MODELAGEM HIDRÁULICA DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUBATÃO SUL

Lucas Mauro Rosa da Luz[1] & Pedro Luiz Borges Chaffe[2] & Gustavo Andrei Speckhann[3]*

Resumo –As inundações são caracterizadas pelo extravasamento da água do leito de escoamento natural de um rio. É provável que este tipo de desastre seja o mais frequente, abrangente e danoso para a sociedade humana. Os danos associados às inundações podem ser separados em danos ambientais, sociais e econômicos, tornando necessário a adoção de medidas que diminuam, evitem e também preparem a sociedade para lidar com estes eventos. Uma importante ferramenta de planejamento é a obtenção das áreas suscetíveis a sofrer inundação em um determinado local, pois assim é possível estimar, por exemplo, a população afetada, perdas financeiras e áreas vulneráveis. É neste contexto que este trabalho foi desenvolvido. Foi definida como área de estudo a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão Sul as áreas mais urbanizadas da bacia, uma vez que estas são as áreas das quais os danos à sociedade são maiores. A obtenção das áreas suscetíveis à inundações foi feita através da utilização de um modelo hidrodinâmico 1D, utilizando-se o software HEC-RAS, no qual computou-se a passagem de uma onda de cheia através do leito o rio. Por fim, foram elaborados os mapas com a mancha de inundação utilizando-se ferramentas de geoprocessamento.

Palavras-Chave – Modelagem de inundação, HEC-RAS, bacia do rio Cubatão.

HYDRAULIC MODELLING OF FLOOD PRONE AREAS IN THE CUBATÃO SUL RIVER BASIN

Abstract – Floods are characterized by the overflow of the water of the natural flow riverbed. It is probably the most frequent, widespread, and harmful natural disaster to human societies. The damages related to flooding are classified into environmental damages, social damages, and economic damages, which makes necessary the adoption of measurements that decrease, avoid, and prepare the society on how to deal with those events. An important management tool is to obtain the flood prone areas in a specific location because it allows estimating, for example, the affected population, financial losses, and vulnerable areas. This project was developed in this context. The study area was defined as the most urbanized in the Cubatão do Sul Basin since the damages to society would be the greater. The flood prone areas were calculated with a 1D hydrodynamic modeling, by using the HEC-RAS software. Inundation maps were elaborated using GIS tools and the output from the HEC-RAS model.

Keywords – Inundation modeling, HEC-RAS, Cubatão river basin.

[1] Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC - E-mail: lucasmrluz@gmail.com
[2] Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC - E-mail: pedro.chaffe@ufsc.br
[3] Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC - E-Mail: gustavo.speckhann@gmail.com

INTRODUÇÃO

As inundações são um fenômeno global que afetam a vida das pessoas desde os tempos antigos. Dentre os desastres naturais, as inundações, destacando-se pela recorrência, abrangência e capacidade de destruição dos eventos (Teng *et. al.*, 2017). No Brasil. estima-se que as inundações corresponderam a mais de 70% dos desastres naturais durante o período entre 2006 a 2016 (EM-DAT, 2017). O número de fatalidades ocasionadas pelas inundações foi de 1929 mortes, correspondendo a aproximadamente 90% do total das mortes por desastres naturais no país. Minimizar, ou até mesmo evitar, a ocorrências de inundações em determinado local requer a adoção de soluções preventivas. Medidas estruturais e não estruturais têm sido adotadas para a redução dos danos gerados por inundação Momo (2015). As primeiras envolvem ações que atuam no escoamento da onda de cheia, enquanto as segundas abrangem ações preventivas e de convivência com este tipo de evento hidrológico extremo.

A modelagem hidrodinâmica como HEC-RAS (USACE-HEC, 2010) e LISFLOOD-FP (Bates e De Roo 2002), tem sido amplamente utilizada na elaboração de mapas de perigo de inundação, sendo comumente empregado também para a previsão de inundações (Savage *et al*., 2014). No entanto, o custo computacional elevado e o nível de especificidade dos dados de entrada podem ser entraves na modelagem hidrodinâmica.

