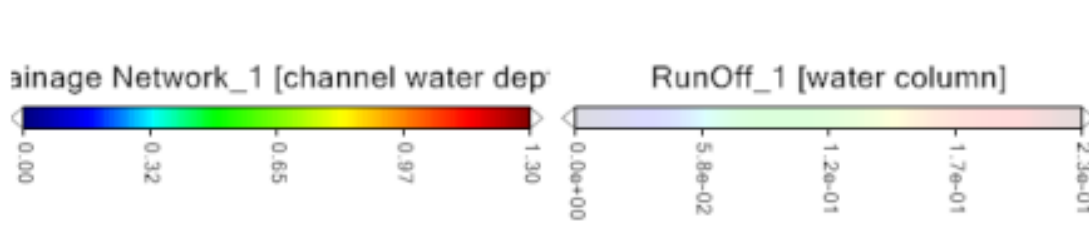


Figura 5a: Imagens das escalas de cores da figura 5 ampliadas para apresentação dos valores ali consignados.

Diante desta constatação procuramos alternativas que conciliassem soluções para as áreas críticas e as oportunidades de locação de novos canais em terrenos desocupados, pois nestes poderão ser usados os instrumentos de gestão do desenvolvimento urbano previstos no Estatuto das Cidades e, em decorrência, também presentes no Plano Diretor do Município de Rio das Ostras (LEI 004/2006). Também projetamos um greide conveniente, mas tecnicamente viável, para uma rua secundária, de forma que comportasse ali uma galeria celular (2 x 1) m. Dessa forma, espera-se que seja resolvido o escoamento das águas acumuladas na mancha de alagamento mais ao sul até o início do canal principal. Para tanto, inserimos pontos com cotas convenientes, modificando artificialmente o MDT através de pequenas e tecnicamente viáveis alterações do relevo, acarretando o melhor posicionamento da nova rede de drenagem para a bacia. Obtivemos o projeto da figura 6.

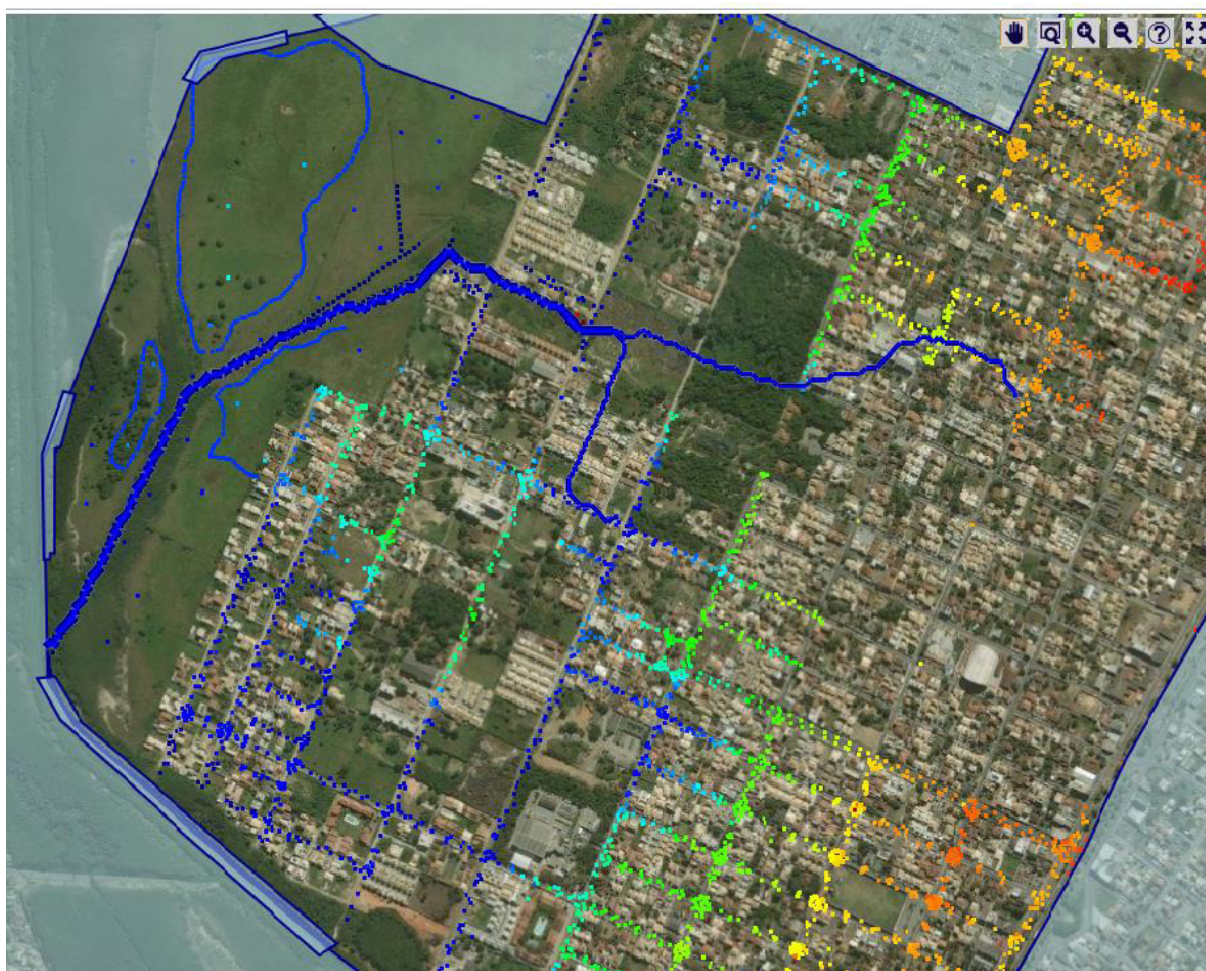


Figura 6: Imagem da configuração dos novos canais projetados para minimizar os problemas de MAP.

Depois de algumas tentativas sem sucesso convergiu-se para a solução na qual indicou-se ao sistema as dimensões do canal principal (o mais largo) com seção trapezoidal de base média 9 m e profundidade de 1,8 m e os secundários com seção retangular (2 x 1) m. Parte desse último terá que ser em galeria pois ocupa leito de rua existente.

Resultados e Discussão

As simulações dos escoamentos das chuvas de projeto com TR 10, 20 e 50 anos, nas condições estabelecidas, acarretaram as animações de imagens diferidas no tempo do evento simulado, com as quais se podem verificar as situações de picos dos escoamentos conforme apresentamos através da figura 7 (TR 10 anos), figura 8 (TR 20 anos) e figura 9 (TR 50 anos) todas produzidas pelo simulador MOHID Land. Verifica-se que a altura máxima da lâmina d'água no canal principal nunca ultrapassa 1,66 m para a chuva de projeto com TR 50 anos. Portanto chuvas com TR_s iguais ou menores que 50 anos não transbordarão do canal com 1,80 m de profundidade conforme o cenário projetado.

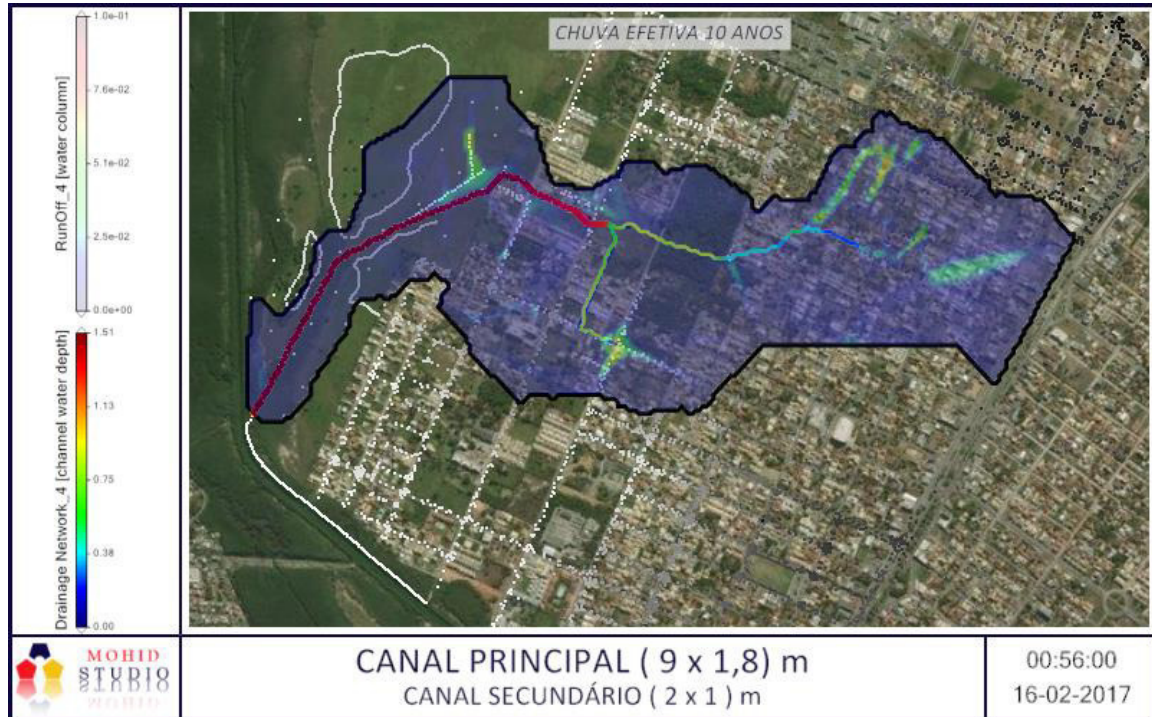


Figura 7: Imagem do momento de pico do escoamento da chuva de projeto TR 10 anos.

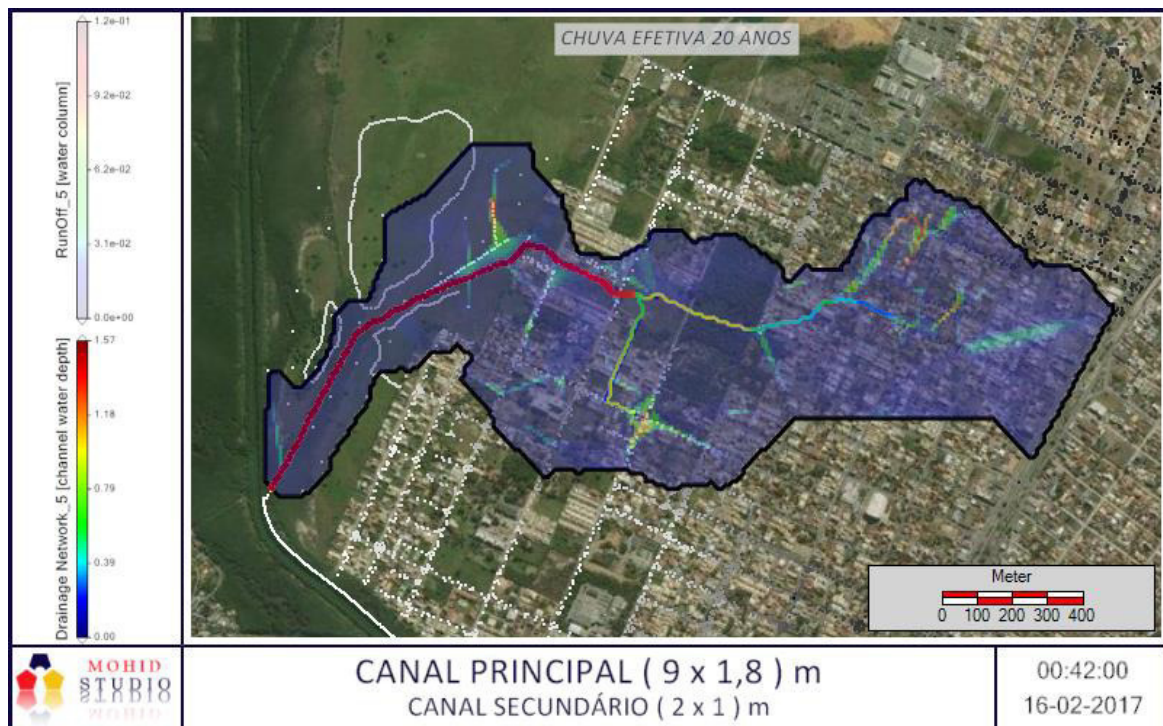


Figura 8: Imagem do momento de pico do escoamento da chuva de projeto TR 20 anos.

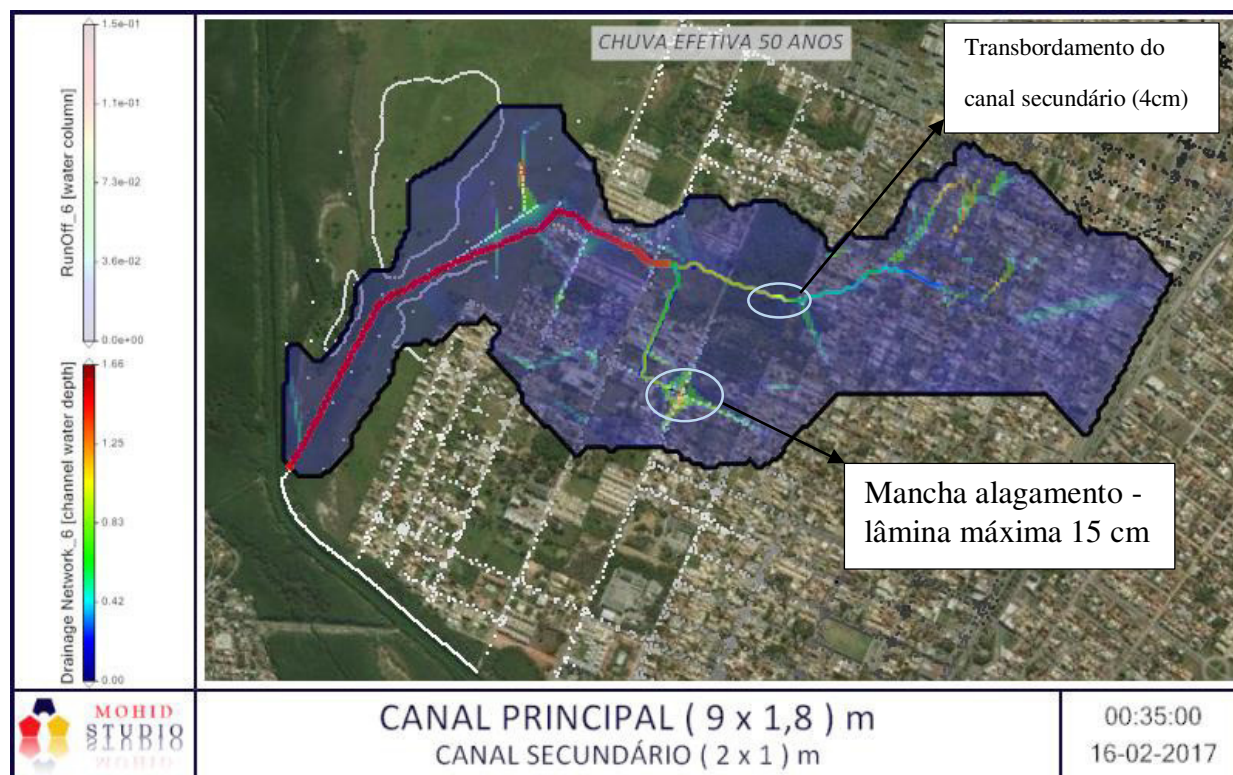


Figura 9: Imagem do momento de pico do escoamento da chuva de projeto TR 50 anos.

No entanto, observa-se uma região do canal secundário cuja lâmina d'água atinge pouco mais que 1 m, transbordando-o ali, porém não acarretará consequências relevantes por tratar-se de área protegida de recarga de aquífero, pertencente ao Parque Municipal dos Pássaros. Também prevalece uma região com mancha de alagamento com altura máxima da ordem de 15 cm para chuva com TR 50 anos. É provável que o prolongamento de uns poucos metros do início do canal secundário (galeria), bem ali, seja suficiente para solucionar o problema remanescente. Os tempos em que ocorrem os momentos críticos dos escoamentos são apresentados no canto inferior direito das respectivas imagens. Por análise das 103 imagens das simulações verifica-se que os tempos de permanência das lâminas d'água dos setores alagáveis são inferiores a 1 hora, o que seria aceitável numa condição de chuva intensa, por tanto extraordinária. Observa-se que os picos ocorrem mais rapidamente conforme aumentam os TR, o que é coerente com a realidade.

Os procedimentos acima descritos viabilizaram a análise do fenômeno “chuva intensa” com vistas a minimização das lâminas de alagamento, numa bacia urbana muito plana e com altitudes próximas ao nível do mar. No entanto observou-se a prevalência de algum alagamento em determinados setores, o que vai requerer novas opções de solução. No momento, pode-se intuir que a solução talvez seja o ajuste da posição ou do sistema de captação do início da galeria projetada, ou a construção de alguma estrutura para armazenamento de cheia em área a montante de onde se verificou o problema ou ainda alguma medida não estrutural. De qualquer forma observa-se que o canal principal tem uma folga de 0,14 m para a chuva de TR 50 anos que aumenta para TR 20 anos e chega à TR 10 anos com folga de 0,29 m. O que sugere que se poderia testar cenários com canais de menores capacidades procurando um ajuste que equilibrasse custos e benefícios.

As manchas de alagamentos se restringem à uma pequenas área com lâminas d'água máxima próximas de 0,10 m, 0,12 m e 0,15 m, respectivamente para TR 10, 20 e 50 anos. Estes valores podem orientar o Gestor Municipal quanto ao estabelecimento de cotas de soleiras, especificamente localizadas, para novas construções e/ou reformas das existentes. Também, as extensões e alturas das manchas de alagamento podem indicar os volumes d'água em trânsito que poderiam ser amortecidos em estruturas para esse fim, ou por estabelecimento de legislação quanto à limites de impermeabilização dos lotes, ou por aplicação de pavimentos permeáveis nos logradouros públicos, visto que todas as áreas com problemas ainda não tiveram seus logradouros públicos pavimentados.

