



## **XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

### **IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO MUNICÍPIO DE SÃO LEOPOLDO – PARTE 2: SISTEMA URBANO DE ÁGUAS PLUVIAIS**

*Thiago de Gois Araújo Tavares<sup>1</sup>; Daniele Feitoza Silva<sup>2</sup>; Joel Avruch Goldenfum<sup>3</sup>;  
Fernando Dornelles<sup>4</sup>*

**Palavras-Chave** – LID, macrodrenagem, alagamento

#### **INTRODUÇÃO**

Apesar do conhecimento adquirido ao longo dos anos, continua sendo desafiador projetar e planejar um sistema de manejo de águas pluviais eficaz e funcional. Esse desafio é amplificado à medida que impactos decorrente das mudanças climáticas e urbanização tendem a ocasionar um aumento na frequência e magnitude das inundações urbanas (Huong e Pathirana 2013).

Essas mudanças podem aumentar déficits já existentes nos sistemas de manejo de águas pluviais, pois foram projetados com base em um tempo de retorno estimado a partir de dados de período anterior às mudanças climáticas. Pesquisadores têm investigado os efeitos das mudanças climáticas em precipitações extremas e inundações urbanas, simulação de fluxo e avaliação da eficiência do sistema urbano de águas pluviais (Hu *et al.* 2017; Wu *et al.* 2019; Roozbahani *et al.* 2020; Zhang *et al.* 2021). Roozbahani, Parichehreh e Alireza (2020) identificaram que 23,25% do comprimento total do canal não iram suportar as condições futuras de precipitação.

O uso de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto (LID), é uma das estratégias de gestão de águas pluviais para preservar ou replicar a hidrologia natural, usando uma série de práticas de controle em microescala (Newcomer *et al.* 2014). Desta forma, práticas de LID podem ser utilizadas tanto para mitigar efeitos negativos decorrente da impermeabilização do solo em área urbanizadas quanto possíveis mudanças climáticas. As práticas de LID mostram boa eficácia para

---

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

4) Doutorando no PPG em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA)/IPH/UFRGS; e-mail: fds\_eng@yahoo.com.br

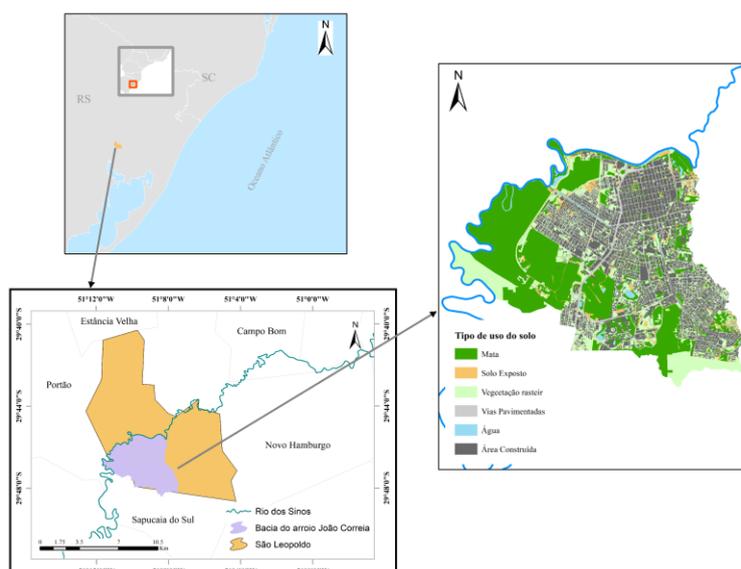
mitigar o risco de inundação em bacias hidrográficas urbanas, especialmente para reduzir áreas com alto risco de inundação (Hu *et al.* 2017), sendo eficazes no gerenciamento do volume e pico do escoamento (Wang *et al.* 2019). A eficácia das práticas de LID na diminuição do escoamento tem sido demonstrada em várias oportunidades (Newcomer *et al.* 2014; Yang *et al.* 2018; Wang *et al.* 2019). Por exemplo, Ahiablam e Shakya (2016) observaram que dispositivos LID provocaram uma redução de 3% e 47% no escoamento bacia urbana.

