

Estudo das cotas de inundação em canais urbanos de pequenas bacias hidrográficas, próximas a áreas estuarinas, sob efeito de marés

Study of flood quotas in urban channels of small hydrographic basins, close to estuarine areas, under tidal effect

Luciano Vilas Bôas*
Jáder Lugon Junior**
Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues***

Este trabalho apresenta os resultados gerados por modelo hidrodinâmico aplicado ao canal do Capote localizado na área urbana de Macaé/RJ e avalia as inundações decorrentes de picos de chuvas na microbacia e as marés de sizígia em seu estuário. O software utilizado inclui um algoritmo na forma implícita de quatro pontos para resolução das equações completas de Saint-Venant pelo método das diferenças finitas, com aproximações para ambas as derivações: temporal e espacial, originadas da continuidade e momento. A solução para a taxa de escoamento e elevação da superfície líquida foi então obtida para tempos e distâncias incrementais ao longo do canal. A partir das informações topobatimétricas disponíveis, foi construído um modelo digital de terreno, calibrado, medindo-se as variações limnimétricas do canal e vazões, e comparando-se os dados observados e simulados para as condições de picos e baixas. Os modelos simularam diferentes cenários, com ênfase principalmente naqueles que foram gerados sob regime de alta vazão, por representarem situação mais crítica do ponto de vista ambiental e do interesse deste trabalho. Os resultados mostraram que, para essas condições, áreas importantes próximas a esse canal serão inundadas.

| 119 |

Palavras-chave: Inundação. Canais. Marés. Chuvas. Estuário.

This paper presents the results generated by a hydrodynamic model applied to the Capote Channel in the urban area of Macaé / RJ. It also evaluates the flooding resulting from rainfall peaks in the micro-basin and spring tides in its estuary. The software used in the investigation includes a four-point implicit algorithm to complete resolution of Saint-Venant equations by finite difference method, with approximations to both derivations: time and space, originated from continuity and momentum. The solution to the flow rate and increase of the liquid surface was obtained for times and incremental distances along the channel. From the top-bathymetric information available, a digital terrain model was built and calibrated by measuring the limnimetric variations of the channel and flows, as well as by comparing the observed and simulated data for the conditions of peaks and troughs. The models simulated different scenarios, with special emphasis on those generated under high flow regime as they represent the most critical situation from an environmental approach and aim of this work. Results showed that, for these conditions, important areas close to that channel will be flooded.

Keywords: Flood. Channels. Tides. Rain. Estuary.

* Especialista em Análise de Sistemas (CENID), Mestrando em Engenharia Ambiental do PPEA/IFF, Engenheiro mecânico (UFBA) - Brasil. E-mail: vilasboas.eng@gmail.com.

** Doutor em Modelagem Computacional (UERJ). Engenheiro Mecânico, Professor do Instituto Federal Fluminense *campus* Macaé/RJ - Brasil. E-mail: jlugonjr@gmail.com.

*** PhD pela School of Marine Science and Technology - University of Newcastle Upon Tyne (2003). Professor Associado do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Nova Friburgo/RJ - Brasil. E-mail: pwatts@iprj.uerj.br.

1 Introdução

Praticamente toda semana tomamos conhecimento de países que enfrentam intensos eventos hidrológicos, atribuídos às mudanças climáticas globais, com grandes prejuízos econômicos e perdas de vida. Inundações são riscos naturais, imprevisíveis até certo ponto, mas, inevitáveis (UNISDR, 2012). Este trabalho apresenta os resultados gerados por modelo hidrológico e hidrodinâmico, aplicado ao canal do Capote localizado na área urbana de Macaé/RJ, com o objetivo de avaliar as inundações decorrentes de picos de chuvas, cheias do rio Macaé e marés de sizígia em seu estuário, úteis, quase sempre, no licenciamento e construção de novos empreendimentos.