Os tempos de cada simulação ficaram próximos de 28 minutos com simulador MOHID Land versão 2016 operando num computador com sistema operacional Windows 7 - 64 Bits, Processador AMD Athlon (tm) 64 x 2 Dual Core Processor 4600+ 2.40 GHz – Memória RAM: 4 GB

Apresentam-se a seguir as figuras 10, 11 e 12 com os gráficos de vazão x tempo no exutório do canal principal, no rio das Ostras. Tais valores poderiam ser comparados com resultados obtidos por métodos clássicos de transformação de chuva em vazão.

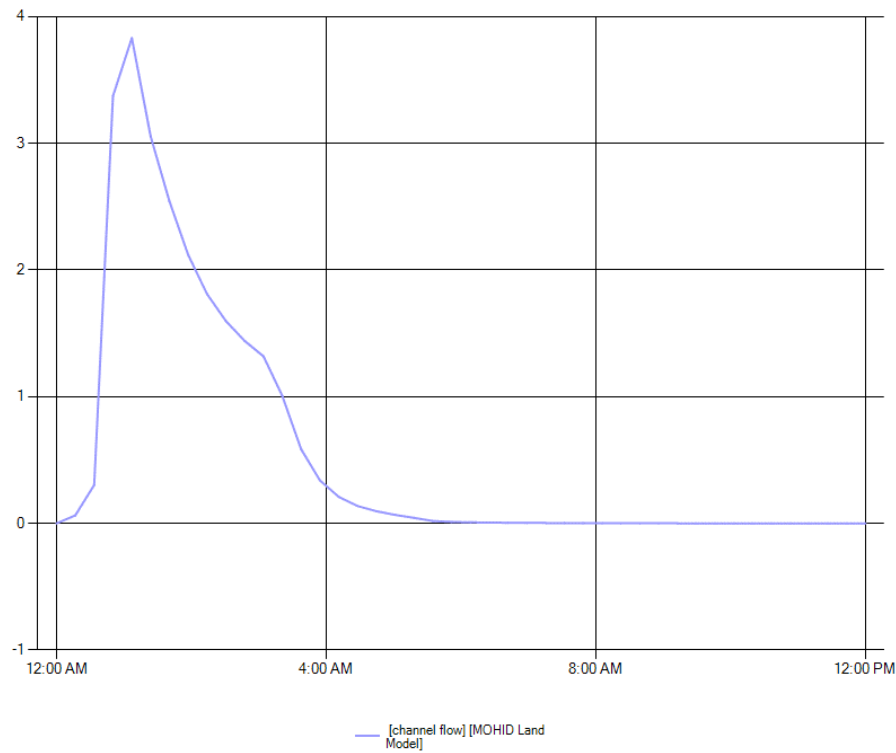


Figura 10: Gráfico Vazão (m³) x Tempo (segundos) no exutório do canal projetado, TR 10 anos.

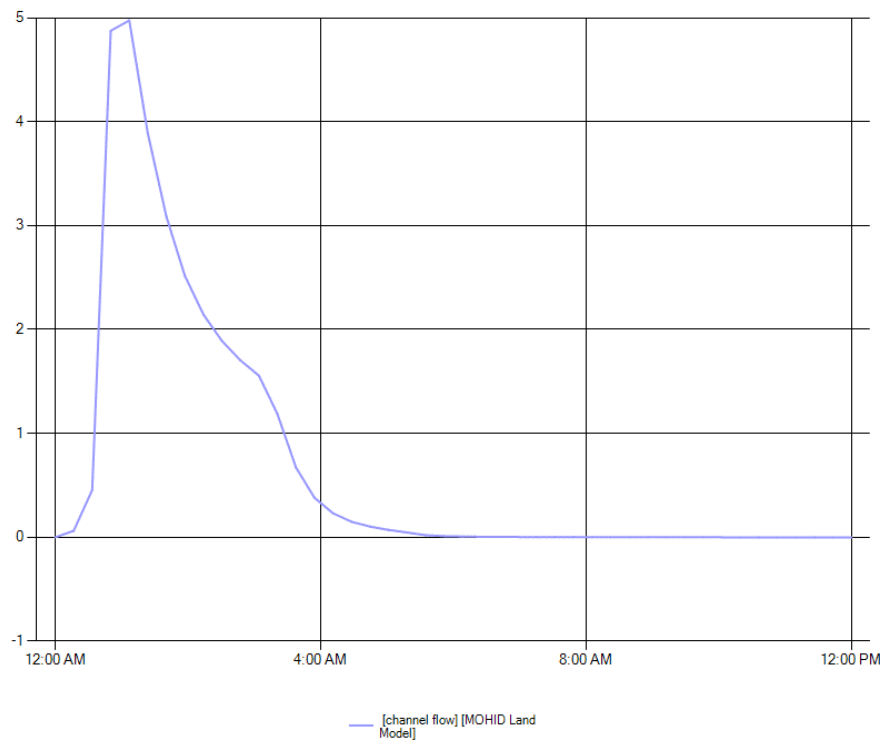


Figura 11: Gráfico Vazão (m³) x Tempo (segundos) no exutório do canal projetado, TR 20 anos.

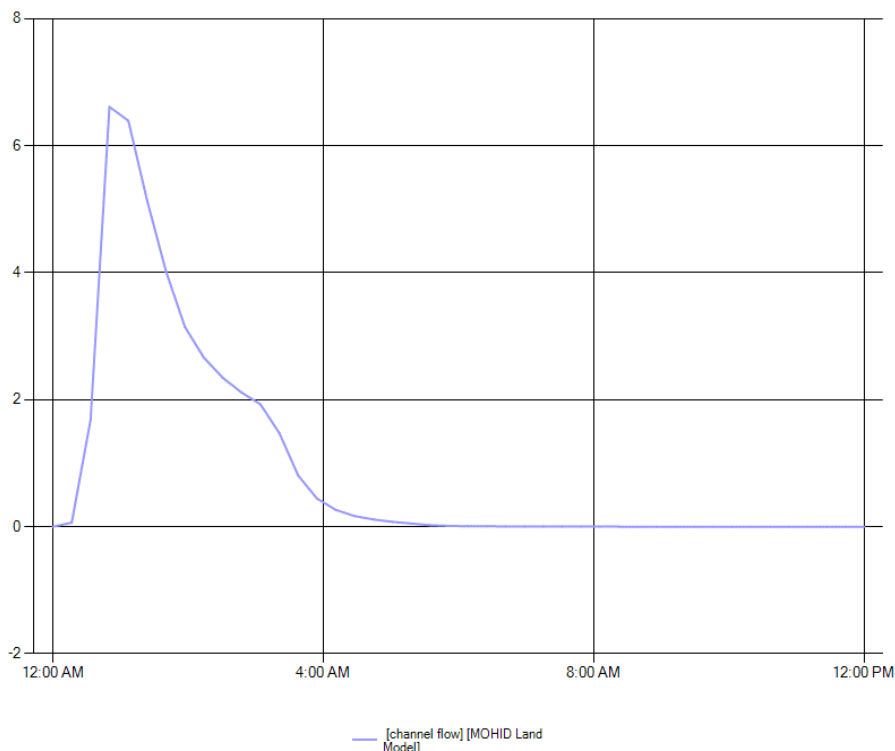


Figura 12: Gráfico Vazão (m³) x Tempo (segundos) no exutório do canal projetado, TR 50 anos.

Considerações Finais

A metodologia aplicada neste trabalho poderá dar suporte à soluções de MAP até mesmo para setores localizados onde ocorrem problemas. Muitas cidades se desenvolveram em estuários por questões de proximidade com portos, em muitas delas se observam ocupações de áreas de domínio esporádico das vazões extremas de seus cursos d'água. São problemas de difícil abordagem por várias razões, desde a falta de dados até questões institucionais e tecnológicas. Essas duas últimas, pelo menos no Brasil, têm agora melhores condições para seu enfrentamento. Isto, devido às Lei das Águas e ao Estatuto da Cidade e as legislações deles decorrentes, como também, devido à possibilidade de se praticar mais intensamente modelos de base física, através de modelagem computacional do MAP que traz a expectativa de maior desenvolvimento e disseminação desta metodologia no meio técnico.

Este trabalho mostra que os Analistas de MAP de áreas urbanas estuarinas dispõem de poderosa ferramenta para a busca de soluções mais econômicas e com menores custos para o próprio desenvolvimento da solução. Baseados no uso de solo atual da região em estudo pode se verificar à priori, quais áreas são vocacionadas para o uso como faixa de domínio das águas pluviais e propor sua preservação para tanto quando ainda desocupadas. Ou, em caso contrário, procurar a alternativa mais econômica para as soluções requeridas.

Uma vez indicada a melhor solução pelos procedimentos descritos neste trabalho, deveria ser elaborado um projeto executivo baseado em topografia detalhada da faixa eleita, com sondagem de pontos do percurso, principalmente os elevados, para se avaliar a constituição do solo, bem como se verificar as cotas de soleiras das edificações nas áreas críticas de alagamentos, confirmando ou não a adequação da faixa eleita. Todas as interferências com o projeto devem ser cadastradas e consideradas na elaboração do projeto executivo.

Durante o nosso desenvolvimento no uso do MOHID Land para aplicações em MAP, verificamos que também é possível adotar as PCD 1:2000 como base topográfica para o modelo hidrodinâmico. Estas existentes em várias cidades, pois fazem parte dos mapeamentos sistemáticos e servem à estudos de urbanismo em geral. Outras escalas de mapeamento maiores ou menores podem também servir de base para os projetos, desde que se atende para limitações decorrentes de detalhamento de relevo.

Agradecimentos

Agradecemos ao PPEA do IFF Macaé, pelo empenho de seus docentes e funcionários e pelo incentivo ao desenvolvimento deste trabalho e à Prefeitura Municipal de Rio das Ostras pelo apoio e estímulo ao meu desenvolvimento profissional.

Referências Bibliográficas

- BRASIL - Decreto nº 89.817; 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.
- BRASIL. Lei Nº 9.433; 1984. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos.
- BRASIL. [Lei nº 10.257; 2001](#). Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana.
- Braunschweig, F.; Brito, D.; Fernandes, L.; 2016. MOHID Studio Quick Start Guide for MOHID Land.
- Lei Complementar nº 004/2006; 2006. Dispõe sobre Plano Diretor, o sistema e o processo de planejamento e gestão do desenvolvimento urbano do Município de Rio das Ostras.
- Leitão, P.C; Ramos, T.B.; Domingos, T.; Neves, R.; 2015. MOHID Land - Porous Media, a Tool for Modeling Soil Hydrology at Plot Scale and Watershed Scale. The Open Hydrology Journal, v. 9, pp. 1-12.
- MARETEC; 2012. Descrição do MOHID.
- Pfafstetter, O; 1982. Chuvas Intensas no Brasil. Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS).
- Rodrigues, P. P. G.W; Lugon, Júnior. J.; 2012. Uso de Modelos Matemáticos na Gestão de Recursos Hídricos.
- Souza, V. C. B.; Moraes, L. R. S.; Borja, P. C.; 2013. Déficit na Drenagem Urbana: buscando o entendimento e contribuindo para a definição. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais - Gesta, v. 1, n. 2, pp. 162-175.
- Telles, W. R.; 2014. Previsão do comportamento hidráulico de um rio com base na estimativa de coeficientes que controlam seu escoamento. Estudo de caso: Rio Bengalas, Nova Friburgo-RJ. Tese de Doutorado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro- Centro de Tecnologia e Ciências, Instituto Politécnico.
- Tucci, C. E. M; 2002. Gerenciamento de Drenagem Urbana. Revista brasileira de Recursos Hídricos, v. 7 nº1 Jan/Mar 2002, pp.5-27

ARTIGO CIENTÍFICO 2

AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DAS MANCHAS DE ALAGAMENTO NA ÁREA URBANA DE MACAÉ DURANTE AS CHEIAS DO RIO

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF FLOODING STAINS IN THE URBAN AREA OF MACAÉ DURING THE FLOODS OF THE RIVER

Marcos da Silva Lourenço - IFFluminense/PPEA

Yasmim Faturine – IFFluminense

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico de escoamento de chuvas extremas na área urbana de Macaé – RJ. A cidade é geograficamente situada no estuário do rio que lhe dá nome. Essa condição, naturalmente impõe desafios para o tratamento de questões relacionadas ao manejo de águas pluviais, devido às baixas declividades da planície fluvio marinha que se urbanizou para abrigar as atividades econômicas ali desenvolvidas. Uma densa rede de canais afluentes para o rio Macaé foi sendo construída para drenar mais rapidamente as águas que se acumulavam por longos períodos nas planícies de inundação durante as estações chuvosas. Mas a configuração atual desse sistema tem se mostrado insuficiente para conciliar o uso atual do solo com a capacidade de escoamento do sistema de canais. Consequentemente, alagamentos recorrentemente impõem ao município severas perdas econômicas. Diante deste cenário, o Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras, determina o aprofundamento de estudos para o enfrentamento deste problema, apontando inclusive a necessidade de utilização de descrição topográfica mais detalhada no desenvolvimento de tais trabalhos. Nesse contexto se desenvolve o trabalho ora apresentado. Com uso do simulador computacional Mohid Land foi construído um modelo hidrodinâmico de escoamento de chuva extrema baseado na descrição topográfica pré-existente da área urbana de Macaé. A performance do modelo foi avaliada por comparação de valores simulados com os efetivamente medidos durante os alagamentos ocorridos em 10/03/2018. Após pesquisa para determinação e aplicação das vazões decorrentes da chuva que os causaram, bem como das variações de maré no período do evento, executou-se a simulação do evento real. Os resultados de abrangência e espessura de lâminas d'água dos alagamentos ocorridos e outros valores de variáveis de estado, foram comparados com os valores

de nível d'água medidos na ocasião da cheia evidenciando proximidade entre os valores simulados e os medidos, indicando a viabilidade do método.

Palavras chave: Mohid. Simulação computacional. Modelagem hidrodinâmica. Enchente.

ABSTRACT

In this work the methodological procedures used in the development of a hydrodynamic model of extreme rainfall flow in the urban area of Macaé - RJ are presented. The town is geographically situated on the estuary of the river that gives it its name. This condition naturally poses challenges for the treatment of issues related to the management of stormwater, due to the low slopes of the marine fluvial plain that has been urbanized to house the economic activities developed there. A dense network of tributary channels to the Macaé river was being built to drain more rapidly the waters that accumulated for long periods in the flood plains during rainy seasons. But the current configuration of this system has proved insufficient to reconcile the current use of the soil with the flow capacity of the channel system. Consequently, floods repeatedly impose severe economic losses on the county. In view of this scenario, the Water Resources Plan of the Macaé and das Ostras Hydrographic Region determines the deepening of studies to address this problem, including the need to use a more detailed topographic description in the development of such works. In this context the work presented here is developed. Using a Mohid Land computational simulator, a hydrodynamic model of extreme rainfall flow was constructed based on the preexisting topographic description of the urban area of Macaé. The performance of the model was evaluated by comparison of simulated values with those actually measured during the floods that occurred on 10/03/2018. After a research to determine and apply the flows due to the rain that caused them, as well as the tidal variations during the event period, the simulation of the actual event was performed. The results of flood coverage and thickness occurred and other values of state variables were compared with the water level values measured at the time of flooding, showing proximity between the simulated and measured values, indicating the viability of the method.

Keywords: Mohid. Computational simulation. Hydrodynamic modeling. Flood

1. INTRODUÇÃO

O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (PRH RH-VIII) (SEA/INEA, 2014) desenvolveu um diagnóstico da situação atual, visando delinear as intervenções necessárias para assegurar água em quantidade e qualidade necessária a seus usos múltiplos. Entre os diversos relatórios que constituem o Plano de Bacia assim instituído, deve-se destacar para o apêndice do Relatório de Cheias, apresentando uma revisão dos principais estudos de cheias realizados para a região (SEA/INEA, 2013).

A área urbana do município de Macaé é o local no qual foi aplicada a metodologia para análise do escoamento de chuvas extremas proposta neste trabalho. Conforme a divisão estabelecida pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERHI) e apresentada na figura 13, esta área situa-se na Unidade Hidrográfica de Planejamento (UHP) VIII-a1, uma das três UHPs da Região Hidrográfica VIII (RH VIII) (COPPETEC, 2014).

