

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE GLOBAL DA RESILIÊNCIA DO SISTEMA DE DRENAGEM DE TUBARÃO/SC

*Thiago de Gois Araújo Tavares*¹; *Daniele Feitoza Silva*²; *Benício Emanuel Omena Monte*³; *Joel Avruch Goldenfum*⁴

RESUMO – Os sistemas de drenagem urbana são usados para drenar a água da chuva e mitigar os efeitos de inundação e/ou alagamentos urbanos, cuja eficiência é geralmente calculada a partir da probabilidade de falha. Este estudo avalia o sistema de drenagem de Tubarão/SC através do índice de resiliência Res_o , quantificando a confiabilidade do sistema em função da magnitude e duração da falha nos nós. O Res_o varia de 0 a 1; com 0 indicando o nível mais baixo de resiliência e 1 a resiliência de nível mais alto para os nós que sofreram alagamentos. Para a chuva de projeto adotada, o sistema de drenagem apresentou uma variação da resiliência aos alagamentos dos nós de 0,69 a 0,99. O resultado determina que 77% do sistema de drenagem do município de Tubarão/SC apresenta uma resiliência acima de 0,9, mostrando que os nós do sistema de drenagem apresentam uma alta confiabilidade no controle dos alagamentos. A resiliência nas sub-bacias mais vulneráveis pode ser aumentada alterando a redundância do sistema de drenagem, com a implementação de novos componentes com funções semelhantes. O método aplicado é intuitivo e abrange uma análise sobre sistemas de drenagem que vão além de inferências quantitativas de nós alagados.

ABSTRACT – Urban drainage systems are used to safely drain stormwater and mitigate the effects of urban flooding, and its efficiency is often measured from the probability of failure. This study evaluates the Tubarão drainage system through the Res_o resilience index, which quantifies the reliability of the system as a function of the magnitude and duration of nodes failure. The Res_o ranges from 0 to 1; with 0 indicating the lowest level of resilience and 1 the highest level of resilience for nodes that suffered flooding. For the rainfall used, the drainage system presented a flood resilience variation in the nodes of 0,69 to 0,99. The result determines that 77% of the drainage system of the city of Tubarão/SC has a resilience above 0,9, indicating that the nodes of the drainage system present a high reliability to control urban floods. Resilience in the most vulnerable sub-basins can be increased by changing the redundancy of the drainage system with the implementation of new components with similar functions. The application of the method was easy to understand, providing a more systemic analysis of the drainage system, not only inferring the number of flooded nodes.

Palavras-Chave – Rede de drenagem, índice de resiliência.

1) Doutorando no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: thiago.tgat@gmail.com

2) Doutorando no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: pariconha@gmail.com

3) Doutorando no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: benicio_monte@hotmail.com

4) Professor Titular IPH/UFRGS; e-mail: joel@iph.ufrgs.com

INTRODUÇÃO

A sociedade vem sendo confrontada com os eventos naturais desde das sociedades antigas (Tucci, 2007), e apenas há meio século o termo resiliência e sua aplicação tem se tornado alvo de interesse para ser um contribuidor chave na diminuição dos impactos de eventos como os de inundação (Park *et al.*, 2013). A drenagem é um conjunto de elementos que, dentre seus objetivos, visa escoar as águas pluviais, evitando seu acúmulo; todavia, trata-se de um sistema passível de falha quando sua capacidade é comprometida, e as causas não têm relação somente com a precipitação e/ou índice de área impermeabilizada. Exemplos de falhas abruptas no sistema de drenagem podem ser expressa por: (i) envelhecimento ou deterioração das estruturas, (ii) sedimentação de esgotos, (iii) excesso de resíduo sólido, e (iv) falha de bombas e sensores. Todas as ocorrências aqui listadas podem contribuir decisivamente com o aumento de danos a infraestrutura pública e privada, além de perda de vidas (Mugume, 2015).

A abordagem de resiliência se tornou algo mais proeminente com Holling (1973) baseando-se na ideia de que os sistemas conseguem absorver as mudanças e perturbações. O mesmo autor ainda afirma que a flutuação do regime é normal, pois os sistemas são dinâmicos. A resiliência dentro da engenharia seguiu uma linha próxima ao paradigma do equilíbrio ecológico, em que apenas o regime de estado estável idealizado é aceitável, e qualquer alteração é desviante (Wang e Blackmore 2009; Liao, 2012). Porém, hoje o conceito evoluiu para o foco de absorver os impactos e manter-se ou voltar a ser totalmente operacional, seja para retornar ao estado anterior e/ou evoluir pelo conhecimento adquirido, tendo flexibilidade (Klein *et al.* 2003; Tompkins *et al.* 2005; Butler *et al.* 2014).

