



EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

HYDROLOGICAL EFFICIENCY OF PERMEABLE PAVEMENTS IN URBAN AREAS: A CASE STUDY IN TERESINA - PI

Girleiane Santos de Sá¹, Igor Samuel da Silva Barbosa², Reurysson Chagas de Sousa Morais³, Mauro César de Brito Sousa⁴

¹ Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial (MAPEPROF); Instituto Federal do Piauí; catce.2025111pape0006@aluno.ifpi.edu.br; ORCID: 0000-0001-5433-2594

² Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial (MAPEPROF); Instituto Federal do Piauí; eng.igorsamuel@gmail.com; ORCID 0009-0004-2961-8522

³ Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial (MAPEPROF); Instituto Federal do Piauí; reurysson@ifpi.edu.br; ORCID: 0000-0002-1334-4182

⁴ Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial (MAPEPROF); Instituto Federal do Piauí; mauro.sousa@ifpi.edu.br; ORCID: 0000-0002-0650-6577

Recebido: 19/01/2026
Publicado: 24/05/2026

RESUMO

A rápida urbanização das cidades tem gerado desafios para a gestão eficiente do escoamento de águas pluviais. Os pavimentos convencionais, ao impermeabilizarem o solo, contribuem para alagamentos, inundações e danos à infraestrutura urbana. Esses eventos acarretam perdas econômicas e comprometem a qualidade de vida da população, além de afetarem o funcionamento regular das cidades. Este estudo analisa a efetividade dos pavimentos permeáveis como alternativa sustentável para mitigar tais problemas, com foco em Teresina, Piauí. A pesquisa utilizou o *software Storm Water Management Model (SWMM)* para simular o comportamento hidrológico em um loteamento residencial, comparando cenários com e sem pavimentos permeáveis. Os resultados demonstram que a adoção dessa tecnologia pode reduzir o volume total de escoamento em cerca de 24,00%, diminuir a vazão de pico em aproximadamente 57,00% e aumentar o tempo de resposta do sistema em até 7 minutos. Além disso, os pavimentos permeáveis favorecem a infiltração da água no solo, contribuindo para a recarga do lençol freático. O estudo evidencia a relevância dos pavimentos permeáveis como solução sustentável, promovendo maior eficiência na drenagem urbana e auxiliando na redução de alagamentos em Teresina.

Palavras-chave: pavimentos permeáveis, escoamento superficial, SWMM, gestão de águas pluviais urbanas.

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

ABSTRACT

The rapid urbanization of cities has generated challenges for the efficient management of stormwater runoff. Conventional pavements, by making the soil impermeable, contribute to flooding, inundations, and damage to urban infrastructure. These events result in economic losses and compromise the population's quality of life, while also affecting the regular functioning of cities. This study analyzes the effectiveness of permeable pavements as a sustainable alternative to mitigate such problems, focusing on the city of Teresina, Piauí, Brazil. The research used the Storm Water Management Model (SWMM) software to simulate the hydrological behavior of a residential subdivision, comparing scenarios with and without permeable pavements. The results show that adopting this technology can reduce the total runoff volume by about 24.00%, decrease peak flow by approximately 57.00%, and increase the system's response time by up to 7 minutes. In addition, permeable pavements enhance water infiltration into the soil, contributing to groundwater recharge. The study highlights the relevance of permeable pavements as a sustainable solution, promoting more efficient urban drainage and helping to reduce flooding in Teresina.

Keywords: Permeable pavements, Surface runoff, SWMM (Storm Water Management Model), Urban stormwater management.

1 Introdução

A urbanização acelerada, frequentemente marcada pela expansão desordenada e pouco sensível às questões ambientais, tem promovido alterações significativas no equilíbrio entre os sistemas naturais e as infraestruturas urbanas (Zhu et al., 2021). Uma das consequências mais relevantes desse processo é a substituição de áreas vegetadas por superfícies impermeáveis, como vias pavimentadas, coberturas e estacionamentos, comprometendo os mecanismos naturais de infiltração, evapotranspiração e armazenamento de água. Tais alterações impactam diretamente o ciclo hidrológico urbano, reduzindo a capacidade de infiltração do solo e a recarga hídrica (Chui et al., 2016), além de intensificarem o volume e a velocidade do escoamento superficial, com antecipação dos picos de vazão e conseqüente agravamento de alagamentos, inundações e sobrecarga dos sistemas de drenagem existentes (Qi et al., 2025; Przechelska et al., 2024). Agravando esse cenário, os efeitos das mudanças climáticas se tornam cada vez mais evidentes, com a intensificação de eventos extremos, como chuvas intensas e concentradas, que ampliam os riscos hidrológicos nas áreas urbanas (Baek et al., 2020).

Frente a esse contexto, práticas baseadas no Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID – *Low Impact Development*) têm se consolidado como alternativas promissoras para restaurar a função hidrológica dos centros urbanos. Técnicas como pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, valas vegetadas, telhados verdes e jardins de chuva atuam descentralizadamente na retenção, infiltração e controle do escoamento superficial,

contribuindo para a mitigação dos impactos da urbanização sobre os recursos hídricos. Em consonância com o 11º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que visa tornar as cidades mais resilientes e sustentáveis (ONU, 2015), destaca-se a importância de estudos voltados à avaliação do desempenho dessas soluções em bacias urbanas, em alinhamento às metas da Agenda 2030 (Macedo et al., 2021).

