

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS EM CASCATA COM O MODELO MGB**

*Maria Eduarda Pereira Alves<sup>1</sup>; Fernando Mainardi Fan<sup>2</sup> & Ayan Santos Fleischmann<sup>3</sup>*

**RESUMO** – Eventos de ruptura de grandes barragens têm, em geral, consequências catastróficas ao vale de jusante. Assim, modelos matemáticos são utilizados para representar o comportamento de uma mancha de inundação ao longo da bacia hidrográfica. Este trabalho apresenta uma análise da aplicabilidade do Modelo de Grandes Bacias (MGB) com propagação hidrodinâmica. A área de estudo escolhida foi a bacia do rio Uruguai, a qual possui aproximadamente 175 mil km<sup>2</sup> em terreno brasileiro e diversos barramentos ao longo de seus cursos d'água. A simulação consistiu em cenários de rompimento de barragens em cascata e sem rompimento. A partir das simulações foi possível observar que o cenário de rompimento das barragens em cascata no rio Uruguai acarretou as maiores vazões, apresentando manchas de inundação mais extensas ao longo da bacia hidrográfica, vazões de aproximadamente 97419 m<sup>3</sup>/s na UHE Foz do Chapecó e profundidades de 1018% acima da calha cheia do rio na UHE Itá. Já no cenário de referência (sem rompimento), a vazão atingida foi de aproximadamente 15388 m<sup>3</sup>/s na UHE Foz do Chapecó e a profundidade de 246% na UHE Itá.

**ABSTRACT**– Large dam breaks have, in general, catastrophic consequences to the downstream valley. For this, mathematical models are used, being able to represent the behavior of a flooded spot along the watershed. This work presents an application of the hydrologic-hydrodynamic MGB model for dam break studies. The chosen study area was the Uruguay River basin, which has approximately 175,000 km<sup>2</sup> in the Brazilian territory and several dams along its watercourses. The simulation consisted of scenarios representing situations of the cascade dam breaking and a reference scenario without rupture. Results showed that the cascading rupture scenario in the Uruguay River caused larger flows if compared with different tests, presenting more extensive flooded areas along the basin. Maximum discharge at the *Foz do Chapecó* hydropower plant was estimated at 97,419 m<sup>3</sup>/s and at *Itá* dam the river water depth represented 1,018% of the channel bank elevation. In the reference scenario, the obtained flow was 15,388 m<sup>3</sup>/s at *Foz do Chapecó*, and the depth increase in relation to bank elevation was of 246% at *Itá*.

**Palavras-Chave** – Rompimento de barragens, Modelagem de Grande Escala, Rompimento em cascata.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), [duda.epa@gmail.com](mailto:duda.epa@gmail.com)

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), [fernando.fan@ufrgs.br](mailto:fernando.fan@ufrgs.br)

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), [ayan.fleischmann@gmail.com](mailto:ayan.fleischmann@gmail.com)

## INTRODUÇÃO

Estudos relativos à previsão de danos ocasionados pelo rompimento de barragens são fundamentais, visto que a ruptura dessas estruturas pode ocasionar perdas econômicas e humanas localizadas no vale a jusante (BRASIL, 2010). Para isso, a lei nº 12334 de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010) estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB) que apresenta como instrumento o Plano de Segurança da Barragem (PSB), o qual deve ser realizado para cada barragem.

O Plano de Ação de Emergência (PAE) é um dos componentes do PSB e representa o plano de ação na eventualidade de rompimento da barragem. No PAE é necessário avaliar a área de potencial impacto de um eventual rompimento, através de informações como o tempo de chegada da onda de cheia e a mancha de inundação máxima em locais de interesse (BRASIL, 2010).

Para elaboração do PAE podem ser utilizados modelos matemáticos para simular o movimento da onda de cheia ao longo do vale a jusante, possibilitando a determinação de características da onda e permitindo estimar o dano potencial e a duração da inundação. Os modelos para simulação podem ser classificados em modelos simplificados, modelos hidrológicos, modelos hidrodinâmicos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais (LAURIANO, 2009).

Os modelos comumente utilizados para simulação de ruptura de barragens são o DAMBRK, FLDWAV e HEC-RAS (1D), os quais são modelos unidimensionais baseados na solução das equações completas de Saint-Venant (RUBÍ, 2006; LAURIANO, 2009). Entretanto, na maioria das vezes, esses modelos são utilizados para estudos em trechos de rio, pois necessitam de mais dados de entrada e possuem códigos computacionais extensos e complicados (PONTES et al., 2015).

