

## ROMPIMENTO DA BARRAGEM LOMBA DO SABÃO: DIFERENTES ABORDAGENS DIMENSIONAIS

*Arthur da Fontoura Tschiedel\*<sup>1</sup>, Benício Monte<sup>2</sup> e Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>3</sup>*

**Resumo** – Este trabalho tem o intuito de comparar duas abordagens dimensionais em simulações de rompimento de barragens, utilizando como área de estudo a barragem Lomba do Sabão, localizada em Viamão/RS. Para tal, dispõe-se de um Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta precisão, obtido via LiDAR para a cidade a jusante da barragem (Porto Alegre). Foram fixados todos os dados de entrada normalmente utilizados em estudos de rompimento de barragens, como (i) Coeficiente de Manning; (ii) Volume do reservatório; (iii) Formação da brecha e; (iv) Topografia de jusante, simulando-se dois cenários: Um considerando as equações de Saint Venant 1D e outro considerando as equações de Saint Venant 2D. Observou-se que as vazões de pico e velocidades máximas locais obtidas através da aplicação do modelo 1D são ligeiramente maiores que no modelo 2D. Além disso, a utilização do modelo 1D se demonstrou ineficiente para a área de estudo pelo fato de subestimar a zona de inundação observada, que tem cota média inferior à cota da calha do curso hídrico e superestimar as profundidades nestes locais. Ainda, a utilização do modelo 2D se demonstrou de maior coerência hidráulica / hidrológica, maior estabilidade e maior facilidade de aplicação.

**Palavras-Chave** – Hec-Ras 5.03; Simulação Unidimensional e Bidimensional; LiDAR

## DAM BREAK OF LOMBA DO SABÃO DAM: DIFFERENT DIMENSIONAL APPROACHES

**Abstract** – This work intends to compare two dimensional approaches in dam breaking simulations, using as a study area the Lomba do Sabão dam, located in Viamão / RS. For this, a high precision Digital Terrain Model (MDT), obtained by LiDAR for Porto Alegre city was used. To do this study, was fixed all the input data normally used in dam rupture studies, such as (i) Manning Coefficient; (ii) Reservoir volume; (iii) Breach formation and; (iv) Downstream topography. Two scenarios were adopted: One considering the 1D Saint Venant equations and another considering the 2D Saint Venant equations. It was observed that the peak flows and maximum local velocities obtained by applying the 1D model are slightly larger than in the 2D model. In addition, the use of the 1D model was inefficient for the study area because it underestimated the observed flood zone (which has a lower average height than the watercourse level) and overestimate the depths at these sites. Also, the use of the 2D model demonstrated greater hydraulic / hydrological coherence, greater stability and facility of application.

**Keywords** – Hec-Ras 5.03; One-dimensional and Two-dimensional simulation; LiDAR

### 1 INTRODUÇÃO

Observa-se, com o passar dos anos, um incremento significativo relativo à construção de barragens em solo brasileiro. O número de maciços mapeados até o ano de 2015 era 17.256 barragens, segundo o Relatório Anual de Segurança de Barragens de 2015 (ANA, 2016), considerando tanto

<sup>1</sup>\* Universidade Federal do Rio Grande do Sul – arthurtidel@hotmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – benicio\_monte@hotmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul – rodrigocdpaiva@gmail.com

barragens utilizadas para fins energéticos como também aquelas utilizadas para fins de abastecimento, aquicultura, captação de água, regularização, uso industrial e estocagem de resíduos. Alguns autores, como Menescal (2005), por outro lado, estimam algo em torno de 300.000 barramentos existentes no Brasil.

Como possíveis rompimentos destas estruturas estão atrelados a altos riscos para a sociedade, percebeu-se a necessidade de regulação do setor. E essa regulação, muito também baseada na experiência internacional, veio com a Lei 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, sancionada no ano de 2010 (BRASIL, 2010).

A referida lei, entre outros aspectos regulativos, apresenta a necessidade de elaboração de Planos de Ação Emergenciais (PAEs) para barragens que se caracterizarem com alto Dano Potencial Associado, conforme definido na resolução nº 91 de 02 de abril de 2012 (ANA, 2012b) e na resolução nº 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2012).