No contexto nacional, embora ainda incipientes, iniciativas com técnicas LID têm demonstrado resultados positivos. Em Curitiba-PR, a integração de valas vegetadas e jardins de chuva como parte de uma estratégia de infraestrutura verde e azul contribuiu para a mitigação de alagamentos e para a melhoria da qualidade das águas pluviais (Hoepers et al., 2025). No Distrito Federal, modelagens realizadas por Bigonha (2024) apontaram que trincheiras de infiltração foram capazes de infiltrar até 87% do volume precipitado. Em São Paulo, Sasaki (2021) avaliou o desempenho estrutural de diferentes configurações de pavimentos permeáveis, reforçando a viabilidade de sua aplicação em áreas urbanas densamente ocupadas.

Diante disso, a modelagem numérica tem se consolidado como uma ferramenta essencial na avaliação da resposta hidrológica urbana frente à adoção de técnicas LID, especialmente em cenários de urbanização intensa e eventos extremos. O software SWMM (*Storm Water Management Model*), desenvolvido pela US EPA, destaca-se por sua capacidade de simular com precisão processos como escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração e o desempenho de diversas soluções sustentáveis. Desde a versão 5.0.019, o SWMM passou a incorporar um módulo específico para práticas LID, permitindo a modelagem integrada de soluções como telhados verdes, pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, jardins de chuva, cisternas, entre outras (Qi et al., 2025; Ahiablame e Shakya, 2016).

Na cidade de Teresina-PI, embora o Plano Diretor de Drenagem Urbana reconheça a relevância de medidas compensatórias, observa-se que, na prática, ainda prevalecem soluções convencionais, centradas na canalização e no escoamento rápido das águas pluviais. Essa discrepância entre as diretrizes estabelecidas e a aplicação efetiva no território motivou o desenvolvimento do presente estudo, que adota a simulação computacional por meio do software SWMM (*Storm Water Management Model*) para avaliar a eficiência hidrológica dos pavimentos permeáveis aplicados em um loteamento urbano situado no bairro São Sebastião, zona leste de Teresina-PI, inserido na sub-bacia PD 03, situada na zona urbana de Teresina.

A análise foi conduzida a partir da comparação de cenários com e sem a

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

aplicação dessa técnica, utilizando indicadores hidrológicos como volume escoado, vazão de pico e tempo até o pico, além de considerar o volume infiltrado como parâmetro essencial para aferir o desempenho da solução. Dessa forma, buscou-se verificar o potencial dos pavimentos permeáveis na mitigação dos impactos das chuvas intensas sobre o sistema de drenagem urbana, contribuindo com subsídios técnicos para a adoção de práticas mais sustentáveis e alinhadas às necessidades locais.

2 Fundamentação teórica

2.1 Drenagem das águas pluviais urbanas

Historicamente, os sistemas de drenagem urbana foram projetados para remover rapidamente as águas pluviais por meio de obras estruturais, como galerias, canais e bocas de lobo (Malheiros et al., 2019). Essa abordagem, baseada no escoamento rápido, tem como principais consequências o aumento do pico de vazão, a redução do tempo de concentração e a transferência dos problemas de alagamento para áreas a jusante. Além disso, o descarte indevido de esgotos e resíduos sólidos nesses sistemas contribui para a poluição dos corpos hídricos e compromete a eficiência hidráulica das redes (Christofidis; Assumpção; Kligerman, 2019).

Em resposta a essas limitações, emergiu a partir da década de 1970 o conceito de drenagem urbana sustentável, que visa à gestão descentralizada das águas pluviais por meio de práticas que promovam a retenção, infiltração e evapotranspiração, aproximando o comportamento hidrológico do meio urbano ao ciclo natural da água (Fletcher et al., 2015). Essa mudança de paradigma tem se refletido, ainda que de forma gradual, nas políticas públicas e na legislação brasileira, a exemplo da Lei nº 14.026/2020, que reconhece a drenagem e o manejo de águas pluviais urbanas como componentes do saneamento básico. No entanto, apesar desse reconhecimento legal, o setor ainda é frequentemente tratado de maneira secundária na gestão urbana, enfrentando lacunas técnicas e institucionais (SNIS, 2020).

Nesse contexto, as estratégias de controle do escoamento pluvial são classificadas em medidas estruturais, como reservatórios de retenção, galerias e canais (Righetto, 2009), e não estruturais, como normas urbanísticas, educação ambiental e planejamento territorial (Canholi, 2005; Carvalho, 2019). A atuação integrada dessas medidas pode ocorrer em diferentes escalas, desde intervenções localizadas na fonte (em lotes e áreas verdes), passando pela microdrenagem (vias e calçadas), até a

macrodrenagem, que envolve a condução das águas por córregos e rios urbanos (Tucci, 2006; Adasa, 2018).

2.2 Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS's)

A Agenda 2030 é um plano de ação global adotado por 193 países-membros da ONU, incluindo o Brasil, que estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 1) e 169 metas com o propósito de erradicar a pobreza, promover a prosperidade, proteger o meio ambiente e assegurar os direitos humanos de todos, até o ano de 2030 (GT Agenda 2030, 2015).

Figura 1. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU.