Contudo, o rompimento de barragens pode causar uma onda que atinge centenas de quilômetros de extensão, ainda mais quando as mesmas se encontram em cascata, o que é comum no Brasil. Um exemplo é o rompimento da barragem de Fundão na cidade de Mariana (MG), onde o colapso da estrutura resultou em uma onda de rejeitos que percorreu mais de 650 km (IBAMA, 2015). Portanto, para estudo desses rompimentos é preciso analisar em grande escala, sendo necessário modelos que permitam o estudo da bacia hidrográfica como um todo, e não apenas em trechos de rio.

Tendo em vista essa necessidade, um modelo que considera toda a bacia hidrográfica em sua simulação é o Modelo de Grandes Bacias (MGB). O MGB é um modelo hidrológico e hidrodinâmico desenvolvido para aplicações em grandes bacias, que representa o processo de transformação de chuva em vazão de forma distribuída (PONTES et al., 2017). Diferentemente dos modelos citados anteriormente, apresenta a alternativa de uso do método inercial na simulação hidrodinâmica, onde realiza uma aproximação das equações de Saint-Venant, desprezando o termo de inércia advectiva na equação dinâmica. (PONTES et al., 2015; FAN et al., 2014).

O MGB nunca foi testado para estudo de rompimento de barragens, sendo este trabalho a primeira análise desta possibilidade. Como vantagens desta possível utilização, que seria uma metodologia não convencional, cita-se que, por ser um modelo de simulação que considera toda a bacia hidrográfica, e possibilita a avaliação de variáveis como mancha de inundação, profundidade, efeitos de planície e vazão em centenas de quilômetros de trechos de rio a partir de uma aplicação em escala de bacia.

Assim, com esta pesquisa buscou-se contribuir para os estudos de rompimento de barragens, analisando a possibilidade de utilização do Modelo de Grandes Bacias – MGB, com a simplificação nas equações de Saint-Venant utilizadas para propagação de vazões, conhecida como método inercial.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo foi realizado na bacia do rio Uruguai, a qual apresenta uma área de 365 mil km<sup>2</sup>, com 174,4 mil km<sup>2</sup> situados em território brasileiro, representando a Região Hidrográfica do Uruguai (MMA, 2006). Essa região apresenta diversas Usinas Hidrelétricas (UHE), sendo objetos deste estudo as seguintes: a UHE Barra Grande localizada no rio Pelotas (formador do rio Uruguai) e as UHEs Machadinho, Itá e Foz do Chapecó no rio Uruguai. A Figura 1 apresenta a localização da bacia hidrográfica e das usinas hidrelétricas da região.

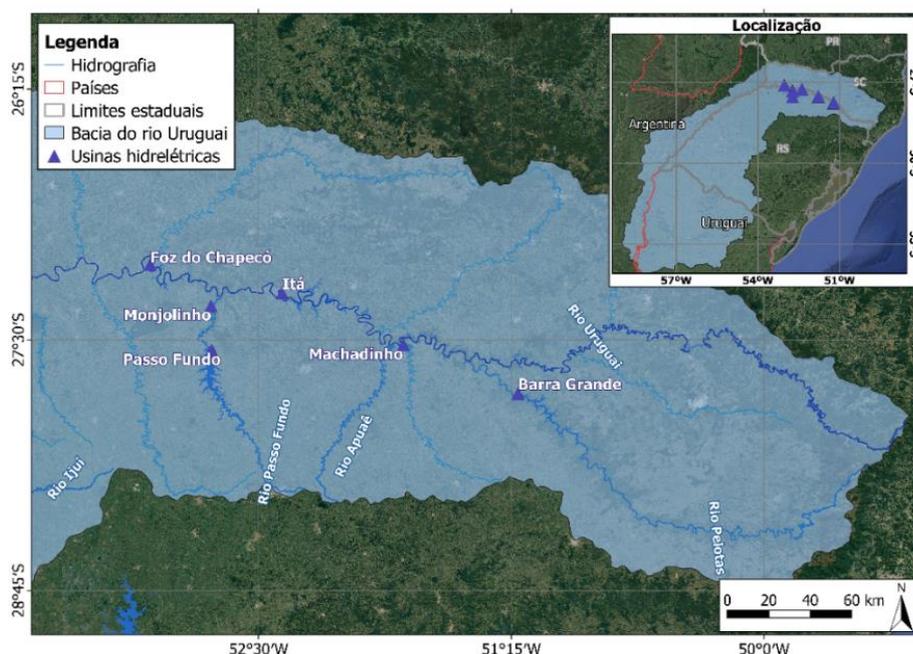


Figura 1. Bacia hidrográfica e usinas hidrelétricas do estudo.