O modelo foi calibrado medindo-se as variações limnimétricas do canal e vazões em várias campanhas e localizações, comparando-se os dados observados e simulados para as condições de picos e baixas. Uma vez calibrados, os modelos simularam diferentes cenários, com ênfase principalmente naqueles que foram gerados sob regime de alta vazão, por representarem situação mais crítica do ponto de vista ambiental e do interesse deste trabalho. Os resultados mostraram que, para essas condições, áreas importantes próximas a esse canal serão inundadas. A implementação dos modelos aqui apresentados obedeceu à sequência usual necessária para tal propósito. Fazendo-se uso das informações topobatimétricas disponíveis, inicialmente foi construído um Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de interesse na condição natural (LUGON JR et al., 2016).

Os estudos objetivaram desenvolver e testar um sistema de avaliação de inundações em microbacias urbanas, através do desenvolvimento de um modelo hidrológico-hidráulico que incorporasse as características físicas da bacia (MDT, escoamento superficial, nível e vazão do canal principal), da análise do regime das marés e aplicação dos dados de intensidade de chuva estimados.

2 Metodologia

Existem vários modelos para estudo das inundações que ocorrem principalmente pelo efeito de propagação de ondas de cheias em canais e rios. Os principais modelos para estudo das inundações são: Hidrodinâmico, Difusão, Onda cinemática, Armazenamento, Muskingum e modificação Muskingum-Cunge. Segundo Tucci (1998), os modelos hidrodinâmicos são aqueles que utilizam a forma completa das equações de Saint-Venant, utilizadas neste trabalho.

Segundo Monteiro (2015), as simulações hidrodinâmicas utilizam métodos numéricos para resolver as equações diferenciais do escoamento (Equação do Movimento e da Continuidade). Em hidrodinâmica, o método das Diferenças Finitas é um dos mais utilizados. Este método reduz um problema de sistemas de equações e fornece uma solução em pontos (nós) discretizados no interior do domínio do problema. Em sua totalidade, os escoamentos são não permanentes já que variam ao longo do tempo. Quando se tem interesse na variação de um fluxo com o tempo, como no caso de propagação de hidrogramas, torna-se necessário o uso de equações que levam em consideração a variação temporal do escoamento.

A equação de Saint-Venant é uma das formulações clássicas para o cálculo de escoamentos em canais. Mesmo que esta equação possua simplificações, como o da pressão hidrostática e o da difusividade do fluido, ela é aceita e amplamente utilizada. Esta é definida pela equação dinâmica:

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{aceleração local}} + \underbrace{\frac{\partial \frac{Q^2}{A}}{\partial x}}_{\text{aceleração advectiva}} + \underbrace{gA \frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{pressão hidrostática}} = \underbrace{gAS_o}_{\text{declividade de fundo}} - \underbrace{gAS_f}_{\text{declividade da linha de energia}}$$

e é utilizada junto à equação da continuidade:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + q = 0$$

em que Q é a vazão normal a seção transversal, A é a área molhada da seção transversal, x é a distância, g é a aceleração da gravidade, h é a profundidade do escoamento, S_o é a declividade do canal, S_f é a declividade da linha de energia, q são as vazões laterais entre duas seções e t é o tempo. Para simulações bi ou tridimensionais se utiliza ou uma modificação da equação de Saint-Venant, ou as equações de Navier-Stokes.

Chow et al. (1988) confirmam que as equações de Saint-Venant para escoamentos distribuídos não são facilmente resolvidas por soluções analíticas, exceto em pouquíssimos casos. Existem equações diferenciais parciais, em geral, resolvidas utilizando-se métodos numéricos. Tais métodos são classificados como Métodos Característicos ou Numéricos Diretos. Para os Métodos Diretos as equações das diferenças finitas são formuladas a partir das equações diferenciais parciais originadas da continuidade e do momento. A solução para a taxa de escoamento e elevação da superfície líquida é então obtida para tempos e distâncias incrementais ao longo do canal. Em métodos numéricos para resolução das equações parciais, os cálculos são executados em uma malha localizada sobre o plano x-t. O plano x-t é uma rede de pontos definidos por incrementos de distância de comprimento x e incrementos de tempo de duração, os pontos de distância são denotados pelo índice i e os pontos de tempo pelo índice j . A linha do tempo (Figura 1) seria uma linha paralela ao eixo x por todas as distâncias e para um valor de tempo definido.

