

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PATO BRANCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

DJULIANA ANTONIA RIBAS

**COMPARAÇÃO DE MODELAGEM SWMM COM OBSERVAÇÃO DE MÓDULOS
EXPERIMENTAIS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS (TIPO C)**

PATO BRANCO

2023

DJULIANA ANTONIA RIBAS

**COMPARAÇÃO DE MODELAGEM SWMM COM OBSERVAÇÃO DE MÓDULOS
EXPERIMENTAIS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS (TIPO C)**

**Comparison of SWMM modeling with observation of experimental modules of
permeable pavements (Type C)**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil -
PPGEC, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro.

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco**



DJULIANA ANTONIA RIBAS

**COMPARAÇÃO DE MODELAGEM SWMM COM OBSERVAÇÃO DE MÓDULOS EXPERIMENTAIS DE
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS (TIPO C)**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 30 de Agosto de 2023

Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Daniel Costa Dos Santos, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Murilo Cesar Lucas, Doutorado - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 05/09/2023.

AGRADECIMENTOS

Gratidão é o sentimento que define este momento. Agradeço primeiramente a Deus por possibilitar que tudo isso acontecesse, ao longo dessa jornada.

Agradeço a todos, minha família, parentes, colegas e amigos por acreditar e incentivar a minha trajetória e, assim chegar a conclusão do meu curso.

Gostaria de deixar meu reconhecimento e gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro, pela sabedoria, paciência e compreensão com que me guiou nesta trajetória.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) com auxílio financeiro do Projeto CNPq Universal nº 429750/2018-8, chamada MCTIC/CNPq nº 28/2018.

Agradecimento ainda à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus de Pato Branco pelo apoio recebido pela secretaria e coordenação do curso Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo” (Albert Einstein).

RESUMO

Em decorrência do crescimento desordenado das cidades, a impermeabilização do solo é um dos principais fatores de alteração do ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica. O aumento da velocidade e do volume do escoamento superficial tende a tornar os sistemas de drenagem tradicionais ineficientes. Aderência a práticas sustentáveis de gestão de águas pluviais, também conhecidas como low impact development (LIDs), uma aplicação crescente em áreas com altas taxas de urbanização. Nessa perspectiva, esta pesquisa tem como objetivo simular o comportamento de sistemas de drenagem de pavimentos permeáveis intertravados, convencional e poroso do Tipo (C). Foram desenvolvidos dois módulos experimentais no campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – PB, um para o pavimento tradicional e outro para o pavimento poroso, possibilitando monitoramento dos dados observados e simulados. Para a modelagem dos sistemas de drenagem, o software Storm Water Management Model (SWMM) foi utilizado. O monitoramento dos módulos foi realizado por meio de dados fornecidos pela Estação Meteorológica Parque Tecnológico de Pato Branco - PR. O estado do modelo SWMM é composto por sub-bacias equivalentes, nó, tubulação e unidade de armazenamento, para os pavimentos permeáveis tradicionais e porosos foi utilizado o Editor LID, proposto pelo SWMM. Para melhor entendimento do comportamento hidráulico do modelo proposto foi realizada calibração e validação pelo Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), Percentual de Viés (PBIAS), Erro Médio Absoluto (EMA) e a Razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos (RSR). A validação do modelo indica resultados satisfatórios para as métricas, com variação NSE de 0,69 a 0,97, PBIAS de -0,57 a 15,22, EMA de 0,79 a 3,35 e para RSR de 0,16 a 0,56. O software SWMM é uma ferramenta que simular o comportamento hidráulico de sistemas de drenagem, podendo ser aplicado no planejamento, dimensionamento e na tomada de decisão por gestores públicos e privados.

Palavras-chave: Inundação Urbana; Desenvolvimento Sustentável; Monitoramento Hidrológico.

ABSTRACT

Due to the disorderly growth of cities, soil sealing is one of the main factors in altering the hydrological cycle of a river basin. The increase in the speed and volume of surface runoff tends to make traditional drainage systems inefficient. Adherence to sustainable stormwater management practices, also known as low impact development (LIDs), a growing application in areas with high rates of urbanization. From this perspective, this research aims to simulate the behavior of permeable, conventional and porous Type (C) interlocking pavement drainage systems. Two experimental modules were developed on the campus of the Federal Technological University of Paraná – PB, one for traditional pavement and the other for porous pavement, enabling monitoring of observed and simulated data. For modeling drainage systems, the Storm Water Management Model (SWMM) software was used. The monitoring of the modules was carried out using data provided by the Pato Branco Technological Park Meteorological Station - PR. The state of the SWMM model is composed of equivalent sub-basins, node, pipe and storage unit. For traditional permeable and porous pavements, the LID Editor, proposed by SWMM, was used. To better understand the hydraulic behavior of the proposed model, calibration and validation were carried out using the Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (NSE), Percentage of Bias (PBIAS), Mean Absolute Error (EMA) and the Ratio between the mean squared error and the deviation standard of measured data (RSR). Model validation indicates satisfactory results for the metrics, with NSE variation from 0.69 to 0.97, PBIAS from -0.57 to 15.22, EMA from 0.79 to 3.35 and for RSR from 0.16 to 0.56. The SWMM software is a tool that simulates the hydraulic behavior of drainage systems, and can be applied in planning, sizing and decision-making by public and private managers.

Keywords: Urban Flooding; Sustainable development; Hydrological Monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Histórico das águas pluviais.....	14
Figura 2 - Estruturas de microdrenagem. (1) sarjeta, (2) boca de lobo, (3) ramal de ligação, (4) poço de visita e (5) galeria de água pluvial.....	18
Figura 3 - Aumento do escoamento superficial pós-ocupação.....	20
Figura 4 - Alternativas de aplicação LID.....	25
Figura 5 - Projeto de instalação de pavimento permeável	28
Figura 6 - Tipos de infiltração para sistema de pavimento permeável	29
Figura 7 - Estrutura Editor LID EPA-SWMM.....	32
Figura 8 - Mapa localização	41
Figura 9 - Mapa de localização dos módulos experimentais.....	42
Figura 10 - Mapa de localização dos módulos experimentais.....	44
Figura 11 - Corte transversal dos módulos experimentais	44
Figura 12 - Materiais utilizado nos sistemas de pavimento permeável	45
Figura 13 - Imagem frontal dos módulos experimentais.....	52
Figura 14 - Imagem lateral dos módulos experimentais.....	52
Figura 15 - Modelo computacional SWMM	55
Figura 16 – Simulação do modelo (Leve intensidade) dos PPC e PPP dos dias 19/10/2022 para (a) e (b) e, 12/11/2022 para (c) e (d), respectivamente.	58
Figura 17 - Simulação do modelo (Média intensidade) dos PPC e PPP dos dias 06/10/2022 para (a) e (b) e, 19/12/2022 para (c) e (d), respectivamente.	58
Figura 18 - Simulação do modelo (Alta intensidade) dos PPC e PPP dos dias 29/10/2022 para (a) e (b) e, 01/12/2022 para (c) e (d), respectivamente.	59
Figura 19 - Simulação dos modelos PPC e PPP dos dias 14/02/2023 para (a) e (b) (Leve intensidade); 18/01/2023 para (c) e (d), e 03/02/2023 para (e) e (f) (Média intensidade) e; 19/01/2023 para (g) e (h) (Alta intensidade), respectivamente.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases histórica da drenagem urbana.....	19
Tabela 2 - Consequências negativas causadas por chuvas e temporais no Brasil em 2022	21
Tabela 3 - Estudos atuais sobre o impacto da urbanização na hidrografia	22
Tabela 4 - Parâmetros dos pavimentos permeáveis Editor LID	33
Tabela 5 - Parâmetros modelo EPA-SWMM.....	35
Tabela 6 - Principais parâmetros de entrada do pluviômetro	36
Tabela 7 - Parâmetros de sensibilidade	38
Tabela 8 - Estudos referentes a sensibilidade, calibração e validação de práticas LID	39
Tabela 9 - Parâmetros de construção do modelo EPA-SWMM.....	47
Tabela 10 - Parâmetros do Editor LID para pavimentos permeáveis	48
Tabela 11 - Classificação da precipitação por intensidade	49
Tabela 12 - Características dos materiais	53
Tabela 13 - Características do monitoramento dos eventos de chuva.....	54
Tabela 14 - Características construtivas dos módulos experimentais.....	54
Tabela 15 – Valores do modelo inicial dos parâmetros (Editor LID).....	55
Tabela 16 – Intervalo de calibração dos modelos	57
Tabela 17 – Ajustes dos parâmetros sensíveis para calibração dos modelos	57
Tabela 18 – Valores das métricas de desempenho dos modelos de calibração.....	60
Tabela 19 - Valores das métricas de desempenho dos modelos de validação.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMPs	Best Management Practices
EA	Erro Absoluto
EMA	Erro Médio Absoluto
EPA	Environmental Protection Agency
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
LID	Low Impact Development
MSE	Erro quadrático médio
NBR	Norma Brasileira
NSE	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
PBIAS	Percentual de Viés
PI	Índice de desempenho
R ²	Coefficiente de Determinação
RPD	Diferença percentual relativa
RSR	Razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos
SUDS	Sustainable Urban Drainage Systems
SWMM	Storm Water Management Model
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WI	Índice de concordância de Willmott
WSUD	Water Sensitive Urban Design

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Geral	16
2.2	Específicos	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1	Mudanças climáticas e o Impacto do Crescimento Urbano	17
3.1.1	Drenagem Urbana	17
3.1.2	Cenário Atual.....	19
3.2	Alternativas sustentáveis para drenagem urbana.....	23
3.3	Desenvolvimento de baixo impacto (LID)	24
3.4	Pavimentos permeáveis.....	26
3.5	Modelagem computacional EPA-SWMM	30
3.5.1	EPA-SWMM em sistemas LID.....	31
<u>3.5.1.1</u>	<u>Parâmetros SWMM para Pavimentos permeáveis</u>	<u>32</u>
3.5.2	Propriedades e parâmetros do modelo EPA-SWMM	34
3.5.3	Precipitação EPA-SWMM.....	36
3.5.4	Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	Local de estudo	41
4.2	Dimensionamento hidráulico e mecânico	42
4.3	Montagem dos módulos experimentais	43
4.4	Caracterização dos materiais	45
4.5	Monitoramento.....	46
4.6	Simulação EPA-SWMM	46
4.6.1	Estado do Modelo Computacional.....	46
4.6.2	Parâmetros Editor LID.....	47
4.6.3	Precipitação.....	49
4.7	Calibração e Validação	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	Módulos Experimentais	52
5.2	Características dos materiais.....	53
5.3	Monitoramento.....	54
5.4	Construção do modelo computacional SWMM.....	54

5.5	Calibração	56
5.6	Validação.....	60
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS.....	64
	ANEXO A – VALORES DAS SIMULAÇÕES DOS EVENTOS DE CALIBRAÇÃO.....	72

1 INTRODUÇÃO

A drenagem de águas pluviais é um fenômeno que se forma naturalmente e, historicamente, da forma os recursos hídricos, permite altas taxas de infiltração de água no solo, evaporação e abastecimento de águas superficiais e subterrâneas. Com o passar do tempo e o avanço do ser humano nos espaços naturais, muitos dos cenários de drenagem natural são alterados e passam a ser drenagem urbana.

O crescimento populacional aumenta essa intensificação e a incorporação de sistemas de drenagem nos espaços urbanizados, trazendo um conceito chamado drenagem urbana tradicional. A drenagem urbana tradicional, por muito tempo passa a ganhar notoriedade, principalmente na fase de maior crescimento e desenvolvimento das cidades. Por outro lado, o crescimento desordenado das cidades, decorrente nos últimos séculos, traz grandes desafios para a drenagem urbana, uma vez que a ocupação das áreas urbanas continua se intensificando.

No ritmo atual, a estimativa é que a população urbana passe de 56% do total global em 2021 para 68% em 2050 (Nações Unidas Brasil, 2022). No Brasil, de acordo com dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) 2015 a maior parte da população brasileira, 84,72%, vive em áreas urbanas, já 15,28% dos brasileiros vivem em áreas rurais (IBGE 2023).

Para Miguez, Resende e Veról (2015), o processo de urbanização dos últimos 200 anos, aliados ao uso inadequado do solo proporcionou um aumento das superfícies impermeáveis, influenciando na capacidade de retenção natural de água e, conseqüentemente, maiores vazões de pico e volumes de escoamento. Misra (2011), afirma que a impermeabilização urbana leva não só para reduzir a taxa de infiltração, mas também aumenta os volumes de escoamento direto, além de criar obstruções ao ciclo hidrológico ao perturbar os processos de evaporação e transpiração.

São várias as ligações diretas e indiretas entre a urbanização e o meio ambiente, dentre elas a degradação, pois cada vez mais as pessoas dependem dos recursos naturais disponíveis, o abastecimento de água, saneamento e drenagem afetam severamente os recursos hídricos e aumenta a pressão sobre a hidrologia urbana (MISRA, 2011). A Figura 1, traz de forma simplificada o ciclo histórico da drenagem das águas pluviais, desde a drenagem natural até os impactos causados pelo ser humano na drenagem urbana e, como hoje, a drenagem natural adaptada

para os centros urbanos se tornou a melhor opção de um desenvolvimento sustentável para as cidades.

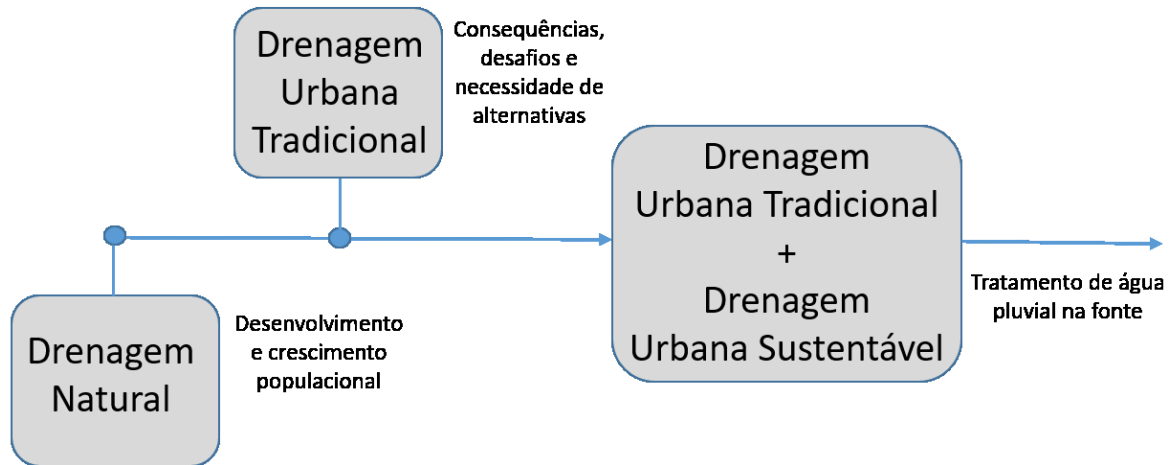


Figura 1 – Histórico das águas pluviais
Fonte: Autoria própria.

Os projetos tradicionais para controle de enchentes, principalmente referente à canalização, conduzem ao aumento de vazão resultante e oferecem maior capacidade de descarga do sistema de drenagem, que por sua vez tem sido projetado para enfrentar os problemas de enchentes urbanas e equacionar as consequências esperadas, não procurando realmente mitigar as causas (MIGUEZ et al., 2012).

Nos últimos anos, a drenagem urbana tradicional trouxe impactos e consequências nada positivas. Pois, as falhas dos sistemas de drenagem urbana propiciam prejuízos às pessoas, propriedades e infraestrutura, afeta diretamente os serviços públicos, agrava os problemas de saúde pública e circulação de bens e pessoas (LOURENÇO et al., 2020).

Tais falhas afetam 170 milhões de pessoas anualmente e, se não forem tratadas adequadamente, podem levar a impactos socioeconômicos graves e até irreparáveis, pois somente em 2016, as inundações causaram 4.731 mortes e 60 bilhões de dólares em danos em todo o mundo Azari (2022).

Para tanto, nas últimas décadas a gestão de águas pluviais vem recebendo novos olhares, sendo direcionada a uma nova perspectiva de técnicas alternativas que proporcionam menos impacto à sociedade e ao meio ambiente. Com objetivo de alcançar maior controle e eficiência dos sistemas de drenagem urbana, notadamente conceitos como o low impact development (LID, desenvolvimento de baixo impacto) estão sendo cada vez mais aplicadas.

As práticas LID, trazem como objetivo principal a redução do escoamento, atraso nos fluxos de pico e mitigação na poluição de fonte não pontual (LI et al., 2019). Miguez, Resende e Veról (2015) ressaltam ainda, o LID como um princípio de preservar e recriar características da paisagem natural, minimizar as áreas impermeáveis e criar locais funcionais e atraentes que tratam as águas pluviais como um recurso e não como um desperdício. Dessa forma, os sistemas LID são ferramentas que aplicados corretamente auxiliam a integração sustentável e o controle das águas pluviais ainda na fonte.

Um número limitado de estudos investigou os benefícios abrangentes das instalações de LID e a otimização das combinações de LID (LI et al., 2019). Dentre as diversas alternativas de sistemas LID está o pavimento permeável, conhecido por sua fácil adaptação com o ambiente em superfícies que necessitam de pavimentação.

De acordo com Madrazo et al. (2021), o pavimento permeável é caracterizado por gerar uma superfície porosa, ao mesmo tempo, acessível para pessoas e veículos, consistem em várias camadas, sendo a camada superficial de pavimento permitindo que a água flua. Para obter maior controle do funcionamento e eficiência dos sistemas de drenagem é utilizada a modelagem computacional, e um software desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA) é o Storm Water Management Model (SWMM).

Atualmente, o SWMM é um dos melhores modelos para estudos de sistemas de drenagem, que tem sido amplamente utilizado em muitos países, pode simular dinamicamente todo o processo de chuva-escoamento urbano, incluindo escoamento superficial, transporte de tubos de drenagem e confluência de água, quantidade e qualidade da água (ZHU et al., 2019).

Com intuito de contribuir cientificamente com a compreensibilidade dos sistemas de drenagem sustentáveis, auxiliando na tomada de decisões eficazes e no planejamento de espaços urbanos, foi desenvolvido um sistema de pavimento permeável Tipo C, aplicado a pavimentos de blocos de concreto intertravados convencional e poroso, em que são calibrados e validados a partir de dados realizado em simulações no modelo SWMM.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo dessa pesquisa é melhorar a compreensão do escoamento superficial e a descarga de fundo de pavimentos permeáveis Tipo C, revestidos com blocos de concreto intertravados convencionais e porosos, modelados no SWMM com observações em campo.

2.2 Específicos

- Caracterizar os materiais utilizados para confecção dos módulos experimentais de pavimento permeável convencional e poroso do Tipo C;
- Realizar a modelagem SWMM dos pavimentos permeáveis Tipo C;
- Calibrar as simulações da modelagem computacional dos pavimentos permeáveis do Tipo C;
- Validar as simulações do modelo aplicado os parâmetros calibrados;
- Comparar o funcionamento e desempenho entre os tipos de pavimentos permeáveis aplicados à simulação.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Mudanças climáticas e o Impacto do Crescimento Urbano

A industrialização no século XIX moldou a maioria das cidades, um processo sustentado pela crença de que a natureza estaria sujeita às necessidades do crescimento econômico, considerando que a natureza poderia absorver indefinidamente as mudanças impostas pela urbanização (LOURENÇO et al., 2020).

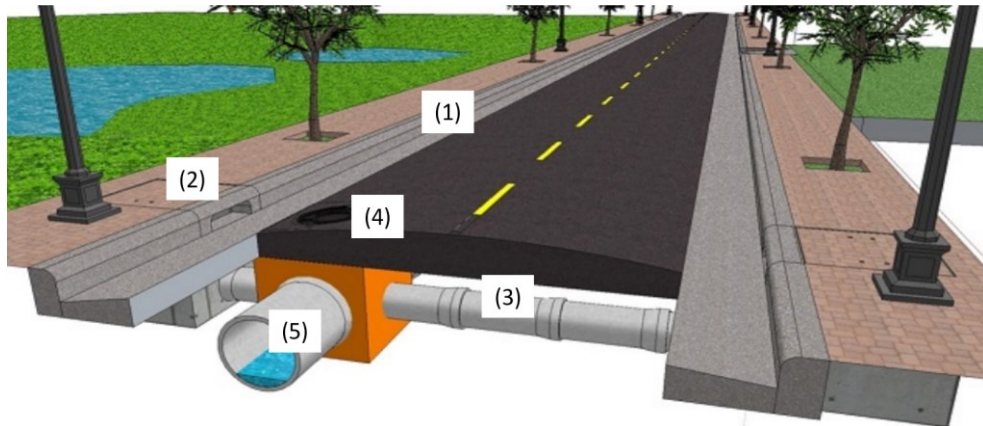
Os modelos climáticos projetam consistentemente que a frequência, a gravidade e a duração dos extremos hidroclimáticos aumentarão ao longo deste século sob as mudanças climáticas (GRAY, ZHAO e STILLWELL, 2023). Para Pokhrel et. al (2023), os sistemas hídricos convencionais já estão enfrentando desafios de aumento da população, infraestrutura envelhecida e incidentes de mudança climática.