### Aplicação do modelo MGB

Neste estudo foi aplicado o modelo MGB desenvolvido para a bacia do rio Uruguai por Fan et al. (2017). Foram ajustadas as relações geomorfológicas utilizadas na calibração do modelo. Essas relações contemplam as larguras e profundidades de acordo com a área de drenagem, ao longo dos

cursos d'água (PONTES et al., 2015; PAIVA R. C., 2009). A Figura 2A apresenta a relação entre as larguras e áreas de drenagem e a Figura 2B entre as profundidades e áreas de drenagem.

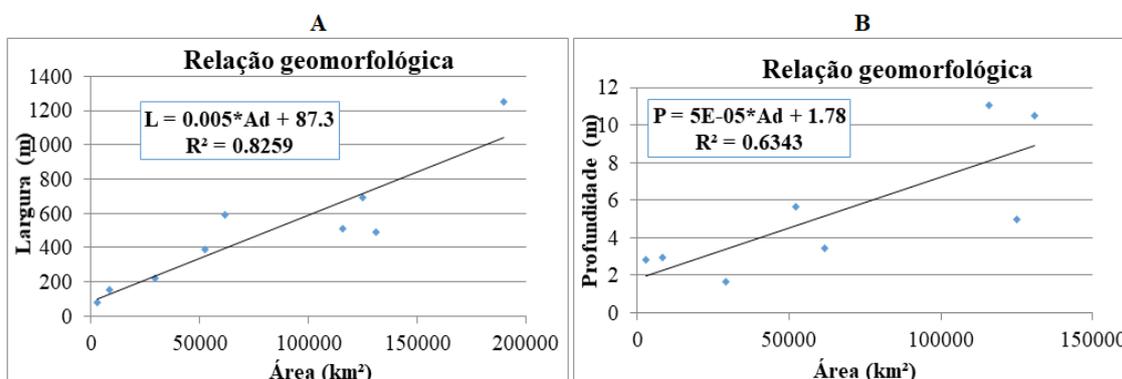


Figura 2. Relações geomorfológicas da bacia utilizadas no estudo.

A partir das novas relações geomorfológicas descritas acima, foram obtidas as larguras e profundidades para cada minibacia, utilizando a área de drenagem da mesma, finalizando a etapa de calibração do modelo. A Figura 3 apresenta essa calibração do projeto da bacia do rio Uruguai, comparando as vazões diárias observadas na estação fluviométrica e as resultantes do modelo, no município de Uruguaiana. Juntamente, apresenta-se o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe, que indica a concordância entre os valores de vazão simulados e os observados.

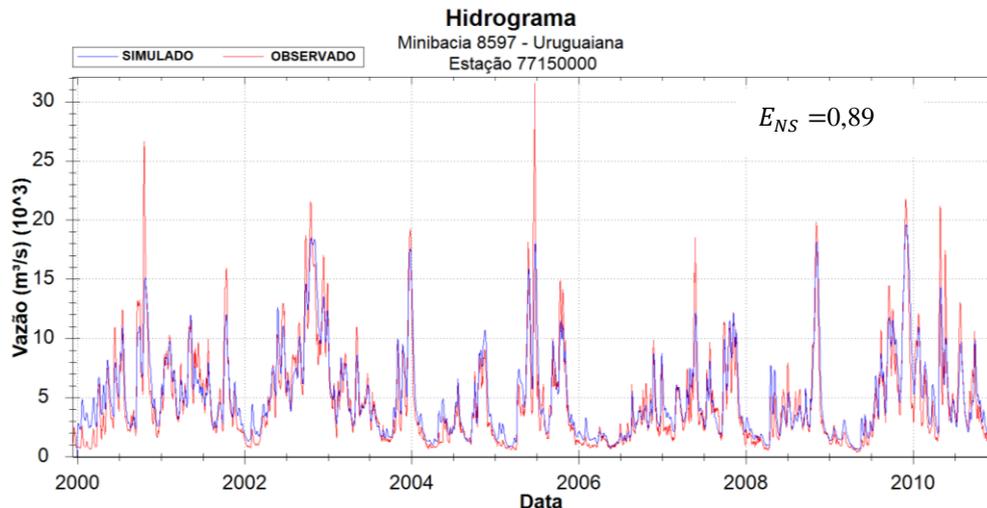


Figura 3. Vazões diárias simuladas e observadas no município de Uruguaiana. ENS: coeficiente de Nash-Sutcliffe.