O principal instrumento que subsidia a elaboração de um PAE está embasado na simulação da onda de cheia originada pelo rompimento da barragem em questão, e este tipo de informação é obtida a partir da aplicação de modelos de simulação hidráulica, como o DAMBRK Collischonn & Tucci (1997) e Gallegos et al (2009) e o HEC-RAS, segundo Tschiedel (2017).

Conforme apresentado por Tschiedel (2017), diversos são os aspectos e dados de entrada que influenciam diretamente no modo como a onda se propaga para jusante do vale de inundação, (independentemente do modelo utilizado) e entre estes aspectos, a dimensionalidade do modelo considerado pode ser relevante. Esta importância é também observada por Kim et al (2016) que salienta a utilização de modelos de rompimento de barragens 2D e 3D para agregar mais precisão nos resultados obtidos. Em contra-partida, Benjankar *et al* (2014) comparou simulações 1D e 2D utilizando os softwares MIKE11 e MIKE21 respectivamente para uma área nos Estados Unidos, encontrando resultados muito similares entre as duas simulações. Este tipo de resultado é encontrado também por diversos autores, quando são comparadas simulações 1D x 2D considerando apenas a calha principal do curso hídricos, segundo Kumar *et al* (2017), que fez uma revisão da literatura recente envolvendo estudos de rompimento de barragem. Nota-se neste trabalho, também, uma convergência de diversos autores no sentido de necessidade de simulação em 2 dimensões em planícies de inundação, e possibilidade de simulação em 1 dimensão dentro da calha de cursos hídricos, visando ganhos em custos computacionais.

Este estudo tem o intuito, portanto, de explorar um pouco mais as diferenças existentes entre abordagens unidimensionais e bidimensionais em simulações de rompimento de barragens em áreas densamente urbanizadas. Para tal, foi utilizado o modelo HEC-RAS 5.03 (USACE, 2016) para simular, sob estas duas abordagens, um hipotético rompimento da barragem Lomba do Sabão, localizada em Viamão/RS.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A barragem Lomba do Sabão está a montante da bacia do Arroio Dilúvio, curso hídrico que cruza a cidade de Porto Alegre / RS, destacado em azul na Figura 1. Na referida figura, é apresentada a hipsometria da região de interesse à esquerda e o uso do solo à direita, destacando-se também a localização da barragem Lomba do Sabão frente à cidade. Percebe-se, a partir da análise destas figuras, que um hipotético rompimento da barragem Lomba do Sabão tem potencial para gerar enormes prejuízos à cidade de Porto Alegre, mesmo havendo grande capacidade de suporte por parte do Arroio Dilúvio, que já suportou cheias com vazão de pico da ordem de 250 m<sup>3</sup>/s (Porto Alegre, 2012).



Figura 1– Modelo Digital de Elevação de Superfície e Uso do Solo do Vale de Jusante da Barragem Lomba do Sabão

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo se divide em 2 partes, sendo a primeira referente à apresentação das equações que regem as simulações 1D e 2D. A segunda parte apresenta os dados de entrada utilizados nas duas simulações realizadas, enquanto ao final é apresentada a metodologia de comparação entre as duas simulações.

#### 3.1 Simulação 1D e 2D

A simulação unidimensional do HEC-RAS 5.03 passa pela resolução das equações de Saint Venant a partir de um esquema implícito de diferenças finitas. As equações de Saint Venant são compostas pela equação da conservação da quantidade de movimento (Equação 01), que é baseada no princípio de que a soma das forças sobre um corpo é igual à variação da quantidade de movimento ao longo do mesmo, sendo a quantidade de movimento o produto da massa pela velocidade e pela equação da continuidade (Equação 02), baseada no fato de que a vazão que passa por uma seção de montante é a mesma vazão que passa por uma seção de jusante, em trechos que não há aportes ou abstrações significativas de vazões. Estes princípios aplicados a um volume de controle de um rio tratado de forma unidimensional levam à:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (2)$$

Para as duas equações apresentadas, “ $x$ ” é a distância ao longo do rio, “ $Q$ ” é a vazão, “ $t$ ” é o tempo; “ $V$ ” é a velocidade da água, “ $A$ ” é a área da seção transversal, “ $g$ ” é a aceleração da gravidade; “ $S_f$ ” é a declividade de atrito (força do atrito dividido pelo peso da água) e “ $z$ ” é a elevação da superfície da água, segundo USACE (2016).

