

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE ÍNDICE DE PERIGO ASSOCIADO À RUPTURA DE UMA PEQUENA ESTRUTURA DE TERRA: ESTUDO DE CASO DO ARROIO BAIÓ

Fernando de Oliveira Fraga¹ & Gean Paulo Michel²

RESUMO

Inundações estão entre os desastres mais destrutivos, com potencial de gerar impactos negativos em populações em termos de fatalidades, ferimentos, deslocamento de pessoas, danos a infraestruturas, patrimônio cultural e ambiental e atividades econômicas. Nesse sentido, o Índice de Perigo (IP) estima o limite de segurança em que pessoas estão submetidas a eventos de inundação, levando em consideração a velocidade do fluxo de água e a altura da lâmina de água. O presente estudo se propõe a aplicar o IP a partir da propagação da onda de cheia resultante da ruptura de uma pequena estrada vicinal, localizada no arroio Baio, no município de São Francisco de Paula (RS) a partir do uso do *software* HEC-RAS.

ABSTRACT

Floods are among the most destructive disasters, with the potential to generate negative impacts on populations in terms of fatalities, injuries, displacement of people, damage to infrastructure, cultural and environmental heritage and economic activities. In this sense, the Hazard Index (HI) estimates the safety limit at which people are subjected to flood events, taking into account the speed of the water flow and the water level. This study aims to apply the HI from the flood wave propagation from the rupture of a small embankment road, placed in the Baio stream, in São Francisco de Paula city (RS), using the HEC-RAS software.

Palavras-Chave – Índice de Perigo; Desastres Naturais; Inundações

INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas vitais na história da civilização. As barragens para abastecimento de água estão, sem dúvidas, entre as primeiras estruturas concebidas pela humanidade, tendo relação direta com a ascensão e o declínio de civilizações, especialmente para aquelas com alta dependência da irrigação (Jansen, 1983). Apesar de seus benefícios, as inundações resultantes dos eventos de rompimento de barragens também produziram alguns dos maiores desastres nos últimos dois séculos (Xiong *et al.*, 2011).

Inundações estão entre os desastres mais destrutivos, com potencial de gerar impactos negativos em populações em termos de fatalidades, ferimentos, deslocamento de pessoas, danos a infraestruturas, patrimônio cultural e ambiental e atividades econômicas (CRED-UNDRR, 2020).

De acordo com Merz *et al.* (2007), o mapeamento de inundação é uma ferramenta útil que auxilia na identificação de áreas inundáveis e na gestão e mitigação dos riscos que envolvem tais

¹) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS; fernandodof@ufrgs.br

²) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS; gean.michel@ufrgs.br

eventos. Para tal, o HEC-RAS se mostrou um *software* muito eficiente e amplamente utilizado ao redor do mundo para o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação.

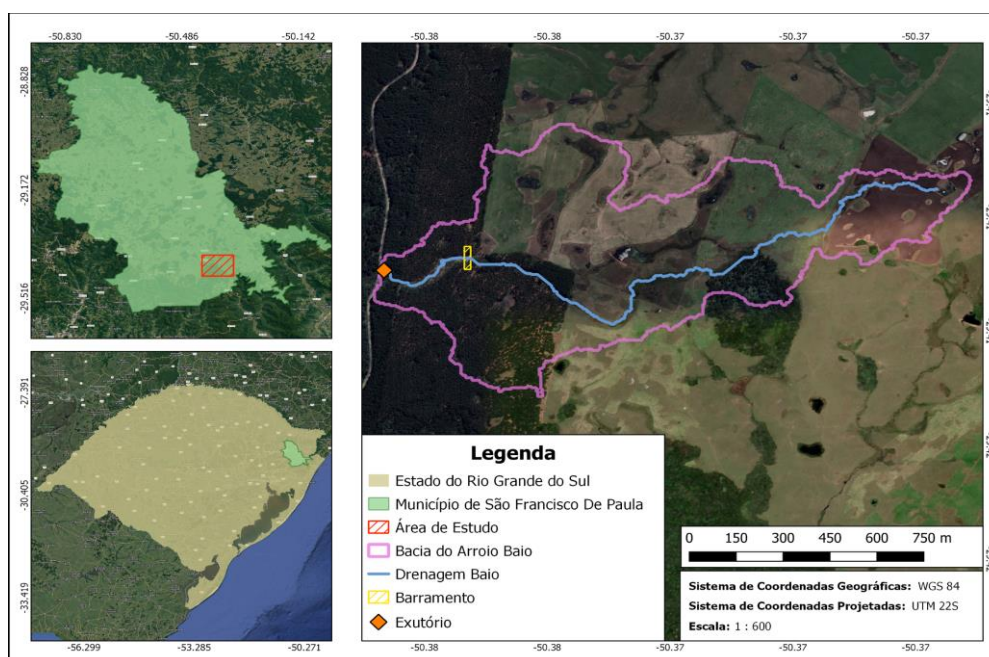
Para o mapeamento de risco de inundação com maior detalhamento em termos de intensidade e frequência, o uso de Índices de Perigo (IP) que consideram a profundidade e a velocidade da água se tornaram uma ferramenta útil e prática (Stephenson, 2002; Smith *et al.*, 2014). Foster e Cox (1973) foram os primeiros a relacionarem a estabilidade de pessoas em cenários de inundação a partir de estudos em laboratório com crianças submetidas a uma área de simulação de inundação.