Com base nesses fatos, o presente trabalho tem por finalidade avaliar os efeitos potenciais de mudanças climáticas no sistema de macrodrenagem e examinar benefícios que a implementação de práticas de LID pode proporcionar ao sistema de macrodrenagem. Este trabalho faz parte de uma série de 2 artigos que investigam os possíveis impactos das mudanças climáticas sob o projeto e funcionamento do sistema de drenagem urbana do município de São Leopoldo – RS. A Parte 1 analisa os impactos sobre chuva de projeto, mais precisamente em relações intensidade-duração-frequência (IDF), enquanto a Parte 2 investiga os impactos sobre o funcionamento de um sistema urbano de águas pluviais.

## ÁREA DE ESTUDO

A arroio João Correia está localizado no município de São Leopoldo, no Rio Grande do Sul (Figura 1). A bacia do arroio João Correia está na margem esquerda do rio dos Sinos. Cerca de 57% da bacia João Correia apresenta área permeável. Apesar de apresentar mais da metade da área da bacia em áreas permeáveis, o adensamento urbano está localizado em regiões críticas por serem as áreas mais planas, às margens do rio dos Sinos e do arroio João Corrêa. A rede de macrodrenagem da bacia do João Corrêa apresenta uma extensão total de aproximadamente 31,51 km, sendo 53,6 % do comprimento total referente a condutos com diâmetro entre 0,8 m a 1,2 m. Além disso, a rede de macro drenagem é formada por canais abertos e galerias fechadas, reservatórios e casa de bombas.

Figura 1. Localização da área de estudo.



## METODOLOGIA

A metodologia adotada nesse trabalho seguiu as seguintes etapas: (a) Obtenção e determinação da chuva de projeto; (b) montagem dos cenários; e (c) simulação dos cenários através do Storm Water Management Model (SWMMv5.1);

### Obtenção e determinação da chuva de projeto

A equação IDF no período histórico para a bacia do arroio João Corrêa foi obtida do Plano Municipal de Macrodrenagem de São Leopoldo (RS) (São Leopoldo, 2021). A IDF foi gerada a partir da série histórica completa de precipitações diárias máximas anuais, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no período de 1985 a 2015, sendo obtida a equação para a precipitação no período atual (equação 1).

Utilizou-se o período de 2070-2099 para projeções futuras, adotando-se o cenário de emissão de gases de efeito estufa RCP 8.5 (cenário de altas emissões adotadas pelo IPCC). Os dados foram obtidos junto à plataforma Projeta, correspondentes a precipitações simulados pelo modelo regional climático ETA (INPE/CPTEC). A metodologia *Equidistance Quantile Matching Method* (Schardong *et al.*, 2018; Srivastav *et al.*, 2014) foi adotada para geração de série de precipitações máximas anuais no período futuro e, conseqüentemente, equações IDF. Maiores detalhes sobre a geração da curva IDF futura são contemplados na Parte 1 deste trabalho (Silva *et al.*, 2021, em revisão). A equação 2, apresentada abaixo, representa a curva IDF estimada para o período de 2070 a 2099.

A equação IDF é dada por:

$$I(H) = \frac{863,3315Tr^{0,1401}}{(t + 7,6983)^{0,7315}} \quad (1)$$

$$I(F) = \frac{1018,697Tr^{0,1619}}{(t + 9,0772)^{0,7601}} \quad (2)$$

onde  $I$  é a intensidade média máxima da chuva, em mm/h;  $Tr$  é o período de retorno, em anos e  $t$  é a duração da chuva, em minutos. A intensidade da precipitação atual e futura foi calculada para uma duração de 24 horas e um TR de 10 anos, sendo observada uma intensidade máxima futura de 198,17 mm/hora. Isso corresponde a um aumento de aproximadamente 6% em relação à intensidade máxima atual. As precipitações foram discretizadas em 5 minutos, sendo rearranjadas pelo Método dos Blocos Alternados.