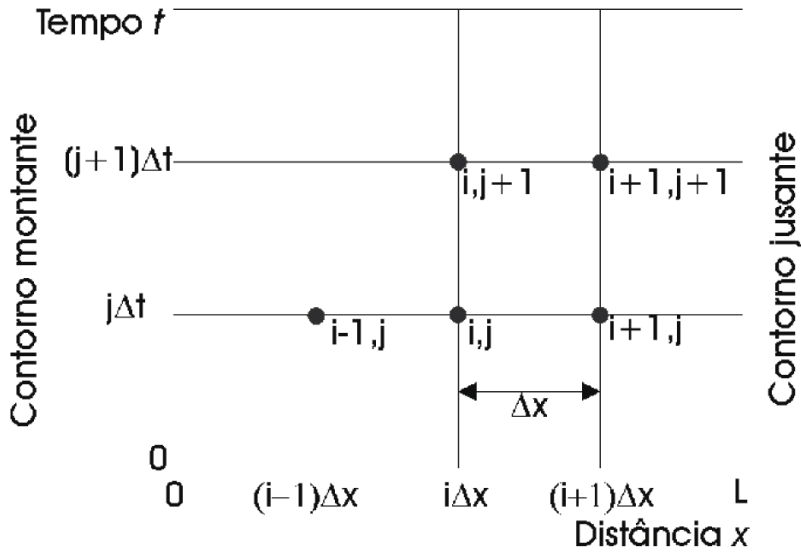


Figura 1: Malha do plano $x-t$ usada para solução numérica das equações de Saint-Venant por diferenças finitas Adaptado de Chow et al. (1988).

| 122 |

Esquemas numéricos transformam as equações diferenciais governantes em um esquema de equações de diferenças finitas algébricas, que pode ser linear ou não linear. As equações de diferenças finitas representam as derivadas espaciais e temporais em termos de variáveis desconhecidas em ambas as linhas do tempo, $j+1$, e sua linha precedente, j , onde todos os valores são conhecidos do cálculo anterior. A solução das equações de Saint-Venant avança de uma linha do tempo para a próxima. O método das diferenças finitas pode utilizar o esquema implícito ou o esquema explícito. A principal diferença entre os dois é que, para o esquema explícito, os valores desconhecidos são obtidos de forma sequencial ao longo do eixo do tempo de um ponto de distância para outro; enquanto que, no esquema implícito, os valores desconhecidos em uma linha do tempo são obtidos simultaneamente. O esquema explícito é bem mais simples, mas pode ser instável, o que significa que valores de x e t pequenos são necessários para a convergência numérica da simulação.

Para Campos (2012), o esquema explícito é mais conveniente porque os resultados são fornecidos em pontos de uma malha, e assim pode-se tratar as variações sutis do canal de uma seção para outra, mas é menos eficiente que o esquema implícito, e assim não adequado para simulação de vazões por longos períodos. O esquema implícito é matematicamente mais sofisticado, o que não se traduz num problema sério com a aplicação de computadores. O esquema implícito é estável para longos intervalos com baixa perda de precisão e assim trabalha mais rápido que o esquema explícito. Este método também pode suportar variações significativas entre as seções que descrevem o canal.

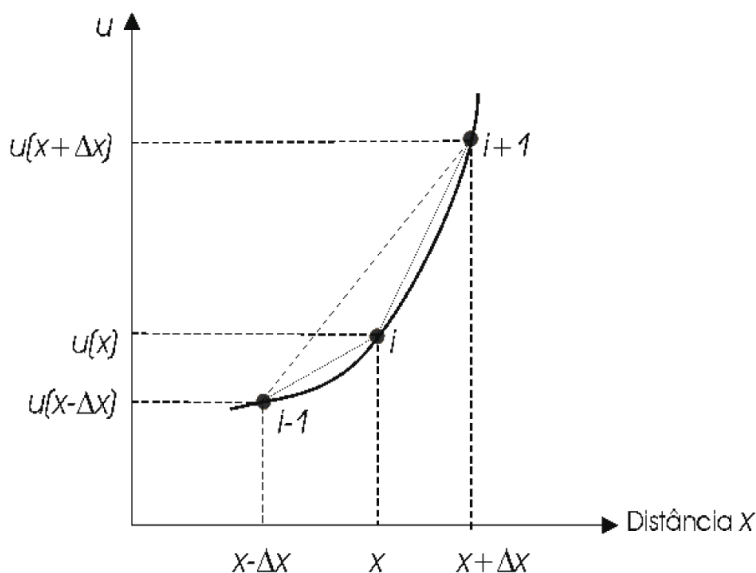


Gráfico 1: Aproximações por diferenças finitas para a função $u(x)$
 Adaptado de Chow et al. (1988)

