

IV-310 - MODELAGEM HIDRODINÂMICA PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES NO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA, ESTADO DE ALAGOAS

Daniel Palmeira Sinivirta⁽¹⁾

Graduando em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente pela Universidade Federal Fluminense (UFF).

Vitor Rocco Albernaz⁽²⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Mestrando em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ.

João Paulo Rebechi Fraga⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Mestrando em Engenharia Urbana na Escola Politécnica da UFRJ.

Dario de Andrade Prata Filho⁽⁴⁾

Professor de Saneamento Ambiental, Escola de Engenharia, UFF. Engenheiro Civil e Engenheiro Agrícola e Ambiental, UFV. Mestrado em Drenagem e Irrigação, UFV. Pós-graduação em Engenharia de Saúde Pública, FIOCRUZ. Doutorando em Engenharia Ambiental, UFRRJ.

Endereço⁽¹⁾: Rua Ferreira Pontes, 286, ap. 403ª. Rio de Janeiro – RJ – CEP: 20541-280 - Brasil - Tel: (21)986965488 - e-mail: danielsinivirta@gmail.com

Endereço⁽²⁾: Rua Cazuza, 25, apart. 102. Rio de Janeiro – RJ – CEP: 22765-070 - Brasil – Tel.: (21) 99861-5432 – e-mail: vraz@outlook.com.br

Endereço⁽³⁾: Rua Farani, 60 - Botafogo – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 22231-020 - Brasil - Tel: (21) 98618-3336 - e-mail: jpraga@poli.ufrj.br

Endereço⁽⁴⁾: Rua Passo da Pátria, 256, Sala 242-A, Bloco E - Escola de Engenharia - Universidade Federal Fluminense; São Domingos - CEP 24210-240 - Niterói-RJ; Tel.: 21 99679-7538; 20/05/57. E-mail: darioprata@gmail.com

RESUMO

Eventos extremos de inundação são responsáveis por causar cheias em cidades que margeiam rios e lagoas, sendo um dos desastres naturais mais danosos social e economicamente no Brasil, onde sua incidência vem ficando mais frequente. Este trabalho teve como objetivo aplicar modelagem computacional para simular previsões de eventos de inundação. A modelagem foi realizada baseando-se em dados do evento de inundação ocorrido em maio de 2017 no complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba, além de dados históricos, para prognóstico de diferentes cenários. A modelagem foi capaz de reproduzir o evento real, mostrando correspondência entre os dados medidos e simulados, assim calibrando o modelo. A análise da inundação de TR 50 e 100 anos mostrou um aumento progressivo significativo dos níveis de cheia, revelando a importância de serem tomadas medidas preventivas. Conclui-se a necessidade do estudo do uso do solo no aumento dos níveis de escoamento superficial das águas de chuva e em ocupações irregulares, que tornam áreas urbanas vulneráveis às inundações.

PALAVRAS-CHAVE: Inundação, Macrodrenagem, Modelagem Hidrodinâmica, Sistema Estuarino-lagunar.

INTRODUÇÃO

As principais formas de desastres naturais incidentes no Brasil são decorrentes de eventos extremos de chuva com altas intensidades. Estima-se que, entre 1960 e 2008, 15 milhões de pessoas foram afetadas e ocorreram mais de 5000 mortes. Nas últimas décadas, foi observado uma intensificação desses eventos, o consenso entre vários autores é de que seria consequência do intenso processo de desenvolvimento urbano. Diversas intervenções antrópicas contribuem para essa intensificação, como o desmatamento, alterações geomorfológicas, alteração da drenagem local e construções em locais inapropriados (Tominaga et al, 2012).

Para mitigar os danos das inundações, uma série de medidas podem ser adotadas, como decisões políticas, planejamento, *design* e aspectos operacionais. Elas podem atuar tanto na redução da exposição da inundação como também aliviar os impactos por elas causados (Moore, 2015). Uma região que sofre com eventos de

inundação extremos com frequência é o complexo estuarino-lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). Trata-se de um sistema hídrico formado por duas lagoas, denominadas Mundaú e Manguaba, que são conectadas por meandros e desembocam em um delta no mar (ANA, 2004). As lagoas também possuem extensas áreas de drenagens de bacias diferentes, sendo a de Mundaú com 4281 km² e Manguaba com 3671 km². Em eventos extremos de chuva, observa-se o extravasamento das águas e a inundação de áreas urbanas localizadas em planícies inundáveis. Algumas delas foram marcantes e geraram altos prejuízos; como em 1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010 e 2017.

