



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



LUIZ HUMBERTO DE FREITAS SOUZA



**MODELO HIDRODINÂMICO PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL
EM MICRODRENAGEM:
UMA CONTRIBUIÇÃO À GEOMORFOLOGIA URBANA**

UBERLÂNDIA - MG

2024

LUIZ HUMBERTO DE FREITAS SOUZA

**MODELO HIDRODINÂMICO PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL
EM MICRODRENAGEM:
UMA CONTRIBUIÇÃO À GEOMORFOLOGIA URBANA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Geografia.

Área de Concentração: Dinâmicas Territoriais e Estudos Ambientais.

Linha de Pesquisa: Estudos Ambientais e Geotecnologias.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues.

UBERLÂNDIA - MG

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S729m Souza, Luiz Humberto de Freitas, 1977-
2024 Modelo hidrodinâmico para análise de escoamento superficial em
microdrenagem [recurso eletrônico]: uma contribuição à geomorfologia
urbana / Luiz Humberto de Freitas Souza. - 2024.

Orientador: Silvio Carlos Rodrigues.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-graduação em Geografia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.5509>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Geografia. 2. Ciências ambientais. 3. Geomorfologia ambiental. I.
Rodrigues, Silvio Carlos, 1965-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Programa de Pós-graduação em Geografia. III.
Título.

CDU: 910.1

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária Documentalista – CRB6/1925



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geografia
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1H, Sala 1H35 - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4381/3291-6304 - www.ppgeo.ig.ufu.br - posgeo@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	GEOGRAFIA				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, Número 275 , PPGGEO				
Data:	10 de setembro de 2024	Hora de início:	08h:00min.	Hora de encerramento:	12h:00min.
Matrícula do Discente:	12013GEO030				
Nome do Discente:	LUIZ HUMBERTO DE FREITAS SOUZA				
Título do Trabalho:	MODELO HIDRODINÂMICO PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM MICRODENAGEM: UMA CONTRIBUIÇÃO À GEOMORFOLOGIA URBANA				
Área de concentração:	DINÂMICAS TERRITORIAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS				
Linha de pesquisa:	ESTUDOS AMBIENTAIS E GEOTECNOLOGIAS				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se no Campus Santa Mônica (Online - conferenciaweb.rnp.br) do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em **GEOGRAFIA**, assim composta: Professores Doutores: [Rui Filipe Ferreira Carvalho - Universidade de Barcelona](#); [Fernando Shinji Kawakubo - DG/FFLCH/USP](#); [Vanderlei de Oliveira Ferreira - IG-UFU](#); [João Vitor Meza Bravo - IG-UFU](#) e [Sívio Carlos Rodrigues - IG-UFU](#) (orientador do(a) candidato). Os membros participaram de forma remota.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, [Professor Sívio Carlos Rodrigues - IG-UFU](#), apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Doutor**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Silvio Carlos Rodrigues, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/09/2024, às 12:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Shinji Kawakubo, Usuário Externo**, em 10/09/2024, às 12:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Vitor Meza Bravo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/09/2024, às 12:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vanderlei de Oliveira Ferreira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/09/2024, às 12:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rui Filipe Ferreira de Carvalho, Usuário Externo**, em 10/09/2024, às 13:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5562902** e o código CRC **88E0BE16**.

“Temos que aceitar que nosso clima é outro. Para sobreviver, devemos fazer mudanças radicais e custosas. Reconstruir do mesmo modo, nos mesmos lugares, será um desperdício. Tratar a natureza do mesmo modo que fizemos é acelerar o processo de destruição”. (Mário Corso, RS, 07/05/2024).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e instituições que contribuíram para o desenvolvimento desta tese de doutorado.

À minha querida família, cujo apoio, compreensão e encorajamento foram fundamentais.

À minha esposa, Ivone Luzia Ferreira, e às minhas filhas, Maria Clara e Maria Luiza, por compreenderem e apoiarem meus objetivos incondicionalmente.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues, cujas intervenções ao longo deste trabalho foram essenciais para o sucesso da pesquisa.

Ao Prof. Dr. João Vitor Meza Bravo, pela disponibilidade e contribuições indispensáveis.

Aos demais docentes, expresso minha sincera gratidão pelo compartilhamento de conhecimentos e pelo estímulo ao meu desenvolvimento acadêmico.

Aos parceiros de pesquisa, que colaboraram neste projeto, sou grato pela troca de ideias e pelo apoio mútuo.

Ao advogado e amigo Alexandre Ferreira Paiva, agradeço profundamente pela generosa doação de sua expertise profissional.

Agradeço também aos servidores do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia (DMAE), especialmente aos colegas com quem compartilhei o dia a dia.

À espiritualidade que me conduziu e trouxe equilíbrio ao longo desse desafio.

RESUMO

Esta tese propõe um modelo hidrodinâmico para analisar o Escoamento Superficial Direto (ESD) na microdrenagem urbana, integrando elementos da Geomorfologia, com foco especial nos impactos das intervenções antrópicas sobre a paisagem. O estudo pretende identificar padrões de concentração de escoamento e pontos de alagamento em cenários hipotéticos de precipitação, especialmente em vias urbanas. A análise se concentra na morfologia, bem como nas características físicas e topográficas do ambiente construído que impactam diretamente o escoamento, incluindo a declividade, o uso da terra e a rugosidade dos materiais de cobertura. A modelagem é processada pelo *software* PCSWMM, que facilita a simulação bidimensional do ESD. Para a organização e análise dos dados espaciais é utilizada a ferramenta QGIS. Metodologicamente, foram considerados dois cenários urbanísticos para a simulação e estudo das condições hidrológico-hidráulicas do ESD na área de estudo delimitada pelo Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia/MG. Essa análise abrange as seguintes situações: 1) Plano viário e topografia referentes ao ano de 1989, conforme apresentado pelo Plano Diretor Físico da Instituição (DICIE-UFU, 1991); 2) Levantamento topográfico realizado entre os anos de 2013 e 2014. As condições hidrológicas em ambas as situações foram definidas por meio da especificação das chuvas de projeto com Tempos de Retorno (Tr) de 10 e 50 anos. Estes valores, de acordo com Porto (1995) e SUDERHSA (2002), são parâmetros frequentemente empregados em projetos de drenagem. Os resultados obtidos têm o propósito de enriquecer a compreensão da dinâmica do ESD em ambientes urbanos, proporcionando informações essenciais para o planejamento e execução de estratégias de gestão e manejo das águas pluviais. A abordagem integrada entre Geomorfologia e modelagem hidráulico-hidrológica, aliada ao uso dos *softwares* QGIS e PCSWMM, visa ampliar o debate sobre o comportamento dinâmico das águas pluviais em condições análogas. A concepção de indicadores característicos aliada a produção de mapas temáticos das áreas suscetíveis à concentração de fluxo superficial e alagamentos, servirá como referência para aprimorar as técnicas de previsão e gestão de eventos naturais adversos em áreas urbanizadas.

Palavras-chave: Geomorfologia, Modelagem Hidráulico-Hidrológica, PCSWMM, Microdrenagem, Escoamento Superficial.

ABSTRACT

This thesis proposes a hydrodynamic model to analyze surface runoff in urban microdrainage, integrating elements of Geomorphology with a particular focus on the impacts of anthropogenic interventions on the landscape. The study aims to identify patterns of runoff concentration and flooding points in hypothetical precipitation scenarios, especially in urban roadways. The analysis concentrates on morphology, as well as the physical and topographic characteristics of the built environment that directly affect runoff, including slope, land use, and the roughness of surface materials. The modeling is processed using the PCSWMM software, which facilitates the two-dimensional simulation of DSR. For the organization and analysis of spatial data, the QGIS tool is employed. Methodologically, two urban scenarios were considered for simulating and studying the hydrological-hydraulic conditions of DSR in the area defined by the Santa Mônica Campus of the Federal University of Uberlândia/MG. This analysis encompasses the following situations: 1) Roadway layout and topography from the year 1989, as presented in the Institution's Physical Master Plan (DICIE-UFU, 1991); 2) Topographic survey conducted between 2013 and 2014. The hydrological conditions in both situations were defined by specifying design rainfall events with Return Periods (T_r) of 10 and 50 years. These values, according to Porto (1995) and SUDERHSA (2002), are parameters commonly used in drainage projects. The results obtained aim to enhance the understanding of runoff dynamics in urban environments, providing essential information for planning and implementing strategies for stormwater management. The integrated approach between Geomorphology and hydraulic-hydrological modeling, combined with the use of QGIS and PCSWMM software, seeks to broaden the discussion on the dynamic behavior of stormwater under similar conditions. The development of characteristic indicators alongside thematic mapping of areas prone to surface runoff concentration and flooding will serve as a reference for improving forecasting techniques and management of adverse natural events in urbanized areas.

Keywords: Geomorphology, Hydraulic-Hydrological Modeling, PCSWMM, Microdrainage, Surface Runoff.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resposta hidrológica sob diferentes perspectivas de urbanização. (a) Condição pré-urbanização; (b) Condição essencialmente urbana; (c) Condição urbana combinada com soluções ecológicas. Obs.: A variação do tamanho das setas indica a variação quantitativa da variável.	26
Figura 2 – Organograma Síntese: Estrutura da Tese.	34
Figura 3 - Rede bibliométrica com temas mais explorados nos estudos geomorfológicos (2012 a 2022).	49
Figura 4 - Rede bibliométrica com temas explorados nos estudos geomorfológicos de 2012 a 2022 no Brasil.	50
Figura 5 - Divisão clássica do sistema de drenagem pluvial.	53
Figura 6 - Seção transversal com os componentes básicos de um sistema de drenagem de águas pluviais.	54
Figura 7 - Esquema da disposição dos elementos de um sistema de drenagem de águas pluviais.	54
Figura 8 - Contribuições teóricas sobre a teoria do Hidrograma Unitário (HU).	64
Figura 9 - Resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica, representada por um Hidrograma Unitário (HU) e do seu correspondente hietograma de precipitação.	65
Figura 10 - Formatos genéricos de Hidrogramas Unitários (HUs) para situações influenciadoras da dinâmica hidrológica. Situação: (a) bacia urbana e rural; (b) bacia natural e com reservatório de regularização; (c) comportamento variável da distribuição, duração e intensidade da chuva e; (d) influência da forma da bacia.	67
Figura 11 - Extensão aproximada em quilômetros, para ruas com diferentes opções de <i>layout</i>	78
Figura 12 - Exemplares do desenho urbano de setores residenciais no Estado Americano de Connecticut.	78
Figura 13 - Fluxograma evolutivo da modelagem hidrológica.	89
Figura 14 - Principais componentes dos processos hidrológicos.	90
Figura 15 - Sequência hipotética para o tratamento de uma amostra com variáveis hidrológicas.	92
Figura 16 - Subdivisão de ruas em sub-bacias de contribuição e respectivos pontos de descarga. Fig. 13a – Localização dos pontos de descarga dos lotes; 13b – Definição dos polígonos de Thiessen; 13c – Definição das sub-bacias; 13d – Indicação das direções de fluxo.	101

Figura 17 - Diagrama esquemático com vários métodos empregados na determinação do caminho de fluxo.	102
Figura 18 – Fluxograma síntese da metodologia empregada.	109
Figura 19 - Localização da Área de Estudo.....	119
Figura 20 - Mapa do Campus Santa Mônica.	122
Figura 21 - Planta Cadastral de Propriedades - Campus Santa Mônica.	123
Figura 22 - Localização do Campus Santa Mônica na bacia hidrográfica do córrego São Pedro.....	126
Figura 23 (a) – Obra de expansão da galeria de águas pluviais do Córrego São Pedro (1992); (b) – Inundação na Avenida Rondon Pacheco registrada em 30/05/2013.....	127
Figura 24 – Unidades Geomorfológicas do Município de Uberlândia – MG.	129
Figura 25 - Pontos de referência para análise da declividade das vias locais do Campus Santa Mônica.....	131
Figura 26 - Direção dos perfis topográficos A-A' e B-B'.....	133
Figura 27 - Perfil topográfico A-A'.....	133
Figura 28 - Perfil topográfico B-B'.....	134
Figura 29 - Limites das unidades de materiais inconsolidados e hipsometria da bacia do córrego São Pedro.....	135
Figura 30 - Perfil topográfico A-B.	136
Figura 31 – Climograma com as médias compensadas de temperatura e precipitação.....	138
Figura 32 - Diagrama esquemático do modelo hidrodinâmico acoplado 1D/2D adotado pelo PCSWMM.	143
Figura 33 - Sobreposição de camadas elementares do modelo hidráulico.....	144
Figura 34 – Área de trabalho do <i>software</i> PCSWMM. Em destaque sub-bacia R14, cenário 2013/2014.	148
Figura 35 (a) - Elementos do modelo proposto para o cenário correspondente ao ano de 1989; (b) - Elementos do modelo proposto para o cenário correspondente ao período 2013/2014.	153
Figura 36 - Localização dos furos de sondagem: SP.1 – Bloco 5K e SP.2 – Bloco 3Q - Campus Santa Mônica.	154
Figura 37 - Recorte da planilha de sondagem à percussão do furo SP.1 – Bloco 5K (Relatório 01/2004).....	155

Figura 38 - Recorte da planilha de sondagem à percussão do furo SP.2 – Bloco 3Q (Relatório 05/2002).....	155
Figura 39 - Curvas IDF para chuvas intensas hipotéticas em Uberlândia-MG.....	159
Figura 40 - Elementos do hietograma do método de Chicago proposto por Keifer & Chu (1957).	162
Figura 41 (a; b) - Hietogramas e Acumulados de Chuva para Tr: 10 e 50 anos.	163
Figura 42 - Visão conceitual do fenômeno do escoamento no software PCSWMM.	164
Figura 43 - Esboço conceitual - Equação da continuidade.....	166
Figura 44 - Histograma das séries de precipitação hipotética (P) e efetiva (Pe), definidas pelo método de Chicago, considerando o Tempo de Retorno (Tr) 10 anos.	172
Figura 45 - <i>Box Plot</i> (P; Pe).....	173
Figura 46 - Valores resultantes do teste <i>t-student</i> e padrão de distribuição dos conjuntos de dados amostrais.	174
Figura 47 - Gráfico de dispersão, equação de regressão e coeficiente de determinação entre os conjuntos de dados de precipitação definida pelo método de Chicago “P” e de chuva efetiva “Pe”.	177
Figura 48 - Gráfico de dispersão, equação de regressão e coeficiente de determinação entre os conjuntos de dados de precipitação (hipotética) definida pelo método de Chicago “P” e de chuva efetiva “Pe”, pós-simulação no PCSWMM – sem <i>outliers</i>	179
Figura 49 - Valores resultantes do teste ANOVA para o conjunto de dados (P; Pe).....	180
Figura 50 - Comportamento gráfico Q-Q Plot da variância dos resíduos para o conjunto de dados (P; Pe).	183
Figura 51 - Situações de verificação e violação de variância constante dos resíduos.....	184
Figura 52 - Gráfico das médias dos grupos (P; Pe) em relação aos resíduos.....	185
Figura 53 - Resposta hidrológica (Hidrograma Unitário) da área de estudo para Tr 10 anos.	186
Figura 54 - (a) Histograma da série de chuva efetiva (Pe). (b) Histograma da vazão no exutório (Q _{ex}).....	189
Figura 55 - <i>Box Plot</i> (Pe; Q _{ex}).....	190
Figura 56 - Resultado do teste de Mann-Whitney para os conjuntos de dados amostrais (Pe; Q _{ex}).	191
Figura 57 - Comportamento gráfico Q-Q <i>Plot</i> da variância dos resíduos para o conjunto de dados (Pe; Q _{ex}).	194

Figura 58 - Gráfico das médias dos grupos (P_e ; Q_{ex}) em relação aos resíduos.	195
Figura 59 – Mapa 1 – Dinâmica do Fluxo de Escoamento Superficial Direto (ESD) – Cenários 1989 e 2014 – Tr 10 Anos.	198
Figura 60 – Mapa 2 – Dinâmica do Fluxo de Escoamento Superficial Direto (ESD) – Cenários 1989 e 2014 – Tr 50 Anos.	199
Figura 61 – Mapa 3 – Pontos de Alagamento – Cenários 1989 e 2014 – Tr 10 Anos.	200
Figura 62 – Mapa 4 – Pontos de Alagamento – Cenários 1989 e 2014 – Tr 50 Anos.	201
Figura 63 – Diagrama ilustrativo do sistema viário do Campus Santa Mônica com trechos ordenados.	202
Figura 64 – Trecho n.º 17 – 20. Ocorrência de alagamento pós-precipitação de 14,2 mm em uma hora. Visão a partir do ponto n.º 20	205
Figura 65 – Trecho n.º 17 – 20. Ocorrência de alagamento pós-precipitação de 6,8 mm em uma hora. Visão a partir do ponto n.º 17	205
Figura 66 – Classificação dos principais tipos de bocas de lobo.....	206
Figura 67 – Comportamento dinâmico do fluxo de ESD (cenário ano 2014), flagrado em boca de lobo de guia, localizada no trecho n.º 13-14, entre Avenida das Jaboticabas e Avenida das Amoras.	207
Figura 68 – Faixa elevada para travessia pedestres, próximo ao ponto n.º 1 do Campus Santa Mônica, em carga de escoamento, imediatamente após precipitação.	208
Figura 69 – Rotatória no ponto n.º 1 do Campus Santa Mônica, em carga de escoamento, imediatamente após precipitação.....	208
Figura 70 (a) – Cruzamento viário da Avenida João Naves de Ávila com Avenida Segismundo Pereira; (b) – Desabamento de parte do muro do Campus Santa Mônica no ano de 2013.	210
Figura 71 (a; b) – Hidrogramas Unitários Tr 10 anos (Cenários 1989; 2013-2014); (c; d) – Hidrogramas Unitários Tr 50 anos (Cenários 1989; 2013-2014).	211
Figura 72 (a; b) – Comportamento Dinâmico Velocidade ESD Tr 10 anos (Cenários 1989; 2014); (c; d) – Comportamento Dinâmico Velocidade ESD Tr 50 anos (Cenários 1989; 2014);	213

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definição do “Tr” conforme parâmetros hidromorfodinâmicos teóricos.	57
Quadro 2 - Características importantes das inundações em áreas urbanas e não urbanas.....	85
Quadro 3 - Modelos de escoamento organizados por premissas de modelagem.	99
Quadro 4 - Limites empíricos referenciais para calibração e verificação dos parâmetros de modelagem.	105
Quadro 5 - Grupos e características dos solos - Método SCS.....	112
Quadro 6 - Condições antecedentes de umidade do solo.	113
Quadro 7 – Diretrizes Urbanísticas: Cenário correspondente ao plano viário e topografia do Plano Diretor 1989.	124
Quadro 8 – Diretrizes Urbanísticas: Cenário correspondente ao levantamento topográfico da R&V 2013-2014.	124
Quadro 9 - Termos da equação da quantidade de movimento.	169
Quadro 10 – Categorias de uso e ocupação do solo do Campus Santa Mônica.....	196
Quadro 11 – Produtos cartográficos resultantes pós-modelagem.	197
Quadro 12 – Situações de destaque obtidas pós-modelagem e pós-mapas resultantes.....	203

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de retorno (T_r) para sistemas de microdrenagem e macrodrenagem pluvial.	58
Tabela 2 - Ranking das fórmulas do tempo de concentração (t_c). Recomendação em função da estimativa do erro médio percentual (EM) e erro padrão (EP).....	59
Tabela 3 - Valores de referência para o coeficiente de escoamento “C” em áreas urbanas.	61
Tabela 4 - Funcionalidade e acessibilidade de modelos representativos de águas pluviais.	94
Tabela 5 - Ajuste do número CN da condição II para as condições de solo seco (I) ou saturado (III).	113
Tabela 6 - Valores de CN para bacias rurais.	114
Tabela 7 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.	115
Tabela 8 - Declividades médias por trecho viário.	132
Tabela 9 - Síntese das classificações de intensidade de precipitação e características do evento chuvoso.	146
Tabela 10 - Valores de I-D-F para chuvas intensas hipotéticas em Uberlândia-MG.	158
Tabela 11 - Séries de precipitação total (P) e chuva efetiva (P_e), para T_r 10 anos.	171
Tabela 12 - Critério qualitativo para avaliação da intensidade do $ r $	178
Tabela 13 - Estudo do erro padrão da estimativa (S_e) e intervalos de previsão (E) para os pares (P; P_e).....	182
Tabela 14 - Séries de chuva efetiva (P_e) e vazão roteada no exutório (Q_{ex}), para T_r 10 anos.	189
Tabela 15 - Estudo do erro padrão da estimativa (S_e) e intervalos de previsão (E) para os pares (P_e ; Q_{ex}).....	193

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADASA	Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATH's	Assinaturas Topográficas Humanas
BMP's	<i>Best Management Practices</i>
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego – SP
CHI	<i>Computational Hydraulics International</i>
CN	<i>Curve Number ou Complex Number</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTM	Cadastro Técnico Multifinalitário
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DDU+S	Dispositivos de Drenagem Urbana Mais Sustentável
DICIE-UFU	Divisão de Cadastro Integrado do Espaço Físico - UFU
DIRIE-UFU	Diretoria de Infraestrutura - UFU
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESD	Escoamento Superficial Direto
HU	Hidrograma Unitário
HUG	Hidrograma Unitário Geomorfológico
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Curva Intensidade-Duração-Frequência
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDSC-BR	Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades - Brasil
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LDCs	<i>Least Developed Countries</i>
LID	<i>Low Impact Development</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação

MDT	Modelo Digital do Terreno
NBR	Norma Brasileira
NRCS	<i>Resources Conservation Service</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PCSWMM	<i>Personal Computer Storm Water Management Model</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEI-UFU	Sistema Eletrônico de Informações - UFU
SIG's	Sistemas de Informações Geográficas
SGB/CPRM	Serviço Geológico do Brasil / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
SRTC	<i>Sensitivity-based Radio Tuning Calibration</i>
SUD's	<i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>
SUDECAP	Superintendência de Desenvolvimento da Capital – Belo Horizonte
SUDERHSA	Superintendência Desenv. Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – PR
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
U.S. EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UN CC:Learn	<i>UN Climate Change Learning Partnership</i>
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UGB	Diretoria da União da Geomorfologia Brasileira
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCOUs	Zona de Convergência de Umidade

SUMÁRIO

ASPECTOS INTRODUTÓRIOS.....	20
<i>Problemática</i>	<i>24</i>
<i>Hipótese.....</i>	<i>31</i>
<i>Objetivos.....</i>	<i>32</i>
ESTRUTURA DA TESE	33
- CAPÍTULO 1 -	35
Geomorfologia e Hidrologia	35
<i>1.1 Geomorfologia Urbana</i>	<i>41</i>
<i>1.2 Drenagem Urbana: Panorama Conceitual.....</i>	<i>53</i>
<i>1.3 Planejamento e Gestão do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas.....</i>	<i>73</i>
<i>1.4 Pressupostos da Modelagem Hidrológico-Hidráulica.....</i>	<i>88</i>
<i>1.4.1 Qualidade da Modelagem: Erros de Continuidade</i>	<i>104</i>
- CAPÍTULO 2 -	108
Abordagem Metodológica.....	108
<i>2.1 Transformação Chuva-Vazão: Método SCS</i>	<i>110</i>
<i>2.2 Caracterização da Área de Estudo.....</i>	<i>119</i>
<i>2.2.1 Contexto Urbano</i>	<i>120</i>
<i>2.2.2 Hidrologia</i>	<i>126</i>
<i>2.2.3 Geomorfologia.....</i>	<i>129</i>
<i>2.2.4 Materiais Inconsolidados</i>	<i>135</i>
<i>2.2.5 Clima</i>	<i>138</i>

2.3 Modelo Proposto	140
- CAPÍTULO 3 -	148
Parametrização do Modelo	148
3.1 Número da Curva (NRCS-CN)	154
3.2 Calibração Hidrológica	158
3.3 Calibração Hidráulica	164
- CAPÍTULO 4 -	171
Resultados e Discussões.....	171
4.1 Análise Estatística Preliminar.....	171
4.1.1 Teste de Significância: Chuva Total (P) e Efetiva (P_e)	172
4.1.2 Teste de Significância: Chuva Efetiva (P_e) e Vazão no Exutório (Q_{ex}).....	188
4.2 Produtos Pós-modelagem.....	196
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	215
REFERÊNCIAS	222
ANEXO 1.....	253

ASPECTOS INTRODUTÓRIOS

A urbanização e a expansão urbana afetam os serviços ecossistêmicos das cidades e estão diretamente associadas a desafios ambientais, sociais e econômicos. Um problema específico decorrente desse processo é a transformação do ambiente natural para atender às necessidades humanas, frequentemente de maneira predatória, resultando em processos morfogenéticos característicos (V.P.I.S & Li, 2022).

A modificação da morfologia natural exige uma adaptação na dinâmica hidráulica do ambiente, impondo aos sistemas de escoamento das águas pluviais um reajuste diante de uma nova configuração do relevo. Esse processo se manifesta por meio da impermeabilização de superfícies, canalização e redirecionamento do fluxo, resultando em desafios para a gestão urbana. As variações na quantidade, intensidade, frequência e tipo de precipitação, associadas a flutuações climáticas extremas (naturais e anômalas), contribuem para a sobrecarga dos sistemas de drenagem, afetando especialmente dispositivos subdimensionados (IPCC, 2018; Rodriguez *et al.*, 2003; Bibi & Kara, 2023).

Li *et al.* (2022) destacam que as vias de tráfego urbano são altamente vulneráveis a inundações. Em casos de colapso dos sistemas de drenagem de águas pluviais, as ruas são consideravelmente afetadas, impactando a mobilidade urbana e os serviços básicos, como abastecimento de água, energia e comunicação.

Nesse contexto, desde a metade do último século, há uma busca contínua por soluções para mitigar os impactos de alagamentos e inundações urbanas, especialmente em áreas ribeirinhas (Tucci, 2005; 2024). Esse cenário justifica a realização de numerosas pesquisas voltadas para o uso de modelos hidrológicos e hidráulicos para simular a dinâmica do fluxo das águas pluviais em ambientes complexos (Feng *et al.*, 2020; Tucci, 2024).

A revolução digital pós-1960 possibilitou avanços importantes na modelagem, incluindo métodos de hidrologia, aplicações unidimensionais e bidimensionais (1D/2D) da hidrodinâmica, e, mais recentemente, o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), utilizados para gestão de grandes bancos de dados, tratamento de informações e mapeamento (Zoppou, 2001; Fernández & Lutz, 2010; Birgani & Azdandoost, 2018).

De acordo com Luo *et al.* (2022), a simulação do escoamento superficial urbano e dos processos de confluência é uma etapa essencial na elaboração de um modelo de inundação urbana. A principal causa dos alagamentos nas ruas é a capacidade inadequada dos sistemas de drenagem para captar a água de maneira eficiente. Modelos de inundação da rede viária, que anteriormente consideravam o escoamento superficial como fluxos estacionários ou instáveis e eram calculados por métodos hidrodinâmicos unidimensionais (1D), passaram a utilizar equações bidimensionais (2D) com os avanços na modelagem digital, permitindo simulações mais precisas.

Nesse contexto, surgem novas abordagens que consideram, por exemplo, a influência das edificações no direcionamento do escoamento das águas urbanas (Luo *et al.*, 2022). Além disso, há uma evolução na representação hidrológica das bacias hidrográficas com o uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). Essa abordagem é fundamental para a captura, gerenciamento, análise e exibição de dados geográficos com maior precisão espacial e temporal, oferecendo suporte às tarefas de modelagem (Bem, 2016).

Ross & Moroz-Caccia Gouveia (2022) destacam a recente substituição de técnicas tradicionais de Cartografia Geomorfológica por ferramentas digitais, como o sensoriamento remoto, os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e outras geotecnologias. Essa tendência é igualmente observada no contexto hidrogeomorfológico, onde a informatização da modelagem e a integração com a ciência hidrológica são essenciais para a análise de eventos espaço-temporais. Esses avanços permitem a reprodução mais criteriosa dos comportamentos naturais das águas pluviais e promovem uma compreensão mais ampla sobre o comportamento dinâmico das águas de chuva em áreas urbanas.

Nos últimos anos, a investigação de eventos extraordinários por meio de técnicas de modelagem hidrológico-hidrodinâmica, aliadas a dados obtidos por métodos historiográficos, despertaram o interesse da comunidade acadêmica. Esta abordagem é comumente denominada "reconstrução hidrológica" ou "retromodelação" (Remo & Pinter, 2007; Remo *et al.*, 2009; Balasch *et al.*, 2010; Barriendos *et al.*, 2014; Diodato *et al.*, 2019; Vanelli *et al.*, 2020). Entre os estudos produzidos, destaca-se a análise da origem e das consequências de grandes inundações, explorando a relação entre a evolução da morfologia urbana e os riscos hidrogeológicos associados a grandes desastres, como os registrados em Roma, na Itália (Berti *et al.*, 2004; Del Monte *et al.*, 2016; Ferraresi, 2023; Pica *et al.*, 2024), e em Porto

Alegre, no Brasil (Oliveira, 1979; Allasia, 2015; Possa, 2022; Altafini, 2023; Hanzen, 2024; Zambrano, Ruoso & Kobiyama, 2024; Tucci, 2024).

Contudo, o objetivo deste estudo é identificar padrões de concentração de fluxo e pontos de alagamento em cenários hipotéticos de precipitação, com ênfase nas vias urbanas. A pesquisa integra a modelagem hidráulico-hidrológica à sistematização dos resultados da simulação do Escoamento Superficial Direto (ESD) em escala de microdrenagem. A análise considera a morfologia, além das características físicas e topográficas do ambiente construído que influenciam o ESD, incluindo a declividade, condições de uso do solo e a rugosidade dos materiais de cobertura.

Por definição, o sistema hidráulico-hidrológico é considerado um “sistema aberto”, uma vez que interage com o ambiente externo, realizando trocas de energia e matéria (Viessman *et al.*, 1972; Chow *et al.*, 1988; Dingman, 2015). Entretanto, uma dificuldade relevante na pesquisa deste campo é o dimensionamento de um sistema que visa representar a influência de heterogeneidades em multiescala (Bacchin, *et al.*, 2013), bem como as interações entre os processos e a conectividade da água na paisagem. O desafio do dimensionamento hidráulico-hidrológico nessas condições é onipresente (Wood *et al.*, 1988). Em determinados contextos, como o abordado neste trabalho, é possível adotar abordagens metodológicas e abstrações empíricas adaptadas aos objetivos da modelagem.

Um exemplo teórico em que o sistema hidráulico-hidrológico pode ser considerado fechado é a simulação da dinâmica de pequenas bacias de contribuição em laboratório ou em campo. Em cenários controlados, é possível isolar uma ou mais áreas de drenagem, para monitorar e regular as entradas e saídas de água. Embora essa abordagem não capture a complexidade total do sistema hidráulico-hidrológico, pode fornecer informações importantes sobre processos específicos e relações causais em contextos restritos (Clark *et al.*, 2017).

Outro enfoque próximo de um sistema fechado é a modelagem computacional ou simulações que visam representar o sistema hidráulico-hidrológico de uma amostra ou da totalidade de uma bacia hidrográfica. Esses modelos definem limites geográficos e consideram condições iniciais e fronteiras externas para representar o sistema dentro de um domínio finito. Embora essa abordagem simplificada não capture todos os aspectos das interações com o ambiente externo, fornece informações úteis sobre padrões de fluxo, distribuição de água e a resposta do sistema sob diferentes condições (Clark *et al.*, 2017).

Apesar da compreensão do sistema hidráulico-hidrológico como um todo, surgem desafios na sua caracterização adequada devido à impossibilidade de mensurar todas as propriedades correlacionadas. Além disso, a implementação de modelagens mais complexas enfrenta limitações, como a escassez de dados disponíveis, a ausência de bases cartográficas detalhadas em escalas compatíveis e o elevado custo computacional necessário para garantir a confiabilidade dos parâmetros do modelo (Pechlivanidis *et al.*, 2011; Clark *et al.*, 2017).

Nesse sentido, é importante destacar, conforme Silva & Soares (2017), que os modelos de sistemas ambientais não representam uma cópia fiel da realidade, mas sim uma simplificação das complexidades dos componentes e das inter-relações presentes nos recortes espaciais estudados. Na modelagem do comportamento dinâmico do escoamento superficial urbano, essa premissa se aplica particularmente às incertezas relacionadas às peculiaridades da morfologia e à resolução dos dados espaciais e temporais que definem os cenários de precipitação (Manchikatla & Umamahesh, 2022).

Problemática

A Geomorfologia Urbana, inserida na Geomorfologia Antropogênica (Thornbush & Allen, 2018), é uma subdisciplina elementar que possibilita a compreensão das escalas espaço-temporais e as formas artificiais do relevo em ambientes urbanos. Sua abordagem analítica destaca a relação entre os processos geomórficos antrópicos e naturais, explorando transformações ocorridas entre anos e décadas (Coates, 1984; Sherman, 1989; Jorge, 2011).

Guerra e Marçal (2006) enfatizam a importância da disciplina ao elucidar a interação entre fatores do meio físico e os impactos da ocupação humana, que desencadeiam processos geomorfológicos. Por outro lado, a Geomorfologia Urbana se destaca como uma abordagem multidisciplinar, examinando os efeitos das intervenções humanas em ambientes urbanos (Jorge, 2011; Thornbush, 2015; Nunes & Bastos, 2023; Martins *et al.*, 2024; Pica *et al.*, 2024).

Li *et al.* (2017) demonstra que os processos geomorfológicos antropogênicos diretos respondem pela remodelagem contundente da superfície terrestre, materializada pelo conjunto de ações de acumulação (processos construtivos) e denudação (processos destrutivos) que atuam sobre o relevo. Já os processos indiretos, resultam da influência dos fatores anteriores sobre o fluxo de matéria e energia que envolve os elementos físicos, químicos e biológicos do ambiente geomorfológico.

Janice Martins *et al.* (2024) destacam que as atividades agrícolas são frequentemente reconhecidas como agentes modificadores do relevo, especialmente no campo da Geografia. Em áreas urbanas, os processos geomorfológicos antropogênicos diretos são predominantes na criação, indução, intensificação ou modificação das atividades de acumulação e denudação do relevo. Essas mudanças são constantemente atribuídas à impermeabilização das áreas de recarga, à realização de cortes, aterros e outras intervenções relacionadas ao parcelamento do solo para a implementação de infraestrutura. Com frequência, essas alterações repercutem em obras de drenagem pluvial, acompanhadas de práticas de modificação dos canais fluviais.

Em síntese, a problemática resulta em impactos ambientais importantes decorrentes da remodelação fisiográfica da paisagem, refletindo-se imediatamente na dinâmica de escoamento superficial e subsuperficial, assim como nos padrões de drenagem natural das águas pluviais (Fujimoto, 2005; Ferrari, 2018).

As abordagens metodológicas para o reconhecimento e mapeamento das formas de relevo em ambientes urbanos diferem consideravelmente das utilizadas em ambientes naturais, onde as características geomorfológicas são mais evidentes. Por essa razão, os levantamentos geomorfológicos em áreas urbanizadas demandam observações mais detalhadas da topografia (Brandolini *et al.*, 2020).

