

## DETERMINAÇÃO DE MANCHA DE INUNDAÇÃO EM LOCAL SEM MONITORAMENTO DE NÍVEIS E COM EFEITO DE REMANSO: CASO DE ELDORADO DO SUL

*Paulo R.M. Pontes<sup>1,2\*</sup> & Fernando Dornelles<sup>2</sup> & Mino V. Sorribas<sup>3,2</sup> & Joel Avruch Goldenfum<sup>2</sup>*

**Resumo** – No Sul do Brasil, as inundações ribeirinhas são frequentes e medidas não-estruturais e medidas estruturais são necessárias para mitigar os impactos em cidades ribeirinhas. Localizada nas margens do rio Jacuí, próximo ao delta do lago Guaíba, a cidade de Eldorado do Sul tem sido atingida por inundações que causaram danos ultimamente. A estimativa de cotas de inundação é fundamental para a concepção e dimensionamento de medidas estruturais. Assim, esse trabalho visou desenvolver estudos para projeto conceitual de proteção contra cheias do rio Jacuí em Eldorado do Sul. As áreas sujeitas à inundação estão localizadas em um trecho sem estação fluviométrica e com efeito de remanso por parte da proximidade com o lago Guaíba. Assim, a concepção geral foi realizada a partir da (i) modelagem hidrodinâmica do trecho do rio Jacuí, com software HEC-RAS, e (ii) análise de frequência de dados hidrológicos em postos hidrométricos na região. Os resultados obtidos foram consistentes com registros de inundação existente (mapas e entrevistas) e as cotas para dimensionamento dos diques foram calculadas. Por fim, o uso de modelagem se destaca por considerar o efeito simultâneo e dinâmico das condições das cheias do rio Jacuí e do nível do Guaíba sobre Eldorado do Sul.

**Palavras-Chave** – Inundações ribeirinhas; Modelagem Hidrodinâmica; HEC-RAS.

## FLOODED AREA MAPPING IN RIVERS WITH LEVEL LIMITED DATA AND BACKWATER EFFECT: A CASE STUDY ON ELDORADO DO SUL

**Abstract** – In southern Brazil, river floods occur often and structural measures are needed to mitigate impacts in cities located in inundation-prone areas. Located on the banks of the Jacuí River, near the Guaíba Lake Delta, the city of Eldorado do Sul has been subject to river flood inundation with damages nowadays. The calculation of river flooding water levels is fundamental for the design and determination of structural measures. So, this work aimed to study the conceptual design of a flood protection system of the Jacuí River in Eldorado do Sul - RS. The areas subject to the flood are in a river reach without hydrometric station and with significant backwater effect as it is close to the large lake Guaíba. The general design was based on (i) the hydrodynamic modeling of the Jacuí river with HEC-RAS software, (ii) and the frequency analysis of hydrological data of limited available data in the region. The results obtained are consistent with existing flood records (maps and local interviews) and the water levels to design levees were calculated. Finally, the modeling approach stands as it captures the simultaneous and dynamic effects of the flood conditions of the Jacuí river and the Guaíba level.

**Keywords** – River flooding; hydrodynamic modeling; HEC-RAS.

<sup>1\*</sup> UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (pmpontes@unisinos.br).

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) (fds\_eng@yahoo.com.br).

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) (joel@iph.ufrgs.br).

<sup>3</sup> SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná (mino.sorribas@gmail.com).

## INTRODUÇÃO

Inundação ribeirinha é o processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para as áreas marginais (planície de inundação, várzea ou leito maior do rio) quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio (Tucci, 2007). As inundações ribeirinhas são desastres que podem ocorrer por fatores naturais (eventos extremos e variabilidade climática) ou ainda influenciados por fatores antrópicos (mudanças climáticas, modificação da cobertura do solo, ruptura de barragem e ocupação urbana sem planejamento adequado), além de ocorrerem, tanto países desenvolvidos, como, principalmente, países em desenvolvimento (Jha *et al.*, 2012).