Alguns estudos após as cheias de 1988 e 1989 apontaram a necessidade de medidas estruturais para mitigação dos eventos, assim como estudos sobre a abrangência dos eventos (Monte et al, 2015). Ambas as lagoas se interconectam por canais que compõem sua parte estuarina, que somam 12km² de área de lâmina d'água, que então desembocam no mar (ANA, 2004).

O mapeamento de inundações pode ser obtido como resultado da modelagem hidrodinâmica da região estudada. Esta técnica vem sendo muito difundida para estudos em regiões estuarinas, pois se utilizam dados que possibilitam uma boa representatividade da complexidade da geomorfologia e da dinâmica dos corpos hídricos. A qualidade destes dados de entrada é frequentemente salientada como um fator importante para se obter um resultado coerente. Os dados em questão são: hidrogramas de entrada a montante; modelos de terreno; batimetria; definição da rugosidade do solo; e maregrama na fronteira com o mar. Alguns exemplos de estudos de inundação em regiões estuarinas são os de Souza et al (2004), Monte et al (2015), Fachi, Barros e Rosman (2017) e Kumbier et al (2017).

O objetivo deste trabalho foi de mapear as machas de inundações no Complexo Lagunar Mundaú-Manguaba por meio de modelos hidrodinâmicos. A ferramenta de modelagem simula a realidade estudada, onde a qualidade dos dados diz sobre sua acurácia. Esses dados representam as condições de contorno do sistema, a serem calibrados para a melhor representação. A área de estudo é apresentada na Figura 1.

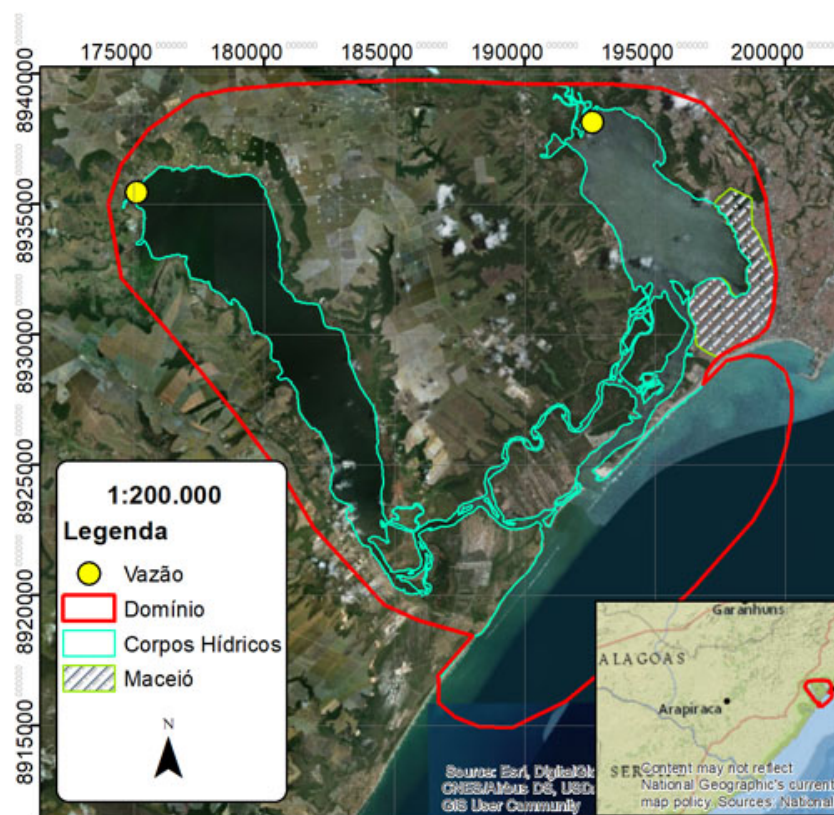


Figura 1 - Domínio da área de estudo e delimitação dos corpos hídricos. Fonte: Elaborada pelo autor

A ferramenta de modelagem hidrodinâmica utilizada foi o software HEC-RAS 5.0.3 desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC). O modelo hidrodinâmico é capaz de operar em modo 1D ou 2D, permitindo o cálculo de escoamentos unidimensionais e bidimensionais, em regime permanente ou não permanente. No modelo 2D, existem duas opções de equações a serem resolvidas, a equação de Ondas Difusivas e a equação de Saint-Venant, que utiliza método de volumes finitos implícito para sua solução (Brunner, 2016).