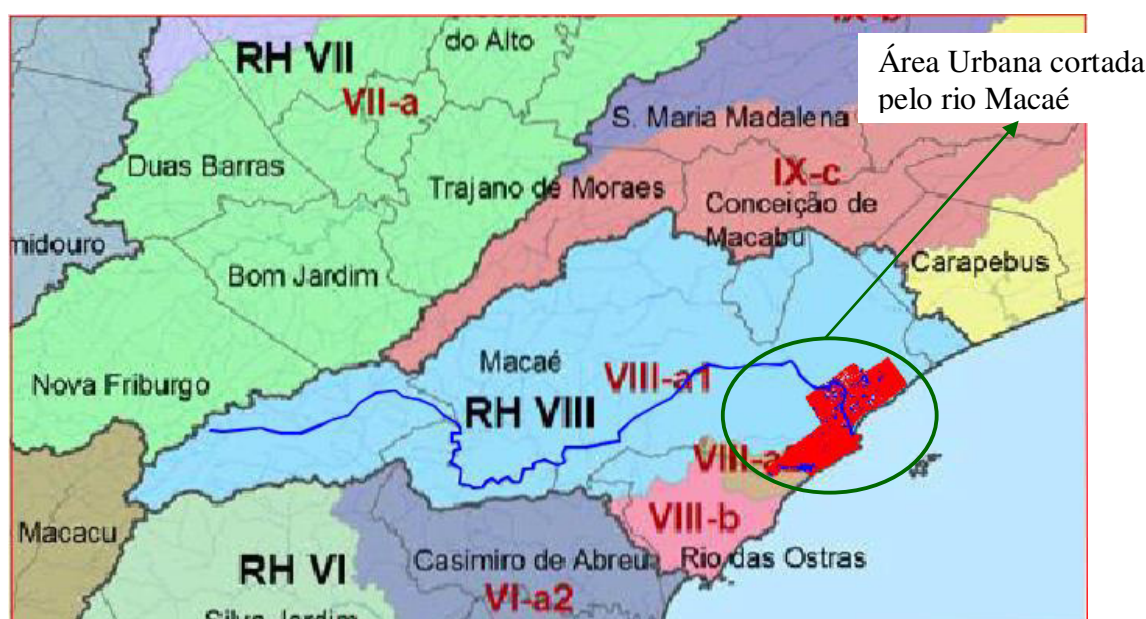


Figura 13 – Divisão das UHPs da RH-VIII: UHP VIII-a1 (bacia do rio Macaé); UHP VIII-a2 (bacia do rio Imboassica) e UHP VIII-b (bacia do rio das Ostras), (COPPETEC, 2014). Adaptação do autor.

O Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (PRH-Macaé/Ostras), ou Plano de Bacia (PB), foi desenvolvido e está em implementação. Visa o levantamento de informações e o delineamento das intervenções relacionadas com a gestão ambiental da bacia de modo a promover a recuperação, a conservação e o planejamento do uso dos recursos hídricos da RH VIII. Foi elaborado entre os anos 2011 e 2014 em consonância com a Lei 9.433/1997

(SEA / INEA, 2014). Dessa forma se constitui como o instrumento legal para gestão das políticas públicas voltadas também ao manejo de águas pluviais (MAP) (BRASIL, 1997).

Considerando-se as ações descritas nas estratégias de implementação do PRH RH-VIII, objetiva-se com o presente estudo oferecer contribuições para compor as ações denominadas “Proposta de intervenções estruturais visando ao controle de cheias” e “Proposta de intervenções não estruturais visando a mitigação dos impactos das cheias”, respectivamente H1 e H2 (SEA/INEA, 2014).

Com uso das informações de altimetria contidas em Planta Cadastral Digital (PCD) 1: 2000 da área objeto, após ajustes e adoção de algumas hipóteses simplificadoras descritas em seções posteriores, foi possível elaborar a modelagem computacional do escoamento da chuva extrema da área urbana de Macaé usando-se o simulador Mohid Land.

Utilizando tal modelo, foi possível analisar a magnitude de alagamentos na área urbana de Macaé como resultado da ocorrência simultânea de precipitações extremas na região alta da Bacia Hidrográfica e das variações cíclicas dos níveis de marés astronômicas, que interferem no escoamento do canal principal para o oceano, e por consequência influenciam as alturas de lâminas d’água e o tempo de permanência de alagamento na área urbana. Assim sendo, as ações de mitigação de cheias urbanas na região costeira do município de Macaé devem obrigatoriamente considerar a soma destes efeitos (SEA/INEA, 2013), portanto necessitam de uma visão ampla e integrada da Bacia Hidrográfica para seu entendimento mais completo.

2. METODOLOGIA

2.1. Análise dos Relatórios do PRH RH-VIII

O PB produziu resultados em forma de Relatórios Técnicos (CBH MACAÊ, 2018). Dos estudos sobre cheias e de caracterização física da Bacia do rio Macaé para o PB extraem-se conclusões relevantes que, após confirmação de suas consistências, foram adotadas como hipóteses para a construção do modelo hidrodinâmico desenvolvido neste trabalho, a saber:

1. As cheias na área urbana são ocasionadas pela maior pluviosidade das regiões serranas da bacia associada à forma do perfil do rio Macaé, cuja declividade passa de muito forte no alto da bacia à quase nula na área urbana (ASSUMPCÃO; MARÇAL, 2012; DAVIS; NAGHETTINI, 2000;

SEA/INEA, 2013). Tal condição acarreta acúmulo de grandes volumes nas planícies de inundação presentes em grande parte da área urbana (FGV, 2004; SEA/INEA, 2013).

2. O gleissolo é o solo de constituição predominante das planícies de inundação adjacentes ao rio Macaé na área urbana. Sua característica em termos de reposta hidrológica é o baixo coeficiente de permeabilidade e a ocorrência deste tipo de solo associado à lençol freático sub-aflorante (EMBRAPA SOLOS, 2003; SEA/INEA, 2012).
3. A variação cíclica do nível do mar pelas marés afetam o escoamento das cheias (AMARAL; ROSMAN; AZEVEDO, 2004; SEA/INEA, 2013).
4. Para o aprofundamento dos estudos de cheias na área urbana recomenda-se a utilização de um modelo capaz de representar o processo de inundação da planície e a influência da maré. Para tanto, necessita-se de uma base topográfica mais detalhada do que as cartas 1:50.000 do IBGE e Modelo Digital de Elevação (MDE) do *Shutter Radar Topography Mission* (SRTM), (FGV, 2004; SEA/INEA, 2013).

Esta última conclusão do PB justifica a aplicação da Planta Cadastral Digital (PCD) 1:2000 da área urbana de Macaé como base topográfica essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Esse material foi disponibilizado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense (PPEA-IFF), em 2013, por ocasião de curso de extensão oferecido aos Técnicos do Núcleo de Geoprocessamento da Secretaria de Ambiente e Sustentabilidade da Prefeitura de Macaé.

A PCD 1: 2000 foi confeccionada por restituição digital do aerolevantamento da área urbana. Por suas características, observa-se compatibilidade com os protocolos recomendados nas Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (BRASIL, 1984), conferindo-lhe assim a qualidade técnica adequada para produção do Modelo Digital de Terreno (MDT) da área urbana.

Entre os protocolos para confecção desse tipo de base cartográfica, as Instruções Reguladoras acima citadas impõem explicitamente (BRASIL, 1984): (i) amarração à Rede Altimétrica de Alta Precisão do IBGE; (ii) o geo-referenciamento; (iii) a descrição cabal do relevo; e (iv) a representação de todos os detalhes visíveis nas imagens aéreas.

Portanto, a PCD 1: 2000 da área urbana de Macaé (Figura 14) pode suprir a necessidade de uma base topográfica com resolução suficiente para o aprofundamento dos estudos de cheias na área urbana de Macaé, conforme recomendação do PB (SEA/INEA, 2013, p. 30), servindo de base para o modelo hidrodinâmico em desenvolvimento. Na figura 14 apresentam-se somente as camadas da PCD 1: 2000 de interesse ao projeto (pontos cotados, canais principais e arruamento).

Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS (MGH) (SEA/INEA, 2013). Barboza (2014), também produziu resultados semelhantes aplicando o consagrado método do Soil Service Conservation (SCS).

Tal convergência de resultados, aliada a disponibilidade do modelo de Tavares (2017), para análises, discussões e uso neste trabalho, viabilizaram a adoção de uma estratégia para prover a vazão da chuva extrema afluyente à área urbana pelo rio Macaé. Assim, essa vazão é um forçante que substitui a chuva extrema no modelo de simulação da quantificação da magnitude e espacialização das cheias na área urbana de Macaé, o objetivo principal do trabalho ora apresentado.

2.3. Simulador Mohid Land

O Mohid Land é a ferramenta computacional que foi utilizada para o alcance dos objetivos propostos. Trata-se de um aplicativo que juntamente com Mohid Water e Mohid River integram o sistema MOHID (Water Modelling System©). Esse último é um *software* versátil para simulação computacional de fenômenos ambientais de diversos tipos e escalas, cuja versão atual denomina-se MOHID Studio. Em Maretec (2012) e Braunschweig et al. (2016) encontram-se as descrições de suas funcionalidades e tutoriais de operação.

Na fase de construção do Modelo Digital de Terreno (MDT) e rede de drenagem, utilizou-se o MOHID GIS. Este aplicativo do antigo sistema MOHID é um sistema de informações geográficas capaz de gerir os dados das variáveis de espaço requeridas pelos programas numéricos do MOHID (AREIZAGA, 2012).

Atualmente esta função foi incorporada no MOHID Studio. Porém, devido à complexidade da rede de canais com declividades muito baixas, optou-se pelo uso do MOHID GIS pela maior facilidade e eficácia dos procedimentos para construção da rede de drenagem coerente com a realidade. Em Braunschweig et al. (2004) encontra-se um histórico da evolução do sistema, desde 1985, e as características técnicas de sua arquitetura computacional.

O simulador Mohid Land permite sua aplicação em diversos fenômenos ambientais que ocorrem na porção continental do planeta. Tal característica, se por um lado agrega a vantagem de reunir numa mesma plataforma várias funcionalidades, por outro lado exige do usuário o conhecimento prévio do referencial teórico e as práticas consagradas sobre o tema de seu projeto, confirmando o que enfatizou Rosman (2001) *apud* Amaral (2003). Dessa forma se poderá reconhecer, no *software* multifuncional, o ferramental disponível para desenvolver seu projeto de pesquisa, limitando o espaço operacional no qual o usuário deve concentrar seus esforços para aprofundar o conhecimento de sua funcionalidade.

2.4. Base Topográfica

A aplicação do método proposto é viabilizada quando se dispõe de base topográfica com resolução adequada para produzir um modelo hidrodinâmico em cujos caminhos das águas sejam o mais próximo possível da realidade. Assim sendo, iniciaram-se os estudos com uma primeira análise da PCD 1: 2000 da área urbana de Macaé, em estação gráfica AutoCad®, isolando-se as camadas que representam a altimetria (curvas de nível e pontos cotados), bem como a hidrografia e o arruamento, pois são esses os elementos que interferem objetivamente na construção do MDT e Rede de Drenagem.

Assim, a primeira análise da PCD 1: 2000 evidenciou que algumas hipóteses simplificadoras poderiam ser adotadas sem prejuízo dos resultados, por exemplo:

1. Apenas os pontos cotados já seriam suficientes para descrever o relevo com fins de construção do MDT, pois a altimetria da planície de inundação se define basicamente com pontos cotados.
2. Alguns meandros abandonados pelos cursos originais da rede hidrográfica após as obras de retificação, poderiam ser desconsiderados apesar de poderem ainda funcionar como vasos comunicantes entre os canais retificados ou construídos durante as cheias.
3. A rede hidrográfica atualmente implantada na área urbana apresenta-se muito ramificada através de valas de drenagem. Porém, suas pequenas capacidades de interferência com as cheias de chuvas extremas poderiam justificar sua desconsideração com vistas à simplificação do modelo hidrodinâmico.
4. O limite da restituição nos quadrantes Norte e Oeste se desenvolve pela planície de inundação do rio Macaé e do canal Jurumim. Portanto, nestes setores, a PCD 1: 2000 não abrange o limite da bacia de contribuição, o que reforça a necessidade e conveniência de obtenção e uso da vazão simulada através do Modelo de Tavarez (2017).

Adotando-se tais simplificações, realizou-se a edição da PCD 1: 2000, de forma que o simulador Mohid GIS recebesse os dados altimétricos para a construção automática do Modelo Digital do Terreno (MDT), o MDT sem depressões (MDT_ND) e a Rede de Drenagem coerentes com a realidade; respectivamente os arquivos MDT.dat, MDT_ND.dat e Drainage Network.dnt. Essas operações são iterativas visando o melhor resultado.

Para tanto, o arquivo extensão DWG com a PCD 1: 2000 foi aberto na estação gráfica AutoCad® e retirados os pontos cotados sobre pontes, os pontos das vias sobre bueiros, os pontos muito baixos que caracterizam depressões mais pronunciadas de áreas alagáveis, bem como ajustadas e/ou atribuídas cotas das margens de canais. As cotas restantes foram então extraídas através do comando

LIST do AutoCad e suas coordenadas X, Y e Z formatadas para inteligência do Mohid Land em editores de texto e/ou planilha do Office.

2.5. Construção do Projeto de Simulação Computacional

O modelo hidrodinâmico de escoamento de chuva extrema na área urbana de Macaé relatado neste trabalho pode ser subdividido sinteticamente com três grupos de dados de entrada, à saber: (i) a base topográfica onde o fenômeno ocorre; (ii) os forçantes que impulsionam a hidrodinâmica do escoamento; e (iii) as propriedades das simulações que regulam as condições específicas para o processamento. Denominou-se aqui estas definições de Projeto de Simulação Computacional.

Iniciando-se a construção do projeto no Mohid Land com os procedimentos normais para delineamento da bacia disponibilizados pelo *software*, observaram-se dificuldades no processamento do MDT para obtenção do MDT_ND, as quais se verificou estarem associadas ao relevo essencialmente plano, característico da planície de inundação do rio Macaé. No entanto, essa formação de relevo não implicou em dificuldades de obtenção do MDT_ND pelo MOHID GIS.

Esta opção foi então adotada, mas tal procedimento acarretou na necessidade adaptações do arquivo texto que define o MDT_ND produzido pelo GIS, visando sua compatibilização com o formato requerido para utilização do mesmo no Mohid Land. Verificou-se que os últimos só se diferenciam dos primeiros em relação às respectivas primeiras linhas e à descrição das células do *grid* que contêm as elevações.

Assim sendo, incluíram-se as primeiras linhas no MDT_ND criado pelo Mohid GIS, copiando-as de um MDT_ND qualquer criado pelo Mohid Land. Também deletou-se integralmente as duas seções que definem os endereços das células do *grid*, porque são desnecessárias e não reconhecidas pelo Land.

Resumidamente apresenta-se à seguir a sequência de operações para produção do projeto de simulação computacional:

- De posse do arquivo de pontos extraído da PCD 1: 2000 conforme preparado na operação descrita no item 2.2.1 e salvo na extensão xyz (ex.: pontos.xyz), abriu-se o *software* MOHID GIS e criou-se o projeto conforme as instruções disponíveis em Areizaga (2012). O projeto assim preparado habilitou o MOHID GIS a construir o MDT.dat, MDT_ND.dat e Drainage Network.dnt aplicando-se comandos iterativos. Na construção do MDT_ND adotou-se o cuidado de indicar ao sistema o valor da

declividade mínima compatível com as declividades quase nulas que se observa na realidade.

- Concluída esta etapa, avaliou-se o grau de representatividade do campo real da rede de drenagem criada pelo sistema. Como os caminhos reais do escoamento não estavam convenientemente reproduzidos no modelo computacional criado, analisou-se a altimetria na região onde o modelo se desviou da realidade e corrigiu-se suas cotas ou eliminou-se os pontos causadores do problema. Ajustou-se também os pontos das margens de montante do modelo para impor a representação da realidade, com inserção de cotas mais altas para que os fluxos sempre se conduzissem para jusante da bacia nas áreas dos limites de montante da restituição.
- Em seguida o novo arquivo pontos.xyz foi feito conforme o item 2.2.1 e substituído no projeto para gerar os novos MDT, MDT_ND e rede de drenagem (figura 15).

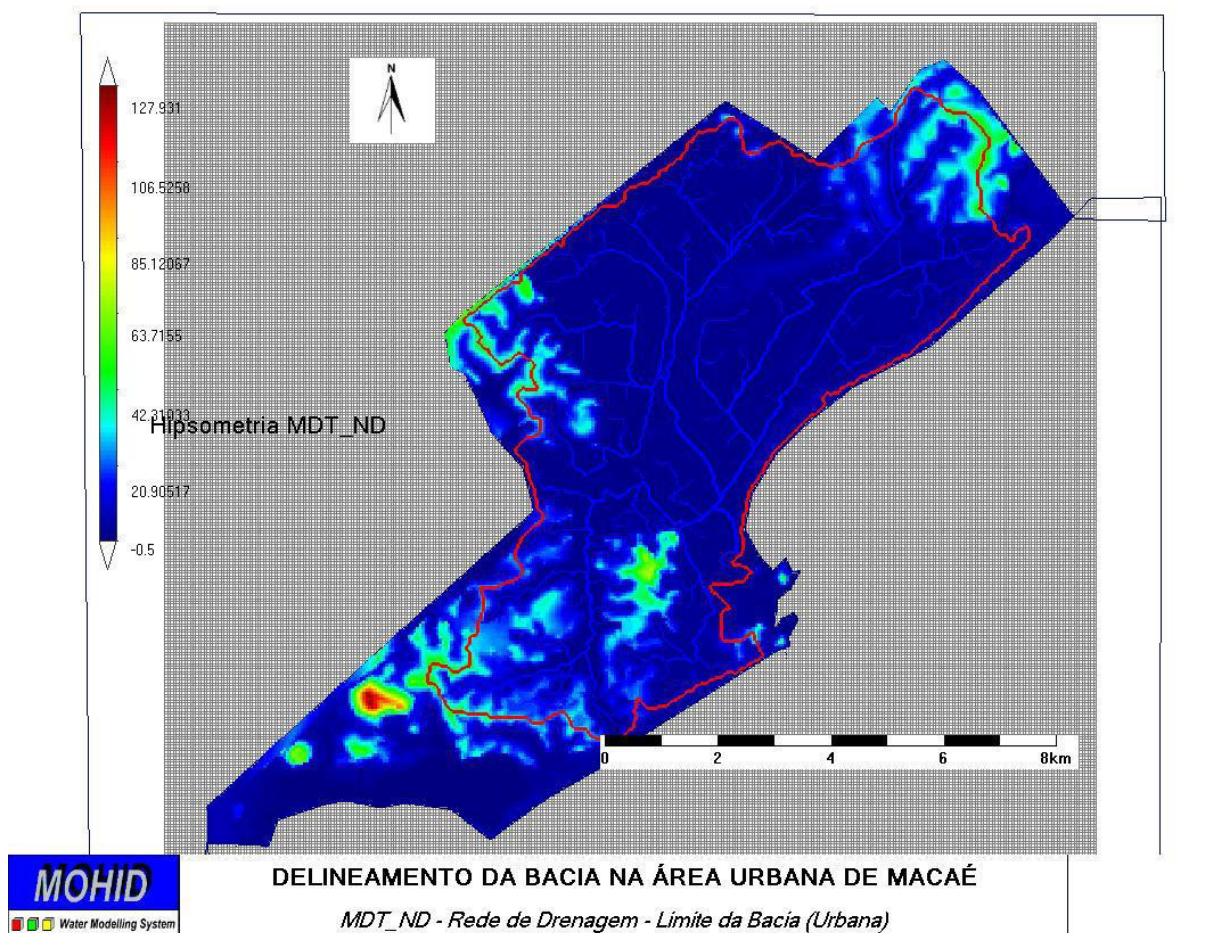


Figura 15 - Projeto com a base topográfica do modelo criada no MOHID GIS

Observação: há dois detalhes importantes para se produzir esses resultados no MOHID GIS e que não se encontram descritos nas instruções de operação ou na bibliografia. São eles:

1. O sistema só salva efetivamente as alterações produzidas antes do comando “Create Digital Terrain” (que cria o MDT.dat) quando o sistema é fechado e comandado para salvar as alterações dos arquivos modificado.
2. Para visualizar a solução proposta pelo sistema na tela com a toda a área em projeto, no nosso caso foi preciso aumentar em 20 vezes a espessura da rede de drenagem construída pelo sistema, alterando a respectiva propriedade do arquivo referido.