Considerando o fato de que é nas cidades que os princípios geomórficos do meio físico se sobressaem (Coates, 1984), o processo de metamorfismo da paisagem, a exemplo das modificações do regime fluvial, contribui sensivelmente para a potencialização dos impactos sobre este ecossistema. O estudo aprofundado das características físicas do assoalho topográfico (Ab'Saber, 1956) assim como de toda a dinâmica geomorfológica pode entregar elementos essenciais para o planejamento do uso e ocupação das áreas urbanas, além de contribuir para o aprimoramento de políticas públicas de habitação (Jorge, 2011).

Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento da Água (UNESCO, 2020), as soluções naturais constituem mecanismo de controle dos processos erosivos, inundações e outros efeitos adversos das mudanças climáticas e da ocupação humana desordenada das cidades. Em um cenário de crescente urbanização, tem-se por resultado a obsolescência gradual e inexorável das redes de drenagem, levando a inundações cada vez mais frequentes, com pesadas implicações sociais, econômicas e políticas decorrentes (Yao *et al.*, 2023).

O quadro atual demanda soluções mais adequadas à expansão e à densidade populacional urbana, especialmente no que diz respeito à substituição da infraestrutura cinza (materiais de construção civil convencionais) por métodos mais inovadores. Um exemplo remete ao uso de sistemas sustentáveis de drenagem urbana, os quais se destacam por sua capacidade de lidar com os picos supercríticos de escoamento (Huang, 2020; Seyedashraf, 2023).

De acordo com Thornbush & Allen (2018), atualmente o grau de transformação das áreas urbanas é tão amplo que a sua acessibilidade para pesquisa se torna limitada e o pleno reconhecimento da escala de transformação do relevo também é prejudicado. Assim, em muitos casos, é difícil distinguir, por exemplo, quais sedimentos foram depositados por processos de sedimentação e quais são antropogênicos. Da mesma forma, sobre a morfologia, torna-se difícil fazer distinção entre as formas de relevo naturais e antropogênicas.

O cenário apresentado também denota a problemática das cidades contemporâneas, densamente edificadas e majoritariamente impermeabilizadas, atribuindo grande relevância aos trabalhos sobre os efeitos adversos provocados pela rápida concentração do Escoamento Superficial Direto (ESD) em determinados recortes espaciais. O aumento da cobertura impermeável sob diferentes perspectivas, afeta a resposta hidrológica das bacias hidrográficas provocando reflexos imediatos sobre o fluxo de escoamento (Figura 1 - a; b; c).

Figura 1 - Resposta hidrológica sob diferentes perspectivas de urbanização. (a) Condição pré-urbanização; (b) Condição essencialmente urbana; (c) Condição urbana combinada com soluções ecológicas. Obs.: A variação do tamanho das setas indica a variação quantitativa da variável.



Fonte: Adaptado de Arnold & Gibbons (1996) e; Gonçalves (2022). Organização: O autor.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU (IPCC) projeta que, ao longo do século XXI, o contraste na precipitação entre regiões úmidas e secas, assim como entre as estações chuvosas e secas, tende a aumentar. É especialmente provável que eventos extremos de precipitação se tornem mais intensos e frequentes nas latitudes médias e em regiões tropicais úmidas, o que exigirá maior capacidade dos sistemas de drenagem nos grandes centros urbanos (IPCC, 2013; UN CC: LEARN, 2024).

Os relatórios do IPCC reúnem estudos e interpretações abrangentes sobre o conhecimento produzido por cientistas de alto nível de diversas partes do mundo, tanto independentes quanto vinculados a organizações governamentais e institucionais. A síntese do AR6 – Sexto Relatório de Avaliação, por exemplo, resume a compreensão do IPCC sobre a "ciência da mudança climática", abrangendo estudos sobre impactos e riscos climáticos. Esse conhecimento pode subsidiar a tomada de decisões em diferentes níveis, possibilitando ações

de mitigação e adaptação a eventos severos (UN CC: LEARN, 2024). O relatório destaca o aumento alarmante do risco de desastres climáticos, exacerbado pela intensificação de "vetores antrópicos da mudança climática", em especial pela elevação da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

Na atualidade, há aproximadamente 3,6 bilhões de pessoas vivendo em áreas altamente vulneráveis às mudanças climáticas. A maioria dessas regiões apresentam consideráveis riscos com milhões de pessoas expostas à insegurança hídrica e alimentar agudas. Entre os anos de 2010 e 2020, a mortalidade humana por inundações, secas e tempestades foi quinze vezes maior em regiões altamente vulneráveis, se comparado a regiões de menor vulnerabilidade (IPCC, 2023). Tragédias climáticas em países menos desenvolvidos (LDCs - *Least Developed Countries*), como os da África, Ásia, América Central e do Sul, encontram enormes desafios no enfrentamento, devido à limitação de recursos financeiros para essa finalidade.

Enquanto na Ásia e na África ocorrem frequentes danos sociais associados às inundações, acompanhadas de grandes perdas humanas, nos países desenvolvidos da Europa e da América do Norte, as principais perdas são de ordem econômica (UNEP, 2009; Piadeh *et al.*, 2022).

Na China, a rápida conversão de terras em ambientes urbanos e os efeitos das mudanças climáticas resultaram em inúmeros desafios, incluindo a drástica deterioração dos recursos hídricos do país (Zinda *et al.*, 2018). Severas inundações e a deterioração da qualidade da água tornaram-se questões ambientais urgentes nos últimos anos. Esses riscos são exacerbados pela complexa organização sociopolítica das cidades, especialmente nas megacidades (Tucci, 2005).

Hegarty *et al.* (2021), ao investigar a qualidade da água ao longo do rio Liffey, em Dublin, Irlanda, com o auxílio da comunidade e da metodologia da ciência cidadã (Bonney *et al.*, 2009), constataram a significativa presença de substâncias prejudiciais ao corpo d'água, oriundas de descargas de áreas urbanizadas adjacentes. Esses estudos poderiam parecer irrelevantes no contexto de extremos climáticos e insegurança hídrica se não fosse pelo fato de Dublin estar entre as melhores cidades do mundo para se viver, localizada em um país com um dos mais altos Índices de Desenvolvimento Humano (IDH), conforme o Relatório do Desenvolvimento Humano (GRDH) do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) de 2022. Certamente, as questões relacionadas a desastres naturais nessa cidade não afligem sua população na mesma medida que os problemas enfrentados por regiões tropicais

de menor renda per capita, onde a capacidade de resiliência aos efeitos adversos dos extremos climáticos é consideravelmente inferior.

No Brasil, não há uma gestão integrada das águas pluviais em sentido estrito, seja na esfera municipal, estadual ou federal. Estima-se que as inundações ribeirinhas causem perdas anuais da ordem de R\$ 70 bilhões. O investimento em sistemas de captação artificiais gira em torno de US\$ 10 milhões por quilômetro quadrado de bacia hidrográfica, enquanto medidas sustentáveis de amortecimento de cheias podem reduzir esse custo para aproximadamente US\$ 1,5 milhão por quilômetro quadrado (Tucci, 2024).

As mudanças climáticas discutidas pelo IPCC requerem ajustes tanto proativos quanto reativos nos sistemas ecológicos, sociais e econômicos. Essa adaptação deve ser respaldada por avanços tecnológicos, políticas e estratégias, soluções de baixo carbono e a promoção da "economia verde". Contudo, apesar de a implementação de medidas adaptativas poder implicar custos elevados, a inação ou a procrastinação na adoção de ações efetivas podem resultar em danos severos e irreversíveis aos sistemas naturais e às comunidades humanas, acarretando implicações financeiras ainda mais sérias.

Por outro lado, Tucci (2005) argumenta que o financiamento das ações de controle da drenagem urbana deve seguir o princípio da distribuição dos custos das soluções conforme a intensidade das áreas impermeáveis. De acordo com esse princípio, aqueles que contribuem para o aumento do volume de escoamento superficial são responsáveis pelas inundações e devem arcar com os custos adicionais decorrentes desse impacto sob a perspectiva socioeconômica.

Sob essa ótica, Mulugetta e Urban (2010) enfatizam a importância da "economia verde", que abrange sistemas voltados para a redução das emissões de gases de efeito estufa e outros problemas ambientais que não estão diretamente relacionados às mudanças climáticas. Essa abordagem inclui a salvaguarda da saúde humana e a promoção de benefícios sociais.

A precariedade dos assentamentos informais, geralmente caracterizados por baixo investimento público em infraestrutura, agrava o cenário de severidade climática. A desigualdade social se reflete no acesso às áreas de ocupação do relevo, intensificando as disparidades entre as comunidades. Normalmente, as unidades morfotopográficas de "fácil urbanização", como planícies, patamares e encostas de baixa declividade, são rapidamente ocupadas pelas parcelas da população com maior poder aquisitivo. Em contrapartida, leitos

fluviais e vertentes íngremes, mais suscetíveis a desastres naturais, são habitados por aqueles com menos recursos financeiros, que veem nesses locais uma das poucas alternativas para a instalação de suas moradias (Janice Martins *et al.*, 2024).

A gestão de riscos, o gerenciamento das águas urbanas, sistemas de alerta prévio e a ampliação dos serviços climatológicos e das redes de segurança social são ações reconhecidas pelo IPCC por sua relevância em diversos setores da sociedade. No entanto, o Sexto Relatório de Avaliação (IPCC, 2023) aponta as dificuldades que os sistemas urbanos enfrentam na gestão de eventos críticos, tendências e distúrbios climáticos. Para mitigar desastres e fortalecer a resiliência urbana, é fundamental reconhecer os impactos do clima e superar os paradigmas impostos pelo "negacionismo climático", especialmente em relação a perspectivas políticas conservadoras que rejeitam evidências e metodologias científicas (Queiroz-Stein, 2023). Além disso, é essencial incorporar coeficientes de previsão de risco das mudanças climáticas nos projetos e no planejamento de novos empreendimentos institucionais e habitacionais, bem como adotar uma abordagem revisada para a infraestrutura viária e de saneamento.

Nesse sentido, a gestão dos espaços urbanos deve incluir, em suas diretrizes, o planejamento do uso da terra, o estudo locacional dos setores produtivos e habitacionais, e soluções sustentáveis de transporte público e mobilidade ativa, como caminhada e ciclismo. É essencial promover arquiteturas mais eficientes e ecológicas, realizar o *retrofit* (revitalização) dos sistemas viários e dos espaços públicos, reduzir o consumo de energia e utilizar materiais de construção alternativos, além de incentivar o uso de fontes de baixa emissão de poluentes.

Adicionalmente, destaca-se a urgente necessidade de esforços políticos e econômicos para promover um planejamento inclusivo e estimular o uso da infraestrutura verde e azul como alternativas de readaptação urbana, visando à promoção da saúde e do bem-estar social (Bibi *et al.*, 2024).

Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo preencher uma lacuna científica ao investigar a contribuição da Geomorfologia Urbana na modelagem hidrológico-hidráulica do escoamento superficial. Considerando a influência da morfologia no comportamento dinâmico das águas pluviais, o Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) foi escolhido como área de estudo. O modelo idealizado visa identificar padrões de ESD e pontos de alagamento em cenários hipotéticos de precipitação.

O problema central da pesquisa é a seguinte indagação: **qual é o grau de relevância da conexão entre as formas antropogênicas e os resultados da modelagem hidrodinâmica das águas pluviais no âmbito da Geomorfologia Urbana?** Essa questão depende inicialmente da definição da escala de trabalho, que pode variar desde a microcaptação (nível de bairro) até a captação urbana (nível cidade/regional), incluindo também a sub-bacia (nível distrital) (Bacchin *et al.*, 2013). No caso em questão, o estudo é realizado na escala de microdrenagem.

Hipótese

A presença e a configuração das formas antropogênicas na escala de microdrenagem, como o *layout* das quadras e os padrões viários, influenciam os resultados da modelagem hidrodinâmica no contexto da Geomorfologia Urbana. Alterações morfológicas, como a implantação e a impermeabilização da infraestrutura viária, impactam elementos do ciclo hidrológico, especialmente a dinâmica do escoamento superficial. Essas mudanças afetam a distribuição e a concentração do fluxo de águas pluviais, evidenciando a necessidade de considerar as formas antropogênicas na parametrização dos modelos hidrodinâmicos e na interpretação dos resultados das simulações, especialmente durante a concepção de projetos de soluções para a drenagem pluvial.

Objetivos

Em um contexto de crescente demanda socioambiental devido à intensificação das atividades humanas nas cidades, a gestão da drenagem urbana torna-se cada vez mais necessária e complexa, exigindo o domínio de novas técnicas de monitoramento, modelagem e controle. Nesse aspecto, os objetivos da tese são os seguintes:

Objetivo Geral

Este estudo propõe um modelo hidrodinâmico para a análise do escoamento superficial direto na microdrenagem urbana, com ênfase na relação entre padrões de escoamento e alagamento, considerando aspectos morfológicos de uma área específica.

Objetivos Específicos

- * Reexaminar os fundamentos da modelagem hidráulico-hidrológica, sob a perspectiva da Geomorfologia Urbana, com ênfase nas abordagens aplicadas à conversão de padrões chuva-vazão e simulação do Escoamento Superficial Direto (ESD) em ambientes urbanos;
- * Avaliar a aplicabilidade do modelo hidrológico-hidráulico *Personal Computer Storm Water Management Model* – PCSWMM no estudo do comportamento dinâmico do ESD em vias urbanas (escala de microdrenagem);
- * Definir “indicadores” para o comportamento do fluxo de ESD e de alagamentos, a partir das medidas de vazão e altura da lâmina d’água resultantes da modelagem hidrológico-hidráulica contrastando dois cenários urbanísticos do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) sendo: 1) Plano Diretor no ano de 1991 e; 2) Levantamento topográfico planialtimétrico cadastral realizado entre os anos de 2013 e 2014, ambos considerando os Tempos de Retorno de 10 e 50 anos para a chuva de projeto;
- * Constatar a relação entre os padrões de escoamento e alagamento identificados, explorando aspectos da morfologia urbana.

ESTRUTURA DA TESE

A estrutura da tese segue o organograma apresentado na Figura 2. O primeiro capítulo aborda a Geomorfologia Urbana e seus princípios fundamentais, incluindo o panorama conceitual da drenagem de águas pluviais, o planejamento e a gestão do escoamento superficial, bem como os pressupostos da modelagem hidrológico-hidráulica e os erros de continuidade do fluxo pós-processamento.

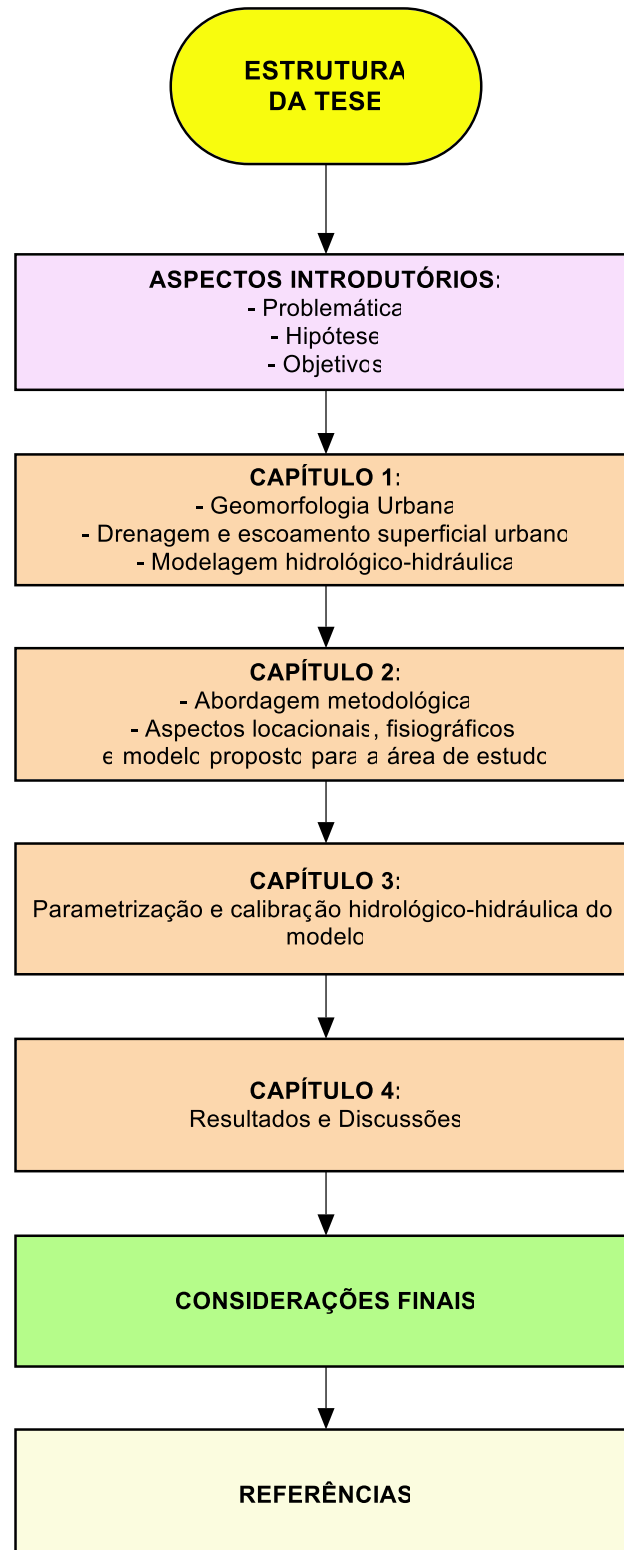
O segundo capítulo detalha a abordagem metodológica adotada. Inicia-se com o método *Soil Conservation Service* (SCS) de transformação chuva-vazão. Em seguida, apresenta aspectos da área de estudo, incluindo fatores urbanos, climáticos, geomorfológicos, morfométricos, hídricos e depósitos superficiais. Por fim, discute-se o modelo proposto.

O terceiro capítulo centra-se na parametrização do modelo, enfatizando a definição dos parâmetros do Número da Curva (NRCS-CN) para a área de estudo, além da calibração hidrológica e hidráulica.

O quarto capítulo é dedicado à apresentação e discussão dos resultados obtidos. Inclui uma análise estatística preliminar, com ênfase em testes de significância relacionados à chuva total de projeto e à chuva efetiva, bem como à vazão efluente no exutório hipotético. As investigações estatísticas utilizam dados da modelagem para o cenário urbanístico 2013/2014, considerando um Tempo de Retorno de 10 anos, parâmetro comumente empregado no dimensionamento das soluções de microdrenagem. Além disso, são apresentados os produtos gerados após a modelagem.

As considerações finais revisitam a problemática da pesquisa, ressaltando a importância da conexão entre as formas antropogênicas e os resultados da modelagem hidrodinâmica das águas pluviais no contexto da Geomorfologia Urbana. Ademais, são discutidas as contribuições para a temática abordada, enfatizando novas perspectivas de análise e a proposição de soluções. As referências utilizadas ao longo do trabalho são apresentadas ao final da tese.

Figura 2 – Organograma Síntese: Estrutura da Tese.



Fonte: O autor.

- CAPÍTULO 1 -

Geomorfologia e Hidrologia

De acordo com Chorley (1971), durante a década de 1950, houve tentativas significativas de aplicar a teoria geral dos sistemas (Bertalanffy, 1950) aos estudos geomorfológicos, com o intuito de examinar de maneira mais detalhada as bases fundamentais do tema e o alcance de seus métodos. Bertalanffy (1950) concluiu que os organismos vivos são sistemas abertos, nos quais ocorrem constante importação, exportação e transformação de matéria e energia. Strahler (1950) e Hack (1960) introduziram o conceito de sistema aberto na Geomorfologia, enquanto Chorley (1962) descreveu a organização sistêmica dessa disciplina.

Ao longo da história da ciência geomorfológica, diferentes correntes epistemológicas foram registradas, principalmente pela escola anglo-americana e germânica. No entanto, a disciplina consolidou-se ao longo do tempo como uma ferramenta indispensável para a compreensão dos processos naturais e humanos. No Brasil, a contribuição mais importante para a teoria geomorfológica parte de Ab'Sáber (1969), que desenvolveu estudos integrados da paisagem sob a perspectiva sistêmica (Cassetti, 2005).

Ab'Saber (1969) foi fundamental para a renovação metodológica e instrumental nas pesquisas geomorfológicas, revitalizando o conceito de fisiologia da paisagem e expandindo sua compreensão como resultado da interação entre processos passados e atuais. Destaca-se a valorização da geomorfologia germânica, influenciada por estudiosos como Ferdinand von Richthofen, Alexander von Humboldt e, em especial, pela contribuição de Goethe, reconhecido como ponto de referência permanente por ter empregado pela primeira vez a expressão "morfologia" como sinônimo de geomorfologia (Cassetti, 2005).

Nota-se que a Geomorfologia sempre teve um forte diálogo com outras disciplinas e campos temáticos, abrangendo tanto as ciências naturais quanto as sociais. Seus fundamentos consolidados são amplamente utilizados na compreensão de mudanças sistemáticas naturais e artificiais.

Para os geomorfólogos, as formas terrestres são derivadas de um sistema complexo de variáveis interligadas, onde as forças transformadoras atuam sobre materiais resistentes, resultando em processos geomorfológicos. A teoria do "equilíbrio dinâmico" descreve o

comportamento harmônico desses fatores, onde qualquer alteração em uma variável resulta em uma nova dinâmica (Hack, 1960; Chorley, 1962; Tricart, 1965). Essa teoria tem sido moldada com base em críticas construtivas e é fundamental para os estudos do relevo em diferentes escalas de abordagem. Todavia, é necessário notar que se trata de um entendimento complexo devido à multiplicidade de padrões de equilíbrio existentes, que variam de acordo com a escala temporal e o tipo de fenômeno observado. Porém, nem todos os componentes do sistema precisam estar, ao mesmo tempo, em perfeito equilíbrio para haver um balanceamento harmonioso entre os fluxos de matéria e energia (Huggett, 2011; Fierz, 2016).

A abordagem sistêmica adotada pelos geomorfólogos contribui para a consolidação de uma linguagem e uma base teórica que permite a análise das condições estáticas e mutáveis. É importante considerar como um sistema geomorfológico responde às perturbações da força motriz, levando em conta as variações de frequência, magnitude, extensão, duração, espacialização, velocidade e tempo de atuação de um distúrbio (Huggett, 2011).

Joly (1977) destaca que a ciência geomorfológica se dedica à descrição, interpretação e explicação das formas de relevo em termos de espacialidade, gênese e temporalidade. Esses aspectos são abordados pela interpretação da morfologia, sobretudo a morfogênese, a morfocronologia, a morfodinâmica e a morfometria do relevo. Huggett (2011) ressalta a importância dos processos geomorfológicos e da história do relevo como elementos-chave na classificação geomorfológica do modelado, refletindo a vocação natural da Geomorfologia.

Barros & Valadão (2018) e Silva (2021) destacam a questão interescalar presente na tríade geomorfológica dada pela forma, processos e materiais, em que o primeiro elemento é resultado dos processos geológico-geomorfológicos que ocorrem em diferentes escalas de tempo, da escala geológica a histórica, onde a sociedade influencia diretamente a produção de relevos tecnogênicos e intensifica processos erosivos e deposicionais.

Machado *et al.* (2018), com base em Peloggia (1997), define o termo tecnogênico como um tempo de transição em que as atividades humanas na geologia começaram há cerca de 10.000 anos, durante o período Quaternário. Eles explicam que as mudanças geomorfológicas e do solo nas áreas urbanas, resultantes de atividades de construção e engenharia, podem ser definidas como depósitos tecnogênicos. Silva (2021) complementa que esses relevos e depósitos são locais e têm origem em ações humanas diretas e indiretas, resultando em sensíveis transformações da paisagem natural.

No contexto dos estudos geomorfológicos, é essencial compreender a relação íntima entre os elementos do sistema geomórfico, considerando as variáveis que moldam o relevo e o complexo sistema hidrológico responsável pelo ciclo natural da água. As mudanças ambientais ocorridas durante o período Quaternário, especialmente as oscilações climáticas entre condições glaciais e interglaciais, provocaram ajustes substanciais nos processos geomorfológicos e nos regimes modeladores. Essas oscilações resultaram em um desequilíbrio marcado por intensas transformações nas vertentes, retrabalho do substrato geológico e reconfiguração de depósitos sedimentares em escala planetária (Huggett, 2011).

Durante o Quaternário, as mudanças ambientais exerceram profunda influência na interação entre as formas do relevo e os processos hidrológicos, destacando-se o escoamento superficial. Essas mudanças impactaram não apenas a constituição físico-química dos materiais, mas também a configuração geométrica das formas superficiais e a dinâmica do fluxo de energia, incluindo fatores como precipitação, evaporação e vazão.

Guerra (1999) apresenta uma sistematização do processo de escoamento, descrevendo-o a partir do contato da água da chuva com a superfície e subdividindo em etapas como saltitação, infiltração, hidratação do solo, formação de poças e o escoamento superficial ou subsuperficial. No entanto, é fundamental ir além dessa relação de dependência mútua entre os fluxos de matéria e energia e adotar uma visão mais holística dos elementos, buscando-se alcançar o conhecimento ecodinâmico dos processos hidrológicos (Tricart, 1977).

O reconhecimento da ação antrópica na alteração do equilíbrio dinâmico dos sistemas naturais despertou um maior interesse dos geomorfólogos a partir do século XX. No entanto, foi apenas na década de 1970 que se percebeu a incorporação efetiva da ação antrópica nos modelos de previsão das mudanças geomórficas de curto prazo, especialmente em relação à escala de tempo humana (Chorley, 1971; Tricart, 1977; Moroz-Caccia Gouveia, 2010; Kondolf & Podolak, 2014; Barros & Valadão, 2018).

Durante as décadas de 1970 e 1980, houve uma aproximação entre a Geomorfologia e a engenharia civil, principalmente no Reino Unido. O termo "Geomorfologia de Engenharia" foi mencionado pela primeira vez em 1984 por Andrew Hansen, considerado o primeiro "geopraticante" a utilizar essa terminologia (Hearn, 2019).

Uma das contribuições mais notáveis da Geomorfologia para a Engenharia Civil foi o uso de mapeamentos geomorfológicos em projetos de construção de estradas. No entanto, sua

aplicação prática foi limitada por algumas restrições, como a falta de aceitação universal pelos engenheiros, a abordagem secundária em relação às análises sistêmicas, o reconhecimento insuficiente das contribuições dos geomorfólogos e a carência de conhecimentos adequados sobre critérios de projeto entre os "geomorfologistas de engenharia" (Griffiths & Hearn, 1990).

Giardino e Marston (1999) discutem o papel pragmático da Geomorfologia e afirmam que o termo "Geomorfologia de Engenharia" é mais apropriado, enfatizando a importância do conhecimento geomorfológico para os trabalhos de engenharia, ao mesmo tempo em que ressaltam a distinção entre essas disciplinas.

A Geomorfologia de Engenharia se beneficia de uma compreensão abrangente da ciência geomorfológica e das condições de contorno para uma abordagem mais apropriada e econômica. Novas direções de pesquisa empolgantes podem ser seguidas pelos geomorfologistas para fornecer informações essenciais para o manejo do relevo. A colaboração interdisciplinar entre geomorfólogos e engenheiros é fundamental para alcançar soluções e percepções que não seriam obtidas individualmente (Giardino & Marston, 1999).

Além disso, a hidráulica e a hidrologia desempenham papéis fundamentais nessa discussão. A hidráulica estuda o comportamento e o fluxo da água em sistemas naturais e artificiais, fornecendo informações sobre as características do escoamento e a interação entre a água e o relevo. Por sua vez, a hidrologia investiga o ciclo hidrológico, oferecendo dados essenciais para compreender os processos associados e sua influência na dinâmica geomorfológica. A integração dessas disciplinas com a Geomorfologia possibilita uma abordagem mais abrangente e precisa na análise e no planejamento de projetos de engenharia relacionados ao relevo (Giardino & Marston, 1999; Saadi, 1997).

Sobre a cartografia geomorfológica, Silva (2021) destaca que essa área tem suas origens nos anos 1940, com o debate sobre o mapeamento do relevo sendo impulsionado principalmente pela escola francesa, representada por Jean Tricart e André Cailleux. Esses pesquisadores buscaram registrar as formas de relevo por meio de uma análise integrada dos parâmetros físico-ambientais, resultando em mapas geomorfológicos de alta qualidade técnica. O autor também menciona a contribuição de Julius Büdel, que enfatizou o papel do fator climático na (re)elaboração do relevo, além dos pesquisadores russos Gerasimov e Mescerjakov, que introduziram conceitos como morfoestrutura e morfoescultura na classificação do relevo.

Ross (1992) destaca a diferença entre os conceitos de morfoescultura e morfoclimática, ressaltando que o primeiro é resultado da ação climática sobre uma estrutura específica, enquanto o segundo está relacionado aos processos morfogenéticos determinados por um tipo climático específico. Com a perspectiva sistêmica, os estudos integrados da paisagem passaram a considerar a interação entre atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera, ampliando o entendimento dos sistemas naturais e exigindo a consideração dos impactos das ações humanas nas investigações geomorfológicas (Tricart, 1977; Rodrigues & Souza, 2013).

Os estudos de fragilidade ambiental surgiram como instrumentos para auxiliar a tomada de decisões. A "Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados", desenvolvida por Ross (1994), contribuiu com os conceitos de "Unidades Ecodinâmicas Instáveis" (áreas intensamente modificadas pela ação humana) e "Unidades Ecodinâmicas Estáveis" (áreas em relativo equilíbrio dinâmico), destacando a importância dos estudos sobre ecodinâmica. Santos & Ross (2012) enfatizam a necessidade de estudos básicos do relevo, solo, subsolo, uso da terra e clima, juntamente com levantamentos de campo, serviços de gabinete e técnicas de geoprocessamento para possibilitar o diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas de fragilidade dos ambientes naturais e urbanos.

A capacidade da Geomorfologia em se relacionar com outras áreas do conhecimento foi fundamental para seu desenvolvimento. Com base em Coltrinari (2000) e Tricart (1986), Barros & Valadão (2018) argumentam que o progresso e o avanço teórico no estudo geomorfológico representam o quanto essa ciência enriqueceu e se diversificou a partir das contribuições coletivas no diálogo com as variadas ciências da Terra e que mesmo tendo um objeto específico, não se constituiu um campo de pesquisa fechado nele mesmo. Nesse contexto, salienta-se que desde a fase clássica da "Geomorfologia de processo" com o tratado de Gilbert (1877), novas áreas multidisciplinares foram incorporadas como objeto de estudo da ciência geomorfológica, como a Antropogeomorfologia (Lóczy, 2010; Marques Neto & Oliveira, 2022), Hidrogeomorfologia (Scheidegger, 1973; Sidle & Onda, 2004) e Geomorfologia Urbana (Coates, 1984; Jorge, 2011).

A abordagem geomorfológica contemporânea também contempla novos conceitos como, por exemplo, as "assinaturas topográficas", que engloba as morfologias influenciadas pela tectônica, clima, processos erosivos, sedimentação e elementos bióticos (Tarolli & Sofia, 2015), as quais quando modificadas pela ação humana, denominam-se "assinaturas topográficas humanas - ATH's" (Ellis, 2011; Silva, 2018). Acompanhando a tendência

inovadora, Danelon & Barcelos (2023) introduzem o conceito de "processos antropogênicos induzidos em ambientes urbanizados", relacionando diretamente os processos geomorfológicos e hidrogeomorfológicos responsáveis pelas alterações nas paisagens naturais e artificiais das cidades.

É fundamental ressaltar a relevância da morfologia urbana para a Geomorfologia e a Hidrologia, especialmente na análise espacial das estruturas construídas, uso da terra, padrões de infraestrutura viária, edificações, espaços abertos e na formação e transformação dos assentamentos humanos (Kropf, 2017). A inclusão da morfologia na estimativa de cheias, por exemplo, emerge da necessidade de compreender o crescimento urbano através da perspectiva da expansão geográfica e da intensificação das edificações (Dumedah *et al.*, 2021).

A análise morfológica, no contexto da arquitetura e urbanismo, limita-se aos componentes elementares do tecido urbano. Contudo, na Geografia, permite uma compreensão abrangente das características físicas e espaciais de toda a estrutura urbanizada. Sob a perspectiva da Geomorfologia Urbana, abrange ambientes modificados pelo ser humano e reflete o conflito entre processos geomorfológicos antrópicos e naturais (Rego & Meneguetti, 2011). Esse tipo de análise viabiliza a identificação e o mapeamento de elementos-chave, como áreas impermeáveis, padrões de drenagem, sistemas de escoamento de água e fatores que influenciam a dinâmica do fluxo pluvial urbano. Além disso, uma abordagem holística sobre a configuração espacial das estruturas urbanas pode impactar diretamente a compreensão do comportamento do escoamento superficial e seus efeitos.

A análise morfológica nos estudos hidrológicos e geomorfológicos é fundamental para a compreensão dos processos urbanos. Essa abordagem é pertinente para o desenvolvimento de estratégias eficazes de planejamento e gestão de riscos, pois permite avaliar os impactos das alterações resultantes do ambiente construído e identificar medidas para mitigar os efeitos adversos do manejo inadequado das águas pluviais. Além disso, essa perspectiva visa contribuir para a resiliência das cidades em níveis comunitário e governamental (Imperiale & Vanclay, 2023).

1.1 Geomorfologia Urbana

As investigações científicas da Geomorfologia Urbana são relativamente recentes, e os trabalhos que carregam essa temática como pano de fundo foram motivados, boa parte, pelo entendimento da amplitude das atividades humanas sobre o meio (Chengtai, 1996; Fujimoto, 2005; Guerra & Marçal, 2006). As ações antrópicas ocorrem geralmente de forma assíncrona e intensificada, contribuindo para a aceleração dos processos geomorfológicos e para o desenvolvimento de uma nova morfodinâmica (Nir, 1983; Guerra, 2011; Ferrari, 2018).

Chengtai (1996) pontua que o relevo é um elemento básico do ambiente urbano. Trata-se de uma substância geomórfica com várias formas e materiais que constituem a superfície subjacente e que atua como fator controlador do *layout* das cidades. As constantes intervenções que se dão nesse ambiente contribuem para a destruição e transformação dos componentes físicos de sua complexa geomorfologia. Desse modo e, concomitante a perturbação do processo morfológico, surgem novas formas artificiais do relevo.

A importante contribuição de Chengtai (1996) possibilita uma maior compreensão sobre as formas do elemento “geomorfologia urbana”, considerando sua divisão em três partes essenciais: relevos físicos; artificiais e; físico-artificiais.

As formas de "relevos físicos" referem-se àquelas que são conservadas ou pouco alteradas pelas atividades humanas, apresentando uma estrutura macroscópica que influencia a expansão, estruturação e padronização das cidades. Por outro lado, as formas de "relevos artificiais" correspondem a diversas construções realizadas pelo homem, como infraestrutura viária, edifícios e pontes, sendo identificadas principalmente por meio da análise dos impactos da expansão urbana. Geralmente, essas formas são compostas por materiais de construção variados, constituindo uma parte significativa do ambiente geomorfológico. Já as formas de "relevos físico-artificiais" combinam elementos reformados pela sociedade em diferentes graus, como canais bloqueados, gramados artificiais e cinturões verdes, incorporando características tanto de relevos físicos quanto artificiais.