O presente trabalho utilizou a solução 2D do modelo em regime não permanente utilizando a equação de Saint-Venant, por se tratar de uma região ampla e com morfologia complexa, com a vazão e velocidade variando no tempo e no espaço. Os dados de entrada utilizados são a topobatimetria da região, a caracterização da rugosidade de fundo, pela variação dos níveis de maré, e com os dados de hidrograma de entrada. Além destes dados de entrada do modelo, foi criada uma malha regular quadrangular (automaticamente ajustada para triangular quando necessário) de 25m de lado, onde quanto menor é esse lado, melhor é o refinamento do resultado da solução numérica, ao custo de um tempo de processamento mais alto (Fewtrell et al, 2008).

MATERIAIS E MÉTODOS

As informações topobatimétricas foram processadas utilizando ambiente SIG. Foi utilizado Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pelo projeto Topodata, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cuja resolução espacial é de 30m. Nos trechos onde a mancha de inundação foi analisada, foi gerado MDE a partir de curvas de nível de 1m cedidas pelo Departamento de Geoprocessamento da Prefeitura de Maceió. As informações batimétricas foram obtidas pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), tendo sido produzidas pela Portobrás.

A rugosidade de fundo determina a resistência ao escoamento durante a propagação da onda de cheia. Para achar os valores de rugosidade, foi feito estudo do uso do solo das regiões dos arredores das lagoas para se achar os valores do coeficiente de Manning para cada classe, tabelados por Chow (1959), e que foram utilizados como parâmetros de entrada no modelo. A partir dos valores tabelados, eles foram calibrados para ajustar a altura da cota de inundação modelada para a cota obtida em campo durante evento real de inundação até os valores se ajustarem, como recomenda Brunner (2016).

A maré aparece na condição de jusante do sistema. Nessa posição a maré pode proporcionar o efeito de fluxo de entrada ou de saída no sistema, onde em cada passo do processamento se tem um nível de maré e um nível dentro do corpo hídrico interior, e a diferença entre eles irá determinar o sentido e a intensidade de propagação. Os níveis de maré foram calculados pelo método harmônico a partir de constantes do Porto de Maceió. (BRASIL, 2012)

A vazão do evento real ocorrido em maio de 2017 foi obtida pelo portal Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018). Foram utilizados dados telemétricos de vazão, compostos a partir dos níveis medidos e transformados por curva chave, entre os dias 18 e 31 de maio de 2017 das estações Fazenda Boa Fortuna e Atalaia, com dados discretizados em intervalos de 15 minutos. Os dados da estação Atalaia para o período mencionado possuem 8% de falhas. Os dados da estação Fazenda Boa Fortuna não possuem falhas no período. A Figura 1 mostra os hidrogramas de vazão durante o evento de cheia.