Gray, Zhao e Stillwell (2023), afirmam que as inundações e escoamentos urbanos em geral tornaram-se problemas importantes para muitas cidades e regiões, decorrentes de uma combinação de padrões alterados de precipitação, crescimento urbano, desenvolvimento em planícies aluviais e aumento de superfícies impermeáveis. Entender as causas e indicadores de mudanças climáticas auxiliam a garantir maior segurança ao homem e a reduzir os impactos ambientais.

3.1.1 Drenagem Urbana

A drenagem urbana necessita de uma mudança de paradigma em direção à gestão integrada da água, sustentada pelo conceito de avaliação do desempenho dos sistemas integrados de água, de modo a gerenciar os sistemas de água urbana de forma holística (Pokhre et. Al, 2023).

Tradicionalmente, a drenagem urbana são medidas de controle do escoamento na microdrenagem, consiste em drenar a água através de condutos pluviais até um coletor principal ou córrego urbano, porém esse tipo de solução acaba transferindo o aumento e a velocidade do escoamento para a jusante, que acaba provocando inundações nos troncos ou na macrodrenagem (TUCCI, 2005). A Figura 2 apresenta a estrutura tradicional de um sistema de drenagem.



**Figura 2 - Estruturas de microdrenagem. (1) sarjeta, (2) boca de lobo, (3) ramal de ligação, (4) poço de visita e (5) galeria de água pluvial.
Fonte: Moraes (2015).**

O uso inadequado e a falta de técnicas ao utilizar as estruturas hídricas tornou-se um dos maiores problemas das cidades e, partindo de necessidades, o objetivo de transportar o mais rápido possível às águas pluviais e esgotos para longe do contato com as pessoas das áreas urbanas, tal que a canalização e os bueiros tornaram-se uma solução frequente nos sistemas de drenagem (MIGUEZ et al., 2012). Para tanto, são usadas medidas estruturais, que por sua vez, modificam o sistema, buscando reduzir o risco de enchentes, pela implantação de obras para conter, reter ou melhorar a condução dos escoamentos, envolvem construção de barragens, diques, canalizações, reflorestamento, entre outros (SUDERHSA, 2002).

Durante muito tempo, o problema das inundações urbanas foi tratado sem necessariamente conectar questões de controle de uso do solo, essa visão direcionou soluções de engenharia para transportar rapidamente os crescentes fluxos pós-urbanização, com o objetivo de aumentar a capacidade dos sistemas de drenagem, essa abordagem tem uma premissa intrinsecamente insustentável (MIGUEZ; RESENDE; VERÓL, 2015). O aumento da capacidade de vazão do escoamento superficial direcionados para os mananciais hídricos, a nível local, afeta não somente a qualidade da água, devido aos resíduos e sedimentos poluentes carregados durante o trajeto, mas também o ecossistema aquático e terrestre ribeirinho, enchentes a jusante, podendo causar ainda, erosão e assoreamento do recurso hídrico.

Para Tucci (2005), historicamente, a gestão de águas pluviais é dividida por fases, Tabela 1, sendo marco histórico da drenagem urbana desde o início da urbanização até a atualização.

Tabela 1 - Fases histórica da drenagem urbana

Anos	Período	Característica
Até 1970	Higienista	Abastecimento de água sem tratamento de esgoto, transferência para jusante do escoamento pluvial por canalização.
1970 - 1990	Corretivo	Tratamento de esgoto, amortecimento quantitativo da drenagem e controle do impacto existente da qualidade da água pluvial. Envolve principalmente a atuação sobre os impactos.
1990 - Atual	Sustentável	Planejamento da ocupação do espaço urbano, obedecendo aos mecanismos naturais de escoamento; controle dos micro poluentes e da poluição difusa, e o desenvolvimento sustentável do escoamento pluvial por meio da recuperação da infiltração.

Fonte: Adaptado de TUCCI, 2005.

Para Christofidis et. al (2019), a drenagem urbana tradicional caracterizava-se até 1990, com objetivo de coleta e afastar imediatamente as águas pluviais para jusante, essa cultura causou a elevação do pico de cheias nos cursos de água e a diminuição do tempo de concentração, agravando a situação das cidades, dos cidadãos e das águas, pelas características das soluções parciais que resultam em inúmeros problemas intersetoriais.

Os princípios do desenvolvimento sustentável nas águas pluviais abrangem várias iniciativas: recuperação ou manutenção das funções naturais do escoamento pluvial como a infiltração, ravinamento natural desenvolvido pelo escoamento, redução das fontes de poluição difusas, envolve ainda, a integração entre o projeto de implantação no espaço, o projeto arquitetônico e as funções da infraestrutura de água em um ambiente urbanizado, e não apenas a busca de espaço de infiltração dentro do design de um projeto (TUCCI, 2005). Ou seja, a fase da drenagem sustentável propõe um tratamento das águas pluviais ainda na fonte, com intuito de reduzir a contaminação e o escoamento superficial lançado para a rede tradicional de drenagem.

3.1.2 Cenário Atual

Com o crescimento das áreas urbanas, há também mudanças significativas nas propriedades físicas da superfície terrestre, aumentando a vulnerabilidade integrada dos habitantes, terras agrícolas e sistemas de suporte à vida ecológica (NIEMCZYNOWICZ, 1999). A urbanização gera grandes impactos no uso e ocupação do solo, modifica as paisagens e a hidrografia local, apesar do tema ser denotado há muito tempo é importante buscar atualização constante. A Figura 3 apresenta um

comparativo dos efeitos hidrológicos entre áreas de drenagem natural e áreas urbanizadas.



Figura 3 - Aumento do escoamento superficial pós-ocupação
Fonte: Adaptado de (WOODS-BALLARD et al., 2015).

SUDERHSA (2002) assegura que as alterações da cobertura vegetal provocam efeitos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural, à medida que a bacia é urbanizada e a densificação consolidada, são introduzidos vários elementos antrópicos que atuam sobre o ambiente, geram redução da infiltração de água no solo, aumento das vazões, antecipando seus picos no tempo, rebaixamento dos lençóis freáticos e águas subterrâneas, redução da evapotranspiração, causando efeitos favoráveis a inundações.

Em razão do aumento de superfícies pavimentadas, infiltração diminuem, e o escoamento superficial acelera, a canalização de riachos naturais resulta em altos picos de fluxo, essas mudanças de regime natural em uma área comparativamente pequena de uma cidade trazem mudanças significativas e muitos efeitos em toda a bacia hidrográfica a jusante (NIEMCZYNOWICZ, 1999).

A crescente alteração no uso e cobertura do solo, bem como, mudanças climáticas relacionadas às emissões de gases de efeito estufa reforça o desafio urgente de adaptar nas cidades a infraestruturas mais verdes, pois a maior parte da população mundial vive em áreas urbanas (MOURA; PELLEGRINO; MARTINS, 2014). A Tabela 2 traz alguns impactos ocorridos no Brasil em 2022, causado por temporais e chuvas extremas, devido principalmente a mudanças climáticas, uso e ocupação do solo.

Tabela 2 - Consequências negativas causadas por chuvas e temporais no Brasil em 2022

LOCAL	DATA	SITUAÇÃO/OBSERVAÇÃO	AUTOR/ANO
Castelo, Ibatiba e Guaçuí - ESPÍRITO SANTO	Janeiro de 2022	Situação de Emergência: evacuação da população em locais de risco, pessoas precisaram sair de suas casas devido ao aumento do nível dos rios, estradas com circulação comprometida. De acordo com a Defesa Civil, 789 pessoas ficaram desalojadas e 159 desabrigadas no estado.	Rodrigues/2022
Petrópolis - RIO DE JANEIRO	Fevereiro de 2022	Situação de Emergência: forte chuva atingiu o município, totalizando 259,8mm em 24 horas, provocando enchentes, deslizamentos, 240 mortes e mais de 8 mil famílias desalojadas.	Puente, Brasil e Alpaca/2022
SANTA CATARINA	Maio de 2022	Situação de Emergência: as chuvas que atingiram o estado de Santa Catarina causaram estragos em mais de 90 municípios entre alagamentos, deslizamentos e quedas de muros e árvores. Mais de 400 pessoas tiveram que deixar suas casas, 170 ficaram desabrigadas e 2 pessoas morreram.	Caldas e Bridi/2022
RIO GRANDE DO NORTE, PERNAMBUCO E ALAGOAS	Julho de 2022	Situação de Emergência: chuvas causam deslizamentos e enchentes, deixam mais de 73 mil pessoas desalojadas ou desabrigadas, em Pernambuco entre fim de maio e início de julho ocasionou a morte de 130 pessoas.	Coutinho/2022
PARANÁ	Outubro de 2022	Situação de Emergência: 24 cidades do sudoeste do Paraná foram afetadas por temporais, enxurradas e alagamentos. Cerca de 455 casas foram danificadas, 151 pessoas ficaram desabrigadas, 1,2 mil desalojadas e 7 pessoas perderam a vida por conta das chuvas.	G1 PR e RPC Foz do Iguaçu/2022
BAHIA	Novembro de 2022	Fortes chuvas deixam rastros de destruição no sul da Bahia, mais de 20 mortes, milhares de desabrigados e cidades inteiras alagadas.	Souza/2022

Fonte: Autoria própria.

Por mais tecnológica que seja a época em que vivemos estar em constantes atualizações e melhorar o desenvolvimento dos centros urbanos ainda é um desafio atual. Para tanto, a Tabela 3, refere-se a estudos dos impactos da urbanização sobre as bacias hidrográficas.

Tabela 3 - Estudos atuais sobre o impacto da urbanização na hidrográfia

Autor	Local	Período	Objetivo	Resultados	Conclusões
Belihu et al., 2020	Bacia Hidrográfica do Alto Gidabo, Etiópia. Área de 539,6 km ² .	2000 a 2018	Avaliar os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra.	Aumento de 28,7% da área urbana. Aumento no escoamento superficial em 9,2%. Aumento da evapotranspiração em 1,7%.	Quantificar e abordar a sustentabilidade dos recursos hídricos é necessário para planejadores e gestores aplicarem política em relação ao ordenamento do uso da terra e da água na bacia hidrográfica, para sustentar os recursos hídricos.
Lei e Zhu, 2018	Bacia do Rio Huron, sudeste de Michigan, EUA. Área de 2350 km ² .	1992 a 2011	Investigar influências da mudança de uso e cobertura do solo e precipitação em mudanças espaço-temporal em fluxos extremos.	Aumento da urbanização de 8 % para 16%. Aumento da vazão média de 0,21 m ³ /s para 1,64 m ³ /s.	A crescente vazão do córrego indica que a bacia hidrográfica do rio Huron sofreu problemas potenciais no fluxo do córrego, elevando o potencial de inundação nas sub-bacias.
Pabi, Egyir e Actua, 2021	Bacia hidrográfica do Rio Odaw, Região de Accra, Gana Área de 24.257,16 ha.	2000 a 2020	Simular os picos de escoamento e vazão de água para uso e cobertura do solo em cenários de intensidade de chuvas	As áreas impermeáveis se expandiram de 40% em 2000 para 65% em 2020 Áreas de vegetação, tiveram intensa redução Relação positiva entre pluviosidade em intensidade e picos de escoamento e vazões	As atividades de uso da terra que removem a cobertura vegetal e promovem superfícies impermeáveis devem ser regulamentadas dentro da bacia hidrográfica. A alta intensidade das chuvas, o aumento da área urbanas e os longos períodos de retorno aumentam o escoamento e a vazão.
Younis e Ammar, 2018	Bacia hidrográfica do Rio Indo, Paquistão Área de 6812,40 km ²	2000 a 2010	Quantificar os impactos da mudança de uso do solo por um período de 10 anos na vazão de um córrego.	A área urbanizada na bacia aumentou de 8,2% em 2000 para 13,76% em 2010. A vazão de escoamento aumentou em 33,61% do ano 2000 a 2010.	À medida que a área urbanizada aumenta de 2000 a 2010, também aumenta a descarga, confirmando que a mudança de uso e cobertura do solo afetaram o valor de descarga de uma área de bacia hidrográfica.

Fonte: Autoria própria.

Em uma pesquisa de revisão de situação e causas de inundações Liu et al., (2022), destaca que no período de 20 anos entre 2000 e 2019, houve em média 367 eventos de desastres a cada ano, em todo o mundo, a maioria dos quais foram

inundações e tempestades (representam 44% e 28%, respectivamente). Análises estatísticas indicaram ainda que, entre 2000 e 2018, as populações das cidades do mundo com 500.000 habitantes ou mais cresceram a uma taxa média anual de 2,4%, alterando rapidamente bacias hidrográficas naturais para bacias hidrográficas artificiais, em decorrência da urbanização (LIU et al., 2022).

3.2 Alternativas sustentáveis para drenagem urbana

Considerando o aumento da demanda e sobrecarga na infraestrutura de drenagem e controle de enchentes, as melhores práticas de gestão de águas pluviais devem ser examinadas como uma possibilidade técnica, quando comparados com soluções convencionais (MOURA; PELLEGRINO; MARTINS, 2014). Sustentabilidade e resiliência são conceitos relacionados, aspectos como ordenamento do uso do solo e ocupação urbana, tamanho e forma das edificações, densidade populacional, sistemas de infraestrutura e organização sistemática de espaços abertos e verdes são aspectos fundamentais que influenciam o resultado futuro de uma cidade (LOURENÇO et al., 2020).

Um sistema de drenagem urbana sustentável deve ser capaz de acompanhar o processo de desenvolvimento da cidade, mantendo sua funcionalidade, considerando as alterações naturais das bacias hidrográficas (MIGUEZ; RESENDE; VERÓL, 2015). As alterações climáticas implicam vários desafios para o ambiente construído, porque a infraestrutura urbana de drenagem e controle de enchentes já atingiu ou está próxima de seu limite, a intensificação prevista de eventos de chuvas extremas deve criar uma demanda maior e sem precedentes na gestão de águas pluviais (MOURA; PELLEGRINO; MARTINS, 2014).

O conceito de sustentabilidade na drenagem urbana implica considerar uma abordagem integrada, onde as inundações urbanas não podem ser transferidas e os sistemas de drenagem devem ser planejados em estreita sintonia com o crescimento urbano, permitindo a recarga das águas subterrâneas e buscar a restauração das condições aproximadas de fluxo natural antes da urbanização (MIGUEZ et al., 2012).

Na gestão de águas pluviais urbanas o desenvolvimento e uso da terminologia se deram de forma informal, impulsionada por perspectivas, entendimentos e contextos locais e regionais, sendo usados para definir conceitos semelhantes em

diferentes partes do mundo, potencialmente levando a sobreposição, contradições e confusão (FLETCHER et al. 2014).

As práticas de drenagem sustentável estão presentes em diversos países, para tanto, recebe termos diferentes como, melhores práticas de gestão (BMPs), desenvolvimento de baixo impacto (LID), sistema de drenagem urbana sustentável (SUDS), desenho urbano sensível à água (WSUD), dentre outros. Embora a terminologia evolua em resposta às mudanças nas práticas de drenagem urbana, a abordagem mais sustentável profissional e social desempenha papel importante na condução, influência e evolução dessa prática orientada, portanto, autores e profissionais devem ser explícitos e específicos ao descrever os termos, para que o público entenda seu significado e contexto (FLETCHER et al. 2014).

Diversas alternativas têm sido desenvolvidas nas últimas décadas para soluções sustentáveis em projetos de drenagem urbana, tentando recuperar as características naturais do ciclo hidrológico, agregando valor para a própria cidade, para tanto, é importante entender como esses conceitos evoluíram para usar seu potencial no processo de desenvolvimento da cidade (MIGUEZ; RESENDE; VERÓL, 2015).

3.3 Desenvolvimento de baixo impacto (LID)

Os sistemas de desenvolvimento de baixo impacto é um método cada vez mais popular para reduzir os efeitos hidrológicos e efeitos da urbanização na qualidade da água (ZHU e CHEN, 2017). A inclusão de técnicas LID é um conceito de gestão de águas pluviais urbana na construção de cidade esponja, que pode efetivamente aliviar as inundações urbanas, reduzir a poluição de fontes não pontuais e promover o uso de recursos de águas pluviais, com o objetivo de manter, tanto quanto possível, um ciclo hidrológico regional inalterado no processo de rápido desenvolvimento da cidade (LI et al., 2019).

As técnicas LID usadas para tratamento e controle do escoamento de águas pluviais, apresentadas na Figura 4, são alternativas que permitem trabalhar a drenagem urbana ainda na fonte e de forma integrada aos espaços urbanos.



Figura 4 - Alternativas de aplicação LID
Fonte: Adaptado de US-EPA (2022).

Os sistemas de biorretenção são depressões rasas nas paisagens urbanas projetadas para coletar e tratar águas pluviais, as águas pluviais transportadas para um sistema são tratadas através de um meio filtrante de areia, barro biologicamente ativo e com vegetação densa (WATER BY DESIGN, 2014). À medida que a água percola através do meio filtrante, os poluentes são capturados por filtração fina, adsorção e processamento biológico por micróbios do solo e plantas, em seguida, descarregadas para as águas subterrâneas ou é transportada através de tubos para sistemas de drenagem a jusante (WATER BY DESIGN, 2014).

Barris e cisternas de chuva são recipientes que coletam o escoamento do telhado durante eventos de precipitação e podem liberar ou reutilizar a água da chuva

durante os períodos de seca, o armazenamento pode estar localizado acima ou abaixo do solo (US-EPA, 2022).

O telhado verde é uma camada viva que oferece a oportunidade de descoberta, absorção, filtragem, liberação, deterioração e renovação, é uma das muitas estratégias de gerenciamento de águas pluviais e pode ajudar a imitar as condições de pré-desenvolvimento em um local, a vegetação do telhado retém e filtra as águas pluviais, reduzindo conseqüentemente os picos de vazão e melhorando a qualidade das águas pluviais lançadas nos sistemas de esgoto da cidade (TOLDERLUND, 2010).

Sistema de pavimento permeável permite que a chuva passe imediatamente através do pavimento para a camada de armazenamento de cascalho abaixo, onde pode se infiltrar em taxas naturais no solo nativo do local, nos sistemas de pavimentação de blocos, a chuva é captada nos espaços abertos entre os blocos e transportada para a zona de armazenamento e solo nativo abaixo (US-EPA, 2022).

Além de medidas estruturais, as alternativas LID incluem medidas não estruturais, com layouts alternativos de estradas e edifícios para minimizar a impermeabilidade e maximizar o uso de solos e vegetação permeáveis, redução de fontes de contaminantes e programas de educação para modificar atividades (ELLIOTT, 2007).

Determinar o tipo, a área e a localização mais adequados dos LIDs é a principal preocupação relacionada ao uso de LIDs para gerenciamento de escoamento urbano (ZHU et al., 2019). Dispositivos LID enfatiza o controle local em pequena escala de fontes de águas pluviais e apesar da crescente conscientização e conhecimento desses problemas e soluções potenciais, a transição para um projeto de drenagem urbana mais sustentável tem sido lenta, podendo refletir, entre outros fatores, uma escassez de ferramentas de projeto de drenagem LID que operem efetivamente na faixa de escalas necessária (ELLIOTT, 2007).

3.4 Pavimentos permeáveis

A gestão de águas pluviais em áreas pavimentadas e superfícies de tráfego por meio de sistemas permeáveis é um elemento importante dentro de um

planejamento geral de Desenvolvimento de Baixo Impacto que busca alcançar um sistema de gerenciamento que se adapte às condições naturais (USDOD, 2004).

Os pavimentos permeáveis reduzem o escoamento pela infiltração da chuva, desde que a infiltração seja rápida o suficiente, o escoamento pode ser minimizado ou eliminado e para manter a infiltração alta, todo o sistema deve ser projetado para garantir a alta permeabilidade (SHACKEL, 2010). O pavimento permeável deve atender simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, cuja estrutura permita a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura NBR 16416 (ABNT, 2015).

O escoamento superficial percola através dos vazios dos pavimentos permeáveis e pode ser retido no leito de cascalho, infiltrado no solo subjacente ou ambos, ao reduzir o volume de escoamento, os pavimentos permeáveis ajudam a diminuir as inundações a jusante, a frequência de transbordamentos de esgoto combinado e a poluição térmica de águas sensíveis (USDOD, 2004).

De acordo com a NBR 16416, os locais revestidos com pavimentos permeáveis devem permitir a percolação de 100 % da água precipitada incidente sobre a área e áreas de contribuição consideradas no projeto NBR 16416 (ABNT, 2015). O projeto deve considerar o tipo de uso e o local de implantação, sendo que a definição dos materiais e espessuras das camadas a serem executadas deve atender simultaneamente aos dimensionamentos mecânico e hidráulico NBR 16416 (ABNT, 2015).