O desenvolvimento de novas abordagens que foquem não somente na avaliação de falhas estruturais é essencial para que sistemas de drenagem possam ser seguros durante condições normais e condições excepcionais; no entanto, a operacionalização da resiliência na drenagem urbana ainda não apresenta padrão, método ou diretriz adequada (Butler *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2013). O foco deve ser em atributos que visam a redundância, flexibilidade, reforma e/ou reabilitação possibilitando o quanto o sistema suporta e se recupera de uma falha existente (Hassler e Kohler, 2014).

Inundações e alagamentos pluviais em cidades brasileiras já são recorrentes, e o poder destrutivo dos desastres tem aumentado, muitas vezes por descaso no uso de técnicas de drenagem em voga, crescimento urbano sem seguir o planejamento definido e falta de gerenciamento e manutenção das estruturas existentes, por exemplo. A necessidade de estudos de resiliência torna-se necessária. Alguns estudos pioneiros já se prestaram a fazer análises em alguns locais (Miguez; Veról, 2016; Borba; Warner; Porto, 2015), mas ainda são casos isolados e sua aplicação de forma massiva não está em prática.

Esse estudo teve por objetivo utilizar o índice de resiliência Res_o , desenvolvido por Mugume (2015), o qual quantifica a confiabilidade residual do sistema em função da magnitude e duração da falha, sendo calculado para cada nó com falha (alagamento). A área de estudo foi a cidade de Tubarão em Santa Catarina, pois é um local recorrente com problemas de inundações e alagamentos históricos (Machado, 2005; Vanelli *et al.*, 2017), e por isso alto potencial para causar stress ao sistema de drenagem urbana local.

ÁREA DE ESTUDO

O município de Tubarão está localizado na bacia hidrográfica do Rio Tubarão, em Santa Catarina (Figura 1) e é conhecido por ter um crítico histórico de inundações e alagamentos. Um fator importante deve-se ao fato que o município localiza-se na zona do baixo Rio Tubarão, que recebe as vazões dos afluentes de regiões mais elevadas e/ou com alta declividade. Além disso, o centro urbano de Tubarão se desenvolveu ao longo das planícies de inundação do rio. Através do Plano Municipal de Macrodrenagem, o município possui trabalhos publicados que buscaram avaliar a mancha de inundação (Vanelli *et al.*, 2017) e o perigo das áreas inundadas (Monte *et al.*, 2017).