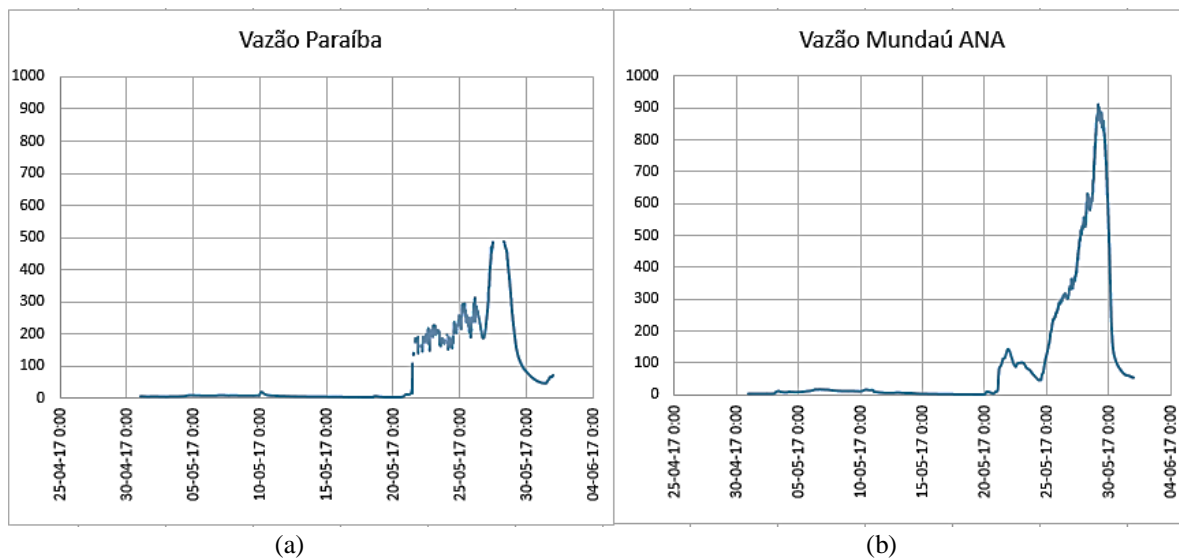


Figura 2 - Gráficos referentes as vazões nas cabeceiras das lagoas. a) Rio Paraíba do Meio. b) Rio Mundaú. Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os eventos hipotéticos de diferentes tempos de recorrência, serão utilizados dados de vazão calculados por método estatístico demonstrado no estudo de Marins (2017), que são apresentados nas Figura 3 e Figura 4.

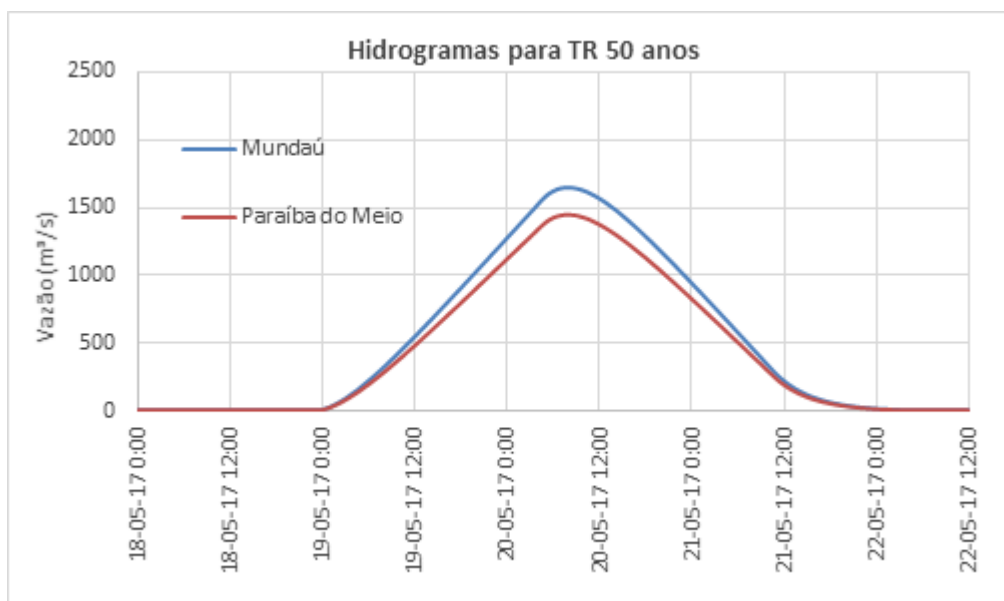


Figura 3 - Vazões calculadas nos rios Mundaú e Paraíba do Meio para TR de 50 anos. Fonte: Adaptado de Marins (2017).