Faccini *et al.* (2021) resumem a “Geomorfologia Urbana” a partir de Cooke *et al.* (1982) e Giardino *et al.* (2015) como um conjunto de processos físicos de mudanças efetuadas por atividades antrópicas, no qual os seres humanos modificam as formas naturais do relevo, transformando-as em uma paisagem antropogênica.

Nesse contexto, os métodos desse subcampo visam facilitar uma análise mais aprofundada da relação contraditória e unitária entre o ser humano e as formas geomorfológicas. Essa área de conhecimento se configura como uma lente interdisciplinar que abrange tanto os impactos positivos quanto negativos, diretos e indiretos, das intervenções humanas sobre o relevo, incluindo obras, edificações e infraestrutura. Além disso, permite a interpretação dos processos antrópicos que moldam a morfologia urbana (Thornbush, 2015; Jorge, 2011).

As drásticas mudanças provocadas pela urbanização resultam em mecanismos de retroalimentação que comprometem o ecossistema terra-água e que por sua vez, convergem para uma enorme variedade de distorções e desajustes que configuram e reconfiguram constantemente, a paisagem urbana (Coates, 1984). Em regiões tropicais, por exemplo, onde o crescimento das áreas urbanas ocorre muitas vezes de forma desordenada, a manutenção dos ambientes naturais torna-se extremamente complexa (Cunha, 2010).

Um ecossistema urbano pode ser mais bem compreendido pela ótica da abordagem sistêmica, reconhecendo, conforme Bertalanffy (1968), que o todo é mais do que a soma de suas partes. Desse modo a cidade deve ser entendida no contexto de sua forma como um conjunto de elementos, considerando o seu ambiente, pois, as propriedades das partes não são intrínsecas. Elas se tornam insuficientes quando o sistema é visto como elementos isolados, uma vez que o todo é sempre diferente da mera soma das partes (Capra, 2006; Oliveira, 2018).

A interação da sociedade com os fatores abióticos urbanos demanda um conhecimento aprofundado desses elementos. Nesse sentido, a análise do ambiente urbano por meio de um inventário físico oferece recursos para compreender como o substrato geológico-geomorfológico é moldado pelas atividades humanas. É essencial reconhecer que o ser humano, enquanto agente geomórfico, atua como catalisador nos processos de acumulação e erosão, principalmente devido ao movimento de grandes volumes de solo e rochas (Pica *et al.*, 2024).

Por essas razões, entende-se o relevo como elemento fundamental da fisiografia urbana, compreendido como uma superfície composta por materiais e formas que constituem a base de assentamento para as construções humanas. É, portanto, um fator controlador das características urbanas, tanto que se percebe a existência de um modelo conflituoso no qual, temos as formas originais do modelado terrestre em contraste com as formas artificiais, resultando em um ambiente geomorfológico urbano (Chengtai, 1996).

Nas últimas décadas os assuntos geomorfológicos, especialmente no que diz respeito ao Antropoceno, as mudanças climáticas e os desastres naturais, ganharam amplitude (Keiler *et al.*, 2010; Stoffel & Huggel, 2012). O aumento do nível do mar, as inundações, enchentes, alagamentos, erosões, colapsos do solo e outros riscos geomorfológicos despertaram crescente interesse da mídia, notadamente, os eventos extremos atribuídos às mudanças climáticas. As ações de prevenção e medidas mitigadoras têm requerido, dentre outras abordagens, a compreensão dos processos geomorfológicos em convergência com a grande relevância prática da ciência geomorfológica contemporânea (Laimer, 2021).

A ruptura no discurso ecológico moderno, em que o Holoceno, anteriormente estável, deu lugar a uma época dominada pela espécie humana, oferece um quadro analítico crítico para reflexão sobre o passado geológico e os impactos contemporâneos das atividades antropogênicas. Esse cenário direciona-nos para novas abordagens que estão fundamentalmente preocupadas com a resiliência e a capacidade adaptativa dos sistemas globais. Diante do intenso debate acadêmico sobre o Antropoceno, os estudiosos contemporâneos dedicados a pensar ou teorizar sobre o futuro dessa tese enfrentam agora o desafio de negociar as transformações epistêmicas proporcionadas pela introdução de uma nova era geológica (Thakur & Jayaram, 2024).

Em um período em que as alterações antrópicas são cada vez mais onipresentes e frequentemente multifacetadas, torna-se elementar um foco renovado na geomorfologia da atividade humana. Essa linha de pesquisa, reconhecida na literatura como Geomorfologia Antropogênica (Thornbush & Allen, 2018) e Antropogeomorfologia (Lóczy, 2010), deve abranger, contudo, não apenas as consequências diretas e indiretas da atividade humana no passado e no presente, mas também a maneira como essas alterações impactam as atividades subsequentes da sociedade em diversas escalas espaço-temporais (Jefferson *et al.*, 2013).

Os eventos climáticos decorrem de processos naturais, em especial da dinâmica dos sistemas atmosféricos (Hoffmann *et al.*, 2014). Os casos extremos são atribuídos ao desvio excepcional dos padrões climáticos habituais de determinada região (Costa, 2014). Contudo, é importante advertir sobre o uso de termos relacionados a “evento extremo”, uma vez que esse conceito depende dos objetivos estabelecidos em cada pesquisa.

Há dois principais caminhos para conceituar o termo “extremo”: o estatístico e o qualitativo (Tavares & Ferreira, 2020). O primeiro utiliza equações matemáticas aplicadas a conjuntos de

dados para determinar os limites de intensidade, definindo desvios e analisando a frequência dos limiares do evento, onde a raridade é fundamental para o conceito. O segundo aborda a consideração qualitativa em relação ao substrato físico local e ao impacto social ou ambiental causado. Vale ressaltar que a abordagem estatística não é excludente, mas sim complementar à análise das repercussões e consequências do evento.

Os extremos climáticos, especialmente em relação à intensidade e frequência das precipitações, podem resultar em duas situações opostas: escassez hídrica, como em períodos de seca, ou excesso de chuvas, que se manifesta em eventos pluviométricos intensos e prolongados. Esse excesso pode levar a inundações, enchentes, alagamentos e outros efeitos devastadores, com impactos significativos nas comunidades e no ambiente urbano (Tominaga *et al.*, 2009).

As **inundações** decorrem do transbordamento das águas de um canal fluvial ao longo de sua planície de inundação. Apesar de serem tratadas popularmente como enchentes ou cheias, a diferença encontra-se na elevação do nível d'água do canal até a cota máxima do mesmo, sem ocorrer, no entanto, o extravasamento (Kobiyama *et al.*, 2006). Já os **alagamentos**, são definidos pela classificação e codificação brasileira de desastres (COBRADE, 2012), como a extrapolação da capacidade de escoamento dos dispositivos de drenagem e o consequente acúmulo de água da chuva. Genericamente, o alagamento pode ser entendido como uma área com acúmulo de água. Esse conceito é muito empregado em áreas urbanas, cujo processo motivador decorre da associação de vários fatores tais como: intensidade de precipitação; grau de impermeabilização do solo; subdimensionamento e/ou má conservação dos dispositivos de drenagem urbana, entre outros (Sousa & Rocha, 2022).

As transformações do ambiente geomórfico originam novas paisagens, geralmente irremediáveis e irreversíveis. Os processos geomorfológicos antropogênicos diretos são aqueles responsáveis pela remodelagem contundente da superfície terrestre, materializada pelo conjunto de ações de acumulação (processos construtivos) e denudação (processos destrutivos) que atuam sobre o relevo. Já os processos indiretos, resultam da influência dos anteriores sobre o fluxo de matéria e energia que envolve os elementos físicos, químicos e biológicos do ambiente geomorfológico (Zhang *apud* Li *et al.*, 2017).

As ações humanas processadas diretamente sobre o relevo criam, induzem, intensificam ou modificam as atividades de acumulação e denudação, sobretudo pela supressão da cobertura

vegetal, execução de cortes, aterros, impermeabilização da superfície, e outras intervenções de parcelamento do solo, particularmente a instalação de formas urbanas (quadras, lotes, edificações, elementos do sistema viário, entre outras) que requeiram obras de drenagem pluvial caracterizadas normalmente pela retificação, canalização e o desvio de canais fluviais. Em síntese, esses processos culminam na remodelação fisiográfica da paisagem, com reflexos imediatos na dinâmica de escoamento superficial, subsuperficial e nos padrões de drenagem natural das águas pluviais (Fujimoto, 2005; Ferrari, 2018).

As abordagens metodológicas empregadas no reconhecimento e mapeamento das formas de relevo em ambientes urbanizados diferem consideravelmente daquelas utilizadas em ambientes naturais, onde as características geomorfológicas são mais explícitas. Por iguais razões, os levantamentos geomorfológicos nesses ambientes requerem observações mais cuidadosas da topografia, particularmente nas escalas de médio e grande detalhe (Brandolini *et al.*, 2020; Brandolini *et al.*, 2021).

É nas cidades que os princípios geomórficos do meio físico se sobressaem (Coates, 1984). O processo metamórfico da paisagem natural para paisagem urbana contribui para a potencialização dos impactos sobre esse ecossistema, a exemplo das modificações do regime fluvial dos recursos hídricos superficiais, provocado por obras de drenagem pluvial.

A Geomorfologia e suas subdisciplinas requerem como pré-requisito de estudo, o conhecimento e a definição das escalas de distribuição espaço-temporal do fenômeno a ser investigado. A dimensão dos elementos a serem explorados é fundamental para o entendimento dos processos de controle e modificação do relevo (Viles, 2001). Segundo Tricart (1965), a grandeza têmporo-espacial dos objetos da Geomorfologia, além de relacionar-se diretamente com sua classificação, condiciona também a escolha dos métodos de análise e a natureza das ligações de causalidade.

A Geomorfologia Urbana, portanto, é uma subdisciplina da Geomorfologia Antropogênica (Thornbush & Allen, 2018) que requer amplo nível de abstração. Suas análises são concentradas nas formas artificiais do relevo dos ambientes modificados pelo Homem e na relação conflitante entre os processos geomórficos antrópicos e naturais, em uma escala de abordagem temporal que compreende anos e décadas (Coates, 1984; Sherman, 1989; Jorge, 2011). Recai sobre esse subcampo, a tarefa multidisciplinar de examinar os efeitos positivos e

negativos, diretos e indiretos das intervenções humanas sobre a paisagem urbanizada contemporânea (Thornbush, 2015).

Outros subcampos da Geomorfologia investigam a influência das "paisagens fósseis" no comportamento evolutivo dos ancestrais humanos, como a Paleogeomorfologia (Martin, 1968; Fairbridge, 1968a) e a Arqueogeomorfologia. Este último utiliza técnicas para analisar paleossolos e climas do passado, além de realizar levantamentos paleoambientais e modelagem geoespacial, com o objetivo de reconstruir contextos históricos, culturais, sociais e econômicos de antigos sítios urbanos (Thornbush, 2012; Thornbush & Allen, 2018).

Os impactos das atividades humanas no contexto do Antropoceno, que provocam alterações morfológicas em diferentes escalas, são objeto de estudo da Antropogeomorfologia (Sherman, 1989; Lóczy, 2010; Zwoliński *et al.*, 2018; Aguilar, 2020). Moroz-Caccia Gouveia (2010) realizou um amplo levantamento histórico sobre esse subcampo, destacando que as primeiras investigações sobre o componente antrópico na Geomorfologia datam do final do século XIX e início do século XX, com Marsh (1864) na obra "*Man and Nature: Or, Physical Geography as Modified by Human Action*" e Sherlock (1922) em "*Man as a Geological Agent*".

Observa-se uma proximidade entre os estudos da Geomorfologia Urbana e da Antropogeomorfologia. Ambas disciplinas abordam o contexto multidisciplinar da humanidade como agente geomorfológico (Thornbush & Allen, 2018). No entanto, a Antropogeomorfologia inclui o ser humano como um novo elemento do meio, colocando-o em um papel específico de intervenção e modificação das formas e processos naturais nas diversas paisagens (Nir, 1983; Rodrigues, 2005). Diante da necessidade de investigar os fenômenos de construção da cidade sob a ótica geomorfológica, alguns autores preferem o termo "Antropogeomorfologia Urbana" em vez de "Geomorfologia Urbana" (Santos Filho, 2011).

É importante notar que, antes do início do século XX, as ações humanas sobre o meio ambiente eram vistas como irrelevantes em comparação com os efeitos das forças naturais, como vulcões, abalos sísmicos, mudanças climáticas e grandes rios (Goudie, 1993). No entanto, deve-se considerar que o processo de urbanização teve um impacto expressivo sobre os ambientes naturais, resultando em consideráveis implicações para a intensidade, duração e frequência dos fenômenos físicos.

Rahmati *et al.* (2022) destacam que formas erosivas, como ravinas, têm sido observadas com maior frequência em ambientes urbanizados e desenvolvidos devido a diversos fatores como a escavação e compactação do solo, abertura de vias de tráfego, construção de edificações, assentamentos irregulares e ausência de infraestrutura adequada.

No contexto da abordagem metodológica de classificação e representação cartográfica proposta por Ross (1992), diferentes níveis de interpretação do relevo foram estabelecidos, considerando as características fisionômicas de cada forma, independentemente de sua extensão. No entanto, antes dessa classificação, é necessário compreender as características morfo genéticas e sua influência estrutural e/ou escultural no modelado.

A morfoestrutura, por exemplo, desempenha um papel fundamental no primeiro táxon (nível 1), a partir do qual surgem várias unidades morfoesculturais no segundo táxon, resultantes da ação climática ao longo do tempo geológico, como depressões periféricas, depressões monoclinais, planaltos em patamares intermediários, planaltos e chapadas de superfícies de cimeira, planaltos residuais, entre outros (Ross, 1992; Ross & Moroz-Caccia Gouveia, 2022).

No Brasil, o Comitê Executivo Nacional (CEN/SBCR, 2023), composto por representantes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e da União da Geomorfologia Brasileira (UGB), tem trabalhado desde 2019 na construção de um Sistema Brasileiro de Classificação de Relevo (SBCR) unificado e padronizado, visando a padronização da Cartografia Geomorfológica.

Durante o 1º Workshop sobre o SBCR, ocorrido em 2019, foi decidido que o primeiro táxon do sistema seria representado pelas macroformas do relevo brasileiro, sendo elas Montanhas, Planaltos, Planícies, Superfícies Rebaixadas e Tabuleiros. O segundo táxon está relacionado ao substrato geológico e sua influência na configuração do relevo, mas ainda precisa de maior compreensão e correlação com o primeiro táxon. Os táxons inferiores ainda não foram definidos, mas uma publicação específica sobre o SBCR está prevista para o ano de 2024.

O SBCR também propõe classificações temáticas específicas, como os (Sub)Sistemas de Relevo (Fluvial, Costeiro e Tecnogênico), que podem ser acoplados ao sistema principal em níveis hierárquicos maiores ou utilizados em pesquisas com abordagens mais específicas. O termo "Tecnogênico" refere-se à morfogênese associada à intervenção humana, sem implicar idade dos terrenos e formas associadas.

No contexto das formas tecnogênicas, são identificados três tipos de processos: acumulação de material (Elevações ou Superposições Tecnogênicas), perda de material (Cicatrizes ou Depressões Tecnogênicas) e dinâmica conservativa (Corrugações Tecnogênicas e Equiformas Tecnogênicas). Essas formas se desenvolvem principalmente em ambientes urbanos (Rodrigues; Danelon & Barcelos, 2022).

Os táxons posteriores ao segundo incluem conjuntos de formas menores com características distintas, formas individualizadas (morros, colinas, chapadas, etc.) e formas relacionadas a processos erosivos atuais, como sulcos, ravinas e voçorocas. O desenvolvimento urbano também causa expressivas alterações na paisagem geomórfica, incluindo redistribuição de materiais de superfície e mudanças na organização geomórfica (Jones *et al.*, 2014).

A representação cartográfica desses elementos requer o uso de escalas grandes para detalhar os fenômenos geomórficos. A identificação precoce de tipologias do relevo, como convexidade e concavidade das vertentes em diferentes planos, é um desafio para a Geomorfologia (Loro *et al.*, 2017; Ross & Moroz-Caccia Gouveia, 2022).

Observa-se que a ocupação desordenada do meio urbano nesse nível taxonômico também contribui para a modificação da dinâmica de escoamento das encostas, a partir da desarticulação das formas de relevo. A interferência antrópica predatória pode contribuir consideravelmente para alteração das funções hidrológicas e hidráulicas das bacias hidrográficas nesses ambientes (Jones *et al.*, 2014), a exemplo das alterações da dinâmica de escoamento causadas pela modificação da rugosidade natural das vertentes.

Diante das questões ambientais que envolvem o assunto, torna-se essencial compreender o panorama recente das pesquisas geomorfológicas. Nesse contexto, foram investigados os temas transversais mais explorados nos estudos geomorfológicos no período de 2012 a 2022, empregando-se o *software* livre VOSviewer (Van Eck & Waltman, 2010) e a base de dados Scopus Elsevier para a construção e visualização de mapas bibliométricos. Foram considerados artigos abertos das áreas de ciências da terra, ambientais, sociais e biológicas. A busca inicial pela palavra-chave "Geomorfologia" resultou em 17.059 documentos de instituições de pesquisa de várias regiões, incluindo América, Ásia e Europa.

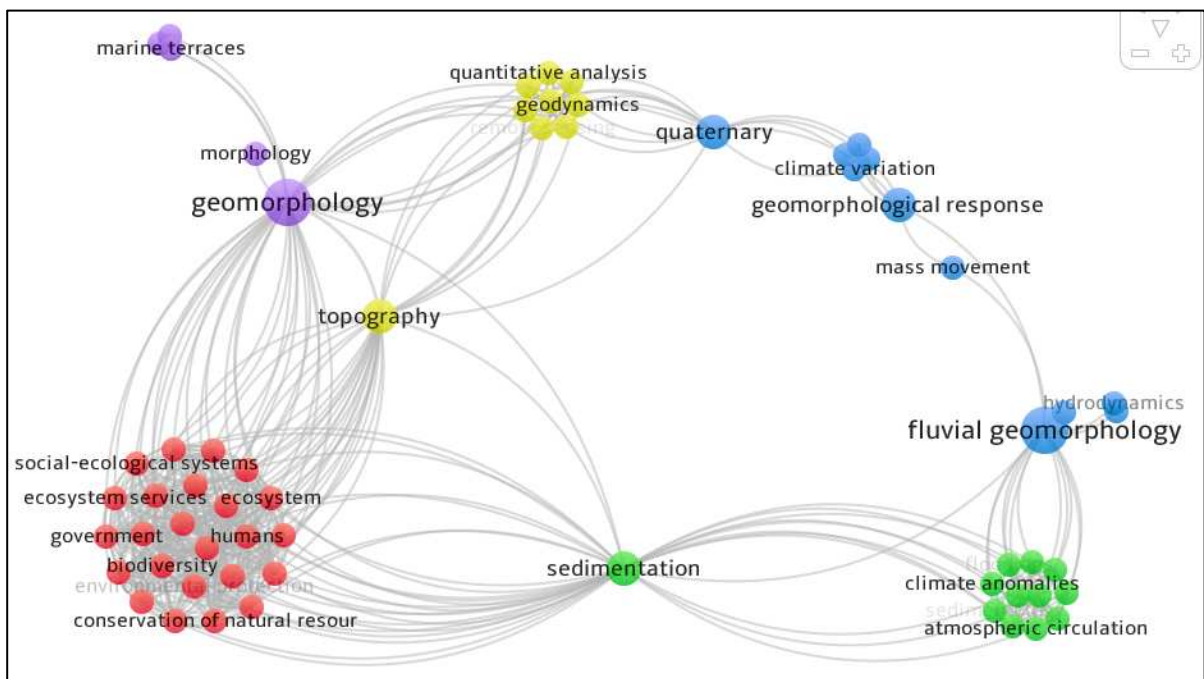
O *software* VOSviewer é uma ferramenta importante que permite a visualização e a análise de dados bibliográficos de maneira eficiente e informativa. A Cienciometria (*Scientometrics*) e a pesquisa bibliométrica são complementares, pois ambas utilizam métodos quantitativos para

estudar a produção científica. A análise bibliométrica e os mapas de rede compreendem um conjunto de ferramentas para o alcance do estado da arte dos estudos dentre as diversas áreas do conhecimento.

Sharifi (2021), por exemplo, utilizou essa abordagem para avaliar a sustentabilidade urbana, identificando áreas de foco, autores influentes e periódicos relevantes. Guimarães *et al.* (2021) empregaram recursos semelhantes na identificação de palavras-chave relacionadas à restauração fluvial urbana. A revisão bibliométrica realizada por Buyukozkan *et al.* (2022) analisou tendências de estudos anteriores sobre resiliência urbana, destacando temas multidisciplinares como mudanças climáticas, planejamento, sustentabilidade, vulnerabilidades urbanas e cidades inteligentes (Bonab *et al.*, 2023).

Na análise envolvendo os anos de 2012 a 2022, foi definido um número mínimo de 1 (uma) co-ocorrência para o filtro da quantidade de termos entre os dados exportados (informações de citação, bibliográficas, palavras-chave e resumos). Posteriormente, empregou-se o grupo de palavras-chave filtradas pelo *VOSviewer* (223 palavras) para criação da rede bibliométrica (Figura 3), de modo a alcançar somente os grupos de temas transversais mais explorados nos estudos geomorfológicos do período adotado. Um último ajuste foi realizado, para retirar desse conjunto os nomes de lugares, sinônimos e outros elementos fora de contexto.

Figura 3 - Rede bibliométrica com temas mais explorados nos estudos geomorfológicos (2012 a 2022).



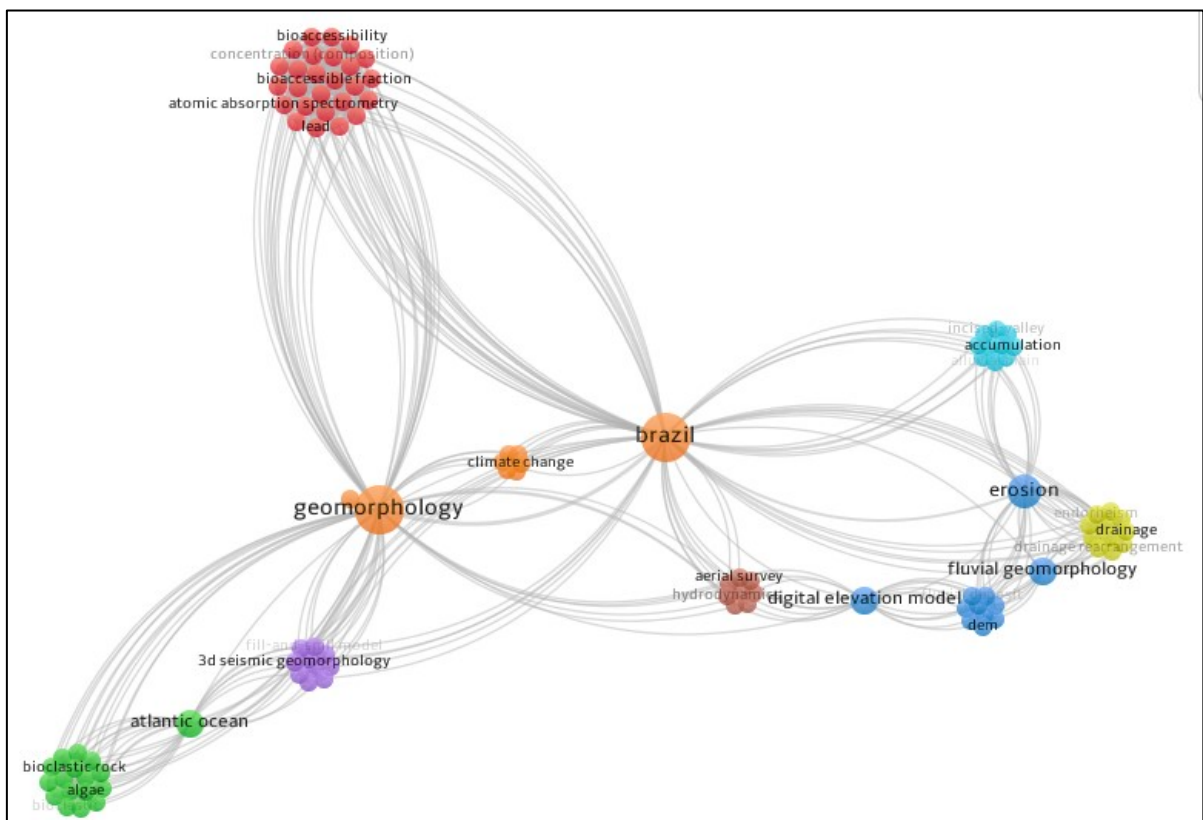
Fonte: *Scopus Elsevier; SciELO - Scientific Electronic Library Online*. Organização: O autor.

Utilizando a análise bibliométrica, foram identificados 5 (cinco) grupos temáticos (*clusters*) relacionados à Geomorfologia. No *cluster* 1 (vermelho), foram reunidos temas como serviços ecossistêmicos, simulação, gestão e conservação de recursos naturais. O *cluster* 2 (verde) agregou a circulação atmosférica e anomalias climáticas, paleoclimatologia, desmatamento, sedimentologia, entre outros.

O *cluster* 3 (azul escuro) abrangeu as respostas geomorfológicas, os estudos sobre o Quaternário, movimentos de massa, hidrodinâmica, etc. O *cluster* 4 (amarelo) focou na análise quantitativa, geodinâmica e elementos da topografia. Os *cluster* 5 (roxo) abordou temas mais amplos como os estudos sobre morfologia, variações do nível do mar e outras temáticas ligadas a Geomorfologia “genuína”.

Além disso, foi realizada uma análise similar na base de dados da SciELO, com foco na produção nacional. Utilizando a palavra-chave "Geomorfologia" e adotando o mesmo período de busca (2012-2022), foram encontradas 728 ocorrências (Figura 4).

Figura 4 - Rede bibliométrica com temas explorados nos estudos geomorfológicos de 2012 a 2022 no Brasil.



Fonte: Scopus Elsevier; SciELO - Scientific Electronic Library Online. Organização: O autor.

Foi definido no *VOSviewer*, um número mínimo de 1 (uma) co-ocorrência para o filtro da quantidade de palavras-chave entre os dados exportados. Posteriormente, foi estabelecido um limite de 160 palavras para criação da rede bibliométrica, de modo a alcançar somente grupos com os temas transversais mais explorados nos estudos geomorfológicos de 2012 a 2022 no Brasil. Um último ajuste foi realizado para excluir as expressões fora de contexto.

Esta rede apresentou 8 (oito) *clusters* com termos organizados por cores em função da força de co-ocorrência. O *cluster* 1 (vermelho) agrupou temas abrangentes ligados a deposição, contaminação dos solos, mineração, riscos a saúde dos seres vivos, sistemas de monitoramento ambiental, etc. O *cluster* 2 (verde) destacou a relação entre os estudos sobre relevos marinhos costeiros, carbonatação, sedimentologia litorânea, soluções de bioconstrução, entre outros. O *cluster* 3 (azul escuro) reuniu modelos digitais de elevação, mapeamento, topografia e elementos de geomorfologia fluvial. O *cluster* 4 (amarelo) evidenciou a drenagem e os rearranjos dos sistemas fluviais, a sedimentologia e ferramentas do sensoriamento remoto. Demais *clusters* (cores restantes), finalizaram a rede com outros temas relevantes para a Geomorfologia no cenário nacional tais como a estratigrafia geológica, geomorfologia sísmica, planícies aluviais, resposta hidrológica de bacias hidrográficas, recursos hídricos, paleoclimas, geoconservação, mudanças climáticas, hidrodinâmica, movimentos de massa, entre outros.

Na pesquisa bibliométrica executada, foi constatado que a dinâmica das águas pluviais e os riscos ambientais urbanos conquistaram posição de destaque nas investigações geomorfológicas contemporâneas, sobretudo no âmbito dos estudos internacionais. De modo geral, notam-se nos trabalhos atuais, assuntos ligados às mudanças climáticas e seus impactos sobre as formas e processos em ambientes urbanos, salientando que, os eventos extremos potencializam os efeitos provocados pelas alterações antrópicas e agregam novos componentes aos estudos geomorfológicos clássicos, especialmente aqueles que requerem escalas de maior detalhe (Haff, 2002; Goudie, 2004; Gregory, 2006; Silva, 2018).

Também é possível deduzir avanços da Geomorfologia Urbana no Brasil, impulsionados principalmente, pelo refinamento da abordagem geomorfológica no contexto da expansão das áreas urbanas e de seus impactos sobre o relevo, em um momento marcado por contribuições importantes, como o estudo da dinâmica das enchentes e dos movimentos de massa, a avaliação dos processos de degradação ambiental em centros urbanos, e a análise dos impactos atribuídos às transformações do relevo.

Laino & Iglesias (2023) salientam que a exploração dos impactos das mudanças globais no clima remonta à década de 1970. Desde então, a literatura nesse domínio testemunhou um crescimento notável, consolidando-se na contemporaneidade. O aumento dos investimentos em ESG (*Environmental, Social, and Governance*), sobretudo no contexto das mudanças climáticas, por exemplo, resultou em maior aporte financeiro para pesquisas científicas nos últimos anos, potencialmente contribuindo para a ampliação da produção acadêmica (Bonab *et al.*, 2023). Os resultados das pesquisas conduzidas pelos autores, utilizando a ferramenta VOSviewer, indicam que a análise cienciométrica pode constituir uma ferramenta para a compreensão do panorama da investigação acerca das alterações climáticas em áreas urbanas, abrangendo tópicos essenciais, assim como identificando lacunas e oportunidades para pesquisas futuras.

Em relação às implicações específicas das mudanças climáticas, no âmbito das inundações urbanas, Nkwunonwo *et al.* (2020) destacam a relevância da Geomorfologia Urbana, juntamente com o aumento dos eventos climáticos, na compreensão dos fatores causais. Esses fatores incluem alterações na morfologia natural dos espaços urbanos, problemas de planejamento e gestão das águas, pressão demográfica e ocupação irregular. Os autores sublinham a necessidade de pesquisas abrangentes sobre gestão de risco de inundações, diagnóstico e correção de anomalias hidráulicas, assim como os efeitos da ocupação irregular e impermeabilização dos vales e encostas, que contribuem para a vulnerabilidade ambiental de áreas periféricas com infraestrutura de saneamento deficiente (Nkwunonwo *et al.*, 2020).

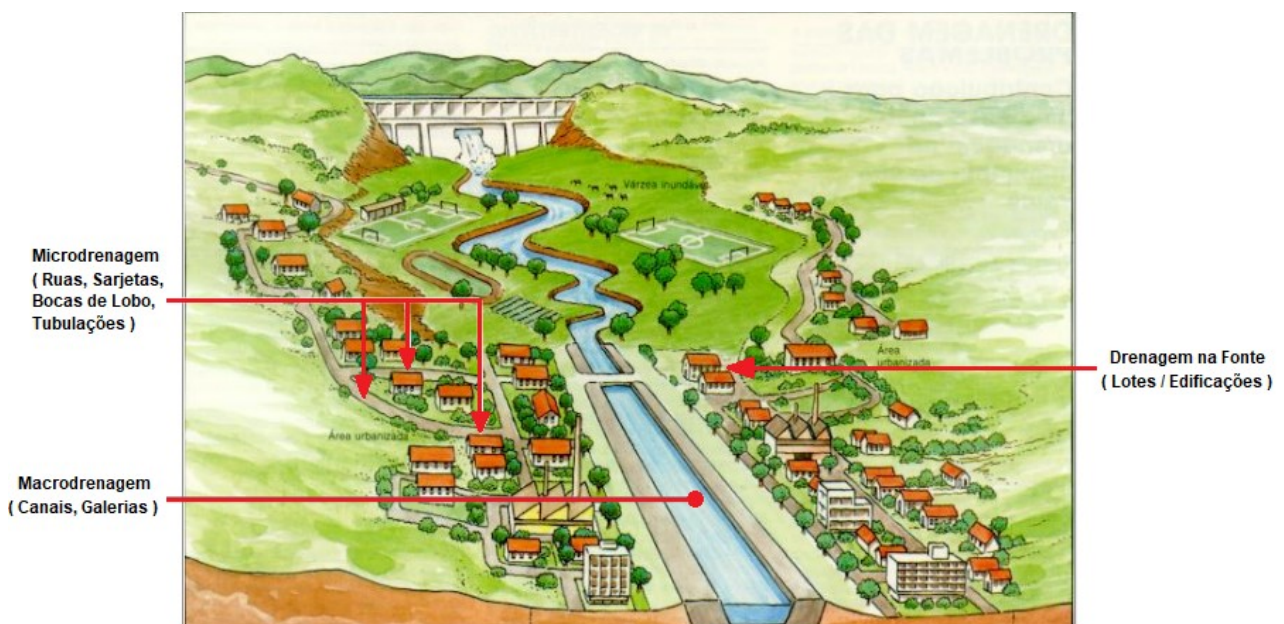
Nesse contexto, a Geomorfologia Urbana assume um papel fundamental na compreensão de cenários antropomorfizados, onde os processos geomórficos são continuamente moldados pela atividade humana. É fundamental que essa disciplina considere de maneira ampla a dinâmica transformadora dos espaços urbanos, com ênfase em seus movimentos de expansão, contração e reestruturação.

1.2 Drenagem Urbana: Panorama Conceitual

Embora a investigação da dinâmica do escoamento superficial urbano exija uma rigorosa sequência metodológica, começando pela determinação do período de retorno das vazões resultantes de uma chuva hipotética, e incluindo a delimitação da intensidade, duração e frequência do evento, assim como o cálculo do volume e a configuração do hidrograma que representa a vazão máxima da bacia em análise (Porto, 1995; Gribbin, 2014), é essencial que o escopo metodológico não desconsidere os elementos fundamentais da drenagem pluvial.

O manual que integra os estudos do Plano Diretor de Drenagem da bacia hidrográfica do alto rio Iguaçu, na Região Metropolitana de Curitiba - PR (SUDERHSA, 2002), traz uma abordagem clássica encontrada na literatura, que divide o sistema de drenagem pluvial em dois subsistemas: a **microdrenagem**, definida como o conjunto de condutos ou canais (superficiais ou enterrados) responsáveis pelo controle das águas, resultantes das áreas parceladas do solo (loteamento), por via de regra inferiores a 2 km² e; a **macrodrenagem**, que em geral, compreende o esgotamento de áreas superiores por meio de sistemas coletores de maior capacidade, capazes de escoar o fluxo captado à montante pela microdrenagem (Miguez, 2015). Tucci & Bertoni (2003) acrescentam o conceito de **drenagem na fonte** que compreende a captação e a condução do fluxo do lote/edificação à microdrenagem (Figura 5).