O objetivo deste trabalho foi realizar ~~a~~ modelagem hidráulica de modo a identificar as áreas de maior susceptibilidade à inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão Sul. A maior densidade populacional foi o critério adotado para a delimitação da área de estudo. A modelagem hidráulica 1D foi empregada por meio do software HEC-RAS. Para a utilização do modelo foram inseridos: a) os hidrogramas de cheia (tempo de retorno 20, 50 e 100 anos); b) as seções transversais - as quais foram extraídas dos Modelos Digitais de Terreno (com resolução 1x1 metros) da Secretária de Estado e Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina (SDS); e c) de medições realizadas em campo utilizando-se o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP).

METODOLOGIA

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Cubatão Sul está localizada no estado de Santa Catarina, região sul do Brasil, tendo como principais municípios Águas Mornas, Santo Amaro da Imperatriz e parcialmente os municípios de Palhoça e São Pedro de Alcântara. O rio Cubatão do Sul, principal curso d'água da bacia, origina-se da junção dos rios Novo e do Salto, em altitudes superiores a 1200 m. Além de ser utilizado para o turismo o rio também é de suma importância para o sistema de abastecimento de água de uma parcela significativa da população da Grande Florianópolis. O Rio Cubatão é responsável pelo abastecimento de cerca de 700 mil habitantes, abrangendo os municípios de Santo Amaro da Imperatriz, Palhoça, Biguaçu, São José e Florianópolis (Mendes, 2013).

Foi definida a área mais urbanizada da bacia hidrográfica como local de interesse deste estudo, pois a maior parte da população residente está concentrada nestas áreas e, consequentemente, as perdas sociais e econômicas são mais severas. Foram definidas quatro sub-bacias contribuintes para as quais calculou-se os hidrogramas de cheia que foram inseridos no software para a realização da modelagem. A Figura 1 apresenta a localização da bacia, a área do modelo e também suas sub-bacias.

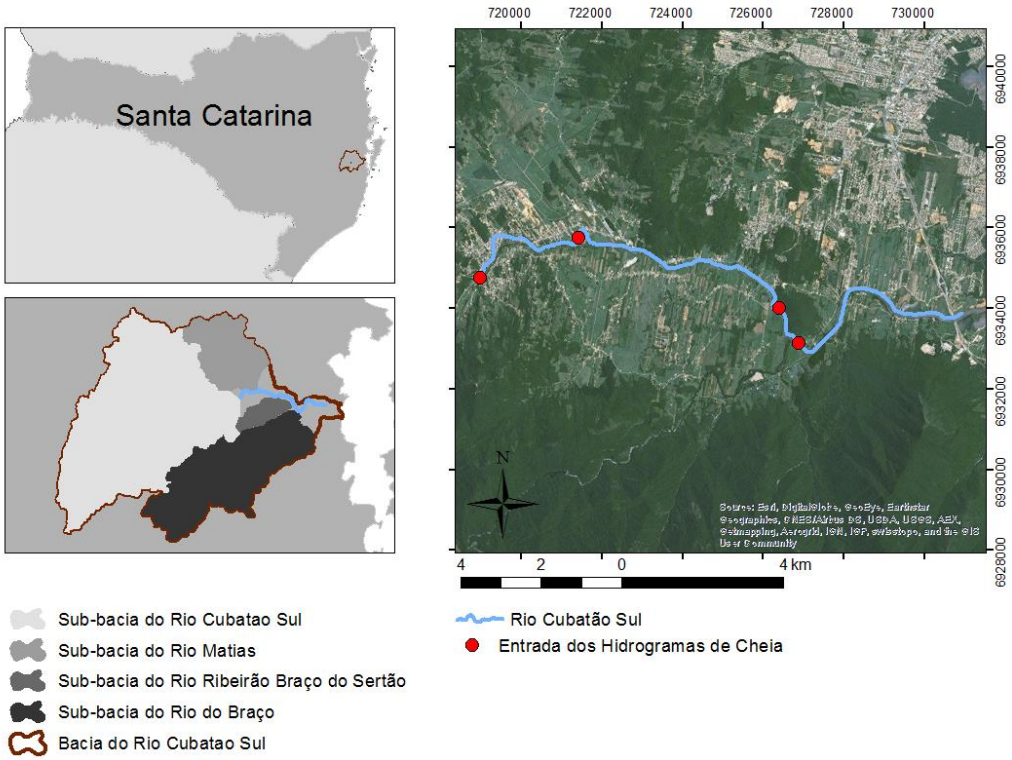

Figura 1- Área de estudo - Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão Sul