Uma vez que o resultado foi considerado satisfatório, passou-se para etapa seguinte: a criação do projeto no Mohid Land, cujas operações para implementação podem ser apreendidas pelo usuário, por meio de uma série de exemplos disponibilizados no próprio sistema. Também em Braunschweig *et al.* (2016) encontram-se as instruções para operação do sistema.

Neste caso apresentado, abriu-se a tela do sistema MOHID Studio, criou-se o projeto definindo o nome do “Workspace” e da “Solution”. Em seguida criou-se o “Domain” numa pasta nova (portanto vazia) onde o sistema cria e nomeia automaticamente as subpastas específicas para a organização do projeto. Ali o sistema armazena os arquivos de entrada e saída. Importou-se o arquivo MDT_ND (criado com o MOHID GIS e adaptado para uso no Land) para subpasta “Digital Terrain” e adicionamos ao Mapa selecionando o sistema de coordenadas UTM SAD 1969.

Em seguida criou-se a rede de canais do projeto com o procedimento descrito à seguir: Informou-se ao sistema o ponto onde a nova rede desagua no oceano e para simplificar a complexa rede de canais existente na região urbana, fixou-se o valor de área mínima para início da formação de canal em 1 500 000 m². Dessa forma, o Mohid Land construiu a rede simplificada com apenas 3 (três) ordens, facilitando os procedimentos de controles, de construção e de edição das seções criadas. Assim, foi produzido o arquivo Drainage Network.dnt, fundamental para o modelo hidrodinâmico.

Para avaliação do grau de representatividade da rede de drenagem construída pelo sistema, inseriu-se a imagem de satélite da região no projeto através do comando disponibilizado pelo software. Esta funcionalidade do sistema MOHID permitiu verificar que em alguns setores a rede construída era diferente da real. Para corrigir a inconsistência editou-se o MDT_ND com os comandos próprios, executando-se em seguida a construção da nova rede de drenagem. Repetiu-se a operação até que a rede simulada se apresentou próxima da real.

Para atribuição das dimensões das seções transversais da rede de canais criada pelo sistema, analisou-se a PCD 1: 2000 e a imagem Google Earth[®] da região, com vistas à definição das larguras médias respectivas às três ordens da rede construída na fase anterior, adotando-se então valores médios para cada ordem. Arbitrou-se as profundidades fixas para cada uma das três ordens baseadas em bom senso a partir da profundidade média = 2,40 m da seção SM 6 levantada pela HICON ENGENHARIA

e apresentada no trabalho de Amaral, (2003). Editou-se o próprio arquivo Drainage Network.dnt para adequar as larguras das seções conforme a realidade observada na imagem Google Earth®.

Adotou-se como hipótese do projeto de simulação de escoamento de chuva extrema, que a geometria da bacia é invariável no tempo, ou seja: não se consideraram eventuais fenômenos de erosão ou assoreamento do leito dos canais de drenagem. Também se admitiu que não existem singularidades que eventualmente podem estar estrangulando seções de canais.

Por fim criaram-se os pontos para obtenção de medidas de variáveis de estado ao longo do tempo da simulação e que interessam aos objetivos do projeto. São os pontos onde o sistema produz os resultados em forma de Séries Temporais, gráficos que relacionam o tempo com diversas variáveis de estado, por exemplo: alturas de lâminas e níveis d'água, velocidades de fluxo e vazões do escoamento da chuva.

A figura 16 foi produzida pelo sistema, no formato apresentado, por meio do emprego de comandos próprios. Representa a área urbana da bacia hidrográfica do rio Macaé sobre a imagem de satélite da região, contendo o MDT_ND, os limites da bacia, a rede de drenagem e os pontos de medida das séries temporais.

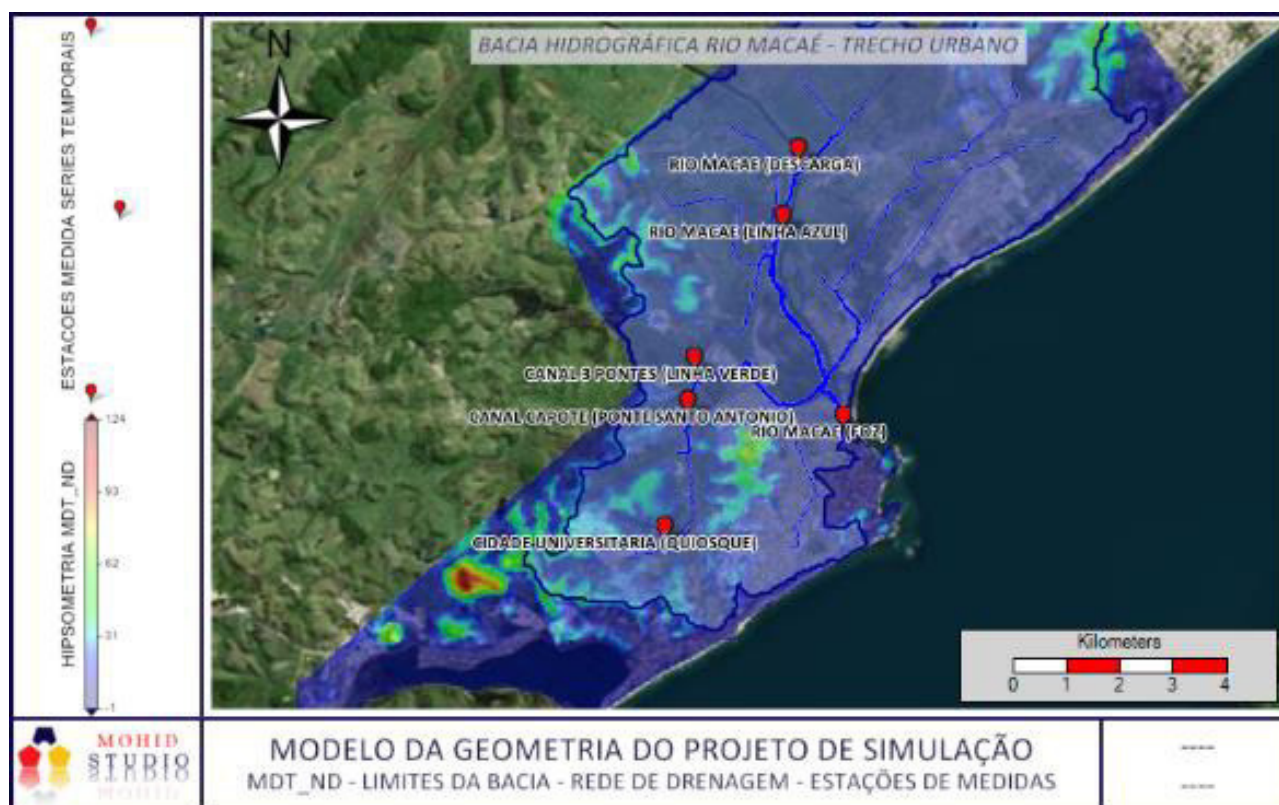


Figura 16 – Construída com o ferramental do Mohid Land para representar a geometria do projeto.

Completada a fase de construção do modelo representativo da geometria da bacia, passou-se então à próxima etapa que define os forçantes do modelo. Esses foram limitados à vazão afluente pelo rio Macaé, à montante da área urbana e à variação da maré, ambas diferidas no tempo da simulação. Considerou-se que outras forçantes que interferem no balanço hídrico, tais como: evaporação e evapotranspiração e infiltração no solo não são relevantes quando se trata do escoamento de chuva extrema devido ao tempo da simulação, o tipo de solo das planícies alagáveis e os volumes em escoamento.

2.6. Vazão forçante

Considerando-se que a base topográfica com resolução capaz de simular a magnitude das cheias na área urbana de Macaé (PCD 1: 2000) se limitava a própria área urbana, com aproximadamente 76,4 km², e que esta área representa apenas 5% da área da bacia, e ainda, a maior pluviosidade das regiões do médio e alto em relação ao baixo rio Macaé (DAVIS e NAGHETTINI, 2000), optou-se por aplicar a vazão afluente pelo rio Macaé à montante da área urbana resultante de chuva extrema em toda bacia.

Em Tavaréz (2017), encontra-se a descrição de modelo hidrológico da bacia do rio Macaé desenvolvido na plataforma Mohid Land. A autora simulou diversos cenários, com e sem intervenções estruturais, para avaliar a influência dessas mediadas na mitigação das cheias decorrentes de chuvas com tempo de recorrência (TR) de 20 e 50 anos. Suas simulações produziram resultados semelhantes aos de outros trabalhos previamente elaborados com outras metodologias para aquela bacia (FGV, 2004; SEA/INEA, 2013; BARBOZA, 2014).

O modelo de Tavaréz (2017) foi apropriado por importação. Com ele simularam-se as vazões no rio Macaé, na seção à montante da área urbana, decorrente de uma chuva de projeto com TR de 10 anos, produzindo-se a hidrógrafa correspondente, a ser aplicada como descarga naquele ponto.

A figura 17 apresenta o modelo original de Tavaréz (2017), no qual foram inseridas as marcas das seções onde o sistema produz as hidrógrafas de vazão x tempo, e a delimitação da área urbana, apresentando sua relação com o resto da bacia.

Assim, substituíram-se os forçantes chuvas extremas pelas respectivas vazões decorrentes, diferidas no tempo, na seção à montante da área urbana. Tal estratégia, em tese, não afetaria significativamente os resultados de avaliação da magnitude das manchas de alagamento na área urbana, visto que as vazões correspondem às chuvas aplicadas em praticamente 95% da área da bacia.

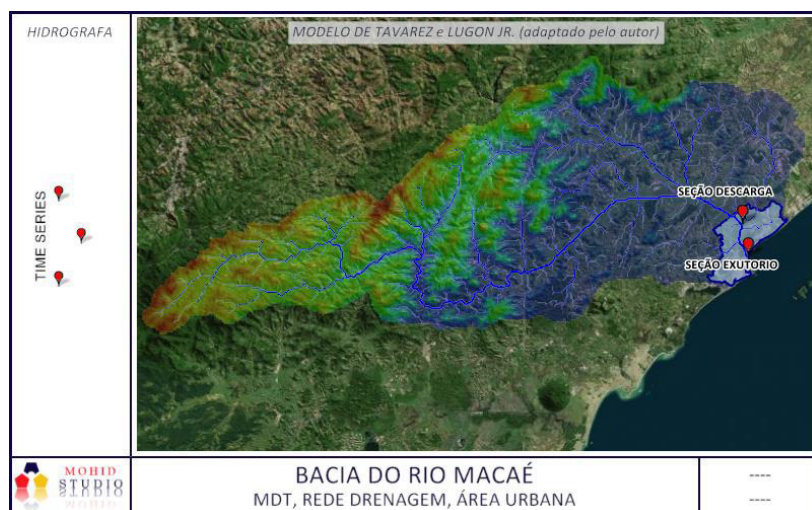


Figura 17 – Representação do modelo da bacia do rio Macaé: limites, MDT (translúcido), área urbana e sinalização das seções de produção das series temporais das vazões.

A hidrógrafa produzida na seção à montante da área urbana foi formatada para inteligência do Mohid Land, e salva como arquivo de descarga na extensão .srm para posterior aplicação no futuro modelo de escoamento de chuva extrema da área urbana, uma das metas deste trabalho. A figura 18 é a hidrógrafa representativa da evolução da vazão conforme o tempo e com esses valores foi posteriormente aplicada a montante da área urbana para o estudo dos alagamentos da área urbana.

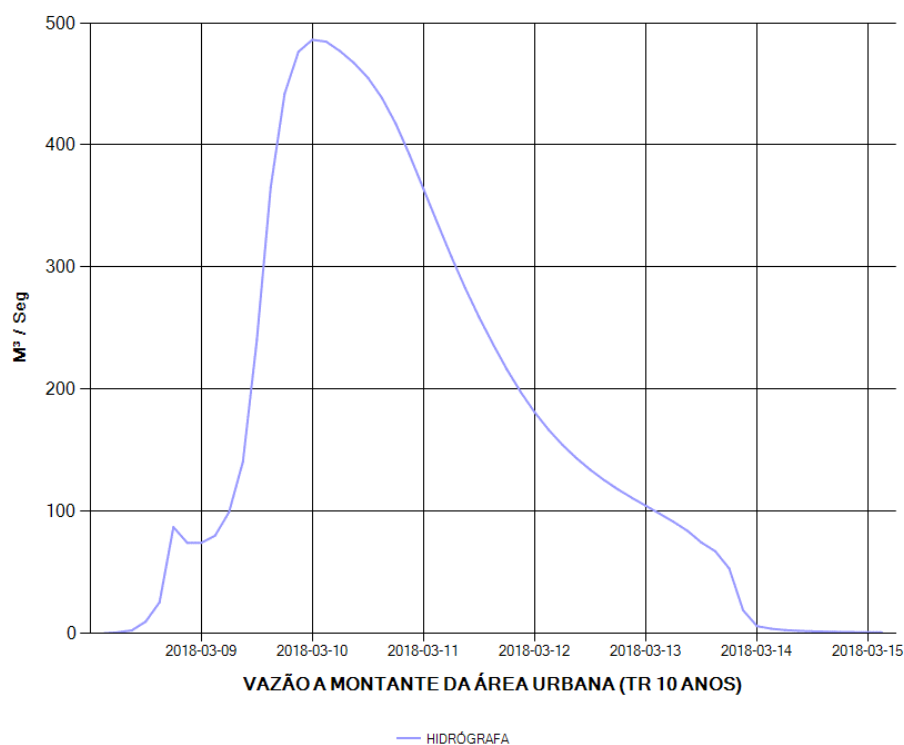


Figura 18 – Hidrógrafa da vazão na seção à montante da área urbana produzida por chuva de projeto TR de 10 anos, aplicada em toda a bacia do rio Macaé e simulada pelo Mohid Land.

2.7. Maré forçante

Comparando-se os dados das tábuas de maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), para Terminal Marítimo de Imbetiba (próximo da foz do rio Macaé), consignando variações de maré entre + 0,722 e - 0,722 m, com os dados altimétricos da planície fluvio-marinha na região do baixo curso do rio Macaé, com extensas regiões com altitudes abaixo de 1 m. E considerando os valores das profundidades médias da calha do rio na região estuarina (maiores que 2 m), medidas por Hicon Engenharia (2002) *apud* Amaral (2003), conclui-se que o canal do rio Macaé funciona como braço de mar quando em maré alta, conforme as definições de tipos de estuários enunciadas em Rodrigues *et al.* (2012).

Assim sendo, no modelo em desenvolvimento, incluiu-se a maré como um forçante aplicado na foz do rio, pois os métodos de cálculo do Mohid Land consideram essa variação de níveis na circulação hidrodinâmica do escoamento da chuva através da calha do rio (BRAUNSCHWEIG *et al.*, 2016). Amaral *et al.* (2004), também adotaram essa hipótese.

Utilizou-se o aplicativo “TidePreview.exe”, desenvolvido e disponibilizado pela MARETEC, na determinação dos níveis de maré astronômica na foz do rio. Para tanto, redefiniram-se os dados de entrada para previsão da maré astronômica do projeto: coordenadas da célula do exutório, constantes harmônicas para região, fuso horário, período e intervalos de tempo para previsão dos valores de elevação do nível de maré, nome do arquivo de entrada e do arquivo de saída.

O arquivo de saída recebeu automaticamente a extensão .prv, se apresentando então formatado para inteligência do Mohid Land, sendo porém salvo na extensão .srm. Foi copiado para a pasta do projeto de simulação do escoamento da área urbana, na subpasta Boundary Condition para posterior informação do nome e endereço ao arquivo Drainage Network.dat, um dos arquivos que compõem os Módulos de Propriedades da Simulação, tópico que se apresenta a seguir.

A opção por utilizar somente a previsão de maré astronômica como a melhor aproximação da realidade se fez devido à falta de dados sobre a maré real. O Relatório do IBGE sobre ajustamentos da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) informa que a Estação Maregráfica de Macaé, que monitorava as elevações de maré real *in loco*, foi desativada em 2015 (IBGE, 2016).