Nesse contexto, o presente estudo se propõe a aplicar o Índice de Perigo a partir da propagação da onda de cheia resultante da ruptura de uma pequena estrada vicinal, localizada no arroio Baio, a partir do uso do *software* HEC-RAS. Após um evento de intensa precipitação, a estrutura constituída por dois bueiros circulares, rompeu, quando seu sistema de drenagem não suportou a vazão recebida. A partir disso, uma onda de cheia foi propagada a jusante da estrutura, onde um monitoramento hidrológico vinha ocorrendo a partir de uma calha Parshall e uma sonda de nível, das quais forneceram valores de vazão e nível de água ao longo de todo o evento de ruptura.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do arroio Baio possui uma área de drenagem de 0,94 km² e está localizada no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, no município de São Francisco de Paula (Figura 1). Além disso, o arroio Baio está compreendido na bacia hidrográfica do rio Mascarada, afluente do rio dos Sinos.

Figura 1: Localização da bacia hidrográfica do arroio Baio



No exutório da bacia, ocorre o monitoramento hidrológico contínuo, do qual permitiu o registro de vazão e nível de água ao longo de todo o evento de ruptura. Para tal, se utilizou uma calha Parshall, estrutura amplamente utilizada na medição de vazão, através da relação direta com o nível de água medido na régua localizada no interior da estrutura. Além disso, se utilizou um sensor de nível com capacidade de medição de pressão dentro de um intervalo de 0 a 10 MCA, da marca SOLAR, a qual possibilitou a digitalização dos dados de níveis medidos em intervalos de 5 minutos.

A estrada vicinal estudada é responsável pela interseção da rede de drenagem do arroio Baio por meio de um aterro de aproximadamente 2 metros de altura, constituído por 2 bueiros circulares,

responsável por conduzir a vazão de montante para jusante da estrutura. Após um evento com alta intensidade de precipitação, se levantou a hipótese de que a estrutura sofreu o galgamento na medida que os bueiros não tiveram capacidade de suportar a vazão de água recebida. Com isso, a estrutura passou a trabalhar de forma análoga a uma barragem, uma vez que um reservatório foi gerado a montante da mesma, até o momento que o nível de água alcançou o topo da estrada, causando o seu rompimento. A partir disso, se gerou uma onda de cheia em direção ao exutório da bacia, onde se mediu os dados de vazão e nível de água ao longo de todo o evento de ruptura.

METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo foi desenvolvida em duas etapas. Primeiramente se realizou toda a modelagem hidrodinâmica através do *software* HEC-RAS. O modelo foi calibrado através de dados reais de vazão medidos ao longo do processo de ruptura da estrutura estudada. Além disso, foi utilizado valores reais acerca das medidas da brecha, uma vez que se esteve em campo logo após o evento, sendo possível observar a estrutura ainda rompida com sua respectiva brecha ainda presente.