O Brasil é um dos 15 países que mais sofrem com problemas relacionados às inundações ribeirinhas, no qual é estimado que 270 mil pessoas sejam afetadas por inundações, anualmente (Winsemius *et al.*, 2013). No Sul do Brasil, as inundações ribeirinhas são muito frequentes, onde muitas vezes os eventos extremos são influenciados pelo fenômeno El-Niño atingindo urbanizações em áreas ribeirinhas. Uma das regiões que sofre com as inundações ribeirinhas é a cidade de Eldorado do Sul, localizada nas margens do rio Jacuí, próxima ao delta do lago Guaíba.

Para mitigar os problemas relacionados às inundações, podem ser aplicadas medidas não-estruturais e/ou medidas estruturais (Tucci, 2007). As medidas não-estruturais conservam o meio ambiente e os prejuízos são diminuídos pela melhor convivência da população com o meio (e.g. sistema de monitoramento e alerta, zoneamento de áreas inundáveis, seguro e construções resilientes). As medidas estruturais modificam o modo que a água escoar por meio de obras na bacia ou no rio (e.g. mudança de cobertura vegetal, diques, modificação da rugosidade do leito do rio, retificação e reservatórios).

Para avaliar o efeito das medidas de controle, sejam estruturais ou não-estruturais, pode-se fazer o uso de modelos hidrodinâmicos matemáticos para simular as alternativas de medidas de controle propostas. Um dos modelos hidrodinâmicos mais utilizados para tal finalidade é o modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*) (USACE, 2015), que permite simular o comportamento hidráulico do rio.

Tendo isso em vista, o objetivo desse trabalho é, por meio de modelagem hidrodinâmica, desenvolver estudos para projeto conceitual de proteção contra cheias do rio Jacuí em Eldorado do Sul – RS localizado em local sem estação fluviométrica e com efeito de remanso significativo. A concepção geral prevista envolve a proteção contra inundações por sistema de diques.

## ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Eldorado do Sul encontra-se na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), onde há grande frequência de inundações ribeirinhas. Eldorado do Sul está situado próximo à foz do rio Jacuí, na margem direita desse importante curso de água, sob a influência conjunta dos níveis do Lago Guaíba e das vazões afluentes ao delta do Jacuí (aproximadamente 72 mil km<sup>2</sup> de área de contribuição). Importante parte da área urbana consolidada e da área de expansão (prevista no Plano Diretor do município de Eldorado - Lei Municipal no 2.574, de 26/12/2006) localiza-se na zona de extravasamento do rio Jacuí, sujeita a inundações frequentes.

Conforme o documento “Ação Emergencial para Reconhecimento de Áreas de Alto e Muito Alto Risco a Movimentos de Massas e Enchentes – Eldorado Do Sul” (CPRM, 2012), a área urbana do município de Eldorado do Sul encontra-se edificada sobre a planície aluvionar formada pelo rio Jacuí e pelo lago Guaíba, onde o regime de escoamento é de baixa energia em função da baixa declividade e do exutório lacustre. O relevo é predominantemente planos e mal drenados, com presença de lençol freático muito próximo à superfície.

No levantamento de CPRM (2012), foram delimitados 13 setores de risco, sendo 11 deles em áreas planas sujeitas a inundação gradual, conforme regime das chuvas incidentes na bacia hidrográfica do rio Jacuí e nas bacias contribuintes do lago Guaíba. Na zona rural, nos distritos de Bom Retiro e Parque Eldorado, foram delimitados 02 setores de risco sujeitos a eventos de enxurradas causadas pelos arroios do Conde e Sangão. A Figura 1A mostra a localização destes setores.

Foram também pesquisados eventos de inundação com documentação e estimativa das áreas atingidas. A Figura 1B, apresenta a regisção inundada no evento de outubro de 2015 em Eldorado do Sul. A área inundada desse evento está de acordo com os pontos identificados como inundáveis por CPRM (2012).