Fonte: GT Agenda 2030 (2015)

Dentre esses objetivos, destaca-se o ODS 11, que visa tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Em especial, as metas 11.5, 11.6 e 11.b dialogam diretamente com os desafios da drenagem urbana e com a necessidade de adaptação das infraestruturas às mudanças climáticas. A meta 11.5 propõe a redução significativa dos impactos causados por desastres naturais, com ênfase nas populações em situação de vulnerabilidade, cenário em que as técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID), surgem como alternativas eficazes para a

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

mitigação de enchentes e a promoção da resiliência urbana.

A meta 11.6, ao tratar da redução dos impactos ambientais negativos per capita, reforça a importância de soluções que favoreçam a infiltração, a qualidade da água e o controle da poluição difusa, atributos que são inerentes às técnicas LID. Já a meta 11.b estimula os municípios a implementarem políticas integradas de adaptação climática e gestão de riscos, favorecendo a inserção da infraestrutura verde nos instrumentos de planejamento urbano, como os planos diretores e os planos municipais de drenagem.

2.3 Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development* – LID)

A abordagem conhecida como *Low Impact Development* (LID), também referida em algumas literaturas como *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD), corresponde, em português, ao termo Desenvolvimento de Baixo Impacto (Ferrans et al., 2022; Ferrans et al., 2023). Esse conceito teve origem nos Estados Unidos e na Nova Zelândia, e tem como principal premissa a promoção de uma drenagem urbana mais sustentável, com ênfase na replicação, o mais próximo possível, das condições hidrológicas naturais anteriores à urbanização das bacias hidrográficas (Ipea, 2022). Elas atuam diretamente na redução do escoamento superficial e na melhoria da infiltração, contribuindo para a atenuação dos picos de vazão e para o tratamento qualitativo das águas (Zhang et al., 2021).

Esses dispositivos são ideais para áreas urbanas, pois demandam pequenas áreas e se integram facilmente ao ambiente, como calçadas, rodovias e estacionamentos (Gregoire et al., 2011; Chen et al., 2019).

Dentre as técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID), destacam-se a biorretenção, os telhados verdes, os pavimentos permeáveis, os coletores de águas pluviais, as valas vegetadas, as trincheiras de infiltração, entre outras. Neste estudo, a ênfase recai sobre os pavimentos permeáveis, de modo a avaliar em profundidade sua eficiência hidrológica e seu papel no controle do escoamento superficial e na mitigação de sobrecargas no sistema de drenagem.

2.4 Pavimentos permeáveis

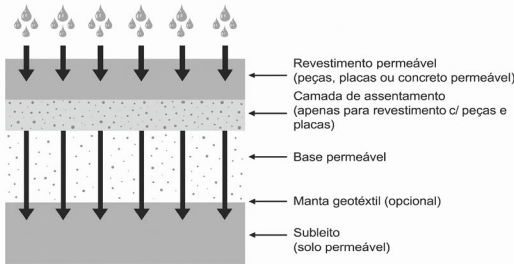
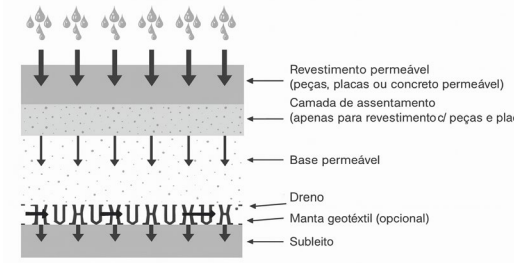
Os pavimentos permeáveis são soluções eficazes no controle de inundações urbanas, permitindo a infiltração da água no solo por meio de camadas estruturais porosas

(Xie et al., 2019; Chu; Fwa, 2019). Além de reduzirem o escoamento superficial, contribuem para o tratamento das águas pluviais por filtração (Kuruppu et al., 2019; Liu et al., 2020).

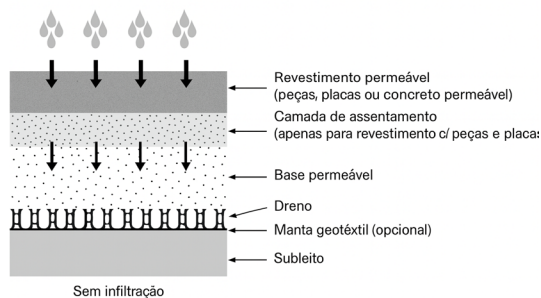
Classificados como estruturas do tipo “estrutura-reservatório”, esses pavimentos associam resistência mecânica à capacidade de armazenar temporariamente a água da chuva (Carvalho, 2019). Em geral, são compostos por camadas de agregados e revestimento superior permeável, separados por geotêxtil para evitar colmatação (Canholli, 2005). Os materiais utilizados incluem concreto permeável, asfalto poroso e blocos vazados, preenchidos com areia ou vegetação (Araújo et al., 2000; Castro, 2011; Urbonas; Stahre, 1993).

Segundo a ABNT (2015), os sistemas podem ser classificados em três tipos: com infiltração total, parcial ou apenas drenagem da água. A Tabela 1 apresenta a descrição e esquematização de cada tipo.

Tabela 1. Tipos de sistemas de infiltração para pavimentos permeáveis segundo a ABNT (2015).

Esquema	Descrição
 <p>Infiltração total</p>	<p>Modelo de pavimento permeável com total infiltração.</p>
 <p>Infiltração parcial</p>	<p>Modelo de pavimento permeável com infiltração parcial.</p>

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI



Modelo de pavimento permeável sem infiltração.

Fonte: Adaptado de ABNT (2015).