Os modelos bidimensionais de águas rasas trabalham com velocidade médias na profundidade, integrando as equações de Navier-Stokes ao longo do eixo vertical  $z$  e resolvendo as equações de conservação de massa e de conservação do momento nos eixos  $x$  e  $y$  do curso hídrico modelado (Martin & McCutcheon, 1998), dando origem às equações 2D de Saint Venant. Estes modelos são aplicáveis a cursos hídricos com profundidades insignificantes frente às extensões de lâmina d’água, como lagos bem misturados, não estratificados e várzeas de inundação (Zhen-Gang, 2008). As simplificações adotadas no conjunto de soluções em duas dimensões do modelo HEC-RAS 5.03 são muito similares às simplificações adotadas nas equações de Saint Venant 1D: Fluido

incompreensível, massa específica uniforme e pressões hidrostáticas, sendo a movimentação turbulenta aproximada pela viscosidade turbulenta do fluido. Ainda, assim como ocorre para modelos 1D, as equações 2D de Saint-Venant também podem ser simplificadas, dando origem a outros modelos hidrodinâmicos mais simples que podem ser aplicáveis para determinadas condições de contorno (USACE, 2016). O modelo dado pelas equações de Saint Venant 2D é composto, portanto, da equação da conservação de massa (Equação 03) e da equação da conservação de momento nos eixos  $x$  e  $y$  (Equação 04 e Equação 05).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + fv \quad (5)$$

Nas três equações anteriores, “ $u$ ” e “ $v$ ” são as velocidades nas direções cartesianas, “ $t$ ” é o tempo, “ $q$ ” são as contribuições ou abstrações de fluxo, “ $g$ ” é a aceleração da gravidade, “ $H$ ” é a elevação da superfície d’água, “ $h$ ” é a profundidade, “ $v_t$ ” é o coeficiente de viscosidade turbulenta, “ $c_f$ ” é o coeficiente de fricção de fundo e “ $f$ ” é o parâmetro de Coriolis. A resolução das Equações 03, 04 e 05 dentro do HEC-RAS 5.03 ocorre a partir de uma discretização híbrida envolvendo um esquema implícito de diferenças finitas e uma aproximação de volumes finitos, segundo USACE (2016).

### 3.2 Dados de Entrada

Segundo Tschiedel (2017), estudos de rompimento de barragens são resolvidos a partir da definição de 5 dados de entrada principais: (i) Topografia do vale de jusante; (ii) Configurações da brecha; (iii) Volume do reservatório; (iv) Coeficiente de Manning e (v) tipo de equacionamento considerado, referente à supressão ou não de alguns termos da equação de Saint Venant 2D. Além destes dados de entrada, devem ser também definidas as condições de jusante da área de estudo, de modo que no âmbito deste trabalho, a mesma foi definida como a profundidade normal, no valor de 0,0005, correspondente à declividade do canal dos últimos 4 km.

Os dados de entrada referente à topografia de jusante partiram de um levantamento aerofotogramétrico com perfilamento Laser (LiDAR) realizado na região, no ano de 2010, que teve como produto um Modelo Digital de Superfície (MDS) com resolução de 1 metro de pixel (Zanardi *et al.*, 2013), conforme demonstrado na Figura 1. O vale estudado se apresenta mais bem encaixado nos primeiros 4,5 km a jusante da barragem, enquanto que para os aproximadamente 9 km seguintes, uma grande planície de inundação é observada. Adiciona-se, a essa vasta planície de inundação densamente urbanizada, a singularidade do canal construído no arroio dilúvio, referente ao fato de o mesmo ter cota das margens mais alta do que a planície de inundação. Estas informações são apresentadas na Figura 2a. Outro dado de entrada de extrema importância em estudos de rompimento de barragem diz respeito à forma como a brecha formada no maciço evolui com o tempo. Para este estudo, adotou-se uma brecha no formato trapezoidal, com largura de base de 100 metros completando-se em 1 hora, com 10 metros de altura, conforme mostra a Figura 2b.