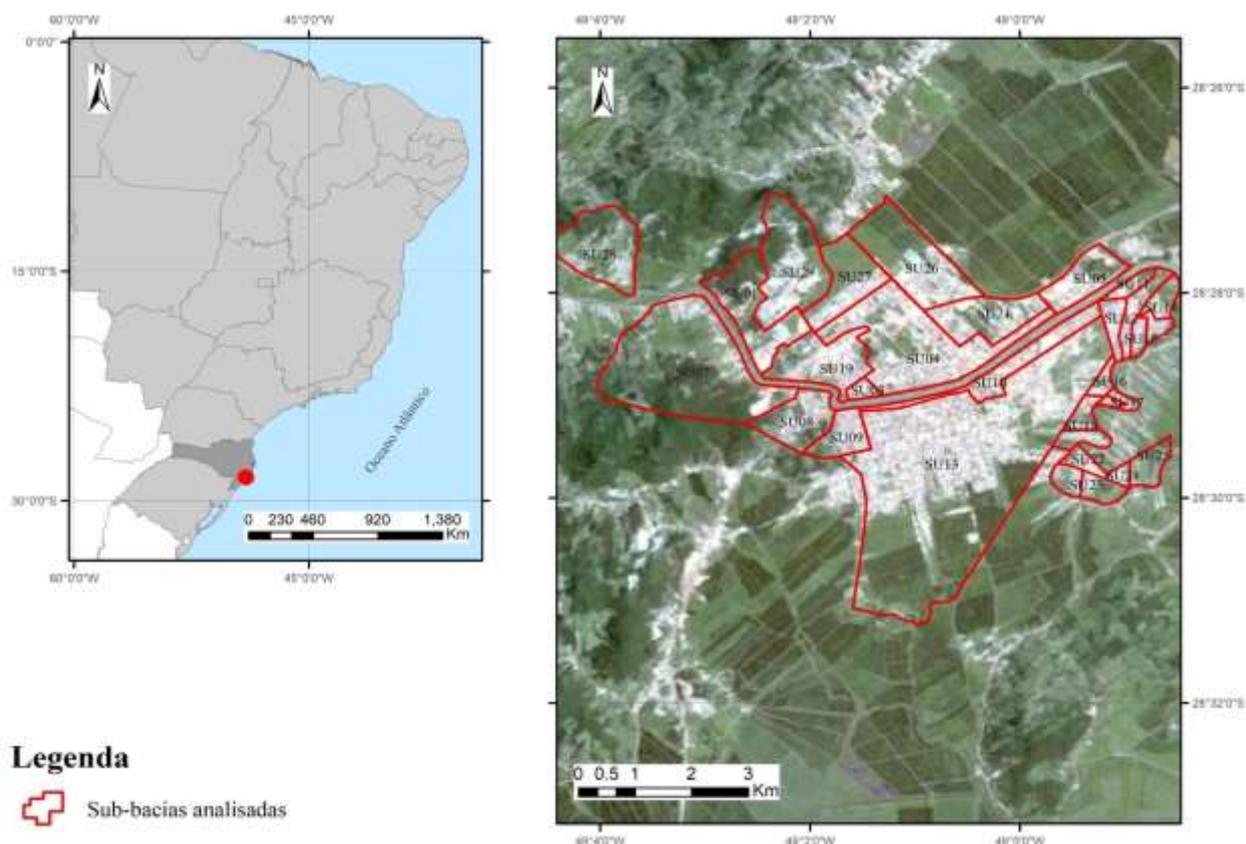


Figura 1 – Município de Tubarão/SC e representação das sub-bacias urbanas

METODOLOGIA

A metodologia adotada nesse trabalho seguiu as seguintes etapas: (a) Obtenção e determinação da chuva de projeto; (b) simulação hidrodinâmica do sistema de drenagem no *Storm Water Management Model* (SWMMv5.1); (c) Quantificação da resiliência com output do SWMM.

Obtenção e Determinação da Chuva de Projeto

A equação IDF foi obtida através do Plano Municipal de Macrodrenagem de Tubarão (SC), gerada a partir da série de dados de máximas anuais da ANA para o posto pluviométrico de Rio do Pouso (02849000), com série histórica de 1940 a 2016 (Tubarão, 2018). A equação IDF foi obtida no formato abaixo (1):

$$i = \frac{1123,22 TR^{0,194}}{(t + 14,685)^{0,792}} \quad (1)$$

onde: i é a intensidade média máxima da chuva, em mm/h; TR é o período de retorno, em anos e t sendo a duração da chuva, em minutos.

A escolha do tempo de retorno (TR) adotado se baseou em duas premissas: (i) apenas a rede de microdrenagem foi considerada na simulação; (ii) o geral, para projetos de microdrenagem, recomenda-se um TR de 2 a 5 anos. Dessa maneira, para explicar o efeito do aumento da intensidade de eventos extremos de precipitação, foi adotado uma precipitação com TR de 10 anos. Adotou-se uma duração da chuva de 60 minutos, média do t_c encontrado na área de estudo. O resultado obtido foi uma intensidade de 25,67 mm/h. A chuva de projeto foi produzida pelo método dos Blocos Alternados.