A aproximação para o esquema de diferenças finitas (Gráfico 1) pode ser aproximado pela função $u(x)$. Por um processo de expansão da série de Taylor de $u(x)$ em um ponto $x + x$ que possui um erro de aproximação de ordem de x . Este erro de aproximação, devido à eliminação dos termos de ordem maior, é também referido como erro truncado. O software utilizado neste trabalho (HEC-RAS) inclui em seus algoritmos a forma implícita de quatro pontos para resolução do método das diferenças finitas, conhecido como “esquema caixa”. Os esquemas implícitos usam as aproximações por diferenças finitas para ambas as derivações temporal e espacial em termos da variável dependente em uma linha do tempo qualquer (USACE, 2016).

3 Desenvolvimento

O canal do Capote (22° 22' 46.73" S, 41° 48' 05.55" W) com extensão de 5,63 km (Figura 2), nasce no bairro da Glória e deságua no rio Macaé na altura dos bairros Botafogo e Malvinas. Historicamente suas inundações são fortemente influenciadas pelas cheias do rio Macaé. A bacia hidrográfica do canal foi delimitada a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 10 metros entre curvas de nível, obtido a partir das Cartas de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações, elaborada pelo CPRM/IPT (2012), incluído no plano plurianual do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão que abrange atualmente 286 municípios brasileiros.



Figura 2: Localização do canal do Capote na Bacia Hidrográfica do Rio Macaé

Fonte: dos autores

Segundo Tavares (2011), a região do estudo (baixo curso do rio Macaé) está localizada no litoral norte-fluminense e sofre o impacto de toda a bacia hidrográfica. A bacia apresenta dois aproveitamentos hidrelétricos na sub-bacia do rio São Pedro: a UHE Macabu e a UHE de Glicério (atualmente desativada). No baixo curso do rio Macaé estão instaladas duas usinas termelétricas, a UTE Mário Lago e a UTE Norte Fluminense, que recentemente foram incorporadas ao patrimônio da Petrobras. Neste trabalho, o autor utiliza a modelagem computacional para criar diversos cenários e simulações através do programa MOHID (Water Modelling System), utilizando variáveis de batimetria e fluviometria que podem alterar a disponibilidade hídrica do rio Macaé e impactar diretamente o canal do Capote.

Os dados hidrológicos foram levantados a partir do *site* Hidroweb da ANA – Agência Nacional de Águas e do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica Macaé/Ostras (INEA, 2013). Calcularam-se algumas características físicas da bacia (área, declividade média, tempo de concentração etc.), utilizadas como dados de entrada do modelo HEC-HMS, que, a partir de uma chuva de projeto de uma área com características semelhantes, gerou o hidrograma estimado para uma precipitação crítica com duração de 6 horas (Gráfico 2). Inicialmente, calculou-se uma vazão de pico de cerca de 2 m³/s no canal, sendo utilizado um multiplicador 2 para posterior simulação de uma chuva maior. Esses dados foram inseridos no modelo como condição de contorno a montante do canal.