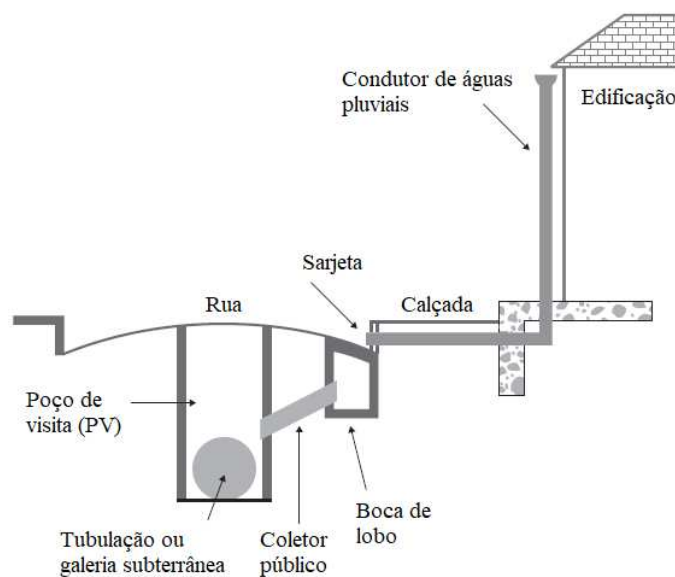
Figura 5 - Divisão clássica do sistema de drenagem pluvial.



Adaptado de: Caderno Temático de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas
Cadernos Metodológicos (FUNASA, 2016). Organização: O autor.

Normalmente, os sistemas de drenagem são compostos por soluções impermeáveis que modificam a resposta hidrológica da bacia contribuindo para o aumento do escoamento superficial. Seu principal objetivo reside no afastamento das vazões provocadas por precipitações habituais. Rezende & Miguez (2021) reforçam que um sistema de drenagem urbana compreende basicamente as **sarjetas** que correspondem as faixas de via pública, adjacentes ao meio fio; as **bocas de lobo (BLs)** que constituem elementos de captação das águas das sarjetas e as conduzem para tubulações, galerias, canais fluviais etc. e; os **poços de visita (PVs)** que possibilitam a inspeção e a manutenção da rede pluvial (Figura 6).

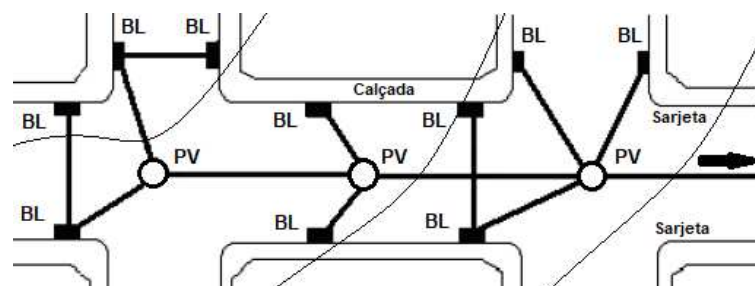
Figura 6 - Seção transversal com os componentes básicos de um sistema de drenagem de águas pluviais.



Fonte: Adaptado de: Rezende & Miguez (2021). Organização: O autor.

A Figura 7 ilustra os poços de visita posicionados estrategicamente nas mudanças de direção da rede (Menezes Filho & Ribeiro da Costa, 2012).

Figura 7 - Esquema da disposição dos elementos de um sistema de drenagem de águas pluviais.



Fonte: Adaptado de: Menezes Filho & Ribeiro da Costa (2012). Organização: O autor.

Em nível nacional, a Lei Federal nº 14.026 (Brasil, 2020), que atualiza o marco legal do saneamento básico estabelecido pela Lei Federal nº 11.445/2007, define a drenagem e o manejo das águas pluviais urbanas como atividades que englobam infraestrutura e instalações operacionais. Essas atividades incluem o transporte, a detenção ou retenção para amortecimento de vazões de cheias, além do tratamento e disposição final das águas. A legislação também abrange a limpeza e a fiscalização preventiva das redes, incluindo a varrição de logradouros públicos e a desobstrução de dispositivos de drenagem, entre outros serviços.

Apesar de sua importância, os sistemas de drenagem não representam uma solução definitiva para o combate a enchentes, inundações e alagamentos. Frequentemente, são complementados por outras medidas, tanto estruturais quanto não estruturais, que visam aumentar a eficiência e a segurança em relação aos riscos (SUDERHSA, 2002; Pereira & Cunha, 2022).

Nesse sentido, Botelho (2001) analisa os mecanismos de controle de eventos pluviais, ressaltando que as medidas estruturais incluem obras hidráulicas, como barragens, diques e canalização de cursos d'água. Por outro lado, instrumentos legais, como leis de parcelamento, uso e ocupação do solo, e o zoneamento de áreas de risco, além de campanhas educativas, buscam promover a adoção de medidas não estruturais (BRASIL, 1979; 2001; 2012).

Queiroga *et al.* (2023) acrescentam o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação no conjunto de medidas não-estruturais, tratando a ferramenta como um modo de auxiliar comunidades para o desenvolvimento de sistemas de alerta eficientes e respostas mais eficazes, além de servir de base para a elaboração de planos de contingência, auxiliando na redução de vulnerabilidades, assim como na adaptação e no aumento da resiliência urbana.

Segundo o "Marco de Sendai" (UNDRR, 2015; UNISDR, 2017), estabelecido pela ONU em 2015 para orientar as decisões relacionadas à mitigação do risco de desastres naturais e à promoção de medidas resilientes, assim como para redução de perdas e danos aos sistemas humanos e naturais, um sistema de alerta é composto por quatro eixos inter-relacionados: **(i) compreensão do risco**, utilizando, entre outras técnicas, as ferramentas de mapeamento; **(ii) monitoramento e alerta**, visando à previsão e antecipação do evento; **(iii) divulgação e comunicação**, para o amplo acesso à informação; e **(iv) capacidade de resposta**, promovendo a resiliência de infraestruturas novas e antigas.

Os sistemas de alerta fundamentam-se na análise de condições potencialmente adversas por meio da simulação e acompanhamento meteorológico, hidrológico e geológico (Menero *et al.*, 2023). Nesse contexto, os modelos hidrodinâmicos se destacam ao facilitar a implementação de medidas não estruturais, como por exemplo, o zoneamento de áreas de risco e a formulação de políticas de seguro como a praticada nos Estados Unidos e Inglaterra (Tucci, 2005; 2024). A moderna modelagem hidrológica tem provocado uma reconfiguração na simulação de sistemas de drenagem, abrangendo tanto soluções convencionais quanto não convencionais, como técnicas de infiltração e retenção, e incorporando recursos essenciais para o dimensionamento de estruturas hidráulicas (Pimentel, 2015; Queiroga *et al.*, 2023).

Gonçalves (2022) destaca que, nas últimas décadas, a drenagem urbana passou por uma recontextualização conceitual, evoluindo de uma abordagem tradicional, voltada ao controle de enchentes e inundações, para uma perspectiva mais abrangente. Essa nova visão considera aspectos sanitários, ambientais, sociais, paisagísticos e econômicos, refletindo os avanços no entendimento da ecologia dos espaços urbanos. Além do reconhecimento dos diversos benefícios, a gestão das águas pluviais urbanas incorporou um enfoque multidisciplinar, integrando aspectos de engenharia e a gestão do meio ambiente.

Nesse contexto, afloraram estudos sobre as encostas urbanas, apontadas como uma das formas de relevo mais alteradas nas cidades, principalmente em áreas com crescimento acelerado e desordenado (Guerra, 2001). As respostas dadas por esse tipo de forma ocorrem em grau diversificado de intensidade e magnitude, sendo mais nítido, quando se percebem cicatrizes provocadas por grandes movimentos de massa, resultante do uso inadequado do relevo. A segurança das encostas está fundamentalmente relacionada às suas características geomorfológicas intrínsecas, como forma, comprimento, declividade e tipo de cobertura. Além disso, é importante considerar as propriedades químicas e físicas dos solos, bem como o regime e a dinâmica hidrológica local (Santos Filho, 2011).

A probabilidade de ocorrência de um evento extremo em um ano específico é determinada pelo tempo de retorno (T_r), que é calculado com base na série histórica local (Gribbin, 2014). Este conceito é amplamente utilizado no dimensionamento de dispositivos de drenagem e, segundo Veneziani (2014), depende de dois critérios essenciais: a resposta hidromorfodinâmica esperada e a dimensão das obras hidráulicas (Quadro 1). Essas respostas podem variar entre diferentes bacias, dependendo das condições morfométricas e das intervenções antrópicas presentes.

O risco associado a uma determinada vazão ou precipitação extraordinária define a dimensão dos investimentos envolvidos e a segurança diante de episódios desastrosos. Nesse contexto, quantificar o volume de *runoff* em bacias hidrográficas urbanas, especialmente em áreas sujeitas a possíveis ocupações desordenadas, é um processo complexo e dinâmico, sobretudo considerando a variabilidade espacial (Yogi, 2021).

Quadro 1 - Definição do “Tr” conforme parâmetros hidromorfodinâmicos teóricos.

Tempo de retorno (Tr)	Resposta hidromorfodinâmica esperada	Dimensão das obras hidráulicas
Anualmente	O NA atinge e pode superar as margens plenas	Microdrenagem: canaletas e sarjetas.
2 anos	O NA atinge o limite da planície de inundação	Microdrenagem: canaletas, sarjetas, bueiros e bocas de lobo.
5 anos	O NA submerge a planície de inundação e mantém coluna delgada de água	
10 anos	O NA pode atingir o limite do primeiro nível de terraço (se houver)	Microdrenagem: canaletas, sarjetas, bueiros, bocas de lobo e pequenas travessias.
20 anos		Microdrenagem e macrodrenagem: canaletas, sarjetas, bueiros, bocas de lobo, tubulações e travessias.
25 a 50 anos	O NA pode superar o limite do primeiro nível de terraço (se houver) e atingir níveis terraceados superiores.	Macro drenagem: extravasores, travessias, tubulações, canalizações, tamponamentos, retificações e pontes (em áreas rurais).
100 anos	O NA pode superar o limite do primeiro nível de terraço (se houver) e suplantam níveis de terraços superiores.	Macro drenagem: extravasores, vertedouros de grandes reservatórios, travessias, tubulações, canalizações, tamponamentos, retificações e pontes (em áreas urbanas).
200 anos		Macro drenagem: extravasores, vertedouros de grandes reservatórios, travessias, tubulações, canalizações, tamponamentos, retificações e pontes (em áreas urbanas).

Fonte: Veneziani (2014). Adaptação: O autor.

Na Hidrologia, existem dois métodos clássicos para a transformação de chuva em vazão (Munna, 2021). O método racional, aplicável a bacias de até 3 km², é predominantemente utilizado em projetos de microdrenagem. Por outro lado, para áreas mais extensas, destaca-se a teoria do Hidrograma Unitário proposta por Sherman (1932), que possibilita o dimensionamento eficaz de redes pluviais de macrodrenagem (Porto, 1995; Wang, 2012; Gribbin, 2014).

Menezes Filho e Costa (2012) apresentam limites distintos para a aplicação do método racional, sugerindo que sua eficácia é válida para bacias urbanas ou rurais pequenas, com

áreas de até 500 ha (5 km²). Eles indicam que o método pode ser aplicado com segurança para bacias de até 50 ha (0,5 km²). No entanto, ressaltam que existem interpretações divergentes que consideram o limite máximo da área para a aplicação do método como sendo igual a 2 km².

Em todos os casos mencionados, a vazão teórica é derivada de uma chuva crítica de projeto, e um dos principais desafios é a determinação de modelos que representem adequadamente os parâmetros envolvidos (Yogi, 2021). Conforme destacado pela SUDERHSA (2002), as soluções de microdrenagem e macrodrenagem pluvial frequentemente utilizam tempos de retorno (Tr) já estabelecidos na literatura técnica e por consenso internacional, conforme apresentado na Tabela 1. Entretanto, esses valores não dispensam a consideração de outros critérios técnicos, sociais e ambientais que devem ser levados em conta na concepção de projetos, visando aumentar a segurança das obras. É importante ressaltar que o risco aceitável na definição do “Tr” é aquele que indica a probabilidade de a obra colapsar pelo menos uma vez durante sua vida útil (Porto, 1995).

Tabela 1 - Tempo de retorno (Tr) para sistemas de microdrenagem e macrodrenagem pluvial.

Sistema	Característica	“Tr” (anos)	“Tr” recomendado (anos)
Microdrenagem	Residencial	2 - 5	2
	Comercial	2 - 5	2
	Áreas de prédios públicos	2 - 5	2
	Áreas comerciais e avenidas	2 - 10	2
	Aeroporto	5 - 10	5
Macrodrenagem		10 - 50	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas		5 - 100	50

Fonte: Porto (1995); SUDERHSA (2002). Adaptação: O autor.

O método racional é amplamente utilizado para estimar o pico de escoamento em projetos de drenagem de áreas impermeáveis (Guo, 2001). Os princípios fundamentais dessa metodologia assumem que a duração da precipitação máxima é igual ao tempo de concentração da bacia (Gribbin, 2014). Além disso, a relação entre o pico de vazão e a chuva média sobre a área receptora é representada por um coeficiente único de perdas, denominado “C”, que é estimado com base nas características físicas da área de estudo (SUDERHSA, 2002).

Conforme Silveira (2005), o tempo de concentração é um parâmetro hidrológico que surge da hipótese de que a bacia hidrográfica responde como um sistema linear na produção do escoamento superficial direto. Decorre do pressuposto, a definição desse parâmetro como o intervalo necessário para que toda a bacia contribua na seção de saída ou exutório (Gribbin, 2014).

Os estudos de Silveira (2005) consideraram o desempenho de 23 fórmulas de cálculo do tempo de concentração disponíveis na literatura técnico-científica, considerando formulações de uso exclusivo em bacias rurais, urbanas ou recomendadas para ambos os casos, seguido da comparação entre seus comportamentos estatísticos, sobretudo o erro médio percentual de cada fórmula (EM) e o desvio-padrão, ou erro padrão (EP). Com base nas avaliações realizadas pelo autor, definiu-se um ranking com 04 fórmulas para cada situação de bacia hidrográfica, rural e urbana (Tabela 2), reconhecendo a possibilidade de existência de outras formulações com potencial de uso, desde que avaliadas as suas limitações ou processados novos testes de consistência (Yogi, 2021).

O *ranking* das fórmulas do tempo de concentração também aponta que as melhores estimativas ocorreram para as fórmulas elaboradas a partir dos testes em bacias rurais, onde o erro padrão ficou em torno de 20%. Em contrapartida, para bacias urbanas, esse valor aproximou-se de 33%, indicando que as equações para bacias rurais são ligeiramente mais precisas.

Tabela 2 - Ranking das fórmulas do tempo de concentração (tc). Recomendação em função da estimativa do erro médio percentual (EM) e erro padrão (EP).

Fórmula	Ranking	Bacias Rurais (R)			Bacias Urbanas (U)		
		Área (km ²)	EM (%)*	EP (%)**	Área (ha)	EM (%)*	EP (%)**
Corps E. ⁽¹⁾	1R	< 12.000	9	21			
V. Chow ⁽²⁾	2R	< 12.000	-7	19			
Onda Cin. ⁽³⁾	3R	< 12.000	2	20			
Kirpich ⁽⁴⁾	4R, 3U	< 12.000	-9	19	< 2.700	1	39
Carter ⁽⁵⁾	1U				< 1.100	1	40
Schaake <i>et al.</i> ⁽⁶⁾	2U				< 62	-9	30
Desbordes ⁽⁷⁾	4U				< 5.100	11	49

*Melhor desempenho: < 30%; **Satisfatório: < 30%. Fonte: Silveira (2005). Adaptação: O autor.

(1) Corps Engineers..... $tc = 0,191L^{0,76}S^{-0,19}$

(2) Ven te Chow..... $tc = 0,160L^{0,64}S^{-0,32}$

(3) Onda Cinemática.... $tc = 7,35n^{0,6}i^{-0,4}L^{0,6}S^{-0,3}$

(4) Kirpich..... $tc = 0,0663L^{0,77}S^{-0,385}$

(5) Carter..... $tc = 0,0977L^{0,6}S^{-0,3}$

(6) Schaake *et al.*,... $tc = 0,0828L^{0,24}S^{-0,16}A_{imp}^{-0,26}$

(7) Desbordes..... $tc = 0,0869A^{0,3039}S^{-0,3832}A_{imp}^{-0,4523}$

Onde, o tempo de concentração “ t_c ” em horas; área da bacia de contribuição “ A ” em km^2 ; comprimento do canal, talvegue principal ou do percurso hidráulico “ L ” em km; declividade média “ S ” em m/m; fração de área impermeável “ A_{imp} ” variando entre 0 e 1; intensidade da chuva “ i ” em mm/h e; rugosidade “ n ” de Manning.

As fórmulas para o tempo de concentração em bacias urbanas avaliadas por Silveira (2005) apresentaram valores acima da margem satisfatória, o que a princípio confirma a influência da grande complexidade atribuída à dinâmica do escoamento nesse tipo de ambiente. Seguramente, uma análise estatística atenta às características fisiográficas da (micro)bacia em estudo, e o grupo de bacias empregadas na parametrização do modelo, são critérios indispensáveis à validação do tempo de contribuição calculado (McCuen, 1984).

Explorando ainda os métodos de transformação chuva-vazão, é possível classificá-los como diretos e indiretos. Os métodos diretos baseiam-se em fórmulas empíricas e análises estatísticas, enquanto os métodos indiretos possuem uma abordagem dedutiva, fundamentada na consideração da velocidade de escoamento e pressupostos cinemáticos (Wilken, 1978).

De acordo com Wilken (1978), os métodos indiretos nasceram da teoria exposta inicialmente em meados do século XIX, por Emil Kuichling, denominada “teoria racional”, que reconhece como axiomática a relação imediata entre a chuva e o deflúvio, expressa pela Equação 1, dita “equação racional” ou “método racional”.

O autor considera que a equação racional foi assim denominada, por considerar as principais características fisiográficas da bacia contribuinte, tais como sua área, condições de permeabilidade, forma e declividade.

$$Q = CiA \quad (\text{Equação 1})$$

Onde “ Q ” é o caudal que deflui (deflúvio) sobre a superfície, em m^3/s , “ C ” é um coeficiente menor que uma unidade, o qual leva em conta o fato de que somente parte da água precipitada escoar sobre a superfície do solo, “ i ” é a intensidade média de chuva em mm/h e, “ A ” é a área da bacia receptora em hectares.

Essa expressão traduz a concepção básica de que a máxima vazão provocada por uma chuva de intensidade uniforme ocorre quando todas as partes da bacia passam a contribuir para o

canal principal de drenagem. O tempo necessário para que isso ocorra é o próprio tempo de concentração “*t_c*” (Sousa Pinto *et al.*, 1976).

Quanto ao coeficiente de escoamento ou de deflúvio “*C*”, utilizado no método racional (Equação 1), o mesmo depende basicamente das características do solo, da ocupação da bacia, da intensidade da chuva e de outros fatores de menor importância (Porto, 1995). A Tabela 3 apresenta valores de referência para “*C*” em áreas urbanas.

Tabela 3 - Valores de referência para o coeficiente de escoamento “*C*” em áreas urbanas.

Zonas	Faixa de variação do coeficiente “ <i>C</i> ”
Zonas urbanas centrais, densamente construídas, com infraestrutura viária consolidada (pavimento, calçamento e drenagem) e aproximadamente 85% da área total impermeabilizada.	0,70 – 0,95
Zonas urbanas adjacentes ao centro, com menor densidade de construções em relação às zonas centrais, com infraestrutura viária consolidada e aproximadamente 65% da área total impermeabilizada.	0,60 – 0,70
Zonas urbanas residenciais com poucos espaços vazios, com infraestrutura viária consolidada e aproximadamente 38% da área total impermeabilizada.	0,50 – 0,60
Zonas urbanas residenciais, com muitos espaços vazios, com infraestrutura viária rudimentar e pavimento macadamizado e aproximadamente 30% da área total impermeabilizada.	0,25 – 0,50
Zonas periféricas, com pequena densidade de construções convencionais e sem infraestrutura adequada.	0,10 – 0,25
Áreas verdes urbanas ou rurais, parques e campos de esporte, com área pavimentada insignificante.	0,05 – 0,20

Fonte: Wilken (1978); Tucci *et al.* (1995); Nunes *et al.* (2011). Adaptação: O autor.

O fator “*i*” é dado pela relação IDF (Curva Intensidade-Duração-Frequência) para um determinado período de retorno de chuvas intensas, e pode ser ajustada pela Equação 2, na qual a intensidade diminui com o aumento da duração (Wilken, 1978).

$$i = \frac{a \cdot tr^b}{(t+c)^d} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo “*a*”, “*b*”, “*c*” e “*d*” constantes a serem determinadas pelo método dos mínimos quadrados, “*i*” é a intensidade de chuva, em mm/h, “*Tr*” é o período de retorno, em anos e, “*t*” a duração da chuva, em minutos ou horas. Geralmente, o valor de “*t*” é o próprio tempo de concentração “*t_c*” da área contribuinte.

Na literatura técnica, encontram-se diversos critérios e parâmetros empregados no dimensionamento de sistemas de drenagem de águas pluviais. No que diz respeito ao tempo de concentração utiliza-se um intervalo geralmente entre 5 e 10 minutos, sendo mais comum a utilização do limite superior (Gribbin, 2014). Entretanto, é recomendável que esse valor seja determinado sempre que possível com base nas condições específicas do projeto (Wilken, 1978; SUDERHSA, 2002; Tomaz, 2002; Menezes Filho & Ribeiro da Costa, 2012).

De acordo com Pereira *et al.* (2013), as curvas IDF podem ser ajustadas a partir da linearização e uso de regressão múltipla para determinação de seus parâmetros. Os eventos mais raros de chuva, com maior período de retorno, tendem a ter maior intensidade para uma determinada duração. Analogamente, Petrucci & Oliveira (2019), na composição metodológica da relação IDF para a cidade de Uberlândia-MG, após tabulação das ocorrências de precipitações máximas em 24 horas, para todos os anos da série histórica de 1981 a 2015, empregaram a função densidade de probabilidade da distribuição de Gumbel (Extrema Tipo 1), e modelaram os valores extremos de precipitação para distintos períodos de retorno (anos). A distribuição de Gumbel é amplamente empregada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com inúmeras aplicações na determinação de relações IDF e estudos de vazões de enchentes (Naghattini & Pinto, 2007).

Segundo o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU (IPCC, 2023), as perdas e danos disseminados nos sistemas humanos e naturais estão fortemente relacionados a fatores antropogênicos. Estes têm o poder de agravar a frequência, intensidade e/ou duração de eventos extremos, como secas, ondas de calor e inundações. Normalmente, esses fenômenos apresentam uma propensão a exceder a resiliência dos ambientes urbanos, resultando em impactos severos, exigindo medidas de mitigação (redução) e adaptação (processo de ajuste ao clima presente ou futuro e seus efeitos).

O tratamento matemático/estatístico das séries de registros climatológicos (normais climatológicas) permite maior compreensão da frequência dos extremos meteorológicos e o maior alcance das contribuições científicas sobre os impactos resultantes em ambientes urbanos e rurais. Tal fato atribui importância aos estudos sobre a variabilidade das médias históricas de uma dada localidade.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), membro integrante da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e órgão responsável pelo monitoramento climático no Brasil, define o termo “normais climatológicas” como valores médios, de variáveis meteorológicas, calculadas para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas, representando as características médias do clima em um determinado local (OMM, 2017; INMET, 2022). Considerando a magnitude dos desvios positivos ou negativos, em relação à média do período histórico (normal climatológica), torna-se possível inferir sobre a ocorrência de eventos climáticos extremos.

Al-Wagdany (2021) salienta que a construção de curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) é muito importante para a concepção de projetos e gerenciamento de sistemas hídricos e estruturas hidráulicas. No entanto, o acesso aos registros históricos de chuvas de curta duração é pré-requisito para o desenvolvimento matemático/estatístico das equações. Esse método é largamente empregado na estimativa de hietogramas (gráfico da intensidade de chuva ao longo de sua duração), possibilitando a previsão de cheias de projeto, a partir da definição de uma série de precipitação “artificial” (Fragoso Júnior, 2004; Damé, 2010).

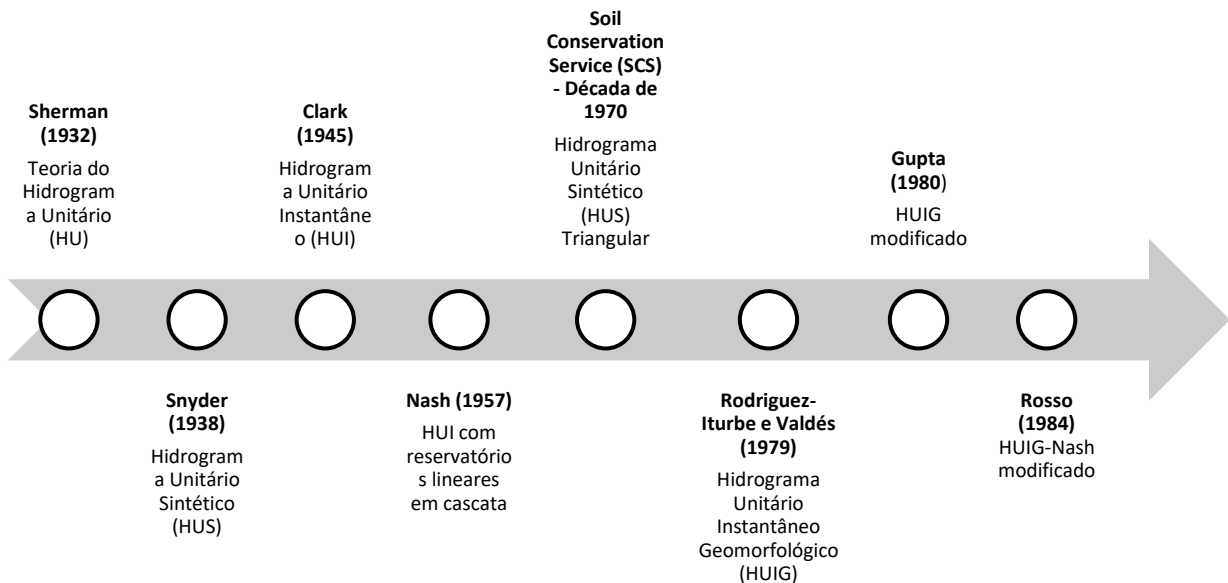
Ferreira (2015) salienta que a determinação de uma chuva hipotética tem forte influência na forma e no valor do pico dos hidrogramas e que há vários métodos citados na literatura para sua determinação, tal como o método de Huff (1967), o método dos blocos alternados (Bemfica *et al.*, 2000), o método de Chicago (Keifer & Chu, 1957), o hidrograma triangular proposto por Yen & Chow (1980), o método de Pilgrim & Cordery (1975).

A estimativa de vazão também pode ser realizada a partir de um evento de precipitação, empregando-se respectivamente os métodos NRCS-CN (CN - *Curve Number*) e NRCS-HUT (HUT – Hidrograma Unitário Triangular), ambos desenvolvidos pelo Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS), antigo Serviço de Conservação do Solo (SCS), agência ligada ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (Tucci, 1995; Grove, Harbor & Engel, 1998; Gribbin, 2014; Lima, 2017).

Wilken (1978) salienta que uma chuva, cuja distribuição espaço-temporal é perfeitamente definida, precipitando sobre uma bacia hidrográfica com fisiografia conhecida, tanto em nível de atributos geomorfológicos e de padrão de cobertura superficial, como de suas condições hidrológicas e climáticas iniciais, pode ser representada por um Hidrograma Unitário (HU), definindo assim sua resposta hidrológica (Gribbin, 2014).

Na literatura, é possível encontrar inúmeras contribuições sobre a teoria do Hidrograma Unitário (Figura 8). No entanto, é necessário ressaltar que a maioria dos ensaios que possibilitaram a definição desses modelos hidrológicos teve como área de estudo as bacias hidrográficas naturais.

Figura 8 - Contribuições teóricas sobre a teoria do Hidrograma Unitário (HU).



Fonte: Bem (2016). Adaptação: O autor.

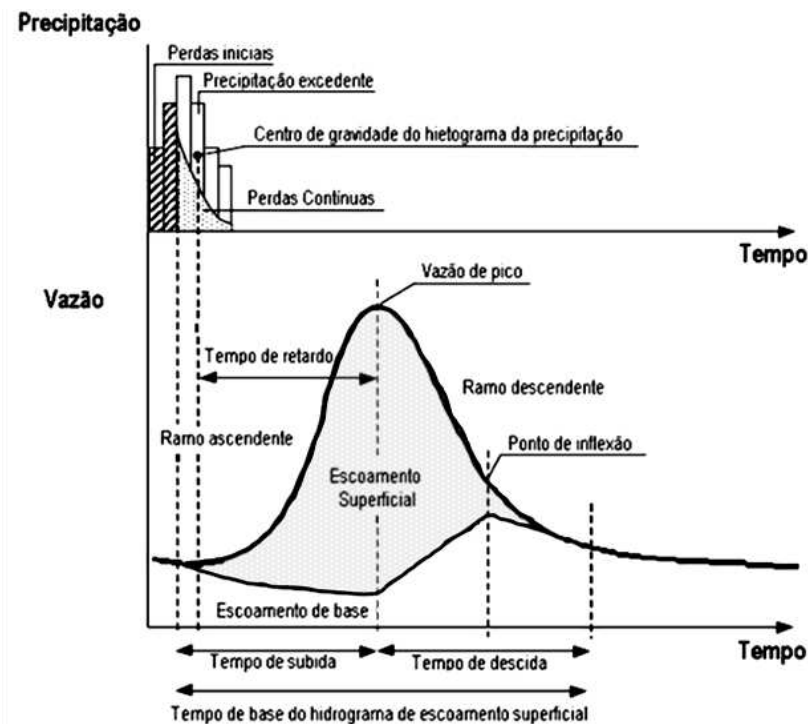
Observa-se que os fatores que determinam um HU podem ser extremamente variáveis, na escala espaço-tempo. Os modelos matemáticos utilizados para sua interpretação podem apresentar relativa complexidade, acompanhados de resultados controversos, o que justifica a constante busca da ciência por métodos que permitam o mapeamento mais detalhado possível dos sistemas de drenagem (Moussa & Bocquillon, 1993).

Logo, deve-se prever nos estudos de bacias urbanizadas, a parametrização sistemática dos modelos e a verificação protocolar dos resultados das simulações de forma a validar as soluções empregadas e viabilizar a representação adequada das condições hidrológicas e geomorfológicas dos espaços urbanizados.

Tucci (1995) resume o Hidrograma Unitário como um elemento capaz de representar a vazão (Q) em função do tempo (t) e como consequência, a área abaixo de sua curva resultante reflete o volume do escoamento superficial direto, causado por uma chuva excedente sobre toda a bacia de drenagem (Figura 9). Com as devidas proporções, o comportamento do Hidrograma

Unitário representa a função hidrológica de uma bacia, ou seja, a capacidade de converter a entrada de um volume concentrado no tempo (precipitação) em uma saída de água (escoamento) de forma mais distribuída.

Figura 9 - Resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica, representada por um Hidrograma Unitário (HU) e do seu correspondente hietograma de precipitação.



Fonte: Tucci (2001); Portela (2006). Adaptação: O autor.

Nesse sentido, sua interpretação requer o conhecimento mínimo sobre o **tempo de concentração**, que representa o espaço temporal necessário para uma gota de água precipitada no ponto mais distante da bacia, deslocar-se até a sua foz (Silveira, 2005); do **tempo de ascensão ou de subida** (ramo ascendente) definido entre o início da produção do escoamento propriamente dito e o pico do hidrograma e; do **tempo de recessão ou de descida** (ramo descendente) que compreende o momento de declínio da vazão até o ponto de inflexão da curva do hidrograma (Tucci, 2001).

Após o início de uma chuva unitária ocorre um **tempo de retardo** até que o escoamento inicie. Esse atraso na resposta da bacia deve-se as perdas iniciais por interceptação da água pela vegetação, retenção por objetos sobre o terreno e armazenamento em depressões superficiais. Em geral o segmento de elevação até o pico do hidrograma apresenta gradiente maior que o trecho de recessão, demonstrando o domínio do escoamento superficial neste

intervalo. A contribuição da vazão subterrânea é influenciada pela camada superior de solo e pelas condições de percolação (Tucci, 2001).

Salienta-se que o fluxo que percorre a seção transversal de um canal após a ocorrência da chuva não provém inteiramente da precipitação, afinal é possível que já exista um escoamento permanente no curso d'água, que se mantém após o término do evento. Assim, podem-se distinguir outras duas componentes fundamentais do hidrograma; o **escoamento de base** e o **escoamento superficial** (Portela, 2006).

Nas últimas décadas, os estudos em áreas urbanas se viram desafiados pela alta heterogeneidade do uso da terra e pelos efeitos adversos da influência humana sobre a dinâmica hidrológica (Mendonça & Christopherson, 2012). Conforme observado por Rodriguez *et al.* (2008), o comportamento hidrológico dessas superfícies não se restringe apenas ao escoamento das águas precipitadas sobre áreas impermeáveis, geralmente interpretado como o principal componente de fluxo nos projetos de engenharia.

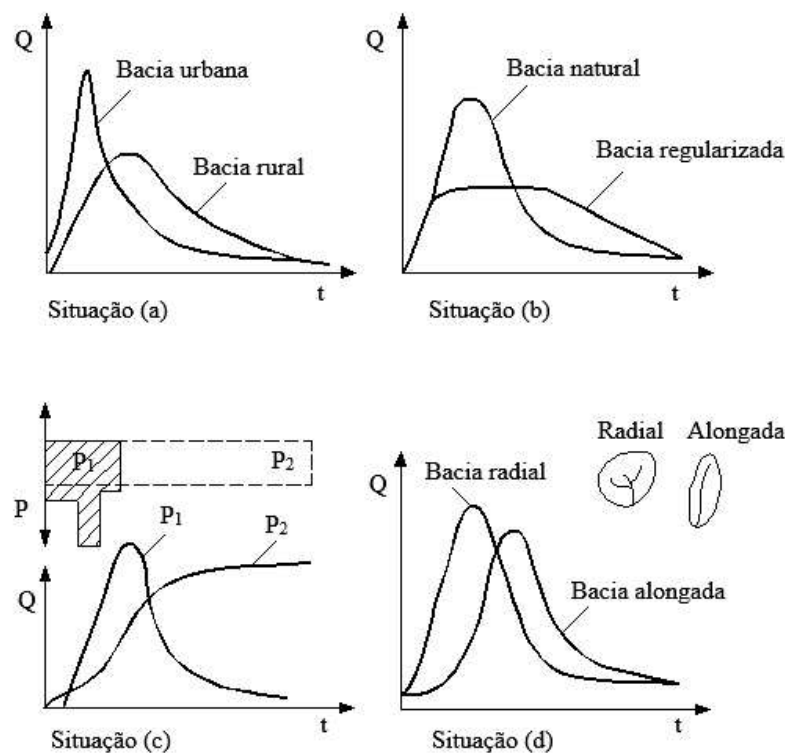
A complexidade das áreas antropizadas é fonte inesgotável de temas para pesquisas focadas no alcance das relações de interdependência entre os elementos hidrológicos das bacias urbanas. O escopo dos estudos acadêmicos tem se concentrado na utilização do Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM) aliado ao SIG para a caracterização do uso da terra e a modelagem de Hidrogramas Unitários Geomorfológicos (HUGs) em bacias urbanas, além do desenvolvimento de metodologias para estimativa dos parâmetros de controle, simulação de chuva, previsão de vazão, comparação entre modelos hidrológicos, análise de redes de drenagem, novos conceitos e aplicações correlatas (Bem, 2016).