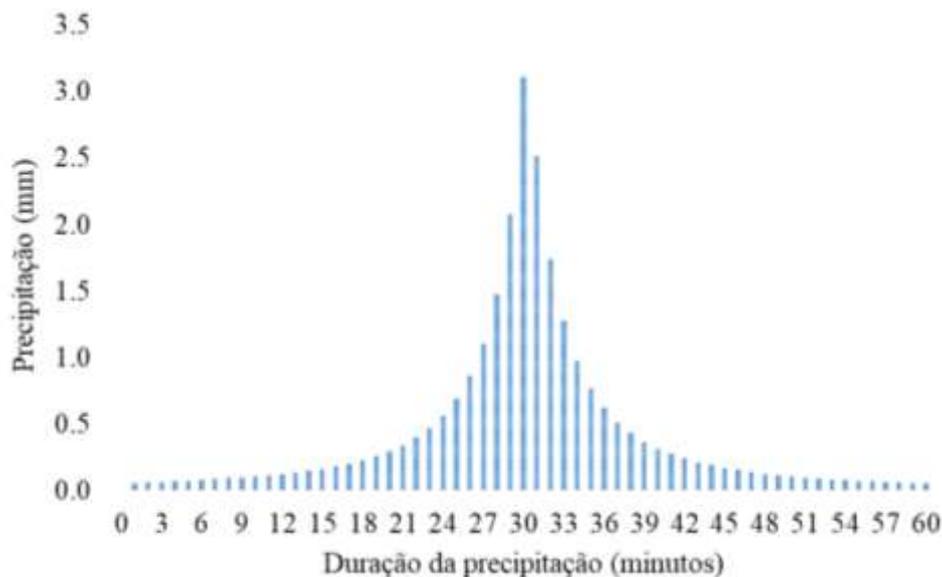


Figura 2 - Chuva de projeto com TR de 10 anos e duração de 60 minutos

Simulação hidráulica do sistema de drenagem

A simulação realizada na rede de microdrenagem do município de Tubarão (SC) foi construída usando o *Storm Water Management Model* (SWMMv5.1). Foi utilizado o princípio de onda dinâmica (equações de St. Venant) para propagação do escoamento, por melhor adequar-se na modelagem do escoamento através das redes de tubulações, canais abertos e pode modelar vários regimes de fluxo, tais como remanso, sobretaxa, fluxo reverso (Rossman, 2010). O modelo hidráulico do sistema é composto por 26 sub-bacias e um total de 339 nós (Figura 3). O sistema modelado drena uma área de captação total de 34 km². As sub-bacias apresentam uma variação de 0,10 km² a 10,52 km².