A segunda etapa da metodologia se deu pela geração do mapa de Índice de Perigo através do produto dos mapas de velocidade do escoamento e profundidade da água no trecho estudado. A partir disso, se analisou o comportamento do IP ao longo de todo o trecho, sendo possível a verificação dos trechos mais críticos e a análise dos valores de IP em relação a valores propostos por diferentes autores, dos quais relacionam o grau de IP em função da estabilidade de pessoas em diferentes idades e estruturas com diferentes condições.

Modelagem Hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica realizada no evento de ruptura da estrada vicinal em estudo se deu pela aplicação do *software* HEC-RAS, do qual realiza simulações bidimensionais a partir das Equações da Conservação de Massa e da Quantidade de Movimento, que juntas compõem as Equações de Saint Venant.

O Modelo Digital de Elevação (MDT) utilizado na calibração possui uma resolução espacial de 1 metro e foi adquirido através da empresa NTT DATA Corporation, em fevereiro de 2017. As condições de contorno utilizadas na calibração foram o hidrograma de ruptura e a declividade calculada. O hidrograma de ruptura foi utilizado como condição de contorno de montante e, seus valores foram extraídos do monitoramento hidrológico realizado no local através da calha Parshall e sonda de nível. Entretanto, para que o evento de ruptura pudesse ser simulado, foi necessário a adaptação do hidrograma de entrada do modelo. A adaptação se deu pela remoção do pico do hidrograma, causado pelo rompimento da estrutura, e pela distribuição do volume removido ao longo do início do hidrograma até o momento da ruptura. Como condição de contorno de jusante, se utilizou a declividade calculada de 0,021 m/m.

Os parâmetros utilizados para a calibração do modelo foram o tempo de abertura da brecha e o coeficiente de manning. O tempo de abertura da brecha se mostrou um parâmetro capaz de modificar o instante do rompimento da estrutura, alterando conseqüentemente o instante do pico do hidrograma de ruptura e a recessão do mesmo. Dessa forma, se buscou igualar o comportamento do pico do evento simulado com o pico do evento observado. Por fim, se modificou o coeficiente de manning do leito do rio e das margens. O manning se mostrou um parâmetro sensível ao pico do hidrograma de ruptura do evento, sendo assim, sua calibração se deu pela tentativa de igualar o pico do hidrograma simulado com o pico do hidrograma observado, do qual possui uma vazão de 0,24 m³/s. Com o modelo calibrado, se gerou os mapas de profundidade da água e velocidade do escoamento para o trecho estudado, para serem utilizados posteriormente na geração do mapa de Índice de Perigo resultantes da ruptura da estrutura em questão.

Índice de Perigo

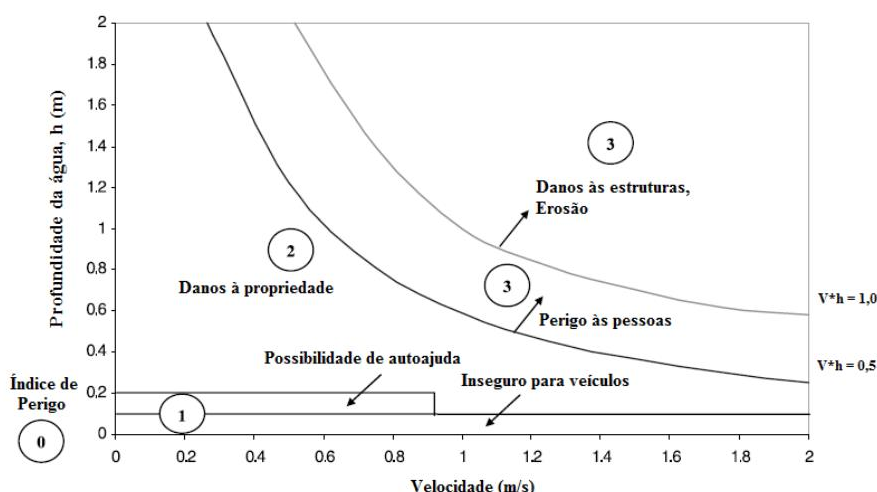
Inundações decorrentes de causas naturais são desastres que deixam milhares de desabrigados todos os anos (Moore, 2005). O mapeamento do perigo de inundação se tornou uma boa alternativa para uma melhor gestão das áreas inundáveis (Monteiro, 2021). Nesse sentido, uma das metodologias utilizadas para a determinação dos perigos relacionados ao escoamento de água, proposta por Stephenson (2002), relaciona o perigo com a velocidade do escoamento e a profundidade da água, como mostra a Equação 1.

$$IP = h * v \quad (1)$$

onde: IP = Índice de perigo (m^2/s); h = profundidade de água (m) e v = velocidade do escoamento (m/s).