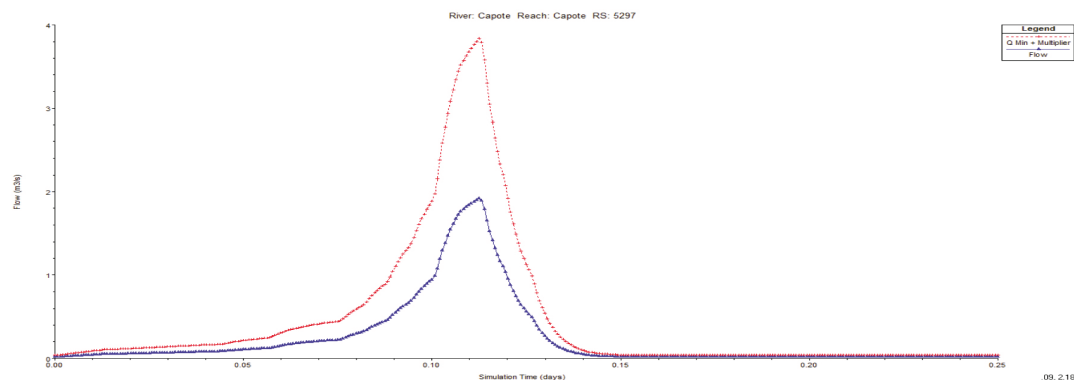


Gráfico 2: Hidrograma do canal do Capote para uma chuva crítica de 6 horas

A determinação dos dados batimétricos e de vazões foi feita através de levantamento em campo em 3 (três) campanhas, a primeira a fim de determinar as variáveis hidráulicas referentes a morfologia e profundidade do fundo do canal, a área e perímetro da seção e da seção molhada.

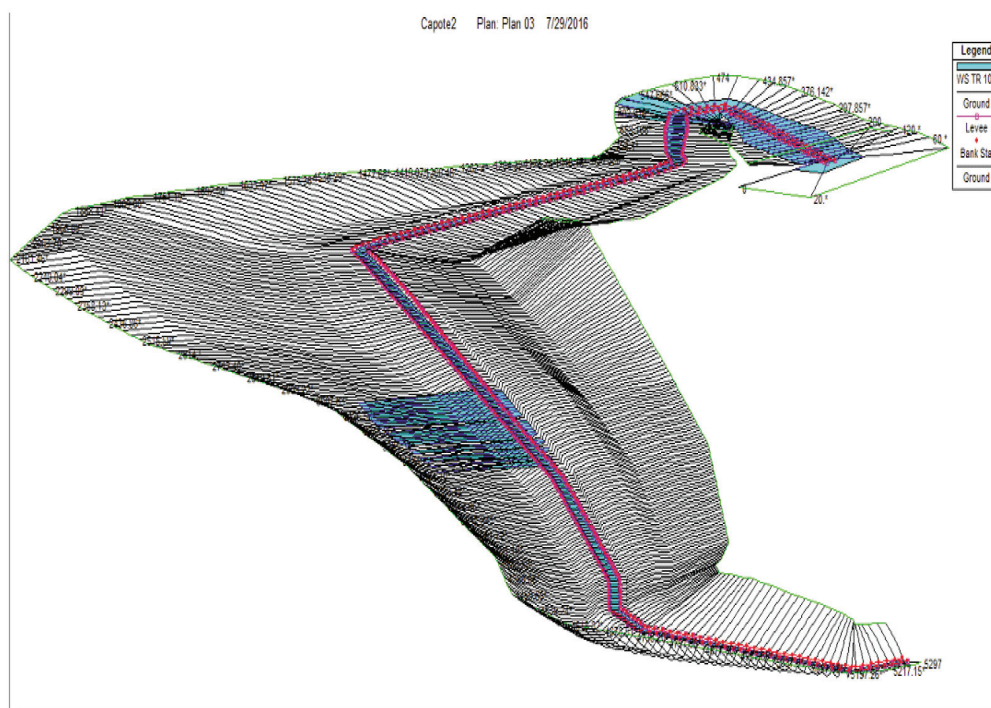


Gráfico 3: Visão 3D do Modelo Digital do Terreno (MDT) do canal do Capote

Na segunda e terceira campanha, determinaram-se as vazões e variações de profundidade ao longo do dia do canal de drenagem principal da bacia no seu trecho médio e mais alto do canal a

partir da velocidade do fluxo no sentido do movimento com desvio máximo de 20° no sensor e área da seção transversal ao fluxo. Ambas foram feitas em período pouco chuvoso (agosto e setembro).

Foi feita uma equalização das medições, visando definir um único datum, inseriram-se no modelo hidrodinâmico o talvegue, as seções transversais topobatimétricas e o Coeficiente de Manning para as planícies de inundação e para o canal e a distância até a próxima seção transversal, gerando-se seções interpoladas pelo método linear, de 10 em 10 metros no MDT que pode ser visualizado em 3D (Gráfico 3). Com a ferramenta *Compute Interpolation Surface*, estenderam-se as seções transversais.