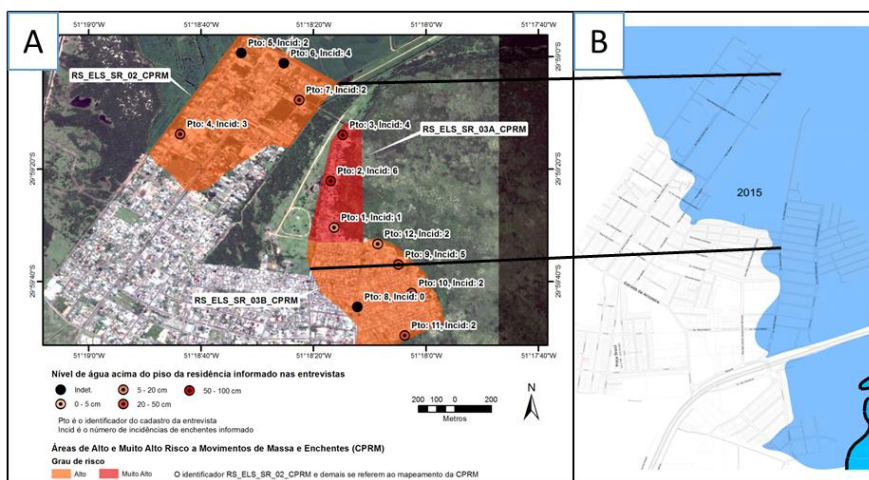


Figura 1: A) Mapa de informações de inundações na área de planejamento e setores de risco delimitados por CPRM (2012) situados na área de interesse. B) Estimativa da área inundada do evento extremo ocorrido em outubro de 2015

A área de estudo da simulação hidrodinâmica abrange o trecho entre as Seções 01 e o Lago Guaíba (jusante da Seção 06) apresentados na Figura 2. Entretanto os resultados terão como foco principal a parte urbanizada de Eldorado do Sul, localizada entre as seções 03 e 05.

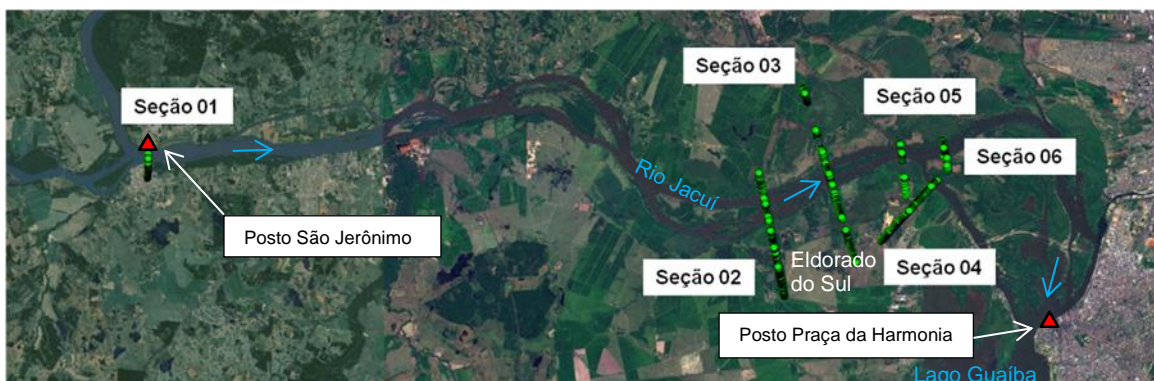


Figura 2: Seções transversais com levantamento batimétrico e topográfico do canal principal e planície de inundação qualitativamente as regiões de planície (i.e. baixa declividade) mais suscetíveis a inundação

## METODOLOGIA

A metodologia do trabalho está baseada nos seguintes passos: i) Obtenção dos dados hidrológicos para simulação; ii) Batimetria da área de estudo; iii) Construção do modelo hidrodinâmico; iv) Calibração do modelo com base no evento observado em outubro de 2015.

### **Obtenção de dados hidrológicos**

Foram utilizados dados de níveis na estação fluviométrica São Jerônimo (código ANA 87020000, localizada nas proximidades da Seção 01) e na estação Praça da Harmonia (código ANA 87450003 localizada a jusante do Delta do Guaíba). Esses dados foram utilizados como condição de contorno de montante e de jusante, respectivamente, no modelo hidrodinâmico utilizado. Vale citar que se optou pela modelagem hidrodinâmica para gerar níveis na região de Eldorado do Sul, pois nela não existem dados de níveis ou vazões observadas.

