



Cenários de implementação de LID para mitigação de inundações no bairro São Sebastião, Lages/SC, utilizando PCSWMM

Leonardo Francisco Zatti¹, Felizardo Moraes Neto², Daniele Carolina Pereira³, Felipe Perotoni Perdoná⁴, Gabriel Gonçalves⁵, Sabrina Antunes Vieira⁶, Leonardo Josué Biffi⁷

¹ Possui graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2024). Tem experiência na área de Engenharia Sanitária, com ênfase em Planejamento Integrado dos Recursos Hídricos. Mestrado em andamento na instituição de ensino Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) no curso de Ciências Ambientais com bolsa no Programa de Monitoria de Pós-Graduação - PROMOP. E-mail: zatti_leo@hotmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1052-710X> ² Mestrando em Ciências Ambientais no UDESC. Possui graduação em Segurança No Trabalho pelo Centro Universitário Leonardo da Vinci(2023), graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade do Estado de Santa Catarina(2024), curso tecnico-profissionalizante em Técnico em Segurança do Trabalho pela SENAI/SC-Lages(2021). E-mail: felizardo.neto@edu.udesc.br ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7685-9964> ³ Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária na UDESC (2024 - presente) E-mail: dc.pereira1203@edu.udesc.br ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1374-0915> ⁴ Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária pela UDESC e-mail: felipe.perdona@edu.udesc.br ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7087-265X> ⁵ Graduado no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UDESC, E-mail: gongalves.gabriel.077@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8987-3763> ⁶ Engenheira Ambiental formada na Universidade de Passo Fundo. Doutora e Mestre em Qualidade Ambiental pela Universidade Feevale. Atualmente é Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) E-mail: sabrina.vieira@udesc.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5564-4944> ⁷ Graduação em Agronomia pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2003), especialização em Georreferenciamento de Imóveis Rurais pela UTP (2010), mestrado em Produção Vegetal pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2006) e doutorado em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná (2021). É professor adjunto da Universidade do Estado de Santa Catarina do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária (CAV/UDESC) e professor permanente do Curso de Mestrado de Ciências Ambientais (CAV/UDESC). E-mail: leonardo.biffi@udesc.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3334-4507>

Artigo recebido em 18/02/2025 e aceito em 12/12/2025

RESUMO

As inundações urbanas têm sido intensificadas pela expansão desordenada, impermeabilização do solo e eventos extremos cada vez mais frequentes. Soluções baseadas na natureza, como os telhados verdes, constituem alternativas eficazes para reduzir o escoamento superficial e mitigar impactos hidrológicos em áreas urbanizadas. Este estudo avaliou o potencial de telhados verdes como medida de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) para diminuir o escoamento superficial na sub-bacia 26 do rio Ponte Grande, bairro São Sebastião, Lages/SC. Utilizou-se o software PCSWMM para simular a resposta hidrológica a dois eventos extremos ocorridos em 2017, caracterizados por intensidades elevadas e tempos de retorno estimados em até 80 anos. Foram modelados dois cenários de conversão de telhados tradicionais em telhados verdes: 25% e 80% da área total de coberturas. Os resultados indicaram reduções médias de 32,5% e 41,1% no escoamento superficial, respectivamente. Os achados reforçam o potencial de telhados verdes como estratégia complementar para mitigação de inundações urbanas em bacias impermeabilizadas.

Palavras-chave: Drenagem sustentável; Modelagem hidrológica; Infraestrutura verde; Evento extremo.

LID Scenarios for Flood Mitigation in São Sebastião Neighborhood, Lages-SC, Using PCSWMM

ABSTRACT

Urban floods have become more frequent due to unplanned expansion, soil sealing, and the intensification of extreme rainfall events. Nature-based solutions such as green roofs are promising alternatives for reducing surface runoff and mitigating hydrological impacts in urban areas. This study evaluated the hydrological performance of green roofs as a Low Impact Development (LID) measure in Sub-basin 26 of the Ponte Grande River, located in the São Sebastião neighborhood, Lages/SC. The PCSWMM model was used to simulate the hydrological response to two extreme rainfall events recorded in 2017, whose intensities correspond to return periods of up to 80 years. Two scenarios were assessed, converting 25% and 80% of roof areas into green roofs. Reductions of 32.5% and 41.1% in surface runoff were observed, respectively. Findings highlight the potential of green roofs as a complementary strategy for mitigating urban flooding in highly impervious catchments.

Keywords: Sustainable Drainage; Hydrological Modeling; Green infrastructure; Extreme event.

Introdução

O excessivo acúmulo de água proveniente de chuvas intensas e seu arraste livre pela superfície do solo é chamado de escoamento superficial, sendo considerado um fenômeno de extrema importância para projetos de engenharia, por ser precursor de eventos extremos, como erosão fluvial, transporte de sedimentos e poluição de corpos hídricos (Kuruppu e Rahman, 2019). Esses fenômenos, embora naturais, têm seus impactos amplificados pela ação antrópica e pelo manejo inadequado do solo urbano, resultando em prejuízos econômicos, sociais e ambientais de grande escala. (Das Neves e Tucci, 2012).

Além de intensificar as inundações, o aumento do escoamento superficial contribui para a poluição difusa das águas pluviais. Em áreas urbanas carentes de infraestrutura de saneamento, o arraste de resíduos sólidos e efluentes sem tratamento agrava a contaminação de rios e córregos, comprometendo a qualidade ambiental e a saúde das populações expostas, tornando a drenagem urbana sustentável um desafio central para o planejamento de cidades (Teixeira et al., 2020).

Diante do pressuposto, alternativas ambientalmente positivas têm sido adotadas para minimizar os impactos causados por estes eventos sobre a infraestrutura e as comunidades locais, por meio do planejamento urbano e da implementação de medidas de mitigação, tanto estruturais quanto não estruturais (Ullah e Zhang, 2020).

Entre as alternativas não convencionais destacam-se as práticas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LIDs - *Low Impact Development*), que buscam reproduzir os processos naturais de infiltração e retenção de águas pluviais, com a finalidade de reduzir o volume gerado e a velocidade do escoamento superficial (Martin et al., 2007; Fletcher et al., 2015). Dentre essas práticas, os telhados verdes se mostram como uma tecnologia eficiente e versátil, sendo um sistema de camadas complexo que opera de forma colaborativa para conferir apelo estético e cumprir uma variedade de funções (Tolderlund, 2010).

Esses sistemas são compostos por camadas de substrato e vegetação que atuam em conjunto para reter e infiltrar parte da precipitação incidente, sendo classificados em extensivos, tendo uma baixa espessura da camada de substrato e plantas de pequeno porte, com manutenção reduzida, ou intensivos, com maior profundidade, diversidade de espécies de plantas e maior capacidade de retenção de água, porém necessitando de mais manutenção e necessidade estrutural mais robusta

(Zinco, 2007; Yang, Yu e Gong, 2008).

Estudos anteriores apontaram reduções de 40% a 85% nas vazões de pico em eventos extremos após a implementação dessa técnica (Palla et al., 2008; Suresh et al., 2023; Essamlali et al., 2024). Entretanto, Johnston et al. (2004) destacam a eficiência em períodos de chuvas prolongadas, podendo dobrar o escoamento superficial, proveniente da diminuição do potencial de infiltração devido ao aumento da umidade e à saturação iminente do substrato poroso do telhado.

No Sul do Brasil, a intensificação das chuvas já é documentada, com aumento das médias mensais em mais de 90% dos meses analisados nas normais climatológicas 1991–2020 (Lapa et al., 2024). Em Santa Catarina, Lages figura entre os municípios com maior incidência de inundações (Herrmann, Kobiyama e Marcelino, 2014), com eventos significativos registrados em 2005, 2008, 2011, 2014 e 2017 (Magro, 2021). O bairro São Sebastião, localizado na sub-bacia 26 do rio Ponte Grande, apresenta alta densidade de edificações e recorrência de alagamentos, reforçando a necessidade de soluções mitigadoras.

Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos desempenham papel essencial na avaliação dessas medidas, permitindo testar cenários, estimar respostas hidrológicas e subsidiar o planejamento urbano (Surwase et al., 2019). O PCSWMM, amplamente empregado em estudos de drenagem, possibilita avaliar o comportamento do escoamento superficial e simular alternativas de infraestrutura verde (Rossman, 2010).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a eficácia de telhados verdes como medida LID na redução do escoamento superficial na sub-bacia 26 do rio Ponte Grande, em Lages/SC, por meio de simulações hidrológicas no PCSWMM considerando eventos extremos ocorridos em 2017 e dois cenários de conversão de telhados (25% e 80%).

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido no município de Lages, localizado na região serrana do estado de Santa Catarina, encontrando-se a uma latitude sul de 27°49'00" e uma longitude oeste de 50°19'35". Este município ostenta a distinção de ser o mais extenso de todo o estado de Santa Catarina, abrangendo uma área total de 2.637,66 km² e a população estimada em 164.981 habitantes (IBGE, 2022).

Dentre as principais bacias hidrográficas urbanas do município de Lages, está a bacia do rio

Ponte Grande, a qual constitui uma das áreas mais críticas do município, devido ao elevado grau de impermeabilização, presença de ocupações irregulares e expansão recente para áreas ambientalmente frágeis (Lemos, 2020). Dentro dessa bacia, destaca-se a sub-bacia 26, objeto de estudo desta pesquisa, situada no bairro São Sebastião, região marcada pela concentração de edificações, inexistência de áreas de infiltração e

dependência do escoamento proveniente das porções a montante da bacia.

A área total modelada no PCSWMM abrange 18,88 km², correspondendo à porção inicial da bacia do rio Ponte Grande, posteriormente subdividida em nove sub-bacias para aprimorar a representação espacial da hidrologia local (Figura 1).

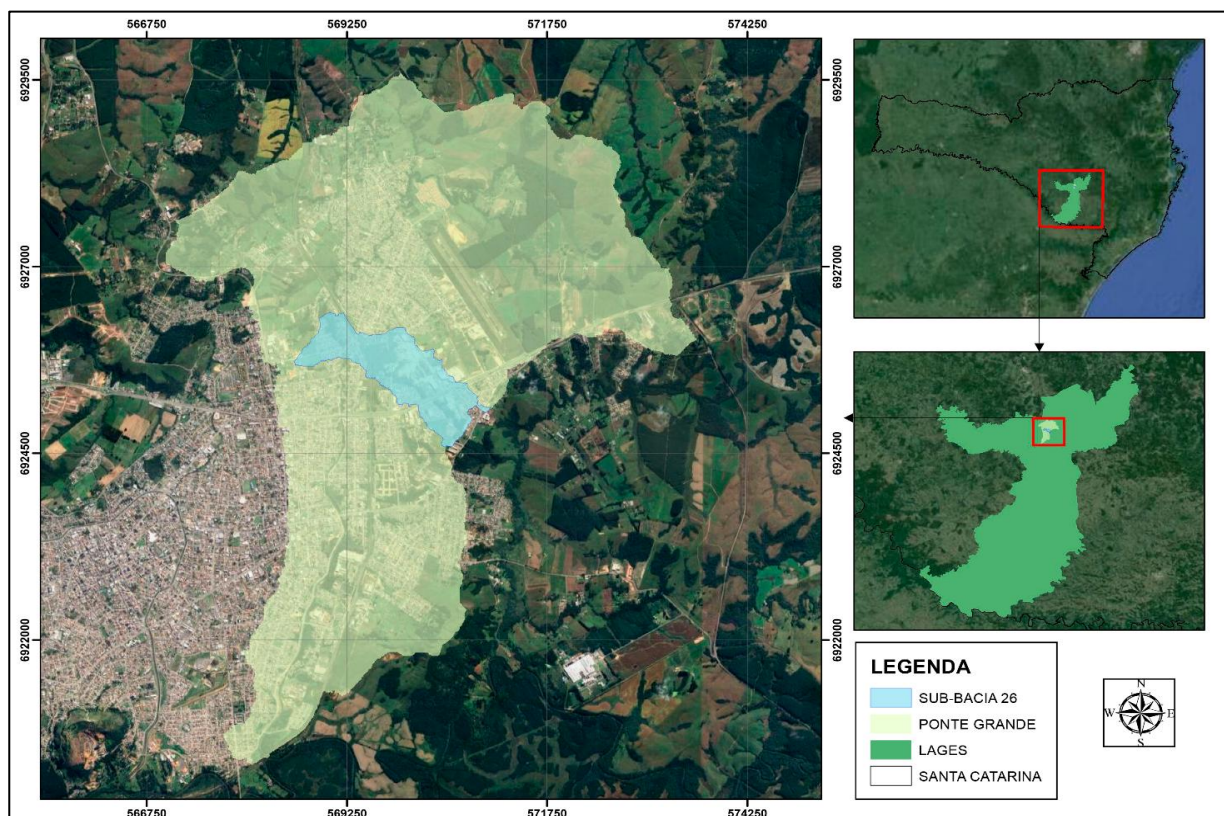


Figura 1. Localização da sub-bacia 26 inserida na bacia do rio Ponte Grande, município de Lages/SC.

Caracterização dos eventos de precipitação

Os dados pluviométricos foram obtidos do pluviômetro automático CEMADEN (código 420930001A), situado no bairro Coral (27°48'25.2"S; 50°18'18"W), com resolução temporal de 10 minutos e precisão de 0,2 mm, para o período de 01/05/2017 a 30/06/2017, assegurando a representação adequada da variabilidade intra-horária das precipitações intensas.

Entre 27 de maio e 07 de junho de 2017 ocorreu o evento extremo de maior relevância hidrológica, cujo tempo de retorno (TR) foi estimado em 83 anos. Dentro desse período destacam-se dois subeventos críticos, utilizados neste estudo como séries de entrada para o PCSWMM: (i) a chuva de 27–28 de maio, predominantemente convectiva, com 106,85 mm; e (ii) a chuva de 04–05 de junho, de caráter

estratiforme, com acumulado de 177,56 mm.

Conforme Neto (2019) e Jutel dos Santos (2024), o evento de 04/06/2017 (duração de 1 dia), registrou 152,22 mm, com intensidade de 913,32 mm/h e tempo de retorno (TR) de 69,5 anos. Já o evento de 04 a 05/06/2017 (2 dias) acumulou 177,56 mm, com intensidade de 1.065,36 mm/h e TR de 19,1 anos. Utilizando a distribuição GEV e a equação IDF do município de Lages, o TR calculado para a precipitação acumulada de dois dias, de 27-28/05/2017, foi de 3,16 anos.

As diferenças entre os mecanismos de geração chuva intensa e curta versus chuva longa e volumosa influenciaram diretamente o comportamento hidrológico simulado, permitindo avaliar a resposta da bacia sob diferentes condições de severidade. Assim, esses eventos foram utilizados integralmente nas simulações hidrológicas.

Cenário Atual

A estruturação do modelo hidrológico para o cenário atual (evento extremo de 2017) seguiu a metodologia de Jutel dos Santos (2024), utilizando o software PCSWMM 5.1015. O processo compreendeu a delimitação das sub-bacias, a inclusão dos parâmetros físicos e a inserção da precipitação.

As sub-bacias foram definidas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido no sistema SIGSC com resolução espacial de 1 metro, e classificadas conforme características topográficas, de uso da terra e de escoamento superficial. Para representar adequadamente a dinâmica hidrológica da área, a sub-bacia 26 foi subdividida em nove sub-bacias menores. Essa subdivisão assegura uma representação mais detalhada do comportamento hidrológico, particularmente em locais com grande variação de declividade e uso do solo, condição típica da bacia

do rio Ponte Grande.

Após a definição das sub-bacias, foram definidos, para cada uma das nove, os parâmetros de área, largura hidráulica, comprimento do escoamento, declividade média, percentual de impermeabilização, valores de Manning e Curve Number, conforme apresentado no Quadro 1. Esses parâmetros foram extraídos do banco de dados utilizado por Jutel dos Santos (2024), mantendo-se consistentes com a configuração hidrológica já validada pelo grupo de pesquisa.