Tempo de Concentração

Para o cálculo do tempo de concentração foi utilizada a equação de Kirpich, segundo Silveira (2005) a fórmula de Kirpich, pode ser aplicada com bons resultados em bacias rurais de médio e grande porte.

$$Tc = 0{,}0663L^{0{,}77}S^{0{,}385} \quad (1)$$

onde L é a extensão do curso d'água em quilômetros S é a declividade em m/m.

Chuva de Projeto

A definição da chuva de projeto foi elaborada para diferentes períodos de tempo de retorno 20, 50 e 100 anos. O tempo de duração da chuva, foi escolhido igual ao maior tempo de concentração das quatro sub-bacias de contribuição, assim é garantido que toda a bacia está contribuindo com vazão na área do modelo. Por fim, foi utilizada a equação IDF obtida por Mendes (2013).

$$i = \frac{1157{,}8T^{0{,}1904}}{(t+12)^{0{,}759617}} \quad (2)$$

onde T é o período de retorno em anos, t é a duração da chuva em horas e i é a intensidade em mm/min.

Método SCS

Para estimar a relação entre o escoamento superficial e a precipitação foi utilizada a metodologia desenvolvida pelo Departamento de Conservação do Solo norte-americano – antigo Soil Conservation Service (SCS) e atual *Natural Resource of Conservation Service* (NRCS). As equações três e quatro fornecem os cálculos da chuva efetiva (escoamento superficial).

$$Pe = \frac{(P-0.2S)^2}{P-0.8S} \quad (3)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (4)$$

onde *CN* é o curve number do escoamento superficial que varia entre $0 \leq CN \leq 100$ em função do uso do solo, *P* é a precipitação em mm e *Pe* é a chuva efetiva.

Blocos Alternados

A metodologia denominada de blocos alternados distribui a precipitação ao longo do tempo de forma a buscar um cenário crítico de precipitação. Este cenário baseia-se em precipitação pequena e média no início do tempo e precipitação alta próximo do final da duração, quando geram hidrogramas com grande pico (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2005). Para esta metodologia, são realizados os seguintes passos: 1) definição do período de retorno; 2) definição da duração da chuva de projeto; 3) determinação do total de precipitação, utilizando a curva I.D.F ou equação de chuvas apropriada; 4) definição da duração de cada bloco de chuva;

Coeficiente de Rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade de Manning é um dos parâmetros exigidos para a aplicação do HEC-RAS. Para tanto, foi feita a pesquisa bibliográfica sobre os possíveis valores do coeficiente de rugosidade. Segundo Chow (1959) o valor de n é de 0,035 para cursos d'água naturais, com pedras e vegetação leve, no entanto, esse valor foi ajustado segundo a calibração que foi realizada.

Hidrogramas unitários

Para obtenção dos hidrogramas unitários foi utilizado a metodologia proposta por Snyder (Snyder, 1938), o qual estudou diversas bacias hidrográficas na região montanhosa dos Apalaches, nos E.U.A. e propôs uma relação do *time-lag* (tempo decorrido entre o centro de massa da precipitação), o comprimento do canal principal e o coeficiente de armazenamento da bacia. As equações propostas por Snyder (1938) fornecem o *time-lag*, a vazão de pico e a duração total do escoamento, ou seja, a base do hidrograma.