Dessa forma, quanto mais profundo e maior a velocidade do escoamento, maior será o perigo associado e conseqüentemente, maiores os danos causados às estruturas e propriedades inseridas no corpo hídrico e maior a probabilidade de pessoas serem arrastadas pela força do fluxo da água. Nesse contexto, a Figura 2 apresenta o diagrama proposto por Stephenson (2002).

Figura 2: Perigo em função da profundidade e velocidade do escoamento. (Adaptado de Stephenson, 2002)



Cenários de inundações podem ser ainda mais agravados quando há intervenção no fluxo natural de um rio, como, por exemplo, em construções de barragens. Quando ocorre a ruptura de uma barragem, há um grande potencial para a ocorrência de altos níveis de perigo, uma vez que nesses cenários, ocorre um aumento abrupto do nível de água e na vazão de um corpo hídrico, colocando em risco estruturas, animais e pessoas localizadas a jusante da estrutura.

Nesse sentido, nas últimas décadas foram realizados diversos estudos e experimentos com a finalidade de determinar intervalos de Índice de Perigo que podem gerar perigo para pessoas com diferentes níveis de idade. Cox *et al.* (2010) evidenciaram com base em diferentes experimentos que a exposição de uma pessoa ao perigo em um cenário de inundação está diretamente relacionada com sua capacidade de suportar o fluxo de água, ou seja, está relacionado ao peso e altura da pessoa. Dessa forma, o autor propôs valores de Índice de Perigo aplicado a três categorias de pessoas, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Perigo associado de acordo com as características físicas da pessoa. (Adaptado de Cox *et al.*, 2010)

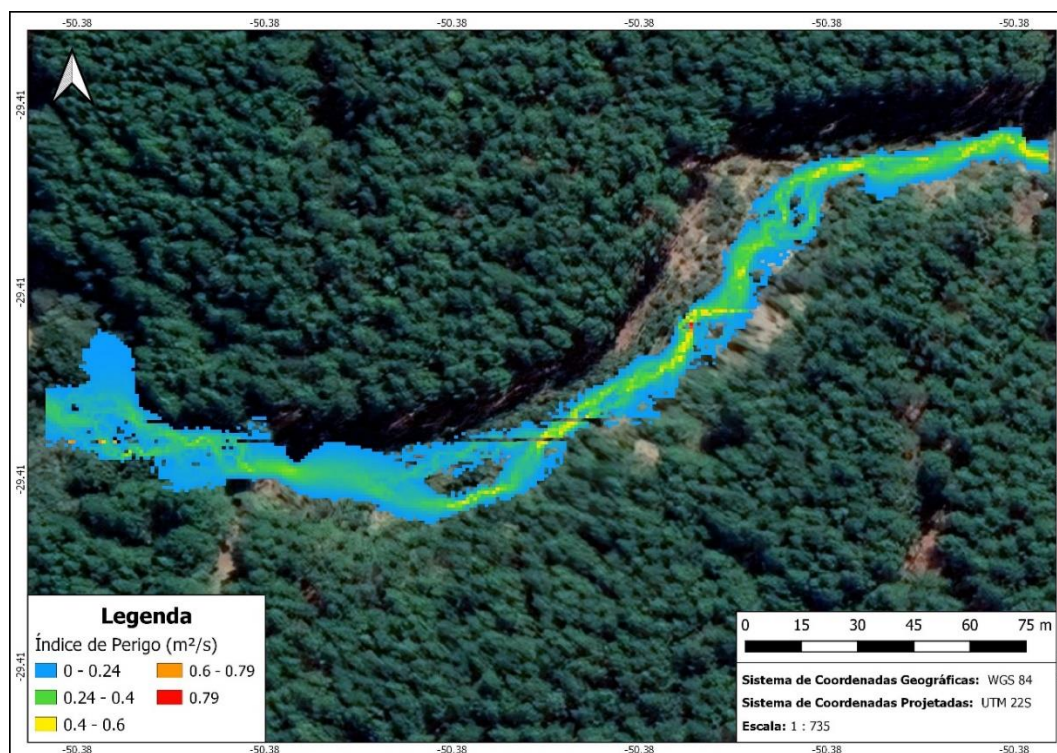
IP (m ² /s)	Crianças Pequenas (AM* ≤ 25 mkg)	Crianças (25 ≤ AM* ≤ 50 mkg)	Adultos (AM* ≥ 50 mkg)
0	Seguro	Seguro	Seguro
0 - 0,24	Perigo Extremo: Perigoso para todos	Perigo Baixo	Perigo baixo
0,4 - 0,6		Perigo Significativo: Perigoso para a maioria	
0,6 - 0,8		Perigo Extremo: Perigoso para todos	Perigo Moderado: Perigoso para alguns
0,8 - 1,2			Perigo Significativo: Perigoso para a maioria
> 1,2			Perigo Extremo: Perigoso para todos