### Montagem dos cenários

A investigação e exploração das conseqüências decorrente da alteração das precipitações futuras em regiões urbanizada foi realizada por meio da aplicação de um conjunto de cenários fictícios. A exploração de cenário permite que analisemos diversas circunstâncias futuras, sendo possível simular o desempenho em diversas situações (Makropoulos *et al.* 2018). Sendo assim, a investigação dos cenários propostos ocorreu por meio da mudança da quantidade de sub-bacias onde são implementadas práticas de LID (QSUL) e com a alteração da área efetiva controlada por

dispositivos LID na sub-bacia (AAE). Vale destacar, que os dispositivos LID apenas foram implementados em sub-bacias que apresentaram área impermeável (AI) maior que 50%. Desta maneira, foram propostos 11 cenários, conforme descrito a seguir e resumido na Tabela 1.

No cenário base (C0), a rede de macrodrenagem da bacia João Corrêa foi simulada para uma precipitação utilizando a I(H) com duração de 24 horas e TR 10 anos. Além disso, no C0 não foi implementado nenhum tipo de prática de LID.

Já para os cenários C1 a C9, buscou-se mitigar os impactos da precipitação futura com a implementação de prática de LID em sub-bacias que apresentaram uma área impermeável superior a 50%. Por fim, o cenário C10 buscou avaliar o efeito da precipitação futura na rede de macrodrenagem atual, porém sem a utilização de práticas de LID. Em cada cenário proposto ocorreu uma mudança da porcentagem de sub-bacias que implementaram LID e o tamanho do dispositivo de LID.

Para melhor entendermos, no cenário C1, um total de 10% das sub-bacias com área impermeável maior que 50% receberam LID em sua área. Além disso, neste cenário, o tamanho das áreas controladas pelos dispositivos de LID deve corresponder a 60% da área impermeável. A mesma lógica foi utilizada para os cenários de C1 ao C9.

Tabela 1 Exploração dos cenários.

Projeção Climática	QSUL	AAE	Cenários
Atual	Não são implementados técnicas de LID nesse cenário		C0
Futura	10% das Sub-bacias com AI>50%	60% da AI da sub-bacia	C1
	20% das Sub-bacias com AI>50%		C2
	50% das Sub-bacias com AI>50%		C3
	10% das Sub-bacias com AI>50%	70% da AI da sub-bacia	C4
	30% das Sub-bacias com AI>50%		C5
	60% das Sub-bacias com AI>50%		C6
	10% das Sub-bacias com AI>50%	95% da AI da sub-bacia	C7
	40% das Sub-bacias com AI>50%		C8
	70% das Sub-bacias com AI>50%		C9
	Não são implementados técnicas de LID nesse cenário		

QSUL = quantidade de sub-bacias onde são implementados técnicas de LID;

AAE = área efetiva controlada por dispositivos LID na sub-bacia;

AI = área impermeável

### Parâmetros operacionais dos dispositivos de LID

As técnicas de LID escolhidas para serem implementado nas sub-bacias foram biorretenção e telhado/reservatório verde. Em cada sub-bacia escolhida foram implementados dois dispositivos de LID. Os parâmetros de projeto dos dispositivos de LID foram extraídos de outros estudos Liu e Chui (2019) e Wang *et al.* (2019). Os parâmetros dos dispositivos de LID são mostrados na tabela 2.

Tabela 2. Características dos dispositivos de LID implementados nos cenários.

LID	Parâmetro	Biorretenção	Telhado verde
Superfície	Borda livre máxima (mm)	300	14
	Fração de volume da vegetação (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	0,1	0,0
	Rugosidade da superfície (Manning)	0,1	0,1
	Declive da superfície (%)	1	15
Solo	Espessura do solo (mm)	600	40
	Porosidade (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	0,500	0,4
	Capacidade de campo (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	0,2	0,2
	Ponto de murcha (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> )	0,100	0,1
	Condutividade (mm / h)	250	15
	Declive de condutividade	10	10
	Carga positiva de sucção (mm)	87,5	87,5
Armazename nto	Espessura de armazenamento (mm)	300	-
	Razão de vazios (vazios / sólidos)	0,75	-
	Taxa de infiltração (mm / hora)	750	-
	Fator de entupimento	0	-
Drenagem subterrânea	Coefficiente de fluxo	0,5	Espessura (mm) 40
	Expoente de fluxo	0,5	Fração de vazios 0,8
	Altura (mm)	100,0	Rugosidade (Manning) 0,1