O coeficiente de Manning utilizado neste estudo foi constante para todo o vale (0,20), diferenciando-se apenas quanto ao coeficiente adotado para o leito do Arroio Dilúvio (0,027). O alto valor adotado para a zona de inundação procura representar todos os obstáculos presentes na cidade, não representados pela topografia utilizada neste estudo. Já o valor adotado para o canal principal foi



escolhido com base em USACE (2014), considerando valores máximos para canais com revestimento parcial.

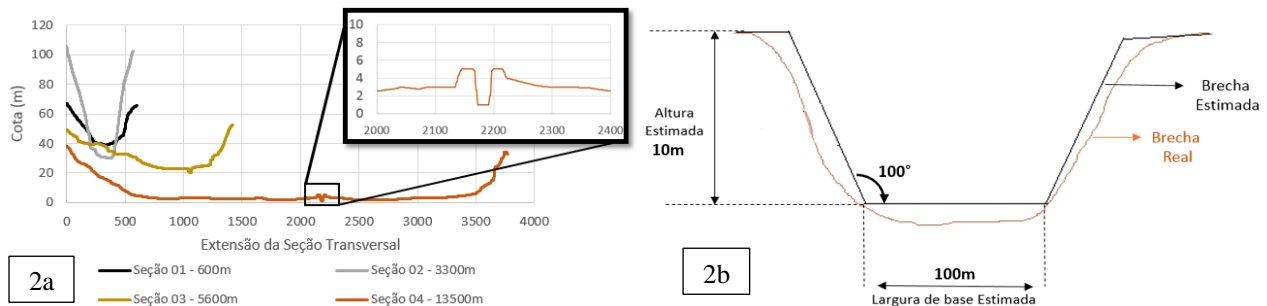


Figura 2– Seções Transversais de Interesse ao longo do Arroio Dilúvio e Brecha Formada

A curva cota-volume do reservatório, por outro lado, foi estimada com base no procedimento de estimativa de volume de reservatórios apresentado em Tschiedel (2017), considerando um coeficiente de segurança de 1,4. O valor foi comparado com um dado de referência apresentado por Maizonave *et al* (2005), que calculou, para um nível de água dito “normal” (sem maiores especificações) um volume aproximado de 3,0 hm<sup>3</sup>. O método utilizado estimou um volume de aproximadamente 3,0 hm<sup>3</sup> para a cota de 51,2 metros.

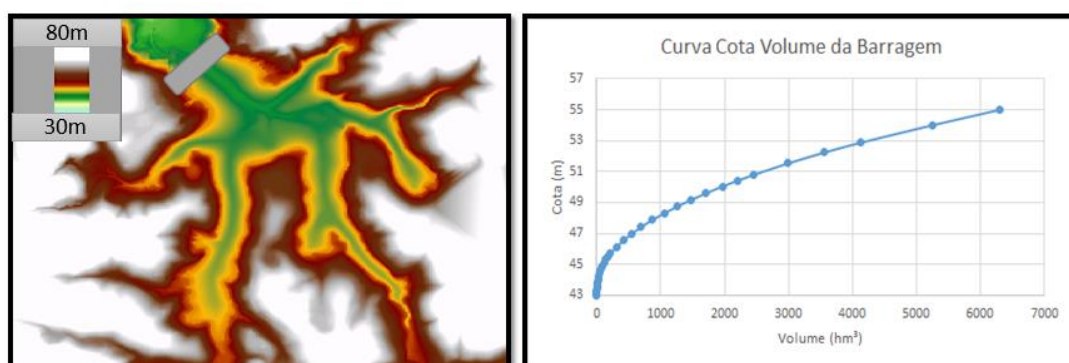


Figura 3– Topobatimetria e Curva Cota-Volume Estimada do Reservatório Lomba do Sabão

### 3.3 Método de Avaliação das Simulações

Foram realizadas duas simulações, fixando-se todos os dados de entrada a partir dos valores e dados apresentados no item 3.2 e variando-se a dimensionalidade, de modo que para uma simulação, utilizou-se o módulo unidimensional do Hec-Ras 5.03 e em outra se utilizou o método bidimensional. A avaliação dos resultados obtidos se resume à comparação de 5 variáveis hidráulicas obtidas para as quatro seções apresentadas na Figura 2a: (i) vazão de pico; (ii) tempo de pico; (iii) profundidade máxima; (iv) velocidade máxima e; (v) extensão da lâmina d’água. Por fim, avalia-se a mancha de inundação máxima obtida a partir das duas simulações.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra uma comparação entre os hidrogramas formados nas 4 seções estudadas, em que pode-se observar as diferenças existentes entre o modelo 1D e o modelo 2D. Sendo assim, percebe-se que a adoção do modelo unidimensional tende a apresentar maiores vazões de pico e chegada mais rápida da onda de cheia, com antecipação do tempo de pico.