De modo geral a literatura contemporânea tem classificado a infraestrutura de águas pluviais urbanas em: cinza, verde e/ou azul. A primeira emprega soluções clássicas compostas por técnicas tradicionais de gerenciamento das águas pluviais tais como a canalização e a retificação dos cursos d'água.

A infraestrutura verde engloba uma variedade de práticas de gerenciamento que preveem a captura, infiltração e redução das águas pluviais, imitando o comportamento de hidrogramas de áreas naturais. A infraestrutura azul, ou verde-azul, pode ser vista como uma solução híbrida que se concentra especificamente no aproveitamento da capacidade de drenagem dos sistemas hídricos (Axelsson *et al.*, 2021).

Tucci (2001) acrescenta que a resposta hidrológica das bacias hidrográficas sofre influência direta de fatores como: a densidade de drenagem, a declividade dos canais, a capacidade de armazenamento subsuperficial, o tipo de uso e de cobertura da terra, obras executadas e/ou intervenções em andamento, dispositivos de drenagem implantados, a intensidade, duração e a distribuição da precipitação, dentre outros elementos modificadores da dinâmica hidrológica (Figura 10 - a; b; c; d).

Figura 10 - Formatos genéricos de Hidrogramas Unitários (HUs) para situações influenciadoras da dinâmica hidrológica. Situação: (a) bacia urbana e rural; (b) bacia natural e com reservatório de regularização; (c) comportamento variável da distribuição, duração e intensidade da chuva e; (d) influência da forma da bacia.



Fonte: Tucci (2001). Adaptação: O autor.

Tucci (2001) destaca que as situações ilustradas na Figura 10 indicam a influência de diversos fatores relevantes que impactam diretamente na resposta hidrológica da bacia. A **situação (a)**, por exemplo, revela o comportamento dos hidrogramas unitários em condições urbanas e rurais, demonstrando claramente a variação no fluxo de água para diferentes tipos de cobertura do solo. Notavelmente, devido à maior impermeabilização das áreas urbanas, o escoamento superficial e o pico de vazão aumentam em um curto período, ultrapassando a capacidade dos dispositivos projetados e dos elementos naturais.

Na **situação (b)**, as alterações artificiais nos canais fluviais, resultantes da construção de reservatórios de regularização ao longo do curso d'água, têm o efeito de amenizar o pico de vazão, retardando a velocidade de escoamento. No entanto, é necessário destacar que tal intervenção pode provocar, através da modificação na distribuição das vazões nos canais naturais, mudanças na garantia de suprimento de água a jusante, causando sensíveis danos aos ecossistemas terrestres e aquáticos interligados. Além disso, há a constante ameaça de ruptura do maciço estabilizador da barragem, seja devido a sobrecarga volumétrica do corpo hídrico ou a patologias estruturais da barragem, como falta de manutenção, defeitos construtivos, entre outros.

A **situação (c)** descreve o comportamento do hidrograma em relação às variáveis de distribuição, duração e intensidade da chuva. Quando a chuva (P1) é constante e abrange extensivamente a bacia, a capacidade de armazenamento e o tempo de concentração são alcançados, seguido pela recessão da curva do hidrograma logo após o término do evento. No entanto, em uma situação momentânea de concentração do evento (P2) na parte inferior da bacia, com subsequente deslocamento em direção à montante, o hidrograma de precipitação pode exibir um padrão anômalo, apresentando "repiques" de vazão (variação).

Em relação à **situação (d)**, destaca-se a influência da forma da bacia na evolução do hidrograma. Observa-se que a bacia do tipo radial tende a concentrar o escoamento superficial, antecipando e aumentando o pico em comparação com a bacia alongada. Esta última, caracterizada pelo fluxo predominante no canal principal, que possui um percurso mais longo, contribui, dessa forma, para a amortização das vazões produzidas.

Embora o aumento nas vazões em curto período de tempo, muitas vezes associado ao escoamento rápido, seja comumente referido como escoamento superficial, essa designação é cientificamente imprecisa. Isso ocorre porque é necessário considerar toda a dinâmica do fenômeno, incluindo os efeitos de infiltração e afloramentos ao longo do percurso do fluxo até o exutório (Silveira, 2001; Gribbin, 2014).

É importante destacar que diversos fenômenos relacionados aos recursos hídricos, especialmente aqueles que envolvem variáveis hidrológicas complexas, estão sujeitos a consideráveis incertezas aleatórias que não podem ser previstas com absoluta precisão. Em geral, esses eventos devem ser caracterizados por um ou mais componentes mensuráveis no

campo (ou em laboratório), de maneira normalizada e sistemática (Naghetini & Portela, 2011).

Nesse contexto, é importante avaliar se os modelos chuva-vazão empregados utilizam parâmetros representativos médios da(s) bacia(s) de estudo (modelos concentrados), o que pode resultar em valores subestimados ou superestimados, ou se incorporam uma série histórica de precipitação real (modelos distribuídos), sendo assim mais fiéis à realidade (Ferreira, 2015).

Rezende & Miguez (2021) salientam que a aplicação dos cálculos de probabilidade de ocorrência de um evento em função de determinado Tempo de Recorrência (T_r) possibilita o conhecimento de cenários de risco. Neste caso, a simulação matemática de eventos hidrológicos pode fornecer informações estratégicas aos programas de gestão de águas pluviais urbanas, a exemplo dos mapas de probabilidade de ocorrência de alagamentos, enchentes e inundações, e subsídios para os estudos de vulnerabilidade social.

Os produtos resultantes da modelagem hidrodinâmica atuam na determinação da hierarquia dos diversos tipos de uso do solo em bacias hidrográficas. Esses resultados podem, por exemplo, propiciar a identificação das áreas mais suscetíveis à ocorrência de eventos trágicos (Rezende & Miguez, 2021).

É imprescindível estabelecer critérios sistemáticos para a extrapolação dos resultados apresentados. Um exemplo disso é o método de Huff, que teve origem em estudos conduzidos em uma região do estado de Illinois (EUA), caracterizada por condições hidroclimatológicas totalmente distintas das regiões tropicais (Tucci, 1995; Pereira *et al.*, 2013).

Nesse aspecto, nota-se que a atual disponibilidade de dados de topografia, tipos de solos, uso e cobertura da terra, especialmente tratados pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), aliada ao constante aprimoramento tecnológico, tem contribuído consideravelmente para o progresso dos modelos computacionais distribuídos. Isso proporciona amplas possibilidades de discretização da bacia em sub-bacias (Lima, 2017).

O Modelo de Gestão de Drenagem Urbana – SWMM, desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (U.S. EPA, 2010), por exemplo, entende que as sub-bacias são unidades hidrológicas do terreno. A topografia e os elementos do sistema de drenagem neste modelo direcionam o escoamento de cada sub-bacia para um ponto de descarga único, conhecido

como nó. Por sua vez, o *software* capacita o usuário a discretizar a área de estudo em um número apropriado de sub-bacias e a designar um ponto de saída (*outlet*) para cada uma delas.

Tung & Wong (2014) enfatizam a preocupação com o uso indiscriminado de um período de registro de dados de chuva finito na análise de frequência, devido à incerteza introduzida por potenciais erros de cálculo. Essa imprecisão pode, por sua vez, influenciar os coeficientes IDF, impactando eventualmente na determinação da quantidade de chuva de projeto e no hietograma adotado. Dado que as características do projeto de drenagem estão intrinsecamente ligadas à chuva projetada, as incertezas podem ser transmitidas ao escoamento correspondente, afetando, como consequência, o dimensionamento da infraestrutura pluvial e a confiabilidade de seu desempenho.

Da mesma forma, é relevante observar que não existem diretrizes universais aplicáveis a todas as cidades, uma vez que cada localidade é afetada por padrões climáticos regionais e sazonais específicos de sua posição geográfica. Mei *et al.* (2020) argumentam que, apesar das incertezas, é importante considerar as simulações numéricas como um meio econômico e viável para a condução de estudos sobre o impacto de chuvas intensas, caracterizadas por diferentes padrões nas inundações urbanas.

Uma defesa semelhante é apresentada por Silveira (2016), que trata o método clássico de Chicago como amplamente utilizado em todo o mundo, apesar de considerar, em sua concepção, o mesmo período de retorno para todo o hietograma. Essa abordagem pode resultar em uma “pequena” superestimação dos dados que pode ser tecnicamente corrigida, por meio de um fator de correção adequado. Vale ressaltar que este método foi originalmente desenvolvido por Keifer & Chu (1957) para ser aplicado no dimensionamento de sistemas de drenagem pluvial em bacias urbanas. Os pesquisadores utilizaram uma bacia hidrográfica na cidade de Chicago, nos Estados Unidos, como área de estudo (Tucci, 1995).

Enquanto existe uma predominância histórica da infraestrutura cinza nas cidades, associada ao uso de materiais de construção manufaturados, por outro lado, temos uma gama de soluções proporcionadas pela infraestrutura verde (*GI - Green Infrastructure*) (Naumann *et al.*, 2011) e pelas melhores práticas de gestão (*BMP - Best Management Practice*) de ecossistemas. Isso inclui iniciativas como empreendimentos de baixo impacto (*LID - Low Impact Development*), sistemas de drenagem sustentável (*SUD's - Sustainable Urban Drainage Systems*) e o desenho urbano sensível à água (*WSUD - Water sensitive urban*

design), entre outros (Yu *et al.*, 2006; Bacchin *et al.*, 2013; Fletcher *et al.*, 2015; Ruangpan *et al.*, 2020). Conceitos como biorretenções (Young *et al.*, 2011, Alves *et al.*, 2018) são cada vez mais incorporados aos estudos sobre os impactos da infraestrutura cinza, visando contribuir para uma maior resiliência dos ecossistemas urbanos e possibilitar a restauração do ciclo da água nesses ambientes (Bacchin *et al.*, 2013; Ruangpan *et al.*, 2020).

Em síntese, a avaliação da capacidade hidráulica dos sistemas de drenagem assume uma importância crescente nos dias atuais, especialmente diante dos cenários de desenvolvimento urbano e dos possíveis aumentos de chuvas intensas associados às mudanças climáticas (IPCC, 2023).

Entretanto, é essencial reconhecer que a implementação de sistemas sustentáveis é uma tarefa complexa, demandando uma análise holística de diversas variáveis dentre elas a compartimentação fisiográfica da paisagem (Corrêa, 2013) que impacta diretamente a capacidade desses sistemas em atender ao nível de serviço necessário (Berggren *et al.*, 2014).

A abordagem proposta por Rentachintala *et al.* (2022) ressalta a importância de reexaminar os paradigmas da drenagem urbana à luz das mudanças climáticas. Essa revisão deve abranger análises de incerteza em eventos hidrológicos extremos e considerações econômicas. Os modelos preditivos devem ser embasados em dados realistas de longo prazo, enquanto o uso de tecnologias como internet das coisas, *Artificial Intelligence* (AI) e *Machine Learning* (ML) se mostra necessário para o monitoramento dos eventos em tempo real. Além disso, é imperativo explorar o reaproveitamento de águas pluviais para uso potável em larga escala, especialmente em espaços públicos urbanos (Houser *et al.*, 2022; Rane, 2024).

No contexto das políticas públicas brasileiras, o Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades - Brasil (IDSC-BR) constitui uma ferramenta que pode auxiliar na orientação dos gestores. Desenvolvido como uma iniciativa da sociedade civil de interesse público, o IDSC-BR é fundamentado na agenda de sustentabilidade urbana estabelecida pelas Nações Unidas, que por sua vez, integra dimensões sociais, ambientais, econômicas, políticas e culturais no planejamento municipal, norteadas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas. A pontuação gerada pelos critérios de cálculo do IDSC-BR permite classificar os municípios conforme seu nível de desenvolvimento sustentável em diversos aspectos, incluindo o saneamento ambiental (Ziliotto *et al.*, 2024).

Nesse aspecto, a captação e reutilização de água da chuva (RWH - *Rainwater Harvesting*) se posicionam dentre as melhores práticas de gestão (BMP) e fazem parte do conjunto de estratégias conhecidas como LID (*Low Impact Development*) ou SuDS (*Sustainable Drainage Systems*), dependendo do país. As vantagens dessa prática ainda são subestimadas, sobretudo no âmbito dos ODS.

No futuro, essa prática deve não apenas incluir diretrizes técnicas e ambientais, mas também fontes de apoio econômico e social para sua viabilização (Raimondi *et al.*, 2023). A efetivação de ações políticas e planos de adaptação ocorre de forma simultânea à acumulação de experiências (Moser & Ekstrom, 2010). Essa observação ressalta a importância de aprender com situações adversas para promover um planejamento mais robusto e adaptável às condições climáticas, evidenciando a necessidade de uma abordagem mais proativa e integrada na gestão da drenagem urbana por exemplo.

Nesse contexto, o termo planejamento, frequentemente mencionado até aqui, deve ser compreendido como uma sequência de critérios e diretrizes no extenso rol dos processos de gerenciamento de projetos. Essa sequência engloba a identificação inicial das necessidades; a fase de estudo das ações, que, por sua vez, envolve a definição do escopo, a formação da equipe de trabalho, o cronograma, a identificação dos caminhos críticos e a estimativa dos custos. De forma contínua, segue a etapa de execução, gerenciamento, monitoramento e controle integrado; culminando na fase de entrega e operação. Em suma, trata-se de uma abordagem que exige a capacitação de profissionais e o rigoroso comprometimento com o que foi idealizado, subordinado a condicionantes, regras e boas práticas cuidadosamente definidas (Paes, 2014; ABNT, 2021).

1.3 Planejamento e Gestão do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas

O regime global de chuvas é marcado por escalas espaciais e temporais, e por séries de dados de ampla aleatoriedade. Enquanto em algumas partes do mundo há condições climáticas essencialmente úmidas, em outras predominam extensos desertos. Contudo, a chuva é apenas um aspecto do ciclo dinâmico da água que opera na Terra e constitui um produto final de um complexo sistema.

O comportamento do tempo e do clima resulta das interações ocorridas na interface multiespectral que permuta e modifica a radiação solar através do meio terrestre, envolvendo a litosfera, a hidrosfera, a criosfera (Fairbridge, 1968b) e a biosfera, repercutindo, particularmente, no estado da atmosfera (Ribeiro, 1993). O estudo desse processo e do comportamento das variáveis que compõem o ciclo hidrológico constitui a ciência da Hidrologia (Bowen, 1982).

O escoamento superficial é uma fase desse extenso ciclo e compreende a ocorrência, o movimento e o direcionamento da água sobre as formas de relevo. Esse fenômeno está submetido, constantemente, as forças universais da gravidade e atrito (Veneziani, 2014). Horton (1933) concluiu que esse processo depende também, intrinsecamente, da taxa máxima de impermeabilização do material constituinte de uma dada superfície.

Durante as chuvas intensas, a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, que é governada pela proporção de área superficial impermeabilizada (princípio do escoamento superficial hortoniano) ou pelo teor de saturação do solo.

Mendiondo & Tucci (1997) enfatizam a natureza empírica dos postulados de Horton e a importância inicial de seus estudos para os avanços da Hidrologia Básica, especialmente para o entendimento sistêmico do escoamento superficial. No entanto, ressaltam que os trabalhos de Hewlett, Hibbert & Weyman, nas décadas de 1960 e 1970, também conferem grande relevância à produção de escoamento superficial em condições de saturação da superfície, em contraste com o escoamento hortoniano.

Hallema *et al.* (2016), afirmam que a reunião dos atributos morfológicos (concavidade, convexidade e retinidade), morfométricos (extensão e declividade) e padrão de drenagem, definem a dinâmica da chamada conectividade hidrológica das vertentes. Tais qualidades são responsáveis pelo fornecimento de importantes serviços ecossistêmicos às bacias

hidrográficas, tais como o controle de processos erosivos e a regulação do escoamento rápido (superficial) e lento (subterrâneo), por meio dos processos de captação, absorção e liberação gradativa da água.

As intervenções antropogênicas sobre a paisagem, que de certo modo desconsideram as características ambientais antecessoras, podem contribuir sensivelmente para a desestabilização dos componentes hidrológicos do meio, refletindo em alterações do movimento de matéria e energia dos sistemas ambientais, demandando como consequência, um maior esforço e tempo da natureza para um novo reequilíbrio dinâmico.

A gestão inadequada dos territórios, aliada à constante prática de remediação, é evidenciada após eventos pluviiais severos, quando os fluxos superficiais afetam o ciclo hidrológico e a capacidade hidráulica dos elementos de drenagem, resultando em colapsos sistemáticos que comprometem a funcionalidade do espaço urbano (Rocha & Ribeiro, 2018).

As intervenções predatórias sobre o relevo com a substituição das formas naturais por elementos artificiais provocam perturbações do ciclo hidrológico que, por sua vez, afetam os processos hidromorfodinâmicos, sobretudo das encostas e dos vales fluviais em regiões tropicais, onde a dinâmica da circulação da água (em superfície, subsuperfície e na atmosfera) é mais intensa (Moroz-Caccia Gouveia & Rodrigues, 2017).

Coelho Netto (1998) reconhece que a água constitui um dos elementos físicos mais importantes da composição da paisagem terrestre, pois interliga os fenômenos da atmosfera inferior e da litosfera. Assim, o ciclo da água interfere diretamente na vida vegetal, animal e humana, a partir da interação entre os elementos de uma dada cadeia ecossistêmica (Oliveira, 2018).

Aranha & Souza (2015), ao analisarem o processo de ensino-aprendizagem relacionado à Ciência Geomorfológica, elaboraram um mapa conceitual focalizado no papel da água em ambientes tropicais, considerando-a como um agente fundamental que integra diversos processos geomorfológicos. Utilizando a teoria de “aprendizagem significativa e uso do mapa conceitual” de David Ausubel (1968), os autores basearam-se em estudos específicos sobre a ação da água nos processos modeladores do relevo em domínios tropicais, referenciando trabalhos como Christofolletti (1972, 1980, 1981), Coelho Netto (1998), Guerra (1998, 1999), Tucci (2001), e Suertegaray (1997, 2008).

Ao explorar os estudos consultados, emergiram temáticas recorrentes que abrangem os processos, as formas de relevo e as interações. Notavelmente, em relação aos "processos hídricos" ou hidrológicos, Aranha & Souza (2015) destacam a importância dos processos típicos em áreas rurais, atribuindo-a à influência da cobertura vegetal. No entanto, observa-se a necessidade de incluir também a dinâmica geomorfológica dos ambientes urbanos, especialmente os processos que demandam interpretações da Geomorfologia Urbana, como o Escoamento Superficial Direto (ESD).

De acordo com Porto (2001), as alterações no regime hidrológico representam uma das consequências mais imediatas do processo de urbanização. Nessas circunstâncias, o volume escoado é predominantemente influenciado pelas características pedológicas, pelos padrões de uso e ocupação do solo, e pela morfometria das encostas (Leopold, 1968).

Conforme Jorge (2011), a discussão sobre as paisagens urbanas modificadas suscita reflexões em dois aspectos: o primeiro refere-se ao papel do geomorfólogo e de outros profissionais, os quais, apesar de compartilharem o mesmo objeto de estudo, exploram o contexto de maneiras distintas; o segundo aspecto está relacionado à extensão do terreno que a Geomorfologia Urbana pode abranger. É fundamental para esse subcampo ampliar sua abordagem teórico-conceitual e metodológica a fim de proporcionar contribuições efetivas aos estudos ambientais urbanos.

Espinosa *et al.* (2018) propõem uma revisão da geomorfologia fluvial e do desenho urbano da cidade, buscando uma aproximação interdisciplinar entre essas duas disciplinas. O objetivo é utilizar a morfometria urbana como uma ferramenta orientadora para um processo de urbanização mais equilibrado e recalibrado. Os autores sugerem que um projeto com soluções urbanas interdisciplinares pode redefinir e recuperar a rugosidade do terreno, a permeabilidade e as funções naturais dos sistemas fluviais urbanos. Esse cenário também contribuiria para fortalecer o diálogo entre a universidade, comunidade, empresas, governo e outros atores envolvidos.

Sobre a morfometria das encostas ou a Geomorfometria propriamente dita, Pike *et al.* (2009), esclarece que se trata de uma ciência voltada a análise quantitativa da superfície terrestre e que nos últimos anos desenvolveu uma abordagem moderna, analítico-cartográfica, para representar a topografia do relevo pela manipulação e interpretação digital das variações planialtimétricas do terreno.

As antigas práticas da Cartografia Geomorfológica, que empregavam técnicas de interpretação visual de imagens impressas e critérios manuais para delimitar unidades morfológicas homogêneas, foram amplamente substituídas por métodos digitais de extração de dados. Isso inclui o uso de sensoriamento remoto, Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e outras geotecnologias (Souza *et al.*, 2004; Ferreira, 2005; Souza, 2006; Ross & Moroz-Caccia Gouveia, 2022).

Wang *et al.* (2015) exemplifica claramente a tendência da Geomorfometria contemporânea por meio de um estudo com emprego da modelagem digital aplicada a transformação topográfica de Cingapura, com base em Modelos Digitais de Elevação (MDEs). O trabalho permitiu a quantificação das alterações topográficas de áreas naturais e também, daquelas tipicamente associadas ao processo de urbanização. Além da previsão e avaliação de processos geomorfológicos, a modelagem topográfica pode fornecer pistas sobre a cultura, tecnologia e organização sociopolítica das gerações passadas e dizer o quanto as formas de relevo foram afetadas (Hesse, 2014).

A Geomorfometria detalhada de ambientes urbanos tem ampliado o debate, especialmente sobre a influência das formas urbanas na dinâmica do escoamento superficial de vertentes antropizadas (Bruwier *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021). Entre os principais desafios da modelagem de chuva-escoamento nesses ambientes, destaca-se a complexa interação entre o sistema de drenagem, a superfície terrestre e a heterogeneidade espacial das formas urbanas.

A geometria e a disposição das construções sobre o relevo têm um impacto direto nas direções preferenciais do fluxo superficial, criando verdadeiros obstáculos (Leandro *et al.*, 2016). Entre os parâmetros geométricos, como destacado por Bruwier *et al.* (2020), estão variáveis como largura, comprimento, curvatura, rugosidade (microdepressões superficiais) e orientação das vias, além do tamanho e da distância entre as edificações.

Nesse contexto, é possível afirmar que os estudos sobre o comportamento do escoamento superficial em áreas urbanas são de extrema relevância. Destaca-se a importância de abordar a complexidade da dinâmica dos fluxos difusos, especialmente condicionados pelos padrões da topografia de detalhe da paisagem urbana, bem como pelas formas geometricamente projetadas, em áreas parceladas ou em processo de parcelamento do solo.

A ênfase dada à compreensão dos mecanismos de escoamento e da trajetória das águas pluviais sobre a superfície possibilita expandir a análise para variáveis que influenciam a

qualidade do ambiente urbano. Isso inclui considerações sobre processos erosivos desencadeados pela velocidade excessiva do escoamento sobre a superfície intrincada do traçado viário, quadras, edificações, dispositivos de drenagem e a própria qualidade dos recursos hídricos, que é impactada pela poluição difusa (Baptista & Nascimento, 2002).

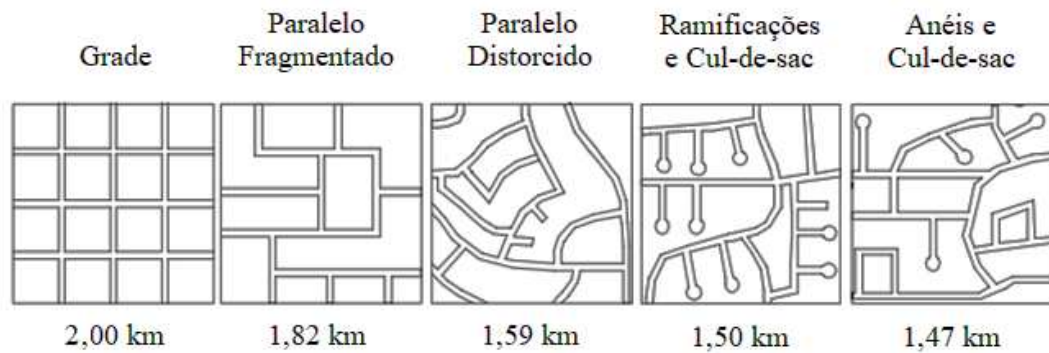
O *layout* das vias urbanas exerce influência no total de áreas impermeáveis, assim como no planejamento da drenagem local. A configuração das ruas segue a proposta do desenho ou projeto do sistema viário, e a escolha de alternativas devidamente interconectadas ao perfil topográfico do terreno pode contribuir para mitigar os danos ambientais causados por esse tipo de intervenção (Tavanti, 2009; Andrade & Blumenschein, 2013).

Nesse contexto, Cabanek *et al.* (2020) apresentam o termo “urbanismo biofílico”, explorado por Beatley (2010) na obra sobre cidades biofílicas, a qual demonstra aspectos da integração entre a natureza e o desenho urbano. O conceito abrange não apenas a concepção das formas urbanas, mas também o planejamento integrado entre os elementos naturais e artificiais, potencializando a transformação de espaços urbanos estéreis em locais restauradores e propícios à vida.

Com base nas experiências de lugares biofílicos e seus benefícios, Cabanek *et al.* (2020) propõem seis categorias a serem consideradas na definição de uma rua biofílica. Essas categorias abarcam o planejamento do tráfego, o conforto do ambiente, o manejo das águas pluviais, a gestão da biodiversidade, o mobiliário urbano e os valores socioculturais locais, considerando suas funções, objetivos, elementos e características do traçado.

Entretanto, é comum observar o dimensionamento excessivo de ruas residenciais, com larguras que ultrapassam o necessário, resultando em um aumento desnecessário das áreas impermeáveis. As vias poderiam ser projetadas com uma largura mínima adequada para a instalação das faixas de circulação, espaços de estacionamento, acesso de veículos de emergência e funcionamento de serviços públicos, dentre outros elementos mencionados por Cabanek *et al.* (2020). Essa abordagem visa à redução das áreas impermeáveis contribuindo para uma drenagem mais resiliente (DEEP, 2004). Assim, tanto a extensão quanto a impermeabilidade total das ruas podem ser reduzidas com a prática de desenhos urbanos mais integrados às variáveis do meio ambiente local (Mascaró, 2005). A Figura 11 ilustra como *layouts* viários alternativos podem diminuir as superfícies impermeáveis em até 26% (MDE, 1999; DEEP, 2004).

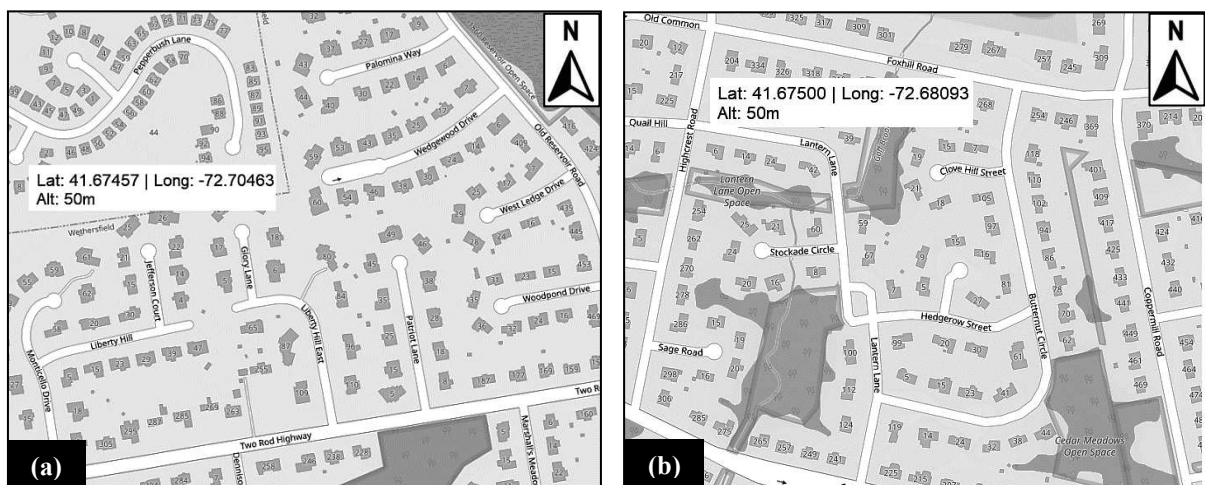
Figura 11 - Extensão aproximada em quilômetros, para ruas com diferentes opções de *layout*.



Fonte: Adaptado de Maryland Department of Environmental Resources - MDE (1999); DEEP (2004).
Organização: O autor.

Loteamentos em grade tendem a ter comprimentos gerais de ruas relativamente maiores. Entretanto, nenhum *layout* pode ser considerado único ou totalmente apropriado para todos os empreendimentos residenciais, pois o desenho das vias urbanas é especialmente dependente da topografia local, da densidade e do volume de tráfego previsto e, da proposta do loteamento. Notadamente, as áreas residenciais com baixo volume de tráfego e topografia favorável podem oferecer maior flexibilidade na concepção do projeto (DEEP, 2004). No Estado Americano de Connecticut, por exemplo, boa parte dos setores residenciais utilizam configurações do tipo “Ramificações e *Cul-de-sac*” e “Anéis e *Cul-de-sac*” (Figura 12). De acordo com o *Department of Energy & Environmental Protection* de Connecticut, esses modelos priorizam a acomodação mais harmônica das ruas levando-se em conta as características naturais do local (DEEP, 2004).

Figura 12 - Exemplares do desenho urbano de setores residenciais no Estado Americano de Connecticut. Layout (a) configurações do tipo “Ramificações e *Cul-de-sac*”; (b) “Anéis e *Cul-de-sac*”.



Fonte: *Esri - OpenStreetMap*. Catálogo INPE (2023). Organização: O autor.

Outra questão refere-se ao uso de valas de escoamento ou canais abertos com vegetação em ruas residenciais, estacionamentos e quintais em detrimento dos sistemas convencionais de drenagem pluvial. Essas soluções contribuem para o aumento da permeabilidade das áreas parceladas, bem como a recarga de águas subterrâneas e a redução do fluxo de escoamento. Além dos benefícios elencados, esses sistemas também são mais baratos do que os sistemas convencionais de drenagem pluvial (MDE, 1999; DEEP, 2004; Tavanti, 2009; Andrade & Blumenschein, 2013).

Em muitas situações, os ordenamentos legais e normativos desencorajam ou até mesmo, proíbem o uso de canais com vegetação aberta para drenagem marginal das ruas sob a justificativa de precauções quanto a proliferação de insetos, odores desagradáveis, custos elevados de manutenção, instabilidade estrutural do pavimento, entre outros argumentos frequentes. Entretanto, uma quebra de paradigma requer inicialmente, investimentos em educação ambiental, capacitação e conscientização de gestores públicos e cidadãos.

Sobre esse aspecto, Arnold Jr. & Gibbons (1996) salientam que os problemas de escoamento das águas pluviais não são uma novidade para os gestores públicos. É notório que ao se intensificar a ocupação urbana numa bacia hidrográfica, a impermeabilização generalizada, proporcionada pelas edificações, lotes e vias de circulação, desequilibrem consideravelmente a dinâmica natural do ciclo hidrológico, favorecendo a aceleração dos fluxos superficiais, reduzindo o tempo de concentração de água na bacia, antecipando a vazão de pico e potencializando catástrofes hidrometeorológicas (Rodrigues & Moroz-Caccia Gouveia, 2013). Entretanto, a principal preocupação do poder público, sempre esteve condicionada a retirada da água da chuva das superfícies pavimentadas, direcionando e esgotando o mais ágil e eficientemente possível, de tal modo que uma vez esgotada e fora do sistema viário, ficaria em grande parte, fora da mente dos cidadãos também.

De acordo com Leal Filho *et al.* (2019), apesar dos esforços globais para um futuro mais sustentável das cidades, notadamente nas últimas décadas, sobretudo nos compromissos assumidos na Agenda 2030 para Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS (ONU, 2015); no Acordo de Paris sobre as Mudanças Climáticas (UNFCCC, 2020) e; na Nova Agenda Urbana (ONU, 2016), os empenhos observados ainda são muito tímidos e aquém da abordagem holística que o tema exige (Younos, 2011), especialmente quando se trata da vulnerabilidade sistêmica, do mapeamento de riscos e dos impactos socioambientais causados por eventos hidrológicos extremos (Farias, 2019).

Neste contexto, salienta-se a importância do compromisso para maiores esforços no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos pela ONU (ONU, 2015), notadamente o ODS 6 que visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento; o ODS 11 que foca na promoção de cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis e; o ODS 13 que aponta para a ação climática e a adoção de medidas urgentes de confronto das alterações do clima e seus impactos. Para alcançar tais metas, as soluções baseadas na natureza configuram-se como premente necessidade dos ambientes urbanos (Gobatti & Coelho Leite, 2022).

A ideia sobre riscos acompanha desde sempre a história da humanidade. As ciências cindínicas ou ciências do perigo, nascidas no último quarto do século XX e desde então em pleno crescimento, buscam enquadrar essa problemática associada ao estudo sistêmico e holístico dos riscos considerando a sua origem: natural, antrópica ou mista.

No princípio eram condicionados exclusivamente a fenômenos hidrológicos (inundações fluviais), climatológicos (ondas de frio e calor), meteorológicos (tempestades tropicais ou extratropicais e tornados) ou geofísicos (atividades sísmicas, erupções vulcânicas e tsunamis). Os escorregamentos de encostas e avalanches também geram desastres, mas dependendo do autor, são classificados como geofísico ou hidrometeorológico. Pouco a pouco, além desses, surgiram novos elementos de análise vinculados às atividades antrópicas, associados ou não a componentes naturais e nesse ínterim, os estudos sobre riscos reuniram também, elementos socioeconômicos e tecnológicos que juntos interagem em um complexo universo de variáveis (Rebelo, 2003; Hidalgo Nunes, 2013; Lourenço & Amaro, 2018).

Em resumo, mesmo que exista uma ampla gama de fatores naturais capazes de ameaçar os diversos ecossistemas planetários, essa situação não se limita apenas ao processo em si (vulnerabilidade natural). Inclui também as consequências dos sistemas humanos e suas vulnerabilidades relacionadas (vulnerabilidade social). Quando ambas as formas de vulnerabilidade coincidem nas mesmas coordenadas espaciais e temporais, há uma propensão para a ocorrência de desastres naturais (Alcántara-Ayala, 2002).

Ao considerar a dinâmica sistêmica do ambiente urbano, podem ser observados diversos problemas resultantes da interação entre as variáveis que compõem esse imbricado ecossistema (Oliveira, 2018), dentre eles os riscos socioambientais relacionados aos desastres

naturais que, devido à recorrência e à amplitude dos eventos, demandam cada vez mais o envolvimento do poder público e da população.

A dinâmica do fluxo superficial vinculada ao direcionamento preferencial provocado pelo arruamento, por exemplo, é raramente considerada nas soluções de drenagem pluvial urbana, em função da ausência de informações técnicas elementares (Rodriguez *et al.*, 2003). Atualmente, a representação hidrológica de bacias hidrográficas com a utilização de informações processadas por Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) tornou-se ferramenta indispensável à captura, gerência, análise e exibição de dados geográficos com maior representatividade espacial e temporal para suporte das tarefas de modelagem (Bem, 2016), entretanto, pouquíssimas cidades dispõem desse recurso em suas ações de planejamento e gestão do espaço urbano.