### Simulação do sistema de drenagem de águas pluviais

A simulação foi realizada por meio do modelo *Storm Water Management Model* (SWMMv5.1), um modelo hidrológico e hidrodinâmico de tempo discreto com base física podendo ser utilizado em eventos únicos ou simulação contínua. Para realizar a simulação no SWMM foram fornecidas informações que incluem: propriedades físicas das sub-bacias, características do sistema de águas pluviais (diâmetros dos condutos, largura/profundidade dos canais) e dados hidrológicos da região. Apesar do SWMM possibilitar o uso das equações de Saint-Venant simplificadas, como a onda cinemática, foi adotado o uso da onda dinâmica, com a solução das equações completas por melhor representar cenários onde ocorre o rápido enchimento do conduto, ocasionando a pressurização do mesmo (Rossman 2017), como é o caso em alagamentos em áreas urbanas. Além disso, a onda dinâmica permite avaliar efeitos como remanso, fluxo pressurizado, fluxo reverso (Niazi *et al.* 2017; Rossman 2017).

Para a montagem do modelo, foram realizadas visitas na área de estudo para coletar dados necessários sobre a localização, coordenadas e características da rede de macrodrenagem, que complementaram os dados hidráulicos da rede de macrodrenagem fornecidos pela Prefeitura Municipal de São Leopoldo. Assim, o sistema foi montado com 126 sub-bacias, onde 112 sub-bacias apresentaram área impermeável superior a 50%. As sub-bacias apresentam áreas que variam de 0,008 km<sup>2</sup> a 0,55 km<sup>2</sup>. Em relação à rede macrodrenagem, essa drena uma área de captação total de 16 km<sup>2</sup>.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 3 é apresentada a redução do tempo de alagamento em cada cenário. A maior redução ocorre no cenário no C9, com o tempo de alagamento diminuição 35,1% quando comparado com o cenário C0. Além disso, os resultados mostraram que diante de mudanças climáticas relacionadas ao aumento das precipitações, os dispositivos LIDs precisam ser implementados no mínimo em 30% das sub-bacias em um percentual de 70% da área impermeável para que o tempo de alagamento total seja inferior ao da condição presente (C0).

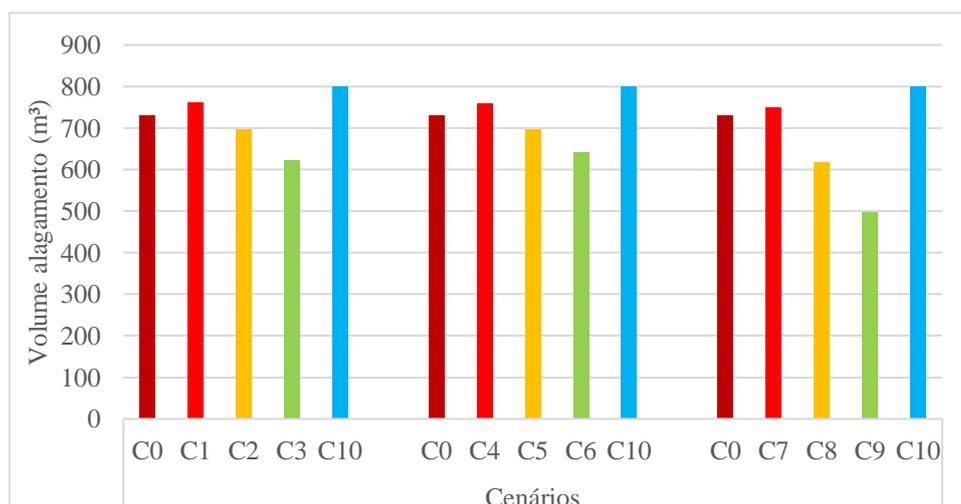
Tabela 3 Tempo total de alagamento por cenário.