O pavimento permeável pode ser asfalto ou concreto, os próprios blocos de pavimentação não são necessariamente permeáveis, a infiltração ocorre nas lacunas entre os blocos, possuem as mesmas propriedades estruturais do pavimento convencional, com benefícios ambientais de redução do volume e da taxa de escoamento, filtragem de poluentes, dispersão do fluxo e recarga de águas subterrâneas (USDOD, 2004).

A camada de armazenamento deve ser constituída de materiais pedregosos de granulometria aberta, variando a peneira com abertura de malha entre 75mm e 19mm NBR 16416 (ABNT, 2015). Já a camada de assentamento se aplica apenas aos projetos de pavimento intertravado permeável ou pavimento com placas de concreto permeáveis, deve ser uniforme, constante e sua espessura deve ser especificada em projeto, podendo estar entre 20 mm e 60 mm na condição não

compactada NBR 16416 (ABNT, 2015). O material de rejuntamento aplicado aos projetos de pavimento intertravado permeável, cuja percolação de água ocorre pelas juntas alargadas ou pelas áreas vazadas entre as peças, deve ser constituído de materiais pedregoso de granulometria aberta, com preenchimento das juntas ou áreas vazadas até 5 mm abaixo do topo das peças após a compactação NBR 16416 (ABNT, 2015).

O sistema de pavimentos permeáveis adequado deve compor, basicamente, camada de armazenamento, camada de assentamento e na superfície, camada de revestimento do pavimento permeável, que pode ser intertravado convencional ou poroso, conforme apresentado na Figura 5. O pavimento permeável intertravado de concreto convencional (PPC) é composto por blocos de concreto maciço, ou seja, a percolação de água acontece apenas nas juntas. Já o pavimento permeável intertravado de concreto poroso (PPP) é similar aos blocos de concreto convencional, com a diferença de permitir a percolação de água não só nas juntas, mas também através do próprio bloco.

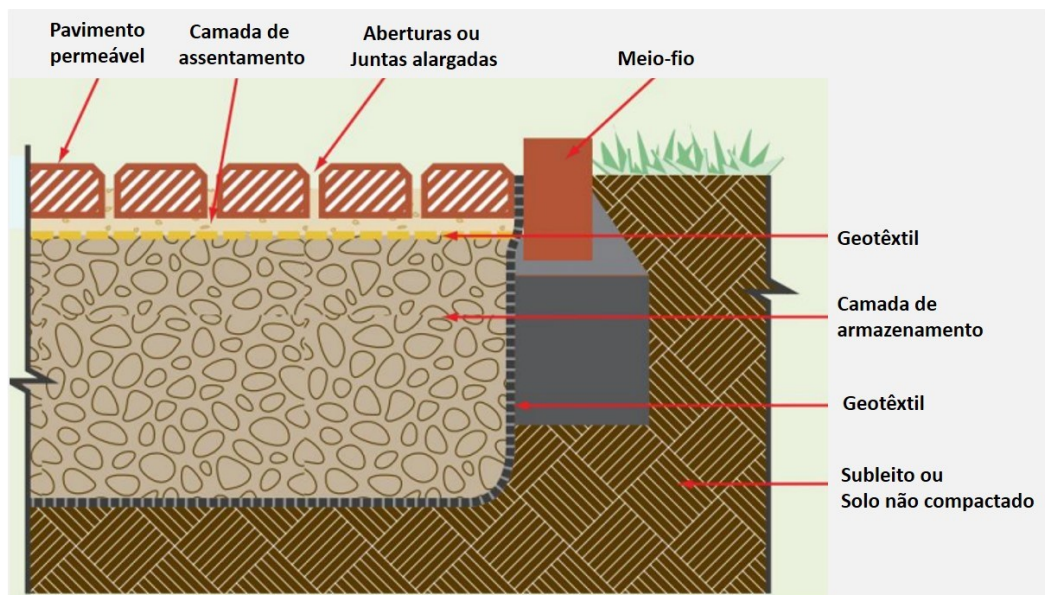


Figura 5 - Projeto de instalação de pavimento permeável
 Fonte: Adaptado de (SHACKEL, 2010).

O uso adequado de pavimentos permeáveis pode eliminar problemas com água parada, fornece recarga de água subterrânea, controlar a erosão de leitos de córregos e margens de rios, facilitar a remoção de poluentes e proporcionar um local esteticamente mais agradável (USDOD, 2004). O pavimento permeável faz parte das alternativas LID, que pode diminuir o coeficiente de escoamento superficial urbano e

a vazão de pico de inundação, o que pode efetivamente reduzir a pressão da drenagem urbana e riscos de inundação de águas pluviais (ZHU et al., 2019).

Existem três sistemas principais adequados para pavimentos permeáveis usando blocos de concreto como superfície de desgaste: sistemas Tipo A, B e C, definido por (WOODS-BALLARD et al., 2015). A estrutura dos sistemas Tipo A, B e C estão apresentados na Figura 6.

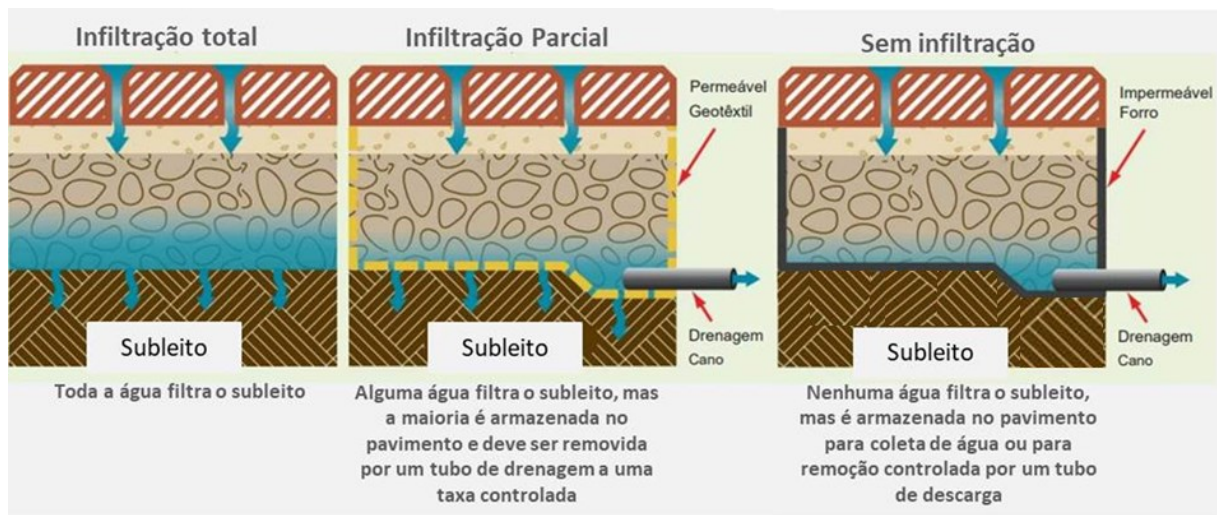


Figura 6 - Tipos de infiltração para sistema de pavimento permeável
Fonte: Adaptado de INTERPAVE (2010).

O sistema Tipo A permite que toda a água que cai no pavimento se infiltre pelas juntas ou vazios entre os blocos de concreto, passando pelas camadas construídas abaixo e eventualmente para o subleito, nenhuma água adicional do sistema é descarregada em sistemas de drenagem tradicionais, portanto, a necessidade de tubos e ravinhas é eliminada e a retenção da água ocorrerá temporariamente na camada de armazenamento (INTERPAVE, 2010).

O sistema Tipo B pode ser usado em situações onde o subleito existente pode não ser capaz de absorver toda a água, evita que o solo existente perca sua estabilidade, são conectadas tubulações de saída à camada de armazenamento permeável e permitem que o excesso de água seja escoado para outros dispositivos de drenagem (INTERPAVE, 2010).

Para o sistema do Tipo C é feita a captação completa da água por meio de uma membrana impermeável e flexível colocada no topo do nível do subleito e nas laterais da camada de armazenamento, para formar efetivamente um tanque de armazenamento, esse sistema é utilizado em situações em que o subleito existente

apresenta baixa permeabilidade ou baixa resistência e, portanto, seria danificado pela introdução de água adicional (INTERPAVE, 2010).

Após a instalação de um sistema de pavimentação permeável, a manutenção é mínima, mas absolutamente necessária para garantir a vida útil do sistema, o PPC e o PPP exigem que a superfície seja mantida limpa de materiais orgânicos, aspiração periódica e a lavagem a baixa pressão devem ser usadas para limpar os vazios e prolongar a vida útil da pavimentação (USDOD, 2004).

3.5 Modelagem computacional EPA-SWMM

Devido à falta de medidas necessárias de controle de chuvas, inundações e à natureza insustentável da gestão tradicional de inundações, os países desenvolvidos têm estudado cenários de desastres de inundações urbanas desde a década de 1970 com base nos requisitos do espaço de descarga de inundações (ZHU e CHEN, 2017). Como a extensão da infraestrutura relacionada à água em uma cidade em crescimento é constantemente complementada com novos elementos, a carga hidráulica e a função do sistema estão mudando, para prever a função hidráulica de todo o sistema torna-se necessário o uso de métodos avançados de cálculo e técnicas de modelagem (NIEMCZYNOWICZ, 1999).

O SWMM da EPA é usado em todo o mundo para planejamento, análise e projeto relacionados ao escoamento de águas pluviais, esgotos combinados e sanitários e outros sistemas de drenagem, podem ser usados para avaliar estratégias de controle de infraestrutura de águas pluviais, como tubulações e drenos pluviais, e é uma ferramenta útil para criar soluções de controle e gestão (US-EPA, 2022). Rossman (2015) afirma que, o componente de escoamento do SWMM opera em uma coleção de áreas de sub-bacia que recebem precipitação e geram escoamento e cargas poluentes, a parte de roteamento transporta esse escoamento através de um sistema de tubos, canais, dispositivos de armazenamento/tratamento, bombas e reguladores, rastreando a quantidade e a qualidade do escoamento gerado em cada sub-bacia.

O SWMM é um programa de desktop baseado em Windows, um software público de código aberto e é gratuito para uso em todo o mundo, foi desenvolvido para

ajudar a apoiar os objetivos locais, estaduais e nacionais de gestão de águas pluviais para reduzir o escoamento através da infiltração e retenção, auxiliando na redução das descargas que causam danos aos corpos d'água (US-EPA, 2022).

O SWMM fornece um ambiente integrado para editar dados de entrada da área de estudo, executar simulações hidrológicas, hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos, incluem áreas de drenagem codificadas por cores e mapas do sistema de transporte, gráficos e tabelas de séries temporais, gráficos de perfil e análises estatísticas de frequência (US-EPA, 2022).

Uma grande variedade de modelos matemáticos hidrológicos foi desenvolvida, desde modelos agrupados conceituais até modelos muito simples, dessa forma, modelos matemáticos formalizados estão se tornando ferramentas cada vez mais importantes para a gestão de recursos hídricos e avaliação de seus impactos ambientais (NIEMCZYNOWICZ, 1999).

3.5.1 EPA-SWMM em sistemas LID

Apesar do número considerável de modelos de águas pluviais que podem ser aplicados ao LID, e uma semelhança na representação de processos e interfaces de modelos sugerindo um amadurecimento do software nesta área, permanecem várias lacunas significativas nas capacidades dos modelos (ELLIOTT, 2007). O SWMM permite que engenheiros e planejadores representem combinações de práticas de infraestrutura verde como controles de desenvolvimento de baixo impacto para determinar sua eficácia no gerenciamento do escoamento (US-EPA, 2022).

O SWMM contém um conjunto flexível de recursos de modelagem hidráulica usados para direcionar escoamento e influxos externos através da rede do sistema de drenagem de tubos, canais, unidades de armazenamento/tratamento e estruturas de desvio (US-EPA, 2022).

No modelo de gestão de águas pluviais é desenvolvido um cenário LID que cumpre os objetivos de uma cidade de esponjas que não apenas imita a hidrologia do pré-desenvolvimento, mas também fornece benefícios econômicos e sociais significativos (LI et al., 2019).

3.5.1.1 Parâmetros SWMM para Pavimentos permeáveis

A estrutura característica dos sistemas de pavimentos permeáveis fica a critério do usuário. Para aplicação da técnica de controle LID pelo método de “editor LID” de simulações do EPA-SWMM, o software traz propriedades básicas de caracterização da superfície, revestimento, assentamento, armazenamento e escoamento do dreno, conforme Figura 7. As propriedades características do solo e escoamento do dreno são opcionais em simulações SWMM, bem como, a total, parcial ou não infiltração de água no subleito.

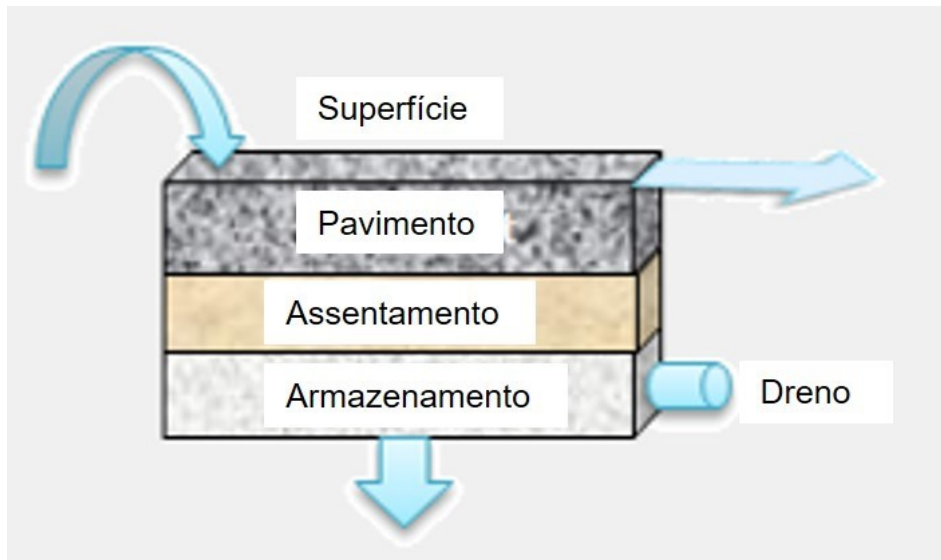


Figura 7 - Estrutura Editor LID EPA-SWMM
Fonte: Adaptado de US-EPA, 2022.

Os valores dos parâmetros adicionados às propriedades das camadas e saída de escoamento (dreno) podem ser: características *in loco* dos materiais em estudo; empíricos, ou seja, valores de referências adotadas por outros autores; ou ainda, valores sugeridos pelo modelo EPA-SWMM. A Tabela 4 apresenta os parâmetros solicitados pelo EPA-SWMM ao utilizar pavimentos permeáveis para controle LID.

Tabela 4 - Parâmetros dos pavimentos permeáveis Editor LID

Camada	Parâmetro	Descrição
Superfície	Altura da berma	Profundidade máxima até a qual a água pode acumular acima da superfície antes que ocorra o transbordamento
	Volume de vegetação	Volume dentro da profundidade de armazenamento preenchida com vegetação
	Rugosidade	Coefficiente de Manning para escoamento superficial
	Declividade	Porcentagem de inclinação da superfície
Pavimento	Espessura	Espessura da camada do pavimento
	Proporção de vazios	Volume de vazios em relação ao volume de sólidos no pavimento
	Superfície impermeável	Relação entre a área impermeável e a área do pavimento
	Permeabilidade	Permeabilidade do pavimento ou condutividade hidráulica do material de enchimento
	Fator de colmatção	Número de volume de vazios necessário para colmatar completamente o pavimento
	Intervalo de regeneração	Número de dias que a camada do pavimento pode colmatar antes que sua permeabilidade seja restaurada
	Fator de regeneração	Proporção em que a permeabilidade do pavimento é restaurada quando um intervalo de regeneração é atingido
Assentamento	Espessura	Espessura da camada de assentamento
	Porosidade	Volume do espaço poroso em relação ao volume total da camada de assentamento
	Capacidade de campo	Volume de água dos poros em relação ao volume total após a drenagem total da camada de assentamento
	Ponto de murcha	Volume de água dos poros em relação ao volume total para um solo bem seco (umidade residual)
	Condutividade hidráulica	Condutividade hidráulica para o solo totalmente saturado
	Inclinação da condutividade	Inclinação da curva de condutividade versus teor de umidade do solo
Armazenamento	Potencial mátrico	Retenção de água na superfície e microporos do material de assentamento
	Espessura	Espessura da camada de cascalho/pedra britada
	Proporção de vazios	Volume do espaço vazio em relação ao volume de sólidos na camada
	Taxa de infiltração	Taxa de água que penetra no solo nativo abaixo da camada
	Fator de colmatção	Volume total de escoamento necessário para colmatar completamente o fundo da camada dividido pelo volume vazio da camada
Dreno	Coefficiente e expoente do dreno	Volume de água em função da altura da água armazenada acima do deslocamento do dreno.
	Deslocamento do dreno	Deslocamento do fundo da camada de armazenamento e a geratriz inferior do dreno

Fonte: Adaptado de Rossman (2015).

A modelagem computacional hidráulica, para drenagem urbana, possibilita a integração de técnicas LID, ou seja, mais de uma solução proposta para uma mesma sub-bacia de contribuição, permite analisar a eficiência e funcionamento das técnicas aplicadas e com isso avaliar qual a melhor viabilidade da aplicação. Por exemplo, um

estudo realizado por Ekmekcioglu et al. (2021), em Istambul, na Turquia, utilizou as técnicas LID de telhado verde, pavimento permeável e biorretenção, aplicados como práticas independentes e por combinação para obter melhor desempenho.

No estudo, o telhado verde é composto por camadas de superfície, solo e drenagem; o pavimento permeável compõe camadas de superfície, pavimento, armazenamento, subleito e escoamento do dreno; já a célula de biorretenção consiste em camadas superficiais, solo, armazenamento e subterrânea, ambas as técnicas LID aplicadas utilizaram valores de parâmetros característicos e empíricos fornecidos por literaturas adotadas pelo autor (EKMEKCIOGLU et al., 2021).

3.5.2 Propriedades e parâmetros do modelo EPA-SWMM

Em sua maioria, os parâmetros no modelo SWMM tem características específicas, significado físico, que pode ser medido teoricamente, são geralmente determinados por método empírico ou método de otimização (XU E ZHAO, 2016). Os principais parâmetros para construção de um modelo SWMM estão apresentados na Tabela 5. Assim como as propriedades características dos controles LID, o estado do modelo EPA-SWMM também é determinado e configurado pelo usuário.

Tabela 5 - Parâmetros modelo EPA-SWMM

Propriedade	Parâmetro	Descrição
Sub-bacia	Pluviômetro	Nome do pluviômetro atribuído à sub-bacia
	Nó de saída	Nome do nó de saída da sub-bacia
	Área	Área superficial da sub-bacia, incluindo quaisquer controle LID
	Largura	Largura característica do escoamento superficial
	% Declividade	Percentual médio de inclinação da sub-bacia
	% Impermeável	Porcentagem de área impermeável
	N-Impermeável	Manning-N de escoamento da porção impermeável
	N-Permeável	Manning-N de escoamento da porção permeável
Nó	% Zero-Impermeável	Porcentagem da área impermeável sem armazenamento em depressão
	% Propagada	Porcentagem de escoamento propagada
	Cota de fundo	Cota de fundo da singularidade do nó
Unidade de armazenamento	Profundidade máxima	Profundidade máxima do nó
	Profundidade inicial	Profundidade de água do nó no início da simulação
	Cota de fundo	Cota de fundo da unidade de armazenamento
	Profundidade máxima	Profundidade máxima da unidade de armazenamento
Tubulação	Profundidade inicial	Profundidade de água na unidade de armazenamento no início da simulação
	Formato	Tipo de formato da unidade de armazenamento
	Nó de entrada	Nome do nó na extremidade de entrada da tubulação
	Nó de saída	Nome do nó na extremidade de saída da tubulação
	Formato	Formato geométrico da seção transversal da tubulação
	Profundidade máxima	Diâmetro/altura da tubulação
	Comprimento	Comprimento da tubulação
	Rugosidade	Coefficiente de rugosidade de Manning
Deslocamento de entrada	Deslocamento de entrada	Deslocamento entre o fundo da singularidade de montante e a geratriz inferior da tubulação.
	Deslocamento de saída	Deslocamento entre o fundo da singularidade de jusante e a geratriz inferior da tubulação.

Fonte: EPA-SWMM (2022).

O processo de chuva-escoamento é conhecido por estar relacionada a complexos fatores de captação urbana, como uso/cobertura do solo, morfologia da rede fluvial, construção de sistemas de drenagem e transferência de água (XU E ZHAO, 2016). O modelo SWMM fornece o modelo Horton, o modelo Green-Ampt e o modelo da Curva Número para calcular a infiltração (ZHU e CHEN, 2017).