A distribuição Gumbel foi utilizada para ajuste das Curvas de Probabilidade de Excedência de Níveis Máximos nos postos selecionados: posto 87020000 - São Jerônimo e 87450003 - Praça da Harmonia, para geração de níveis com tempos de retorno de 1 ano até 500 anos.

### **Batimetria da área de estudo**

Para obter uma simulação realista do ponto de vista hidrodinâmico (i.e. níveis, velocidades, etc.) em canais de superfície livre e planícies de inundação adjacentes, a representatividade do levantamento geométrico das seções transversais e sua variabilidade ao longo do eixo longitudinal é determinante. No presente caso, a única fonte de dados compatível com a escala é o levantamento topobatimétrico de campo, totalizando 6 seções transversais medidas em campo (Figura 2). A topografia da várzea de inundação foi obtida a partir de combinação de MDT da CPRM com levantamento planialtimétrico local.

### **Construção do modelo hidrodinâmico**

O comportamento hidráulico da região foi simulado através do programa HEC-RAS (USACE, 2015). As análises de fluxo foram realizadas em fluxo permanente.

A discretização do modelo hidráulico do canal foi elaborada, fundamentalmente, a partir das seções transversais obtidas no levantamento de campo, em combinação com o levantamento aerofotogramétrico (planialtimétrico) efetuado na região e com o modelo de terreno da CPRM de 2,5 m para a região (para as áreas adjacentes as seções transversais).

As limitações na representação geométrica da calha e da planície de inundação do rio influenciam na simulação hidráulica, pois as estimativas de vazões dependem da capacidade de escoamento da seção transversal e da declividade do canal. Esse fator é um agravante em regiões de baixa declividade e de alta complexidade hidrodinâmica como o baixo rio Jacuí e o delta do Lago Guaíba.

Na situação de falta de informação detalhada, a representação da planície de inundação com obstrução (pouca ou nenhum escoamento nas várzeas) gera uma estimativa mais conservadora da elevação dos níveis de água, favorecendo a segurança no projeto do dique.

A Figura 3 apresenta a representação da geometria do sistema no HEC-RAS, onde as setas azuis apontam as seções obtidas no levantamento de campo. As linhas em preto apresentam obstruções e não representam o traçado das seções planícies de inundação reais do sistema, e foram utilizadas apenas como linhas guia no processo de interpolação.



## Calibração com base no evento observado de outubro de 2015

A calibração do modelo foi efetuada a partir do ajuste do valor do coeficiente de rugosidade de Manning, buscando obter uma mancha de inundação que reproduzisse da forma mais fiel possível as áreas atingidas durante o evento de outubro/2015, conforme apresentado na Figura 1B.

Foram utilizados os seguintes dados:

- informações disponíveis referentes ao máximo nível d'água observado durante a cheia de outubro/2015 na seção de contorno de montante (posto São Jerônimo);
- informações disponíveis referentes ao máximo nível d'água observado durante a cheia de outubro/2015 na seção de contorno de jusante (posto Praça da Harmonia);
- áreas inundadas na cheia de outubro/2015, conforme apresentadas na Figura 1B.

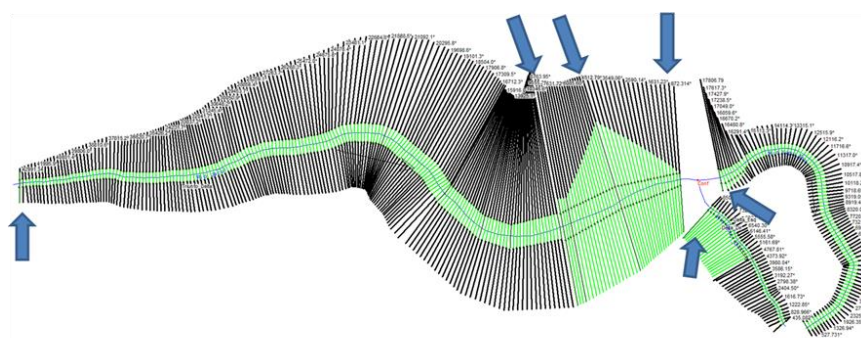


Figura 3: Representação esquemática do sistema no HEC-RAS. As seções transversais obtidas em campo são destacadas pelas setas em azul. Os trechos em verde foram obtidos por interpolação linear entre as seções do levantamento. As regiões delimitadas a partir das linhas pretas representam obstruções na extensão da planície de inundação.