2.8. Propriedades da simulação

Para concluir a “Construção do Projeto de Simulação Computacional” estabeleceram-se as propriedades da primeira simulação, de forma a se proceder uma primeira avaliação da eficácia do

modelo construído. Na tela do MOHID, na palheta projeto, selecionou-se o ícone “new simulation”. Após a definição do nome e do endereço do arquivo de dados topográficos (MDT_ND) desta primeira simulação, o sistema criou automaticamente os 6 arquivos mais comuns de aplicações do Mohid Land. Um sétimo arquivo (“Discharges.dat”) foi selecionado da lista de opções disponíveis para integrar o projeto em desenvolvimento.

O sistema designa estes arquivos como “Modules in Simulation” e disponibiliza-os, na pasta “Data” do projeto. Estão integralmente preenchidos com opções padrão de todas as palavras chaves que definem para o sistema as variáveis de processo. Assim, conforme o projeto objeto deste trabalho, por alteração dos valores padrão do sistema, informou-se: quais processos seriam tratados, o esquema de cálculo, as opções de computação, o período da simulação, os nomes e endereços do arquivos de entrada e saída das séries temporais, os parâmetros de rugosidade e os níveis d’água iniciais dos canais.

2.9. Testes e ajustes do modelo computacional construído

No desenvolvimento do projeto, observaram-se quatro fases distintas, à saber:

1. A configuração de uma primeira simulação, passível de ser concluída com sucesso, pois o sistema faz rapidamente a leitura dos arquivos de entrada definidos pelo usuário, verificando suas configurações relativas à endereços, extensões e formatos, impedindo a execução da simulação até que qualquer inconsistência identificada pelo sistema seja corrigida. Esta etapa foi vencida por meio de pesquisa do problema conforme os avisos automáticos de inconsistência, por consulta aos exemplos disponibilizados pelo *software*, estudo do tutorial, suporte do nosso orientador e dos desenvolvedores do *software*, intenso processo de tentativa e erro, assim como análise do arquivo de saída “UsedKeyWords.dat” com o relatório da verificação de consistência das configurações, sendo este último o mais eficaz.
2. Uma vez rodada a primeira simulação com sucesso, analisando-se os resultados obtidos verificou-se sua compatibilidade com o que se esperava ou com as observações da situação real. Quando constatados desvios grosseiros, avaliaram-se as possíveis causas da incoerência, corrigindo-as e executando novamente a primeira simulação. Esta etapa foi vencida por meio de reavaliação dos parâmetros das variáveis dos processos definidos nos arquivos “Modules in Simulation” e/ou das variáveis forçantes e seus pontos de aplicação geometricamente bem determinados, ou ainda por análise do arquivo de saída “BasinWaterBalance.srb”, sempre tendo em conta que o Sistema Mohid utiliza modelos matemáticos de base física que permitem produzir resultados com elevado grau de exatidão.

3. Obtidos resultados coerentes, procederam-se as análises dos mesmos, com vistas às interpretações e aos ajustes finos. Eventualmente se testou a tese formulada na análise do resultado, confirmando-a ou não, reformulando-a conforme o caso. Considerando-se a confiança na capacidade do modelo construído em reproduzir resultados coerentes com a realidade esperada ou observada, outros cenários de interesse do projeto foram simulados. Ao todo, foram rodadas 36 simulações com sucesso, das quais apresentam-se os resultados mais relevantes.
4. A etapa anterior permitiu realizar a verificação do desempenho do modelo no campo do fenômeno real. Em 08/03/2018, na bacia do rio Macaé ocorreu uma chuva extrema que causou alagamentos típicos da situação para qual o trabalho estava sendo desenvolvido. Em 10/03/2018, em horários anotados, mediu-se o nível d'água dos alagamentos presentes em quatro pontos acessíveis, estáveis, passíveis de serem reocupados e de amarração à rede altimétrica oficial. Apresentam-se as fotos desta atividade de medição nas Figuras 19 a 22.



Figura 19 - Fotos tomadas pelo autor em 10/03/2018 às 12:45 h, no local de medida da lâmina d'água sobre a soleira da Ponte do Capote, Linha Verde na entrada do Bairro Santo Antônio.



Figura 20 - Fotos tomadas pelo autor em 10/03/2018 às 13:14 h no local de medida da diferença de nível entre o NA do rio Macaé e peitoril do guarda corpo da ponte da Linha Azul, Macaé-Niterói.



Figura 21 - Fotos tomadas às 13:27 h, medida da diferença de nível entre o NA do canal Três Pontes e a soleira do guarda corpo da ponte da Linha Verde, sentido Cavaleiros. Vista da planície inundada.



Figura 22 - Fotos tomadas pelo autor em 10/03/2018 às 13:56 h, no local de medida da marca atingida pela pico da cheia por volta da 0:00 h de 10/03/2018.

Diante desses fatos, readequaram-se os objetivos propostos inicialmente, passando-se a considerar a possibilidade de avaliar a qualidade da predição do modelo desenvolvido, limitando-se mais as hipóteses simplificadoras. Para tanto, adotou-se a variação da maré astronômica, ao invés de adotar-se um nível estático e próximo de zero para o deságue no mar, como realizado na 3ª fase descrita acima. Além disso, promoveu-se a melhor adequação das dimensões do canal do rio Macaé à realidade, por cuidadosa edição das seções próximas à foz, pois estas se mostram bem mais largas.

A seguir, foram avaliadas estratégias para enquadramento da magnitude da chuva extrema que causou os alagamentos, adotando-se o período de retorno de chuvas de projeto com TR 10 anos, por ser a que melhor se enquadrava com os dados de chuva do *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA) naquele período (HOU *et al.*, 2011). Dessa forma, os dados de entrada no modelo construído foram reconfigurados e novas simulações foram realizadas.

Uma nova campanha de medidas foi idealizada para ocorrer no futuro quando a rede de canais estivesse solicitada apenas pela variação da maré, possibilitando comparações com a situação de cheia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variação dos níveis de maré na rede de canais da região do projeto

Para avaliar o comportamento das variações de maré nos níveis d'água ao longo das seções da rede de drenagem, o que pode influir no escoamento da chuva, no período entre 08 e 15/03/2018, quando ocorreu a chuva extrema e seu escoamento, especificaram-se duas simulações, nas quais apenas as variações da maré atuaram como forçantes. Uma das simulações representava a condição de maré de quadratura, conforme ocorreu do período real do evento da cheia analisada. Na outra, simulou-se a mesma cheia, supondo-se que ocorria maré de sizígia naquele período. Nos dois casos, admitiu-se que não havia descarga e nem fluxo algum originado no continente.

Os endereços dos arquivos com as duas previsões da elevação dos níveis de maré astronômica, obtidas por meio do aplicativo TidePreview.exe, foram informados nos arquivos “Module Drainage Network_x.dat” respectivos, de forma que a simulação configurada em cada condição de maré obtém ali os valores instantâneos de elevação do nível d'água na foz do rio Macaé. Após a execução de cada simulação indicou-se ao sistema a apresentação dos resultados na forma de gráfico, relacionando as elevações do nível d'água a cada 2 horas nas estações RIO MACAÉ DESCARGA e RIO MACAÉ FOZ, com as elevações nas duas seções superpostas em cada gráfico (figuras. 23 e 24).

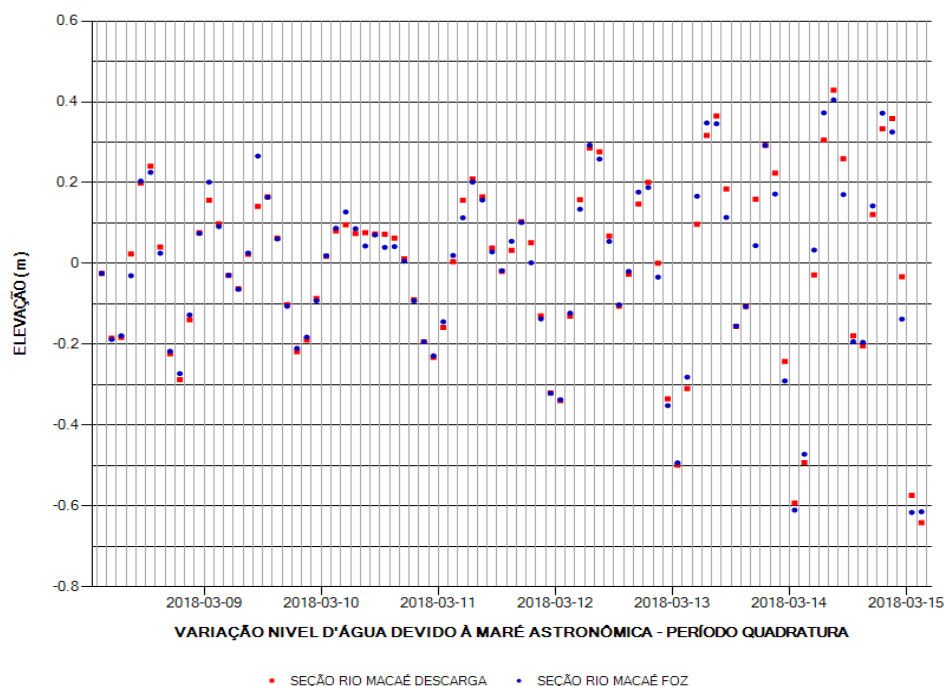


Figura 23 – Gráfico da elevação do nível d'água x tempo nos pontos da entrada do rio a montante da área urbana e no exutório, causado apenas pela maré astronômica em período de quadratura.

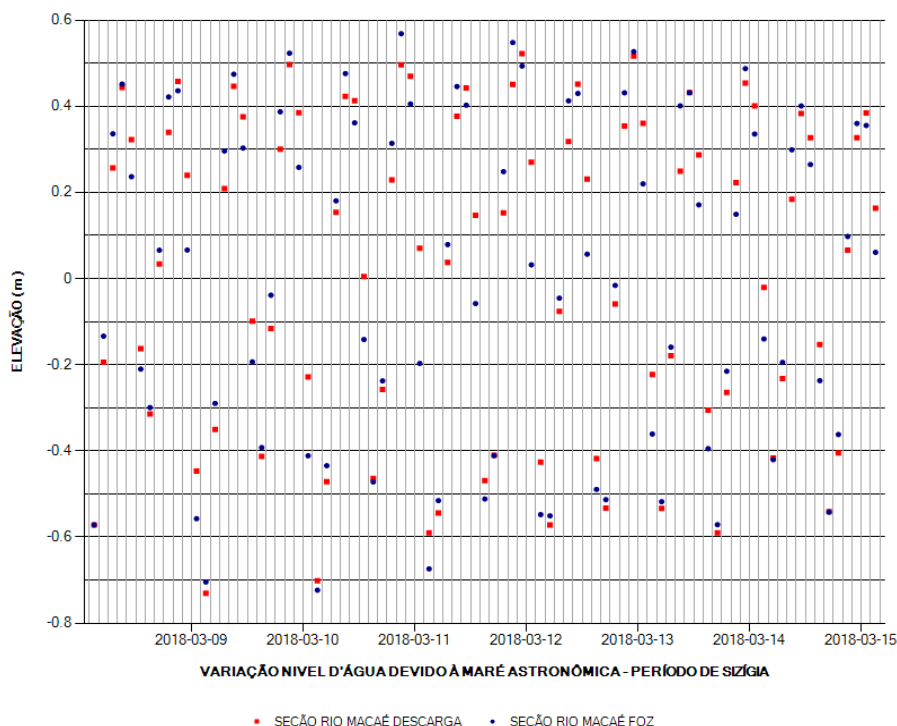


Figura 24 – Gráfico elevação do nível d'água x tempo nos pontos da entrada do rio a montante da área urbana e no exutório, causado apenas pela maré astronômica em período de sizígia.

Comparando-se as duas figuras observa-se que os afastamentos entre as elevações relativas de cada seção analisada são maiores em maré de sizígia. Sendo as duas seções representadas nos gráficos as mais distantes entre si (5,5 Km).

Em vários pontos das figuras 23 e 24, num mesmo instante, observa-se a ocorrência de níveis d'água mais baixos à montante (SEÇÃO DESCARGA em vermelho do que a jusante (SEÇÃO FOZ azul). Conclui-se que, quando vista num corte longitudinal à direção do percurso do rio no trecho analisado, a inclinação da linha d'água eventualmente impõe a inversão de corrente conforme constatada no trabalho de Amaral *et al.* (2004).

Nos dois casos da condição de maré, observou-se que no primeiro instante de medida em cada gráfico, os níveis d'água, tanto na SEÇÃO DESCARGA como na SEÇÃO FOZ, assumem valores idênticos e iguais ao valor da elevação na SEÇÃO FOZ calculado pelo TidePreview.exe. Isso significa que o modelo inicia a simulação da circulação hidrodinâmica, considerando a linha d'água horizontal, uma condição que não corresponde à realidade.

Esta condição de constância dos níveis da linha d'água ao longo do percurso rio acima, no início do período simulado, já havia sido observada durante outras simulações. Mas a evolução dos ciclos da variação de maré, depois de passados os primeiros máximos e mínimos, ou dos primeiros

fluxos de vazão fluvial, tendem à trazer os níveis d'água para valores factíveis, não afetando portanto os resultados objetivos do trabalho conforme relatado em Amaral *et al.* 2004.

3.2. Influência dos níveis de maré no escoamento da chuva extrema

A fim de avaliar como a condição de maré afetaria o escoamento de chuva extrema, especificaram-se duas simulações de escoamento da chuva de projeto com Tempo de Recorrência (TR) 10 anos, cuja vazão resultante e local de aplicação são como descritos no item 2.6. (Vazão forçante) Em uma das simulações o deságue no mar foi especificado com a maré astronômica de quadratura, retratando assim a condição real do período da cheia. Na outra o deságue foi especificado de modo a impor a condição fictícia de maré de sizígia no período da cheia.

Para tanto, copiou-se os Módulos de propriedades das simulações anteriores, informando-se o endereço do arquivo com os dados de vazão diferida no tempo da simulação, obtidos com as operações descritas em 2.6., no Módulo Discharge_x.dat e indicando a existência de descarga no Módulo Drainage Network_x.dat. Executadas as simulações com sucesso, usando-se as ferramentas do sistema, produziu-se o gráfico para a Estação Capote, com as variações dos níveis d'água durante o escoamento da cheia, nas duas condições de maré superpostas x período das simulações (figura 25).

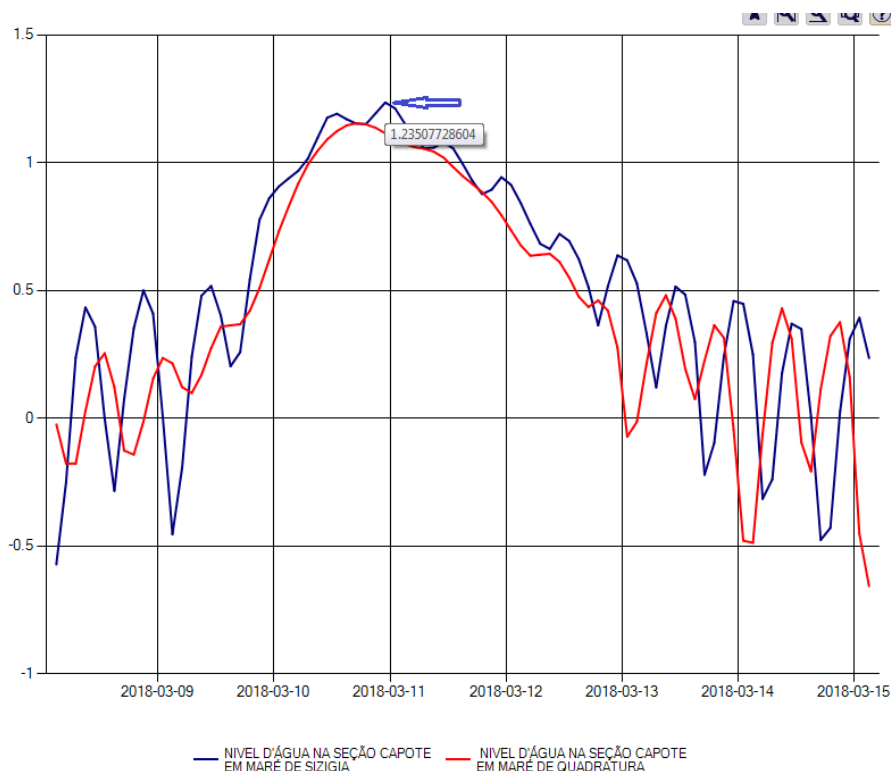


Figura 25 – Gráfico comparativo das elevações do nível do Canal Capote durante o escoamento da cheia (TR 10 anos) em maré de quadratura (vermelho) ou maré sizígia (azul).

Observa-se que, na condição de maré de quadratura, a curva de elevação dos níveis tende a tangenciar os mínimos da curva de elevação de maré de sizígia na região do pico da cheia. Na Estação Canal Capote, as lâminas d'água apresentaram diferenças máximas da ordem de 0,08 m, sendo que a maior elevação ocorreu na condição de sizígia. O tempo de permanência da cheia não se alterou sensivelmente devido às condições de maré naquela seção do canal.

Esta última observação é muito importante para objetivos de manejo de águas pluviais, merecendo ser verificada em seções do canal principal do rio Macaé, pois o canal Capote apresenta-se com as dimensões especificadas para segunda ordem (17,50 x 2,00 m), naquele trecho. Já o canal do rio Macaé, ao qual o Capote se interliga através do canal Virgem Santa, apresenta-se com seções que variam de 70,00 x 2,00 m, no trecho onde atravessa a Linha Azul, até 130,00 x 2,80 m, no trecho próximo a foz. Dimensões essas atribuídas conforme descrito no item 2.5..