	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Tempo total Alagamento (h)	527	550	526	489	543	514	484	475	419	342	555
Aumento/Redução (%) em relação a C0	-	4,5%	-0,1%	-7,3%	3,1%	-2,4%	-8,0%	-9,8%	-20,4%	-35,1%	5,3%
Aumento/Redução (%) em relação a C10	-5,0%	-0,7%	-5,1%	-11,9%	-2,0%	-7,3%	-12,6%	-14,3%	-24,4%	-38,4%	-

Em relação ao volume de alagamento, os cenários C0 e C10 apresentam o maior volume de alagamento. Isso era um resultado esperado, uma vez que não foi implementado nenhum dispositivo LID nesses cenários. Além disso, no cenário C10 ocorreu um aumento de 6% na precipitação máxima futura, o que justifica o aumento em relação ao tempo total e ao volume total de alagamento.

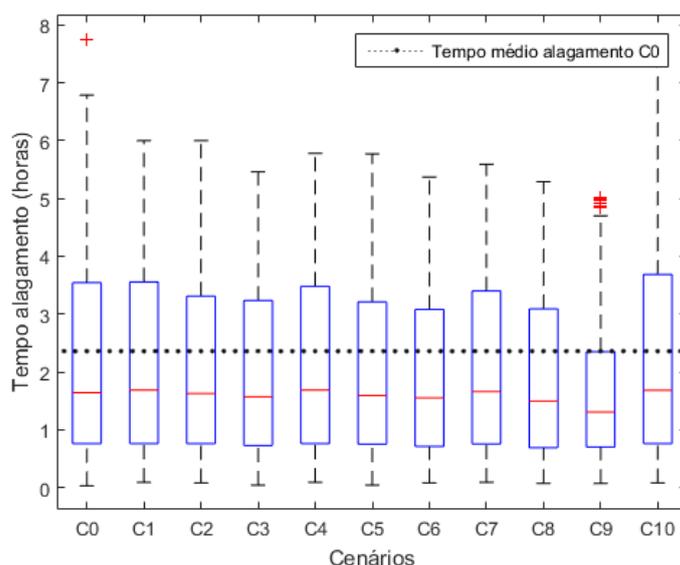
De forma análoga, a maioria dos cenários mostrou uma diminuição do volume alagado nos nós (Figura 2). Foi observado no cenário C8 e C9 uma redução do volume total alagado de cerca de 15,4% e 31,7%, respectivamente, quando comparado com o cenário C0, que apresentou um volume de alagamento de  $730,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ . Os resultados obtidos corroboram com a premissa que a implementação de técnicas de LID possibilita a redução de horas alagadas. Hu *et al.*, 2017 também observaram esse mesmo efeito, uma vez que a implementação de dispositivos LID provocou uma redução de área alagadas, um percentual de 2% a 17%.

Figura 2. Volume total alagado nos cérios



Conforme apresentado na Figura 3, o Cenário 9 (C9) apresentou o melhor resultado, sendo observado um percentual de 75% dos nós alagados abaixo de média do tempo de alagamento do cenário C0. Em geral, nos cenários que implementaram técnicas de LID foi observada uma redução do tempo médio de alagamento. Este resultado corrobora observações de outros estudos (Baek *et al.* 2017; Yang *et al.* 2018) indicando que a utilização de técnicas de LID pode ser benéfica para o sistema de macrodrenagem, uma vez que ocorre a redução do tempo de escoamento de pico e assim possibilitando a mitigação do risco de alagamento.

Figura 3. Variação do tempo de alagamento nos cenários em comparação com o cenário base C0.