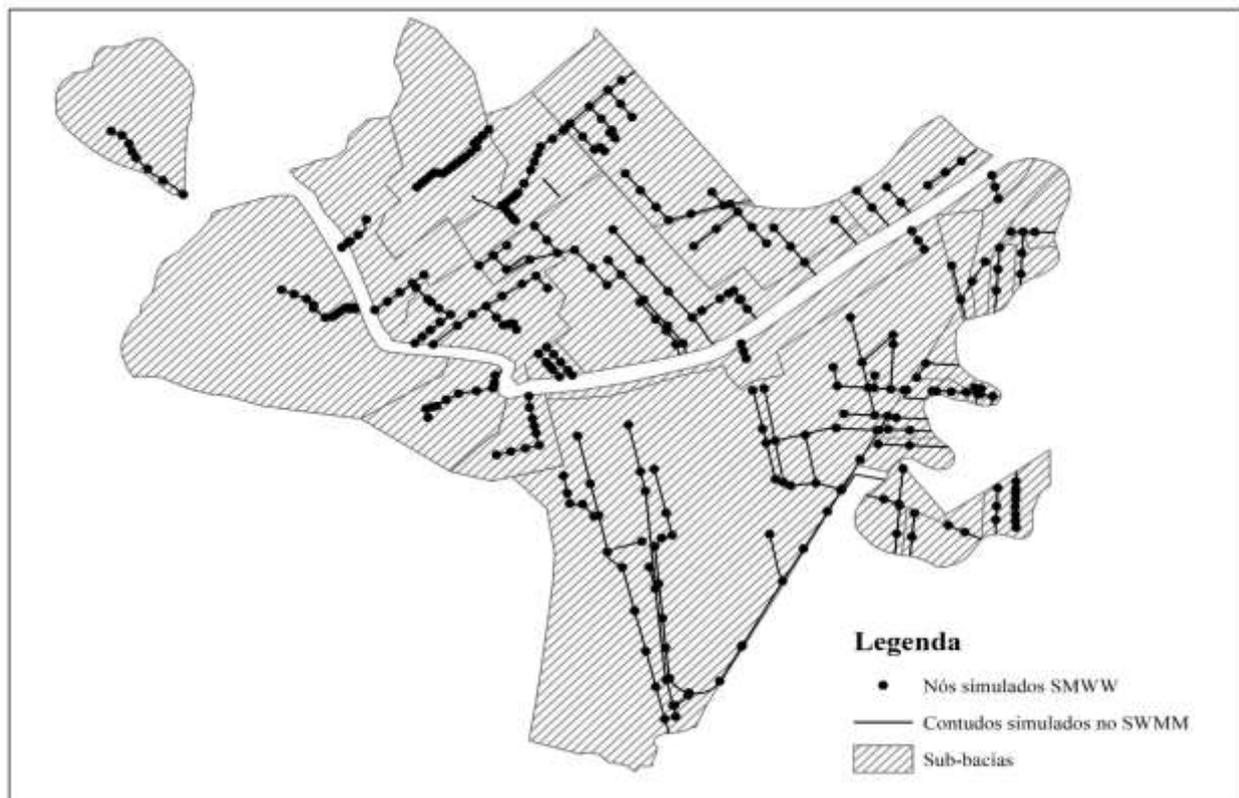


Figura 3 - Configuração do sistema de drenagem de Tubarão modelado no SWMM

Os condutos utilizados na simulação compreendem valas, galerias, travessias e tubulações com diâmetros que variam de 400 mm a 800 mm. O levantamento do sistema de drenagem foi determinado a partir do cadastro fornecido pela Prefeitura de Tubarão (SC).

Quantificação da resiliência

A avaliação da resiliência foi realizada de forma quantitativa, permitindo atestar o comportamento de desempenho do sistema de drenagem durante condições de alagamentos. O índice de resiliência operacional, Res_o , foi utilizado para vincular a perda de funcionalidade resultante à funcionalidade residual do sistema, sendo estimado através da magnitude da falha (volume total de inundação no nó) e duração (duração média da inundação no nó) (Mugume *et al.*, 2014). A perda

resultante da funcionalidade do sistema é estimada usando o conceito de severidade (Hwang *et al.*, 2015; Lansey, 2012).

$$Res_o = 1 - \frac{V_{TF}}{V_{TI}} X \frac{t_f}{t_n} \quad (2)$$

onde: V_{TF} é o volume total de inundação no nó, V_{TI} a entrada total no nó, t_f a duração média da inundação nodal e t_n o tempo total decorrido de simulação.

O Res_o varia de 0 a 1; com 0 indicando o nível mais baixo de resiliência e 1 a resiliência de nível mais alto para os nós que sofreram alagamentos. Sendo a resiliência de 0,7 um nível mínimo aceitável de proteção contra inundação (Mugume *et al.*, 2015).

Mugume *et al.* (2015) destaca que o aumento da resiliência pode ser obtido alterando a redundância e a flexibilidade do sistema de drenagem. A redundância é definida como o grau de sobreposição de funções em um sistema que permite que o sistema mude para garantir continuação de sua funcionalidade, enquanto que novos elementos assumem novas funções (Hassler e Kohler, 2014). Já a flexibilidade é definida como a capacidade do sistema se ajustar ou reconfigurar de modo a manter níveis de desempenho aceitáveis quando sujeita a condições de carga múltiplas (variadas) (Gersonius *et al.*, 2013; Vugrin *et al.*, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observações gerais dos resultados da simulação

Para a chuva de projeto adotada, observou-se que 64,4% dos nós sofreram alagamentos, não apresentando um resultado satisfatório considerando a visão higienista do sistema de drenagem. Em análise às sub-bacias, observou-se que, para 27% todos os nós sofreram alagamentos. O maior volume alagado ocorreu para um nó da Sub-09, apresentado um volume alagado de 2.866 m³, durante um tempo de alagamento de 1,53 horas (tempo 50% superior ao tempo de duração de chuva adotado).

Os resultados aqui apresentados suportam a afirmação de que a rede não possui desempenho eficiente frente a eventos de precipitação com TR igual a 10 anos, sendo este TR atualmente indicado no Plano de Macrodrenagem do município (Tubarão, 2018).

Aplicação Res_o ao output do SWMM

Para facilitar a comparação da confiabilidade dos nós para um evento com tempo de retorno de 10 e duração de 60 minutos, foi assumido um nível aceitável da resiliência de 0,7, considerando como sendo o nível mínimo aceitável de proteção contra alagamento, ou seja, que possibilita a continuidade do fluxo normal nas vias públicas (por exemplo, tráfego de veículos e /ou pessoas).

O índice de resiliência calculado para os nós da rede de drenagem do município de Tubarão/SC apresentou uma variação de 0,69 a 0,99 (Figura 4). O Res_o calculado mostrou que 77% das sub-

bacias apresentam uma resiliência funcional acima de 0,9, ou seja, o produto de volume e tempo de alagamento não é alto o suficiente para quantificar um baixo índice. O menor índice apresentado foi de 0,69, para a Sub-23, provavelmente justificado por estar localizado em uma região de baixa declividade, o que permite maior tempo de escoamento, além de possuir rede de diâmetros pequenos, quando comparado aos demais.