Seções Transversais

Além de dados hidrológicos, o HEC-RAS necessita de dados geométricos das seções de escoamento para que o modelo seja aplicado. A geometria das seções foi obtida através da junção de duas fontes de dados distintas. Primeiro utilizou-se o software HEC-GeoRas, o qual é uma extensão do software ArcGis. Foram inseridas neste software os Modelos Digitais de Terreno (MDT) com resolução de 1x1 metros disponibilizados pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável (SDS). No entanto, os MDTs não trazem informações topo batimétricas, essenciais para uma boa representação da seção de escoamento. Assim, a segunda etapa de obtenção de dados foi a realização de medições em campo utilizando o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). O equipamento é similar a um sonar que utiliza o efeito Doppler de ondas sonoras para medir a velocidade e vazão da água além da seção topo batimétrica do local. Não foi possível realizar a medição em todas as seções do modelo, somente obteve-se duas, para as outras onde não foi possível fazer a medição, optou-se por repetir o formato das seções medidas.

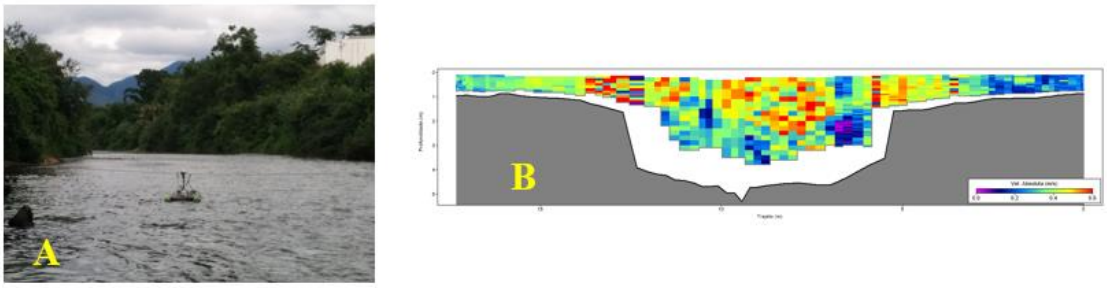

Figura 2 – A) Momento da realização de uma das medições. B) Seção obtida utilizando o ADCP

RESULTADOS

Hidrogramas de Cheia

Os hidrogramas de cheia para cada uma das sub-bacias contribuintes ao modelo foram obtidos através da multiplicação dos hidrogramas unitários pelos blocos de chuva efetiva. Estes hidrogramas foram inseridos no modelo nos pontos identificados anteriormente na Figura 1. Como esperado, o hidrograma de cheia das sub-bacias do Cubatão Sul e do Braço apresentaram as maiores vazões, 736,6 m³/s e 338,2 m³/s respectivamente, uma vez que são as sub-bacias com maiores áreas superficiais. A seguir (Figura 3) são apresentados os hidrogramas de cheia das quatro sub-bacias para cada um dos períodos de retorno avaliados.

Tabela 1- Vazões de pico dos hidrogramas de cheia

Sub-bacias	Vazão de pico (m³/s)		
	100 anos	50 anos	20 anos
Rio Cubatão Sul	736,92	578,68	414,90
Rio do Braço	388,18	305,52	220,33
Rio Matias	289,18	230,78	168,00
Rio Ribeirão Braço do Sertão	68,18	53,71	38,38