### Cenários de rompimento

O trabalho consistiu na simulação de cenários nos quais estudou-se a aplicabilidade do Modelo de Grandes Bacias (MGB) em representar o escoamento e as manchas de inundação resultantes dos rompimentos de barragens. Desses cenários, um representa a situação sem rompimento de barragens, onde são avaliadas as máximas cheias naturais simuladas no intervalo de tempo estudado (período de janeiro de 2000 até dezembro de 2010). Este cenário será apresentado como cenário 1.

O segundo cenário representa o rompimento de barragens em cascata, no qual o rompimento de uma barragem a montante acaba ocasionando uma grande vazão a jusante. Essa onda de cheia acaba promovendo o rompimento da barragem localizada a jusante, e assim sucessivamente. A cascata simulada foi a do rio Uruguai, na qual o rompimento da UHE Barra Grande resultou no rompimento da UHE Machadinho, depois a UHE Itá e, por fim, o rompimento da UHE Foz do Chapecó. Este cenário será apresentado como cenário 2.

Para simulação do cenário de rompimento foi utilizado o método inercial de escoamento e foram necessários os hidrogramas de ruptura das usinas hidrelétricas em estudo. Para formação dos mesmos foram considerados os volumes máximos dos reservatórios das UHEs, que o comportamento do rompimento representaria uma falha onde não há o rompimento repentino da barragem, e que a vazão demoraria três dias para escoar para jusante. A Tabela 1 apresenta os valores de defluência adotado no estudo para o rompimento dos barramentos.

Tabela 1. Hidrogramas de ruptura das UHEs.

| Usina hidrelétrica | Volume do reservatório (hm <sup>3</sup> ) | Vazão (m <sup>3</sup> /s) |        |        |
|--------------------|---|---------------------------|--------|--------|
|                    |   | 1º dia                    | 2º dia | 3º dia |
| Barra Grande       | 5200                                      | 36111                     | 18055  | 6019   |
| Machadinho         | 3340                                      | 23188                     | 11594  | 3865   |
| Itá                | 5100                                      | 35415                     | 17707  | 5903   |
| Foz do Chapecó     | 1502                                      | 10430                     | 5215   | 1739   |

### **Avaliação dos resultados**

Para cada simulação foi gerada a mancha de inundação máxima resultante e os hidrogramas de cada minibacia. Foram analisadas a extensão, as profundidades e a vazão de pico atingidas pela onda de cheia para cada cenário e, também, os impactos aos municípios e locais de interesse inundados pela mancha.

As vazões de pico foram avaliadas de acordo com os Tempos de Retorno (TR) correspondentes, calculados através da distribuição de Gumbel, e as profundidades conforme a porcentagem em que a lâmina d'água ultrapassou a calha cheia do rio adotada nas simulações.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Manchas de inundação máxima**

Foram obtidas as manchas máximas de inundação para os cenários simulados. No cenário sem rompimento a mancha obtida é resultante da máxima inundação ocorrida em cada minibacia, em todo o período simulado (01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2010). Assim, a cheia representada pela mancha de inundação em cada minibacia pode ser representante de eventos ocorridos em datas diferentes. Por exemplo, no município de Uruguaiana a mancha de inundação é resultante do evento ocorrido em dezembro de 2009 e em São Borja e Itaqui referente à cheia de junho de 2005. Entretanto,

no cenário de rompimento, a mancha de inundação máxima corresponde às cheias resultantes da ruptura dos barramentos (defluência dos reservatórios das usinas hidrelétricas) quando essas são superiores as cheias naturais ocorridas no período de simulação, em cada minibacia.

A mancha de inundação resultante da simulação sem rompimento (cenário 1) foi comparada com a resultante do rompimento da cascata do rio Uruguai (cenário 2), sendo apresentadas na Figura 4, logo após a usina hidrelétrica de jusante (UHE Foz do Chapecó), e na Figura 5 em Uruguaiana.