Para as sub-bacias que tiveram todos os nós alagados, o Res_o mostrou que 86% delas apresentaram uma resiliência superior a 0,9, indicando que a ocorrência de alagamentos em si não é suficiente para atestar falta de resiliência. Para o nó da Sub-09, que produziu o maior volume alagado, o índice calculado foi de 0,88, o que indica que, apesar de maior volume, o tempo de alagamento tenha sido baixo, equilibrando o índice a um nível aceitável.

Dos 219 nós que sofreram alagamento, 94,5% apresentaram uma resiliência acima de 0,7. Isso mostra que avaliar uma rede de drenagem apenas através de sua capacidade de alagar ou não alagar, é uma perspectiva que não reflete o sistema como um todo. A metodologia aqui empregada mostra que, mesmo que um nó apresente ocorrência de alagamento, esse nó ainda pode apresentar uma resiliência aceitável.

Para os nós com baixo desempenho, como para a Sub-23, a resiliência pode ser aumentada alterando a redundância do sistema de drenagem, com a implementação de novos componentes com funções semelhantes, por exemplo, tanques de armazenamento ou duplicação da rede de drenagem. Além disso, pode ser alterada a flexibilidade do sistema, com a inclusão de elementos distribuídos (descentralizados) ou modulares, por exemplo, tanques de armazenamento distribuído, sistemas de captação de águas pluviais, telhado verdes e uso de espaços urbanos multifuncionais, como parques de estacionamento, parques infantis (Mugume *et al.*, 2015).

A Figura 4 apresenta um panorama do índice de resiliência calculado para todas as sub-bacias urbanas. Observa-se que, de um modo geral, a resiliência da rede é alta para o evento de estudo. O desenvolvimento deste trabalho permitiu compreender que elementos como área e declividade da sub-bacia, bem como profundidade máxima e declividade dos condutos são essenciais para o comportamento do índice, uma vez que: (i) a área da sub-bacia é a área que contribui para produção de escoamento; (ii) declividade da bacia promove velocidade ao escoamento, bem como menor tempo e maior vazão de pico; (iii) declividade do conduto permite que o escoamento seja direcionado ao *output* da bacia, de modo que menor declividade promoverá maior tempo ao escoamento; e (iv) profundidade máxima do conduto, por definir a capacidade do mesmo para o fluxo de escoamento produzido na bacia.

As sub-bacias que produziram menor índice de resiliência são as que possuem menores profundidades máxima nos condutos da rede; as sub-bacias que possuem rede de maior profundidade máxima produziram os maiores índices de resiliência, independente da área, declividade da bacia e

declividade dos condutos. Para sub-bacias em que a área e declividade, e cuja profundidade máxima e declividade da rede são semelhantes, o índice de resiliência é sensível à fração de área impermeável.