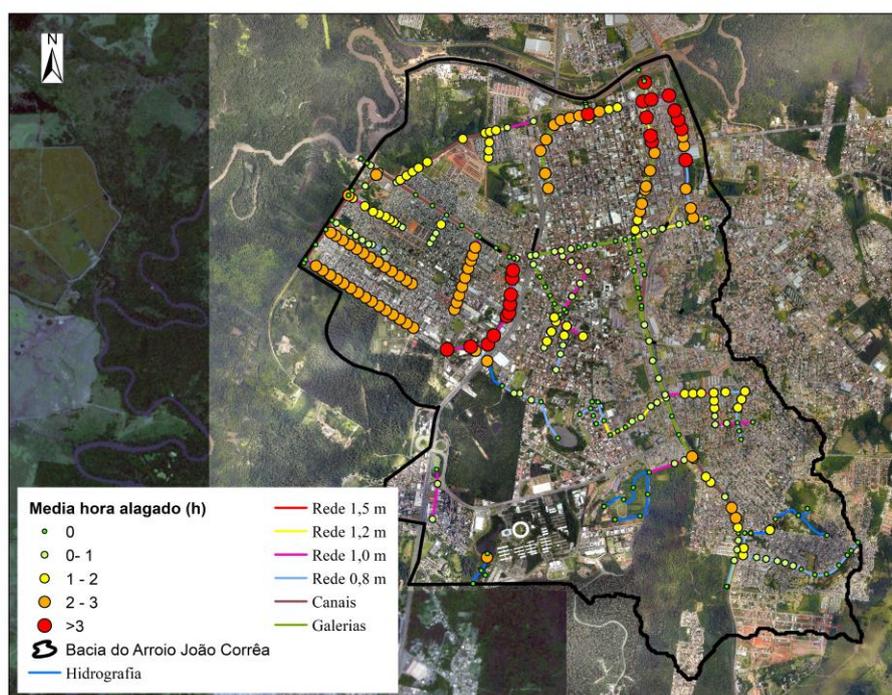


Observando a Figura 4, é possível identificar “pontos críticos” de forma espacial, sendo visualizado o tempo médio de alagamento dos cenários. Isso permite inferir que independentemente

das mudanças que possam ocorrer na precipitação futura ou do uso e ocupação do solo, alguns nós irão apresentar alagamentos. Este tipo de análise torna-se importante, pois possibilita a identificação áreas ou regiões que devem ser priorizadas para receberem melhorias em seu sistema de macrodrenagem e manejo de águas pluviais.

Adaptar a infraestrutura de drenagem urbana às mudanças climáticas é um desafio que a comunidade de análise de risco deve abordar (Shortridge e Camp 2019), uma vez que as mudanças podem exigir um alto custo orçamentário, visto que, para adequar toda uma rede de macrodrenagem se torna financeiramente dispendioso. Desta forma, a modelagem das condições de prováveis mudanças climáticas e a consideração das incertezas, criam um panorama da situação futura da região, o que pode fornecer decisões gerenciais adequadas a fim de se adaptar às suas consequências. (Roozbahani *et al.* 2020).

Figura 4. Média da hora de alagamento dos cenários.



## CONCLUSÃO

Com as simulações realizadas, foi possível concluir que no cenário 10 o tempo de alagamento total da rede de macrodrenagem terá um aumento de 5%, quando comparado com o cenário atual (C0). Além disso, o volume máximo de alagamento foi de  $800,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ , correspondendo um aumento de 9,4% em relação ao C0.

Quando comparado com o C0, o cenário 9 mostrou as maiores reduções do tempo total de alagamento e volume total de alagamento, cerca de 35,1% e 38,4% respectivamente. Mostrando que a implementação de dispositivo LID é uma estratégia adequada no controle de escoamento em regiões urbanizadas, visto que possibilitou a redução do tempo e volume de alagamento em relação

ao que ocorre atualmente ou ao que poderá ocorrer no futuro com um aumento das intensidades precipitações devido a mudanças no clima.

Por fim, a análise de cenários permitiu identificar “pontos críticos” no sistema de macrodrenagem, que mesmo ocorrendo a implementação de LID em determinadas sub-bacias esses pontos sofreram alagamento. Esta análise é interessante, pois permite que as autoridades responsáveis possam priorizar determinadas áreas quando da tomada de decisão.

## AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem à Prefeitura de São Leopoldo pela disponibilização de informações que permitiram a modelagem da rede. Agradecem a CAPES e CNPq pelas bolsas de doutorado.