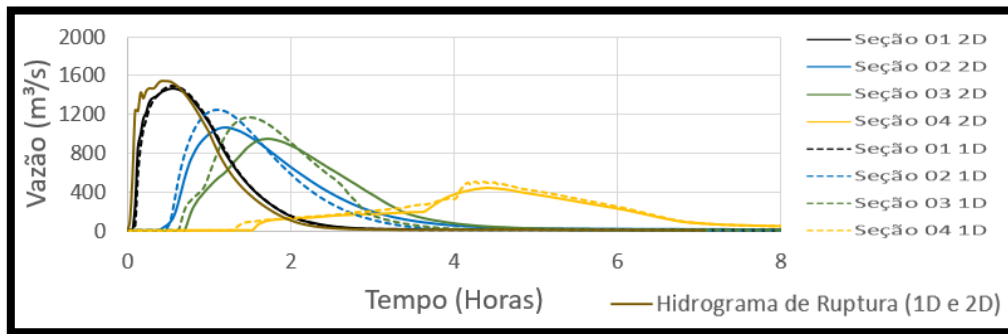


Figura 4– Hidrogramas 1D x 2D

A antecipação das vazões de pico para modelos 1D é corroborada pelos gráficos de velocidade mostrados na Figura 5, em que se observa velocidades máximas locais maiores quando é utilizado o modelo 1D.

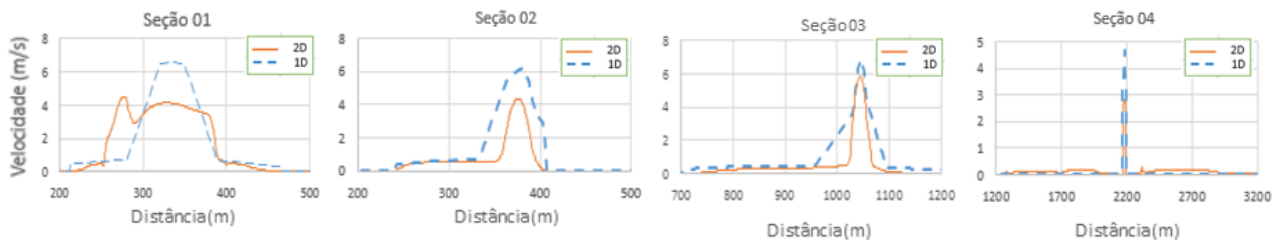


Figura 5– Velocidades 1D x 2D

Nota-se também como a variação na dimensionalidade altera as profundidades máximas obtidas ao longo das seções estudadas. Nos locais mais bem encaixados da área de estudo, localizados a montante da bacia, observa-se profundidades máximas ligeiramente maiores quando é utilizado o modelo 2D. Entretanto, para as áreas com vale aberto, localizadas na porção mais baixa da bacia, as profundidades máximas obtidas pelo modelo 1D são maiores, como pode ser observado para a seção 03 (Figura 6). Na seção 04 ocorre um comportamento peculiar, em que se observa uma diferença muito grande entre as profundidades obtidas, principalmente para a zona de inundação. Isso ocorre porque, nessa seção, a vazão que escoou no canal principal não foi suficiente para extrapolar a calha do canal, na seção. Como o modelo 2D é capaz de simular o avanço da zona inundada a partir da zona inundada de montante, e não só pelo extravasamento da calha do rio (como no 1D), o modelo 2D conseguiu prever áreas inundadas neste local. Esse modo de cálculo do modelo 1D gera consideráveis diferenças nas zonas inundáveis, como observado na Figura 7.