2.5 Storm Water Management Model – SWMM

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é uma ferramenta computacional amplamente utilizada nos campos do saneamento e da hidrologia urbana, desenvolvida pela Environmental Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos. Trata-se de um modelo hidrológico e hidráulico dinâmico de chuva-vazão, capaz de simular tanto a quantidade quanto a qualidade do escoamento superficial em bacias urbanas. O software permite a análise de eventos de precipitação pontuais ou contínuos, representando os componentes do sistema de drenagem por meio de elementos como sub-bacias, condutos, nós, pluviômetros e exutórios (Rossman, 2012).

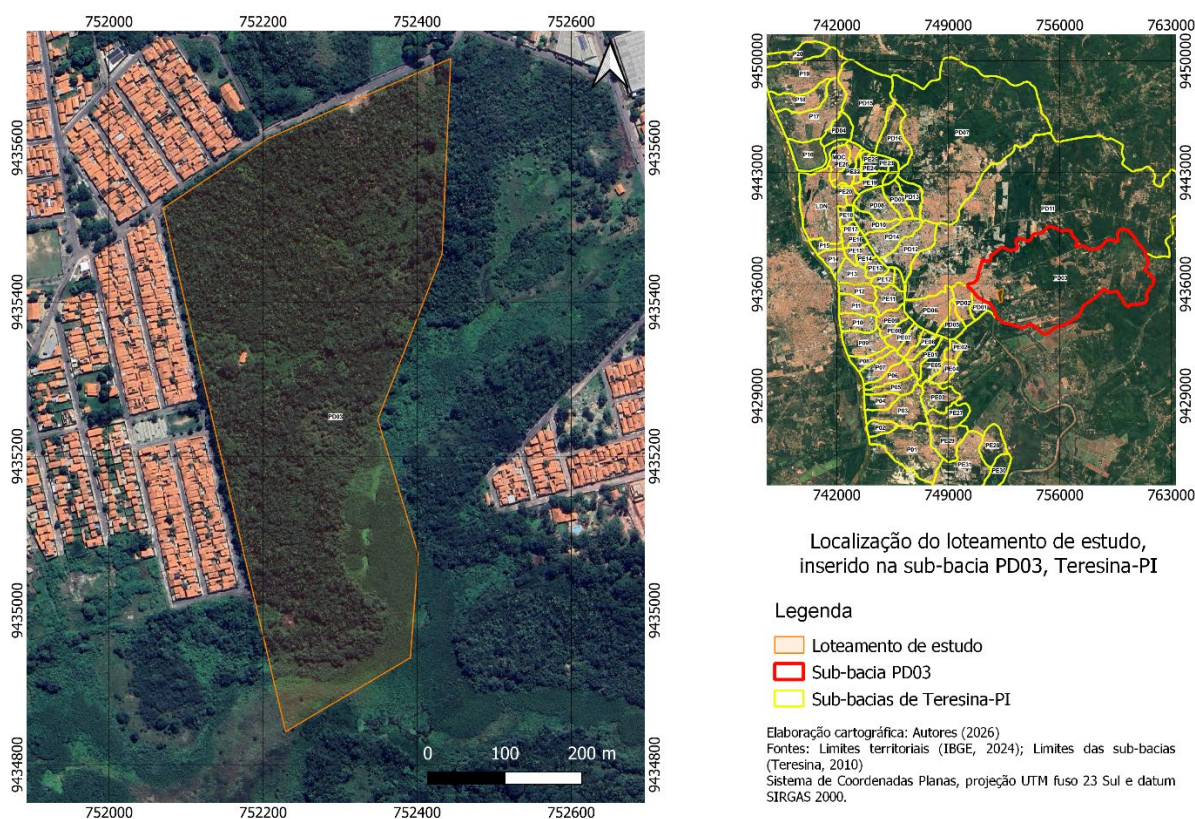
Para a simulação de técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID), o SWMM dispõe de um módulo específico que possibilita a inserção de dispositivos sustentáveis como células de biorretenção, jardins de chuva, telhados verdes, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis (Rossman, 2016). A infiltração da água no solo pode ser modelada por diferentes métodos, incluindo Horton, Green-Ampt e SCS. Além disso, o software permite estimar a geração, entrada e transporte de poluentes, oferecendo uma abordagem integrada e robusta para a gestão das águas pluviais urbanas (Rossman, 2010).

3 Metodologia

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A área modelada corresponde a um loteamento urbano situado no bairro São Sebastião, zona leste de Teresina-PI, inserido na sub-bacia PD 03, conforme ilustrado na Figura 02.

Figura 2. Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024); Teresina (2010); IBGE (2024).

Com área total de 190.104,88 m², o loteamento é composto por quadras residenciais, vias de circulação, áreas verdes, áreas institucionais e de preservação permanente. A região foi escolhida devido à sua vulnerabilidade a alagamentos e alta taxa de impermeabilização, o que a torna ideal para testar soluções de infiltração.

A proporção de áreas impermeáveis na área total foi de 56,90%, e as áreas permeáveis corresponderam a 43,10%. A largura superficial foi determinada pelo método de Rossman (2010), que consiste na razão entre a área da bacia e o comprimento médio do escoamento superficial, resultando em 2.138,59 m. A declividade média calculada foi de 1,32%, obtida a partir de levantamento planialtimétrico do talvegue principal, com comprimento de 1.055 m e variação altimétrica entre 79 m e 65 m.