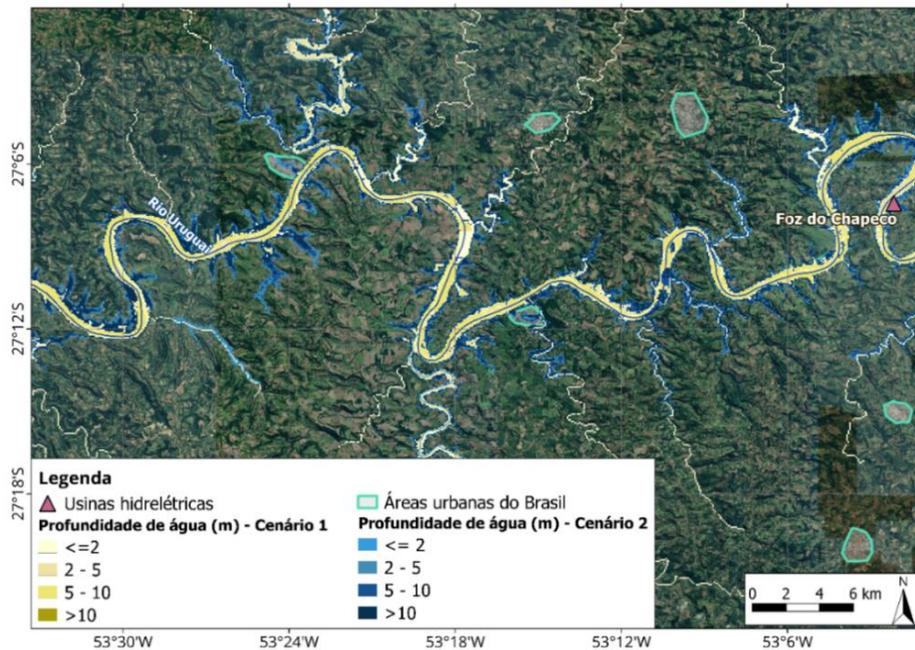


Figura 4. Comparação entre os cenários sem rompimento e com rompimento do cenário 2, na UHE Foz do Chapecó.

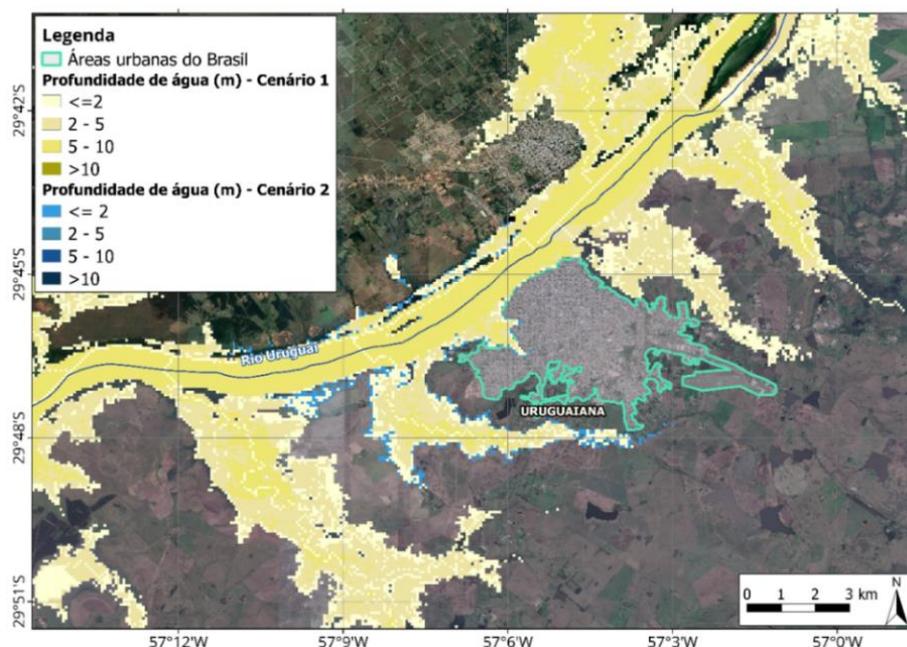


Figura 5. Comparação entre os cenários sem rompimento e com rompimento da cascata do rio Uruguai, em Uruguaiana.