Com a definição do modelo e seus parâmetros físicos e hidrológicos, a última etapa foi a inserção da precipitação, com a série temporal de chuvas extremas sendo importada como arquivo *.txt* para o painel *Graph* do PCSWMM e convertida para dados de intensidade (mm/h) com a ferramenta *Edit* na opção *Convert*. Posteriormente, os dados foram associados a um pluviômetro, utilizando o objeto *Rain Gage*, com intervalo de 10 minutos.

Nome	Área (ha)	Width (m)	Flown Length (m)	Slope (%)	Imperv. (%)	N Imperv.	N Perv.	Curve Number
S26 1	35,85	840,85	426,34	12,53	46,62	0,05	0,29	84,59
S26 2	40,21	940,66	427,42	8,11	55,99	0,02	0,05	88,68
S26 3	35,74	910,19	392,65	7,85	34,58	0,07	0,16	84,42
S26 4	2,17	231,72	93,52	8,51	35,44	0,09	0,19	83,39
S26 5	1,39	240,69	57,91	8,07	48,83	0,03	0,10	87,25
S26 6	3,16	313,96	100,57	5,60	53,02	0,04	0,14	87,31
S26 7	2,66	319,93	83,04	6,20	50,69	0,05	0,30	85,85
S26 8	15,18	638,16	237,83	8,65	50,16	0,05	0,38	84,36
S26 9	15,03	354,50	423,86	7,65	46,18	0,06	0,22	84,52

Quadro 1. Parâmetros físicos e hidrológicos das nove sub-bacias utilizadas como entrada no modelo PCSWMM.

Onde: Width (m): Largura do escoamento superficial (m); Flown Length (m): Comprimento do escoamento superficial (m); Slope (%): Porcentagem de declividade correspondente ao tipo de uso; Imperv.(%): Porcentagem de impermeabilidade correspondente ao tipo de uso; N Imperv.: N de Manning para área impermeável da sub-bacia; N Perv.: N de Manning para área permeável da sub-bacia; Curve Number: Índice correspondente a cada tipo de uso (Adimensional).

Telhado Verde

Para a configuração dos cenários com uso de telhados verdes, considerou-se como superfície potencialmente convertível 16,63 ha de telhados, distribuídos em 1.075 edificações na sub-bacia 26. Entretanto, considerando que há limitações no uso desse tipo de LID, decidiu-se por adotar dois

cenários distintos: um com 25% de conversão, compreendendo uma área de 4,15 ha e outro com 80% de conversão, adotando uma área de 13,3 ha.

A modelagem dos telhados verdes seguiu os parâmetros de sistemas extensivos, recomendados devido ao menor peso estrutural, reduzida manutenção e maior compatibilidade com edificações residenciais da área de estudo. Os valores adotados (espessura do substrato, porosidade, condutividade, capacidade de campo, coeficiente de drenagem, etc.) foram baseados em Martins (2017), conforme Tabela 1, e aplicados conforme o módulo *LID Control* do PCSWMM.

A distribuição espacial dos telhados verdes foi atribuída proporcionalmente à área impermeabilizada das sub-bacias, respeitando a quantidade de edificações e a proporção estipulada para cada cenário, conforme o Quadro 2.

Tabela 1. Parâmetros do sistema de telhado verde extensivo utilizados na configuração do LID Control.

Camada	Parâmetro	Unidade	Valor
Superfície	Armazenamento	mm	0,00
	Volume de Vegetação	%	0,90
	Rugosidade (n)	-	0,10
	Declividade	%	20,00
Solo	Espessura	mm	150,00
	Porosidade	%	0,437
	Capacidade de campo	mm	0,105
	Ponto de murcha	%	0,047
	Condutividade	mm/h	3,00
	Condutividade	%	10,00
	Sucção capilar	mm	2,40
Dreno (manta de drenagem)	Coefficiente de drenagem	-	3,00
	Fração de vazios	mm	0,50
	Rugosidade (n)	-	0,10

Cenário	100%		25%		80%	
Área da Sub-bacia 26 (ha)	Área de Telhados (ha)	Nº de edificações	Área de Telhados (ha)	Nº de edificações	Área de Telhados (ha)	Nº de edificações
151,27	16,63	1075	4,15	264	13,3	985

Quadro 2. Distribuição da área convertida em telhados verdes nos cenários de 25% e 80%.

Análise dos dados

As simulações foram conduzidas de modo a comparar o cenário atual - sem adoção de LID-, o cenário de 25% de telhados verdes - com redução parcial da área impermeabilizada -, e o cenário de 80% de telhados verdes - com conversão intensiva das superfícies de telhados-. Para cada cenário foram analisados o pico de vazão (m^3/s), o volume total escoado (m^3), hidrogramas comparativos e a resposta diferencial das nove sub-bacias.

Para verificar se as diferenças nos picos de vazão entre os cenários simulados eram estatisticamente significativas, foi realizada uma análise inferencial com base nos valores máximos de vazão obtidos para cada sub-bacia. Para cada evento extremo, foram comparados, par a par, os cenários: (i) situação atual versus 25% de conversão em telhados verdes; (ii) situação atual versus 80%; e (iii) 25% versus 80%.

Inicialmente, aplicou-se o teste t pareado, assumindo normalidade aproximada das diferenças. De forma complementar, utilizou-se o teste de Wilcoxon para postos sinalizados, conferindo robustez aos resultados sem depender da suposição de normalidade. Como medida da

magnitude do efeito, foi calculado o tamanho de efeito de Cohen (d) com base na média e no desvio-padrão das diferenças. Todas as análises foram realizadas no software R, adotando-se significância de 5%.

Resultados

Simulação do Cenário Atual

Levando em consideração a elaboração do contexto de controle sem a incorporação de telhados verdes na sub-bacia 26, como encontram-se as áreas atualmente, observou-se um primeiro evento intenso no dia 27 de maio de 2017, com duração de aproximadamente uma hora, tendo o maior pico de escoamento superficial de $7,92 \text{ m}^3/\text{s}$ e volume gerado de 10.710 m^3 na sub-bacia 26-2, como apresentado no Quadro 3 e Figura 2, devido a características geográficas e de uso do solo.

	SUB-BACIAS								
	S26-1	S26-2	S26-3	S26-4	S26-5	S26-6	S26-7	S26-8	S26-9
Máximo escoamento (m ³ /s)	4,06	7,92	3,44	0,35	0,33	0,67	0,5	2,01	1,5
Volume de escoamento (m ³)	7.823	10.710	7.464	509	364	831	673	3.473	3.216

Quadro 3. Pico de vazão e volume de escoamento nas sub-bacias do setor 26 para o evento de 27/05/2017 (cenário atual).

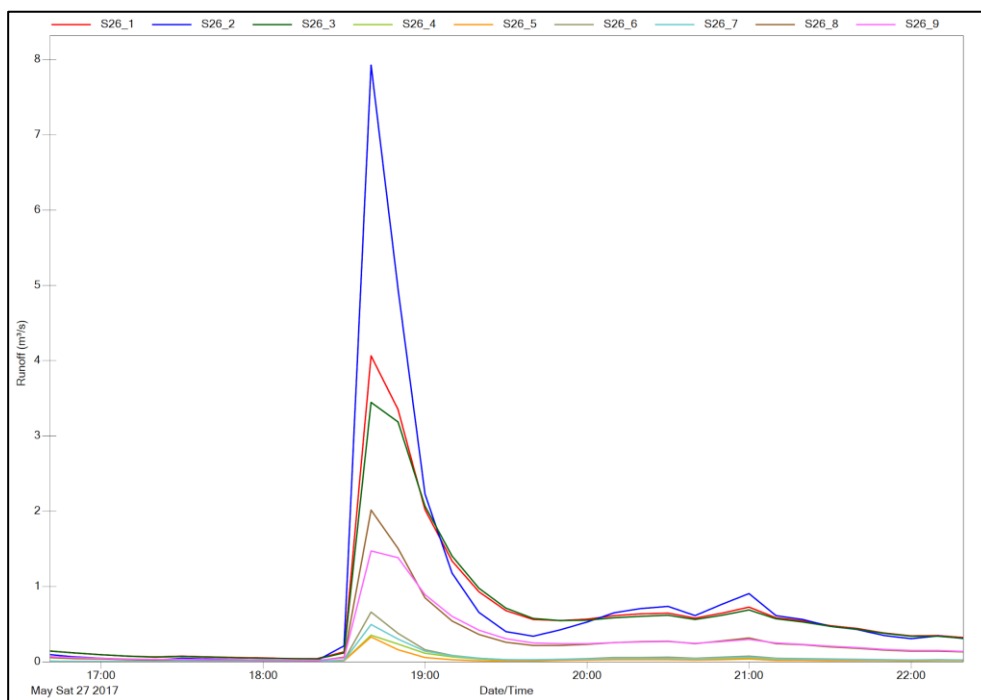


Figura 2. Hidrograma de escoamento superficial nas sub-bacias do setor 26 durante o evento de 27/05/2017 (cenário atual).