## RESULTADOS

Os resultados são apresentados em dois sub-itens: i) Resultados da Calibração; e ii) Resultados das potenciais manchas de inundações para os tempos de retorno analisados.

### Resultado da Calibração

A Tabela 1 resume as informações de níveis d'água observados nas seções de contorno, e respectivos tempos de retorno (TR), estimados a partir dos ajustes de Gumbel nas estações supracitadas.

Tabela 1: Níveis d'água nas seções de contorno para o evento de outubro/2015.

Posto fluviométrico	Nível máximo observado (m)	Data	TR (anos)
São Jerônimo (seção de montante)	6,20	12/10/2015	5,5
Praça da Harmonia (seção de jusante)	2,70	12/10/2015	30

A Figura 4a mostra a mancha de inundação simulada com o parâmetro de Manning ajustado para o valor de  $0,030 \text{ s.m}^{-1/3}$ , constante para todas as seções transversais. Este valor é consistente com valores comumente utilizados em simulações hidrodinâmicas de rios naturais, que geralmente

ficam entre  $0,025 \text{ s.m}^{-1/3}$  e  $0,040 \text{ s.m}^{-1/3}$ . Observa-se um excelente ajuste em relação às áreas atingidas durante o evento de outubro/2015 (apresentadas na Figura 4b).

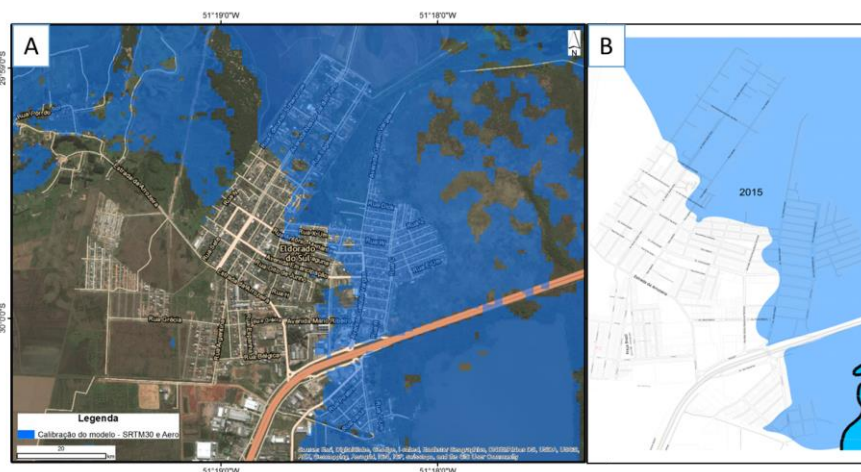


Figura 4: a) Calibração do modelo: mancha de inundação simulada para o evento de Out/2015 (parâmetro de Manning ajustado =  $0,030 \text{ s.m}^{-1/3}$ ), b) Mancha de inundação observada em Out/2015.

### Potenciais manchas de inundação

O resultado final desse projeto visa obter os níveis e áreas de inundações ribeirinhas simuladas na área urbanizada do município de Eldorado do Sul para períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos. Desta forma, as condições de contorno (estabelecidas pelos níveis d'água nas seções de contorno de montante e de jusante) devem ser determinadas de forma a estabelecer configurações com estes períodos de retorno em Eldorado do Sul.

Como não há série histórica de níveis d'água do rio Jacuí em Eldorado do Sul, é necessário estimar o período de retorno em Eldorado do Sul a partir dos valores de período de retorno em São Jerônimo (seção de controle de montante das simulações) e de período de retorno na Praça da Harmonia (seção de controle de jusante das simulações). Assim, a probabilidade de ocorrência dos níveis simulados em Eldorado do Sul corresponderia à probabilidade de ocorrência conjunta dos níveis d'água adotados nas seções de controle. Se os níveis d'água nas seções de controle apresentassem total independência entre si, a ocorrência conjunta de qualquer combinação de níveis seria obtida pela multiplicação das probabilidades individuais. Se houvesse alta correlação entre os níveis, a probabilidade seria aproximadamente igual em todos os trechos simulados.