Assim sendo foram elaborados e analisados os gráficos que permitem verificar o comportamento das elevações do nível d'água na seção RIO MACAÉ LINHA AZUL, imediatamente à montante da área urbana (figura 26), e na seção RIO MACAÉ FOZ, no exutório da bacia (figura 26).

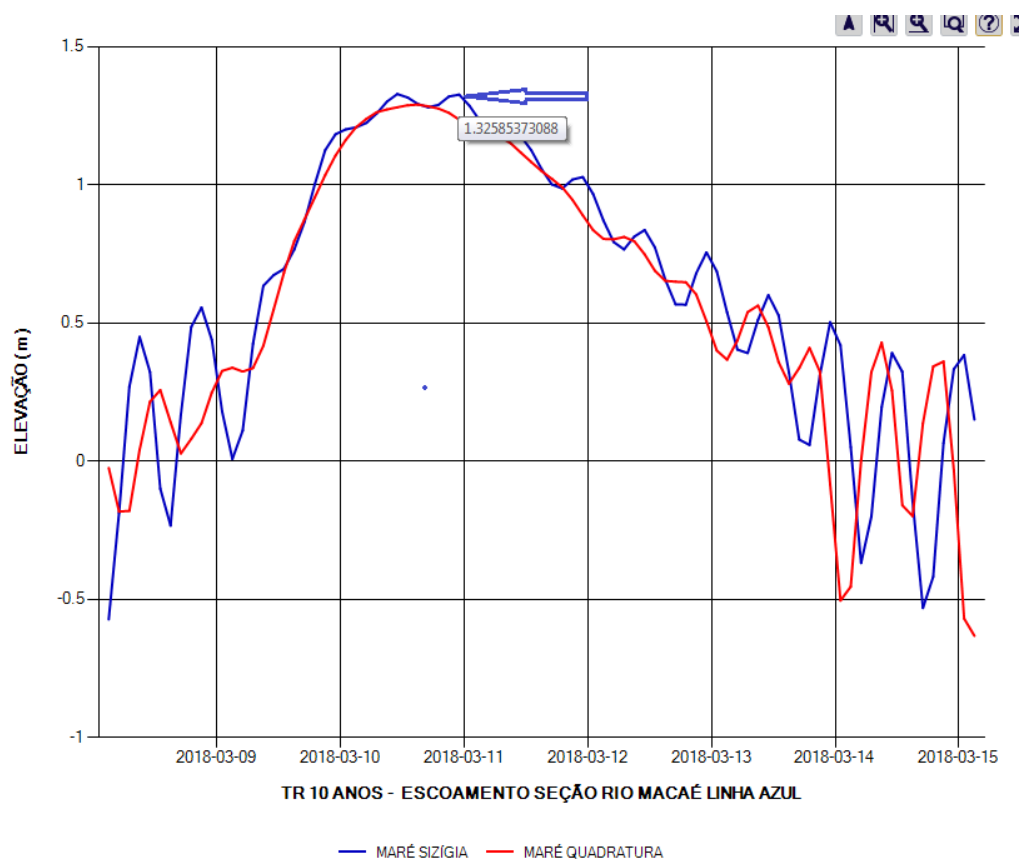


Figura 26 – Gráfico comparativo das elevações do nível d'água na seção RIO MACAÉ LINHA AZUL durante a cheia (TR 10 anos) em maré de quadratura (vermelho) ou maré de sizígia (azul).

Na seção RIO MACAÉ LINHA AZUL (Figura 26) observa-se configuração semelhante à da seção do Capote, sendo que as elevação máxima na situação de maré de sizígia aumentou 0,09 m e o tempo de permanência da cheia nas duas condições de maré se prolongou entre 12 e 24 h em relação ao tempo de permanência da cheia na seção Capote.

Na seção RIO MACAÉ FOZ (Figura 27) observa-se sensível abatimento da onda de cheia, possivelmente decorrente das maiores dimensões das seções próximas da foz. O pico da onda de cheia atingiria 1,03 m se a cheia coincidissem com maré de sizígia mas, em condição de maré de quadratura, o pico da cheia simulada atinge o nível máximo 0,62 m em 11/03/2018, coerente com a ausência de transbordamento da calha na região da foz, verificada in loco no período do evento real.

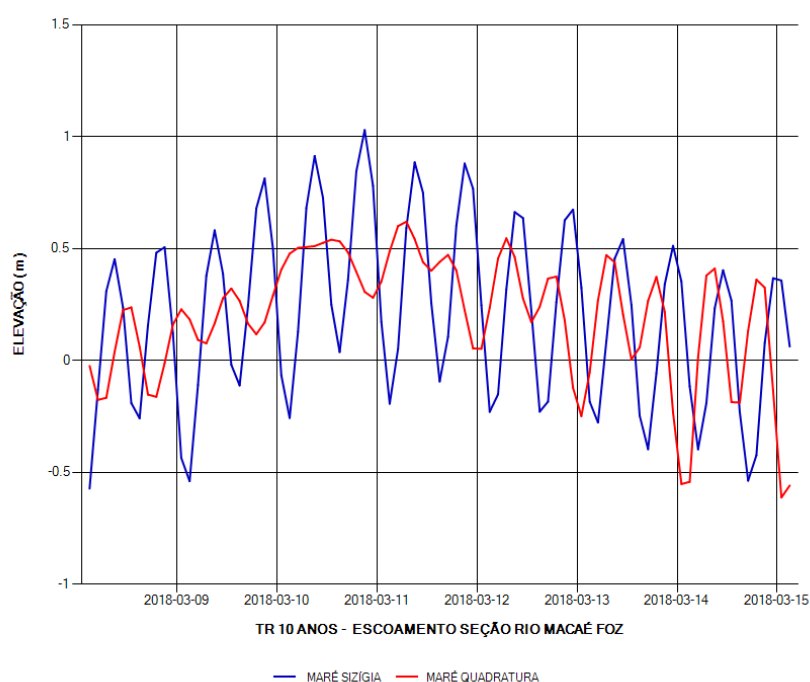


Figura 27 – Gráfico comparativo das elevações do nível d'água na seção RIO MACAÉ FOZ durante o escoamento da cheia (TR 10 anos) em maré de quadratura (vermelho) ou maré sizígia (azul).

3.3. Avaliação da qualidade da predição do modelo desenvolvido

As estações CAPOTE e TRÊS PONTES permitem a medida direta dos níveis d'água em relação ao ponto estável logo acima do espelho d'água sem intervenções de topografia para amarrações altimétricas. Já as estações RIO MACAÉ LINHA AZUL e CIDADE UNIVERSITÁRIA necessitam ainda de amarração à rede altimétrica oficial para possibilitar comparações de medidas (IBGE, 2009).

Em 08/05/2018, durante um período prolongado de ausência de chuva na bacia, coincidente com maré de quadratura, foram medidos os níveis d'água presentes nas estações CAPOTE e TRÊS

PONTES. Os valores medidos em cada estação em 10/03/2018 durante a cheia foram comparados com os valores medidos em 08/05/2018, na condição de estiagem. As diferenças de nível do espelho d'água constatadas em cada estação foram: estação CAPOTE = + 0,845 m e TRÊS PONTES = + 0,925 m, sendo os níveis mais baixos constatados na segunda campanha, evidentemente. Apresentam-se as fotos da campanha e a tabela com os dados brutos medidos e as relações entre eles calculadas:

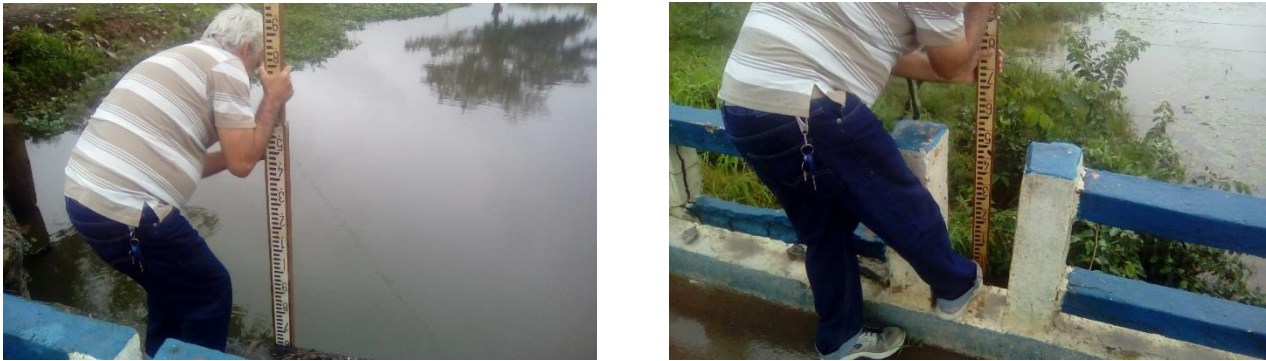


Figura 28 - Fotos tomadas pelo autor em 08/05/2018 (CAPOTE a esquerda e TRÊS PONTES a direita)

			ESTAÇÕES			
			CAPOTE		TRÊS PONTES	
CONDIÇÃO	CAMPANHA	DATA	HORA	VALOR DO NÍVEL MEDIDO (m)	HORA	VALOR DO NÍVEL MEDIDO (m)
CHEIA	1ª	10/03/2018	12:50	+0,14	13:30	- 1,085
ESTIAGEM	2ª	08/05/2018	14:30	- 0,705	14:40	- 2,01
DIFERENÇA DE NÍVEL MEDIDA				+ 0,845		+0,925

Tabela 1 - Dados tomados nas campanhas de 10/03/2018 e 08/05/2018 para medida das diferenças de nível d'água observadas entre os eventos de cheia e estiagem.

Para verificar a qualidade das predições simuladas com modelo hidrodinâmico do escoamento desenvolvido, aplicou-se o Tide Preview.exe, de forma a prever as variações do nível d'água devido à maré astronômica no mês de maio de 2018, para a foz do rio Macaé. Especificou-se outra simulação, tendo os dados de maré como único forçante dos fluxos na rede de canais, produzindo-se então os gráficos das elevações dos níveis d'água nas estações CAPOTE e TRÊS PONTES, na condição de estiagem, reinante naquele período.

Aplicando-se zoom sobre as datas e horários das medidas da segunda campanha, extraíram-se os valores de nível calculados pelo Mohid Land. Para a estação CAPOTE o sistema calculou o nível d'água situado na altitude 0,175 m e para estação TRÊS PONTES o nível estaria em 0,185 m. Na figura 29, apresenta-se o gráfico original completo das elevações simuladas para estação CAPOTE.

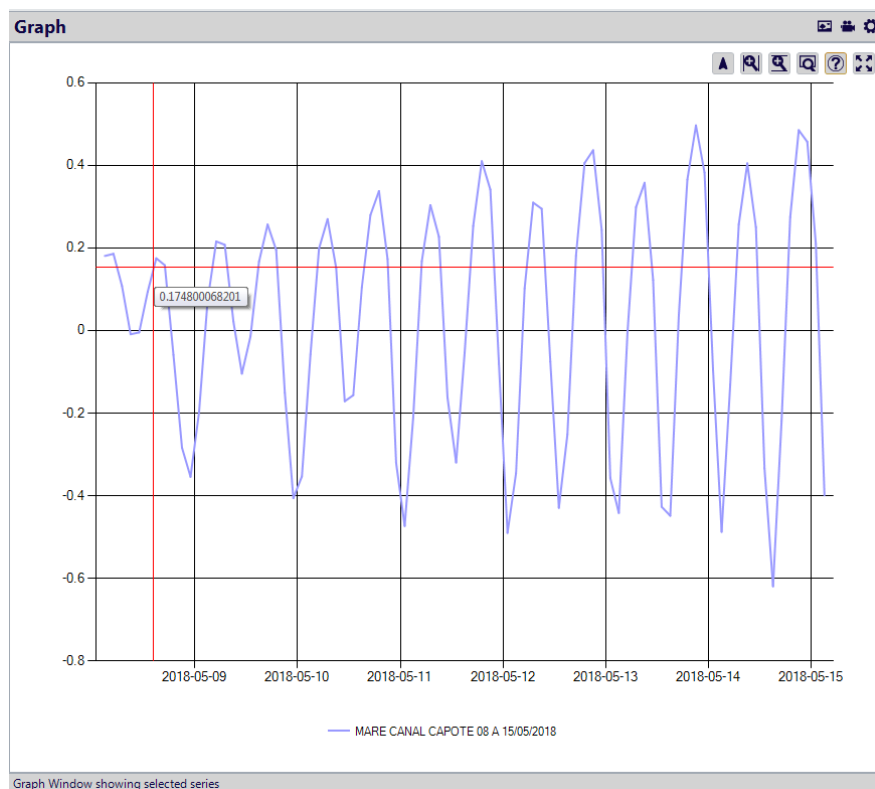


Figura 29 – Gráfico produzido pelo simulador relacionado tempo x elevação devido à maré astronômica, para estação CAPOTE na condição de estiagem reinante na segunda campanha.

Nas figuras 30 e 31 apresentam-se em Zoom as regiões dos gráficos das estações CAPOTE e TRÊS PONTES, no entorno dos momentos das medidas no campo.

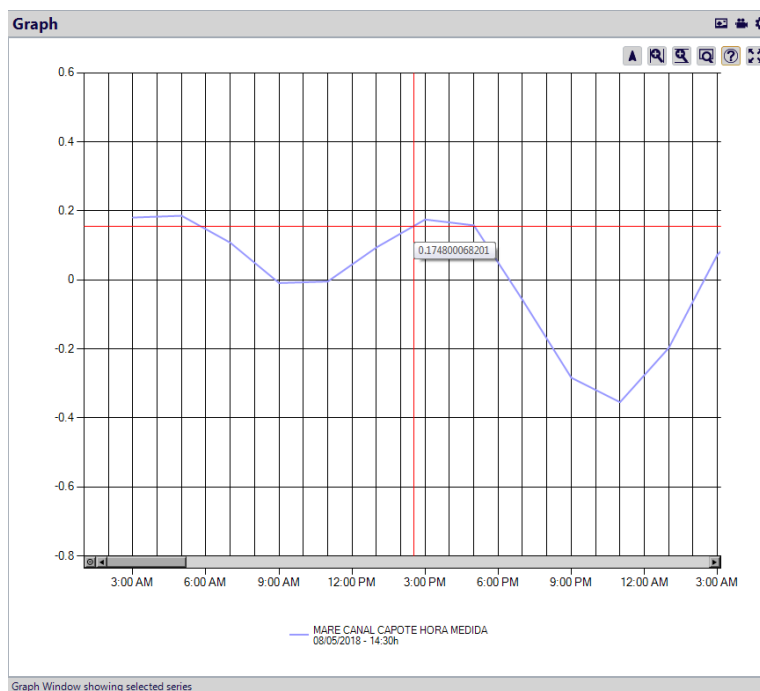


Figura 30 – Zoom da região do gráfico da estação CAPOTE no entorno do momento em que ocorreu a medição da segunda campanha (08/05/2018 às 14:30 h).

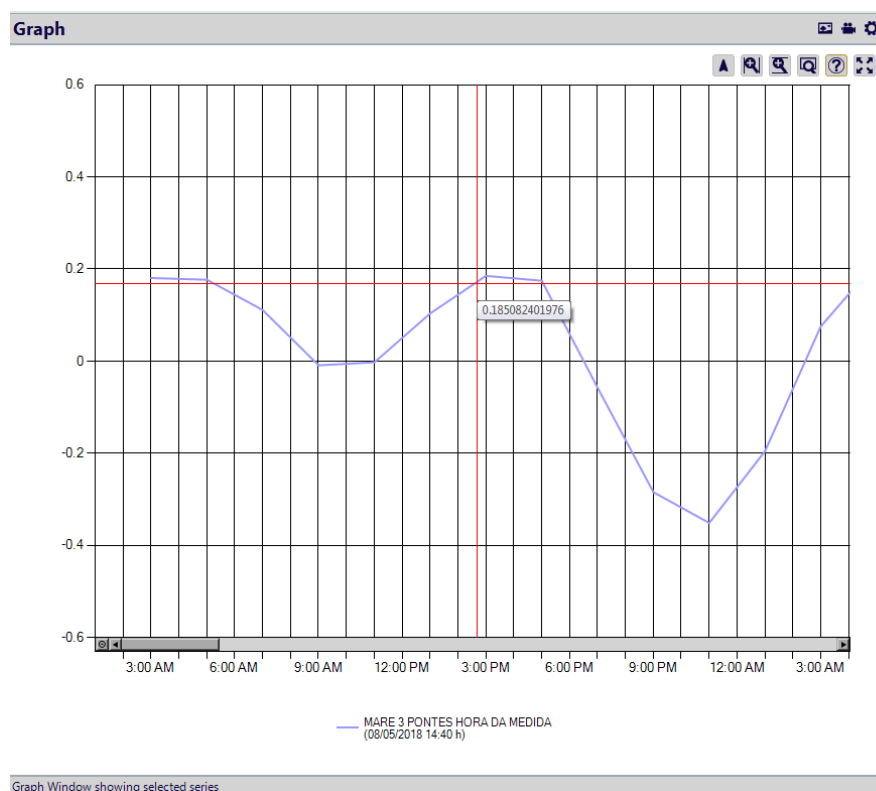


Figura 31 – Zoom da região do gráfico da estação TRÊS PONTES no entorno do momento em que ocorreu a medição da segunda campanha (08/05/2018 às 14:40 h).

A pequena diferença apontada na simulação entre os níveis d'água das duas estações (0,01 m) pode ser explicada devido à proximidade entre duas estações de um mesmo trecho de canal, aproximadamente 750 m, e considerando-se os 10 minutos de espaço temporal entre as estimativas.