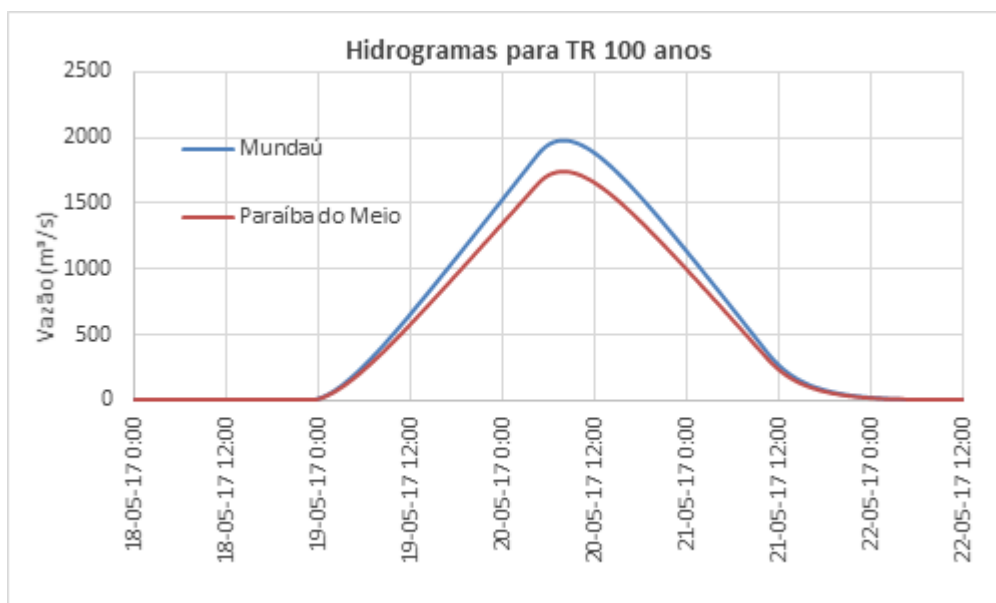


Figura 4 - Vazões calculadas nos rios Mundaú e Paraíba do Meio para TR de 100 anos. Fonte: Adaptado de Marins (2017)

CALIBRAÇÃO

O modelo hidrodinâmico gera registros de níveis de água em todo o domínio de modelagem, este pode ser expresso na forma de limnogramas. Em seguida, tais resultados são comparados com dados reais, onde são utilizadas diferentes metodologias que analisam o ajustamento do modelo e estimam a grandeza dos erros. Jian (2017) discute sobre o ajuste de curvas por regressão linear em modelos hidrológicos, onde em muitos casos, pode-se apresentar tendências errôneas mesmo com uma aceitável correlação. Seu estudo recomenda o uso do coeficiente de correlação (R^2) e o coeficiente de ajustamento proposto por Nash e Sutcliffe (1970). O estudo propõe que os resultados da calibração são aceitáveis para $NSE > 0,5$ e $R^2 > 0,7$. Serão utilizados também o erro quadrático médio (EQM), e o erro absoluto médio relativo (EAMR). EAMR varia de 0 a 1, e os resultados excelentes se encontram próximos de zero.

Os dados locais utilizados são níveis registrados das estações da SEMARH e do INPH. As Figuras 5, 6 e 7 ilustram três limnogramas, referente as estações da Barra, de Mundaú (Coqueiro Seco) e de Manguába (Marechal Deodoro), com os níveis observados e modelados.

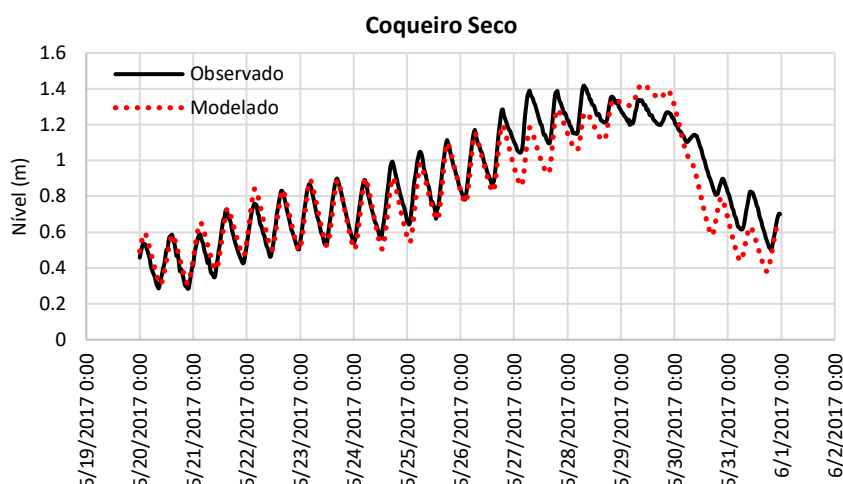


Figura 5 - Calibração dos níveis de água na estação Coqueiro Seco. Fonte: Elaborada pelo autor.