Durante o segundo evento, de 04–05/06/2017, observou-se redução no pico de vazão na sub-bacia 26-2 (5,78 m³/s), mas aumento expressivo no volume escoado (60.480 m³ em S26-2), conforme Quadro 4 e Figura 3, refletindo o caráter estratiforme e prolongado da precipitação. Esse comportamento evidencia o efeito da saturação antecedente do solo e o acúmulo de água

ao longo do evento.

Em ambos os eventos, as sub-bacias 26-2, 26-1 e 26-3 concentraram os maiores volumes escoados e picos de vazão, confirmando sua maior contribuição hidrológica para as áreas críticas de inundação, resultado consistente com os achados de Jutel dos Santos (2024).

	SUB-BACIAS								
	S26-1	S26-2	S26-3	S26-4	S26-5	S26-6	S26-7	S26-8	S26-9
Máximo escoamento (m ³ /s)	4,1	5,8	4	0,3	0,23	0,47	0,38	1,83	1,65
Volume de escoamento (m ³)	53650	60480	53400	3234	2086	4743	3986	22740	22480

Quadro 4. Pico de vazão e volume de escoamento nas sub-bacias do setor 26 para o evento de 04–05/06/2017 (cenário atual).

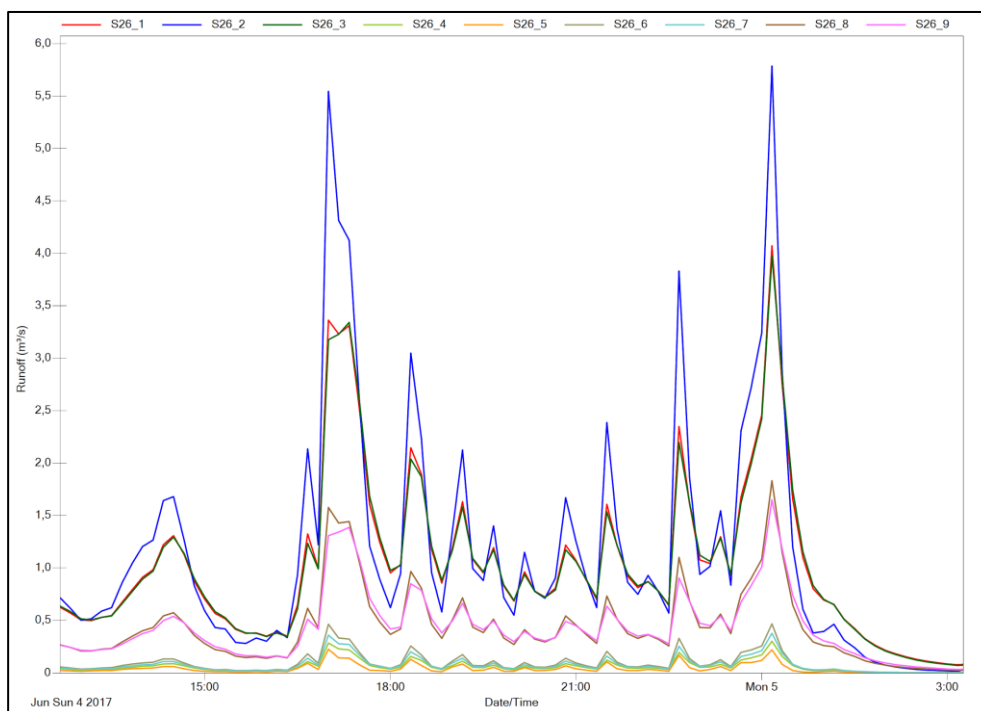


Figura 3. Hidrograma de escoamento superficial nas sub-bacias do setor 26 durante o evento de 04-05/06/2017 (cenário atual).

Simulação do Cenário de 25%

A inclusão de telhados verdes em 25% da área total de coberturas resultou em reduções consideráveis no escoamento superficial.

No evento de 27/05/2017, o pico de vazão da sub-bacia S26-2 diminuiu de 7,92 m³/s para 4,20 m³/s, representando redução de aproximadamente 36%, conforme evidenciado nos resultados apresentados no Quadro 5 e Figura 4.

No segundo evento do dia 4 a 5 de junho de 2017 o total de água escoada na sub-bacia 26-2 durante o experimento foi registrado em 3,90 m³/s, conforme demonstrado nos resultados do Quadro 6

e Figura 5. Embora o volume acumulado do evento seja maior que no evento de maio, a presença do LID diminuiu consideravelmente a taxa de geração de escoamento.

De modo geral, o cenário de 25% apresentou desempenho hidrológico sólido, reduzindo o pico escoado, mesmo representando uma fração modesta da área impermeabilizada. A vazão média da sub-bacia diminuiu em 36%, quando comparado ao escoamento gerado na bacia sem a implementação de telhados verdes no primeiro evento. No segundo evento, houve um decréscimo de 29% na vazão de pico.

	SUB-BACIAS								
	S26-1	S26-2	S26-3	S26-4	S26-5	S26-6	S26-7	S26-8	S26-9
Máximo escoamento (m³/s)	2,50	4,20	2,30	0,35	0,20	0,35	0,30	1,20	0,91

Quadro 5. Pico de vazão por sub-bacia no evento de 27/05/2017 com 25% de telhados verdes.

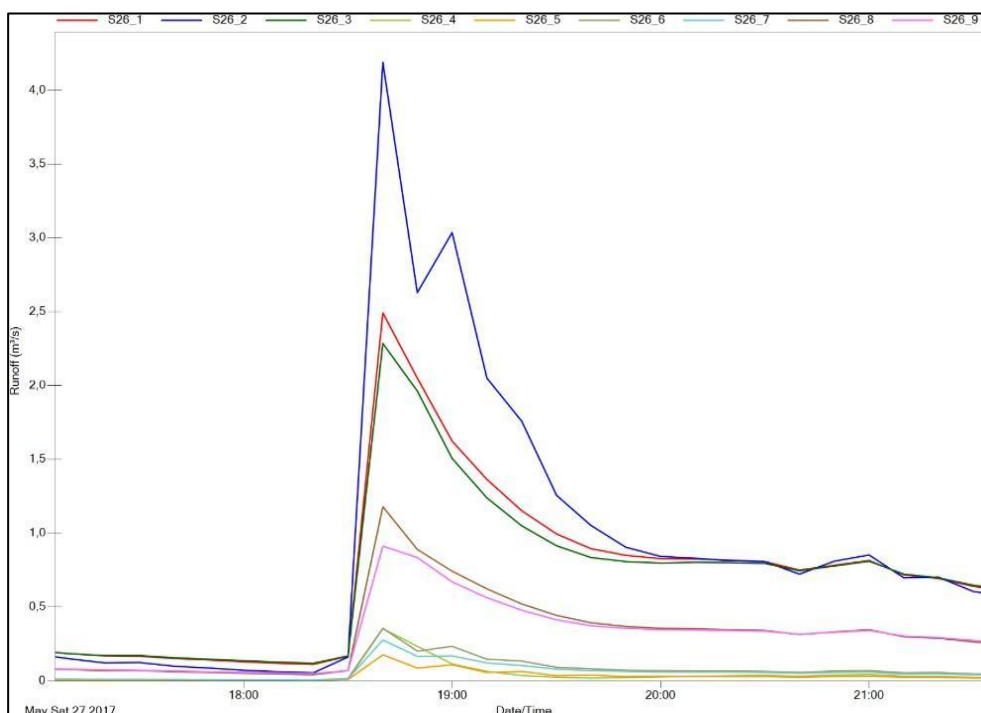


Figura 4. Hidrogramas das sub-bacias do setor 26 para o evento de 27/05/2017 com 25% de telhados verdes.