Para determinar os valores de nível d'água nas estações CAPOTE e TRÊS PONTES no período da cheia ocorrida, no mesmo projeto configurou-se nova simulação com as forçantes: vazão da chuva de projeto; TR 10 anos descarregada no rio Macaé na fronteira a montante da área urbana; e variação da elevação do nível d'água devido à maré astronômica na fronteira aberta para o mar. O período da simulação foi estabelecido entre os dias 08 e 15/03/2018, o mesmo da ocorrência da cheia.

Executou-se a simulação obtendo-se os gráficos representativos dos resultados calculados pelo Mohid Land. Com as ferramentas do sistema para apresentação de resultados, prepararam-se gráficos com os valores de elevação do nível d'água da estação CAPOTE e TRÊS PONTES respectivamente, durante período simulado da cheia, entre 08 e 15/03/2018.

Afim de comparar as diferenças entre os níveis medidos no campo nas duas campanhas (cheia e estiagem) com os valores determinados pelo simulador nesses mesmos momentos, extraíram-se os valores consignados nos gráficos apresentados nas figuras 32 e 33, preparados para especificar com maior precisão o valor do nível d'água no instante real em que ocorreram as medidas no campo.

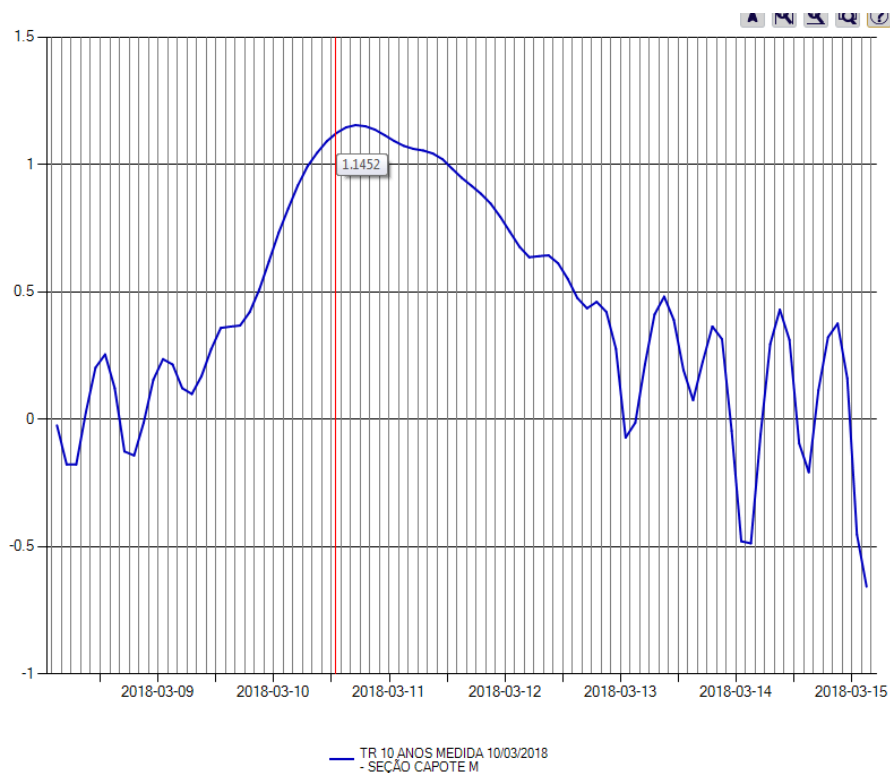


Figura 32 – Hidrógrafa tempo × nível, calculada pelo simulador para estação CAPOTE, consignando o valor de 1,1452 m de elevação do nível d'água às 12:50 h do dia 10/03/2018.

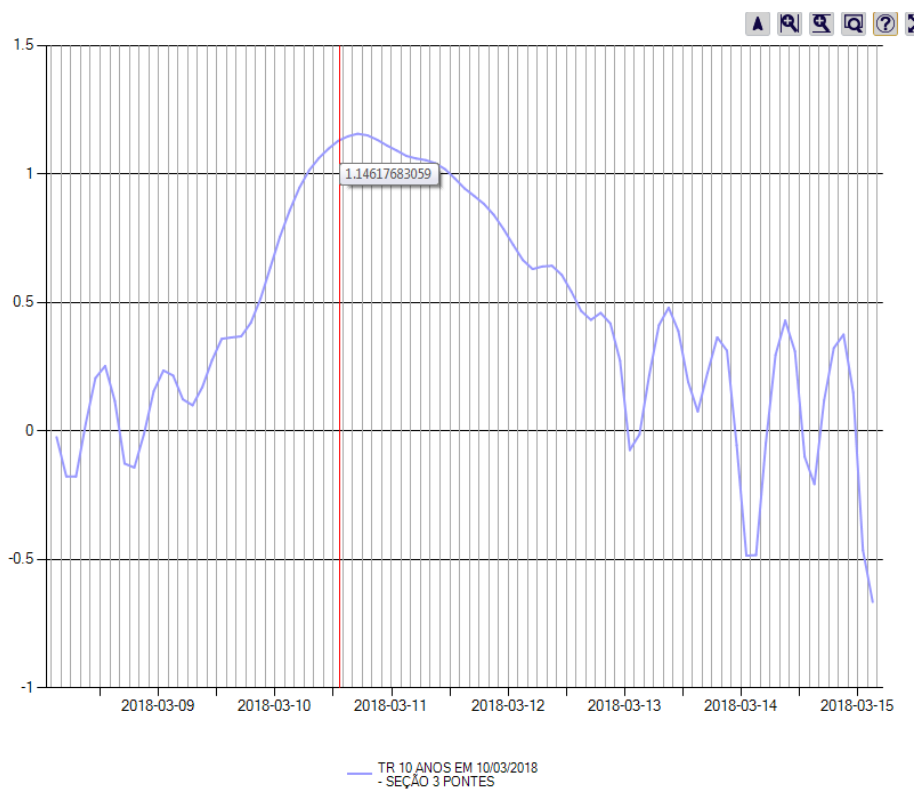


Figura 33 – Hidrógrafa tempo × nível calculada pelo simulador para estação TRÊS PONTES, consignando o valor de 1,1462 m de elevação do nível d'água às 13:30 h do dia 10/03/2018.

Observa-se a diferença de 0,001 m entre os níveis d'água nas duas estações na simulação da cheia. Os valores obtidos na simulação são apresentados na tabela 2, organizando os dados de elevação dos níveis d'água simulados na condição de cheia e de estiagem para apresentação.

			ESTAÇÕES			
			CAPOTE		TRÊS PONTES	
CONDIÇÃO SIMULADA	CAMPANHA	DATA	HORA	VALOR DO NÍVEL SIMULADO (m)	HORA	VALOR DO NÍVEL SIMULADO (m)
CHEIA	1ª	10/03/2018	12:50	+ 1,1452	13:30	+ 1,1462
ESTIAGEM	2ª	08/05/2018	14:30	+ 0,175	14:40	+ 0,185
DIFERENÇA DE NÍVEL SIMULADA				+ 0,970		+0,961

Tabela 2 – Valores calculados pelo simulador nos cenários da situação de cheia e de estiagem.

Por fim os valores medidos no campo foram comparados com os simulados pelo Mohid Land, para avaliação da qualidade da predição do modelo hidrodinâmico para simulação do escoamento de chuva extrema na área urbana de Macaé. A tabela 3 foi preparada para apresentar a comparação:

	ESTAÇÕES	
	CAPOTE	TRES PONTES
DIFERENÇAS DE NÍVEL ENTRE CHEIA E A ESTIAGEM MEDIDA (m)	+ 0,845	+0,925
DIFERENÇAS DE NÍVEL ENTRE CHEIA E A ESTIAGEM SIMULADA (m)	+ 0,970	+0,961
AFASTAMENTO ENTRE O MEDIDO E O SIMULADO	- 0,125	- 0,036
PERCENTAGEM DE AFASTAMENTO DO VALOR SIMULADO EM RELAÇÃO AO VALOR MEDIDO	= 0,125/0,845	= 0,036/0,925
	14,8%	3,9%

Tabela 3– Apresentando as diferenças de nível entre as condições de cheia e estiagem verificadas em campo e as obtidas com as simulações e respectivos afastamentos entre o simulado e a realidade.

Admitindo-se como corretos os valores dos níveis d'água medidos nas duas campanhas, esses resultados sobre o afastamento indicam que o modelo superestimou as diferenças de nível d'água

calculadas nos períodos da cheia e de estiagem. Conforme alertou Xavier (2002), poder-se-ia talvez atribuir o afastamento verificado às incertezas sobre a chuva, maré reais ou aos parâmetros configurados para caracterizar propriedades de escoamento das superfícies da bacia. Neste caso, seria razoável esperar que os afastamentos fossem da mesma grandeza, considerando-se a metodologia usada e a proximidade entre as estações.

Investigando-se as possíveis causas da incoerência constada, observou-se que o modelo digital da rede de drenagem, considerado aceitável no início da construção do projeto, consignou o canal Capote se desenvolvendo em direção ao canal Três Pontes por um percurso errado. Assim sendo, suspeita-se que esse erro de projeto deverá ser revisado antes de qualquer conclusão sobre aferição de parâmetros de avaliação da qualidade de predição do modelo.

Observou-se também que o deságue do canal Virgem Santa no rio Macaé foi modelado em posição diversa da real. Então pelas mesmas razões, a revisão do modelo de drenagem deve corrigir também essa inconsistência. A figura 34 foi preparada para demonstração das inconsistências da rede construída para o projeto. Nela apontam-se os dois setores que precisam ser consertados com operações de edição da base topográfica e/ou diretamente edição do Modelo Digital do terreno (MDT).



Figura 34 – Representando os setores onde a rede de drenagem deve ser corrigida em relação à posição do percurso do Canal Capote e do ponto de deságue do canal Virgem Santa no rio Macaé.

3.4. Quantificação e espacialização das manchas de alagamento

O Mohid Land incorpora poderosa ferramenta para apresentação no formato de animações, com as quais se pode analisar a evolução do fenômeno simulado ao longo do período da simulação, facilitando a formulação e confirmação das conclusões parciais. Como exercício, mesmo antes de readequar a rede de drenagem, produziram-se as animações de diversos cenários alternativos à simulação do evento com as condições próximas da realidade.

Apresentam-se as figuras 35 e 36 com as quais se ilustra os resultados sobre a simulação do cenário principal objeto das medidas de níveis d'água no campo. Conforme evidenciado na figura 35, apresentando as manchas sobrepostas à imagem de satélite da região simulada foi possível identificar as áreas em que o modelo apontou o pico dos alagamentos. As alturas de lâmina variam conforme o relevo e, no pico do alagamento, atingem 1,50 m nas margens do rio Macaé a montante da área urbana.



Figura 35 – Imagem do pico do alagamento ocorrido em 10/03/2018 às 16:00 h, com a localização das manchas e suas alturas respectivas com efeito translúcido sobre a imagem real da cidade.

A avaliação da animação completa desta simulação principal indica que os alagamentos se iniciam por transbordamento da calha do rio Macaé ao norte da Linha Azul e se propagam para leste, inundando as planícies adjacentes ao canal Jurumim. Depois inundam as planícies da margem direita do canal principal do rio Macaé e a da várzea do canal Virgem Santa até chegar às regiões dos canais Três Pontes e Capote. Por último, os alagamentos ocupam as planícies de inundação dos canais Macaé e do Arroz e com menor intensidade as margens do canal Macaé Campos.

Na figura 36 pode-se avaliar as alterações nas magnitudes das manchas de alagamento quando se utiliza o nível fixado na altura do nível médio do mar para o deságue na foz do rio Macaé, em comparação com a imposição do nível da maré astronômica atuante.

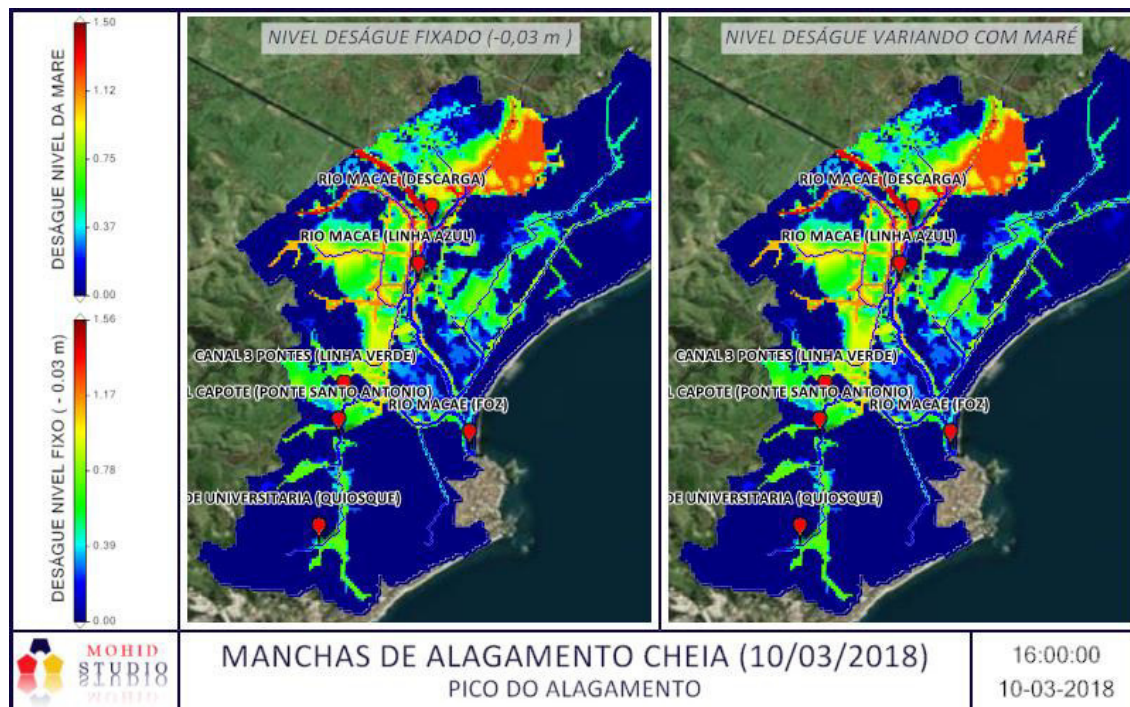


Figura 36 – Imagens comparativas das manchas de alagamento máximas e alturas das lâminas d’água, representadas à esquerda em escala hipsométrica, conforme a condição do deságue.

Observa-se que não há diferença sensível nos resultados, exceto para a lâmina máxima 0,06 m mais alta quando a condição imposta foi nível fixo (- 0,03 m), indicando que a variação cíclica do nível de maré não necessariamente prejudica o escoamento da chuva extrema, pelo menos em maré de quadratura e escoando com vazões da magnitude aplicada neste estudo.

Nas análise de altura das lâminas de alagamento, constatou-se que as lâminas sobre cursos d’água são maiores devido a menor altitude dos espelhos d’água em relação às margens e planícies adjacentes. Assim, fora do curso d’água qualquer altura de lâmina já constitui alagamento. O mesmo não se pode afirmar sobre as lâminas presentes na calha do curso d’água, pois podem não extravasar a calha do curso d’água.

Observou-se que as maiores lâminas de alagamento se formam na região da planície da margem esquerda do canal Jurumim com cotas próximas de 1,15 m e ali permanecem até o fim do período simulado, com poucos centímetros remanescentes.

3.5. Simulação de cenários alternativos

Depois do evento da chuva extrema que alagou as partes mais baixas da área urbana, a meta principal do trabalho passou a ser a avaliação da qualidade das previsões do modelo hidrodinâmico de simulação do escoamento de cheias. No entanto, continua importante a avaliação de cenários alternativos que produzam previsões de resultados quando se modifiquem as condições adotadas. Tais cenários devem ser os mais próximos possível da realidade já conhecida, avaliando-se a resposta do modelo à maiores vazões ou à modificações estruturais da rede de drenagem, por exemplo. Assim foram especificadas simulações com essa intenção.

Como resultados da simulação principal, que adotamos como referência base para as comparações de outros cenários, apresenta-se o gráfico da figura 37, no qual se sobrepõem as hidrógrafas de nível d'água x tempo das respectivas simulações. Referem-se às três estações ao longo do rio Macaé e mais a da estação Capote, quando o modelo é demandado pelas vazões que vem do alto da bacia submetida a chuva de projeto com TR 10 anos e pela maré astronômica de quadratura atuante no período da cheia ocorrida em 10/03/2018. Também se apresenta sobreposta a hidrógrafa resultante da maré de quadratura atuando como único forçante.

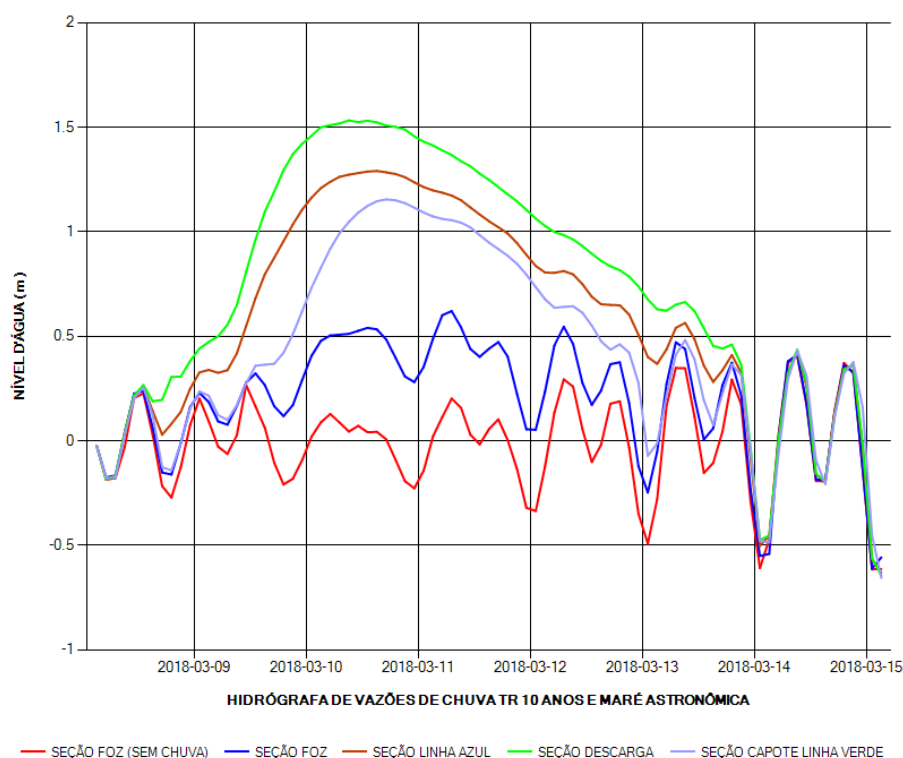


Figura 37 – Gráfico relacionando as elevações do nível d'água no período simulado, em 4 estações de medida de variáveis de estado simulando o evento real em comparação com a ausência de chuva.