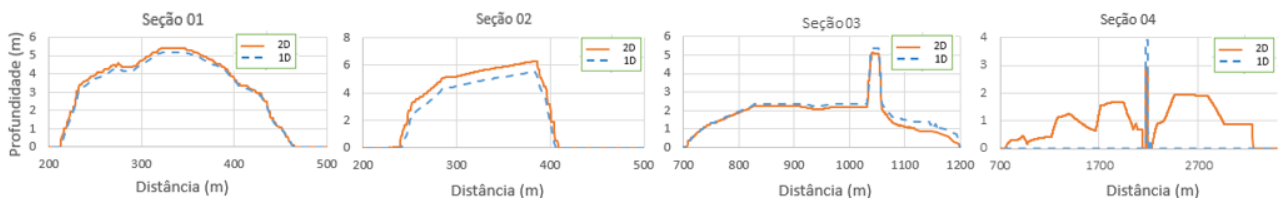


Figura 6– Profundidades 1D x 2D

Na Figura 7 percebe-se, então, que as áreas inundadas pelo modelo 1D são parecidas com a do modelo 2D, sendo a relação geomorfológica entre as cotas do vale de inundação e as cotas das margens do curso hídrico a principal condicionante para determinar se dado local vai ser inundado ou não. Nas porções de jusante, em que se observa cota da margem superior à cota do vale de inundação, o modelo 1D não representa bem a realidade. Já na porção de montante, quando a existência de planícies de inundação com esta característica é pequena, percebe-se um bom

acoplamento entre os dois modelos. É possível observar no detalhe da Figura 7 que na abordagem 1D a teoria de “vasos comunicantes” é utilizada. Ou seja, se determinada cota é atingida no extravasamento da calha, toda altitude abaixo dessa cota é inundada neste exato momento. Já na abordagem em duas dimensões, a mancha de inundação vai avançando lentamente na planície de inundação, sem superestimar as profundidades máximas e o tempo de chegada da onda nessas seções.