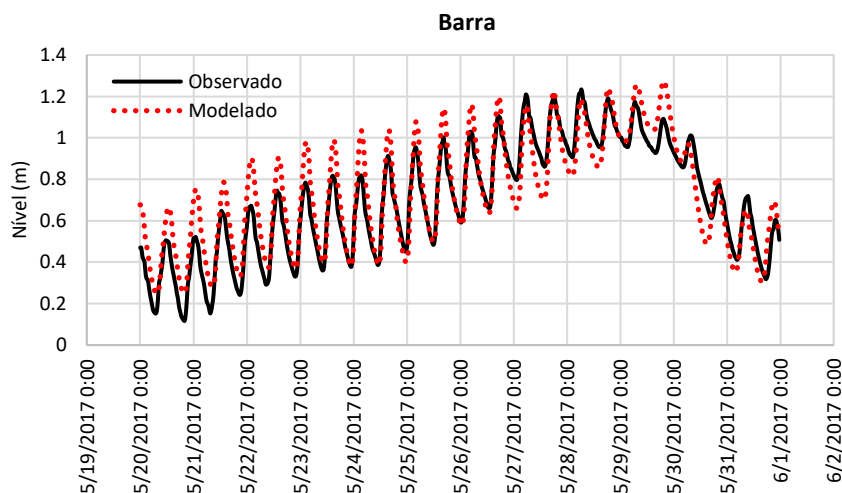


Figura 6 - Calibração dos níveis de água na estação da Barra. Fonte: Elaborada pelo autor.

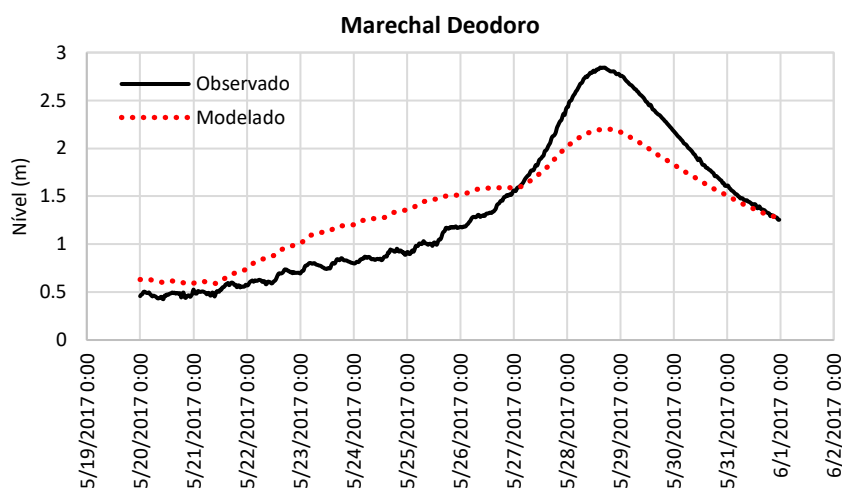


Figura 7 - Calibração dos níveis de água na estação Marechal Deodoro. Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir desses resultados, foi desenvolvida uma análise estatística estimando o erro quadrático médio (EQM), o coeficiente de Nash-Sutcliffe, o erro absoluto médio relativo (EAMR) e o coeficiente de correlação (R^2), além das diferenças relativas dos valores de picos das séries. A Tabela 1 apresenta os valores encontrados.

Tabela 1 – Valores obtidos das funções-objetivos da calibração.

	Marechal Deodoro	Mundaú	Barra	Valor padrão
R^2	0,894	0.896	0.865	> 0,7
EQM (m)	0,327	0.106	0.108	-
NSE	0,804	0.876	0.846	> 0,5
EAMR	0,093	0.054	0.060	< 0,2
Pico (%)	22,64	0,56	3,32	-

Fonte: Autor (2018)

Ao analisar os valores da Tabela 1, é possível observar que os resultados para os três pontos apresentaram valores satisfatórios para R^2 , NSE e EAMR, sendo mais próximos de 1. Sousa e Dias (2007) apontam que o EQM é o parâmetro mais sensível para se calibrar um modelo, sendo o mais adequado para quantificar sua acurácia. O resultado de Marechal Deodoro teve os valores de EQM e de pico consideravelmente maiores que os das outras estações. Ao se analisar estes números juntamente à Figura 4, é possível observar uma diferença na tendência da curva e nos valores de pico, que ilustram os maiores erros de EQM e de pico apresentados em Marechal Deodoro na Tabela 1.