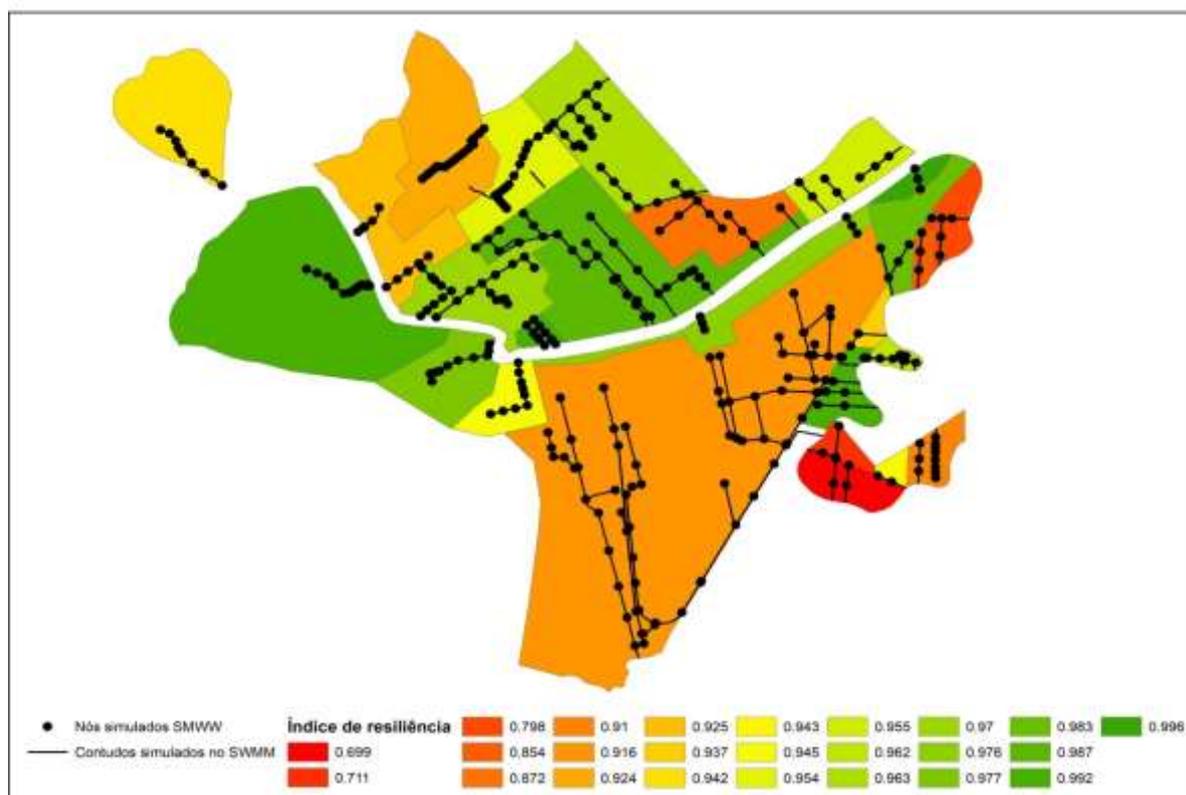


Figura 4 - Resiliência média dos nós alagados por sub-bacia

CONCLUSÃO

A aplicação do índice de resiliência operacional para o município de Tubarão/SC permitiu identificar e avaliar a funcionalidade do sistema de drenagem, quando da confiabilidade de ocorrer alagamentos nos nós do sistema de drenagem.

A metodologia se mostrou intuitiva e aplicável, permitindo avaliar o desenvolvimento do sistema de drenagem além de uma aferição quantitativa, ou seja, de quanto volume e tempo um nó ficou alagado. A aplicação do Res_o se mostrou compatível com a nova visão da gestão da drenagem urbana, no qual o sistema não deve ser entendido apenas como a capacidade de escoar as águas pluviais o mais rápido possível; além disso, a análise permitiu identificar que a profundidade máxima dos condutos foi o parâmetro de maior influência na quantificação do índice.

O índice de resiliência aplicado não permite diferenciar se o sistema de drenagem está sendo mais redundante ou flexível, necessitando de novos estudos que abordem a quantificação destas habilidades da resiliência.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem a equipe técnica do IPH/UFRGS por disponibilizar a modelagem da rede de macrodrenagem, e a Prefeitura de Tubarão pela disponibilidade de

informações que corroboraram a modelagem da rede. Agradecem a Capes e CNPq pelas bolsas de doutorado e produtividade em pesquisa. Além disso, este trabalho recebeu apoio financeiro parcial da Capes-Brasil.