Ao explorar os SIGs e a aplicação do mapeamento do uso e ocupação do solo urbano como ferramentas de diagnóstico para avaliar a extensão de áreas impermeáveis associadas a diferentes tipos de pavimentação, torna-se possível fazer inferências mais precisas sobre o papel e a influência das superfícies impermeáveis na geração de escoamento superficial. A partir desse entendimento, torna-se viável implementar estratégias para reduzir os níveis de impermeabilidade tanto nas condições presentes quanto nas futuras.

Arnold Jr. & Gibbons (1996) propõem que essas estratégias possam ser categorizadas em três principais grupos: (i) planejamento abrangente no nível ecossistêmico urbano (conforme discutido por Oliveira, 2018); (ii) planejamento em nível local ou de bairro; e (iii) regulamentação das práticas urbanas com base no zoneamento do desempenho relacionado à impermeabilidade. Cada uma dessas abordagens apresenta potenciais distintos para reduzir as fontes de poluição difusa e salvaguardar os recursos hídricos urbanos (Tucci, 2005).

Destaca-se que a categorização proposta por Arnold Jr. & Gibbons (1996) não simplifica a complexidade do extenso conjunto de variáveis envolvidas no contexto do escoamento superficial. Atualmente, percebe-se que abordar problemas complexos, dependentes de múltiplos critérios geograficamente inter-relacionados, tem sido facilitado pela aplicação de SIGs, notadamente devido à sua eficácia na gestão de extensos bancos de dados (Fernández & Lutz, 2010; Birgani & Azdandoost, 2018).

A integração entre SIGs e os métodos de decisão multicritério (MCDM – *Multi-Criteria Decision Analysis*), por exemplo, atraiu nas últimas décadas sensível interesse de

pesquisadores e gestores públicos, sobretudo o seu uso como suporte das tarefas de planejamento, ordenamento e gestão espacial do território (Malczewski, 2006; Stefanidis & Stathis, 2013).

Uma amostra do modelo MCDM, largamente empregado nos estudos de vulnerabilidade ambiental (Pinese Júnior & Rodrigues, 2012; Rezende *et al.*, 2017) é o Processo Analítico Hierárquico - AHP (*Analytic Hierarchy Process*), desenvolvido por Saaty (1977; 1990). Composta por níveis ou classes de importância, essa técnica permite a elaboração de bases cartográficas que oferecem uma visão global das relações inerentes ao processo explorado, a exemplo do escoamento superficial, alagamentos e inundações em áreas urbanas.

A impermeabilização do solo é um fenômeno característico das áreas urbanas, relevante para os estudos sobre a dinâmica do escoamento superficial das águas pluviais urbanas (Leal *et al.*, 2018; Du *et al.*, 2019; Tate *et al.*, 2021). A Região Metropolitana de São Paulo, identificada pela ONU (2018) como o quarto maior aglomerado urbano do mundo, exemplifica essa situação. Sua área urbanizada abrange 57% do território do município (SMUL, 2023), e o sistema viário é predominantemente impermeabilizado (SNIS, 2021).

Conforme destacado no Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU (IPCC, 2023), o reflexo desse cenário é o acentuado aumento dos riscos de inundações. Esse aumento é potencializado pela intensificação das atividades antrópicas predatórias e pela ocupação desordenada do solo.

Hegarty *et al.* (2021) no trabalho sobre a aplicação da metodologia da ciência cidadã (Bonney *et al.*, 2009), e durante o processo de investigação da qualidade da água ao longo do rio Liffey, na cidade de Dublin, Irlanda, com a ajuda de cientistas cidadãos, incluindo a própria comunidade de usuários do rio, constatou, além dos efeitos catastróficos associados a dificuldade de retenção e infiltração das águas de chuva na área de estudo, os impactos do efluente conduzido pelos dispositivos de drenagem sobre a qualidade da água do rio.

A prática de envolver cientistas não profissionais na pesquisa científica e na coleta de dados tornou-se amplamente difundida na última década (Follett & Strezov, 2015). Essa abordagem tem se mostrado altamente proveitosa, sobretudo na identificação de locais de poluição urbana, pontos de erosão, inundações, alagamentos e outros problemas de ordem socioambiental. A própria ONU reconhece o potencial da ciência cidadã em fortalecer a base de conhecimento que impulsiona o avanço em direção aos Objetivos de Desenvolvimento

Sustentável (ODS). Essa abordagem amplia a frequência e a abrangência geográfica dos dados disponíveis, otimiza a utilização do conhecimento local e promove a educação da sociedade (UN ENVIRONMENT, 2019).

O uso de dispositivos móveis e o acesso à Internet são uma realidade cotidiana atual para os indivíduos, possibilitando que até mesmo pessoas sem formação específica em cartografia contribuam para a criação de mapas (Bravo, 2014; Bravo & Sluter, 2018; 2022). Este conceito abarca uma vasta gama de possibilidades, que incluem desde o *crowdsourcing* (colaboração coletiva) através de plataformas online até a coleta de dados de forma relativamente passiva (Venkatesh & Velkennedy, 2023; Souza & Rodrigues, 2024). No campo dos estudos hidrológicos e no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), essa abordagem pode contribuir para a obtenção de conhecimentos sobre a biodiversidade urbana e a saúde de seus ecossistemas aquáticos e terrestres.

Assim, a ciência cidadã emerge como uma ferramenta a ser reconhecida e valorizada no campo da Geografia e da Geomorfologia Urbana (Souza & Rodrigues, 2024), promovendo uma compreensão mais profunda dos desafios ambientais das cidades. Essa abordagem inovadora desafia paradigmas tradicionais ao fomentar um maior envolvimento e capacitação da comunidade local. Isso possibilita uma visão mais completa e integrada da dinâmica dos espaços urbanos, abrindo caminho para soluções sustentáveis.

Um exemplo de cenário desafiador são as inundações severas e a degradação da qualidade da água na China, onde as mudanças climáticas e a rápida urbanização têm desencadeado uma série de desafios, incluindo a deterioração dos recursos hídricos (Zinda *et al.*, 2018). Isso ocorre principalmente devido à substituição contínua de áreas de drenagem natural e de retenção/infiltração por estruturas artificialmente construídas e impermeáveis (Rocha & Ribeiro, 2018; Han & He, 2021).

A localização geográfica dos centros urbanos e a situação precária dos assentamentos informais, onde os investimentos governamentais em soluções de drenagem são frequentemente insuficientes, contribuem para agravar a situação. Em muitos países em desenvolvimento, principalmente na Ásia e na África, as inundações resultam em danos sociais e frequentes perdas humanas, enquanto os países desenvolvidos da Europa e América do Norte enfrentam principalmente perdas econômicas (Piadeh *et al.*, 2022).

A integração da ciência cidadã nesse contexto surge como uma abordagem promissora, possibilitando respostas mais ágeis das comunidades afetadas, o aprimoramento de sistemas de alerta precoce e a construção de um banco de dados mais robusto. Essas informações são essenciais para orientar o planejamento urbano e o desenvolvimento de infraestruturas mais resilientes (Souza & Rodrigues, 2024).

Segundo Chan *et al.* (2018), mais de 150 cidades na China enfrentaram sérias inundações nos últimos anos, resultando em perdas de vidas e prejuízos econômicos. Em resposta, especialmente a partir de 2014, o Governo Nacional Chinês introduziu o conceito de "Cidade Esponja" e propôs financiar projetos de demonstração desse modelo em trinta cidades piloto em todo o país, incluindo megacidades como Pequim, Xangai, Tianjin e Shenzhen (Jiang *et al.*, 2017).

A iniciativa visa promover o desenvolvimento de baixo impacto integrado ao planejamento urbano, com o objetivo de criar espaços urbanos mais resilientes às chuvas intensas. É necessário pontuar que o conceito de resiliência utilizado até aqui tem suas raízes nos estudos de Holling (1973), onde a dinâmica do ecossistema é considerada não linear devido a certas capacidades que permitem reter funções e características específicas, mesmo diante de distúrbios severos.

A concepção da “Cidade Esponja” busca uma mudança de paradigma em relação aos projetos tradicionais de drenagem urbana, priorizando a gestão sustentável e integrada das águas pluviais no contexto do planejamento e desenvolvimento urbano (Yu *et al.*, 2006; Jiang *et al.*, 2017).

Essa abordagem, alinhada com a visão holística da cidade (Jiang *et al.*, 2017), é análoga a diversas abordagens contemporâneas relacionadas à gestão da água urbana, como o desenvolvimento de baixo impacto nos EUA, os sistemas de drenagem urbana sustentável no Reino Unido e as cidades sensíveis à água na Austrália (Fletcher *et al.*, 2015).

Quanto às inundações, destacam-se no Quadro 2 características desses eventos tanto em áreas urbanas quanto não urbanas (Piadeh *et al.*, 2022).

Quadro 2 - Características importantes das inundações em áreas urbanas e não urbanas.

Características das Inundações	Áreas Urbanas	Áreas Não Urbanas (Bacias Rurais Preservadas)
Descrição	Transbordamentos das soluções de drenagem e das calhas dos cursos d'água.	Transbordamentos ou elevação do nível de corpos d'água, como rios, córregos, nível do mar e reservatórios.
Causas	Excedente significativo de vazão e rápido escoamento superficial provocado pelas condições de impermeabilidade.	Alta intensidade de chuva somada a saturação do solo e aumento do escoamento superficial.
Tempo de permanência da cheia	De minutos a dias.	De dias a semanas.
Abrangência espacial	Distribuição espacial irregular abrangendo ruas, avenidas e bairros inteiros.	Ampla abrangência reunindo depressões do relevo e planícies ribeirinhas.
Impactos sistêmicos	Perdas e danos nas dimensões social, ambiental, institucional, territorial, estrutural (serviços públicos básicos) e econômica.	Ativação de movimentos de massa e processos erosivos. Perdas de culturas e rebanhos, fauna e flora. Poluição e assoreamento dos cursos d'água e impactos sobre a qualidade dos mananciais de abastecimento.

Fonte: Adaptado de Piadeh *et al.* (2022). Organização: O autor.

Diante desse contexto, compreender a dinâmica do escoamento superficial de águas pluviais em canais viários urbanos (Nanía *et al.*, 2004), por exemplo, poderia ser instrumental na identificação e no desenvolvimento de soluções interdisciplinares mais resilientes. Uma abordagem embasada em critérios de modelagem da relação chuva-escoamento pode oferecer dados de interesse para a avaliação do risco potencial de inundação e, assim, facilitar o planejamento de projetos sustentáveis (Dawod *et al.*, 2012).

Destaca-se que um ecossistema urbano resiliente seria aquele que promove sinergia entre os diferentes setores da sociedade, sendo capaz de fornecer meios para a absorção de impactos e a reação eficiente a rupturas e desastres. Isso possibilita uma rápida reorganização sistêmica da cidade, abrangendo as dimensões social, cultural, ecológica, institucional, territorial e econômica (Oliveira, 2018; Vargas-Hernández & Zdunek-Wielgołaska, 2021).

Imperiale & Vanclay (2023) enfatizam que a construção da resiliência é um dispositivo heurístico que pode auxiliar os pesquisadores na representação mais completa dos processos sociais, ecológicos, culturais, econômicos e político-institucionais interconectados e inseridos. Especialmente importante é a capacidade desse dispositivo de desafiar paradigmas estabelecidos, permitindo que as sociedades e suas instituições aprendam coletivamente com

crises, desastres e falhas anteriores, visando aprimorar a prevenção e a previsão de riscos, responder aos impactos e progredir em termos locais e em diferentes níveis de governança.

A propósito, Goulden *et al.* (2018) mencionam que diversas cidades ao redor do mundo têm demonstrado um compromisso crescente com a adoção de metas e medidas para a gestão sustentável de águas pluviais. Essa abordagem atende a múltiplos objetivos nas esferas hidrológica, ecológica, social e econômica, podendo substituir partes consideráveis da infraestrutura de drenagem convencional. Esse conjunto de princípios, que abrange instalações operacionais para transporte, detenção ou retenção para amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas (BRASIL, 2020), demanda planejamento, organização e administração em escalas que variam desde o lote (BRASIL, 1979) até a bacia hidrográfica afetada (Carmon & Shamir, 2010). O estudo de Goulden *et al.* (2018) concluiu que a mudança de paradigma na gestão de águas pluviais requer necessariamente a compreensão de três categorias de enquadramento socioinstitucional, definidas pelos fatores culturais-cognitivos, normativos e regulatórios.

Os fatores culturais-cognitivos refletem crenças aceitas e formas muitas vezes inquestionáveis de realizar as atividades, demandando pesquisa e geração de conhecimento para promover mudanças de atitudes em relação aos recursos hídricos, além da definição de metas para alcançar uma gestão da água urbana mais sustentável e resiliente (Sañudo-Fontaneda & Robina-Ramírez, 2019).

O segundo fator está relacionado à conduta profissional, enfatizando a obrigação moral e ética dos agentes técnicos-operacionais dos sistemas, por meio de capacitação e orientação embasadas em guias e normas. A terceira e última categoria depende de mecanismos de regulação e coerção, como leis, estatutos, regimentos e planos diretores, como o Plano Diretor de Drenagem Urbana (Tucci, 2005; 2024). Esses elementos são fundamentais para a regulação da atividade individual e coletiva, abrangendo esferas consultivas, deliberativas e executivas nos níveis local, regional e nacional.

A regulação propriamente dita abrange o conjunto de ferramentas regulatórias para a gestão integrada de bacias hidrográficas, aplicando-se a dois planos: setoriais e territoriais. O primeiro busca associar diferentes usos, enquanto o segundo visa a divisão horizontal de jurisdições distintas sobre o território (Pereira & Cunha, 2022). O gerenciamento dos diversos elementos que compõem as bacias urbanas inclui, no plano setorial, além dos usos múltiplos

(abastecimento público, esgotamento sanitário, drenagem pluvial, etc.), uma ampla articulação com segmentos não usuários, como gestão municipal, habitação e transporte urbano, interagindo em constante sinergia.

Mehryar & Surminski (2021) destacam que a gestão do risco de inundação deve ser estruturada e adaptar-se à realidade de cada país e região, levando em consideração aspectos culturais, históricos, bem como a escala e o impacto real dos riscos atribuídos. Essa conclusão foi alcançada por meio de um estudo que analisou 139 instrumentos legais de regulação de 33 países, considerando o contexto das mudanças climáticas e da resiliência às inundações. Observou-se que a maioria das leis abordava a gestão de recursos hídricos, aspectos de drenagem urbana e proteção de bacias hidrográficas. Outros instrumentos contemplavam preocupações gerais com recursos naturais, adaptação às alterações climáticas e ordenamento do território. No entanto, apenas 4% das leis analisadas tratavam especificamente de estratégias focadas em atividades proativas de controle de enchentes.

É fundamental reconhecer que as medidas reguladoras, incluindo planos diretores e leis de zoneamento, desempenham um papel fundamental no gerenciamento das águas urbanas. Contudo, sua eficácia está intrinsecamente ligada às características operacionais e de manutenção dos sistemas de drenagem, bem como às fontes geradoras de escoamento (Pereira & Cunha, 2022). Essa compreensão aprofundada se revela essencial para orientar procedimentos bem-sucedidos que visam promover a sustentabilidade e a resiliência no manejo do escoamento superficial direto em áreas urbanas.

1.4 Pressupostos da Modelagem Hidrológico-Hidráulica

De acordo com Veneziani (2014), o potencial aplicado da Geomorfologia reside na espacialização das unidades morfológicas antropogênicas, especialmente na síntese da evolução hidromorfológica das bacias hidrográficas. Isso é alcançado por meio da análise da sequência histórica das alterações antrópicas ocorridas ao longo do tempo.

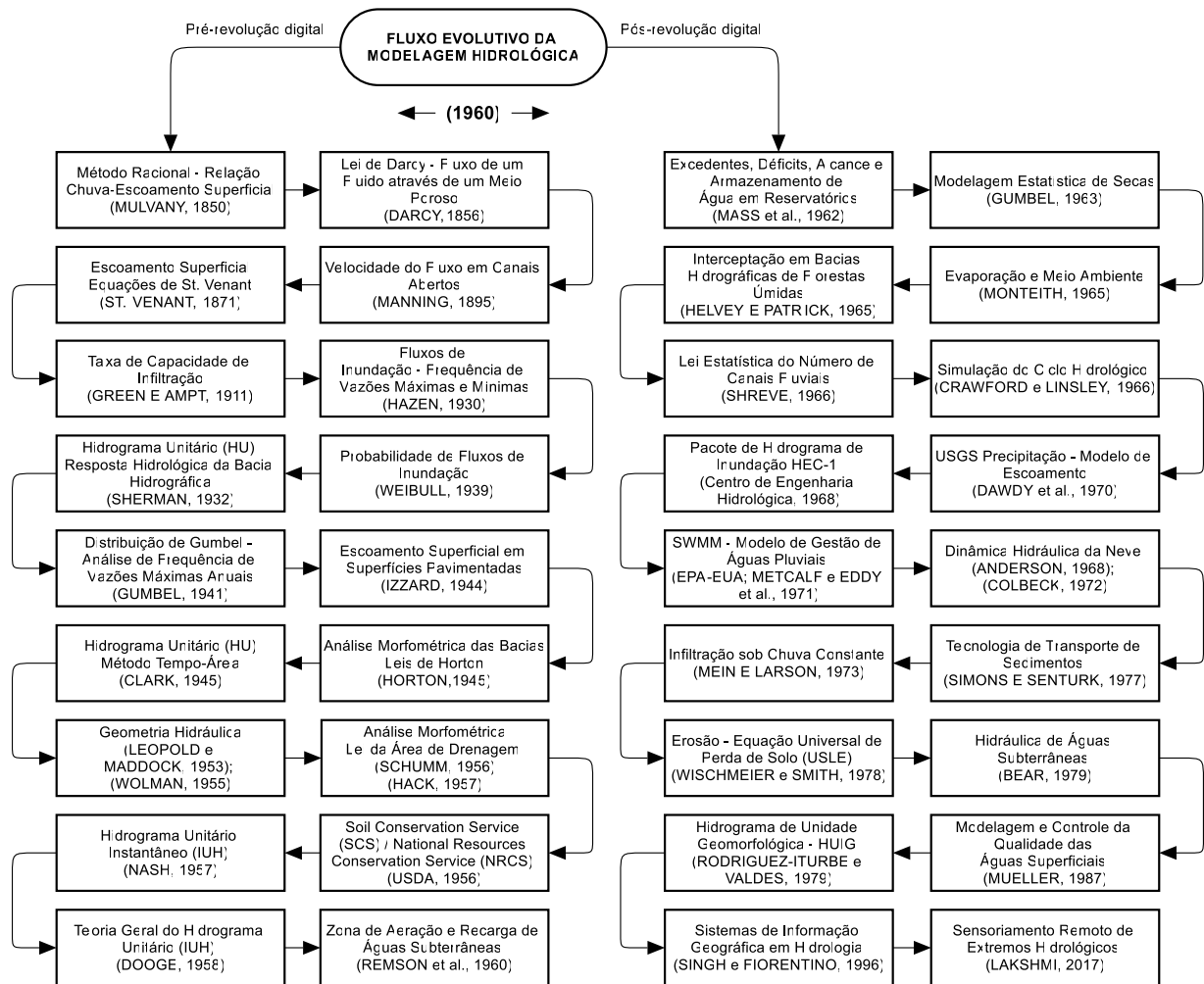
A cartografia de unidades antropogênicas complexas, tanto em áreas de planície quanto de vertente, juntamente com os resultados obtidos nos mapas de vulnerabilidade à inundação e na geração de escoamento superficial concentrado, destaca-se como contribuição importante para a análise de susceptibilidade. Além disso, esses produtos são instrumentais para a gestão e ordenamento territorial. Essa evidência ressalta o notável potencial dos temas geomorfológicos no âmbito da Hidrologia.

A simulação de sistemas ambientais em geomorfologia remonta à década de 1970 (Baker, 2020). Esse enfoque é especialmente evidente nos sistemas de vertente, onde se destaca a modelagem de escorregamentos, bem como as estimativas relacionadas à perda de material, erosão e fragilidade do meio (Veneziani, 2014).

Uma das questões essenciais na ciência hidrológica reside na investigação do destino da água após a ocorrência de chuva (McDonnell, 2003). Nesse contexto, o modelo hidrológico reflete o conhecimento e a compreensão dos processos de chuva-vazão (Gao *et al.*, 2018). A Hidrologia, por sua vez, tem a incumbência de estudar os fenômenos que determinam a distribuição espaço-temporal da água em nosso planeta, considerando os atributos de quantidade, qualidade e interação com os seres vivos, especialmente os humanos (Naghetini & Pinto, 2007). Os modelos destinados a esse propósito evoluíram ao longo da história, especialmente devido à necessidade de compreender o comportamento das variáveis que constituem os processos físicos do ciclo hidrológico (Santos, 2009).

Em resumo, a história da modelagem hidrológica pode ser dividida em dois momentos distintos: o período pré-revolução digital (antes de 1960) e o período pós-revolução digital (Figura 13). O amadurecimento epistemológico da Hidrologia é notavelmente caracterizado pelo desenvolvimento de técnicas de coleta e tratamento de dados, a promoção da interdisciplinaridade, a transição da modelagem analógica para a digital e a incorporação de ferramentas computacionais para análise (Singh, 2018).

Figura 13 - Fluxograma evolutivo da modelagem hidrológica.



Fonte: Adaptado de Singh (2018). Organização: O autor.

Veneziani (2014) destaca que os modelos hidrológicos não seguiram o mesmo ritmo de desenvolvimento observado na modelagem de sistemas ambientais em geomorfologia, afastando-se dessa área e, até mesmo, da geomorfologia fluvial. Passaram a ser, em grande parte, uma responsabilidade exclusiva dos engenheiros hidráulicos, os quais, em muitos casos, negligenciaram as contribuições potenciais dos estudos hidromorfológicos anteriores. O autor conclui que a Geomorfologia e a Hidrologia têm a capacidade de compartilhar procedimentos essenciais.

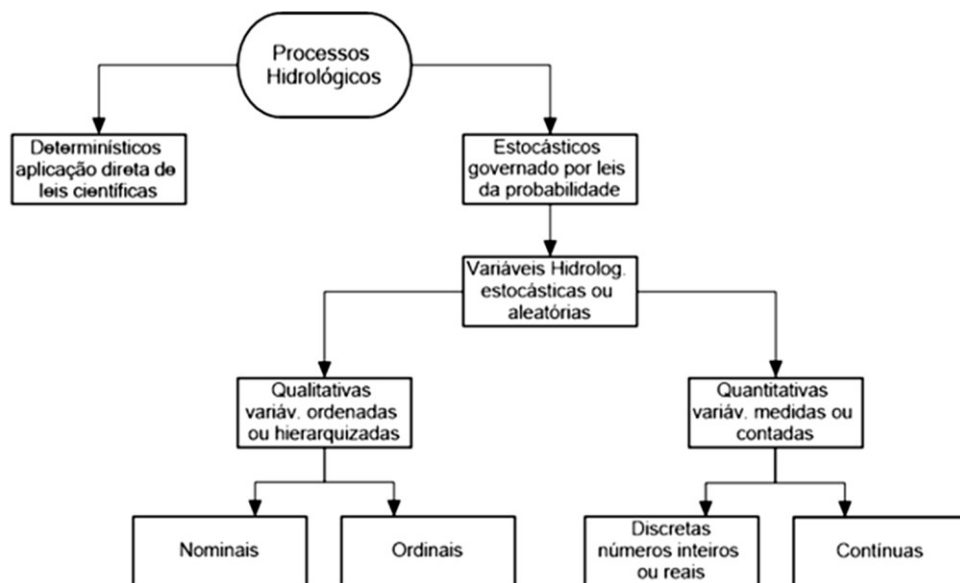
A ciência geomorfológica oferece um arcabouço teórico e metodológico para a análise morfológica e morfométrica da dinâmica do escoamento superficial. Isso inclui técnicas de mapeamento de morfologias naturais e antropogênicas, bem como unidades morfológicas complexas, que são essenciais para a definição de coeficientes de deflúvio e compreensão dos

picos de vazão. Além disso, abrange procedimentos teórico-metodológicos da cartografia de morfologias (originais e antropogênicas) em escala de detalhe, voltados à identificação de paleofluxos e tendências hidrodinâmicas, sendo aplicados de maneira específica ao planejamento da ocupação do meio urbano.

Por outro lado, entre as principais contribuições da ciência hidrológica à Geomorfologia, destaca-se a aplicação de parâmetros hidrológicos determinísticos calibrados para a caracterização e quantificação das tendências hidromorfológicas, tanto antes como após intervenções antrópicas. A ampliação do raciocínio probabilístico e o emprego de técnicas estatísticas são importantes para o aprimoramento da precisão e acurácia temporal de fenômenos hidromorfológicos, associados tanto às morfologias originais quanto às morfologias antropogênicas, utilizando parâmetros hidráulico-geométricos. Esses métodos são exemplos aplicados à reconstituição de paleofluxos.

Naghetini & Pinto (2007) afirmam que a intensidade de ocorrência dos fenômenos hidrológicos está sujeita a uma considerável variabilidade temporal e espacial, sendo influenciada por escalas regionais e locais. Além disso, fatores geofísicos atmosféricos e de superfície, como variações climáticas e geomorfológicas, também atuam nessa dinâmica. Por sua vez, os autores classificam os processos hidrológicos (Figura 14) de maneira simplificada em determinísticos e estocásticos, considerando que, na maioria das vezes, esses processos podem ocorrer de maneira combinada.

Figura 14 - Principais componentes dos processos hidrológicos.



Fonte: Adaptado de Naghetini & Pinto (2007). Organização: O autor.

Os processos determinísticos resultam da aplicação direta das leis científicas, enquanto os estocásticos originam-se das variáveis aleatórias regidas pelas leis da probabilidade. Dessa forma, podem ser considerados estocásticos fenômenos como a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial e subterrâneo, o transporte de sedimentos, a vazão dos cursos d'água, entre outros.

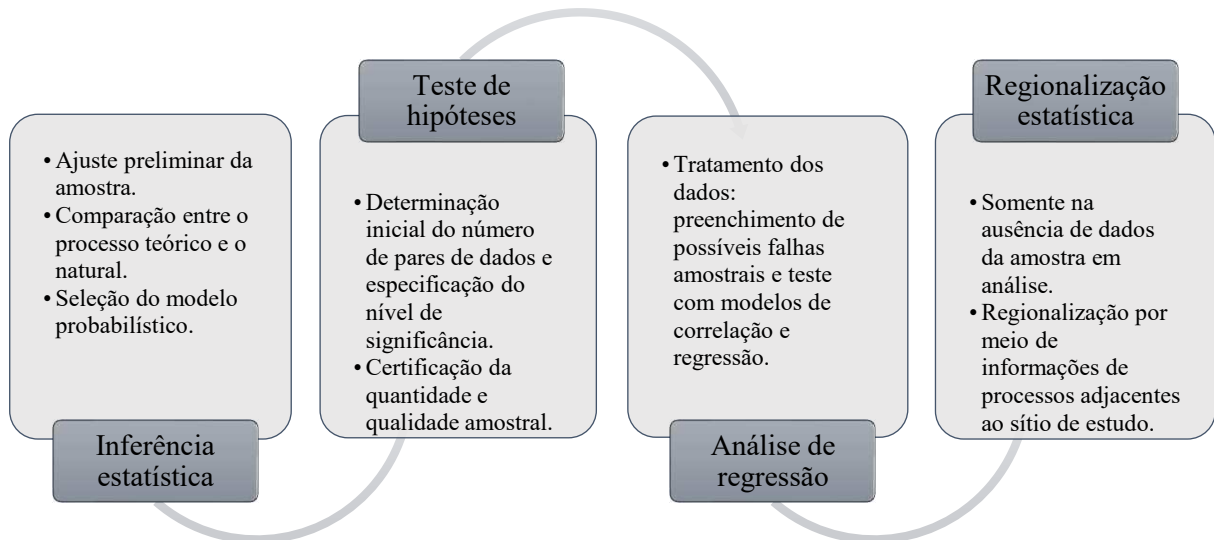
As flutuações temporais e espaciais das variáveis hidrológicas podem ser quantificadas ou categorizadas por meio de observações ou medições padronizadas. As variáveis quantitativas podem ser classificadas como discretas, quando representam uma sequência numérica finita resultante de uma contagem (por exemplo, dias sem chuva), ou contínuas, quando envolvem grandezas que podem assumir qualquer valor dentro de um intervalo específico (como a vazão fluvial). Já as variáveis qualitativas são divididas em nominais (por exemplo, categorias como tempo bom, chuvoso, nublado) ou ordinais (como categorias de temperatura alta, média, baixa, muito baixa). É necessário observar que Marinho Filho (2012) e Sigala & Pérez (2015) ressaltam que os modelos hidrológicos podem ser classificados de várias formas, incluindo a consideração do tipo de variável utilizada em cada modelagem.

O conjunto de observações de uma variável hidrológica, obtidas em diferentes momentos e/ou locais, constitui uma amostra que pode ser parametrizada por meio de medições ou passar por um ajuste preliminar de seus valores. Caso seja necessário prever a probabilidade dessa variável, é oportuno conduzir o processo de inferência estatística, por meio do qual se chega a uma conclusão sobre a população à qual essa amostra pertence (Lanna, 2001; Naghettini & Pinto, 2007).

Historicamente, o desenvolvimento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos tem sido impulsionado pela necessidade de compreender melhor o comportamento dos fenômenos. Esses modelos facilitam tarefas como análise quantitativa e qualitativa dos processos físicos do ciclo hidrológico, abrangendo aspectos como precipitação, evaporação, interceptação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, e produção de sedimentos (Santos, 2009; Tucci, 2024). É fundamental destacar que a comparação entre as características do processo hidrológico teórico e o natural demanda a escolha de um modelo probabilístico minimamente adequado para o processamento das informações (Callegari-Jacques, 2003; Silvia & Shimakura, 2006; Triola, 2008; Larson; Farber, 2010).

A conveniente parametrização da solução adotada é essencial para a representação satisfatória das condições hidrológicas e geomorfológicas em processos urbanos complexos (Bem, 2016). Dependendo do tipo de análise, pode ser necessário recorrer a outros métodos estatísticos, como testes de hipóteses, análise de correlação e regressão, e regionalização estatística (Figura 15).

Figura 15 - Sequência hipotética para o tratamento de uma amostra com variáveis hidrológicas.



Fonte: Adaptado de Lanna (2001). Organização: O autor.

Huang *et al.* (2008) conduziu uma análise comparativa entre cenários pré e pós-urbanização em uma bacia hidrográfica ao redor da cidade de Taipei, no norte de Taiwan. Utilizando um modelo hidrológico com amostras de médias de chuva-vazão, o estudo teve como objetivo calibrar os parâmetros pertinentes e determinar o potencial de contribuição para o escoamento superficial a partir de superfícies urbanas impermeáveis. A modelagem hidrológica permitiu a observação do aumento temporal das vazões de pico nos Hidrogramas Unitários simulados, atribuído à impermeabilização das áreas urbanas.

Em relação à aplicação da modelagem, Kobiyama *et al.* (2006) argumenta que os fenômenos naturais, em sua maioria, apresentam relativa complexidade, o que dificulta a medição e análise direta de variáveis. Diante desse desafio, a modelagem hidrológica emerge como uma alternativa amplamente utilizada, possibilitando a simulação e o diagnóstico de eventos, bem como de seus mecanismos, contribuindo para a formulação de medidas preventivas em relação a desastres naturais.

Nas últimas décadas a discussão acadêmica sobre modelagem hidrológica, conforme observado por Teng *et al.* (2017), tem se concentrado principalmente em abordagens empíricas apoiadas por medições, pesquisas e técnicas de sensoriamento remoto. Paralelamente, modelos estatísticos têm sido explorados para o tratamento eficiente de dados (Schumann *et al.*, 2009; Smith, 1997).

A mesma tendência é observada nos modelos hidrodinâmicos, que englobam metodologias 1D (Brunner, 2016), 2D (Moulinec *et al.*, 2011) e 3D (Luo *et al.*, 2022), utilizadas para simular o movimento da água e resolver equações físicas relacionadas ao movimento de fluidos. Destaca-se o uso crescente de modelos numéricos mais robustos, especialmente na simulação de enchentes e inundações. Essa aplicação é atribuída à necessidade de compreender os efeitos da variação rápida de fluxo causada por eventos como o rompimento de barragens, diques e tsunamis (Prakash; Rothauge & Cleary, 2014; Vacondio *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2022).

A implantação das cidades e a instalação de dispositivos de drenagem implicam em drástica alteração dos padrões naturais do fluxo pluvial superficial. Diante desse cenário, a modelagem hidrológica-hidrodinâmica tem se destacado, por exemplo, como ferramenta para avaliação e identificação de áreas de risco e apoio ao planejamento de ações da defesa civil (Zoppou, 2001; Kobiyama *et al.*, 2006).

Notadamente, a revolução digital pós 1960 é responsável por sensíveis avanços dos processos de modelagem, incluindo os métodos de hidrologia, aplicações 1D/2D da hidrodinâmica e mais recentemente, o incremento de ferramentas SIG para operação gerencial de grandes bancos de dados, tratamento da informação e mapeamento (Zoppou, 2001; Fernández & Lutz, 2010; Birgani & Azdandoost, 2018).

Os modelos tradicionais de simulação pluvial, a exemplo do *Storm Water Management Model* – SWMM (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana – SWMM), da *U.S. Environmental Protection Agency* (U.S. EPA, 2010), são empregados normalmente na simulação computacional de chuva-vazão e da propagação do escoamento superficial, utilizando métodos hidrológicos ou 1D de modelagem hidráulica. Uma das incertezas desse tipo de método é que a água de superfície apresenta dificuldades quanto a identificação segura de sua localização e extensão, haja vista a aleatoriedade que envolve os processos de escoamento superficial difuso (Fu *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2020; Luo *et al.*, 2022).

Atualmente, percebe-se a disponibilidade de numerosos modelos desenvolvidos por instituições acadêmicas, autoridades regulatórias, departamentos governamentais e consultores de engenharia, capazes de simular a qualidade e quantidade de água em ambientes urbanos. Zoppou (2001) analisou as características de doze modelos de águas pluviais, abordando aspectos como funcionalidade, acessibilidade, quantidade de água, componentes de qualidade, e limitações relacionadas a escala temporal e espacial.

O objetivo desse estudo foi divulgar informações para subsidiar ações de planejadores e gestores, proporcionando uma visão abrangente sobre as abordagens utilizadas na simulação do comportamento das águas pluviais. Além disso, a revisão destacou oportunidades de pesquisa potenciais no campo da modelagem hidrodinâmica, contribuindo para a compreensão dos processos e o gerenciamento de dados. Os modelos analisados por Zoppou (2001) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Funcionalidade e acessibilidade de modelos representativos de águas pluviais.

<i>Software/Modelo</i>	Funcionalidade			Acessibilidade	
	Planejamento	Operacional	Projeto	Domínio Público	Comercial
<i>Modelos urbanos</i>					
DR ₃ M-QUAL	✓		✓	✓	
HSPF	✓		✓	✓	
MIKE-SWMM	✓	✓	✓		✓
QQS	✓		✓	Desconhecido	
STORM	✓			✓	
SWMM	✓		✓	✓	
SWMM-Level 1	✓			✓	
Wallingford Model	✓	✓	✓		✓
<i>Modelos não-urbanos</i>					
BRASS		✓	✓	Desconhecido	
HEC-5Q	✓	✓		✓	
QUAL2E-UNCAS	✓			✓	
WQRRS	✓		✓	✓	

Fonte: Adaptado de Zoppou (2001). Organização: O autor.