	SUB-BACIAS								
	S26-1	S26-2	S26-3	S26-4	S26-5	S26-6	S26-7	S26-8	S26-9
Máximo escoamento (m³/s)	2,86	3,90	2,72	0,30	0,14	0,31	0,25	1,30	1,14

Quadro 6. Pico de vazão por sub-bacia no evento de 04–05/06/2017 com 25% de telhados verdes.

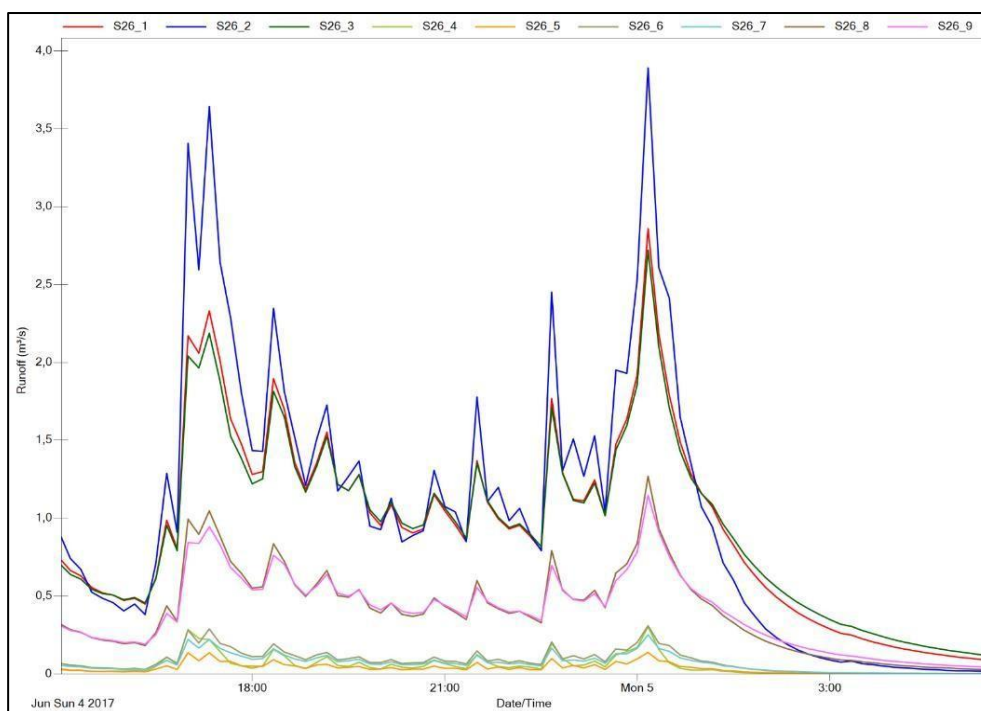


Figura 5. Hidrogramas das sub-bacias do setor 26 para o evento de 04–05/06/2017 com 25% de telhados verdes.

Simulação do Cenário de 80%

Nesse cenário, onde 80% das áreas de telhado foram convertidas em telhados verdes, verificou-se um ponto máximo de escoamento

superficial na S26-2 atingindo 4,10 m³/s durante o evento extremo inicial em 27 de maio de 2017, conforme indicado nos resultados detalhados no Quadro 7 e na Figura 6.

	SUB-BACIAS								
	S26-1	S26-2	S26-3	S26-4	S26-5	S26-6	S26-7	S26-8	S26-9
Máximo escoamento (m ³ /s)	2,47	4,10	2,26	0,20	0,16	0,33	0,26	1,19	0,93

Quadro 7. Pico de vazão por sub-bacia no evento de 27/05/2017 com 80% de telhados verdes.

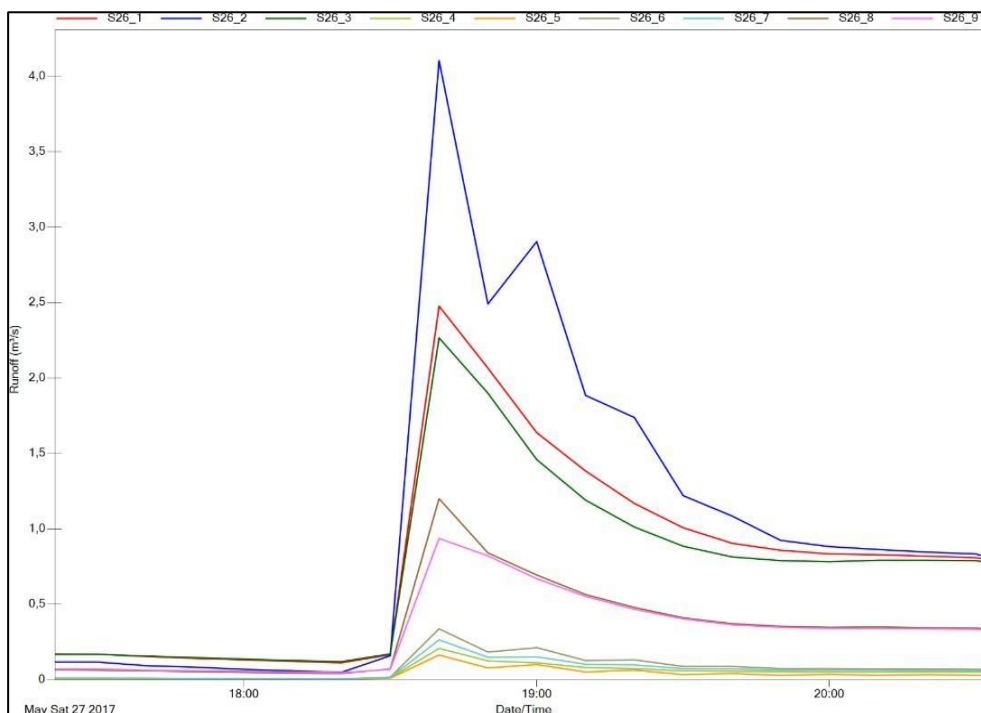


Figura 6. Hidrogramas das sub-bacias do setor 26 para o evento de 27/05/2017 com 80% de telhados verdes.

No segundo evento ocorrido entre os dias 4 e 5 de junho de 2017, o pico de água escoada na sub-bacia 26-2 durante o experimento foi registrada como 3,76 m³/s, conforme evidenciado nos resultados apresentados no Quadro 8 e na Figura 7.

Portanto, neste cenário, o pico de vazão das sub-bacias diminuiu, em média, 44,91% em comparação ao escoamento observado na bacia

sem a adoção de telhados verdes durante o primeiro evento. Para o segundo evento, observou-se uma redução de 37,26% no escoamento. O maior percentual de conversão ampliou a capacidade de retenção e atraso do escoamento, reduzindo os picos de vazão. Entretanto, observa-se que os ganhos incrementais entre 25% e 80% diminuem à medida que a área convertida se aproxima de sua saturação hidrológica.

	SUB-BACIAS								
	S26-1	S26-2	S26-3	S26-4	S26-5	S26-6	S26-7	S26-8	S26-9
Máximo escoamento (m ³ /s)	2,86	3,76	2,67	0,18	0,12	0,29	0,23	1,24	1,14

Quadro 8. Pico de vazão por sub-bacia no evento de 04-05/06/2017 com 80% de telhados verdes.