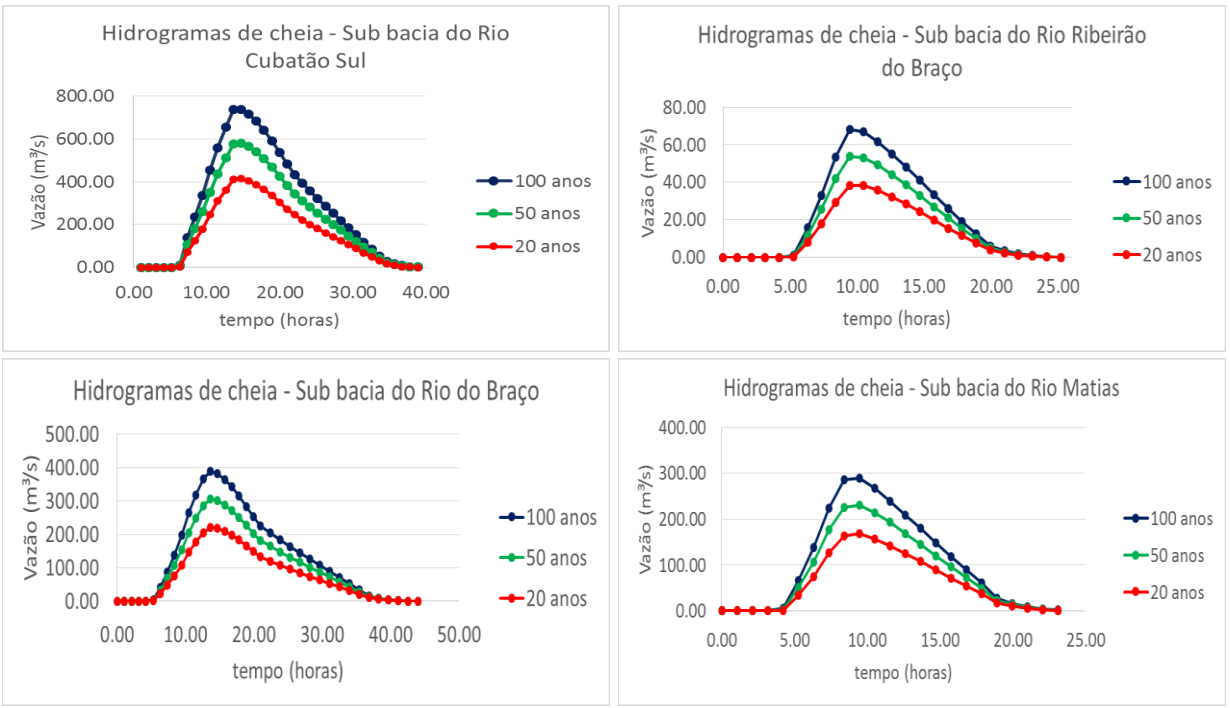

Figura 3 - Hidrogramas de cheia para cada uma das Sub-bacias

Calibração do Modelo

A calibração do modelo foi feita por meio da simulação de um escoamento permanente utilizando-se os dados de vazões e das seções transversais obtidos em campo com ADCP. O dispositivo é equipado com GPS e assim também foi obtida a altura de lâmina d'água no local das medições. Após a inserção dos dados no HEC-RAS procurou-se calibrar o modelo através da comparação da altura de lâmina d'água medida em campo com a altura de lâmina d'água aferida pela modelagem. A primeira rodagem da calibração serviu como controle, a diferença das alturas foi de aproximadamente 2 metros. Assim, inicialmente procurou-se variar o valor do coeficiente de rugosidade de Manning dentro do canal principal a fim de calibrar o modelo, no entanto, o valor de n necessário para que as alturas de lâmina d'água coincidissem ultrapassou valores que segundo Chow (1959) são esperados para áreas urbanizadas (0,05).

Optou-se por fixar o valor de n e variar a declividade das seções a jusante e montante das seções medidas em campo. Esta abordagem também provou-se ineficaz, uma vez que variação da declividade provocava uma variação da ordem de centímetros na altura de lâmina d'água. Por fim, optou-se por diminuir a área de escoamento das seções a jusante daquelas obtidas em campo, tal diminuição resultou na coincidência das alturas das lâminas d'água. É importante salientar que a forma das seções que não foram medidas em campo foi estimada como sendo igual as obtidas pelo ADCP, porém, mesmo que sejam seções próximas, nada garante essa similaridade. Pode-se afirmar que a falta de seções medidas em campo é uma limitação deste trabalho. Além disso, estruturas presentes ao longo do curso do rio, como por exemplo pontes, também podem influenciar o escoamento da água (construção de pontes geralmente causa um estrangulamento da seção do rio), tais estruturas não foram consideradas neste trabalho.