Nas últimas décadas, a modelagem unidirecional de águas pluviais urbanas experimentou avanços expressivos, impulsionados principalmente pela integração de recursos 2D em suas interfaces. A utilização de softwares de código aberto, em constante evolução desde meados dos anos 2000, teve um impacto abrangente em várias disciplinas de pesquisa, especialmente aquelas que fazem uso de dados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sensoriamento

remoto (Kaya, 2019). Nesse contexto, as soluções comerciais seguiram essa tendência, incorporando módulos hidrodinâmicos bidimensionais e ferramentas SIG, o que contribuiu para o surgimento de uma nova geração de modelos, como o PCSWMM (versão atualizada do SWMM), InfoWorks (versão atualizada do Wallingford Model), Sobek Urban, MIKE Urban, entre outros (Yang *et al.*, 2020).

De maneira geral, duas abordagens são comumente empregadas no mapeamento do risco de inundação: modelos hidrológico-hidráulicos e modelos SIG. Os primeiros são frequentemente utilizados em estudos de grande escala, permitindo o cálculo da quantidade total de água escoada em áreas específicas, como bacias hidrográficas. Enquanto isso, os modelos SIG se concentram nas características do fluxo de escoamento (Cook & Merwade, 2009; Alfieri *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2020).

Os modelos hidrológicos e hidráulicos geralmente colaboram de maneira integrada, onde os resultados da modelagem hidrológica são empregados como entrada para a modelagem hidráulica. Influenciado por essa troca de informações, o conjunto de modelos baseados em SWMM (EPA, 2022), como SWMM-Level 1 e MIKE-SWMM, é amplamente utilizado no planejamento, análise e desenvolvimento de projetos relacionados ao escoamento de águas pluviais, sistemas de esgoto combinado, sistemas sanitários e outros sistemas de drenagem. Por outro lado, os modelos de análise multicritério, que dependem de parâmetros como declividade, densidade dos sistemas de drenagem, uso do solo, ocupação da terra, tipo de solo, entre outros, juntamente com ferramentas SIG, possibilitam o estudo da vulnerabilidade a eventos hidrológicos em uma determinada área (Feng *et al.*, 2020; Seyedashraf *et al.*, 2021).

É notável que o Modelo de Gestão de Drenagem Urbana – SWMM, da *U.S. Environmental Protection Agency*, se destaca por ser de domínio público e por sua versatilidade funcional voltada ao planejamento, análise e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas, sistemas coletores de águas residuais (separados, unitários ou mistos) e outras aplicações, inclusive para áreas não urbanas (U.S. EPA, 2010).

Jain *et al.* (2016) conduziu estudos na cidade de Surat, Índia, demonstrando a integração entre sensoriamento remoto, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e SWMM (*Storm Water Management Model*), sendo este último utilizado para modelagem do escoamento de águas pluviais na área urbana. Técnicas de geoinformática foram aplicadas para estimar os parâmetros de controle de *runoff* (escoamento superficial), como declividade e geometria das

quadras, lotes e ruas. A metodologia adotada consistiu na subdivisão das bacias urbanas em unidades hidrológicas menores, chamadas de sub-bacias hidrográficas (Gribbin, 2014).

Na pesquisa de Fu *et al.* (2018), a versão 5.1 do SWMM, com o módulo LID (*Low Impact Development*), foi utilizada para simular, em escala urbana, a quantidade e qualidade da água em uma área da bacia hidrográfica do Rio Zhuoshui em Taiwan. A justificativa para a escolha dessa ferramenta foi a capacidade de mapear as mudanças no uso do solo, empregando um modelo hidrodinâmico que fornecesse informações sobre diversas situações de escoamento superficial na área de estudo.

Browne *et al.* (2021) empregou o SWMM em conjunto com a análise do uso e cobertura do solo em um estudo realizado no sudeste da Austrália, na pequena cidade de Wangaratta, visando confirmar os efeitos da expansão urbana no aumento expressivo do escoamento superficial. Como resultado, foram identificadas alterações geomórficas nos canais fluviais, bem como uma deterioração na qualidade da água e um aumento do risco de inundações.

No estudo conduzido por Bibi (2022), a versão 5.1 do SWMM foi utilizada para investigar os impactos do uso da terra e das mudanças climáticas no escoamento de pico e nos volumes de inundação urbana na cidade de Dodola, sudoeste da Etiópia. A maioria dos dados de entrada foi estimada por meio de uma combinação de análise espacial no *software* ArcGIS 10.3, fontes literárias, pesquisas de campo e padrões de modelagem.

De acordo com Bibi (2022), o sistema SWMM foi escolhido por várias razões: (1) considera a variabilidade espacial das propriedades das sub-bacias hidrográficas; (2) permite a identificação de cada sub-bacia que recebe os fluxos de chuva; (3) processa o escoamento superficial considerando parâmetros físicos como área, largura do fluxo, porcentagem de impermeabilidade, inclinação média, entre outros; (4) contabiliza a chuva-vazão a partir da quantidade de pico de escoamento único ou contínuo em áreas urbanas; (5) possibilita a quantificação do pico de escoamento da sub-bacia em diferentes climas e usos distintos da terra.

Sidek *et al.* (2021) destaca que a falta de interface espacial é um dos grandes desafios dos modelos SWMM devido à complexidade das áreas urbanas. Nesse contexto, uma versão comercial do sistema, conhecida como *Personal Computer Storm Water Management Model* (PCSWMM), foi desenvolvida em 1984 pela *Computational Hydraulics International* (CHI), no Canadá, com o objetivo principal de integrar à sua interface um Sistema de Informação

Geográfica (SIG) autônomo. Essa adição favorece a modelagem mista integrada (1D/2D) e "Quasi-2D", fornecendo um conjunto abrangente de ferramentas de produtividade que aprimoram e ampliam o ambiente de modelagem SWMM (Hamouz *et al.*, 2020; Bibi, 2022; Yang *et al.*, 2023).

Recentemente, a versão 5.2 do SWMM foi publicada com modificações no *layout*, proporcionando uma experiência mais amigável ao usuário. No entanto, ainda carece de ferramentas de análise espacial, e não permite o exame de processos de transporte e depósito de sedimentos em seções transversais, limitando seu uso para bacias hidrográficas rurais (U.S. EPA, 2017; 2022).

Atualmente, o *software* PCSWMM (CHI, 2022) tem ganhado popularidade entre profissionais de vários países (Sidek, 2021), principalmente devido ao seu amplo suporte para análises hidrológico-hidráulicas, projetos LID (*Low Impact Development*), SUDs (*Sustainable Urban Drainage Systems*) e qualidade da água (CHI, 2022). A desenvolvedora destaca que essa solução é essencialmente o resultado da integração entre o Sistema Operacional Windows do EPA SWMM, apresentando uma interface de usuário mais amigável que facilita a criação e edição de arquivos de entrada, o gerenciamento de produtos SIG, a impressão de resultados gráficos, entre outras funcionalidades.

Dentre os diversos estudos disponíveis sobre o uso do PCSWMM como ferramenta, destacam-se os resultados publicados por Yim (2016), notadamente no que diz respeito à gestão das águas pluviais em uma sub-bacia de aproximadamente 0,6 km² em Phnom Penh, capital do Camboja, no Sudeste da Ásia. O *software* demonstrou estabilidade durante as tarefas de exame e avaliação hidrológico-hidráulica do sistema combinado de esgotos, considerando diferentes chuvas de projeto, especialmente a capacidade de drenagem em condições de tempestade severa (aproximadamente 45 mm/h), com um período de retorno inferior a 2 anos.

Hamouz *et al.* (2020) utilizou o mesmo *software* para modelar a redução do escoamento decorrente da implementação de telhados verdes e cinzas em uma bacia hidrográfica urbana na cidade costeira de Trondheim, na Noruega. Os resultados destacaram que esse modelo de gerenciamento pode contribuir para o planejamento e a tomada de decisões relacionadas a planos diretores e estratégias de gestão das águas pluviais urbanas.

Lappicy *et al.* (2020), em um estudo realizado nas Unidades Hidrográficas (UH) do Lago Paranoá e Riacho Fundo, no Distrito Federal (DF), Brasil, descreve o uso do PCSWMM para importar bases e dados do sistema de drenagem de uma bacia urbana com menos de 9 km² e criar um arranjo hipotético a partir dessas informações. Além das entradas de dados, foram estabelecidos dois padrões de precipitação, seguido pela investigação da produção de escoamento superficial utilizando o método do *Soil Conservation Service* - SCS-USDA, também conhecido como Método do Número da Curva - CN (Pruski, 2014).

O CN foi determinado com base nas classes de uso e ocupação do solo previamente estabelecidas. Os resultados evidenciaram que a rede de drenagem proposta apresentou condições favoráveis para amortecer os fluxos hipotéticos, tanto para a chuva de projeto quanto para a crítica, ambas modeladas no PCSWMM.

Destaca-se que o antigo *Soil Conservation Service* (SCS-USDA), atualmente *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), introduziu na década de 1980 o *Technical Release 55* (TR-55 – USDA, 1986), que consolidou os estudos realizados pelo SCS na década de 1970 e incorporou procedimentos simplificados para o cálculo do volume de escoamento superficial, taxa de pico, hidrogramas, entre outros, aplicáveis a pequenas bacias hidrográficas urbanas.

Sousa (2010) elaborou uma apresentação sobre os modelos de escoamento, organizados com base em premissas de modelagem (Quadro 3). Essa classificação foi originalmente proposta por Barnard *et al.* (2007). É oportuno observar que as diversas aplicações dos modelos hidrológico-hidráulicos ao longo do tempo, especialmente após 1960, contribuíram para o desenvolvimento de uma ampla variedade de abordagens e sistemas voltados para a simulação do comportamento chuva-vazão, complementando as observações feitas por Zoppou (2001) e o próprio PCSWMM.

Nota-se que a lista organizada por Sousa (2010) apresenta soluções aplicáveis; no entanto, devido ao dinamismo tecnológico, é fundamental acompanhar o lançamento de novas versões e *softwares*. Os programas atuais estão seguindo a tendência de incorporação de módulos hidrodinâmicos 2D e ferramentas SIG. Exemplos desse tipo de aprimoramento incluem o PCSWMM (com o "núcleo" SWMM), InfoWorks (como a versão atualizada do Wallingford Model), Sobek Urban, MIKE Urban, entre outros, que oferecem recursos voltados para o desenvolvimento de soluções ecológicas de drenagem (Yang *et al.*, 2020).

Quadro 3 - Modelos de escoamento organizados por premissas de modelagem.

Modelo	Descrição	Softwares
Modelos Hidrológicos	Procedimentos de modelagem hidrológica utilizado para simular parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, podendo simular efeitos de armazenamento em calha.	SMAP; HEC-HMS; IPH II; Hidro-Flu
Modelos 1D, com escoamento permanente e gradualmente variado	Escoamento permanente, pequenas mudanças em profundidade e velocidade ao longo do canal.	“Standard Step Method”; HEC-RAS
Modelos Hidrodinâmicos	Resolvem as equações de Saint-Venant, de continuidade e dinâmica, para simulações espaço-temporais.	EPA SWMM; XPSWMM; IPH IV; MIKE11
Modelos Quasi-2D (híbridos)	Teia de ligações, células e/ou nós, com os caminhos de escoamento pré-definidos e que permitem a armazenagem em locais específicos.	EPA SWMM; XPSWMM; ModCel
Modelos 2D	Equações de Navier-Stokes resolvidas em duas dimensões. Utilizados para modelagem hidráulica fluvial e costeira e, uma opção para a modelagem de inundações.	FESWMS-2D; TUFLOW; SisBaHiA; MIKE21
Modelos 1D/2D	São modelos mistos, utilizam um modelo 1D para o escoamento em tubos e canais vinculados a um modelo 2D em regiões de alagamento.	XPSWMM-2D; SOBEK; MIKEFLOOD
Modelos 3D	Modelos complexos, utilizados geralmente, no estudo do comportamento de águas profundas. Resolvem com propriedade as equações de Navier-Stokes em três dimensões.	SisBaHiA

Fonte: Sousa (2010). Adaptação: O autor.

Impulsionado pela moderna abordagem de modelagem de sistemas de drenagem urbana sustentável, Gonçalves (2022) apresentou a concepção de uma ferramenta computacional denominada DDU+S (Dispositivos de Drenagem Urbana Mais Sustentável), utilizando a linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*), desenvolvida pela *Microsoft Corporation*. O objetivo é simular o comportamento de dispositivos submetidos a Eventos de Chuva Característicos (ECCs). Essa ferramenta permite a simulação do balanço hídrico, indicando potenciais benefícios hidrológicos para o uso de cinco dispositivos para cada ECC: (1) Superfície de infiltração; (2) Vala de Infiltração; (3) Trincheira de Infiltração; (4) Poço de Infiltração e; (5) Reservatório de água de chuva. A quantificação do escoamento superficial foi realizada pela metodologia do *Curve Number* (NRCS-CN), e o cálculo da infiltração foi efetuado pela equação de Green-Ampt. Importante notar que os resultados obtidos no DDU+S foram posteriormente comparados com as respostas fornecidas pelo *software* SWMM.

O autor observa que, apesar dos esforços e da funcionalidade constatada durante os testes, a ferramenta ainda carece de diversas melhorias, apontando para a necessidade de avanços na

compreensão do comportamento das variáveis hidrológicas e hidráulicas que governam os eventos pluviométricos e a produção do escoamento (Gonçalves, 2022).

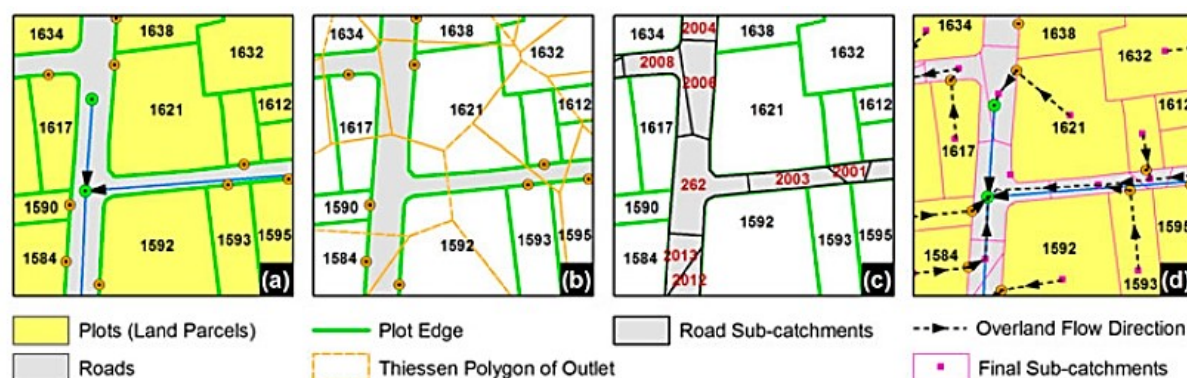
Esse cenário ressalta a importância de reconhecer que, apesar dos notáveis esforços da hidrologia e da hidráulica para oferecer recursos de modelagem mais integrados ao mundo real, as melhores práticas para a gestão dos ecossistemas urbanos ainda enfrentam enormes barreiras técnicas, econômicas, políticas, culturais e regulatórias. Essas barreiras dificultam a implementação de soluções sustentáveis, levando à conclusão de que a gestão da água no meio urbano deve ser uma parte integral das cidades inteligentes do futuro, caracterizadas por serviços, sistemas e infraestruturas que compreendem múltiplas funções (Bonab *et al.*, 2023). No entanto, a captação das águas urbanas precisa ir além da simples compreensão da contribuição das parcelas de cobertura da terra (quadras e lotes) e da rede viária que fornece acesso a esses parcelamentos (Gribbin, 2014).

Sabe-se que o escoamento superficial gerado por essas áreas é direcionado para as sarjetas dos canais viários e para o ponto mais baixo ao longo da borda das ruas (meio-fio), identificado como ponto de descarga ou saída do fluxo. Esse ponto é determinado a partir da análise do cenário topográfico e microtopográfico local (Jain *et al.*, 2016). No entanto, hidrogeomorfologicamente, é necessário compreender que a microtopografia engloba um conjunto de formas que contribuem para a rugosidade do terreno, incluindo microdepressões superficiais com profundidade e extensão milimétricas a centimétricas quando comparadas ao comprimento da vertente. Essas formas são responsáveis pelo armazenamento pluvial em depressões (empoçamento) e pela determinação da dinâmica hidrológica e direcional do fluxo (conectividade estrutural do escoamento) (Thompson *et al.*, 2010; Appels *et al.*, 2011).

Uma abordagem exemplar destaca que, ao contrário das quadras e lotes, que possuem limites definidos, as ruas se comportam como extensos polígonos contínuos. Dentre as técnicas disponíveis, é possível subdividir essas áreas em sub-bacias menores utilizando, por exemplo, o método dos polígonos de Thiessen.

Posteriormente, torna-se viável aplicar um modelo SWMM (Jain *et al.*, 2016) para calcular não apenas a contribuição das quadras e lotes, mas também a contribuição de cada segmento de rua. Isso amplia as análises sobre o volume de escoamento. O resultado desse procedimento pode ser visualizado na Figura 16 - a; b; c; d.

Figura 16 - Subdivisão de ruas em sub-bacias de contribuição e respectivos pontos de descarga. Fig. 13a – Localização dos pontos de descarga dos lotes; 13b – Definição dos polígonos de Thiessen; 13c – Definição das sub-bacias; 13d – Indicação das direções de fluxo.



Fonte: Jain *et al.* (2016). Org.: O autor.

Alam (2014) apresentou em sua tese uma metodologia para o desenvolvimento de um modelo distribuído de drenagem urbana utilizando banco de dados SIG. A abordagem considerou um arranjo espacial compreendendo aspectos morfométricos e informações digitais de uma área residencial tipicamente urbana na cidade de Mississauga, no Canadá. Foram utilizadas séries de precipitação resultantes de observações climatológicas para alimentar o modelo, e a simulação foi realizada no *software* PCSWMM versão 5.1.1279.

O desempenho do modelo foi avaliado pelo autor, comparando a descarga simulada (*output*) não calibrada com o padrão de escoamento monitorado *in-loco*. Alam (2014) menciona que algoritmos de direção de fluxo são utilizados para determinar o caminho do *runoff* em uma determinada área de captação. Para isso, existem diversos algoritmos que podem ser empregados na definição do direcionamento, classificados em duas categorias: (i) Algoritmos de direção de fluxo único e; (ii) Algoritmos de Direção de Fluxo Múltiplo (MFD).

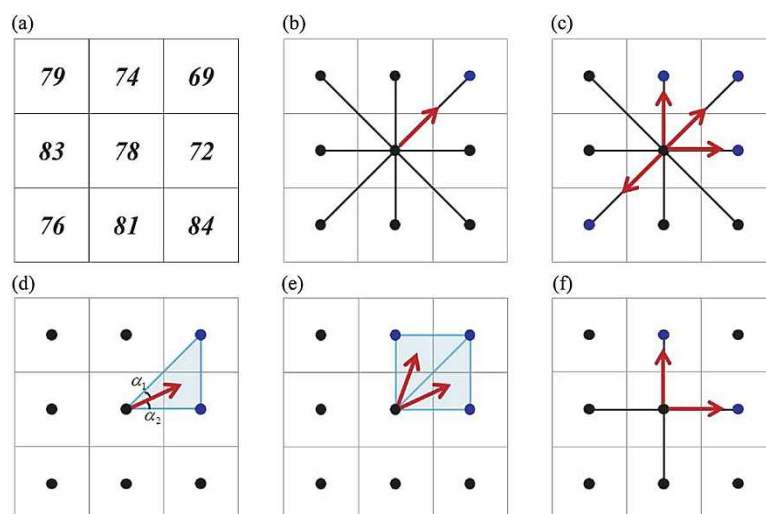
No primeiro grupo, destaca-se o algoritmo D8, determinístico de oito direções (O'Callaghan & Mark, 1984; Orlandini *et al.*, 2003), que direciona a massa total de água de uma unidade celular para a célula adjacente com o sentido mais íngreme, evidenciando a concentração de fluxo (Huang & Tun Lee, 2016). Este é o algoritmo utilizado pelo *software* PCSWMM (ALAM, 2014). Nessa mesma classificação, encontra-se o algoritmo aleatório de oito nós (Rho8), que aplica o processo de aleatoriedade para determinar a direção do fluxo (Alam, 2014).

No segundo agrupamento, estão os métodos de roteamento do fluxo para mais de uma célula adjacente (Direção de Fluxo Múltiplo - MFD). Um exemplo é o FD8, que direciona o

escoamento para mais de uma célula com base em um conjunto de dados de elevação (gradientes de inclinação), atribuindo pesos para o cálculo da proporção de fluxo direcionado para as direções cardeais e diagonais (Alam, 2014). Segundo Huang & Tun Lee (2016), o primeiro método MFD proposto foi o algoritmo MD8, desenvolvido por Quinn *et al.* (1991), no qual o fluxo de uma célula é distribuído proporcionalmente para todas as oito células vizinhas que possuem menor elevação. Em seguida, surgiu o triângulo de direção única (D_{∞}), proposto por Tarboton (1997), assumindo que a superfície topográfica é constituída por facetes triangulares não sobrepostas e interligadas. Além disso, foi desenvolvido o método conhecido como multidireção triangular (MD_{∞}) por Seibert & McGlynn (2007), ampliando a abordagem de Tarboton (1997). Por fim, o algoritmo D4, que investiga tanto os métodos de direção de fluxo único quanto os MFDs mencionados, incluindo a análise do algoritmo de quatro direções amplamente utilizado em modelos de escoamento totalmente bidimensionais (Maksimović *et al.*, 2009; Huang & Tun Lee, 2016).

Huang & Tun Lee (2016) apresentam vários métodos para determinação do caminho de fluxo em um diagrama esquemático (Figura 17), que inclui: (a) um conjunto hipotético de dados de elevação baseados em células; (b) o algoritmo determinístico de oito direções (D8); (c) o fluxo proporcional para todas as oito células vizinhas (MD8); (d) o triângulo de direção única (D_{∞}); (e) o método multidireção triangular (MD_{∞}); (f) a análise do algoritmo de quatro direções (D4).

Figura 17 - Diagrama esquemático com vários métodos empregados na determinação do caminho de fluxo.



Fonte: Huang & Tun Lee (2016).

Notadamente, a harmonização entre os modelos conceituais e empíricos requer a escolha adequada dos parâmetros de entrada. A qualidade da modelagem dependerá da consistência das informações, da excelência das medições amostrais e da caracterização física do meio. Dentre os desafios que envolvem o estudo da dinâmica do escoamento urbano, destaca-se a escolha da escala espaço-temporal mais adequada à abordagem dos processos, a identificação e quantificação das fontes geradoras de fluxo, bem como a definição do modelo mais apropriado para o tratamento e gerenciamento dos dados. Apesar dos vários algoritmos disponíveis para determinação do caminho de fluxo, seu uso deve ser compreendido de modo a evitar que uma escolha inadequada resulte em erros na extração das propriedades hidrogeomorfológicas (Huang & Tun Lee, 2016).

No trabalho de Houser *et al.* (2022), é citado, por exemplo, o número crescente de artigos científicos que têm incorporado abordagens sobre inteligência artificial, notadamente o aprendizado de máquina (*Machine Learning* - ML). Trata-se de uma ferramenta poderosa, especialmente em situações com grandes conjuntos de dados e com interações não lineares entre inúmeras variáveis. Muitos métodos estatísticos têm agregado atualmente o aprendizado de máquina para previsão e inferência estatística (Bzdok, 2018).

De acordo com Houser *et al.* (2022), o ML difere das análises estatísticas tradicionais que dependem de suposições sobre a estrutura da relação (por exemplo, linear vs. não linear) e a natureza dos dados (por exemplo, distribuição de resíduos). Enquanto os métodos estatísticos clássicos se concentram na inferência por meio da criação e ajuste de um modelo de probabilidade, para a medida quantitativa de confiança de que uma relação descoberta é real e improvável de resultar em ruído, o ML tende a não ser limitado por tais suposições, porque procura automaticamente por regras e relacionamentos para encontrar padrões em grandes conjuntos de dados.

Paralelamente às discussões sobre as tendências tecnológicas para simulação do escoamento superficial em áreas urbanas, é sempre importante considerar as novas abordagens no contexto das tecnologias empregadas na gestão de riscos envolvendo fenômenos naturais em ambientes urbanos. Todavia, como salienta Houser *et al.* (2022), apesar de os algoritmos serem excelentes soluções para replicação, automatização e padronização de problemas complexos, não se pode afirmar que são tão bons quanto a compreensão da paisagem alcançada pelo ser humano.

1.4.1 Qualidade da Modelagem: Erros de Continuidade

O desenvolvimento de modelos enfrenta desafios relacionados à disponibilidade de dados espaciais de alta resolução, como modelos digitais de elevação com 1 metro de resolução, além da necessidade de equilibrar o custo computacional com os requisitos de precisão.

Shrestha *et al.* (2022) identificam uma lista de dados primários que influenciam os erros na modelagem de inundações urbanas, destacando a incerteza e a escassez de informações geoespaciais precisas. Esses desafios incluem a inadequação da precisão em relação à escala de análise e questões concernentes à qualidade dos registros de precipitação, necessários à calibração e a realização de simulações.

Um dos fatores que frequentemente contribuem para erros de continuidade do fluxo pós-processamento de modelos hidrológico-hidráulicos é a presença de depressões isoladas no terreno, que são áreas com inclinações insuficientes para o desenvolvimento do fluxo de escoamento (Shrestha *et al.*, 2022). Declividades inferiores a 0,5% costumam intensificar esses erros. Além disso, a seleção de um intervalo de tempo de cálculo muito longo ou a utilização de condutos excessivamente curtos também é uma razão comum para falhas na conservação da massa (U.S. EPA, 2022).

James (2005) ressalta que, para uma determinada resposta simulada, há um número infinito de parâmetros que podem ser utilizados como dados de entrada, o que aumenta a probabilidade de erros. Para mitigar essas incertezas, os métodos e técnicas de calibração hidrológica e hidráulica devem considerar cuidadosamente os valores máximos e mínimos dos parâmetros.

Adicionalmente, a otimização por algoritmos enfrenta limitações na simulação dos efeitos de eventos naturais, devido às complexidades das variáveis hidrológicas e hidráulicas requeridas durante a alimentação do modelo. Entretanto, a identificação de limites empíricos referenciais pode ser fundamental para aprimorar a parametrização e a calibração da modelagem (Quadro 4). Essas diretrizes não apenas facilitam a obtenção de resultados mais consistentes, mas também aumentam a confiabilidade dos modelos na previsão de cenários reais de escoamento e inundação.

Quadro 4 - Limites empíricos referenciais para calibração e verificação dos parâmetros de modelagem.

LIMITES EMPÍRICOS REFERENCIAIS		
<p>Parâmetros Hidrológicos</p> <p>Características físicas da bacia hidrográfica.</p> <p><i>(*) Limite conservador.</i></p>	Área total	Dado que requer o levantamento geométrico/topográfico preciso da área de estudo. Limite aceitável de $\pm 2\%$ para o erro de medição.
	Largura equivalente	Resultado da divisão da área total pelo comprimento mais longo do caminho de fluxo. Limite aceitável de $\pm 15\%$ (*).
	Percentual de área impermeável	Resultado da divisão da área impermeável medida, pela área total. Limite aceitável de $\pm 12\%$.
	Coefficiente de rugosidade de Manning (n)	Limites estimados para elementos essencialmente naturais. Devido à sua alta variabilidade, o limite e alcance deste parâmetro podem ser desafiadores.
	Armazenamento em depressão de área impermeável	Água armazenada em depressões de áreas impermeáveis, esgotada somente por evaporação. Limite sugerido de 0,13 mm a 1,50 mm.
	Armazenamento de depressão de área permeável	Água armazenada em depressões de áreas permeáveis sujeita a infiltração e evaporação. Limite sugerido de 1,50 mm a 6,50 mm.
	Declividade média	Inclinação média ao longo do caminho do fluxo terrestre resultante da divisão entre a diferença de altitude e o comprimento percorrido. Limite aceitável de $\pm 12\%$ (*).
<p>Parâmetros Hidráulicos</p> <p>Propriedades físicas de canais e condutos.</p> <p><i>(*) Limite conservador.</i></p>	Comprimento	Normalmente obtido por medição de campo. Limite aceitável de ± 10 cm entre os dados medidos.
	Largura e diâmetro	Também obtido por medições de campo, entretanto, com mais chance de erro de medição, o que sugere um limite aceitável de $\pm 0,25$ m para canais abertos e ± 5 mm para condutos.
	Inclinação	Mesmo princípio da declividade da bacia hidrográfica. Limite aceitável de $\pm 12\%$ (*).
	Coefficiente de rugosidade de Manning (n)	Valores tabelados e disponíveis em manuais e normas técnicas. Contudo, sugere-se o limite para os canais abertos de 0,009 a 0,200 e para os condutos de 0,011 a 0,026.

Fonte: Adaptado de James (2005). Organização: O autor.

Deng *et al.* (2020) esclarece que os erros de escoamento e de continuidade de fluxo referem-se à diferença percentual entre o escoamento final (*output*) e o inicialmente produzido (*input*). O manual do usuário SWMM 5.2 (U.S. EPA, 2022) adiciona que esses erros representam a razão entre a quantidade armazenada inicialmente no sistema, somada ao fluxo de entrada, e a quantidade armazenada no final, acrescida do fluxo de saída.

A faixa de tolerância para esses desvios é considerada um ponto de divergência na literatura, pois teoricamente não há uma regra consensual sobre o percentual mais aceitável para um erro de continuidade. Hussain *et al.* (2018) menciona que modelos com erros de roteamento inferiores a 1,0% são considerados aceitáveis, enquanto na faixa de 1,0% a 5,0% necessitam de investigação. Acima desse intervalo, uma revisão profunda da concepção do sistema é necessária. De acordo com U.S. EPA (2022), se o relatório do *status* final da modelagem indicar erros inferiores a 10,0%, a simulação é considerada dentro da normalidade.

James (2005) destaca que o modelo PCSWMM, por exemplo, proporciona a entrada de diversos parâmetros hidrológicos (características físicas da bacia hidrográfica) e hidráulicos (propriedades físicas de canais e condutos). O autor enfatiza a possibilidade de recorrer à calibração automática dos modelos conceituais de chuva-vazão, uma tendência nas soluções tecnológicas. Contudo, ele alerta que a determinação de uma solução viável para um conjunto global de parâmetros pode comprometer as respostas obtidas.

Um conhecimento mais aprofundado da área de estudo, aliado à obtenção de dados primários mais precisos, contribui para a realização de simulações confiáveis e a obtenção de resultados mais satisfatórios (Akhter & Hewa, 2016). A calibração do modelo PCSWMM pode ser realizada utilizando a ferramenta *Sensitivity-based Radio Tuning Calibration* (SRTC) embarcada, que atribui classificações percentuais de incerteza a cada parâmetro de interesse. O *software* possibilita tanto a procedimento automático quanto empírico (manual). No entanto, no primeiro caso, é essencial que as estimativas dos parâmetros estejam o mais próximo possível da realidade.

Por essas razões, a parametrização inicial desempenha um papel essencial na configuração e inicialização de um modelo hidrológico-hidráulico. Nesse contexto, observa-se uma clara tendência em abordagens mais integradas, que envolvem o uso de dados de sensoriamento remoto em conjunto com Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), caracterizando o cenário contemporâneo das modelagens hidrológico-hidráulicas. Essa abordagem possibilita a

extração de características espaciais mais detalhadas das bacias hidrográficas urbanas, permitindo a execução de estimativas paramétricas mais precisas (Gong *et al.*, 2023).

Os sistemas a laser aerotransportados, baseados na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), são amplamente utilizados para a extração detalhada de características espaciais. Esses sistemas permitem a obtenção de informações tridimensionais da superfície terrestre com alta precisão e possibilitam o processamento de dados espaciais em diversas escalas, incluindo a análise da topografia urbana (Werbrouck *et al.*, 2011; Turner *et al.*, 2013; Costabile *et al.*, 2015).

Bodoque (2023) destaca que a precisão dos dados topográficos em Modelos Digitais de Elevação (MDEs) afeta sensivelmente a qualidade da modelagem hidrodinâmica 2D. Essa precisão influencia o desenho geométrico das malhas utilizadas nos cálculos numéricos das simulações de escoamento, determinando a acurácia dos resultados obtidos.

- CAPÍTULO 2 -

Abordagem Metodológica

A abordagem metodológica adotada nesta tese incorpora a alternância entre dois métodos utilizados em Geomorfologia: o indutivo e o dedutivo (Novo, 2021). No método indutivo, a experiência é a fonte primordial para a mensuração, abstração, classificação e ordenação lógica do estudo. Por outro lado, o método dedutivo estabelece a base a partir do modelo conceitual que orienta a hipótese e, conseqüentemente, a trajetória a ser seguida.