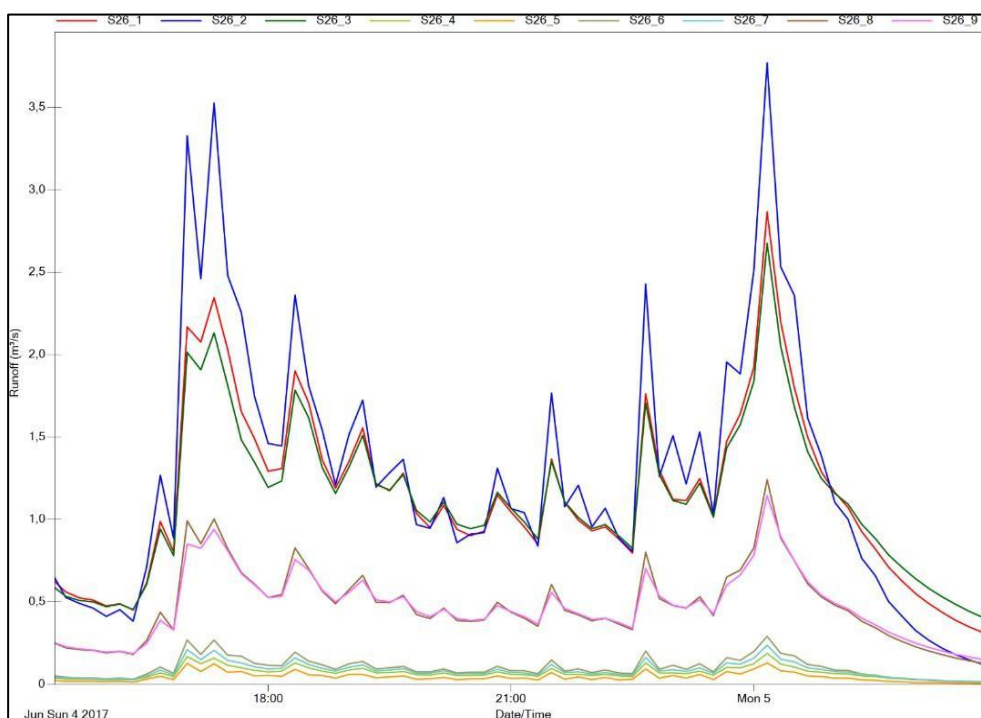


Figura 7. Hidrogramas das sub-bacias do setor 26 para o evento de 04-05/06/2017 com 80% de telhados verdes.

Comparação entre cenários

As Figuras 8 e 9 sintetizam a redução percentual do escoamento superficial para cada sub-bacia. Nota-se que sub-bacias com maior área impermeabilizada (S26-1, S26-2, S26-3, S26-8 e S26-9) apresentaram as maiores reduções absolutas, devido à maior disponibilidade inicial de superfície impermeável convertida.

A diferença entre os cenários 25% e 80% é mais pronunciada em sub-bacias menores, onde a contribuição individual de cada cobertura é mais significativa. Em sub-bacias maiores, a diferença entre os cenários tende a se estabilizar, indicando comportamento de rendimento decrescente à medida que mais LID é inserido.

A avaliação estatística indicou que os telhados verdes promoveram reduções significativas nos picos de vazão para ambos os eventos extremos. No evento de 27/05/2017, as diferenças entre o cenário atual e os cenários com 25% e 80% de conversão foram estatisticamente significativas ($t(8) = 2,434$; $p = 0,041$ e $t(8) = 2,527$; $p = 0,035$, respectivamente). O teste de Wilcoxon corroborou esses resultados ($p = 0,014$ e

$p = 0,009$). Os tamanhos de efeito foram elevados, com valores de Cohen's d entre 0,81 e 0,84, indicando forte magnitude da redução. A comparação entre os cenários com 25% e 80% também apresentou significância estatística ($p < 0,05$), embora a diferença média tenha sido pequena ($0,046 \text{ m}^3/\text{s}$), revelando ganhos adicionais modestos.

No evento de 04-05/06/2017, observou-se o mesmo padrão. As reduções entre o cenário atual e os cenários com 25% e 80% foram novamente significativas ($t(8) = 2,906$; $p = 0,020$ e $t(8) = 3,036$; $p = 0,016$), com confirmação pelo teste de Wilcoxon ($p = 0,014$ e $p = 0,009$). Os tamanhos de efeito foram ainda maiores (Cohen's d entre 0,97 e 1,01), indicando impacto hidrológico expressivo. A diferença entre os cenários de 25% e 80%, ainda que estatisticamente significativa ($p = 0,02$), permaneceu numericamente pequena ($0,048 \text{ m}^3/\text{s}$). Esses resultados reforçam que os telhados verdes são eficazes na mitigação de picos de vazão, mas apresentam eficiência marginal decrescente à medida que a área convertida aumenta.

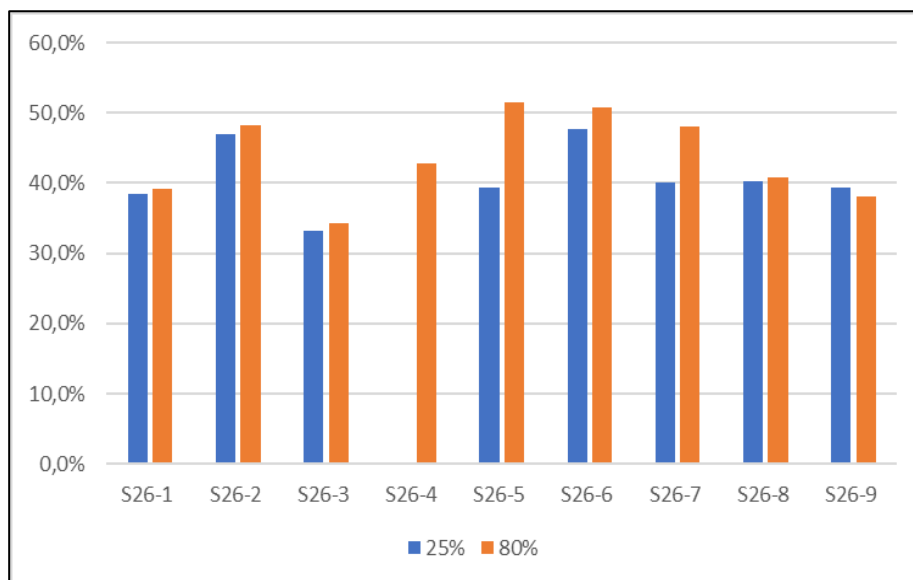


Figura 8. Redução percentual do pico de escoamento em cada sub-bacia para o evento de 27/05/2017, considerando os cenários de 25% e 80%.

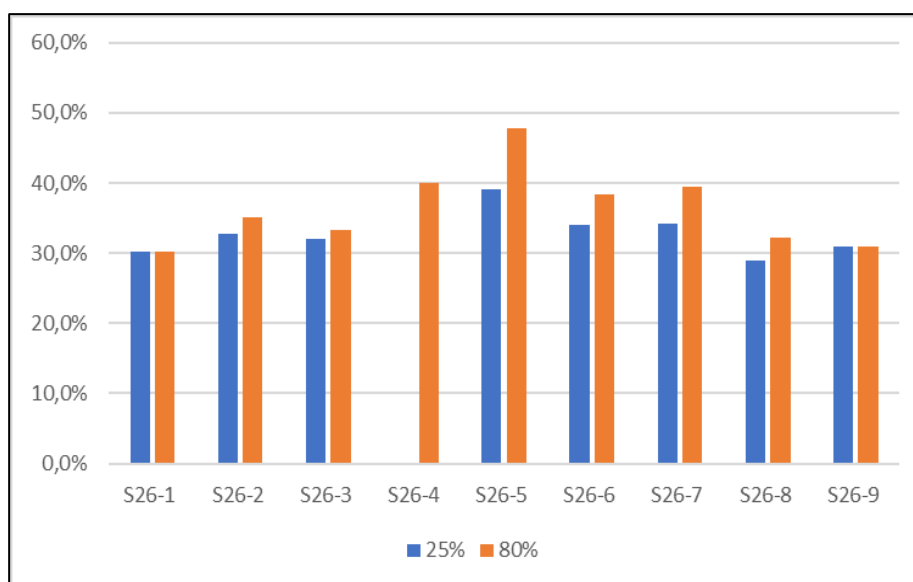


Figura 9. Redução percentual do pico de escoamento em cada sub-bacia para o evento de 04-05/06/2017, considerando os cenários de 25% e 80%.

Discussão

Os resultados evidenciam que os telhados verdes apresentam elevado potencial para mitigar o escoamento superficial em áreas urbanas densamente impermeabilizadas, como o setor 26 da bacia do rio Ponte Grande. A redução do pico de vazão e do volume escoado nos cenários simulados confirma que o LID atua diretamente sobre os processos de interceptação, armazenamento temporário e retardamento do escoamento, mecanismos amplamente descritos na literatura (Palla et al., 2008; Fletcher et al., 2015; Suresh et al., 2023).