Para a modelagem SWMM do estudo de Ekmekcioglu et al. (2021), a área da bacia de 45 km² foi dividida em 41 sub-bacias, apresentando características de declividade mínima de 6,16% e máxima de 14,15%, impermeabilização média de 57,7% para toda a bacia e, o método de infiltração de Horton foi adotado por representar melhor a capacidade de infiltração.

Já Li et al. (2022), utilizou em sua pesquisa dados coletados a partir de mapas para caracterizar a rede de drenagem e dados de topografia para formar o uso do solo local e determinar as características geográficas da área de estudo, na cidade de

Mianyang. (LI et al., 2022), determinou uma área de 209,2 Km², declividade média na região de 6,5% e a declividade máxima de 10,3%, para a modelagem a área foi dividida em 52 sub-bacias e os tipos de uso da terra definidos por água, reservatórios, florestas, construções, estradas, terras de cultivo e pastagem.

O EPA-SWMM permite caracterizar e aplicar propriedades semelhantes à área real de estudo, isso facilita a compreensão e aumenta a precisão dos dados hidrológicos.

3.5.3 Precipitação EPA-SWMM

O pluviômetro é uma das propriedades chave para uma modelagem SWMM, fornece dados de chuva para as sub-bacias e, para o pluviômetro fornecer uma fonte de entrada de chuva de projeto é preciso definir valores de alguns parâmetros solicitados na construção da estação (Rossman, 2015), apresentados na Tabela 6. A série temporal com dados de chuva pode ser adicionada manualmente ou por arquivos de chuva.

Tabela 6 - Principais parâmetros de entrada do pluviômetro

Propriedade	Parâmetro	Descrição
Pluviômetro	Formato da chuva	Formato da chuva: intensidade, volume ou cumulativo
	Intervalo de tempo	Intervalo de tempo entre as leituras do medidor
	Tipo de dados	Fonte de dados pluviométricos: série temporal ou arquivo
	Nome da série	Nome da série com dados de chuva
	Unidade	Unidades de profundidade para valores de precipitação

Fonte: Adaptado de Rossman (2015).

A análise de eventos de chuva usados por Xu e Zhao (2016), foram calculadas com base em uma equação de chuva de projeto, a coleta de dados foi obtida por 4 estações de 1980 a 2012, aplicados a diferentes períodos de retorno.

No estudo de Li et al. (2022), as chuvas são analisadas por três séries temporais, sendo padrões históricos de precipitação máxima de cada mês; padrões de precipitação de distribuição de probabilidade qui-quadrado considerando todos os campos de chuva em cada mês e; chuva de design de Chicago, usada na modelagem de cenários de chuva em cidades esponja Chineses.

O SWMM foi utilizado por Ekmekcioglu et al. (2021), como modelo hidrológico-hidráulico para analisar vazão de chuva ocorrida entre 2012 e 2020, o perfil dos

eventos de chuva foram adotados a partir de chuvas de intensidade-duração-frequência (IDF) pelo método de blocos alternados e diferentes tempos de retorno, ou seja, 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

3.5.4 Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação

Os modelos hidrológicos são extremamente sensíveis à qualidade dos seus dados de entrada, sendo que a precisão de um determinado modelo depende dos parâmetros que descrevem as características relevantes da bacia hidrográfica e da representatividade de cada um (TEIXEIRA, 2017). Análise de sensibilidade e otimização de parâmetros é realizada antes da calibração do modelo, pois os parâmetros mais influentes no desempenho da calibração são determinados usando a análise de sensibilidade e, em seguida, os parâmetros sensíveis são incluídos em uma calibração subsequente do modelo (EKMEKCIOGLU et al., 2021).

A análise de sensibilidade de um modelo é essencial tanto durante o seu desenvolvimento como na redução de suas incertezas, ter o conhecimento da sensibilidade de cada parâmetro é interessante uma vez que a resposta dada pelo modelo não é igual para todos os parâmetros (TEIXEIRA, 2017).

A avaliação da sensibilidade dos parâmetros pode ser realizada utilizando a Equação 1, proposta por (Nearing et al., 1990, p. 840, apud Brunner et al., 2004).

$$S = \frac{[(O_2 - O_1)/O_{12}]}{[(I_2 - I_1)/I_{12}} \quad (1)$$

Onde S = é a medida de sensibilidade; I_1 e I_2 = são os menores e maiores valores de entrada; I_{12} = é a média de ambos os valores; O_1 e O_2 = são os valores de saída para os dois valores de entrada e O_{12} = é a média de ambos os valores de saída.

Sangalli (2021) e Nuernberg (2021) identificaram em seus estudos parâmetros sensíveis nos modelos de PP utilizando o SWMM, sendo esses apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de sensibilidade

Parâmetros	Fonte
Armazenamento em depressão superficial	Nuernberg (2021)
Capacidade de campo - revestimento	Nuernberg (2021)
Capacidade de campo - assentamento	Nuernberg (2021) e Sangalli (2021)
Porosidade - assentamento	Sangalli (2021)
Ponto de murcha - assentamento	Sangalli (2021)
Condutividade - assentamento	Sangalli (2021)
Capacidade de campo - armazenamento	Nuernberg (2021)
Proporção de vazios - armazenamento	Nuernberg (2021) e Sangalli (2021)
Offset do dreno	Nuernberg (2021) e Sangalli (2021)
Expoente do dreno	Sangalli (2021)
Coefficiente do dreno	Sangalli (2021)

Fonte: Autoria própria.

Para o estudo realizado por Xu e Zhao (2016), foi adotado o algoritmo genético para otimizar os parâmetros sensíveis no modelo SWMM. Já Li et al. (2022), utilizaram em seu estudo, parâmetros de sensibilidade do modelo com base no armazenamento de depressões em áreas impermeáveis e parâmetros de infiltração.

No modelo EPA-SWMM são muitos os parâmetros a serem analisados para identificar quais são os mais sensíveis para apresentar melhor desempenho na calibração do modelo. Em uma revisão literária realizada por Niazi et al. (2017), foi identificado 13 artigos com características da superfície permeável (coeficiente de Manning ou armazenamento em depressão) ou parâmetros de infiltração como sensíveis às previsões do SWMM, de um total de 34 artigos revisados.

A calibração do modelo é realizada para comparar os resultados da simulação com as medições reais, normalmente, são funções específicas definidas pelo local de estudo (Rossman 2015).

Para calibração, são utilizados alguns eventos de chuva antes das simulações de validação de modelagem SWMM. Na calibração do modelo aplicado por Zhu e Chen (2017), de acordo com os dados pluviométricos observados, os princípios do modelo SWMM e os parâmetros recomendados, cinco chuvas foram selecionadas para calibrar os parâmetros. Após a calibração do modelo é realizada a validação, que por sua vez precisa obter um desempenho aceitável.

De acordo com Niazi et al. (2017), a validação refere-se à verificação da precisão de um modelo por um período de tempo separado daquele usado para calibração, o desempenho do modelo para o período de validação é geralmente quantificado usando as mesmas medidas de qualidade de ajuste que foram usadas para o processo de calibração.

Uma análise de bacias hidrográficas não calibradas e validadas forneceria informações sobre as habilidades preditivas e limitações das simulações de LID em SWMM (ROSA; CLAUSEN E DIETZ, 2015). A Tabela 8, apresenta estudos de modelagem SWMM para práticas LID, que realizaram análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo.

Tabela 8 - Estudos referentes a sensibilidade, calibração e validação de práticas LID

Autor	Local	Parâmetro sensibilidade	Calibração	LID
Ahiablame e Shakya, 2016	Bacia hidrográfica em Normal-Sugar Creek, Illinois. Área de 87,6 km ² .	Largura característica, declividade, % impermeável e condutividade hidráulica.	(NSE) e (R ²).	Pavimento permeável, barril e jardim de chuva.
Baek et al., 2015	Bacia hidrográfica em Gwangju, Coréia. Área 0,0125 km ² .	Rugosidade de Manning (permeável, impermeável e tubulação), condutividade hidráulica, potencial mátrico, déficit de umidade, Armazenamento em depressão permeável e impermeável.	(NSE).	Biorretenção, trincheira de infiltração, pavimento permeável, barril de chuva e vala vegetativa.
Hou et al., 2020	Bacia hidrográfica em Qian'na, Hebei, China. Área de 2.150 ha.	Armazenamento em depressão permeável e impermeável, % impermeável.	(NSE).	Biorretenção, trincheira de infiltração, pavimento permeável, barril de chuva e vala vegetativa.
Palla e Gnecco, 2015	Bacia hidrográfica em Colle Ometti, Génova, Itália. Área de 4,56 ha.	Capacidade de campo, ponto de murcha, condutividade, inclinação, porosidade, coeficiente de Manning, taxa de vazios, permeabilidade, taxa de infiltração, coeficiente, expoente e deslocamento do dreno.	(RPD) e (NSE).	Telhado verde e pavimento permeável.
Randall et al., 2019	Bacia hidrográfica Qing, Pequim, China. Área de 170 km ² .	Largura, rugosidade de Manning de áreas permeáveis e impermeáveis, profundidade de armazenamento de depressão em área permeável e impermeável, taxa de infiltração.	(NSE).	Telhado verde, pavimento permeável e jardim de chuva.
Yang et al., 2020	Bacia hidrográfica em Dresden, Alemanha. Área de 0,85 km ² .	Rugosidade de Manning de áreas permeáveis e impermeáveis, profundidade de armazenamento de depressão em área permeável e impermeável.	(R ²).	Barril de chuva, trincheira de infiltração e pavimento permeável.

Tabela 8 - Estudos referentes a sensibilidade, calibração e validação de práticas LID (Cont.)

Autor	Local	Parâmetro sensibilidade	Calibração	LID
Ekmekcioylu et al., 2021	Bacia hidrográfica de Ayamama, Istambul, Turquia. Área de 75 km ² .	Rugosidade de Manning de áreas permeáveis e impermeáveis, porcentagem de área impermeável, taxa de infiltração, infiltração de Horton, condutividade hidráulica.	(NSE), (RMSE), (PI), (WI) e (RE).	Telhado verde, pavimento permeável e biorretenção.
Rosa, Clausen e Dietz, 2015	Bacia hidrográfica de Long Island Sound em Waterford, Connecticut. Área de 20.396 m ²	Condutividade hidráulica, Rugosidade de Manning, déficit inicial de umidade do solo, potencial mátrico, fator de regeneração, armazenamento em depressão permeável e impermeável.	(R ²) e (NSE)	Biorretenção, pavimento permeável, jardim e barril de chuva e vala vegetativa.

Fonte: Autoria própria.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local de estudo

Pato Branco é um município da região sudoeste do Estado do Paraná, Figura 8 e, de acordo com (IBGE, 2021), o município possui atualmente uma área territorial de 539.087 km² e uma população estimada em 84.779 habitantes.

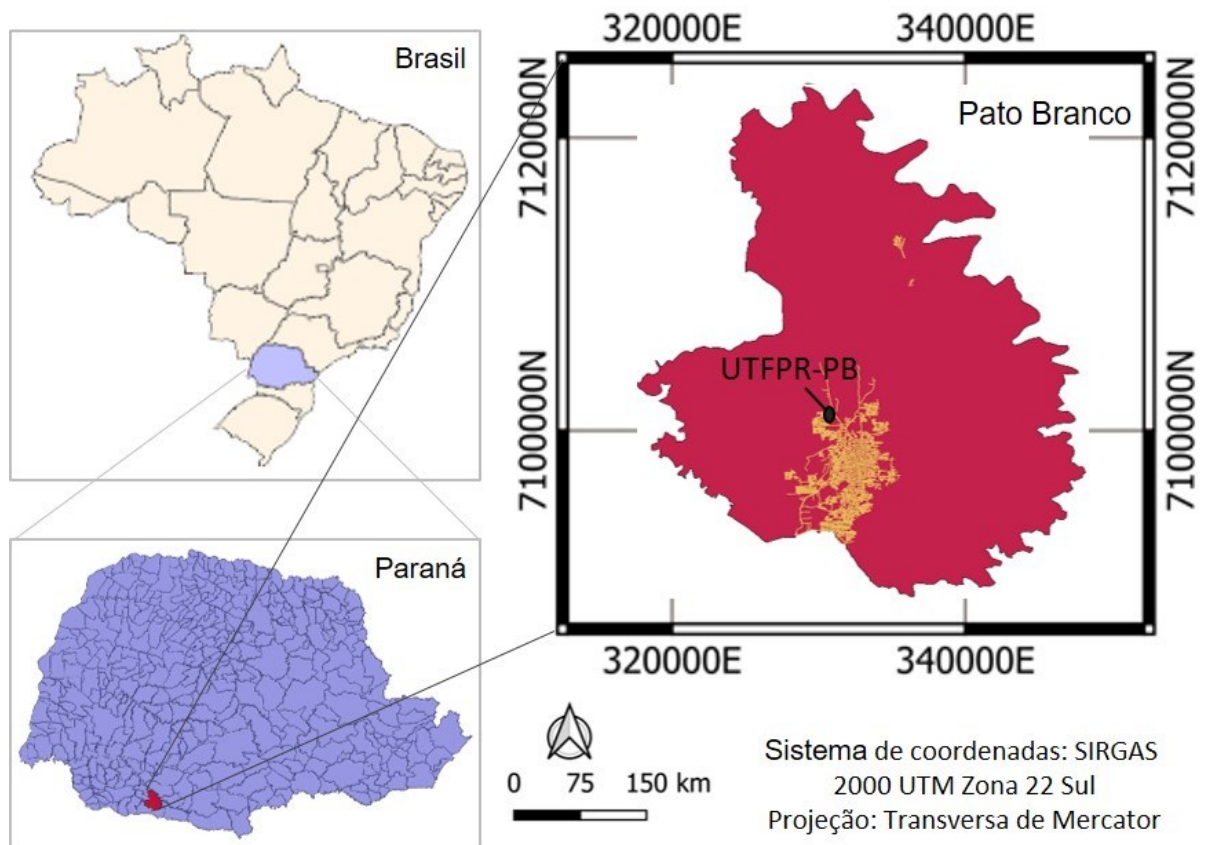


Figura 8 - Mapa localização
Fonte: Autoria própria.

De acordo com o Mapa Simplificado de Solos do Estado do Paraná os solos dominantes na limitação do município de Pato Branco são Latossolos, Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos (EMBRAPA, 2012).

Os solos apresentam à textura de acordo com suas características específicas, para o solo Latossolos a textura apresenta variáveis de argila, o solo Neossolo Litólico caracteriza-se por apresentar uma textura siltosa, arenosa, média ou argilosa, já o Neossolo Regolítico é caracterizado por uma textura argilosa com baixas frações de areia e cascalho (SILVA; SILVA; CAVALCANTI, 2005). O tipo de

solo na região dos módulos experimentais, conforme estudos realizados por Tabalipa e Fiori (2012), classifica-se como Latossolo Roxo Álico, com textura argilosa.

Para Tabalipa e Fiori (2008), a temperatura varia em média de 22°C a 14°C, a umidade relativa do ar em torno de 74% e precipitação anual em média de 2109,79 mm/ano, de acordo com dados analisados entre 1979 e 2005. De acordo com Nitsche et al., (2019), Pato Branco compreende dois tipos de clima dentro da classificação de Köppen: Cfa - Clima temperado úmido com verão quente e Cfb - Clima temperado com verão moderadamente quente.

A construção dos módulos experimentais foi desenvolvida em um espaço fornecido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Pato Branco, aos fundos do Bloco M, conforme apresentado na Figura 9.



Figura 9 - Mapa de localização dos módulos experimentais
Fonte: UTFPR-Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2022).

4.2 Dimensionamento hidráulico e mecânico

O dimensionamento hidráulico e mecânico dos módulos experimentais dos sistemas de pavimento permeável Tipo C, foram desenvolvidos por Nuernberg (2021). Para Nuernberg (2021), o dimensionamento (mecânico e hidráulico) do sistema de pavimento permeável tem a finalidade de permitir a infiltração e armazenamento temporário de água e atender às solicitações hipotéticas de mecânicas de carga de

veículos automotivos e pedestres, de forma eficiente e sem causar danos à sua estrutura.

O dimensionamento hidráulico dos pavimentos permeáveis foi aplicado a dois métodos, método da NBR 16416 e método da Curva Envelope, ambos os métodos consideram parâmetros de dados de precipitação, características de projeto, propriedades do solo e de armazenamento (NUERNBERG, 2021). O dimensionamento mecânico foi desenvolvido pelo Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis, considerando dados de tráfego e propriedades de armazenamento do sistema de pavimentos permeáveis proposto por (SOUZA, 1981), adaptado por (NUERNBERG, 2021).

O resultado do dimensionamento hidráulico e mecânico de pavimentos permeáveis (Tipo C) adotado por Nuernberg (2021) consideram os materiais e espessura das camadas que satisfaçam todos os dimensionamentos aplicados ao estudo. Para tanto, o dimensionamento final resultou em uma espessura total com valor de 47 cm, sendo 6 cm de camada de revestimento, 5 cm de camada de assentamento e 36 cm de camada de armazenamento (NUERNBERG, 2021).

4.3 Montagem dos módulos experimentais

Com base no dimensionamento desenvolvido por Nuernberg (2021), os protótipos foram montados sobre uma estrutura de madeira (pallet), composto por uma estrutura metálica nas laterais e no fundo, com suas respectivas saídas hidráulicas. Tanto a estrutura, quanto os materiais que compõem os módulos experimentais foram adquiridos na região ou no Município de Pato Branco.

A montagem do sistema Tipo C característicos dos módulos experimentais apresenta a seguinte sequência: camada de armazenamento de brita 3, manta geotêxtil entre a camada de armazenamento e a camada de assentamento, que por sua vez é composta por pedrisco, ou popularmente conhecido como granilha e, por fim, na superfície o revestimento de blocos de pavimento intertravado do tipo convencional e poroso. As principais características e dimensões dos módulos experimentais estão presentes na Figura 10.

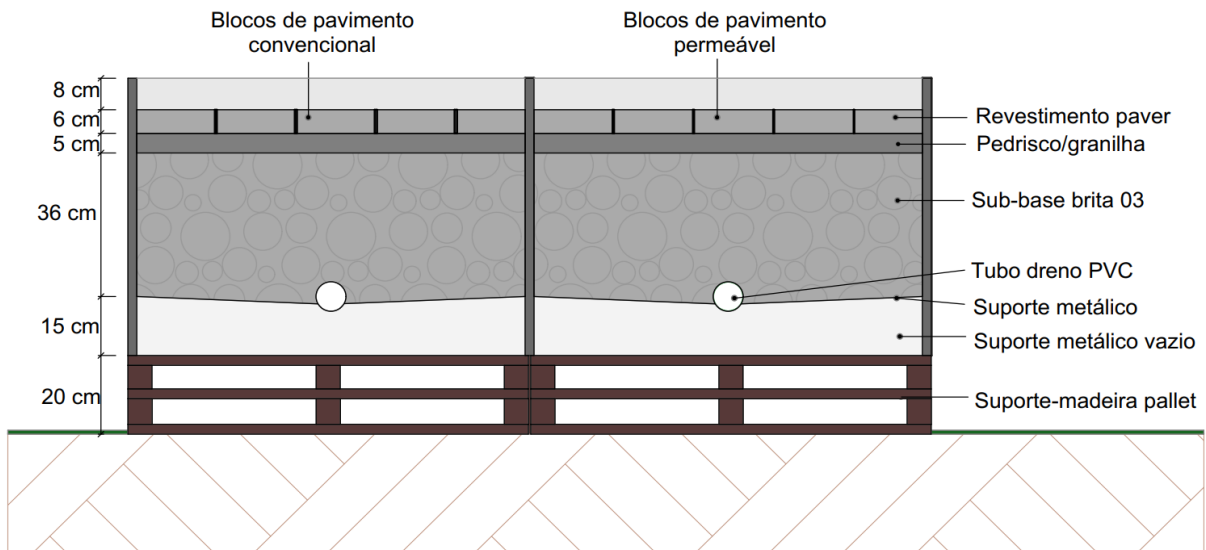


Figura 10 - Mapa de localização dos módulos experimentais
Fonte: Autoria própria.

A precipitação que cai sobre o sistema de pavimentos permeáveis tem o objetivo de infiltrar nas camadas até a água percolar em um tubo dreno de fundo, sendo direcionada por uma tubulação PVC (diâmetro 50 mm) até o reservatório de água do escoamento do dreno. A água pluvial excedente, escoamento superficial, escoam até a calha, que direciona através de uma tubulação PVC (diâmetro 25mm) até o reservatório de escoamento superficial, conforme apresentado na Figura 11.