É possível perceber que na região analisada existem muitas áreas que são naturalmente inundadas em função das cheias naturais que acontecem na bacia hidrográfica. Entretanto, observa-

se que o rompimento em cascata das quatro hidrelétricas localizadas no médio Uruguai, representando uma cheia de aproximadamente 16880 hm<sup>3</sup>, apresenta uma mancha de inundação máxima com maior extensão de áreas inundadas. Assim, atinge uma parcela de áreas urbanas que não foram atingidas pelo cenário sem rompimento, principalmente próximo às usinas hidrelétricas.

### Profundidade máxima

Além das manchas de inundação, foram analisadas as profundidades de água atingidas pela onda de cheia nos municípios de interesse e na região próxima as usinas hidrelétricas. Para isso foram quantificados os percentuais em que as profundidades ultrapassaram a calha cheia do rio adotada nas simulações. A Tabela 2 apresenta os valores absolutos de profundidade e os percentuais de profundidade acima da calha cheia do rio obtidas nas simulações, nos demais locais de interesse do estudo.

Tabela 2. Profundidade acima da calha do rio (%) nos pontos de interesse.

| Pontos de interesse | Máxima profundidade (m) |           | Percentual de profundidade acima da calha cheia do rio (%) |           |
|---------------------|-------------------------|-----------|--|-----------|
|                     | Cenário 1               | Cenário 2 | Cenário 1  | Cenário 2 |
| UHE Barra Grande    | 10,7                    | 28,1      | 335  | 1046      |
| UHE Machadinho      | 10,9                    | 33,2      | 205  | 829       |
| UHE Itá             | 14,0                    | 45,2      | 246  | 1018      |
| UHE Foz do Chapecó  | 13,0                    | 38,8      | 168  | 696       |
| São Borja           | 18,6                    | 22,2      | 131  | 175       |
| Itaqui              | 18,8                    | 20,5      | 125  | 145       |
| Uruguaiana          | 13,8                    | 14,0      | 265  | 271       |

Através destes valores, observa-se na região das usinas um aumento nas profundidades do rio Uruguai nos trechos a jusante das barragens no caso de rompimento. Em locais distantes aos rompimentos as profundidades atingidas correspondem às resultantes do cenário sem rompimento, ou seja, às cheias naturais.

Nos municípios de interesse, os quais estão localizados 650 km a jusante das usinas, as profundidades atingidas no caso de rompimento da cascata também são maiores que as do cenário sem rompimento, porém não na mesma grandeza. Observa-se uma variação de profundidade aumentando de, aproximadamente, 18,6 para 22,2 metros em São Borja, 18,8 para 20,5 metros em Itaqui e de 13,8 para 14,0 m em Uruguaiana.

### Vazões de pico

Para cada minibacia também foram calculados os Tempos de Retorno atingidos pelas vazões de pico correspondentes às cheias obtidas, utilizando o método de Gumbel e a série simulada de 10 anos (2000-2010). Salienta-se que se deve ter cautela com a incerteza dos altos valores obtidos de TRs dado o curto período analisado. Os TRs para as vazões de pico atingidas, para os cenários 1 e 2, são representados na Figura 6 e Figura 7, respectivamente. Na Tabela 3, são apresentados os valores de vazões de pico obtidas e os referentes TRs calculados para ambos cenários.