Observa-se que o pico da elevação da cheia diminui conforme a seção se aproxima do exutório, variando entre 1,53 m na seção DESCARGA até 0,62 na seção FOZ. Na mesma proporção, o tempo de permanência da cheia diminui também. Se considerar-se que cheia é a condição que apresenta níveis d'água acima de 1,00 m em qualquer estação, então o tempo de permanência dessa cheia arbitrada varia de 60 horas na estação DESCARGA até 30 horas na estação Capote.

Admitiu-se o cenário hipotético, quando a bacia é demandada por chuva de projeto com Tempo de Recorrência (TR) 20 anos num período de maré de sizígia e mantendo-se todas as outras condições da simulação de referência. O gráfico relacionando as elevações de nível d'água ao longo do período simulado nas mesmas estações da simulação de referência é apresentado na figura 38.

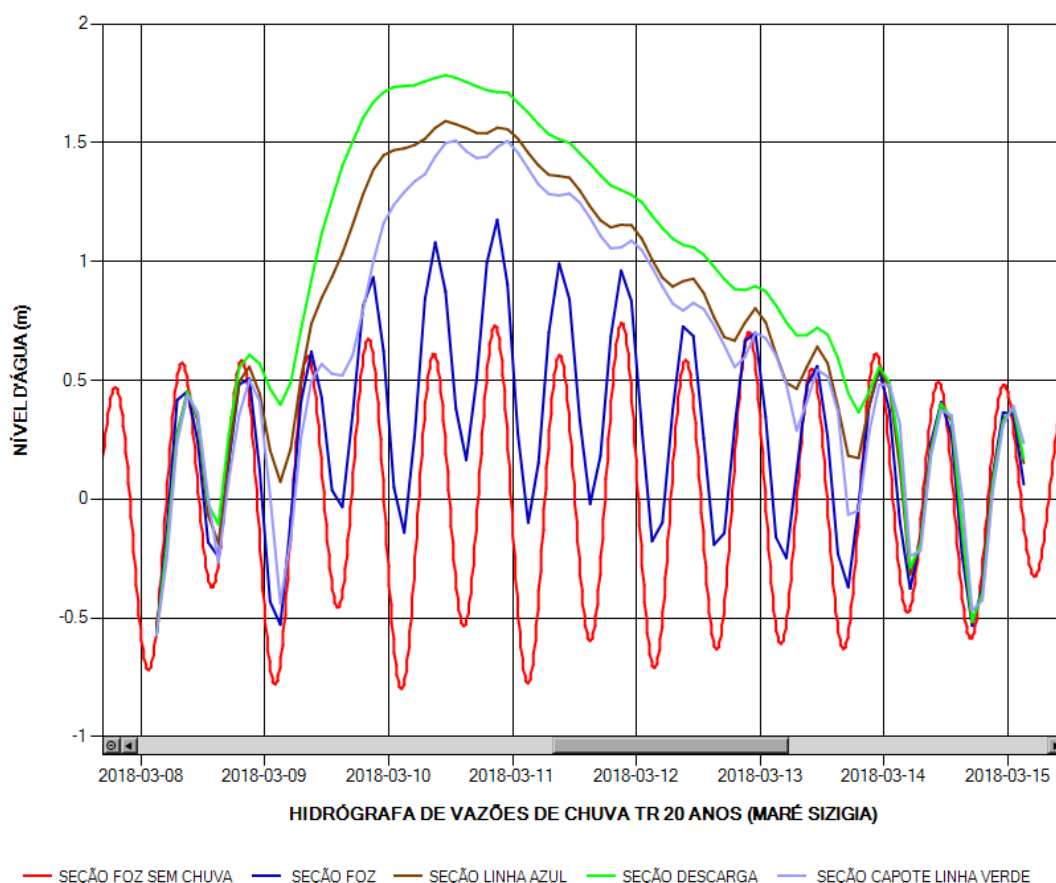


Figura 38 – Gráfico com as elevações de nível d'água nas mesmas estações da simulação de referência, com a bacia submetida a vazão decorrente de chuva extrema TR 20 anos e maré de sizígia.

Observa-se aumento do nível máximo atingido em todas as seções, sendo que os aumentos são maiores com a maior proximidade da foz. Pelos aspectos das curvas hidrógrafas, suspeita-se que a maré de sizígia pode estar interferindo mais nos picos máximos de elevação de nível. Os tempos de

permanência aumentaram de 60 h para 72 h na seção DESCARGA, e de 30 h para 52 h na seção CAPOTE, em relação aos tempos de permanência verificados na simulação de referência.

A modificação da profundidade dos trechos de terceira ordem da rede de drenagem foi um outro cenário avaliado. Inicialmente, os trechos foram especificados com 2,80 m na simulação de referência e no novo cenário reduziram-se estas profundidades para 2,20 m. Apresenta-se o gráfico da figura 39 com as hidrógrafas relacionando as elevações com o tempo decorrido do início da simulação. A curva vermelha representa a condição das elevações de nível, quando a profundidade é menor, e a azul representa as elevações quando a profundidade é a da simulação de referência, ambas na seção CAPOTE.

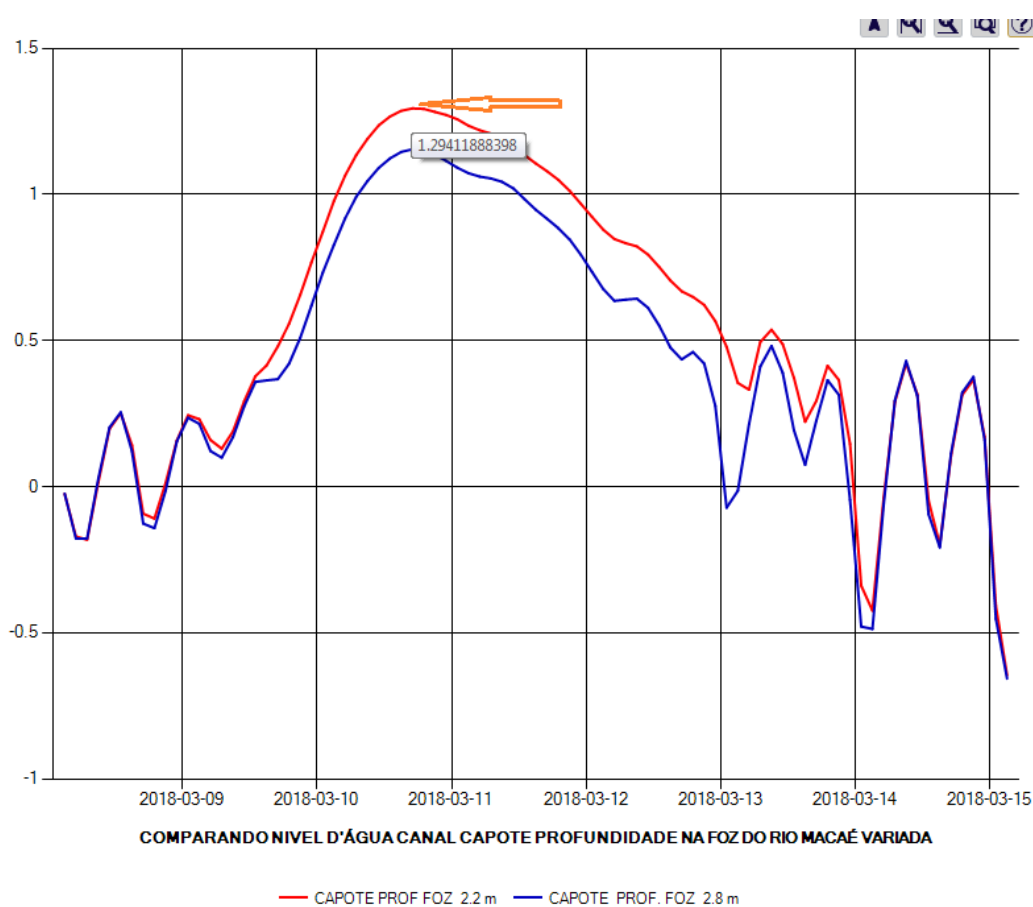


Figura 39 – Comparação do nível d'água na seção Capote variando-se as profundidades na foz do rio Macaé.

Observa-se que a redução da profundidade em 0,60 m acarretou aumento próximo de 0,15 m nas elevações do nível máximo. Informação relevante para análise de Custo x Benefício de dragagem do leito dos canais. O tempo de permanência aumentou de 30 h para 44 h em relação à simulação de referência, quando a profundidade é 2,8 m.

4. CONCLUSÃO

Considerando os resultados produzidos e os objetivos iniciais do trabalho relativos à contribuição com os estudos para implementação das metas relacionadas com manejo de águas pluviais do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (PRH Macaé/Ostras, 2014):

H1 - Proposta de intervenções estruturais visando ao controle de cheias e,

H2 - Proposta de intervenções não estruturais visando a mitigação dos impactos das cheias;

As duas metas com previsão para implementação no ano de 2022, seriam necessárias ou convenientes as seguintes providências adicionais para aperfeiçoamento do modelo hidrodinâmico desenvolvido neste trabalho:

- Adequações em relação ao ajuste da posição do Canal do Capote e do Canal Virgem Santa na rede de drenagem do modelo hidrodinâmico, para que se verifique a performance do mesmo com a configuração da rede de drenagem mais próxima da realidade.
- Amarração altimétrica de todas as estações às RRNN do IBGE, o que permitirá a aferição do nível d'água real atingido pela cheia e na estiagem, nos instantes em que foram medidos, e não apenas a aferição da diferença de níveis relativos verificadas nas estações CAPOTE e TRÊS PONTES, como foi feita neste trabalho. Dessa forma espera-se eliminar alguma incerteza eventualmente passível de ser associada a níveis relativos. E, a amarração das estações CIDADE UNIVERSITÁRIA e RIO MACAÉ LINHA AZUL às RN do IBGE permitirá o aproveitamento das medidas dos níveis d'água durante a cheia, na comparação com níveis d'água dessas estações em condições de estiagem, melhorando-se as condições de verificação do desempenho do modelo.
- Depois das providências acima, caso o modelo seja considerado aceitável e/ou passível de ser melhorado, parece adequado realizar o adensamento das estações de medida das variáveis de estado, de forma que se ampliem as possibilidades de ajustes futuros, com mais informações de campo sobre as dimensões e configurações das seções dos canais.
- Atualizações do MDT com introdução de aterros construídos ao longo das Linhas Verde e Azul, que não existiam na época da confecção da Planta Cadastral Digital (PCD) 1: 2000, verificando-se sua influência nos resultados.

- Cada uma das melhorias na descrição da base topográfica deveria ser avaliada em simulações específicas, como forma de se adquirir maior sensibilidade sobre a relevância de tais revisões.
- Deve-se considerar também que enquanto a vazão oriunda da chuva extrema precipitada a montante da área urbana se forma e cresce para causar os alagamentos estudados, uma eventual precipitação que possa estar ocorrendo na própria área urbana, sozinha ou somada à algum fluxo de base obviamente existente antes da chuva extrema, pode vir a gerar alguma vazão adicional que não foi considerada como forçante no modelo hidrodinâmico proposto neste trabalho. A relevância desta simplificação adotada deveria também ser avaliada e corrigida se necessário.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, K. J. **Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

AMARAL K. J.; ROSMAN P. C. C.; AZEVEDOJ. P.S. Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como Ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos. **Mecânica Computacional** Vol. XXIII, pp. 1167-1185 **G.Buscaglia, E.Dari, O.Zamonsky (Eds.)** Bariloche, Argentina, 2004.

ASSUMPÇÃO, A. P.; MARÇAL, M. S. RETIFICAÇÃO DOS CANAIS FLUVIAIS E MUDANÇAS GEOMORFOLÓGICAS NA PLANÍCIE DO RIO MACAÉ (RJ). **Revista de Geografia**, v. 29, n. 3, p. 19, 2012.

AREIZAGA, J. **MOHID GIS v4.9.2a MANUAL**, 2012.

BARBOZA, A. P. **ESTUDO HIDROLÓGICO DE VAZÕES MÁXIMAS NA BACIA DO RIO MACAÉ**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

BRASIL. nº 89.817. REGULADORAS DAS NORMAS TÉCNICAS DA CARTOGRAFIA NACIONAL. 1984.

BRASIL. nº 9.433. Lei das Águas. 1997.

BRAUNSCHWEIG, F.; BRITO, D.; FERNANDES, L. **User Guide for setting up MOHID Land Project with MOHID Studio Professional Edition**, 2016.

CBH MACAÉ, 2018. Disponível em <http://cbhmacae.eco.br/site/index.php/plano-de-bacia>, acessado em 14/08/2018

COPPETEC. ELABORAÇÃO DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - R3-A – TEMAS TÉCNICOS ESTRATÉGICOS - RT-01 – Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas. Rio de Janeiro: INEA/ SEA, 2014.

HOU, D.; LUO, Y.; ZHU, Y.; XIE, P.; LIN, Y. CCPA Precipitation Analysis: Data Set, Cross Validation and Evaluation. **25th Conference on Hydrology Seattle, WA 23/27 January, 2011.**

IBGE - Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia- RMPG 2001/2015, 2016.

IBGE. Relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana) e outros Níveis Hidrográficos no Litoral Brasileiro (11/02/2009) Disponível em ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros, acessado em 14/08/2018.

LUGON JUNIOR, J. et al. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Macaé utilizando o MOHID Land. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 11, n. 1, p. 169, 30 out. 2017.

MARETEC. DESCRIÇÃO do MOHID. Campos dos Goytacazes: Essentia, 2012.

NAGHETTINI, M. C.; DAVIS, E. G. ESTUDO DE CHUVAS INTENSAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Brasília: CPRM, 2000. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17229>.

RODRIGUES, P. P. G.; LUGON JUNIOR, J. Uso de Modelos Matemáticos na Gestão de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro: Essentia, 2012.

SEA / INEA. Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras: Relatório de Caracterização da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras, (2012).

SEA / INEA. Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras: Relatório Síntese e Diagnóstico Integrado. Rio de Janeiro, (2014).

SEA. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro: Relatório Gerencial, (2014).

SEA / INEA. RELATÓRIO DO DIAGNÓSTICO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA MACAÉ E DAS OSTRAS - (RD-04) – APÊNDICE, (2013).

TAVARES, L. P. S. ESTUDO DE PROPOSTAS DE MITIGAÇÃO DE CHEIAS DO RIO MACAÉ COMO SUBSÍDIO AO PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA VIII. Macaé: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA FLUMINENSE, 2017.

XAVIER, L. N. R. Análise da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo Topmodel (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil), 2002.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO

ALFREDINE, P. - Obras e gestão de portos e costas: A técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. **Editora Edgard Blücher**, 2005.

IBGE. **Relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana) e outros Níveis Hidrográficos no Litoral Brasileiro** (11/02/2009) Disponível em ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros.../outros.../relacao_dvsbg_nr_zh, acessado em 14/08/2018.

BRAUNSCHWEIG, F.; TRANCOSO, A. R.; GAMBOA, M.; FRANCA, M. J. Análise de Risco de Cheias Utilizando um Modelo Hidrológico Distribuído em Regime Variável. In: **X CONGRESSO DA ÁGUA, Alvor**, 2010.

MARÇAL, M. S.; LIMA, R. N. S.; VILLAS BOAS, G. H.; HINGEL, R. L. Mapeamento de feições geomorfológicas no sistema encosta-planície da bacia do rio Macaé (RJ), **IV Congresso Argentino do Cuaternário y Geomorfologia, XII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, II Reunión sobre el Cuaternário de América del Sur**, 2015.

MOORE, I. D.; TURNER, A. K; WINSON, J. P.; JENSON, S. K.; BAND, L. E. **GIS and land-surface-subsurface process modeling**, 1993. <https://www.researchgate.net/publication/246324435>, acessado em junho/2018.

SANTOS, M. A urbanização brasileira. **Editora de Humanismo, Ciência e Tecnologia HUCITEC Ltda.**, 1993.

SILVA, M. R.F.; PAZ, A. R. Avaliação do Impacto da Incorporação do Traçado das Ruas na Simulação de Inundações Urbanas - Universidade Federal da Paraíba – **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2013.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento de Drenagem Urbana. **Revista brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7 nº1 Jan/Mar 2002, pp.5-27.

VIEIRA, I. M. Integração de dados de expansão urbana e dados geotécnicos como subsídios ao estabelecimento de critérios de ocupação em urbana. In: **VII SIMPÓSIO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Curitiba, v.1 p. 163-171, 1993.

VILAS BOAS, L.; LUGON JUNIOR, J.; RODRIGUES, P. P. G. W. Estudo das Cotas de Inundação em Canais Urbanos de Pequenas Bacias Hidrográficas, Próximas a Áreas Estuarinas, sob Efeito de Marés. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 10, n.2, p.119-130, 2016,