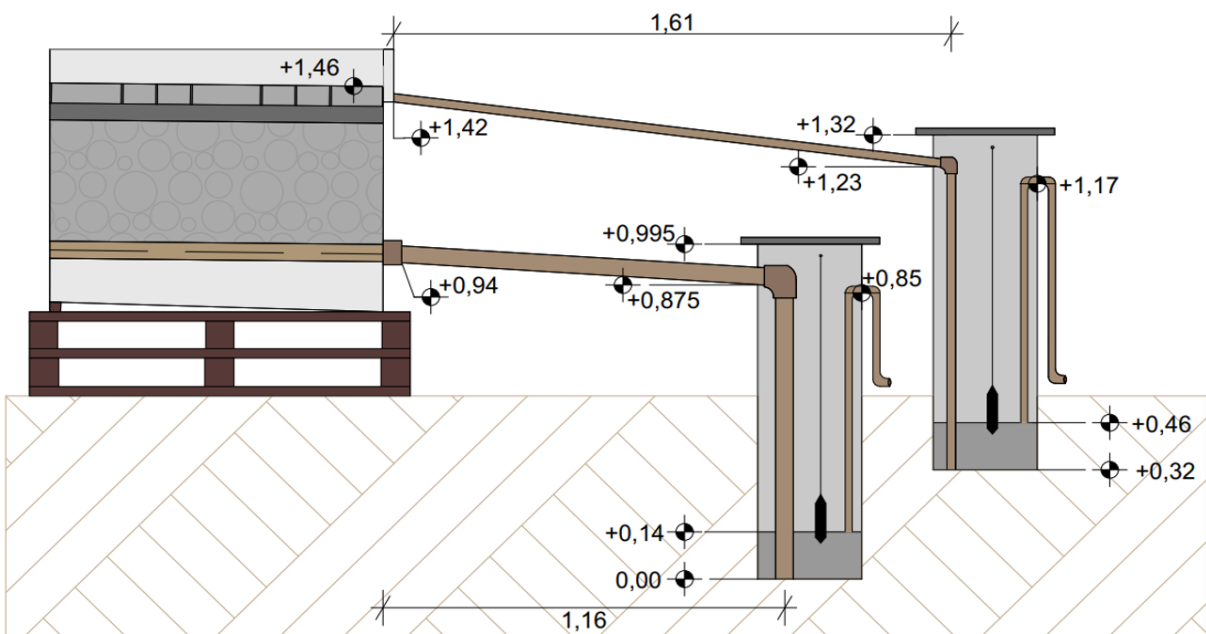


Figura 11 - Corte transversal dos módulos experimentais
Fonte: Autoria própria.

Para os reservatórios de escoamento superficial e escoamento do dreno dos protótipos foram utilizados tubos de PVC de diâmetro 300 mm e 1 m de altura, com capacidade de armazenamento livre e efetiva de 50 litros aproximadamente. Os protótipos e tubulações hidráulicas possuem inclinação de 3%.

Os reservatórios possuem 14 cm em seu fundo completados por brita e água, até a altura dos transdutores de pressão, essa reserva evita a turbulência da água quando atinge o fundo, possibilita assim maior precisão na leitura dos dados.

4.4 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais tem por objetivo determinar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais que compõem os módulos experimentais. Tais informações são necessárias para construir o modelo computacional e definir os parâmetros para simulação do sistema LID, os ensaios a serem realizados, bem como os métodos utilizados podem ser observados na Figura 12.

Camada de pavimento:	Função:	Ensaio:	Método:
Tradicional 	Formado por blocos de concreto, a aplicação tem função de resistir a cargas de tráfego e permitir a percolação de água nas camadas inferiores.	Absorção de água. Conductividade hidráulica (Pavimento tradicional). Conductividade hidráulica (Pavimento poroso).	> NBR 9781 (ABNT, 2013) > ASTM C1701: Teste de infiltração > NBR 16416 (ABNT, 2015a)
Permeável 			
Camada de assentamento:	Função:	Ensaio:	Método:
Pedrisco 	Permite a percolação de água para a camada de armazenamento e bom assentamento do pavimento.	Composição granulométrica. Massa específica. Massa unitária. Índice de volume de vazios.	> NBR NM 248 (ABNT, 2003) > NBR NM 53 (ABNT, 2009) > NBR NM 45 (ABNT, 2006) > NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Camada de armazenamento:	Função:	Ensaio:	Método:
Pedra brita 3 	Agregado de granulometria graúda, deve suportar as cargas de tráfego em estado seco ou molhado, mantendo a estabilidade.	Composição granulométrica. Massa específica. Massa unitária. Índice de volume de vazios.	> NBR NM 248 (ABNT, 2003) > NBR NM 53 (ABNT, 2009) > NBR NM 45 (ABNT, 2006) > NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Figura 12 - Materiais utilizado nos sistemas de pavimento permeável
Fonte: Autoria própria.

4.5 Monitoramento

Para a coleta de dados observados foi realizado o monitoramento *in loco* por 4 transdutores de pressão (marca Hobo, modelo U20L-01), instalados juntos aos módulos de pavimentos permeáveis. Foram coletados, através dos transdutores, informações de pressão absoluta e temperatura. (TP-1) escoamento de água superficial do pavimento convencional, (TP-2) escoamento superficial do pavimento poroso, (TP-3) escoamento de água do sistema de drenagem do pavimento convencional e (TP-4) escoamento de água do sistema de drenagem do pavimento poroso, as leituras dos dados realizadas pelos transdutores de pressão foram convertidas em altura da lâmina de água e, em sequência no volume de água no reservatório.

Os transdutores de pressão foram testados em laboratório, instalados em um reservatório com adição de água controlado, possibilitando a leitura dos dados e comparados com a lâmina de água observada.

As informações de dados pluviométricos foram coletadas da Estação Meteorológica Parque Tecnológico de Pato Branco – PR, os relatórios de precipitação estão disponíveis gratuitamente no site. O pluviômetro está localizado há aproximadamente 280 metros de distância dos módulos experimentais e a uma altitude de 820 metros acima do nível do mar.

4.6 Simulação EPA-SWMM

As simulações da modelagem EPA-SWMM no presente estudo são compostas pelo Estado do Modelo Computacional (sub-bacia, nó, unidade de armazenamento e tubulação), Editor LID (superfície, pavimento, assentamento, armazenamento e dreno) e Precipitação (série temporal).

4.6.1 Estado do Modelo Computacional

A construção do modelo computacional foi realizada de acordo com cada propriedade, nos mesmos foram configurados os parâmetros de acordo com a caracterização dos módulos experimentais *in loco*.

Os principais parâmetros de configuração, aplicados a presente pesquisa são sub-bacias, nó, unidade de armazenamento e tubulações correspondentes aos sistemas de pavimento permeável do Tipo C, sendo estes apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de construção do modelo EPA-SWMM

Propriedade	Parâmetro	Unidade	Fonte
Sub-bacia	Pluviômetro	-	<i>In loco</i>
	Nó de saída	-	<i>In loco</i>
	Área	(ha)	<i>In loco</i>
	Largura	m	<i>In loco</i>
	% Declividade	%	<i>In loco</i>
	% Impermeável	%	<i>In loco</i>
	N-Impermeável	m ³ /s	<i>In loco</i>
	% Zero-Impermeável	%	<i>In loco</i>
	% Propagada	%	<i>In loco</i>
Nó	Cota de fundo	m	<i>In loco</i>
	Profundidade máxima	m	<i>In loco</i>
	Profundidade inicial	m	<i>In loco</i>
Unidade de armazenamento	Cota de fundo	m	<i>In loco</i>
	Profundidade máxima	m	<i>In loco</i>
	Profundidade inicial	m	<i>In loco</i>
	Formato	-	<i>In loco</i>
Tubulação	Nó de entrada	-	<i>In loco</i>
	Nó de saída	-	<i>In loco</i>
	Formato	-	<i>In loco</i>
	Profundidade máxima	m	<i>In loco</i>
	Comprimento	m	<i>In loco</i>
	Rugosidade	m ³ /s	Rossmann (2016)
	Deslocamento de entrada	m	<i>In loco</i>
	Deslocamento de saída	m	<i>In loco</i>

Fonte: Autoria própria.

4.6.2 Parâmetros Editor LID

Os parâmetros das camadas de superfície, pavimento, assentamento, armazenamento e dreno do Editor LID, que serão usados na modelagem SWMM de sistema de pavimentos permeáveis estão representados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros do Editor LID para pavimentos permeáveis

Camadas	Parâmetro	Unidade	Fonte
Superfície	Altura da berma	mm	<i>In loco</i>
	Volume de vegetação	-	N/A
	Rugosidade	m ³ /s	Rossmann (2016)
	Declividade da superfície	%	<i>In loco</i>
Pavimento	Espessura	mm	<i>In loco</i>
	Proporção de vazios	-	<i>In loco</i>
	Superfície impermeável	-	<i>In loco</i>
	Permeabilidade	mm/hr	<i>In loco</i>
	Fator de colmatção	-	N/A
	Intervalo de regeneração	Nº dias	N/A
	Fator de regeneração	-	N/A
Assentamento	Espessura	mm	<i>In loco</i>
	Porosidade	-	<i>In loco</i>
	Capacidade de campo	-	Rossmann (2016)
	Ponto de murcha	-	Rossmann (2016)
	Condutividade hidráulica	mm/hr	<i>In loco</i>
	Inclinação da condutividade	-	Rossmann (2016)
	Potencial mátrico	mm	Rossmann (2016)
Armazenamento	Espessura	mm	<i>In loco</i>
	Proporção de vazios	-	<i>In loco</i>
	Taxa de infiltração	mm/hr	<i>In loco</i>
	Fator de colmatção	-	N/A
Dreno	Coefficiente do dreno	-	<i>In loco</i>
	Expoente do dreno	-	Rossmann (2016)
	Deslocamento do dreno	mm	<i>In loco</i>

N/A = Não aplicável

Fonte: Autoria própria.

As Equações governantes dos pavimentos permeáveis na modelagem SWMM, de acordo com Rossmann (2016), são dispostas por camada de aplicação no Editor LID Control:

$$\frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad \text{Superfície} \quad (1)$$

$$D_4(1 - F_4) \frac{\partial \theta_4}{\partial t} = f_1 - e_4 - f_4 \quad \text{Pavimento} \quad (2)$$

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_4 - e_2 - f_2 \quad \text{Assentamento} \quad (3)$$

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3 \quad \text{Armazenamento} \quad (4)$$

Onde d_1 é o armazenamento de água na superfície (mm), i é a intensidade (mm/h), q_0 é a vazão de área de contribuição (mm/h), sendo está apenas da subacia sem haver contribuição externa, e_1 a evapotranspiração (mm/h), f_1 é o escoamento superficial (mm/h), q_1 o fluxo de água passante para a camada inferior (mm/h), D_4 representa a espessura da camada de pavimento (mm), F_4 é a fração superficial de pavimento impermeável (mm), e_4 é a evapotranspiração da camada de pavimento (mm/h), f_4 é a taxa de fluxo do pavimento (mm/h), D_2 = Espessura da camada de assentamento (mm), e_2 é a evapotranspiração da camada de assentamento (mm/h), f_2 é a taxa de percolação da camada (mm/h), ϕ_3 é a fração nula da camada de armazenamento, d_3 é o armazenamento de água na camada de armazenamento (mm), e_3 é a evapotranspiração da camada de armazenamento (mm/h), f_3 = Taxa de exfiltração da camada de armazenamento para camada de assentamento (mm/h) e q_3 é a taxa de vazão do sub-dreno da camada de armazenamento (mm/h).

4.6.3 Precipitação

Para Brown e Borst (2015) um evento de chuva independente, o evento deverá ter uma precipitação mínima de 2,5 mm e um intervalo mínimo de 6 horas sem ocorrência de chuva entre uma precipitação e outra. Brown e Borst (2015) destacam ainda, que as precipitações podem ser classificadas por intensidade, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Classificação da precipitação por intensidade

CLASSE DE INTENSIDADE	CONDIÇÃO
LEVE	Menor ou igual a 2,5 mm/h
MÉDIA	De 2,6 a 7,5 mm/h
ALTA	Maior ou igual a 7,5 mm/h

Fonte: Adaptado de Brown e Borst (2015).

4.7 Calibração e Validação

A calibração foi realizada por ajuste manual, partindo do modelo inicial para (-100%) e (+100%) com variações de 20% nos parâmetros de Ponto de Murcha, Coeficiente e Deslocamento do dreno. Isso para os três modelos propostos, sendo diferenciados pela classificação de intensidade de chuva leve, média e alta.

Para a realização da calibração e validação do desempenho do modelo proposto será utilizado instrumentos estatísticos, com objetivo de aproximar os resultados do modelo com os resultados observados nos módulos experimentais. Para tanto, os resultados serão aplicados ao Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), Percentual de Viés (PBIAS), Erro Médio Absoluto (EMA) e a Razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos (RSR).

O NSE, Equação 6, é uma estatística normalizada, que determina a magnitude relativa da variância residual comparada com a variância dos dados medidos, indicando o ajustamento dos dados simulados e observados na reta 1:1 (TEIXEIRA, 2017).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mobs})^2} \quad (6)$$

Onde, Y_i^{obs} é a observação em campo da variável de saída analisada; Y_i^{sim} é o valor simulado pelo modelo dessa variável; Y^{mobs} é a média dos dados observados e n é o número total de observações.

O PBIAS mede a tendência dos dados simulados a serem maiores ou menores que os dados observados, resultados de baixa grandeza demonstram uma simulação precisa do modelo (TEIXEIRA, 2017), conforme Equação 7.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100\%}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \quad (7)$$

Onde, Y_i^{obs} é a observação em campo da variável de saída analisada; Y_i^{sim} é o valor simulado pelo modelo dessa variável e n é o número total de observações.

A Equação 8 representa o erro médio absoluto e a Equação 9 representa a razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{sim}| \quad (8)$$

Onde, Y_i^{obs} é a observação em campo da variável de saída analisada; Y_i^{sim} é o valor simulado pelo modelo dessa variável e n é o número total de observações.

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mobs})^2}} \quad (9)$$

Onde, Y_i^{obs} é a observação em campo da variável de saída analisada; Y_i^{sim} é o valor simulado pelo modelo dessa variável; Y^{mobs} é a média dos dados observados e n é o número total de observações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Módulos Experimentais

O sistema caracteriza-se por ser um sistema de pavimentos permeáveis (Tipo C), pois toda água que infiltra no sistema é direcionada para um dreno de fundo, que por sua vez conduz a água para um reservatório. As Figuras 13 e 14 apresentam o resultado final dos módulos experimentais construídos *in loco*.



Figura 13 - Imagem frontal dos módulos experimentais
Fonte: Autoria própria.



Figura 14 - Imagem lateral dos módulos experimentais
Fonte: Autoria própria.

Os módulos experimentais foram montados de acordo com o dimensionamento proposto no estudo de Nuernberg (2021). O teste de estanqueidade foi realizado, no qual não foi detectado vazamento ou escoamento, exceto o dreno e a calha de escoamento superficial. O volume máximo efetivo testado nos módulos experimentais é de 167,50 litros, o teste foi realizado com o preenchimento total do sistema até a água alcançar a superfície.

5.2 Características dos materiais

Os pavimentos permeáveis caracterizam-se por possibilitar o escoamento de água da superfície até o reservatório de armazenamento. Para tanto, os materiais utilizados na confecção dos sistemas de drenagem não devem conter, ou ainda, limitar a percolação de água entre as camadas, estando de acordo com os critérios normativos.

A Tabela 12, traz as principais características dos materiais adotados para os módulos experimentais da presente pesquisa.

Tabela 12 - Características dos materiais

Ensaio	Pedrisco	Pedra nº 3	Pavimento tradicional	Pavimento poroso
Granulometria máxima (mm)	6,30	37,50	-	-
Granulometria mínima (mm)	1,18	9,50	-	-
Massa específica (Kg/cm³)	2880,00	2900,00	-	-
Massa unitária (Kg/m³)	1557,10	1665,98	-	-
Índice de volume de vazios (%)	44,29	42,38	-	-
Absorção de água (%)	1,00	1,00	1,78	3,20
Condutividade hidráulica (m/h)	38,20	38,20	18,01	87,15

Fonte: Autoria própria.

Com base nos ensaios de caracterização o pedrisco e a brita nº 3 apresentam-se dentro dos critérios normativos de classificação e composição. As camadas de pavimento, assentamento e armazenamento apresentam alta condutividade hidráulica, o que permite boa percolação de água entre as camadas do sistema desenvolvido.

5.3 Monitoramento

Os módulos experimentais foram monitorados por aproximadamente seis meses, sendo coletados 10 eventos de precipitação que se enquadram nas características mínimas para a modelagem computacional SWMM. Os mesmos estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Características do monitoramento dos eventos de chuva

Evento	Início do evento		Término do evento		Prec. (mm)	Int. (mm/h)	Classificação Brown e Borst (2015)
	Data	Horário	Data	Horário			
1	06/10/2022	01:34	06/10/2022	12:55	59	5,2	Média
2	19/10/2022	22:34	20/10/2022	18:14	48	2,44	Leve
3	29/10/2022	05:31	29/10/2022	14:04	67	7,84	Alta
4	12/11/2022	19:55	13/11/2022	11:59	41	2,55	Leve
5	01/12/2022	15:53	01/12/2022	17:19	39	27,21	Alta
6	19/12/2022	16:53	19/12/2022	21:58	30	5,9	Média
7	18/01/2023	15:52	18/01/2023	19:37	26	4,33	Média
8	19/01/2023	17:28	19/01/2023	18:10	25	35,71	Alta
9	03/02/2023	15:10	03/02/2023	20:49	22	3,86	Média
10	14/02/2023	14:35	15/02/2023	00:34	22	2,16	Leve

Fonte: Autoria própria.

Foi realizado a classificação em leve, média e alta intensidade dos eventos de precipitação, essa classificação faz-se necessária para melhorar a calibração e validação dos dados simulados no modelo SWMM.

5.4 Construção do modelo computacional SWMM

O modelo SWMM foi construído com base nas informações construtivas caracterizadas dos módulos in loco e podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14 - Características construtivas dos módulos experimentais

Estrutura do módulo experimental	Estrutura do armazenamento e dreno de fundo	Estrutura armazenamento e escoamento superficial
Área superficial = 0,9312 m ²	Tubo de saída = Ø50mm	Tubo de saída = Ø25mm
Pavimento (H) = 5,8 cm	Inclinação = 6,41% ou 3,6°	Inclinação = 12,46% ou 7°
Assentamento (H) = 5 cm	Altura reservatório = 99,5 cm	Altura reservatório = 99,5 cm
Armazenamento (H) = 36 cm	Altura reservatório = 71 cm	Altura reservatório = 71 cm
Tubo dreno = Ø75mm	Área reservatório = 668,96 cm ²	Área reservatório = 672,156 cm ²
	Volume efetivo = 47,496 litros	Volume efetivo = 47,723 litros

Fonte: Autoria própria.

A Figura 15 apresenta a interface do modelo dentro do software SWMM, compondo a área de contribuição, tubulação de condução do escoamento do dreno de fundo e superficial para os reservatórios.

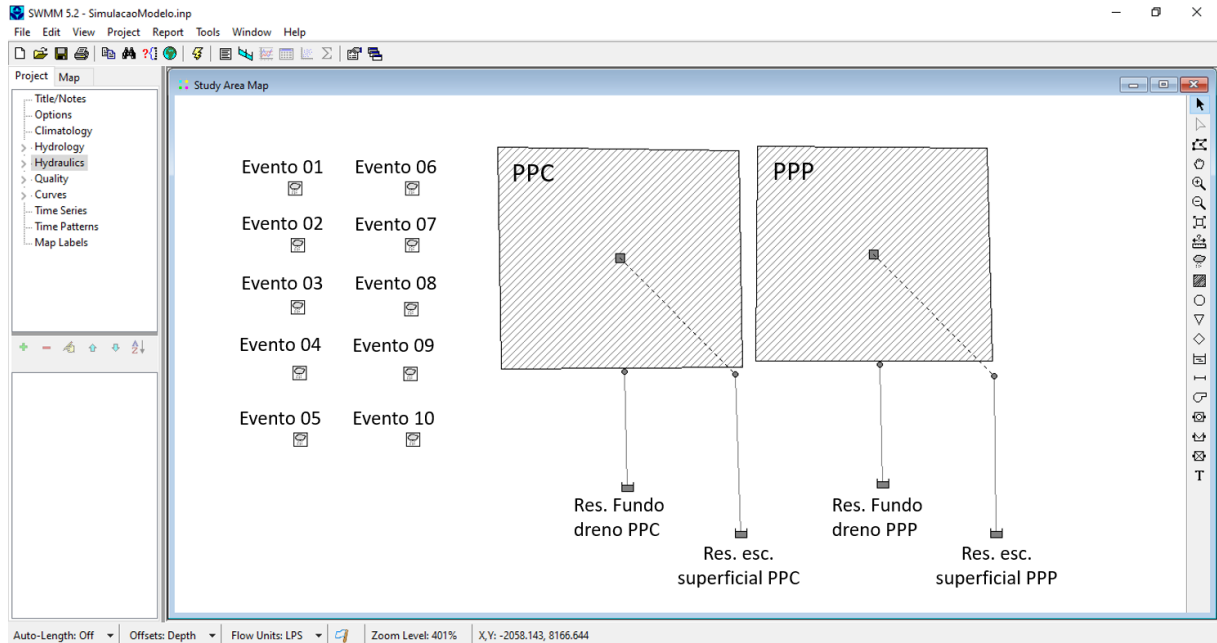


Figura 15 - Modelo computacional SWMM
Fonte: Autoria própria

Após a construção do modelo no SWMM, foi analisado os parâmetros de sensibilidade utilizados para a calibração e validação do modelo, para o mesmo foi adotado como base os estudos de Sangalli (2021) e Nuernberg (2021), sendo aplicados para esse estudo, como parâmetros sensíveis o ponto de murcha na camada de assentamento e, coeficiente do dreno e deslocamento (offset) do dreno.