## REFERÊNCIAS

AHIABLAME, L.; SHAKYA, R. (2016). "Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale". *J Environ Manage* 171, pp. 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036>

BAEK, S.; LIGARAY, M.; PARK, J.; SHIN, H.; KWON, Y.; BRASCHER, J. T.; HWA, K. (2017). "Environmental Modelling & Software Developing a hydrological simulation tool to design bioretention in a watershed". *Environ Model Softw*, pp 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.006>

HU, M.; SAYAMA, T.; ZHANG, X.; TANAKA, K.; TAKARA, K.; YANG, H. (2017). "Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China". *J Environ Manage* 193, pp. 430-438. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.020>

HUONG, H. T. L.; PATHIRANA, A. (2013). "Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam". *Hydrol Earth Syst Sci* 17, pp. 379-394. <https://doi.org/10.5194/hess-17-379-2013>

LIU, X.; CHUI, T. F. M. (2019). "Evaluation of green roof performance in mitigating the impact of extreme storms". *Water (Switzerland)* 11:. <https://doi.org/10.3390/w11040815>

MAKROPOULOS, C.; NIKOLOPOULOS, D.; PALMEN, L.; KOOLS, S.; SEGRAVE, A.; VRIES, D.; KOOP, S.; VAN ALPHEN, H. J.; VONK, E.; VAN THIENEN, P.; ROZOS, E. MEDEMA, G. (2018). "A resilience assessment method for urban water systems". *Urban Water J* 15, pp. 316-328. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1457166>

NEWCOMER, M. E.; GURDAK, J. J.; SKLAR, L. S.; NANUS, L. (2014). "Urban recharge beneath low impact development and effects of climate variability and change Michelle". *Water Resour Res* 50, pp. 1716-1734. <https://doi.org/10.1002/2013WR014282>. Received



NAZI, M.; NIETCH, C.; MAGHREBI, M.; ASCE, A. M.; JACKSON, N.; BENNETT, B. R.; TRYBY, M.; MASSOUDIEH, A.; ASCE, M. (2017). "*Storm Water Management Model : Performance Review and Gap Analysis*". J. Sustainable Water Built Environ.

ROOZBAHANI, A.; PARICHEHREH, B.; ALIREZA, M. B. (2020). "*Analysis of performance criteria and sustainability index in urban stormwater systems under the impacts of climate change*". J Clean Prod 271, pp. 122727. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122727>

ROSSMAN, L. A. (2017). "*Storm Water Management Model Reference Manual Volume II- Hydraulics*". 185p.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. (2016). "*Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality*". Off Res Dev Water Supply Water Resour Div III: 159p.

SÃO LEOPOLDO (2021). "*Plano municipal de macrodrenagem de São Leopoldo/RS*". Prefeitura Municipal de São Leopoldo/RS, p.17, Prouto8.

SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P.; SANDING, D. (2018). "*Computerized tool for the Development of Intensity-Duration-Frequency Curves under a Changing Climate: Technical Manual v.3*". Water Resources Research Report no. 104, Facility for Intelligent Decision Support, Department of Civil and Environmental Engineering, London, Ontario, Canada, 80 p. 2018.

SILVA, D. F.; MONTE, B. E. O.; GOLDENFUM, J. A.; DORNELLES, F. " *Impacto das mudanças climáticas no município de São Leopoldo/RS: Parte 1 - Relação IDF* " in Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Nov. 2021.

SHORTRIDGE, J.; CAMP, J. S. (2019). "*Addressing Climate Change as an Emerging Risk to Infrastructure Systems*". 39:.. <https://doi.org/10.1111/risa.13234>.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. (2014). "*Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves under Climate Change*". Water Resources Management. 28(9), pp. 2539-2562.

WANG, M.; ZHANG, D.; CHENG, Y.; KEAT, S. (2019). "*Assessing performance of porous pavements and bioretention cells for stormwater management in response to probable climatic changes*". J Environ Manage 243, pp.157–167. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.012>

WU, J.; WU, X.; ZHANG, J. (2019). "*Development trend and frontier of stormwater management (1980-2019): A bibliometric overview based on CiteSpace*". Water (Switzerland) 11:.. <https://doi.org/10.3390/w11091908>

YANG, Y.; FONG, T.; CHUI, M. (2018). "*Rapid assessment of hydrologic performance of low impact development practices under design storms*". Am water Resour Assoc, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12637>

ZHANG, Z.; PASCHALIS, A.; MIJIC, A. (2021). "*Planning London’s green spaces in an integrated water management approach to enhance future resilience in urban stormwater control*". J Hydrol 597, pp. 126126. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126126>