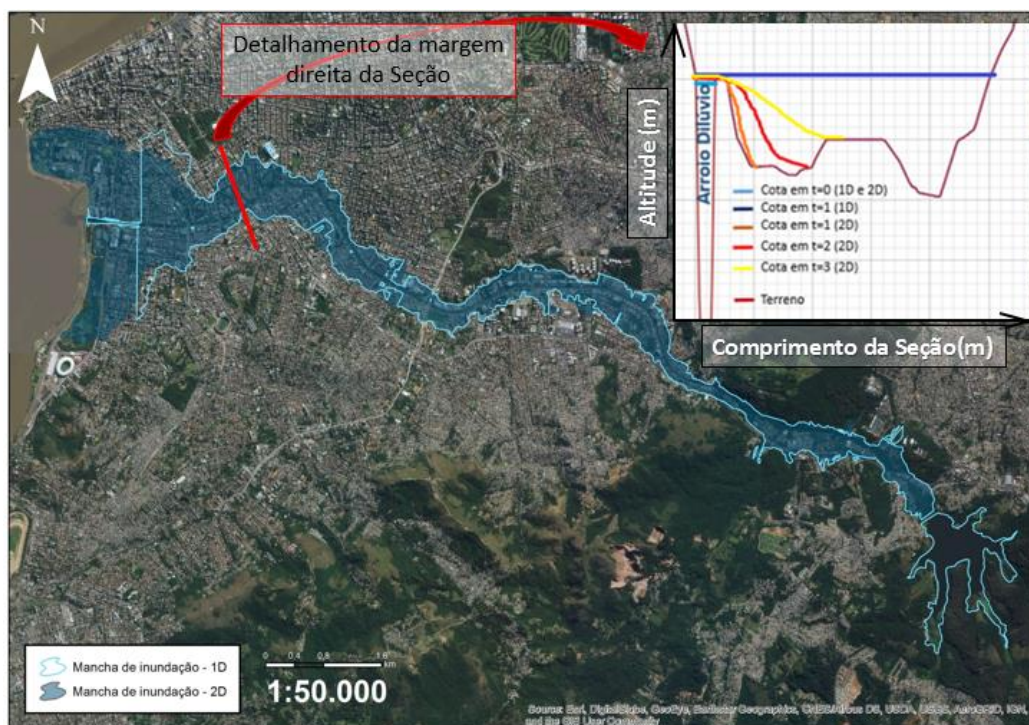


Figura 7 – Zonas Inundáveis: 1D x 2D

## 5 CONCLUSÕES

Com base na resolução nº 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que estabeleceu critérios para classificação de barragens quanto categoria de risco, volume e dano potencial associado (CNRH, 2012), pode-se dizer que a avançada idade da barragem Lomba do Sabão, aliada à outras questões de projeto (cuja averiguação não faz parte do escopo deste trabalho), pode ajudar a enquadrá-la em uma categoria de barragem de Alto Risco com Alto Dano Potencial Associado, necessitando a elaboração de um Plano de Ação Emergencial. A partir das simulações realizadas, percebeu-se um grande potencial de perdas de vidas humanas na cidade de Porto Alegre, caso haja um rompimento, ressaltando-se ainda que as simulações foram realizadas considerando o Arroio Dilúvio vazio. Normalmente estudos de rompimento de barragem são realizados considerando o pior cenário possível, que nesse caso, ocorreria considerando o Arroio Dilúvio totalmente cheio (devido a intensas precipitações hipotéticas) no tempo zero das simulações. As diferenças observadas entre as simulações 1D e 2D se resumem principalmente à maior velocidade de deslocamento da massa d’água nas simulações 1D, que geram tempos de pico 15% menores do que as simulações 2D e vazões de pico 20% maiores, a 5,5 Km a jusante da barragem. Nota-se que para a área de estudo em questão, que apresenta características geomorfológicas diferenciadas a jusante, a aplicação de modelos bidimensionais para prever a mancha de inundação é mais adequada, tanto no sentido de identificar áreas que tem potencial para serem atingidas, como no sentido de não superestimar as profundidades obtidas nas simulações 1D por “vasos comunicantes” para as seções em que a margem do canal tem cota superior à cota da planície de inundação, mesmo que os hidrogramas 1D e 2D tenham se apresentado equivalentes



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA). Relatório de Segurança de Barragens 2015. Superintendência de Regulação (SRE). Brasília, DF. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA). Resolução nº 91, 02 de abril de 2012. Diário Oficial da União, Brasília, 02 de abril de 2012.
- BENJANKAR, R. TONINA, D. ,MCKEAN, J. One Dimensional And Two Dimensional Hydrodynamic Modeling Derived Flow Properties: Impacts On Aquatic Habitat Quality Predictions. Earth Surface Process and Landforms. DOI: 10.1002/esp.3637. 2017
- BRASIL. Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens Diário Oficial da União, Brasília, 20 set. 2010.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise do Rompimento hipotético da barragem de Ernestina. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 1997.
- CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). Resolução nº143 de 10 de Julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília. 2012.
- GALLEGOS, A.H.; SCHUBERT, J.E.; SANDERS, B.F. Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California. Advances in Water Resources. 2009.
- KIM, B.; SANDERS, B.F. Dam-Break Flood Model Uncertainty Assessment: Case Study of Extreme Flooding with Multiple Dam Failures in Gangneung, South Korea. Journal of hydraulic engineering. 2016
- KUMAR, S.; JASWAL, A.; PANDEY, A.; SHARMA, N. Literature Review of Dam Break Studies and Inundation Mapping Using Hydraulic Models and GIS. International Research Journal of Engineering and Technology. p-ISSN: 2395-0072. 2017
- MAIZONAVE, C. R. M.; BENDATI, M. M.; WERNER, V. R.; CYBIS, L. F. A.; CARVALHO, E. N. Avaliação planctônica do reservatório da Lomba do Sabão com ênfase na ocorrência de cianobactérias: implicações para o abastecimento público. In: XXIII CBESA. 2005.
- MENESCAL R. A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil. Ed. ProÁgua. DF. 2005.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. Programa de Revitalização da Bacia do Arroio Dilúvio – Plano de Ação. 2012.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center. California, EUA. 2016.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Using HEC-RAS for a Dam Break Studies. Hydrologic Engineering Center. California, EUA. 2014.
- ZANARDI, R. P.; SCHNEIDER, A. H.; SALOMONI, T. R.; SALOMONI, C. S.; REISS, M. L. L. Validação da Qualidade do Perfilamento a Laser aerotransportado da cidade de Porto Alegre. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Foz do Iguaçu. 2013.
- TSCHIEDEL, A. F. Avaliação de Incerteza em Estudos de Rompimento de Barragens. 2017. Dissertação. PPGRHSA. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.