Manchas de Inundação

As figuras 4, 5 e 6 apresentam as áreas atingidas para os diferentes períodos de retorno. Os resultados mostraram que a área de estudo está sujeita a sofrer inundações, uma vez que a superfície da água estende-se além do leito de escoamento natural do rio. Nota-se que as manchas de inundação atingem áreas residenciais dentro da bacia, sendo a parte mais a jusante da mesma o local mais atingido, pois todas as quatro sub-bacias estão contribuindo com vazão para estas áreas. A Tabela 2 sumariza as principais características das inundações.

Tabela 2- Características das inundações

	100 anos	50 anos	20 anos
Área total inundada (km²)	8,20	6,37	4,40
Altura máxima no canal principal(m)	11,86	11,35	10,56
Velocidade máxima (m/s)	4,08	3,90	3,68

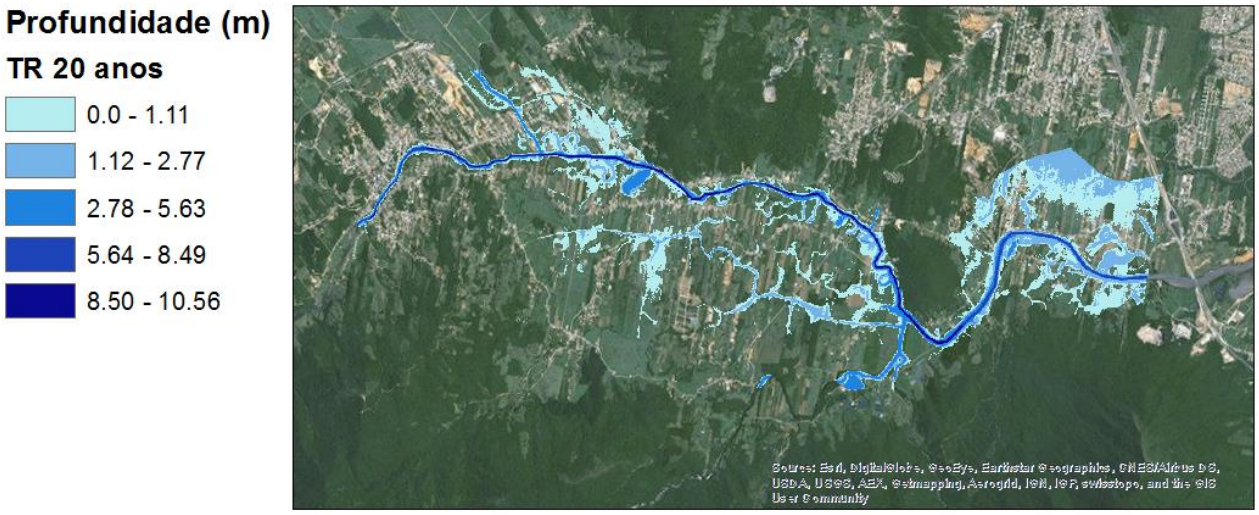

Figura 4 - Mancha de inundação para o tempo de retorno 20 anos

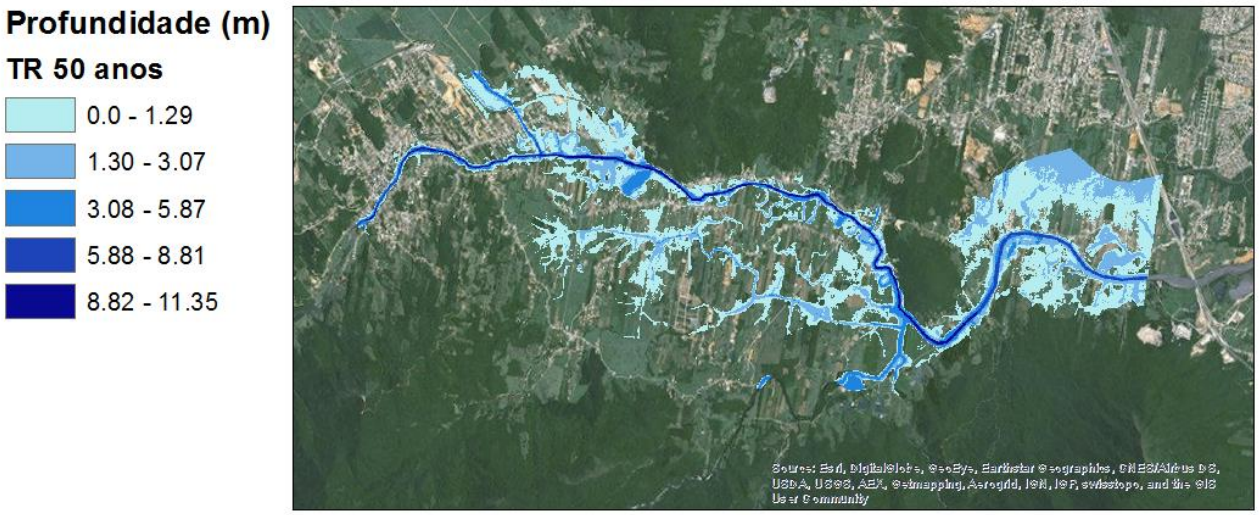

Figura 5 - Mancha de inundação para o tempo de retorno 50 anos

Figura 6 - Mancha de inundação para o tempo de retorno 100 anos

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a obtenção das área suscetíveis à inundação na bacia hidrográfica do Rio Cubatão Sul, para isso, optou-se por realizar a modelagem 1D, da qual foi realizada pelo software HEC-RAS. A metodologia provou ser suficiente para o alcance do objetivo, e de maneira resumida, a obtenção das áreas consistiu na realização de três etapas. A primeira foi a criação da área de modelagem e suas seções de escoamento. Para tanto, utilizou-se os modelos digitais de terreno com resolução 1x1 metros e também medições feitas em campo. A segunda etapa foi a obtenção dos hidrogramas de cheia, dos quais foram obtidos utilizando-se os hidrogramas unitários sintéticos e o método SCS. E a terceira, foi a calibração do modelo. Esta etapa consistiu em igualar os valores obtidos em campo aos obtidos na simulação do programa, no entanto, provou-se complicada. Para que pudesse ser realizada a