Finalmente, manusearam-se os mapas simulados na ferramenta *RAS Mapper* (profundidades e velocidades) para transformá-los em mapas de risco de inundação, apelando-se para algum algebrismo. Em alguns casos assumem-se valores empíricos razoáveis através de observações e experiências reais para facilitar a resolução analítica da teoria hidráulica desses canais (CHOW, 1959).

3.1 Influência das marés

No tocante às marés, utilizaram-se inicialmente como condição de contorno a jusante (Gráfico 4) as alturas do marégrafo (hidrógrafa de marés) instalado (22° 23' 09.62" S, 41° 46' 11.48" W) no Porto de Imbetiba nessa mesma cidade, contendo os dados do mesmo período de tempo do hidrograma gerado no modelo HEC-HMS, e com variações referentes ao mesmo datum do MDT. Observa-se que nesse dia as marés variaram em até ~1,65 m. O levantamento de dados de altura de maré na entrada do canal do Capote permitiu calcular a altura neste em ~1,23 m, mostrando uma atenuação da onda de cheia da maré entre o Porto de Imbetiba e a entrada do canal em ~0,42 m.

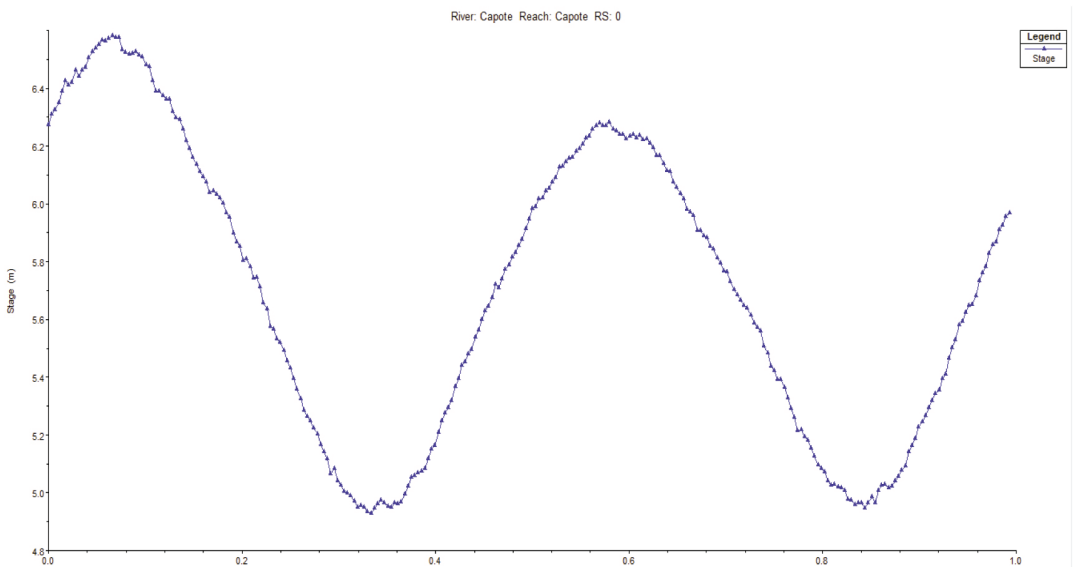


Gráfico 4: Hidrógrafa do Porto de Imbetiba em Macaé/RJ, referente ao mesmo datum

Posteriormente foram instaladas de forma “definitiva” as réguas limnimétricas (alumínio anodizado branco, tinta lavável com ~2,5 m) em pontos estratégicos do canal (Figura 3), tendo-se mobilizado moradores que se comprometeram, de forma voluntária, a enviar fotos via WhatsApp, principalmente no período de marés de sizígia, já tendo sido recebidas até o presente momento dezenas de fotos. A leitura dos pontos de medições mostrou o amortecimento da onda de vazão dentro do canal, o que já havia sido detectado rodando o modelo com as variações de altura das marés do Porto de Imbetiba como referência direta para entrada do canal do Capote.