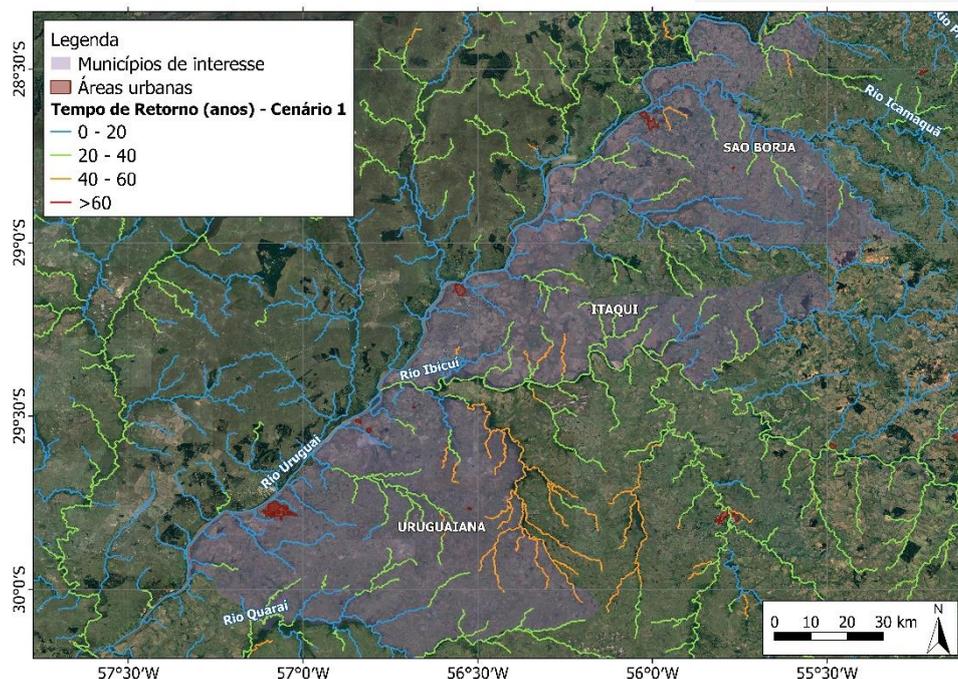


Figura 6. Tempo de Retorno (anos) para o cenário 1, nos municípios de interesse.

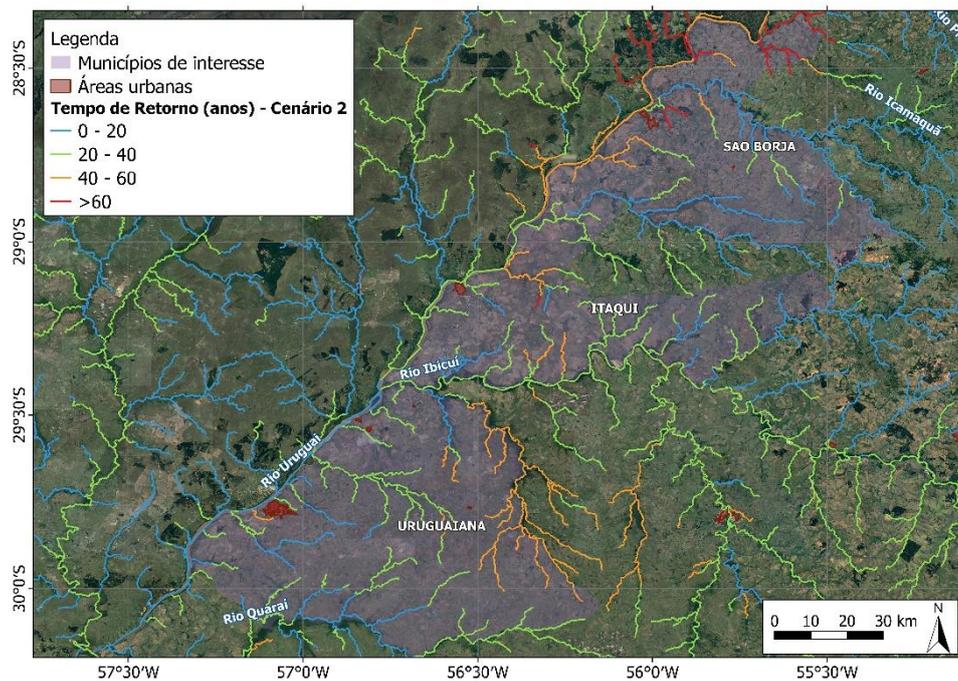


Figura 7. Tempo de Retorno (anos) para o cenário 2, nos municípios de interesse.

Tabela 3. Tempos de Retorno (anos) para os cenários simulados.

| Pontos de interesse | Vazões de pico (m <sup>3</sup> /s) |           | Tempo de Retorno (anos) |           |
|---------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
|                     | Cenário 1                          | Cenário 2 | Cenário 1               | Cenário 2 |
| UHE Barra Grande    | 7168                               | 35431     | 14                      | 81        |
| UHE Machadinho      | 9375                               | 54937     | 11                      | 86        |
| UHE Itá             | 11184                              | 92330     | 10                      | 85        |
| UHE Foz do Chapecó  | 15388                              | 97419     | 13                      | 81        |
| São Borja           | 22415                              | 34439     | 16                      | 44        |
| Itaquí              | 19157                              | 26001     | 15                      | 36        |
| Uruguaiana          | 19580                              | 20806     | 9                       | 10        |

É possível observar que, de maneira geral, os rompimentos provocaram vazões com altos TR no médio Uruguai (maiores do que 50 anos). Essas vazões defluentes das rupturas são amortecidas ao longo do rio, sendo, no Baixo Uruguai, equivalentes às cheias naturais resultantes de eventos hidrológicos. O rompimento do cenário 2 (rompimento da cascata do rio Uruguai) foi o responsável por provocar as maiores vazões com Tempos de Retorno superiores aos do cenário sem rompimento (cenário 1). E, assim como na análise das profundidades, nos trechos do rio Uruguai a jusante das barragens para os cenários de rompimento, os TR atingidos são maiores.