A Tabela 15, apresenta os valores característicos para os parâmetros das camadas do sistema LID, os mesmos estão separados por intensidade e por tipo de pavimento, sistema tradicional e sistema poroso.

Tabela 15 – Valores do modelo inicial dos parâmetros (Editor LID)

Camadas	Parâmetro	Modelo PPC	Modelo PPP
Superfície	Altura da bermá	0	0
	Volume de vegetação	0	0
	Rugosidade	0,01	0,025
	Declividade da superfície	3	3

Tabela 15 - Valores do modelo inicial dos parâmetros (Editor LID) (Cont.)

Camadas	Parâmetro	Modelo PPC	Modelo PPP
Pavimento	Espessura	58	58
	Proporção de vazios	0,03	0,17
	Superfície impermeável	0	0
	Permeabilidade	18010	87154
	Fator de colmatação	0	0
	Intervalo de regeneração	0	0
	Fator de regeneração	0	0
Assentamento	Espessura	50	50
	Porosidade	0,44	0,44
	Capacidade de campo	0,2	0,2
	Ponto de murcha	0,1	0,1
	Condutividade hidráulica	38197	38197
	Inclinação da condutividade	10	10
	Potencial mátrico	3,5	3,5
Armazenamento	Espessura	360	360
	Proporção de vazios	0,42	0,42
	Taxa de infiltração	0	0
	Fator de colmatação	0	0
Dreno	Coeficiente do dreno	10	10
	Expoente do dreno	0,5	0,5
	Deslocamento do dreno	12	12

Fonte: Autoria própria.

Os valores de parâmetros iniciais do modelo foram obtidos com base na caracterização *in loco* dos materiais e pelas referências sugeridas por Rossman (2015).

5.5 Calibração

A calibração do modelo SWMM do PPC e PPP foi realizada por meio de ajustes nos parâmetros de ponto de murcha, coeficiente do dreno e deslocamento do dreno, sendo esses alguns dos parâmetros sensíveis sugeridos por Sangalli (2021) e Nuernberg (2021), em seus respectivos estudos de análise de sensibilidade de parâmetros. Foi realizado a calibração a partir do modelo inicial, ajustado com variação de 20%.

O processo de calibração foi realizado a partir do ajuste manual nos parâmetros, com intuito de otimização para obtenção dos hidrogramas simulados o

mais próximo dos hidrogramas observados *in loco*. A Tabela 16 apresenta os valores iniciais do modelo para os parâmetros ajustados na calibrados e o intervalo de perturbação.

Tabela 16 – Intervalo de calibração dos modelos

Parâmetro	Valor inicial	Intervalo de calibração
Ponto de Murcha	0,1	(-100%) 0,05 – 0,15 (+100%)
Coeficiente do dreno	10	(-100%) 2 – 18 (+100%)
Deslocamento do dreno	12	(-100%) 2 – 22 (+100%)

Fonte: Autoria própria.

Com intuito de melhorar o desempenho do modelo computacional desenvolvido no SWMM, foi calibrado três modelos diferentes, sendo um para cada intensidade leve, média e alta. A Tabela 17 apresenta os valores (em %) do ajuste nos parâmetros para cada classe de intensidade de chuva.

Tabela 17 – Ajustes dos parâmetros sensíveis para calibração dos modelos

Intensidade	Parâmetro	Valor Calibrado	Ajuste do parâmetro
Leve	Ponto de Murcha	0,1	0
	Coeficiente do dreno	2	- 100%
	Deslocamento do dreno	6	- 60%
Médio	Ponto de Murcha	0,1	0
	Coeficiente do dreno	10	0
	Deslocamento do dreno	6	- 60%
Alta	Ponto de Murcha	0,1	0
	Coeficiente do dreno	10	0
	Deslocamento do dreno	12	0

Fonte: Autoria própria.

Foram utilizados 6 eventos de precipitação para a calibração, sendo esses 2 eventos para cada classificação de intensidade. As Figuras 16, 17 e 18 apresentam o comportamento dos hidrogramas calibrados para intensidade leve, média e alta, respectivamente, modelado para PPC e PPP com os valores de parâmetros nas simulações iniciais e pós calibrados.

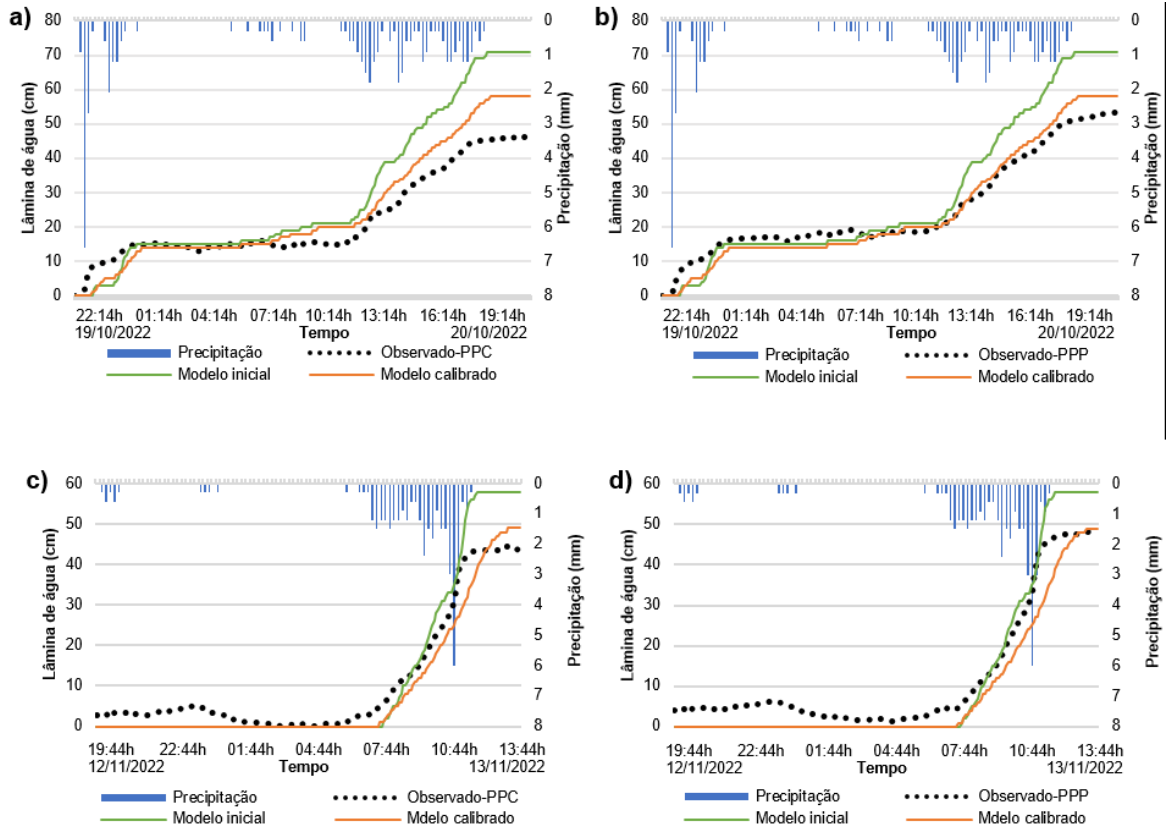


Figura 16 – Calibração: simulação do modelo (Leve intensidade) dos PPC e PPP dos dias 19/10/2022 para (a) e (b) e, 12/11/2022 para (c) e (d), respectivamente. Fonte: Autoria própria.

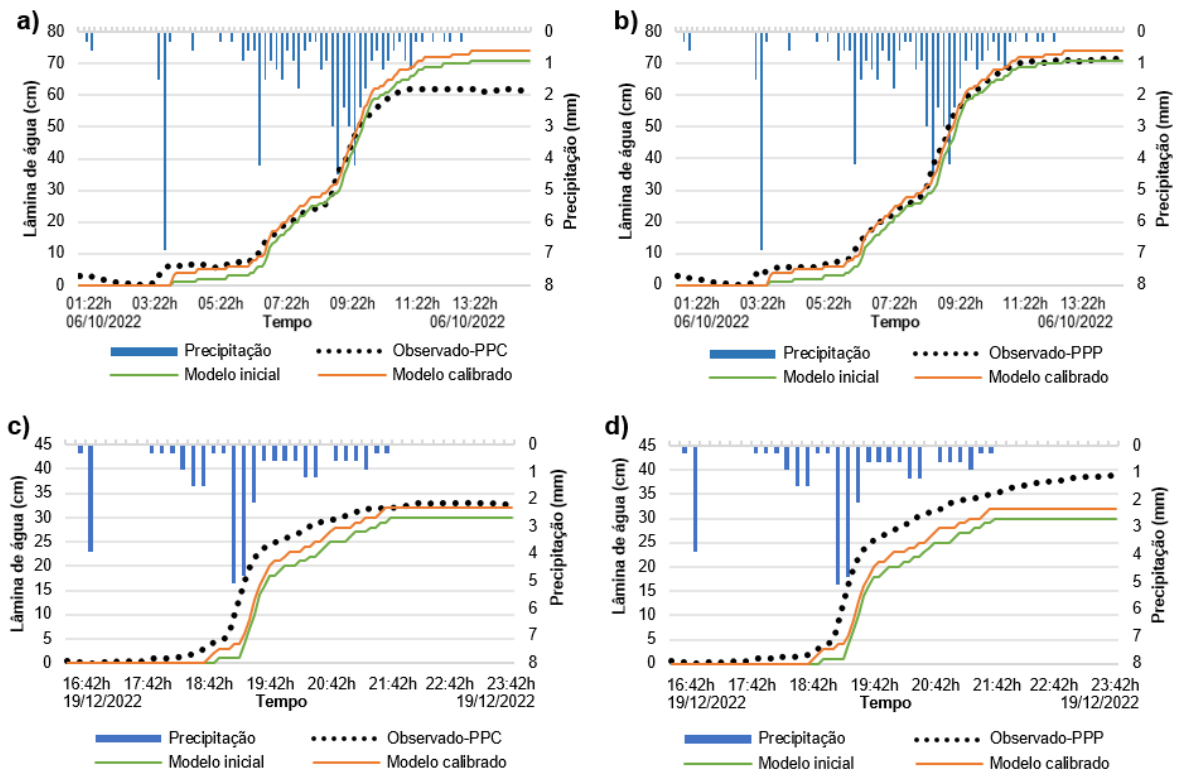


Figura 17 - Calibração: simulação do modelo (Média intensidade) dos PPC e PPP dos dias 06/10/2022 para (a) e (b) e, 19/12/2022 para (c) e (d), respectivamente. Fonte: Autoria própria.

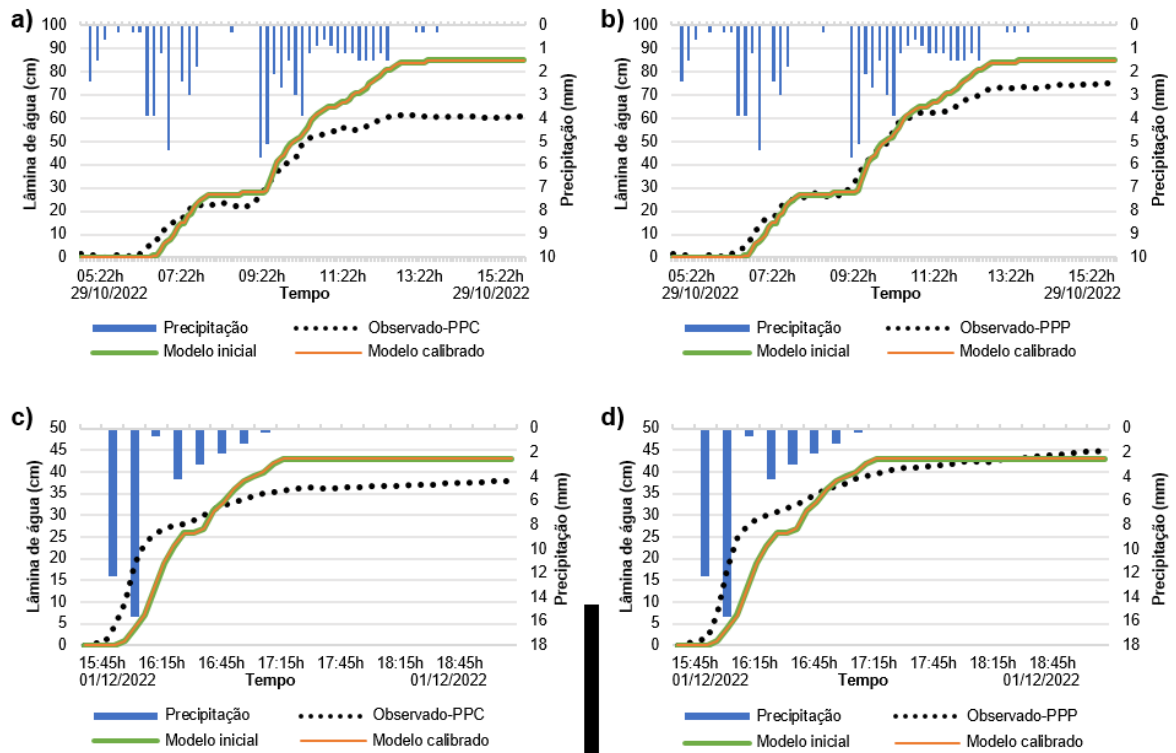


Figura 18 - Calibração: simulação do modelo (Alta intensidade) dos PPC e PPP dos dias 29/10/2022 para (a) e (b) e, 01/12/2022 para (c) e (d), respectivamente.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 16, representa a calibração para o modelo de leve intensidade. Na sobreposição dos hidrogramas é possível verificar uma aproximação considerável entre o modelo calibrado e o observado, quando comparado com o modelo inicial. Essa melhora na correção do modelo calibrado se tem devido à combinação de ajustes feitos nos parâmetros de coeficiente e deslocamento do dreno.

Para a Figura 17, que por sua vez representa o modelo de média intensidade, foi possível melhorar e alcançar um resultado satisfatório no modelo apenas com o ajuste no parâmetro de deslocamento do dreno.

Já para o modelo de alta intensidade, Figura 18, o modelo de estado inicial, apresentou para o hidrograma um comportamento geral próximo ao observado. Sendo então, o modelo inicial calibrado para o modelo de alta intensidade. Os valores dos parâmetros calibrados nos três modelos podem ser consultados no Anexo A.

Como é possível observar em todos os hidrogramas, existe uma característica em comum, que é o ponto de início em que a água começa a acumular no reservatório, pois em ambos os modelos, não foi possível corrigir essa característica. Logo os valores observados em campo sugerem uma antecipação no início acúmulo da lâmina de água, de 15 minutos em média. A explicação dessa característica não foi esclarecida durante o desenvolvimento da pesquisa, para tanto a resposta pode ou

não estar atrelado a parâmetros negligenciados na modelagem, como a evaporação e a condição de umidade presente nas camadas do PP no início das simulações.

Para tanto, as métricas estatísticas utilizadas na calibração do modelo de leve intensidade está apresentado na Tabela 18 e indicam resultados bom/satisfatórios para a calibração dos modelos.

Tabela 18 – Valores das métricas de desempenho dos modelos de calibração

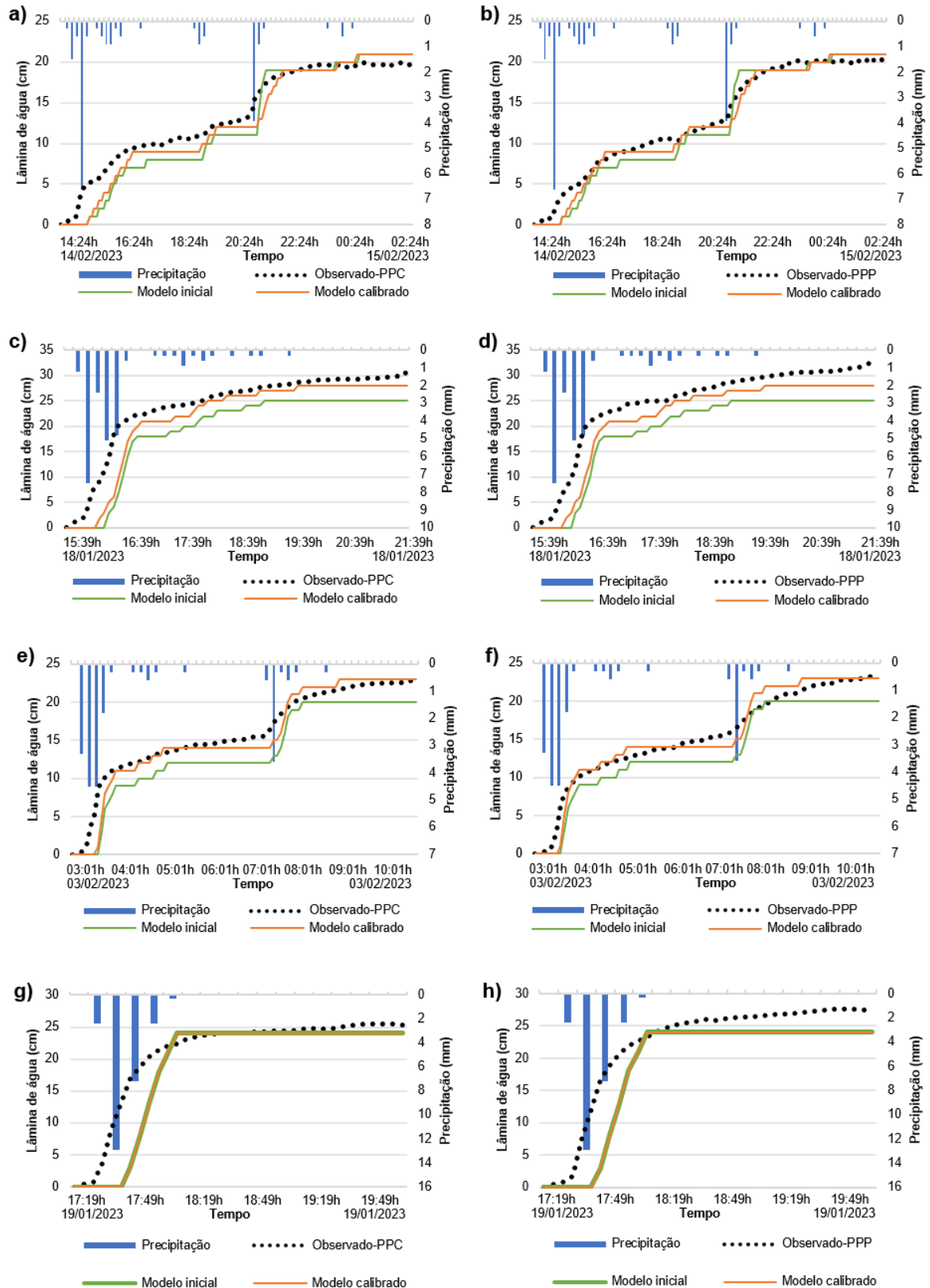
Intensidade	Evento	Modelo	NSE	PBIAS	EMA	RSR
Leve	19/10/2022	PPC	0,8	-12,85	4,41	0,45
		PPP	0,94	0,94	2,84	0,24
	12/11/2022	PPC	0,94	22,63	3,07	0,25
		PPP	0,91	31,77	4,13	0,31
Média	06/10/2022	PPC	0,94	-9,02	4,46	0,24
		PPP	1	1,32	1,58	0,07
	19/12/2022	PPC	0,95	10,79	2,05	0,22
		PPP	0,91	18,7	3,9	0,3
Alta	29/10/2022	PPC	0,59	-26,7	11,4	0,64
		PPP	0,94	-7,96	5,32	0,25
	01/12/2022	PPC	0,64	-6,78	5,66	0,6
		PPP	0,86	4,99	2,99	0,38

Fonte: Autoria própria.

Moriasi et al. (2007) propõem a classificação $NSE \geq 0,75$, como desempenho muito bom; $0,75 > NSE \geq 0,65$, bom; $0,65 > NSE \geq 0,50$, satisfatório; e $0,50 > NSE$, insatisfatório. Van Liew et al. (2007) considera para $|PBIAS| < 10\%$, muito bom; $10\% < |PBIAS| < 15\%$, bom; $15\% < |PBIAS| < 25\%$, satisfatório; $|PBIAS| > 25\%$, o modelo está inadequado. Já para a métrica EMA o intervalo situa-se entre 0 e ∞ , sendo tão melhor quanto mais próximo de zero (FERREIRA, 2017). Os valores de $RSR \geq 0,50$ é classificado como muito bom, valores entre $0,50 < RSR \leq 0,60$ é considerado bom, satisfatório quando os valores estão entre $0,60 < RSR \leq 0,70$, e maiores que 0,70 são valores insatisfatórios, por (MORIASI et al., 2007).