Vale citar que existe também um grau de independência importante entre os níveis observados em São Jerônimo e Praça da Harmonia, situação consistente com a influência de outros fatores, tais como efeito de remanso do lago Guaíba, devido à ação do vento. Dessa forma, foram efetuadas simulações preliminares utilizando modelo HEC-RAS, visando avaliar comportamento hidráulico do trecho em estudo. Para tanto, foram testadas diferentes combinações para as condições de contorno, utilizando os períodos de retorno de 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

Observou-se que as condições de escoamento do rio Jacuí em Eldorado do Sul sofrem influência importante tanto de jusante quanto de montante, visto que os níveis e vazões em Eldorado do Sul são fortemente influenciados pelos níveis d'água a montante. E por outro lado, há claro controle de jusante, com efeito de remanso evidenciado pelo aumento da cota e redução da vazão em Eldorado quando se observa crescimento no nível d'água na Praça da Harmonia. Este

comportamento torna não trivial estimar o período de retorno em Eldorado do Sul a partir da probabilidade conjunta de níveis em São Jerônimo e na Praça da Harmonia.

Levando em conta estas dificuldades, foi assumido que o período de retorno dos níveis em Eldorado do Sul seja aproximadamente igual ao período de retorno na Praça da Harmonia. Assim, as condições de contorno foram adotadas de forma a reproduzir condições normalmente observadas em situações de inundações ribeirinhas do rio Jacuí em Eldorado do Sul, resultando na Tabela 2.

Seção de montante: Posto São Jerônimo		Seção de jusante: Posto Praça da Harmonia		Seção de simulação: Eldorado do Sul		
TR(SJ) <sup>1</sup> (anos)	Nível d'água <sup>2</sup> (m)	TR(PH) <sup>3</sup> (anos)	Nível d'água <sup>4</sup> (m)	TR(ES) <sup>5</sup> (anos)	Nível d'água <sup>6</sup> (m)	Vazão <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> /s)
2	4,67	2	1,60	2	2,77	8755
5,5	6,20	10	2,28	10	3,91	12101
5,5	6,20	25	2,62	25	4,06	11840
5,5	6,20	50	2,88	50	4,18	11608
5,5	6,20	100	3,13	100	4,30	11359

<sup>1</sup> TR em São Jerônimo: Utilizado o período de retorno do evento de OUT/2015, exceto para a simulação de TR=2 anos

<sup>2</sup> Estimados a partir da Curva de Probabilidade de Níveis (Gumbel).

<sup>3</sup> TR na Praça da Harmonia: Iguais aos valores especificados para TR em Eldorado do Sul (2, 10, 25, 50 e 100 anos).

<sup>4</sup> Estimados a partir da Curva de Probabilidade de Níveis (Gumbel).

<sup>5</sup> TR em Eldorado: Aproximado a partir dos valores de TR na Praça da Harmonia

<sup>6</sup> Determinado a partir das simulações efetuadas com o modelo HEC-RAS

A Figura 5 apresenta a) a potencial mancha de inundação em Eldorado do Sul para um tempo de retorno de 2 anos e b) a potencial mancha de inundação em Eldorado do Sul para um tempo de retorno de 100 anos.

## CONCLUSÕES

O modelo hidrodinâmico HEC-RAS foi utilizado para estimar as manchas de inundação no município de Eldorado do Sul, para diferentes períodos de retorno, utilizando como base de dados níveis observados nas estações fluviométricas de São Jerônimo e de Praça da Harmonia, levantamento topobatimétrico de 6 seções transversais do rio Jacuí, levantamento planialtimétrico local combinado com MDE da CPRM. As principais conclusões sobre esse estudo foram:

- As semelhanças entre as manchas de inundação dos eventos simulados e observados servem como verificação da metodologia adotada e das simulações efetuadas.
- Para o tempo de retorno de 2 anos em Eldorado do Sul, observa-se alguma inundação nas várzeas agrícolas, mas praticamente nenhuma influência sobre as áreas urbanas atuais, indicando apenas necessidade de medidas não estruturais para regular a ocupação em áreas de risco;
- Para o tempo de retorno de 100 anos em Eldorado do Sul observam-se extensas áreas de inundação, nos bairros Chácara, Vila da Paz e Cidade Verde e também próximo à BR-116 (via laranja na Figura 6);

## LIMITAÇÕES

É importante citar algumas limitações das análises realizadas. As incertezas das altitudes do modelo numérico de elevação possibilitam apenas uma análise da extensão da área de inundação simulada e não de profundidades ou níveis de água específica em determinados locais.