As maiores diferenças entre as magnitudes das vazões de pico são observadas na região das usinas hidrelétricas, sendo normalizadas próximo aos municípios de interesse. No cenário da cascata do rio Uruguai (cenário 2), os TR atingidos nos municípios de interesse são maiores, principalmente em São Borja e Itaqui. Isso mostra que o acidente de ruptura e a defluência de uma alta vazão no médio da bacia do rio Uruguai provoca danos em regiões localizadas 600 km a jusante.

## CONCLUSÃO

Após análises dos resultados foi verificado que as rupturas causaram grandes vazões no médio Uruguai (próximo às usinas hidrelétricas), com Tempos de Retorno (TR) maiores que os observados na simulação sem rompimento. Entretanto, no baixo Uruguai, próximo aos municípios de São Borja, Itaqui e Uruguaiana, os TR resultantes corresponderam, em geral, as cheias naturais causadas por eventos hidrológicos, representando um amortecimento na onda da cheia ao longo de sua propagação a jusante.

Finalmente, pode-se afirmar que é possível a utilização do Modelo de Grandes Bacias (MGB) como solução tecnológica no estudo de rompimento de barragens, tanto individuais quanto em cascata, apresentando resultados para a bacia hidrográfica como um todo.

Porém, este trabalho apresentou algumas limitações como a definição do hidrograma de ruptura utilizado. Tendo visto que no trabalho foram utilizados hidrogramas com duração de três dias, resultando em TRs máximos de 86 anos nos barramentos e, que hidrogramas mais intensos poderiam gerar resultados ainda mais catastróficos. Também deve-se atentar ao MDE utilizado nas simulações, pois uma má resolução do MDE pode acabar provocando ou não inundações em locais errôneos.

Como desenvolvimentos futuros a serem conduzidos a partir das contribuições trazidas por este trabalho, sugere-se: analisar a sensibilidade das estimativas do modelo ao hidrograma de ruptura adotado; avaliar a interferência nos resultados da utilização de diferentes Modelos Digitais de Elevação (MDE), com melhor resolução espacial e acurácia; aplicar o modelo em passo de tempo horário para este tipo de simulação, permitindo a simulação de eventos mais rápidos; e melhorar as estimativas dos resultados para o Rio Uruguai a partir de medições de campo.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL. (20 de setembro de 2010). Lei n. 12.334. *Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Ba.* Brasília, DF: Diário Oficial da União .
- COLLISCHONN, W. (1997). *Análise do rompimento hipotético da barragem Ernestina - RS.* Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, RS: IPH - UFRGS.
- FAN, F. M., PONTES, P. R., PAIVA, R. C., & COLLISCHONN, W. (2014). *Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant.* RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 4, p. 137-147.
- FAN, F. M.; PONTES, P. R. M. ; BUARQUE, D. C. & COLLISCHONN, W. (2017). *Evaluation of upper Uruguay river basin (Brazil) operational flood forecasts.* RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 22, p. 1-12.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS (IBAMA). (2015). *Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG).*
- LAURIANO, A. W. (2009). *Estudo de ruptura da barragem de funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS.* Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia UFMG.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). (2006). *Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai.* Brasília: MMA.
- PAIVA, R. C. (2009). *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias: Estudo de caso na bacia do rio Solimões.* Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS.
- PONTES, P. R., COLLISCHONN, W., FAN, F. M., PAIVA, R. C., & BUARQUE, D. C. (2015). *Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões.* RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 888 - 904.
- PONTES, P. R., FAN, F. M., FLEISCHMANN, A. S., PAIVA, R. C., BUARQUE, D. C., SIQUEIRA, V. A., & COLLISCHONN, W. (2017). *MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS.* Environmental Modelling & Software. v. 94, p.1-20.
- RUBÍ, A. M. (2006). *Clasificación de Presas y Evaluación del Riesgo con Programa HEC-RAS.* Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.