Figura 3: Foto de régua limnimétrica instalada, enviada por morador em 17/09/2016 via WhatsApp

Este levantamento de dados das variações da altura das marés permitiu a calibração do modelo hidrodinâmico, confirmando o aumento na altura da onda propagada no canal do Capote nas marés de sizígia, já previsto em simulações anteriores.

Foi observada também a grande influência da **comporta** existente na entrada do bairro das Malvinas em medições feitas antes e depois dela, tanto na dimensão temporal como espacial da onda de propagação, tanto na subida como na descida do fluxo.

4 Resultados

Uma premissa básica que sempre deve ser considerada na modelagem matemática é a de que os modelos nunca podem gerar resultados melhores do que os dados lhes são fornecidos como “entradas” (LUGON JR et al., 2016). O Gráfico 5 apresenta a situação mais crítica obtida nas simulações com uma grande chuva de projeto com duração de 6 horas sob efeito de maré de sizígia. Nele podemos observar elevação de até aproximadamente 1,6 m no nível do canal na altura dos bairros de Botafogo e Malvinas. O pico ocorre num momento de pico da maré de sizígia em que a água acumulada no canal pela chuva intensa ainda está escoando.

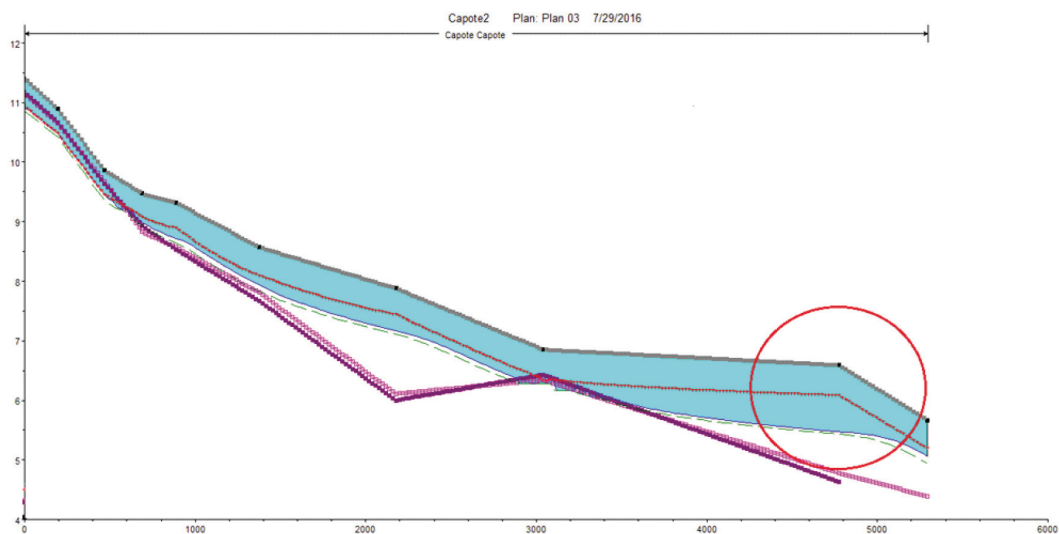


Gráfico 5: Elevações críticas do canal do Capote (m) X distância (m)

Os resultados apresentados mostraram bastante consistência com dados observados, considerando-se a complexidade dos ambientes, fornecendo informações que facilitam a construção de mapas e definição de cotas de inundação (ou cota de segurança) úteis no licenciamento e construção de novos empreendimentos que, dependendo da localização do terreno, vão demonstrar que a construção está protegida de eventuais cheias em rios e/ou canais próximos, evitando perdas de investimento e até vidas. Como resultados o software gerou ainda os seguintes relatórios, não discutidos no presente trabalho: curvas-chave, tabelas de propriedades hidráulicas, variações das propriedades por seções (interpoladas ou não) e diversos tipos de relatórios tabulares, customizados através da exportação para planilhas de cálculo.

5 Conclusões

As simulações efetuadas até agora no canal do Capote mostram baixa influência nas inundações (Figura 4 – em azul) devido às pequenas alterações da forma das seções transversais do canal, sua natureza (tipo de fundo, presença de vegetação etc.) e lançamentos de determinadas vazões adicionais ao longo do canal. Acredita-se que um estudo mais detalhado da comporta, com possíveis alterações em sua forma atual e constantes limpezas (retirada de entulhos, macrófitas etc), possa melhorar a sua dinâmica.