5.6 Validação

Após realização dos ajustes de calibração nos parâmetros dos modelos, foi realizado a validação, utilizando 4 eventos de chuva coletados nos dias 14/02/2023 (Leve intensidade), 18/01/2023 e 03/02/2023 (Média intensidade) e 19/01/2023 (Alta intensidade). A validação dos modelos desenvolvidos para SPPT e SPPP está apresentada na Figura 19.



**Figura 19 - Simulação dos modelos PPC e PPP dos dias 14/02/2023 para (a) e (b) (Leve); 18/01/2023 para (c) e (d), e 03/02/2023 para (e) e (f) (Média) e; 19/01/2023 para (g) e (h) (Alta).
Fonte: Autoria própria.**

Em todos os hidrogramas dos eventos validados, os valores das métricas de desempenhos, Tabela 19, foram satisfatórios para os modelos desenvolvidos.

Tabela 19 - Valores das métricas de desempenho dos modelos de validação

Evento	Modelo	NSE	PBIAS	EMA	RSR
Leve - 14/02/2023	PPC	0,92	6,08	1,31	0,29
	PPP	0,97	2,87	0,79	0,16
Média - 18/01/2023	PPC	0,83	9,42	2,24	0,41
	PPP	0,84	11,86	2,9	0,4
Média - 03/02/2023	PPC	0,93	2,35	0,98	0,26
	PPP	0,96	-0,57	0,9	0,2
Média - 19/01/2023	PPC	0,69	10,21	2,28	0,56
	PPP	0,72	15,22	3,35	0,53

Fonte: Autoria própria.

Os resultados estatísticos NSE, PBIAS, EMA e RSR sugerem, para os modelos desenvolvidos na presente pesquisa, melhor desempenho para o modelo de leve intensidade, na sequência para média intensidade e por fim para alta intensidade, quando comparados entre modelos. Já quando comparados entre o tipo de pavimento aplicado no modelo PPC ou PPP, o modelo de pavimentos permeáveis poroso apresenta melhor resultado, quando comparado com o modelo de pavimento permeáveis convencional.

A calibração e validação dos modelos no EPA SWMM faz-se necessário devido à complexidade em medir ou quantificar os valores de alguns parâmetros, o que torna a pesquisa sobre o assunto ainda mais interessante, pois quanto maior a exatidão do modelo calibrado, maior é a aproximação com o modelo real.

E por menor que seja o modulo experimental, um modelo computacional calibrado e validado pode ser replicado para áreas de contribuição inúmeras vezes maior. Dessa forma a modelagem SWMM é uma ferramenta que possibilita a gestão pública e privada ter uma percepção das lacunas relacionadas a drenagem urbana, bem como avaliar possíveis alternativas, como sistemas LID, no desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e resilientes.

6 CONCLUSÃO

Com uma visão histórica do gerenciamento de águas pluviais no Brasil e no mundo, é cada vez mais notável a insustentabilidade dos sistemas de drenagem tradicional. A demanda por pesquisas e desenvolvimento de alternativas que supram o déficit aumenta e, fica perceptível a necessidade em adaptar as cidades, com intuito de torná-las mais permeáveis e sustentáveis.

A modelagem computacional no EPA SWMM dispõe de inúmeras possibilidades de modelos, parâmetros e combinações, quando aplicados a sistemas LID. Essa possibilidade, em se tratando de drenagem urbana, torna as pesquisas ainda mais interessantes, pois os modelos e respectivas calibrações podem chegar muito próximo a realidade das cidades.

Para tanto, a modelagem SWMM na presente pesquisa, traz resultados em três modelos computacionais para eventos de precipitação de leve, média e alta intensidade, aplicados a simulações de pavimentos permeáveis convencionais e porosos em condição de infiltração Tipo C, ou seja, sem infiltração de água no solo. O desenvolvimento da pesquisa conclui com métricas satisfatórias para NSE, PBIES, EMA e RSR, sendo os modelos calibrados e validados.

A pesquisa de modelagem SWMM para pavimentos permeáveis Tipo C auxilia no desenvolvimento do conhecimento e compreensão de lacunas acerca do tema e os modelos podem servir como ferramentas para outros estudos de aperfeiçoamento, ou ainda, auxiliar a gestão pública de gerenciamento de águas pluviais, na tomada de decisões.

O estudo da drenagem urbana, na presente pesquisa, está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, pois contribui para os objetivos 3 – saúde e bem-estar, 6 – água potável e saneamento, 9 – indústria, inovação e infraestrutura, 11 – cidades e comunidades sustentáveis, 13 – ação contra a mudança global do clima e 14 – vida na água.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15805 - Pisos elevados de placas de concreto - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 16416 - Pavimentos permeáveis de concreto - requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. **NBR NM 53 - Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

AHIABLAME, L., & SHAKYA, R. (2016). **Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale.** *Journal of Environmental Management*, 171, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Área de tecnologia – laboratório: Relatório de ensaio nº 123230.** Determinação do coeficiente de permeabilidade. São Paulo/SP. 2019.

ASTM C1701. **ASTM international can be found on our web site at ASTM C1701: Infiltration Test for Pervious Concrete.**

Azari, B., & Tabesh, M. (2022). **Urban storm water drainage system optimization using a sustainability index and LID/BMPs.** *Sustainable Cities and Society*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103500>

BAEK, S. S., CHOI, D. H., JUNG, J. W., LEE, H. J., LEE, H., YOON, K. S., & CHO, K. H. (2015). **Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach.** *Water Research*, 86, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.038>

BELIHU, M., TEKLEAB, S., ABATE, B., & BEWKET, W. (2020). **Hydrologic response to land use land cover change in the Upper Gidabo Watershed, Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia.** *HydroResearch*, 3, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.07.001>

BROWN, R. A.; BORST, M. **Quantifying evaporation in a permeable pavement system.** *Hydrological Processes*, v. 29, n. 9, p. 2100–2111, 2015.

BRUNNER, A. C., PARK, S. J., RUECKER, G. R., DIKAU, R., & VLEK, P. L. G. (2004). **Catenary soil development influencing erosion susceptibility along a hillslope in Uganda.** *Catena*, 58(1), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2004.02.001>

CABRAL, P. **Erros e Incertezas nas Medições.** Disponível em: <http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncetzas.pdf>. Acesso em 22 de Junho de 2022.

Caldas, Joana; Bridi, Gabriella. (2022). **Chuva causa estragos em mais de 90 municípios de SC e estado tem mais de 170 desabrigados.** Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2022/05/04/chuva-causa-estragos-em-mais-de-90-municipios-de-sc-e-estado-tem-mais-de-170-desabrigados.ghtml>. Acesso em 16 de Abril de 2023.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. **A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza.** *SAÚDE DEBATE*, Rio de Janeiro, v. 43, n. 3, p. 94-108, dez. 2019.

COBOS, D. R., & CHAMBERS, C. **Calibrating ECH 2 O Soil Moisture Sensors.** Decagon Devices. (2010).

Coutinho, Katherine. (2022). **Chuvas deixam mortos e mais de 73 mil pessoas fora de casa em três estados do Nordeste.** Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2022/07/05/chuvas-deixam-milhares-pessoas-fora-de-casa-em-estados-do-nordeste.ghtml>. Acesso em 16 de Abril de 2023.

EKMEKCIOGLU, Ö., YILMAZ, M., ÖZGER, M., & TOSUNOG, F. (2021). **Investigation of the low impact development strategies for highly urbanized area via auto-calibrated storm water management model (SWMM).** *Water Science and Technology*, 84(9), 2194–2213. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.432>

ELLIOTT, A. H., & TROWSDALE, S. A. (2007). **A review of models for low impact urban stormwater drainage.** *Environmental Modelling and Software*, 22(3), 394–405. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.005>

Embrapa florestas. **Mapa simplificado de solos do Estado do Paraná**. Disponível em: http://www.escola.agrarias.ufpr.br/arquivospdf/mapa_solos_pr.pdf. Acesso em 16 de Junho de 2022.

FERREIRA, PALOMA MARA DE LIMA. **Influência da seleção das funções objetivo na calibração do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH**. UFPB – João Pessoa, 2017.

FLETCHER, T. D. et al. **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, 2014.

G1 PR e RPC Foz do Iguaçu. (2022). **Nível da água em rios começa a baixar após forte chuva atingir as regiões oeste e sudoeste do Paraná**. Disponível em: <https://g1.globo.com/pr/oeste-sudoeste/noticia/2022/10/13/nivel-da-agua-em-rios-comeca-a-baixar-apos-forte-chuva-atingir-as-regioes-oeste-e-sudoeste-do-parana.ghtml>. Acesso em 17 de Abril de 2023.

Gray, L. C., Zhao, L., & Stillwell, A. S. (2023). **Impacts of climate change on global total and urban runoff**. Journal of Hydrology, 620. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129352>

HOU, X., GUO, H., WANG, F., LI, M., XUE, X., LIU, X., & ZENG, S. (2020). **Is the sponge city construction sufficiently adaptable for the future stormwater management under climate change?** Journal of Hydrology, 588. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125055>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Cidades e Estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/pato-branco.html>. Acesso em 02 de Dezembro de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **População Brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões de habitantes, aponta censo 2022**. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html> . Acesso em 05 de Março de 2023.

INTERPAVE. **Understanding permeable paving**. v. 6, 2010.

LEI, C., & ZHU, L. (2018). **Spatio-temporal variability of land use/land cover change (LULCC) within the Huron River: Effects on stream flows**. Climate Risk Management, 19, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.09.002>

LI, H., ISHIDAIRA, H., WEI, Y., SOUMA, K., & MAGOME, J. (2022). **Assessment of Sponge City Flood Control Capacity According to Rainfall Pattern Using a Numerical Model after Multi-Source Validation.** *Water (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/w14050769>

LI, Q., WANG, F., YU, Y., HUANG, Z., LI, M., & GUAN, Y. (2019). **Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China.** *Journal of Environmental Management*, 231, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.024>

LIU, J., HYO-SEOB, C., OSMAN, S., HYEON-GYO, J., & LEE, K. (2022). **Review of the status of urban flood monitoring and forecasting in tc region.** *Tropical Cyclone Research and Review*. <https://doi.org/10.1016/j.tccr.2022.07.001>

LOURENÇO, I. B., GUIMARÃES, L. F., ALVES, M. B., & MIGUEZ, M. G. (2020). **Land as a sustainable resource in city planning: The use of open spaces and drainage systems to structure environmental and urban needs.** *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123096>

MADRAZO-URIBEETXEBARRIA, E., GARMENDIA ANTÍN, M., ALMANDOZ BERRONDO, J., & ANDRÉS-DOMÉNECH, I. (2021). **Sensitivity analysis of permeable pavement hydrological modelling in the Storm Water Management Model.** *Journal of Hydrology*, 600. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126525>

MIGUEZ, M. G., BAHIENSE, J. M., REZENDE, O. M., & VERÓL, A. P. (2012). **New urban developments: Flood control and LID - a sustainable approach for urban drainage systems.** *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 155, 469–480. <https://doi.org/10.2495/SC120391>

MIGUEZ, M. G., REZENDE, O. M., & VERÓL, A. P. (2015). **City Growth and Urban Drainage Alternatives: Sustainability Challenge.** *Journal of Urban Planning and Development*, 141(3), 04014026. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000219](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000219)

MISRA, A. K. (2011). **Impact of Urbanization on the Hydrology of Ganga Basin (India).** In *Water Resources Management (Vol. 25, Issue 2, pp. 705–719)*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9722-9>

MORAES, Alexandre Perri de. **PROCEDIMENTOS TÉCNICOS DE DIMENSIONAMENTO DA MICRODRENAGEM DO MUNICÍPIO DE SANTO ANDRÉ.** XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. Poços de Caldas – MG, 2015.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.

MOURA, N. C. B., PELLEGRINO, P. R. M., & MARTINS, J. R. S. (2016). **Best management practices as an alternative for flood and urban storm water control in a changing climate**. *Journal of Flood Risk Management*, 9(3), 243–254. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12194>

Nações Unidas Brasil. **ONU-Habitat: população mundial será 68% urbana até 2050**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-ser%C3%A1-68-urbana-at%C3%A9-2050#:~:text=No%20ritmo%20atual%2C%20a%20estimativa,crescer%20para%2068%25%20at%C3%A9%202050>. Acesso em 15 de Dezembro de 2022.

NIAZI, M., NIETCH, C., MAGHREBI, M., JACKSON, N., BENNETT, B. R., TRYBY, M., & MASSOUDIEH, A. (2017). **Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis**. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(2). <https://doi.org/10.1061/jswbay.0000817>

NIEMCZYNOWICZ, J. (1999). **Urban hydrology and water management - present and future challenges**. *Urban Water*, 1(1), 1-14. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(99\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(99)00009-6)

NITSCHKE, P. R. et al. **Atlas do Estado do Paraná**. 2019.

NUERNBERG, J. K. **Proposta de modelagem de pavimentos permeáveis do Tipo C como sub-bacias regulares equivalentes**. 160 pág. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

PABI, O., EGYIR, S., & ATTUA, E. M. (2021). **Flood hazard response to scenarios of rainfall dynamics and land use and land cover change in an urbanized river basin in Accra, Ghana**. *City and Environment Interactions*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100075>

PALLA, A., & GNECCO, I. (2015). **Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale**. *Journal of Hydrology*, 528, 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>

Pokhrel, S. R., Chhipi-Shrestha, G., Mian, H. R., Hewage, K., & Sadiq, R. (2023). **Integrated performance assessment of urban water systems: Identification and prioritization of one water approach indicators**. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.005>

Puente, Beatriz; Brasil, Filipe; Alpaca, Nathalie. (2022). **Tragédia em Petrópolis completa três meses neste domingo.** Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/tragedia-em-petropolis-completa-tres-meses-neste-domingo/>. Acesso em 17 de Abril de 2023.

RANDALL, M., SUN, F., ZHANG, Y., & JENSEN, M. B. (2019). **Evaluating Sponge City volume capture ratio at the catchment scale using SWMM.** Journal of Environmental Management, 246, 745–757. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.134>

Rodrigues, Thales. (2022). **Cidades do ES decretam situação de emergência por causa da chuva.** Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espirito-santo/noticia/2022/01/12/cidades-do-es-decretam-situacao-de-emergencia-por-causa-da-chuva.ghtml>. Acesso em 18 de Abril de 2023.

ROSA, DAVID J., JOHN C. CLAUSEN, AND MICHAEL E. DIETZ, 2015. **Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development.** Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 51(3): 746-757. DOI: 10.1111/jawr.12272.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's manual version 5.1.** United States Environmental Protection Agency, p. 1–352, 2015.

SANGALLI, N. C. R. **Modelagem hidrológica de um módulo experimental de pavimento permeável poroso utilizando o EPA SWMM.** 97 pág. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

SANTOS, M. F. N., BARBASSA, A. P., VASCONCELOS, A. F., & OMETTO, A. R. (2021). **Stormwater management for highly urbanized areas in the tropics: Life cycle assessment of low impact development practices.** Journal of Hydrology, 598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126409>

SHACKEL, BRIAN. **Permeable Interlocking Concrete Pavements-Design and Construction Guide.** Concrete Masonry Association of Australia - CMAA ISBN 0 909407 58 4. (2010).

SILVA, F. H. B. B., SILVA, M. S. L., & CAVALCANTI, A. C. (2005). **Descrição das principais classes de solos.** Disponível em: http://www.cpatas.embrapa.br/public_eletronica/downloads/OPB1113.pdf. Acesso em 10 de Junho de 2022.

Souza, Felipe. (2022). **Após inundações na Bahia, meteorologia prevê chuvas fortes no Sudeste.** Disponível em: <https://g1.globo.com/meio->

ambiente/noticia/2021/12/29/apos-inundacoes-na-bahia-meteorologia-preve-chuvas-fortes-no-sudeste-entenda.ghml. Acesso em 17 de Abril de 2023.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL – SUDERHSA. **Manual de drenagem urbana**. V. 1, p. 1-150, 2002.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. **Estudo Do Clima Do Município De Pato Branco, Paraná**. Synergismus scyentifica UTFPR, v. 3, n. 4, p. 3–5, 2008.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. **Caracterização dos solos da bacia do Rio Ligeiro (PR) na estabilidade de taludes**. Vol. 42. Curitiba: Revista Brasileira de Geociências, 2012.

TEIXEIRA, L. F. C. **Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo hidrológico SWAt em função de diferentes características de bacias hidrográficas**. Universidade Federal do Espírito Santo: Dissertação de mestrado. Vitória, 2017.

TOLDERLUND, L. **Design Guidelines and Maintenance Manual for Green Roofs In the Semi-Arid and Arid West**. (2010).

Tucci, Carlos E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco 2005.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE (USDOD). (2004). Unified Facilities Criteria (UFC) Design: **Low Impact Development Manual**.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – US EPA. **Storm Water Management Model (SWMM)**. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. Acesso em 05 de Março de 2022.

Van Liew, M.W., Veith, T.L., Bosch, D.D., Arnold, J.G., 2007. **Suitability of SWAT for he conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS atersheds**. Journal of Hydrological Engineering 12, 173-189.

WATER BY DESIGN. (2014). **Bioretention Technical Design Guidelines**. v. 1.1. Healthy Waterways Ltd, Brisbane.

WOODS-BALLARD, B. et al. **The SuDS Manual**. CIRIA, v. 1, p. 386–435, 2015.

XU, Z., & ZHAO, G. (2016). **Impact of urbanization on rainfall-runoff processes: Case study in the liangshui river basin in Beijing, China.** IAHS-AISH Proceedings and Reports, 373, 7–12. <https://doi.org/10.5194/piahs-373-7-2016>

YANG, W., BRÜGGEMANN, K., SEGUYA, K. D., AHMED, E., KAESEBERG, T., DAI, H., HUA, P., ZHANG, J., & KREBS, P. (2020). **Measuring performance of low impact development practices for the surface runoff management.** Environmental Science and Ecotechnology, 1. <https://doi.org/10.1016/j.es.2020.100010>

YOUNIS, S. M. Z., & AMMAR, A. (2018). **Quantification of impact of changes in land use-land cover on hydrology in the upper Indus Basin, Pakistan.** Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 21(3), 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.001>

ZHU, H., YU, M., ZHU, J., LU, H., & CAO, R. (2019). **Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff.** International Journal of Transportation Science and Technology, 8(4), 373–382. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.12.001>

ZHU, Z., & CHEN, X. (2017). **Evaluating the effects of low impact development practices on urban flooding under different rainfall intensities.** Water (Switzerland), 9(7). <https://doi.org/10.3390/w9070548>