* AM = Produto da altura (A) pela massa (M) da pessoa

RESULTADOS

A partir do produto do mapa de nível de água máximo pelo mapa de velocidade máxima do escoamento, se gerou o mapa de Índice de Perigo (Figura 3) resultante da ruptura da estrada vicinal localizada no arroio Baio.

Figura 3: Índice de Perigo resultante da ruptura da estrada vicinal.



É possível analisar pela Figura 3, que os maiores valores de IP estão localizados ao longo do leito do rio, onde a profundidade da água se torna maior, resultando em valores de IP aproximados entre 0,24 e 0,4 m²/s, representados pelas cores verde e amarelo. Além disso, se observa um valor máximo de IP na ordem de 0,79 m²/s, localizado em um único *pixel*, em uma área com grande concentração de IP maiores que 0,4 m²/s.

Ao considerar o diagrama proposto por Stephenson (2002), representado pela Figura 2, valores de Índice de Perigo superiores a $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ apresentam perigo para pessoas. Sendo assim, caso houvesse uma pessoa no local da ruptura no instante do evento, a mesma poderia ser arrastada pelo escoamento.

Ao comparar os valores resultantes da ruptura da estrutura com os intervalos de perigo propostos por Cox *et al.* (2010), apresentados na Tabela 1, é possível concluir que qualquer criança pequena ou idoso, caso estivesse presente na área inundada estaria exposta a perigo extremo. Entretanto, não apenas pessoas vulneráveis estariam em perigo. Adolescentes estariam expostos a perigo extremo caso estivessem no leito do rio no momento da ruptura ou até mesmo nas margens, a depender da relação de altura e massa do adolescente em questão.

Mesmo que os valores possam indicar que adultos talvez não estariam expostos a perigo extremo, ainda assim, se um adulto estivesse no local onde ocorre o valor máximo de IP, essa pessoa poderia estar exposta a algum nível moderado de perigo.

Sendo assim, mesmo uma pequena estrutura, análoga a uma barragem de apenas 2 metros, ao romper, oferece riscos de perigo, principalmente para crianças e idosos. Nesse contexto, é possível concluir que pequenas barragens, de até 15 metros de altura, das quais não possuem obrigatoriedade de serem submetidas ao Plano de Ação Emergencial (PAE), podem oferecer grandes riscos para as populações localizadas próximo à estrutura e no vale a jusante da mesma.

Nesse contexto, o estudo enaltece a importância de se direcionar um olhar mais crítico para as políticas responsáveis pela segurança de barragens, no que tange estudos de rompimento em pequenas estruturas, avaliando com mais cautela os potenciais perigos que pequenas barragens possam oferecer para pessoas, animais e estruturas expostas em tal evento.

CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou a aplicação do Índice de Perigo para o rompimento de uma pequena estrada vicinal, que ao trabalhar de forma análoga a uma barragem, rompeu, gerando uma onda de cheia a jusante da estrutura, elevando de forma abrupta o nível de água e a vazão no exutório da bacia, local onde vinha ocorrendo um monitoramento hidrológico de forma contínua ao longo de todo o evento de ruptura. Dentre as principais considerações sobre a aplicação do Índice de Perigo na estrutura estudada, destaca-se que:

- O uso de dados provenientes do monitoramento hidrológico realizado no local como condição de contorno do modelo, torna a calibração do modelo confiável e fidedigna para as análises realizadas, mostrando a importância de se medir e utilizar dados reais em estudos hidrológicos, principalmente, em estudos que envolvem ruptura de barragens.
- O Índice de Perigo gerado pela ruptura da estrutura obteve os maiores valores ao longo do leito do rio, onde a profundidade da água se torna maior, com um valor máximo de IP na ordem de $0,79 \text{ m}^2/\text{s}$
- De acordo com o diagrama proposto por Stephenson (2002), os valores de Índice de Perigo gerados no evento estudado apresentam perigo para pessoas. Sendo assim, caso houvesse uma pessoa no local da ruptura no instante do evento, a mesma poderia ser arrastada pelo escoamento.
- De acordo com os intervalos de perigo apresentados por Cox *et al.* (2010), crianças e idosos estariam expostos a perigo extremo caso estivessem presentes na área inundada. Adolescentes, dependendo de sua relação de altura pelo peso, poderiam estar expostos a perigo extremo caso estivessem no leito do rio no momento da ruptura. Por fim, se um adulto estivesse no local onde ocorreu o valor máximo de IP, este poderia estar exposto a algum nível moderado de perigo.
- Se uma pequena estrutura de apenas 2 metros de altura oferece perigo extremo para pessoas localizadas no local inundado pelo seu rompimento, pode-se concluir que, pequenas barragens,

de até 15 metros de altura, das quais não possuem obrigatoriedade de serem submetidas ao PAE, podem oferecer grandes riscos para as populações localizadas próximo à estrutura e no vale a jusante da mesma.

- O estudo provoca uma reflexão quanto ao perigo associado ao rompimento de pequenas barragens, sendo assim, o estudo sugere que um olhar mais crítico para as políticas responsáveis pela segurança de barragens deve ser tomado, no que tange estudos de rompimento em pequenas barragens e estruturas, avaliando com mais cautela os potenciais perigos que estas estruturas possam oferecer para pessoas, animais e estruturas expostas em tal evento.

REFERÊNCIAS

COX, R.; SHAND, T.; BLACKA, M. (2010). *“Australian rainfall and runoff, revision project 10: appropriate safety criteria for people”* Stage Report, Water Research Laboratory, The University of New South Wales, Manly Vale, NSW, Australia, 13 p

CRED-UNDRR (2020). *“The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019)”*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – UN Office for Disaster Risk Reduction, Geneva – CH, 30 p.

FOSTER, D. N.; COX, R. J. (1973). *“Stability of Children on Roads Used as Floodways”*, Technical Report, Water Research Laboratory, The University of New South Wales, Manly Vale, NSW, Australia, 13 p.

JANSEN, R. B. (1983). *“Dams and public safety”*. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver – CO, 345 p.

MERZ, B.; THIEKEN, A. H.; GOCHT, M. (2007). *“Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges”*. Flood risk management in Europe: innovation in policy and practice, pp. 231-251.

MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. (2015) *“Forecasting for flood Warning”* Comptes Rendus Geoscience, 337(1-2), pp. 203-217.

MONTEIRO, L. R.; SANTOS, C. I. D.; KOBİYAMA, M.; CORSEUIL, C. W.; CHAFFE, P. L. B. (2021). *“Effects of return periods on flood hazard mapping: an analysis of the UFSC Campus Basin, Florianópolis city, Brazil”*. RBRH 26(9), pp. 1-13.

SMITH, G.; DAVEY, E.; COX, R. (2014). *“Flood hazard”* Technical Report, Water Research Laboratory, The University of New South Wales, Manly Vale, NSW, Australia, 59 p.

STEPHENSON, D. (2002). *“Integrated flood plain management strategy for the Vaal”*. Urban Water, 4(4), pp. 423-428.

XIONG, Y. (2011). *“A Dam Break Analysis Using HEC-RAS”* Journal of Water Resource and Protection 3(6), pp. 370-379.