Os coeficientes de Manning foram adotados conforme o *Manual of Practice* (ASCE, 1982), considerando os cenários mais críticos: 0,011 para superfícies impermeáveis (asfalto liso) e 0,4 para áreas vegetadas densas. Para o armazenamento em depressões, adotou-se o valor de 1,27 mm para superfícies impermeáveis, conforme a faixa recomendada pela literatura, dada a impossibilidade de medições de campo.

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

Para o modelo de transformação de chuva em vazão, foi utilizado o método do *Soil Conservation Service* (SCS), que considera o uso e ocupação do solo, o tipo de solo e a condição de umidade antecedente. Segundo o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (2010), os solos predominantes na área de estudo são Latossolos Amarelos (68%) e Alissolos (32%), ambos classificados como pertencentes ao Grupo Hidrológico B. A partir dessas características e com base nos valores indicados pelo NRCS (2004), foi realizada a média ponderada do *Curve Number* (CN) para a bacia, resultando em um valor de 82, considerando as diferentes classes de uso e ocupação do solo identificadas no loteamento.

3.2 Dados de precipitação

A precipitação foi representada por meio da equação Intensidade -Duração-Frequência (IDF) (Equação 1) proposta pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina (2010), e foram considerados períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos.

$$i = \frac{1194,237 * T^{0,1738}}{(t + 10)^{0,7457}} \quad (1)$$

Sendo i a intensidade da chuva (mm/h), T o período de retorno (anos) e t o tempo de concentração da bacia (min).

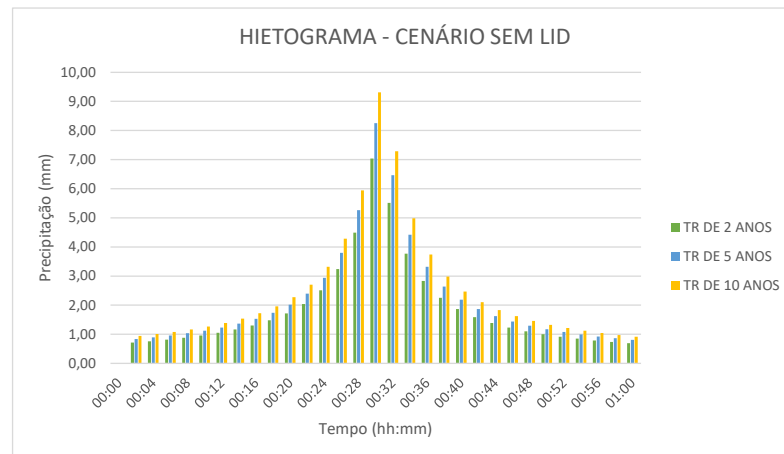
O tempo de concentração foi estimado em 12 minutos, com base na equação de Schaake et al. (1967) (Equação 2).

$$tc = \frac{4,968 * L^{0,24}}{S^{0,16} * Aimp^{0,26}} \quad (2)$$

Sendo tc o tempo de concentração (min), L o comprimento do talvegue (km), S a declividade (m/m) e $Aimp$ a área impermeável.

Os hietogramas utilizados neste estudo foram construídos com base no método dos blocos alternados, adotando-se uma discretização temporal de 2 minutos e uma duração total de 60 minutos. Essa abordagem permitiu representar adequadamente os diferentes períodos de retorno analisados, sendo os hietogramas correspondentes aos TR de 2, 5 e 10 anos ilustrados na Figura 03.

Figura 3. Hietograma para os tempos de retorno de 2,5 e 10 anos.

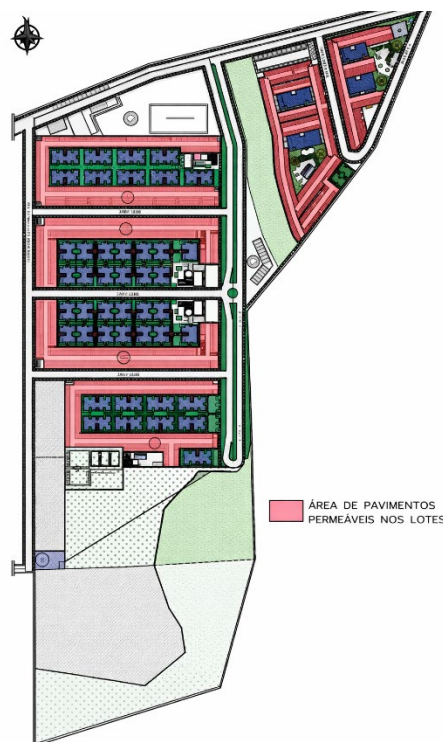


Fonte: Sá, G. S (2024).

3.3 Modelagem dos pavimentos permeáveis

No cenário com aplicação de LID, foi considerada a substituição do revestimento convencional por pavimentos permeáveis em áreas de estacionamentos, ruas e avenidas, totalizando 68.043,77 m² – o que representa 35,79% da área total do loteamento e 62,90% da área impermeável. A quantificação foi feita por meio do software Autodesk AutoCAD.

Figura 4. Delimitação das áreas de aplicação de pavimento permeável.



Fonte: Adaptada, Acervo da Construtora (2024).

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

Na modelagem dos pavimentos permeáveis, adotou-se a abordagem de infiltração total, sem a presença de drenos, partindo do pressuposto de que toda a água da chuva seria absorvida pelo solo. Essa configuração foi escolhida em razão da inexistência de sistema de drenagem no local analisado. O pavimento foi modelado com uma camada de armazenamento de 150 mm de profundidade, índice de vazios de 0,66, taxa de infiltração de 12,70 mm/h e rugosidade superficial de 0,10. Os parâmetros adotados foram definidos com base em estudos prévios, como o de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), garantindo a representatividade técnica do cenário simulado.