6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	2	3	4	4	5		
6	5	4	3	2	2	1	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5		
6	5	5	4	3	2	1	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	1	2	3	3	4	5	6		
6	6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6		
6	6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6		
6	6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6		
6	6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6		
6	6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6		
6	6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6		
6	6	5	4	3	2	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6		
6	6	5	4	3	2	2	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6		
7	6	5	4	3	3	2	1	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	2	3	3	4	5	5	6		
7	6	5	4	4	3	2	1	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	2	3	3	4	5	5	6		
7	6	5	4	4	3	2	1	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	2	3	3	4	5	6	6		
7	6	5	5	4	3	2	1	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	2	2	3	4	4	5	6	6	
7	6	6	5	4	3	2	1	1	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	2	2	3	4	5	5	6	7	
7	6	6	5	4	3	2	2	1	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	2	2	3	4	5	5	6	7	
7	7	6	5	4	3	2	2	1	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	1	2	3	3	4	5	5	6	7	
8	7	6	6	5	4	3	2	1	1	0	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7
9	8	7	6	5	4	4	3	2	1	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7	8	8	
9	8	7	7	6	5	4	3	2	2	1	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	2	3	3	4	5	6	6	7	8	8	8	
10	9	8	7	6	6	5	4	3	2	2	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	2	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	9	
10	10	9	8	7	6	5	5	4	3	2	5	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	3	3	4	5	6	6	7	8	8	9	10	10	
11	10	9	8	8	7	6	5	4	3	3	5	6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	3	4	5	5	6	7	7	8	9	9	10	10	
13	13	12	11	10	9	8	8	7	6	5	6	7	8	8	9	9	9	9	9	10	10	6	6	7	8	9	9	10	11	11	12	13	13	
16	15	14	14	13	12	11	10	9	9	8	7	9	10	11	11	12	12	12	12	12	12	8	9	10	11	11	12	13	13	14	15	15	15	
17	17	16	15	14	13	12	12	11	10	9	8	10	11	13	13	13	13	13	13	14	14	10	10	11	12	13	13	14	15	15	16	17	17	
18	18	17	16	15	14	13	13	12	11	10	9	11	13	14	14	14	14	14	14	15	15	11	11	12	13	14	14	15	16	16	17	18	18	
19	18	17	17	16	15	14	13	12	12	11	10	12	14	15	15	15	15	15	15	15	15	11	12	13	14	14	15	16	16	17	18	18	18	
20	19	18	17	16	16	15	14	13	12	11	10	13	15	15	15	16	16	16	16	16	16	12	13	13	14	15	16	16	17	18	18	19	19	
20	20	19	18	17	16	16	15	14	13	12	11	15	16	16	16	16	16	17	17	17	17	13	14	14	15	16	16	17	18	18	19	20	20	
21	21	20	19	18	17	16	16	15	14	13	12	16	17	17	17	17	17	17	17	17	17	14	14	15	16	17	17	18	19	19	20	21	21	
22	22	21	20	19	18	17	17	16	15	14	13	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18	15	15	16	17	18	18	19	20	20	21	22	22	
23	23	22	21	20	19	18	18	17	16	15	14	18	19	19	19	19	19	19	19	19	19	16	16	17	18	19	19	20	21	21	22	23	23	
24	23	22	21	21	20	19	18	17	16	16	15	18	19	20	20	20	20	20	20	20	20	16	17	18	18	19	20	20	21	22	23	23	23	
25	24	23	22	21	20	20	19	18	17	16	16	19	20	20	20	20	21	21	21	21	21	17	18	18	19	20	20	21	22	23	23	24	24	
26	25	24	23	22	22	21	20	19	18	17	16	20	21	21	21	22	22	22	22	22	22	18	19	19	20	21	22	22	23	24	24	25	25	
26	25	24	24	23	22	21	20	19	19	18	17	21	21	22	22	22	22	22	22	23	23	18	19	20	20	21	22	23	23	24	25	25	25	
27	26	25	24	24	23	22	21	20	19	19	18	21	22	22	23	23	23	23	23	23	24	19	20	21	21	22	23	23	24	25	26	26	26	
28	27	26	26	25	24	23	22	22	21	20	19	22	23	24	24	24	24	24	24	24	25	25	21	21	22	23	23	24	25	25	26	27	27	27
29	28	27	26	25	25	24	23	22	21	21	20	23	24	24	24	25	25	25	25	25	25	21	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	28	
29	28	28	27	26	25	24	23	23	22	21	20	24	25	25	25	25	25	25	25	26	26	22	22	23	24	24	25	26	26	27	28	28	29	
29	29	28	27	26	25	24	24	23	22	21	21	24	25	25	25	25	25	26	26	26	26	22	23	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	
30	29	28	27	26	26	25	24	23	22	21	22	25	25	25	25	26	26	26	26	26	26	22	23	23	24	25	26	26	27	28	28	29	29	
30	29	28	27	27	26	25	24	23	22	22	22	25	25	25	26	26	26	26	26	26	26	22	23	24	24	25	26	26	27	28	29	29	29	
30	29	28	28	27	26	25	24	23	23	22	23	25	25	26	26	26	26	26	26	26	26	22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	29	
31	30	29	28	27	27	26	25	24	23	23	24	26	26	26	26	27	27	27	27	27	27	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30	30	
32	31	30	29	28	28	27	26	25	24	23	24	26	27	27	27	28	28	28	28	28	28	24	25	25	26	27	28	28	29	30	30	31	31	
33	32	31	30	30	29	28	27	26	25	25	25	27	28	28	28	29	29	29	29	29	29	25	26	27	27	28	29	29	30	31	32	32	32	
33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	25	26	28	28	28	29	29	29	29	29	29	29	26	27	28	28	29	29	30	31	31	32	33	33	
34	34	33	32	31	30	30	29	28	27	26	26	29	29	29	30	30	30	31	31	31	31	27	28	28	29	30	30	31	32	32	33	34	34	

37	36	35	34	33	32	32	31	30	29	28	27	30	31	31	32	32	33	33	33	33	34	29	30	30	31	32	32	33	34	35	35	36
39	38	38	37	36	35	34	34	33	32	31	28	31	32	34	35	35	36	36	36	36	36	32	32	33	34	34	35	36	37	37	38	39
42	42	41	40	39	38	38	37	36	35	34	29	33	35	36	37	38	39	39	39	39	40	35	36	36	37	38	38	39	40	40	41	42
45	44	43	42	41	41	40	39	38	37	36	30	34	37	39	40	41	41	41	41	42	42	37	38	38	39	40	41	41	42	43	43	44
46	46	45	44	43	42	41	41	40	39	38	32	36	39	41	42	42	42	43	43	43	43	39	39	40	41	42	42	43	44	44	45	46
48	47	47	46	45	44	43	42	42	41	40	33	38	41	43	44	44	44	45	45	45	45	41	41	42	43	43	44	45	46	46	47	48
50	50	49	48	47	46	45	45	44	43	42	34	40	43	45	46	46	47	47	47	47	47	43	43	44	45	46	46	47	48	48	49	50
53	52	51	51	50	49	48	47	46	46	45	35	41	45	47	48	49	49	49	50	50	50	45	46	47	47	48	49	50	50	51	52	52
56	55	54	53	53	52	51	50	49	48	48	37	43	47	50	51	52	52	52	53	53	53	48	49	50	50	51	52	52	53	54	55	55
58	57	56	56	55	54	53	52	51	51	50	38	45	50	52	53	54	54	55	55	55	55	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	59
60	59	58	57	56	56	55	54	53	52	51	40	47	52	54	55	56	56	56	57	57	57	52	53	53	54	55	56	56	57	58	58	59
62	61	60	59	58	58	57	56	55	54	53	41	49	54	56	57	58	58	58	59	59	60	54	55	56	56	57	58	58	59	60	60	61
63	62	61	61	60	59	58	57	56	56	55	43	51	56	58	59	59	59	60	60	60	61	55	56	57	58	58	59	60	60	61	62	62
63	62	62	61	60	59	58	58	57	56	55	44	53	57	58	59	59	60	60	60	61	61	56	56	57	58	58	59	60	61	61	62	63
64	63	62	61	61	60	59	58	57	57	56	45	54	58	59	59	60	60	61	61	61	62	56	57	58	58	59	60	61	61	62	63	63
64	64	63	62	61	60	60	59	58	57	56	47	56	59	60	60	60	61	61	62	62	62	57	58	58	59	60	60	61	62	62	63	64
65	64	63	62	61	60	59	58	57	57	48	57	60	60	60	61	61	62	62	62	63	63	58	59	59	60	61	61	62	63	63	64	65
65	65	64	63	62	61	61	60	59	58	57	49	58	60	61	61	61	62	62	63	63	63	64	59	59	60	61	61	62	63	64	64	65
66	65	65	64	63	62	61	61	60	59	58	51	59	61	61	62	62	63	63	63	64	64	59	59	60	61	61	62	63	64	64	65	66
67	66	65	65	64	63	62	61	60	60	59	52	60	62	62	63	63	63	64	64	64	65	59	60	61	62	62	63	64	64	65	66	66
68	67	66	65	64	64	63	62	61	60	59	53	61	63	63	63	64	64	64	65	65	66	60	61	61	62	63	64	64	65	66	66	67
69	68	67	66	65	64	64	63	62	61	60	54	62	63	64	64	64	65	65	66	66	67	61	62	62	63	64	64	65	66	67	67	68
69	68	67	67	66	65	64	63	63	62	61	55	63	64	64	65	65	66	66	66	67	67	61	62	63	64	64	65	66	66	67	68	68
69	68	68	67	66	65	64	63	63	62	61	56	63	64	64	65	66	66	66	67	67	67	62	62	63	64	64	65	66	66	67	68	69
69	69	68	67	66	65	64	64	63	62	61	57	64	64	64	65	65	66	66	67	67	68	62	62	63	64	65	65	66	67	67	68	69
70	69	68	67	66	66	65	64	63	62	61	58	64	64	65	65	66	66	66	67	67	68	62	63	63	64	65	66	66	67	68	68	69
70	69	69	68	67	66	65	65	64	63	62	59	65	65	65	66	66	66	67	67	68	68	63	63	64	65	65	66	67	68	68	69	70
71	70	69	68	67	66	65	64	64	63	60	60	65	66	66	66	67	67	68	68	69	69	63	64	65	65	66	67	68	68	69	70	70
72	71	70	69	68	68	67	66	65	64	64	61	66	66	67	67	68	68	69	69	70	70	64	65	66	66	67	68	68	69	70	70	71
72	72	71	70	69	68	68	67	66	65	64	62	67	67	67	68	68	69	69	70	70	71	65	66	66	67	68	68	69	70	70	71	72
73	72	71	70	69	69	68	67	66	65	64	63	67	67	68	68	69	69	70	70	70	71	65	66	67	67	68	68	69	70	71	71	72
73	72	71	70	70	69	68	67	66	66	65	63	67	68	68	68	69	69	70	70	71	71	65	66	67	67	68	69	70	70	71	72	72
73	72	72	71	70	69	68	68	67	66	65	65	68	68	68	69	69	70	70	71	71	71	66	66	67	68	68	69	70	71	71	72	73
73	72	72	71	70	69	68	68	67	66	65	66	68	68	68	69	69	70	70	71	71	72	66	66	67	68	68	69	70	71	71	72	73
73	73	72	71	70	69	68	68	67	66	65	66	68	68	68	69	69	70	70	71	71	72	66	66	67	68	69	69	70	71	71	72	73
74	73	72	71	70	69	69	68	67	66	65	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	66	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	73
74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	67	68	68	69	69	70	70	70	71	71	72	66	67	67	68	69	70	70	71	72	72	73	73
74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	67	68	68	69	69	70	70	70	71	71	72	66	67	67	68	69	70	70	71	72	72	73	73
74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	68	68	68	69	69	70	70	70	71	71	72	66	67	67	68	69	70	70	71	72	72	73	73
74	73	72	71	70	69	68	67	66	66	68	68	69	69	69	70	70	71	71	72	72	66	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	73
74	73	72	71	70	69	68	67	66	66	68	68	69	69	69	70	70	71	71	72	72	66	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	73
74	73	73	72	71	70	69	69	68	67	66	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	73	74
74	74	73	72	71	70	69	69	68	67	66	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	73	67	68	68	69	70	70	71	72	72	73	74
74	74	73	72	71	70	69	69	68	67	66	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	73	67	68	68	69	70	70	71	72	72	73	74
75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	69	69	69	69	70	70	70	71	71	72	72	73	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	74
75	74	73	72	71	70	69	68	67	67	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	74
75	74	73	72	71	70	69	68	67	67	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	74
75	74	73	72	71	70	69	68	67	67	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	74
75	74	73	72	71	70	69	68	67	67	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	74
75	74	73	72	71	70	69	68	67	67	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	74
75	74	73	72	71	70	69	68	67	67	69	69	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	67	68	68	69	70	70	71	72	73	73	74

44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	30	31	33	36	37	39	40	42	43	44	46	35	36	36	37	38	39	40	41	42	42	43	
44	43	43	42	41	40	38	37	37	35	34	31	32	33	36	38	40	41	43	44	45	47	35	36	37	38	38	40	41	41	42	43	43	44
45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	31	32	34	37	39	40	42	43	44	46	47	36	37	38	39	40	41	42	42	43	44	45	
46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	31	33	35	37	39	41	42	44	45	47	48	37	38	38	39	40	41	42	43	44	44	45	
46	45	44	44	42	41	40	39	38	37	36	32	33	35	38	40	41	43	45	46	47	49	37	38	39	39	40	41	42	43	44	45	45	
48	47	46	46	45	43	42	41	40	39	38	32	34	36	39	42	43	45	47	48	50	51	39	40	41	42	42	43	44	45	46	47	47	
49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	33	35	37	40	43	44	46	48	49	51	52	40	41	42	42	43	44	45	46	47	48	48	
50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	33	36	38	41	43	45	47	48	50	51	53	40	42	42	43	44	45	46	47	48	48	49	
51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	34	36	39	42	44	46	48	49	51	52	54	42	43	43	44	45	46	47	48	49	49	50	
52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	35	37	40	43	45	47	49	50	52	54	55	42	44	44	45	46	47	48	49	50	50	51	
52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	35	38	40	43	45	47	49	51	52	54	55	43	44	45	45	46	47	48	49	50	51	51	
53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	36	39	41	44	46	48	50	52	53	55	57	44	45	45	46	47	48	49	50	51	51	52	
53	52	52	51	50	49	47	46	46	44	43	36	39	41	44	47	49	50	52	54	55	57	44	45	46	47	47	49	50	50	51	52	53	
54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	37	39	42	45	47	49	51	53	54	56	58	45	46	46	47	48	49	50	51	52	52	53	
54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	37	40	42	45	47	49	51	53	55	56	58	45	46	47	47	48	49	50	51	52	53	53	
54	53	52	52	51	49	48	47	46	45	44	38	40	42	45	47	49	51	53	55	56	58	45	46	47	48	48	49	50	51	52	53	53	
54	53	53	52	51	50	48	47	47	45	44	38	40	42	45	48	50	51	53	55	57	58	45	46	47	48	48	50	51	51	52	53	54	
55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	39	40	43	46	48	50	52	54	56	58	59	46	47	48	48	49	50	51	52	53	54	54	
56	55	55	54	53	52	50	50	49	47	46	39	41	44	47	50	52	54	56	57	59	61	47	48	49	50	50	52	53	54	54	55	56	
57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	40	42	44	48	50	52	54	56	58	59	61	48	49	49	50	51	52	53	54	55	55	56	
57	56	55	55	54	52	51	50	50	48	47	40	42	45	48	50	52	54	56	58	60	62	48	49	50	51	51	52	53	54	55	56	56	
58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	40	43	46	49	51	53	55	57	59	60	62	49	50	50	51	52	53	54	55	56	56	57	
58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	41	43	46	49	51	53	55	57	59	60	62	49	50	51	51	52	53	54	55	56	56	57	
58	57	57	56	55	54	52	51	51	49	48	42	43	46	49	51	54	56	58	59	61	63	49	50	51	52	52	54	55	55	56	57	58	
58	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	42	44	46	49	52	54	56	58	60	61	63	49	51	51	52	53	54	55	56	56	57	58	
59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	42	44	46	49	52	54	56	58	60	62	63	50	51	52	52	53	54	55	56	57	57	58	
59	58	58	57	56	55	53	52	52	50	49	43	44	47	50	52	55	57	59	60	62	64	50	51	52	53	53	55	56	56	57	58	59	
60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	43	45	47	50	53	55	57	59	61	62	64	50	52	52	53	54	55	56	57	57	58	59	
60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	43	45	47	50	53	55	57	60	61	63	65	51	52	53	53	54	55	56	57	58	59	59	
61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	44	45	48	51	54	56	58	60	62	64	66	52	53	53	54	55	56	57	58	59	59	60	
61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	44	46	48	51	54	56	58	60	62	64	66	52	53	54	54	55	56	57	58	59	60	60	
61	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	44	46	49	52	55	57	59	61	63	65	66	52	54	54	55	56	57	58	59	59	60	61	
62	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	45	47	50	53	56	58	60	62	64	66	68	53	55	55	56	57	58	59	60	60	61	62	
64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	45	48	51	54	57	59	62	64	66	68	70	55	56	57	57	58	59	60	61	62	63	63	
65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	46	48	51	55	58	60	62	64	66	68	70	55	57	57	58	59	60	61	62	63	63	64	
66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	46	49	52	56	59	61	63	66	68	70	72	57	58	59	59	60	61	62	63	64	64	65	
66	66	65	64	63	62	60	60	59	57	56	47	50	53	56	59	62	64	66	68	70	72	57	58	59	60	61	62	63	64	64	65	66	
66	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	47	50	53	57	59	62	64	66	69	71	72	57	59	59	60	61	62	63	64	64	65	66	
67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	48	51	53	57	60	62	65	67	69	71	73	58	59	60	60	61	62	63	64	65	66	66	
68	67	67	66	65	64	62	61	61	59	58	48	51	54	58	61	64	66	68	71	73	75	59	60	61	62	62	64	65	65	66	67	68	
69	68	68	67	66	65	63	63	62	60	59	49	52	55	59	62	65	67	69	72	74	76	60	61	62	63	63	65	66	67	67	68	69	
70	69	69	68	67	66	64	63	63	61	60	50	53	56	60	63	66	68	71	73	75	77	61	62	63	64	64	66	67	67	68	69	70	
71	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	50	54	57	61	64	67	69	72	74	76	79	62	64	64	65	66	67	68	69	69	70	71	
72	71	71	70	69	68	66	65	65	63	62	51	54	58	62	65	68	70	73	75	77	80	63	64	65	66	66	68	69	69	70	71	72	
73	72	72	71	70	69	67	66	64	63	62	51	55	58	63	66	69	71	74	76	79	81	64	65	66	67	67	69	70	70	71	72	73	
74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	52	56	59	63	66	69	72	74	76	79	81	64	66	66	67	68	69	70	71	71	72	73	
74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	53	56	59	63	66	69	72	74	77	79	81	65	66	66	67	68	69	70	71	72	73	73	
74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	54	56	59	63	66	69	72	74	77	79	81	65	66	67	67	68	69	70	71	72	73	73	
74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	54	56	59	63	66	69	72	74	77	79	81	65	66	67	67	68	69	70	71	72	73	73	

64	64	61	60	59	58	57	56	54	53	52	37	45	49	52	55	58	61	63	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	61	63
64	64	61	60	59	58	57	56	55	53	52	38	46	49	52	55	58	61	63	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	39	46	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	40	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	41	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	42	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	43	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	44	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	45	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	45	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	64	61	61	59	58	57	56	55	53	52	46	47	49	52	55	58	61	64	66	68	70	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63

Tabela 5A – Calibração evento 01/12/2022

Deslocamento do dreno											Coeficiente dreno										Ponto murcha												
-100%	-80%	-60%	-40%	-20%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	-100%	-80%	-60%	-40%	-20%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	-100%	-80%	-60%	-40%	-20%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2
7	6	5	5	5	4	4	3	3	3	3	1	1	2	2	3	4	5	5	5	5	5	5	2	2	3	3	4	4	5	5	5	6	6
11	10	9	8	7	7	6	5	4	4	3	2	2	3	4	6	7	7	7	7	8	8	8	3	3	5	5	6	7	7	8	9	9	10
17	16	15	14	14	13	12	11	10	10	9	3	6	8	10	10	13	14	15	16	17	18	9	9	11	11	12	13	13	14	15	15	16	
23	22	21	20	19	19	18	17	16	16	15	5	9	12	15	15	19	20	21	22	23	23	15	15	17	17	18	19	19	20	21	21	22	
28	27	26	25	24	23	23	22	21	21	19	7	11	15	19	19	23	25	25	25	24	23	20	20	21	22	23	23	24	25	25	26	27	
30	29	28	27	26	26	25	24	23	23	21	8	14	18	22	22	26	26	26	26	25	24	22	22	23	24	25	26	27	28	28	29	29	
31	30	29	28	27	26	25	25	24	24	22	10	16	21	25	25	26	27	27	26	26	25	23	23	24	25	26	26	27	28	28	29	30	
32	30	30	29	28	27	26	25	25	25	23	11	18	23	27	27	27	28	28	28	27	26	24	24	25	26	26	27	28	28	29	30	31	
36	34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	13	21	26	29	29	31	32	32	32	31	31	27	27	29	29	30	31	31	32	33	34	35	
38	36	36	35	34	33	32	31	31	31	29	15	23	29	32	32	33	34	35	34	34	33	30	30	31	32	32	33	34	34	35	36	37	
41	39	39	38	37	36	35	34	34	34	32	16	25	31	34	34	36	37	38	38	38	37	33	33	34	35	35	36	37	37	38	39	40	
43	41	41	40	39	38	37	37	36	36	34	18	28	33	36	36	38	39	40	40	40	39	35	35	36	37	37	38	39	40	40	41	42	
44	42	41	41	40	39	38	37	36	36	35	20	30	35	38	38	39	40	41	41	40	39	35	35	37	37	38	39	40	40	41	42	43	
45	44	43	42	41	40	40	39	38	38	36	21	32	37	39	39	40	42	42	42	42	41	37	37	38	39	40	40	41	42	42	43	44	
47	45	44	44	43	42	41	40	39	39	38	23	34	39	41	41	42	43	44	44	44	43	38	38	40	40	41	42	43	43	44	45	46	
48	46	45	45	44	43	42	41	40	40	39	24	36	41	42	42	43	44	45	45	44	44	39	39	41	42	42	43	44	44	45	46	47	
48	46	46	45	44	43	42	41	41	41	39	26	37	42	42	42	43	44	45	45	45	44	40	40	41	42	42	43	44	44	45	46	47	
48	47	46	45	44	43	42	42	41	41	39	27	39	42	42	42	43	45	45	45	45	44	40	40	41	42	42	43	44	45	45	46	47	

34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33
34	33	32	32	31	30	29	28	28	27	26	29	29	29	30	30	30	30	31	31	31	31	27	27	28	29	30	30	31	31	32	33	33