RESULTADOS

Foi gerada a mancha de inundação utilizando-se os mesmos parâmetros da calibração e aplicando os hidrogramas estimados para um TR de 50 anos, conforme obtido por Marins (2017). Esta mancha é apresentada na Figura 8. A cota máxima de inundação para o evento de cheia de TR 50 anos foi de 2,11 metros, sendo 0,6 metros acima da cota máxima do evento de calibração de 1,41 metros. A mancha para TR 100 anos é apresentada na Figura 9, onde sua cota máxima foi de 2,41 metros.

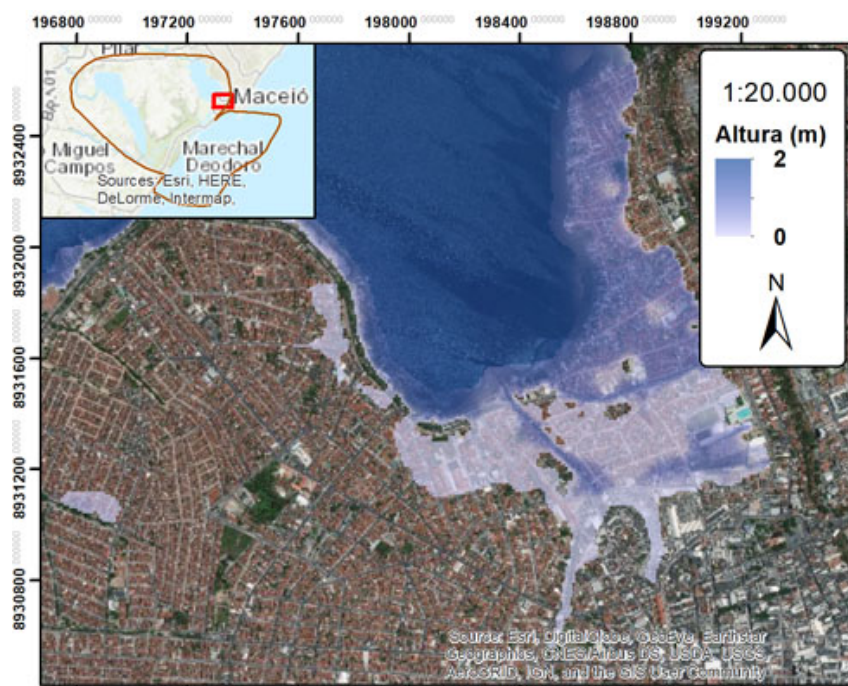


Figura 8 - Mancha de inundação simulada em Maceió para TR 50 anos. Fonte: Elaborada pelo autor.

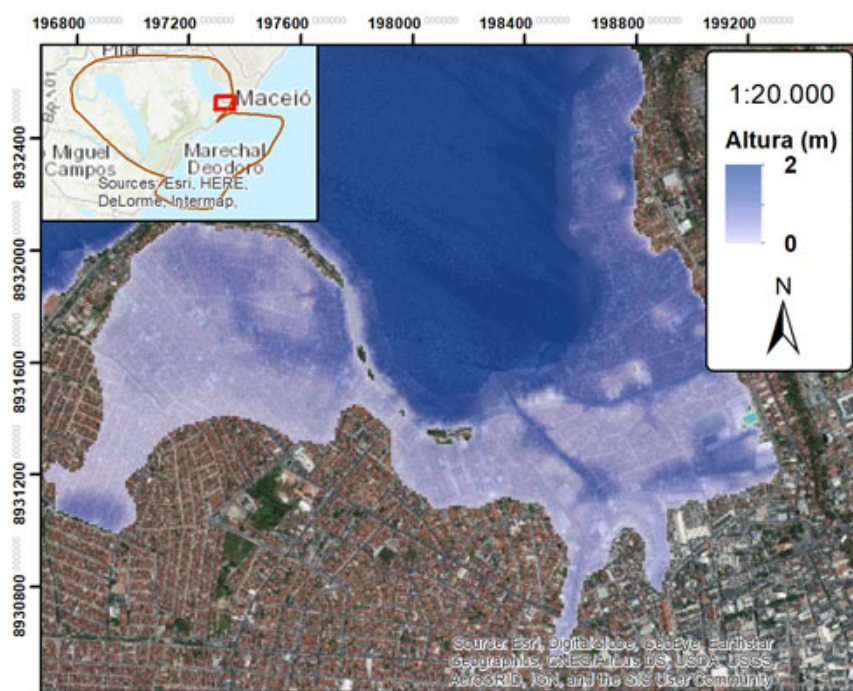


Figura 9 – Mancha de inundação simulada em Maceió para TR 100 anos. Fonte: Elaborada pelo autor.