Os cenários modelados, com e sem a presença dos pavimentos permeáveis, foram então comparados com base nos hidrogramas gerados para os diferentes eventos de precipitação. Os parâmetros de avaliação incluíram: vazão de pico, volume escoado, tempo até o pico de vazão e volume infiltrado, possibilitando uma análise detalhada da eficiência hidrológica da solução proposta.

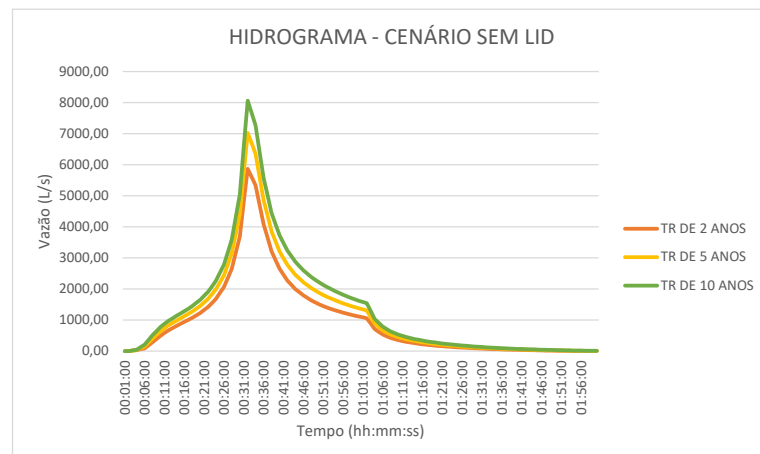
4 Resultados e discussões

4.1 Análise comparativa dos hidrogramas entre os cenários com e sem aplicação dos pavimentos permeáveis

A análise dos hidrogramas obtidos para os tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos evidencia contrastes relevantes no comportamento hidrológico da área estudada quando se comparam os cenários convencional (sem LID) e com a aplicação de pavimentos permeáveis.

No cenário sem LID, o escoamento superficial ocorre de forma mais rápida e concentrada, resultando em picos de vazão significativamente mais elevados e em um tempo de resposta reduzido. Esse comportamento reflete a baixa capacidade de infiltração e armazenamento do solo em áreas impermeabilizadas, favorecendo a geração de escoamentos intensos em curtos intervalos de tempo, como pode ser observado na Figura 05.

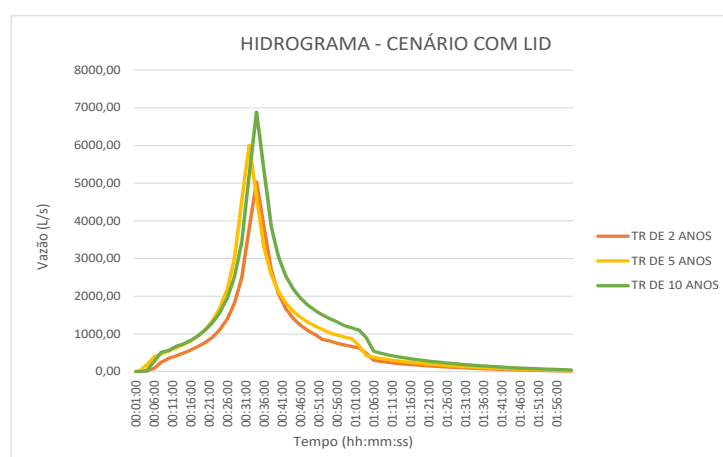
Figura 05. Escoamento superficial considerando os cenários sem aplicação das LID's.



Fonte: Sá, G. S (2024).

Por outro lado, no cenário com a aplicação dos pavimentos permeáveis, nota-se uma alteração expressiva na forma dos hidrogramas. Há redução dos picos de vazão, maior atenuação das descargas e prolongamento do tempo até o pico. Esses efeitos decorrem da maior capacidade de infiltração proporcionada pelos pavimentos permeáveis, que atuam como dispositivos de retenção e infiltração, retardando o escoamento superficial e favorecendo o amortecimento dos volumes escoados, conforme ilustrado na Figura 06.

Figura 06. Escoamento superficial considerando os cenários com aplicação das LID's.



Fonte: Sá, G. S (2024).

A comparação quantitativa evidencia a eficiência dos pavimentos permeáveis na mitigação do escoamento superficial. Para o tempo de retorno de 2 anos, a vazão de pico

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

foi reduzida de 6,71 m³/s para 2,90 m³/s, correspondendo a uma diminuição de 56,82%. Para os tempos de retorno de 5 e 10 anos, as reduções foram de 53,58% e 52,41%, respectivamente. Observa-se também que o tempo até o pico, que era de 32 minutos no cenário sem LID, aumentou para até 39 minutos no cenário com a aplicação dos pavimentos permeáveis, evidenciando a capacidade do sistema em retardar a resposta hidrológica.