REFERÊNCIAS

- BORBA, M.L.; WARNER, J.F.; PORTO, F.A. (2015). “*Urban stormwater flood management in the Cordeiro watershed, São Paulo, Brazil: does the interaction between socio-political and technical aspects create an opportunity to attain community resilience?*”. *Journal of Flood Risk Management* 9 (3), pp 1-9. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfr3.12172>. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12172>.
- BUTLER, D.; FARMANI, R.; FU, G.; WARD, S.; DIAO, K.; ASTARAIE-IMANI, M. (2014). “*A new 535 approach to urban water management: Safe and SuRe*” in: 16th Water Distribution 536 System Analysis Conference, WDSA2014 - Urban Water Hydroinformatics and 537 Strategic Planning. *Procedia Engineering*, pp. 347–354. doi: 538 10.1016/j.proeng.2014.11.198.
- HASSLER, U.; KOHLER, N. (2014). “*Resilience in the built environment*”. *Building Research & Information* 42, 119–129. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09613218.2014.873593>. doi:10.1080/09613218.2014.873593.
- GERSONIUS, B.; ASHLEY, R.; PATHIRANA, A; ZEVENBERGEN, C. (2013). “*Climate change uncertainty: building flexibility into water and flood risk infrastructure*”. *Clim. Chang.* 116, 411–423. doi:10.1007/s10584-012-0494-5
- HWANG, H., LANSEY, K., QUINTANAR, D.R., (2015). “*Resilience-based failure mode effects and criticality analysis for regional water supply system.*” *J. Hydroinformatics* 17, 193–2010. doi:10.2166/hydro.2014.111
- HOLLING, C.S. (1973). “*Resilience and Stability of Ecological Systems*”. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, 1–23. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>. doi: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
- KLEIN, R.J.T.; NICHOLLS, R.J.; THOMALLA F. (2003) “*Resilience to natural hazards: How useful is this concept?*” *Environmental Hazards* 5, 35–45. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1016/j.hazards.2004.02.001>. doi: 10.1016/j.hazards.2004.02.001.
- TOMPKINS, E.; NICHOLSON-COLE, S.L.H.; BOYD, E.; HODGE, G.B.; CLARKE, J.; GRAY, G.; TROTZ, N.; VARLACK, L. (2005). “*Surviving Climate Change in Small Islands- A Guide Book*”, 1st edn. Tyndall Centre for Climate Change Research Norwich-UK, 128 p. Disponível em: <https://www.preventionweb.net/publications/view/734>.
- LANSEY, K., 2012. Sustainable, robust, resilient, water distribution systems, in: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference. Engineers Australia, pp. 1–18.
- LIAO K-H. (2012). “*A theory on urban resilience to floods - A basis for alternative planning practices*”. *Ecology and Society* 17 (4). Disponível em: <https://www.ecologyandsociety.org/vol17/iss4/art48/#intro1>. doi: 10.5751/ES-05231-170448.
- MACHADO, C. do C. (2005). “*Tubarão 1974 - Fatos e relatos da grande enchente*”. UNISUL Palhoça-SC, 203 p.
- MIGUEZ, M.G.; VERÓL, A. L. (2016). “*A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design*”. *Environment and Planning B: Urban*

Analytics and City Science, pp 1-22. Disponível em:
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0265813516655799>.
<https://doi.org/10.1177/0265813516655799>.

MONTE, B. E. O; MONTEIRO, L. R; TAVARES, T. G. A; CAMPOS, J. A; VANELLI, F. M; SILVEIRA, A. L. L; GOLDENFUM, J. A. “Índice de perigo aplicado a inundações com influência de maré”. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 8 p.

MUGUME, S.N.; DIAO, K.; ASTARAIÉ-IMANI, M.; FU, G., FARMANI, R.; BUTLER, D. (2014). “Building resilience in urban water systems for sustainable cities of the future”, in: *IWA World Water Congress and Exhibition*. IWA, Lisbon, p. 72.

MUGUME, S.N.; GOMEZ, D.E.; GUANGTAO, F.; FARMANI, R.; BUTLER, D. (2015). “A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems”. *Water Research* 81, pp. 15-26. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135415300142>.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.030>.

PARK, J.; SEAGER, T.P.; RAO, P.S.C.; CONVERTINO, M.; LINKOV, I. (2013). “Integrating risk and 605 resilience approaches to catastrophe management in engineering systems”. *Risk Analysis* 33, 606, 356–367. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22967095>.
doi:10.1111/j.1539-6924.2012.01885.

ROSSMAN, L.A. (2010). “Storm water management model - User’s manual version 5.0”. Cincinnati, OH: National Risk Management Laboratory, United States Environmental Protection Agency.

TUBARÃO (2018). “Plano municipal de macrodrenagem de Tubarão/SC”. Prefeitura Municipal de Tubarão/SC, p.23, v.III.

TUCCI, C. E. M. (2005). “Inundações urbanas”. ABRH/RHAMA Porto Alegre-RS, 393 p.

WANG, C.; BLACKMORE, J.M.; (2009). “Resilience Concepts for Water Resource Systems”. *J Water Resour Plan Manag* 135:528–536. Disponível em:
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282009%29135%3A6%28528%29>.
doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:6(528)

VANELLI, F.M.; MONTEIRO, L.R.; ZANANDREA, F.; LIMA, G. K. R.; SCHETTINI, E. B. C.; GOLDENFUM, J. A. (2017). “Condição de inicialização em modelagem hidrodinâmica para mapeamento de inundação baseada em vazões constantes”, in XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 8 p. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/173869>.

VUGRIN, E.D.; WARREN, D.E.; EHLEN, M.A. (2011). “A resilience assessment 629 framework for infrastructure and economic systems: Quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane”. *Process Saf. Prog.* 30. doi:10.1002/prs