Entretanto, a comparação direta com

resultados de estudos anteriores apresenta certa complexidade. Isso ocorre porque a literatura utiliza uma ampla variedade de parâmetros de modelagem, como diferentes substratos, percentuais de cobertura, configurações de camadas e métodos de calibração, além de, na maior parte das vezes, analisar eventos de precipitação menos extremos, geralmente associados a tempos de retorno próximos de 5 anos. No presente estudo, os eventos analisados possuem tempo de retorno estimado próximo de 83 anos, o que naturalmente limita a capacidade de retenção dos telhados verdes e resulta em reduções inferiores às observadas em contextos de chuvas mais brandas.

Paithankar e Taji (2020) destacam que o desempenho hidrológico dos telhados verdes é altamente sensível às condições de entrada, tais como área de cobertura, inclinação do telhado, tipo de vegetação, profundidade do substrato e umidade antecedente. De modo semelhante, Mora-Melià et al. (2018) demonstram que escolhas metodológicas, como discretização da bacia, critérios de infiltração e caracterização física das camadas, podem alterar significativamente o efeito das LIDs, dificultando comparações diretas entre diferentes estudos.

No contexto da Sub-bacia 26, a S26-2 se destaca por apresentar maior área contribuinte, maior largura de escoamento superficial e elevado grau de impermeabilização. Como apontam Araújo et al. (2019), essas características favorecem a geração de vazões de pico e ampliam a suscetibilidade a inundações. Portanto, não surpreende que essa sub-bacia concentre os maiores valores absolutos de escoamento no cenário atual e, simultaneamente, apresente reduções expressivas nos cenários com telhados verdes. Esses fatores combinados reforçam o maior índice de escoamento identificado nessa sub-bacia específica.

Os resultados obtidos neste estudo, com reduções de 44,9% e 37,26% no cenário de 80%, situam-se próximos aos valores apresentados por Palla et al. (2008), que observaram redução de 51% com 100% de cobertura verde em bacia urbana italiana. Estudos nacionais, como o de Filho et al. (2016), mostram reduções médias de 40,35%, enquanto Moran et al. (2024) registraram retenção de 60% em clima temperado, contexto no qual eventos extremos tendem a ser menos prolongados. Hamouz et al. (2020), utilizando o PCSWMM, reportaram redução de 30% ao simular adensamento urbano com telhados verdes, resultado coerente com os cenários intermediários deste trabalho. No cenário de 25% de cobertura, as reduções observadas, 36% e 29%, demonstram que mesmo intervenções parciais produzem benefícios hidrológicos relevantes, corroborando os achados de Sousa et al. (2021).

O desempenho dos telhados verdes variou conforme o tipo de evento. No episódio de 27/05/2017, caracterizado por curta duração e elevada intensidade, as reduções de pico foram mais expressivas, alcançando cerca de 36% no cenário de 25% e 45% no de 80%. Esse comportamento condiz com a capacidade natural dos telhados verdes de reter o primeiro fluxo de precipitação (first flush), especialmente quando o substrato apresenta teor de umidade menor no início do evento (Ouldboukhitine et al., 2012). Para

o evento de 04 a 05/06/2017, longo e volumoso, as reduções foram menores, comportamento que se explica pela saturação progressiva do substrato ao longo das várias horas de chuva. Resultados semelhantes foram apresentados por Simmons et al. (2008) e Yao et al. (2020), que destacam que o desempenho dos telhados verdes depende fortemente do padrão temporal da chuva e tende a diminuir durante eventos estratiformes prolongados.

Resultados consistentes também foram reportados por Peng et al. (2022), que analisaram o desempenho hidrológico de telhados verdes sob diferentes padrões de precipitação. Os autores demonstraram que eventos intensos e de curta duração tendem a promover maior eficiência relativa, devido à disponibilidade inicial de armazenamento no substrato. Em contrapartida, chuvas prolongadas diminuem a eficiência devido à saturação acumulada das camadas de crescimento. Além disso, os autores identificaram eficiência marginal decrescente com o aumento da área convertida, padrão que corresponde aos resultados deste estudo, no qual a diferença entre 25% e 80% mostrou-se estatisticamente significativa, porém numericamente discreta.

As reduções observadas, entre 28% e 45% no pico de escoamento, reforçam que a implementação de telhados verdes pode desempenhar papel relevante na mitigação de inundações em Lages, sobretudo em bairros vulneráveis, onde a impermeabilização é intensa e a infraestrutura de drenagem apresenta limitações. Além disso, telhados verdes oferecem benefícios amplamente reconhecidos, como melhora do conforto térmico urbano, aumento da biodiversidade local, redução de cargas poluentes no escoamento e fortalecimento da resiliência climática em regiões onde eventos extremos têm se tornado mais frequentes (Silva e Oliveira, 2024). Nesse sentido, os resultados deste estudo corroboram os argumentos apresentados por Eckart et al. (2017) e Teixeira et al. (2020) acerca da necessidade de incorporar infraestrutura verde em políticas públicas de drenagem urbana.

Conclusão

Neste trabalho, dois cenários de LIDs foram aplicados no modelo hidrodinâmico do software PCSWMM. O primeiro com 25% da área total de residências convertido em telhados verdes e o segundo com 80% transformado em telhados verdes, como alternativa para mitigar os impactos causados pelas inundações na área de estudo. Dentre os cenários avaliados, o simulado com 80%

convertido em telhado verde da área total se mostrou mais eficiente levando em consideração apenas a redução do escoamento superficial, obtendo um decréscimo para o primeiro e o segundo evento extremo climático em 44,91% e 37,27%, respectivamente.

Entretanto, fazendo uma análise mais crítica para a implementação dos telhados verdes na área, considerando o custo-benefício, o cenário em que 25% da área de telhado foi convertida em telhado verde se mostrou mais adequado, pois com apenas 25% da área das residências modificadas com a medida não convencional, houve uma diferença quase inexpressiva comparado ao segundo cenário (80%), se tornando eficiente com a redução do escoamento superficial e mais viável economicamente para a implantação na área.

Este estudo mostra que a adoção de telhados verdes, mesmo em áreas menores, como 25%, pode ser uma solução sustentável e eficaz para reduzir os impactos das inundações em regiões urbanizadas. Essas estratégias são passíveis de adaptação em outros contextos urbanos similares.

Como resultado final da análise, verificou-se que a redução mais significativa no escoamento superficial ocorreu nas sub-bacias 26-1, 26-2, 26-3, 26-8 e 26-9, que apresentavam uma proporção mais elevada da área total e, por consequência, de telhados verdes, além de contribuírem mais para o volume total de escoamento superficial.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo apoio financeiro concedido.

Referências

Araújo, P. R., Tucci, C. E. M., Goldenfum, J. A., 2000. Análise da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial. In: Tucci, C. E. M., Marques, D. M. (Org.). Avaliação e Controle da Drenagem Urbana. Porto Alegre: Editora UFRGS.

Araújo, P. V. N.; Amaro, V. E.; Silva, R. M.; Lopes, A. B., 2019. Delimitação de áreas de inundação com base em um DEM calibrado e geoprocessamento: estudo de caso no rio Uruguai, Itaqui, sul do Brasil. Riscos naturais e ciências do sistema terrestre, v 19, 237 – 250.

Baldessar, S. M. N., 2012. Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada. Dissertação (Mestrado em

Engenharia da Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Curitiba, 124 f.

Becker, N.; Pinheiro, I. G., 2019. Potencialidade dos pavimentos permeáveis na melhoria da qualidade da água do escoamento superficial: uma revisão. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 11.

Carter, T.; Butler, C., 2008. Ecological Impacts of Replacing Traditional Roofs With Green Roofs in Two Urban Areas. *Cities and the Environment*, v. 1, n. 2.

Catuzzo, H., 2013. Telhado Verde: impacto positivo na temperatura e umidade do ar. O caso da cidade de São Paulo. 2013. 206 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Das Neves, M. G. F. P.; Tucci, C. E. M., 2012. Gestão da drenagem urbana. Distrito Federal: IPEA,.