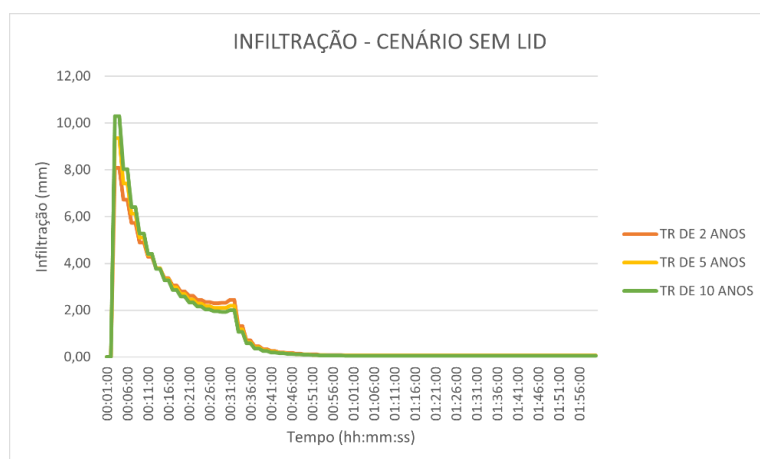
Em relação ao volume total escoado, verificaram-se reduções de 23,98% para o TR de 2 anos, 20,74% para o TR de 5 anos e 18,87% para o TR de 10 anos. Esses resultados refletem diretamente o incremento da infiltração proporcionado pela substituição dos revestimentos convencionais pelos pavimentos permeáveis, contribuindo para a diminuição dos volumes que chegam ao sistema de drenagem.

4.2 Análise comparativa da infiltração ao longo do tempo entre os cenários com e sem aplicação dos pavimentos permeáveis.

A infiltração da água no solo foi avaliada para os tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos, considerando os cenários com e sem a aplicação de pavimentos permeáveis.

No cenário sem LID, como mostrado na Figura 07, a taxa de infiltração apresentou um pico inicial próximo a 10 mm, seguido de um decréscimo acentuado nos primeiros minutos da simulação, até se estabilizar em torno de 1 mm. Esse comportamento reflete a rápida saturação da superfície impermeabilizada e a consequente limitação da capacidade de infiltração ao longo do tempo.

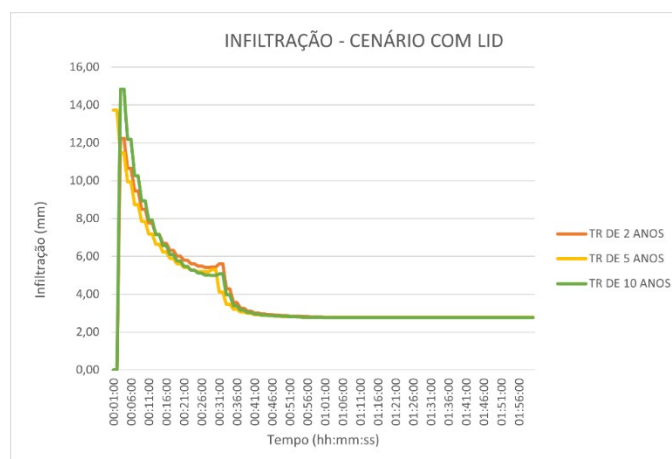
Figura 07. Infiltração considerando os cenários sem aplicação das LID's.



Fonte: Sá, G. S (2024).

No cenário com a aplicação dos pavimentos permeáveis, vide Figura 08, a infiltração manteve valores mais elevados, estabilizando-se em torno de 2 mm mesmo após os 30 minutos iniciais da simulação. Em termos percentuais, observou-se um aumento entre 267% e 273% nas taxas de infiltração em relação ao cenário convencional, dependendo do tempo de retorno analisado.

Figura 08. Infiltração considerando os cenários com aplicação das LID's.



Fonte: Sá, G. S (2024).

Os resultados indicam que a adoção de pavimentos permeáveis modifica significativamente a dinâmica da infiltração, reduzindo o escoamento superficial direto e favorecendo a entrada de água no solo. Esse efeito tem implicações diretas na recarga do aquífero e na mitigação de impactos hidrológicos decorrentes da urbanização, como o aumento da vazão de pico e a sobrecarga das redes de drenagem.

A literatura aponta resultados consistentes com esses achados. Estudos como os de Brattebo e Booth (2003) e Collins et al. (2008) já haviam verificado que a aplicação de pavimentos permeáveis em áreas urbanas promove maior infiltração e contribui para a redução da vulnerabilidade a alagamentos, reforçando a adequação dessa técnica como medida de drenagem urbana de baixo impacto.

5 Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo permitiram quantificar os efeitos da adoção de pavimentos permeáveis no comportamento hidrológico da área de estudo em Teresina-PI. As simulações realizadas no SWMM indicaram reduções expressivas tanto nos volumes escoados quanto nas vazões de pico, com diminuições de até 23,98% e 56,82%, respectivamente, dependendo do tempo de retorno analisado. Verificou-se também o

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

aumento do tempo até o pico de vazão, que passou de 32 minutos no cenário convencional para até 39 minutos com a aplicação da técnica, representando um ganho médio de 7 minutos na resposta hidrológica.

No que se refere à infiltração, os resultados mostraram incremento entre 267% e 273% em relação ao cenário sem LID, com taxas mais elevadas e sustentadas ao longo do tempo. Esse comportamento evidencia a redistribuição das parcelas de precipitação entre infiltração e escoamento, contribuindo para menor pressão sobre o sistema de drenagem e maior recarga do subsolo.