Outra incerteza associada recai sobre a extensão da área inundada. O processo de geração dessa área é limitado à largura das seções transversais medidas em campo. Dessa forma, a inundação real pode avançar para regiões mais próximas da cidade, que estão em cotas muito semelhantes às áreas inundadas.

Finalmente, a rugosidade do rio, representada pelo número de Manning, também impõe uma incerteza nos resultados. Valores do número de Manning na ordem de  $0,025 \text{ s.m}^{-1/3}$  até  $0,040 \text{ s.m}^{-1/3}$  são comumente utilizados em simulações hidrodinâmicas de rios naturais. No presente trabalho foi utilizado um número de Manning igual a  $0,030 \text{ s.m}^{-1/3}$  para todas as seções transversais, obtido na calibração do modelo a partir dos dados disponíveis do evento de outubro/2015.

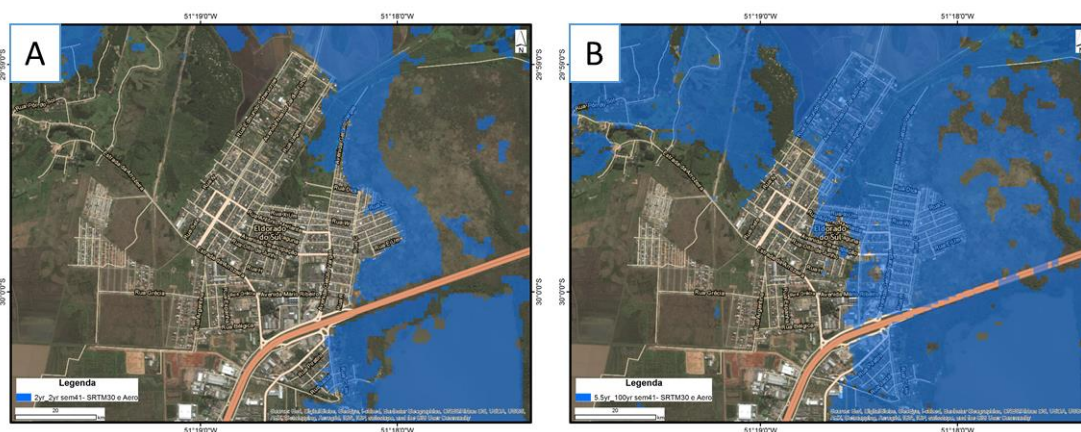


Figura 5: a) a potencial mancha de inundação em Eldorado do Sul para um tempo de retorno de 2 anos e b) a potencial mancha de inundação em Eldorado do Sul para um tempo de retorno de 100 anos.

## REFERÊNCIAS

CPRM/Serviço Geológico do Brasil – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – Ministério de Minas e Energia. AÇÃO EMERGENCIAL PARA RECONHECIMENTO DE ÁREAS DE ALTO E MUITO ALTO RISCO A MOVIMENTOS DE MASSAS E ENCHENTES – ELDORADO DO SUL. CPRM, 2012.

JHA, A.K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century. World Bank. 2012.

TUCCI, C.E.M. (2007). Inundações urbanas. Porto Alegre: ABRH/RHAMA. 393p.

USACE. U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. Computer software for hydrologic engineering and planning analysis procedures. Disponível em: <http://www.hec.usace.army.mil/software/>. Acesso em: 3 de dezembro de 2015.

WINSEMIUS, H.C.; VAN BECK, L.P.H.; JONGMAN, B.; WARD, P.J.; BOUWMAN, A. A framework for global river flood risk assessments. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 1871-1892. 2013.