Dunnett N. P.; Kingsbury, N., 2004. Planting Green Roofs and Living Walls. Portland (OR): Timber Press.

Eckart, K.; McPhee, Z.; Bolisetti, T., 2017. Desempenho e implementação do desenvolvimento de baixo impacto. *Ciência do meio ambiente total*, v. 607-608, p 413-432.

Essamlali, I.; Nhaila, H.; Khaili, M. E., 2024. A new architecture of Low Impact Development (LID)-based stormwater management system through Internet of Things (IoT) and Machine Learning integration. *Chemical and Environmental Engineering*, v. 10.

Filho, J. E. A.; Barcelos, I. B. C.; Melo, N. A.; Caixeta, A. C. M., 2016. Eficiência hidrológica de telhados verdes para a escala de loteamentos residenciais. *Sociedade & Natureza*, v. 28, n. 2, p. 257–272.

Fletcher, T. D. et al., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 7, p. 525–542.

Gilbert, J.K.; Clausen, J.C., 2006. Storm Water runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed atone driveways in Connecticut. *Water Research*, v. 40, p. 826-832.

Hamouz, V.; Møller-Pedersen, P.; Muthanna, T. M., 2020. Modelling runoff reduction through implementation of green and grey roofs in urban catchments using PCSWMM, *Urban Water Journal*, v. 17, n. 9, p. 813-826.

Herrmann, M. L. P.; Kobiyama, M.; Marcelino, E. V., 2014. Inundação gradual. In: Herrmann

- (Org.). Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010. 2. ed. Florianópolis, SC: IHGSC/Cadernos Geográficos, 219 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Área territorial brasileira com data de referência de 2022. Rio de Janeiro.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Estimativas da população residente com data de referência de 2022. Rio de Janeiro.
- Johnston, C.; McCreary, K.; Nelms C., 2004. Vancouver public library green roof monitoring project. Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, v. 2, Portland, pp. 391-403.
- Jutel Dos Santos, V.; Neto, S.L.R., 2024. Abordagem baseada em volumes para análise de alagamentos e inundações em bacia hidrográfica urbana. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. 100 p.
- Kolb, W., 2004. Good reasons for roof planting - Green roofs and rainwater. In: Conference on Urban Horticulture, Acta Horticulturae, n. 643, pp. 295-300. Disponível em: <http://wwwlib.teiep.gr/images/stories/acta/Acta%20643/643_38.pdf>. Acesso em: out. 2023.
- Kuruppu, U.; Rahman, A.R.; Rahman, M. A., 2019. Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion. Environmental Earth Sciences, v. 78, n. 10, p. 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8312-2>.
- Lages. Portal Transparência Municipal. 2020. Disponível em: <<http://www.lages.gov.sc.br>>. Acesso em: out. 2023.
- Lapa, C. H. A.; Campos, C. G. C.; De Quadro, M. F. L.; Rufato, D. P., 2024. Precipitation patterns and their variability in the southern region of Brazil. Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 1521-1542. doi: 10.26848/rbgf.v17.3.p1521-1542.
- Lemos, M. R.; Becegato, V. A., 2020. Vulnerabilidade socioambiental das ocupações na bacia hidrográfica do rio Ponte Grande, no município de Lages-SC: uma análise ambiental e jurídica. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, 84 p.
- Magro, R. B., 2021. Aplicação de rede neurais artificiais para previsão de inundação em uma área urbana. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, 134 p.
- Maus, V.W; Righes, A.A; Buriol, G.A., 2007. Pavimentos Permeáveis e escoamento superficial das águas em áreas urbanas. I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste.
- Mora-Melià, D.; López-Aburto, C. S.; Ballesteros-Pérez, P.; Muñozvelasco, P., 2018. Viability of Green Roofs as a Flood Mitigation Element in the Central Region of Chile. Sustainability, v. 10. <https://doi.org/10.3390/su10041130>
- Moran, A.; Hunt, B.; Jennings, G. A., 2004. North Carolina field study to evaluate greenroof quantity, runoff quality, and plant growth, Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, v. 2, Portland, pp. 446-460.
- Neto, S.L.R.; Ricardo, G.S.; Mendes, C.F.; Cunha, M.B., 2015. Modelagem hidráulica dos eventos de inundações em Lages (SC). In: VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, p. 1 – 7.
- Neto, S. L. R., 2019. Hidrolages, Meta 2 - Estudo Hidrológico: Volumes e Tempos de Recorrência. UDESC/CAV: Lages.
- Ouldboukhitine, S. E.; Belarbi, R.; Djedjig, R., 2012. Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. Building and Environment, v. 56, p. 78-85.
- Paithankar, D. N., Taji, S. G., 2020. Investigating the hydrological performance of green roofs using storm water management model. Materials Today: Proceedings, v. 32, p. 943-950, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.085>.
- Palla, A. et al., 2008. Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale. In: International Conference on Urban Drainage, 21, Edinburgh, Scotland, UK, pp. 1-10. Disponível em: <http://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/11th_International_Conference_on_Urban_Drainage_CD/ICUD08/pdfs/245.pdf>. Acesso em: out. 2023.
- Peng, Z., Jiang, C., Zhang, K., & Zhao, Y., 2022. Hydrological performance of green roofs under variable rainfall patterns. Journal of Hydrology, 612, 128207.
- Pinto, V. C., 2007. Ocupação Irregular do Solo e Infra-estrutura Urbana: o Caso da Energia Elétrica. In: Ministério Público do Estado de

- São Paulo. Temas de Direito Urbanístico 5. São Paulo: Imprensa Oficial, p. 1-24.
- Rossman, L.A., 2010. Manual do Usuário – EPA SWMM 5.0 Modelo de Gestão de Drenagem Urbana. PROCEL Sanear. Tradução do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - Universidade Federal da Paraíba, UFPB, BRASIL.
- Santos, S. et al., 2009. Determinação da Utilidade do Uso de Telhado Verde no Agreste Pernambucano. In: Encontro Nacional, 5.; Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 3. Recife, 10 p.
- Silva, R. F.; Oliveira, P. P., 2024. Eficiência de telhados verdes nos centros urbanos: uma abordagem analítica. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, [S. l.], v. 6, n. 1. doi: 10.61164/rmm.v6i1.2516.
- Simmons, M. T. et al., 2008. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six diverse extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a subtropical climate. Urban Ecosystems, v. 11, p. 339–348.
- Sousa, M. C. B.; Pedrosa, R. A.; Iwata, B. F.; Chaves, S. V. V., 2021. Uso de telhados verdes para controle de águas pluviais urbanas em Teresina-Piauí. Revista de Geografia, v. 38, n. 2.
- Suresh, A.; Pekkat, S.; Subbiah, S., 2023. Quantifying the efficacy of Low Impact Developments (LIDs) for flood reduction in micro-urban watersheds incorporating climate change. Sustainable Cities and Society, v. 95.
- Surwase, T.; Srinivasarao, G.; Manjusree, P.; Begum, A.; Nagamani, P.V.; Jaisankar, G., 2019. Flood inundation simulation of Mahanadi River, Odisha during September 2008 by using HEC-RAS 2D model. In: Proceedings of International Conference on Remote Sensing for Disaster Management. Springer, Cham, p. 851-863. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77276-9_77
- Teixeira, G.S.; Rodrigues, R.S.S.; Crispim, D.L.; Fernandes, L.L.; Bittencourt, G.M., 2020. Metodologias para Caracterização e Avaliação de Sistemas de Drenagem Urbana: uma revisão. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, v. 9, n. 4. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i4.3063>.
- Tolderlund, L., 2010. Design Guidelines and Maintenance Manual for Green Roofs in the Semi-Arid and Arid West. Denver/US: University of Colorado Denver, 59 p.
- Ullah, K.; Zhang, J., 2020. GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method: A case study of Panjkora River Basin, eastern Hindu Kush, Pakistan. Plos one, v. 15, n. 3. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229153>.
- Yao, L., Wu, Z., Wang, Y., Sun, S., Wei, W., Xu, Y., 2020. Does the spatial location of green roofs affect runoff mitigation in small urbanized catchments? J. Environ. Manage, v. 268, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110707>