De forma geral, a aplicação dos pavimentos permeáveis promoveu alterações consistentes no balanço hidrológico urbano, reduzindo a magnitude e a concentração do escoamento superficial. Tais resultados reforçam a relevância da técnica como alternativa de manejo de águas pluviais em áreas de elevada impermeabilização.

Entretanto, destaca-se a necessidade de considerar limitações operacionais, como variações de desempenho em diferentes condições de solo e clima, além da demanda por manutenção periódica para garantir a eficiência do sistema. Recomenda-se que investigações futuras abordem análises em escala de longo prazo, estudos de viabilidade econômica e a adaptação da técnica a diferentes contextos urbanos brasileiros.

Referências

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

ARAÚJO, P. R. DE; TUCCI, C. E. M. P. GOLDENFUM. J. A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 3, p. 21–29, 2000.

BAEK, Sang-Soo et al. **A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds**. Journal of Hydrology, v. 586, p. 124886, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124886>. Acesso em 14 abr. 2025

BIGONHA, Márcio Bittar. **Avaliação do uso de técnicas compensatórias de drenagem urbana com base em modelagem hidrológica**. 2024. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

CARVALHO, N. E. **Desenvolvimento de baixo impacto no manejo de águas pluviais urbanas: uma proposta para o município de campinas**. 2019. 131p. Dissertação (Mestrado em Sistema de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle qualiquantitativo do escoamento superficial urbano**. 2011. 161p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CANHOLLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 304 p.

CHEN, J. et al. **Evaluation of the effectiveness of green infrastructure on hydrology and water quality in a combined sewer overflow community**. *Science of the Total Environment*, v. 665, p. 69–79, 2019.

CHUI, Ting Fong May; LIU, Xin; ZHAN, Wenting. **Assessing cost-effectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events**. *Journal of hydrology*, v. 533, p. 353–364, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.011>. Acesso em 14 abr. 2025

FERRANS, P.; SILVA, J. D. R.; KREBS, P.; TEMPRANO, J. **Flood Management with SUDS: A Simulation–Optimization Framework**. *Water*, v. 15, n. 3, p. 426, 2023. DOI: 10.3390/w15030426.

FERRANS, P.; TORRES, M. N.; TEMPRANO, J.; SÁNCHEZ, J. P. R. **Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review**. *Science of The Total Environment*, v. 806, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150447.

GREGOIRE, B.G., CLAUSEN, J.C. **Effect of a modular extensive green roof on storm- water runoff and water quality**. *Ecological Engineering*, Connecticut, v. 37, p. 963-969, 17 mar. 2011.

HOEPERS, N. S.; MOURA, D. R. S.; OLIVEIRA, R. C. M. **Infraestrutura verde e azul como estratégia para a drenagem urbana: o caso de Curitiba-PR**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES, 31., 2025, Curitiba. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2025. Disponível em: <https://abes-dn.org.br>.

IPEA– Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada. **Drenagem e Manejo Sustentável de águas pluviais urbanas: que falta para o Brasil adotar?** Rio de Janeiro: Ipea, 2022. DOI: 10.38116/td2791.

KURUPPU, U.; RAHMAN, A.; RAHMAN, M. A. **Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion**. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 327, p. 1–20, 2019.

LIU, Wen et al. **Stormwater runoff and pollution retention performances of permeable pavements and the effects of structural factors**. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 24, p. 30831-30843, 2020.

MACEDO, M. B. DE et al. **Low Impact Development practices in the context of**

EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS EM ÁREAS URBANAS: ESTUDO APLICADO EM TERESINA - PI

United Nations Sustainable Development Goals : A new concept , lessons learned and challenges. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, p. 1–44, 2021.

PRZESTRZELSKA, K.; WARTALSKA, K.; ROSÍŃSKA, W.; JURASZ, J.; KAŹMIERCZAK, B.. **Climate Resilient Cities: A Review of Blue-Green Solutions Worldwide.** Water Resources Management, v. 38, p. 5885– 5910, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03950-5>.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model, User’s Manual Version 5.1. 2015.** U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH45268. September 2015.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model, Reference Manual Volume III – Water Quality. 2016.** U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH45268. September 2016.

SASAKI, Jessica Kaori. **Avaliação hidráulica e estrutural de pavimento intertravado permeável com diferentes camadas de subleito.** 2021. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas. Saneamento para todos.** V. 4. Brasília: Ministério das Cidades, 2006.

URBONAS, B.; STAHERE, P. **Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1993.

QI, W.; MA, C.; XU, H.; XU, K.; LIAN, J. **Flood mitigation performance of low impact development practice in a coastal city from the perspective of catchment scale.** Journal of Hydrology, v. 649, p. 132466, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132466>.

XIE; NING; AKIN, M.; SHI, X. **Permeable Concrete Pavements: A review of environmental benefits and durability.** Journal of Cleaner Production, v. 210, 1605-1621, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>

CHU, L.; FWA, T. F. **Evaluation of surface infiltration performance of permeable pavements.** Journal of Environmental Management, v. 238, p. 136–143, 2019.

ZHANG, Ying; XU, Hongliang; LIU, Honglei; ZHOU, Bin. **The application of low impact development facility chain on storm rainfall control: a case study in Shenzhen, China.** Water, Basel, v. 13, n. 23, p. 1-16, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13233375>.

ZHU, Y. et al. **Permeable pavement design framework for urban stormwater management considering multiple criteria and uncertainty.** Journal of Cleaner Production, v. 293, n.126114, p.1-16, 2021