calibração, foi necessário a mudança na área de escoamento das seções a jusante daquela que foi medida. Mesmo que inicialmente estas seções tenham sidos estimadas, a mudança realizada não é capaz de representar a realidade. Deste modo, para que a calibração seja feita com maior precisão e representação da realidade, são necessárias mais medições de campo a fim de aproximar o modelo da realidade. Portanto, a falta de dados de campo é, sem dúvidas, uma limitação deste projeto.

REFERÊNCIAS

CHOW, V. T. Open-Channel Hydraulics. Reimpressão da edição de 1959. Caldwell, NJ. 1959.

EM-DAT. The OFDA/CRED International Disaster Database. Disponível em: <http://www.emdat.be/advanced_search/index.html>. Acesso em: 24 abr. 2017.

MENDES, D. E. Estudo Da Variação Da Onda De Cheia Na Bacia Do Rio Cubatão Do Sul Por Meio De Modelo Numérico HEC-RAS. 2013. 119 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MOMO, M. et al. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, pp.200-208.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS. Manual de Drenagem Urbana. Porto Alegre: 2005.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. Porto Alegre, RS. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n.1 Jan/Mar 2005.

TENG, J. et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. Elsevier, v. 90, p.201-216.

USACE (US Army Corps of Engineers) 2010. HEC-RAS. Hydrologic Engineering Center´s – River Analysis System. User´s Manual. Davis-CA, US.

SNYDER, F. F. Synthetic unit-graphs. Eos, Transactions American Geophysical Union, v. 19, n. 1, p. 447-454, 1938.

SAVAGE, J., BATES, P., FREER, J., NEAL, J., AND ARONICA, G., 2014. The impact of Scale on Probabilistic Flood Inundation Maps Using a 2D Hydraulic Model with Uncertain Boundary Conditions. In: Proceedings of the Second International Conference on Vulnerability, Uncertainty and Risk Analysis and Management (ICVRAM), July 13-16, 2014 Liverpool. Liverpool: American Society of Civil Engineers, 279-289.