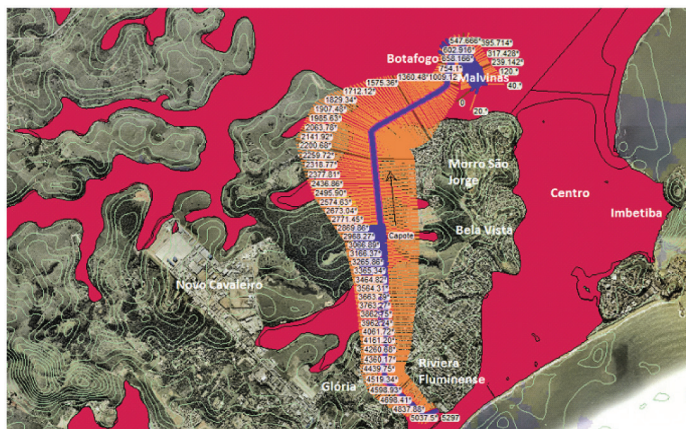


Figura 4: Mapa de inundação do canal do Capote (azul) X Inundação do rio Macaé sob influência de picos de chuva e marés de sizígia (vermelho), base CPRM / IPT (2012)

O estudo criou um modelo que permite testar e avaliar inundações em microbacias urbanas em áreas estuarinas, através de um modelo hidrológico-hidrodinâmico que incorpora as características físicas da bacia (MDT, escoamento superficial, nível e vazão do canal principal), bem como a análise do regime das marés relacionado ao canal e à intensidade de chuva estimada.

As maiores influências sobre as inundações (Figura 4 – em vermelho) no canal e nas várzeas próximas ocorrem por conta das cheias do rio Macaé, da influência das marés de sizígia e das obstruções em pontes e tubulações. Para ampliação dos resultados e melhoria da qualidade da informação obtida a partir dos modelos, sugere-se ainda um refinamento da qualidade do terreno digital a partir de levantamentos topobatimétricos mais apurados, estudo mais detalhado da influência de outros canais na microbacia e do próprio rio Macaé, bem como modelagem hidrodinâmica 2D completa.

Agradecimentos

A Deus e a todos que sempre estiveram por perto e em particular à FAPERJ e ao CNPq pelo apoio.

Referências

- CAMPOS, R. G. D. *Análise da Representatividade de Diferentes Hipóteses de Modelagem Matemática para Definição de Manchas de Inundações em Áreas Urbanas: Estudo de Caso da Cidade de Governador Valadares*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2012.
- CHOW, V. T. *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGRAW-HILL Book Company, 1959. 680p.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw Hill, 1988.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Programa Gestão de Riscos a Respostas a Desastres Naturais*. Brasil, 2012.
- INEA. Instituto Estadual do Ambiente. Relatório de Caracterização da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras: Apêndice. In: *Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras*. Rio de Janeiro, 2013.
- LUGON JR, J.; RIBEIRO COSTA, V. T.; RODRIGUES, P. P. G. W. *Avaliação do Impacto de Pequena Central Hidrelétrica na Qualidade de Água do Rio Itabapoana Através de um Modelo Computacional*. Mestrado (Dissertação) - Instituto Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Modelagem Computacional, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M.; ZAMBRANO, F. C. *Mapeamento de Perigo de Inundação*. UFRGS/IPH/GPDEN, Porto Alegre, 2015. 91p.
- TAVARES, J. H. S. *Estudo de disponibilidade hídrica do baixo curso do Rio Macaé - RJ utilizando modelagem computacional*, Macaé (RJ). Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal Fluminense, 2011. 59p.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Ed. Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. ABRH, 1998. 669p.
- UNISDR. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, UN. United Nations, *Introducing Disaster Risk Reduction and Resilience*. Abr. 2012.
- USACE. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. HEC. RAS. River Analysis System 5.0.1. *2 D Modeling User's manual*. Calif.: [sn], Abr. 2016a.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. HEC. RAS. River Analysis System 5.0.1, *Hydraulic reference manual*. Calif.: [sn], Abr. 2016b.