CONCLUSÕES

A simulação do modelo foi capaz de representar com coerência a série de dados de níveis nos pontos de controle. As simulações subsequentes mostram o alcance provável das inundações para chuvas de tempo de recorrência de 50 e 100 anos, onde um evento extremo de chuva pode vir a ter um alcance consideravelmente maior que o real analisado em 2017. Assim se confirmam as preocupações de serem tomadas medidas de prevenção e mitigação para as áreas diretamente afetadas.

Existem meios para se estimar precipitações como as do evento de 2017, deve-se prosseguir na realização de estudos para com isso tornar as cidades mais resilientes, no caso de inundações urbanas se tem a possibilidade de ser aplicados mecanismos mitigadores, que seriam obras minimizariam os impactos. Um aspecto negativo de tais ações, é que se tem um custo relacionado a operação e manutenção.

A remoção da cobertura natural da bacia tem um efeito significativo nas inundações. Ela acelera o escoamento das águas das chuvas e aumenta o pico da vazão. Uma cobertura vegetal natural funciona como obstáculo a passagem de água, além de facilitar sua infiltração no solo.

As áreas urbanas estão sujeitas a inundação pois devido a seu crescimento, vieram a ocupar espaços onde antes se tinha o extravasamento natural dos corpos hídricos. No caso do CELMM, o extravasamento natural da onda de cheia na Lagoa de Mundaú, se encontra dentro dos limites da cidade de Maceió. A delimitação de tais áreas como Áreas de Proteção Permanente se mostra importante mas de difícil aplicação, pela lei vigente ser posterior a ocupação urbana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM)*. Agência Nacional de Águas. Brasília. 2004.
2. BRASIL. *Descrição De Estação Maregráfica*. Marinha do Brasil. Maceió, p. 1-2. 2012.
3. MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. Forecasting for flood warning. *Computer Rendus Geoscience*, Oxfordshire, Out 2005. 203-217.

4. BRUNNER, G. W. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers Hydrological Engineering Center. Davis. 2016.
5. FACHI, J.; BARROS, L. M. C.; ROSMAN, P. C. C. *INFLUÊNCIA DE APROFUNDAMENTOS NA CALHA DO ESTUÁRIO DO RIO ITAJAÍ-AÇÚ SOBRE AS VARIAÇÕES DOS NÍVEIS DE ÁGUA E SUA RELEVÂNCIA NA REDUÇÃO DE ENCHENTES*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Florianópolis: [s.n.]. 2007. p. 1-8.
6. FEWTRELL, J. et al. N. Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments. *Hydrological Processes*. Out 2008. 22. 5107 - 5118. 10.1002/hyp.7148.
7. JIAN, J. et al. Towards hydrological model calibration using river level measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 10, p. 95-109, Abr 2017.
8. KUMBIER, K. et al. *Modelling inundation extents of the June 2016*. NSW Coastal Conference. Austrália: University of Wollongong. 2017. p. 1-15.
9. MONTE, B. E. O. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, Jan/Mar 2016.
10. SEMARH – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e de Recursos Hídricos.
11. SOUSA, M. C.; DIAS, J. M. Hydrodynamic Model Calibration for a Mesotidal Lagoon: the Case of Ria de Aveiro (Portugal). *Journal of Coastal Research*, Gold Coast, p. 1075-1080, 2007. ISSN 0749.0208.
12. SOUZA, R. C. et al. Uma Análise na Dragagem do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba em Alagoas através de um Modelo Numérico Hidrodinâmico Bidimensional – Resultados Preliminares. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, Out 2004. 21-31.
13. TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. *Desastres Naturais Conhecer Para Prevenir*. 2. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2012.