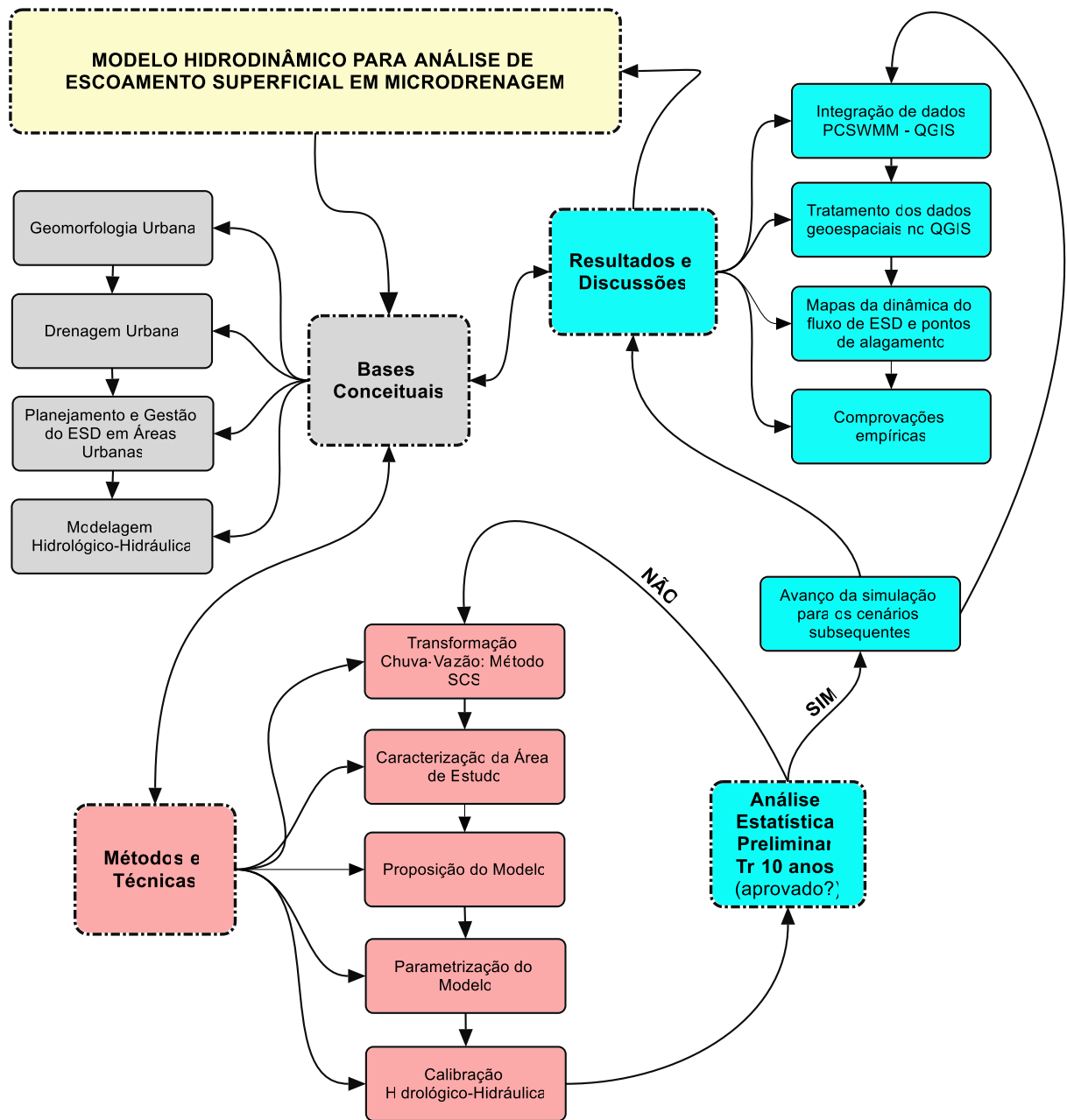
O método utilizado visa atender ao objetivo principal, que abrange a aquisição, tratamento e análise de dados geoespaciais, proporcionando uma compreensão mais aprofundada da dinâmica do escoamento superficial em um recorte específico da morfologia urbana na escala de microdrenagem. Isso inclui operações como a aquisição de dados e a parametrização do modelo proposto.

Os estudos de Smith (1997), Zoppou (2001), Schumann *et al.* (2009), Fernández & Lutz (2010), Brunner (2016) e Birgani & Azdandoost (2018) ressaltam a importância das abordagens empíricas e da utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) em conjunto com a modelagem hidrológica.

Após a validação estatística do arranjo espacial do modelo hidrodinâmico simulado no *software* PCSWMM 1D/2D, versão 7.6 (CHI, 2022), para o cenário urbanístico de 2013/2014 com Tr de 10 anos, procede-se à organização, tratamento e análise espacial dos dados resultantes no QGIS (Team Developer, 2020) para este cenário e subsequentes, seguido da elaboração dos mapas da dinâmica do fluxo de ESD e pontos de alagamento.

Salienta-se que a pesquisa contempla dois cenários urbanísticos para a área de estudo — o Campus Santa Mônica da UFU: 1) o Plano Diretor de 1991 e 2) o levantamento topográfico planialtimétrico cadastral realizado entre 2013 e 2014. Ambos os cenários consideram Tempos de Recorrência de 10 e 50 anos para a chuva de projeto. O fluxograma síntese da metodologia empregada é apresentado a seguir (Figura 18).

Figura 18 – Fluxograma síntese da metodologia empregada.



Fonte: O autor.

2.1 Transformação Chuva-Vazão: Método SCS

O método do *Soil Conservation Service* (SCS) destaca-se como um dos procedimentos mais utilizados no meio técnico-científico para a transformação chuva-vazão. Esta metodologia é fruto de extensivas pesquisas de campo realizadas na primeira metade do século XX, visando aprimorar as ferramentas de planejamento destinadas a pequenas bacias hidrográficas rurais, geralmente não monitoradas, nos Estados Unidos (Nascimento, 2011).

Desenvolvido pelo SCS na década de 1950 e atualmente sob a égide do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), órgão vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, o método foi concebido para atender às demandas relacionadas à obtenção de dados hidrológicos e à determinação e gestão do escoamento superficial. Seu propósito principal reside na prevenção e controle dos efeitos erosivos em áreas cultivadas (Tucci, 1995; Grove, Harbor & Engel, 1998; Hawkins, 2009; Lima, 2017).

Este método viabiliza o cálculo do coeficiente "C" na "equação racional" ou "método racional" (Equação 1), utilizando as características físicas da bacia hidrográfica. O mecanismo é fundamentado em um parâmetro representado pela sigla CN (*Curve Number* ou *Complex Number*), definido após extensivos estudos realizados em bacias hidrográficas dos Estados Unidos, com valores compreendidos entre 0 (zero) e 100 (cem).

A metodologia permite a estimativa da chuva efetiva (ou excedente), que corresponde à parcela de precipitação convertida em escoamento superficial. O processo, baseado no CN, estabelece uma relação entre as características do solo e o uso e ocupação das terras na bacia. Para derivar o Hidrograma Unitário Triangular correspondente, emprega-se o método NRCS-HUT (Lima, 2017).

O CN tem como objetivo caracterizar o tipo de uso e cobertura da superfície, considerando o potencial de produção de escoamento superficial (Nunes *et al.*, 2011). Entre os principais determinantes desse parâmetro, incluem-se os grupos hidrológicos de solo, a condição hidrológica, o histórico anterior de produção de *runoff* (escoamento superficial), bem como o panorama de impermeabilização das áreas de captação e a dinâmica do fluxo gerado, antes de sua efetiva contribuição no sistema de drenagem (TR-55 – USDA, 1986).

Segundo o SCS-USDA, o cálculo do coeficiente de escoamento superficial parte da seguinte premissa (Equação 3):

$$\frac{I}{S} = \frac{C}{P_e} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde, “I” é a infiltração acumulada após o início do escoamento superficial; “S” é a infiltração potencial (retenção máxima potencial do solo); “C” é o escoamento superficial total (chuva excedente); e “P_e” é o escoamento potencial ou precipitação efetiva (Equação 4), com todas as unidades em milímetros (mm). A Equação 3 é válida somente a partir do início do escoamento superficial, sendo:

$$P_e = P - I_a \quad (\text{Equação 4})$$

Onde “P” equivale a precipitação total (chuva acumulada); “I_a” são abstrações iniciais do método, ambos em milímetros (mm). Após a ocorrência de “I_a”, começa o escoamento superficial propriamente dito. A partir deste momento tem-se (Equação 5):

$$P_e = C + I \quad (\text{Equação 5})$$

Segundo o TR-55 (USDA, 1986), a perda inicial (I_a) inclui a água interceptada pela vegetação, por evaporação, infiltração e aquela retida nas depressões do terreno. Substituindo “I” isolado da Equação 5 na 1, tem-se (Equação 6):

$$C = \frac{(P_e)^2}{(P_e + S)} \quad (\text{Equação 6})$$

Na sequência, a análise do comportamento verificado nas bacias hidrográficas experimentais, permitiu ao SCS-USDA convencionar o valor da perda inicial por interceptação e depressões superficiais, como 20% da retenção/infiltração potencial do solo, sendo (Equação 7):

$$I_a = 0,2S \quad (\text{Equação 7})$$

Introduzindo as Equações 4 e 7 na Equação 6, obtêm-se as seguintes relações para o escoamento superficial total ou chuva excedente (C) (Equação 8):

$$C = 0 \text{ para } P < 0,2S; \quad C = \left[\frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \right] \text{ para } P > 0,2S \quad (\text{Equação 8})$$

Para estabelecer a capacidade máxima de retenção potencial do solo "S" (em milímetros) após o início do escoamento, o método SCS utiliza a análise de uma série de hidrogramas, relacionando esse parâmetro com o fator CN, o qual é tabelado para diferentes tipos de uso, ocupação e cobertura da terra, por meio da seguinte expressão (Equação 9):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Equação 9})$$

Essa relação retrata as condições de cobertura do solo, variando desde uma área totalmente impermeável (CN = 100) à situação de alta condutividade hidráulica (CN = 0) (SUDERHSA, 2002).

Conforme McCuen (1998), os pesquisadores do SCS conduziram estudos abrangendo mais de 4.000 tipos de solos nos Estados Unidos, visando avaliar o potencial de escoamento superficial (*runoff*). Esses solos foram categorizados em quatro grupos hidrológicos, designados pelas letras A, B, C e D. Posteriormente, Porto (1995) e Tucci (2001) complementaram essa classificação, incorporando a capacidade mínima de infiltração para cada classe (Quadro 5).

Quadro 5 - Grupos e características dos solos - Método SCS.

Grupo de Solo	Características
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8 %, não havendo rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,50 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1 % (Porto, 1995). Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila (Tucci, 2001).
B	Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15 %. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20 % graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5 %. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,50 m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que a camada superficial (Porto, 1995). Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média (Tucci, 2001).
C	Solos barrentos com teor total de argila de 20 % a 30 %, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidade de 1,20 m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40 % e 1,50 m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade (Porto, 1995). Solos que geram escoamento superficial acima da média, com capacidade de infiltração abaixo da média. Pouco profundos e com percentagem considerável de argila (Tucci, 2001).
D	Solos argilosos (30 % a 40 % de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como do grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados (Porto, 1995). Solos pouco profundos contendo argilas expansivas, com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial (Tucci, 2001).

Fonte: Porto (1995) e Tucci (2001). Organização: O autor.

O número da curva de escoamento superficial (CN) é determinado pela combinação empírica de três fatores: grupo de solo, uso e cobertura da terra, e condições antecedentes de umidade, como apresentado no Quadro 6 (McCuen, 1998).

Quadro 6 - Condições antecedentes de umidade do solo.

Condições Antecedentes de Umidade do Solo	Condição do Solo
I	Solo seco.
II	Condição intermediária - padrão das tabelas do número CN.
III	Solo saturado - ocorrência de precipitações nos últimos cinco dias.

Fonte: McCuen (1998). Organização: O autor.

Por padrão, as tabelas do CN para bacias hidrográficas rurais e urbanas (Tabelas 6 e 7, respectivamente) são específicas para as condições normais antecedentes (Condição II do Quadro 6). Em casos de condições antecedentes diferentes (Condição I ou III), é necessário realizar ajustes utilizando a Tabela 5.

Tabela 5 - Ajuste do número CN da condição II para as condições de solo seco (I) ou saturado (III).

Condição Intermediária do Solo (CN - Condição II)	Número CN correspondente	
	Condição I	Condição III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Fonte: McCuen (1998). Organização: O autor.

Tabela 6 - Valores de CN para bacias rurais.

Uso e Cobertura do Solo	Grupo de Solo			
	A	B	C	D
Solo lavrado: com sulcos retilíneos	77	86	91	94
em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares em curvas de nível	67	77	83	87
terraceado em nível	64	76	84	88
em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais em curvas de nível	62	74	82	85
terraceado em nível	60	71	79	82
em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados em curvas de nível	60	72	81	84
terraceado em nível	57	70	78	89
pobres	68	79	86	89
normais	49	69	79	94
boas	39	61	74	80
Pastagens pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
normais, em curvas de nível	25	59	75	83
boas, em curvas de nível	06	35	70	79
Campos permanentes normais	30	58	71	78
esparsos, de baixa transpiração	45	66	77	83
normais	36	60	73	79
densos, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras com estradas de terra normais	56	75	86	91
más	72	82	87	89
de superfície dura	74	84	90	92
Florestas muito esparsas, com baixa transpiração	56	75	86	91
esparsas	46	68	78	84
densas, alta transpiração	26	52	62	69
normais	36	60	70	76

Fonte: Tucci (2001). Organização: O autor.

Tabela 7 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.

Uso e Cobertura do Solo	Grupo de Solo			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Florestas: cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições				
Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m2)	% média impermeável			
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci (2001). Organização: O autor.

Conforme observado por Tomaz (2002), as equações que dependem do valor do número da curva de escoamento superficial (CN) apresentam algumas limitações. Entre essas, destacam-se: (i) a equação da capacidade máxima de retenção potencial "S" não levar em consideração os parâmetros de tempo, duração e intensidade da chuva; e (ii) a origem do método de determinação da chuva excedente, inicialmente concebido a partir de estudos realizados em bacias hidrográficas predominantemente agrícolas.

Ressalta-se que a aplicação de métodos fundamentados na teoria do Hidrograma Unitário (saída - escoamento) requer a determinação do hietograma da chuva excedente. Esse hietograma pode ser obtido, entre outros métodos, a partir do hietograma de precipitação (entrada - precipitação) mediante a aplicação do método SCS aos valores acumulados de chuva em intervalos de tempo específicos (Tucci, 1995).

Veneziani (2014) optou, em seu estudo, pela modelagem chuva-vazão de Ven Te Chow-SCS proposta por Wilken (1971) e sintetizada por Nunes (2007). Esse modelo parte das mesmas premissas do método do *Soil Conservation Service* (SCS-USDA), que considera as vazões de cheias proporcionais às chuvas, incorporando a transformação contida na relação chuva-vazão. Em seguida, Veneziani seguiu a teoria de Chow (1988) e avaliou os dados usando o modelo de Hidrograma Unitário sintético proposto pelo SCS para a análise do excesso de chuva, utilizando o CN.

Nessa perspectiva, Silveira (2001) destaca que as bacias hidrográficas atuam como sistemas físicos, onde o *input* é representado pelo volume de água precipitado e o *output* é o volume de água escoado pelo exutório. Essa análise também considera observações oportunas das abstrações iniciais, como a água interceptada pela vegetação, a evaporação, a infiltração e a água retida nas depressões do terreno.

O Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - SWMM, desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (U.S. EPA, 2010), adota a abordagem de discretização das sub-bacias em subáreas permeáveis e impermeáveis. Essas subáreas, por sua vez, podem ser subdivididas em duas categorias: uma que inclui armazenamento em depressão e outra que não.

As perdas relacionadas à permeabilidade do solo são calculadas por meio de representações matemáticas do movimento da água em terrenos não saturados (Porto, 1995; Silveira *et al.*, 2001). A infiltração em uma zona não saturada em uma subárea permeável de uma determinada sub-bacia pode ser estimada de acordo com o U.S. EPA (2010), utilizando

modelos de infiltração, como o de Horton, Green-Ampt, ou a Curva Número do SCS. O modelo de Horton baseia-se em observações empíricas, mostrando que a taxa de infiltração diminui exponencialmente desde um valor inicial máximo até atingir um valor mínimo ao longo do evento de chuva.

Para o método de Horton, os parâmetros de entrada essenciais incluem as taxas de infiltração máxima e mínima, o coeficiente de decaimento (que descreve a rapidez com que a infiltração diminui ao longo do tempo) e o tempo necessário para que um solo saturado seque completamente.

Na modelagem da infiltração pelo método de Green e Ampt, é necessário assumir a existência de uma frente de umedecimento na coluna de solo, separando uma camada com a umidade inicial de outra situada na parte superior, onde o material está saturado. Os parâmetros elementares para esse método incluem o valor do déficit inicial de umidade do solo, a condutividade hidráulica e o potencial matricial na frente de umedecimento (U.S. EPA, 2010)

O método do SCS para o cálculo das perdas por infiltração é uma aproximação adotada a partir da Curva-Número (CN) do NRCS (*National Resources Conservation Service*) para estimativa do escoamento superficial. Este método considera que a capacidade total de infiltração do solo pode ser obtida por meio das tabelas de números CN. Durante a precipitação, essa capacidade é reduzida em função da chuva acumulada e da capacidade de infiltração remanescente. Os parâmetros de entrada para esse método são o número CN e o tempo que leva um solo saturado para secar completamente.

Em resumo, até este ponto, nota-se que as perdas relacionadas ao princípio da precipitação e à formação da lâmina líquida excedente marcam o início da fase de produção do escoamento superficial urbano, delineando a dinâmica do deslocamento do fluxo de água sobre as superfícies adjacentes da cidade. Também é observado que o ESD apresenta um pico crítico característico para cada evento e um fluxo desarmônico ao longo da superfície complexa das cidades. Devido a essa complexidade, que envolve áreas impermeáveis e permeáveis, torna-se necessário o uso de métodos hidrológicos aplicáveis ao cálculo do ESD, como o método do *Soil Conservation Service* (SCS-USDA).

Nesse contexto, diversos modelos são empregados para calcular o volume de escoamento superficial, cada um com vantagens e desvantagens inerentes. Contudo, nas pesquisas

contemporâneas de hidrologia urbana, a eficiência relativa ou precisão de um método em comparação com outros não pode ser determinada de maneira definitiva (Luo *et al.*, 2022).

A convergência da água da chuva na superfície tem como destino a infraestrutura de drenagem, composta principalmente por redes e canais. A principal causa de alagamentos em ruas urbanas é frequentemente atribuída à capacidade insuficiente desse sistema de captação de água (Mark, *et al.*, 2004). Dado que os métodos hidrológicos operam com base em um conjunto integrado de variáveis, eles têm a capacidade de simular a confluência das águas pluviais, estabelecendo a relação entre a entrada e saída de água (Luo *et al.*, 2022).

O roteamento do transporte hidráulico em condutos livres ou canais abertos é realizado pela aplicação numérica das equações unidimensionais de conservação de massa e quantidade de movimento, conhecidas como equações de Saint Venant, desenvolvidas no século XIX. De acordo com Porto (2006), essas fórmulas representam leis fundamentais que servem como base para estudos sobre os transientes hidráulicos em escoamentos livres.

Assim, ao analisar o comportamento do escoamento superficial em cruzamentos viários urbanos, a validade das hipóteses hidrodinâmicas unidimensionais torna-se incerta, o que justifica a recomendação de combinar este método com modelos bidimensionais, conforme sugerido por Porto (2006). Além de proporcionar descrições mais precisas dos fatores hidráulicos, a utilização combinada de modelos 1D/2D permite a simulação de fluxos pluviais locais mais complexos.

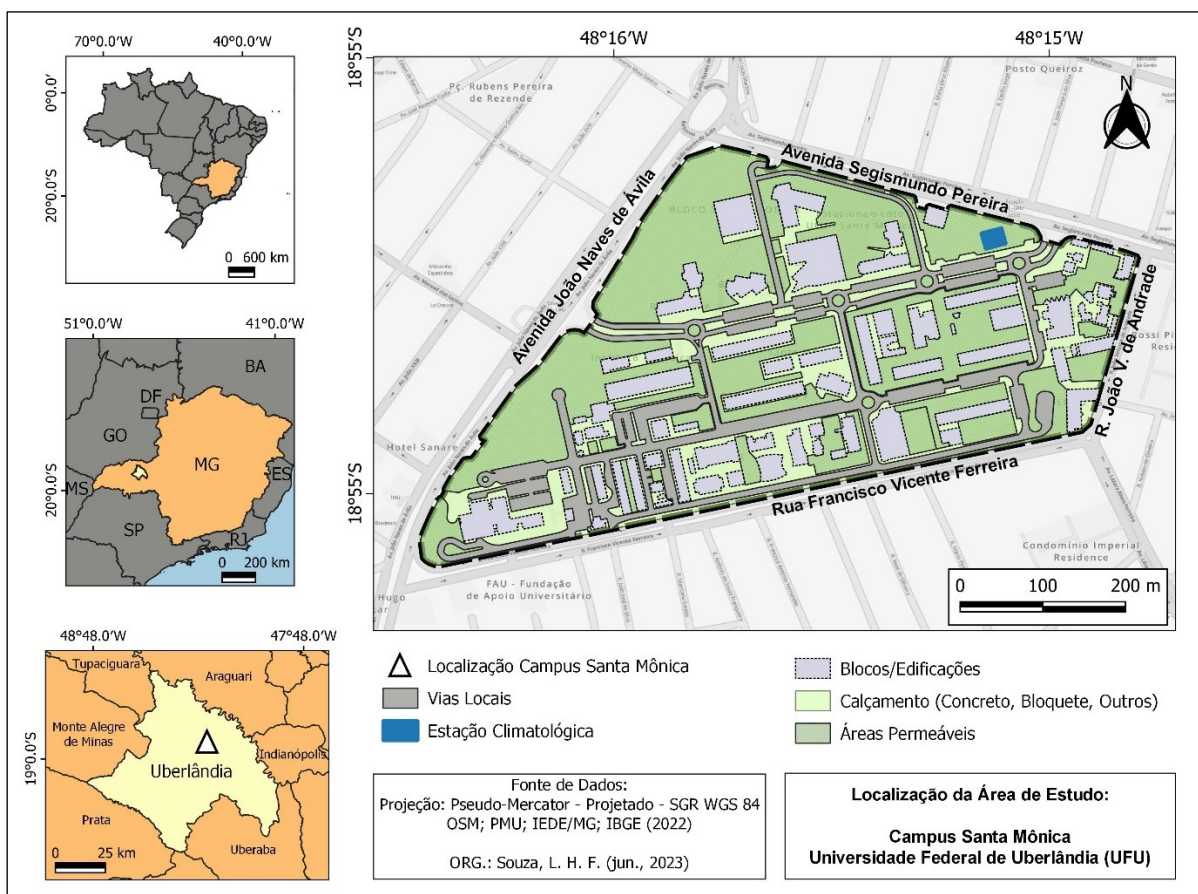
Embora todas as modelagens envolvam algum grau de simplificação, especialmente ao prever fenômenos complexos como as inundações urbanas, a limitação em incluir todos os detalhes não deve desencorajar a aplicação da abordagem 1D, desde que utilizada com prudência em relação aos resultados obtidos (Mark, *et al.*, 2004).

2.2 Caracterização da Área de Estudo

A realização da simulação de *runoff* (Escoamento Superficial Direto – ESD) em escala espacial detalhada, por meio de um modelo hidrológico-hidráulico no ambiente PCSWMM, demandou a escolha criteriosa de um sítio geográfico, guiada por critérios específicos. Um requisito fundamental incluiu a predominância de uso e cobertura urbanos, a presença de solo parcelado em quadras e lotes, e a existência de uma infraestrutura viária consolidada.

Dessa forma, foi delimitada a área de estudo compreendida pelo Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), localizado na porção oeste do Estado de Minas Gerais, conforme a divisão regional do Brasil estabelecida em 2017 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A escolha desse local foi motivada por sua clara aptidão urbana, evidenciada por uma extensa quadra dividida em grandes lotes internos, edificados e servidos por um sistema viário próprio (Figura 19).

Figura 19 - Localização da Área de Estudo.



Fonte: O autor.

2.2.1 Contexto Urbano

A escolha da área de estudo foi respaldada, entre outros atributos, pela disponibilidade de uma base cartográfica proveniente do Levantamento Topográfico Planialtimétrico Cadastral (Anexo 1), contratado pela UFU entre 2013 e 2014. Essa base, fornecida no formato ".dwg" (*AutoCAD Drawing*) pela Divisão de Cadastro Integrado do Espaço Físico (DICIE-UFU, 2022), integra o conjunto de documentos cartográficos do Campus Santa Mônica. Está vinculada ao Sistema Geodésico Brasileiro SIRGAS 2000, com projeção UTM, curvas de nível a cada metro e escala 1:1000.

A amostra situa-se no município de Uberlândia, que ocupa uma área territorial de 4.115,21 km² (IBGE, 2022), sendo aproximadamente 3,50% dessa extensão compreendida pela área urbanizada (MapBiomias, 2023), predominantemente inserida na bacia hidrográfica do rio Uberabinha (Rosa, 2017; Rosa & Ferreira, 2022).

Os limites municipais confrontam-se ao norte com Tupaciguara e Araguari, a leste com Indianópolis, ao sul com Prata, Veríssimo e Uberaba, e a oeste com Monte Alegre de Minas. De acordo com o IBGE, a população censitária de 2022 é de 713.224 pessoas (IBGE, 2022).

A região urbana é cruzada por vias estratégicas que proporcionam uma conexão direta com importantes capitais brasileiras, como São Paulo, Belo Horizonte, Brasília e Goiânia. No setor leste, o Campus Santa Mônica é acessado pelas avenidas Segismundo Pereira e João Naves de Ávila. Seus limites fazem fronteira com os bairros Santa Maria, Progresso e Santa Mônica. A área do campus está integralmente situada dentro do bairro Santa Mônica, que, por sua vez, está aproximadamente a 2,00 km do centro da cidade (Prieto, 2005).

Conforme o Mapa do Campus Santa Mônica (Figura 20), elaborado pela Diretoria de Infraestrutura (DIRIE-UFU, 2018) e disponível no site da Universidade, a área atualmente engloba 62 blocos destinados a salas de aula, laboratórios, unidades técnicas e administrativas, guaritas, restaurante, lanchonete, áreas de convivência, praças, estacionamentos, quadra e campo para prática esportiva.

O sistema viário interno é composto por duas vias principais orientadas no sentido do maior comprimento do campus, além de ruas secundárias perpendiculares ao eixo principal, todas pavimentadas com revestimento asfáltico.

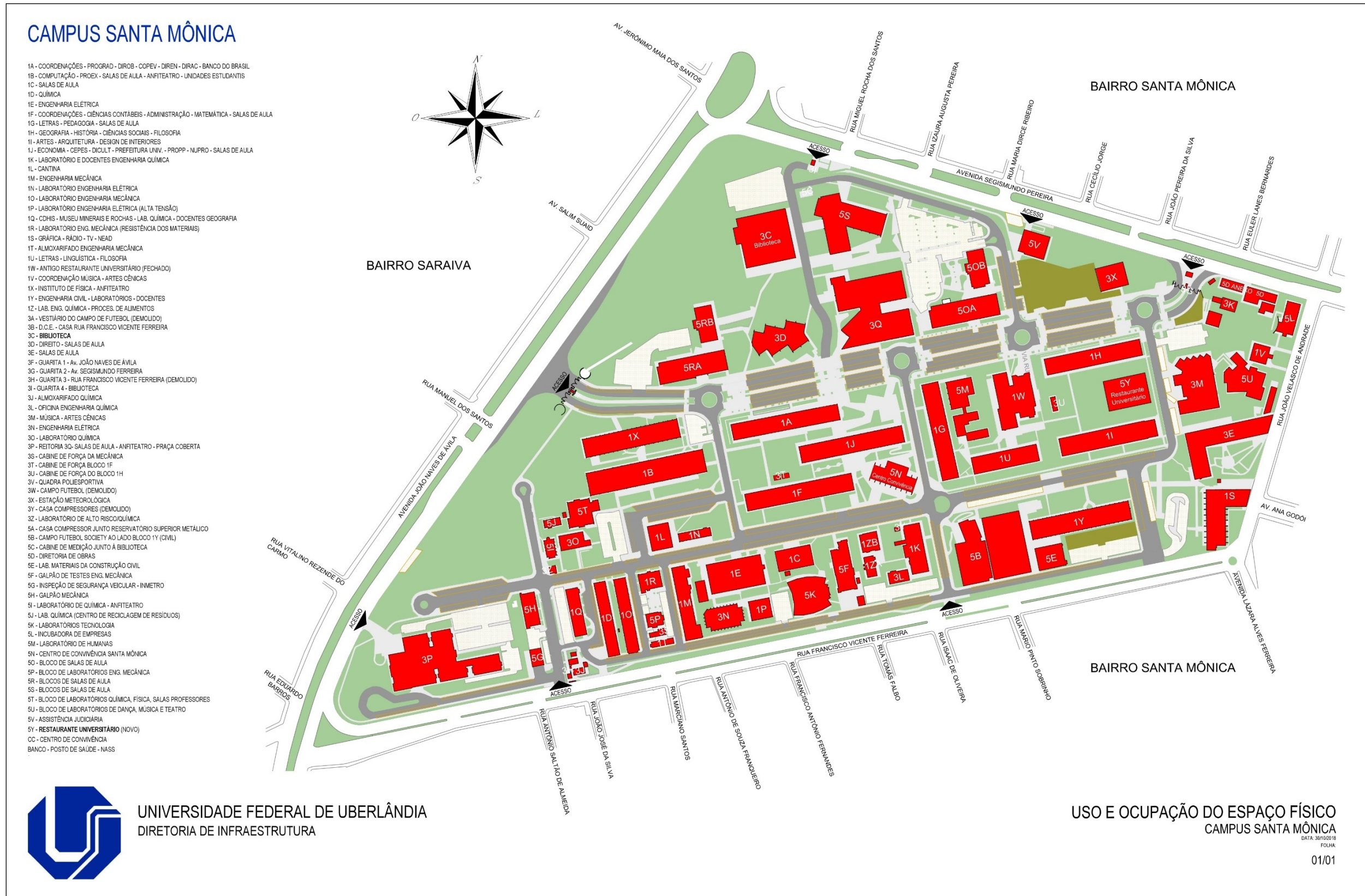
Adicionalmente, na Planta Cadastral de Propriedades (DIRIE-UFU, 2018) (Figura 21), disponível no Sistema Eletrônico de Informações sob n.º 23117.081762/2018-24 (SEI/UFU, 2022), é possível discernir os limites dos terrenos que deram origem à área atual do Campus Santa Mônica, bem como a disposição de suas ruas internas.

A legenda da Figura 21 destaca duas divisas: o "limite real" (linha tracejada), e o "limite legal" ou de fato (linha contínua) do Campus. O primeiro contém 26,10 hectares fisicamente delimitado por alambrados, muros e outros dispositivos e o segundo, abrange 28 hectares de área legal conforme consta na Planta Cadastral de Propriedades (DIRIE-UFU, 2018).

O Plano Diretor Físico da UFU, concebido no início de 1991, compreende um momento em que praticamente todos os campi (Santa Mônica, Umuarama e Educação Física) já haviam consolidado seus arranjos urbanísticos, acadêmicos e administrativos.

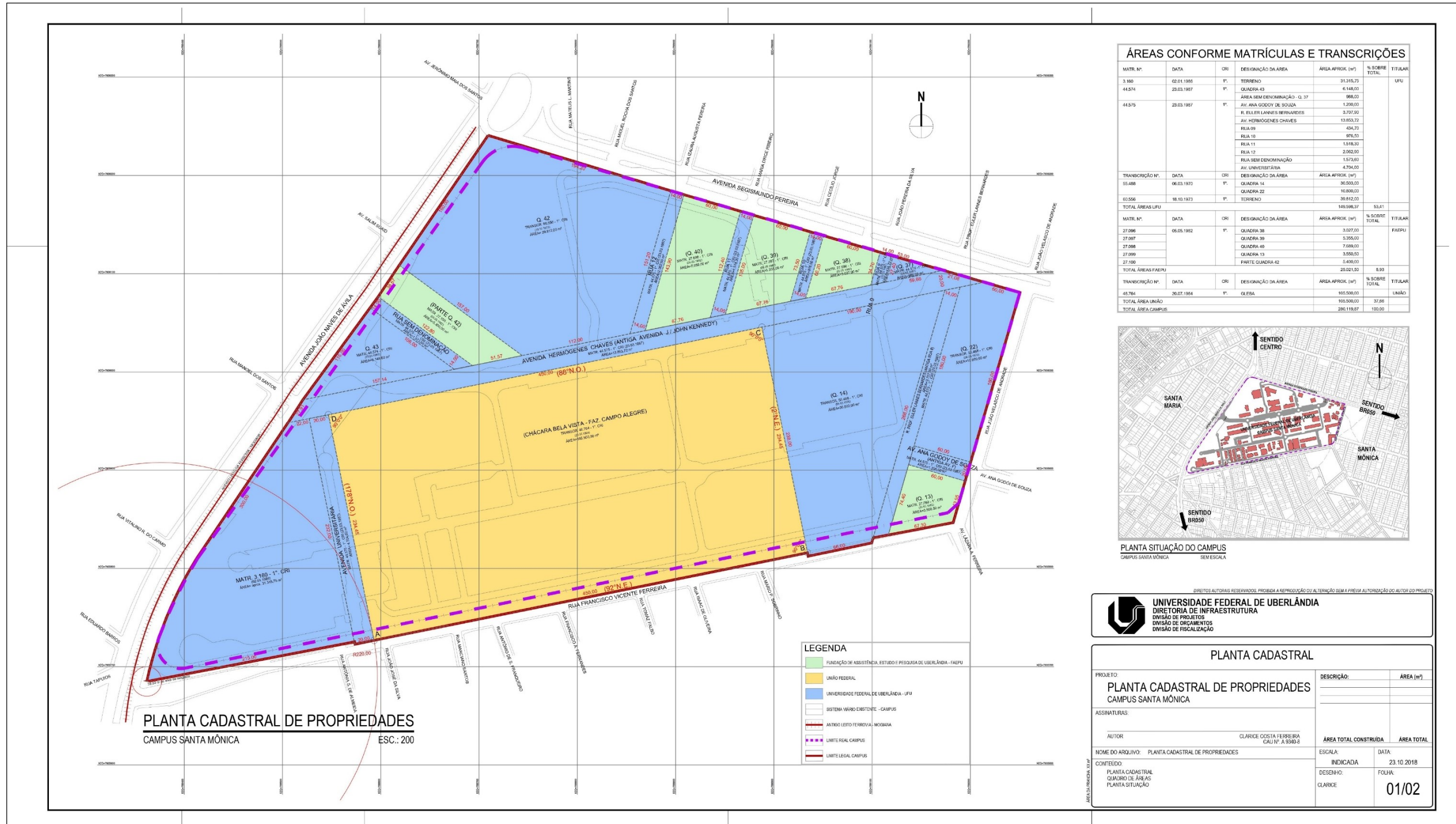
O documento esclarece que a configuração atual da área de estudo resultou da unificação de diversos terrenos doados à Universidade, totalizando uma área de quase 28 hectares (DICIE-UFU, 1991). A versão desse plano está disponível no site da Divisão de Cadastro Integrado do Espaço Físico (DICIE-UFU, 2022), e as diretrizes, originalmente formuladas para o uso e ocupação dos três campi da UFU, não passaram por revisões formais, sofrendo apenas alterações pontuais discutidas nos conselhos superiores da Universidade (Prieto, 2005).

Figura 20 - Mapa do Campus Santa Mônica.



Fonte: Diretoria de Infraestrutura (DIRIE-UFU, 2018)

Figura 21 - Planta Cadastral de Propriedades - Campus Santa Mônica.



Fonte: DIRIE-UFU (2018). Disponível no Sistema Eletrônico de Informações sob n.º 23117.081762/2018-24 (SEI/UFU, 2022)

Considerando dados urbanísticos para os dois cenários propostos, ou seja, para o ano de 1989 e para o período de 2013/2014, complementados por observações de campo e imagens de satélite disponíveis gratuitamente no Google Earth (Google, 2023), foi possível identificar as classes de interesse, conforme descrito nos Quadros 7 e 8:

Quadro 7 – Diretrizes Urbanísticas: Cenário correspondente ao plano viário e topografia do Plano Diretor 1989.

DIRETRIZES URBANÍSTICAS - CAMPUS SANTA MÔNICA – PLANO DIRETOR, 1989				
ÁREA REAL DO CAMPUS (ha)	OCUPAÇÃO DA TERRA			OBS.:
	TAXA DE OCUPAÇÃO T.O. (%)	ÁREA PERMEÁVEL (%)	ÁREA SEMI-PERMEÁVEL + ÁREA IMPERM. (%)	
ARC*	ACPT**/ARC			1- Dados Estimados Extraídos do Plano de Ocupação (1989) anexo ao Plano Diretor Físico UFU (1991); 2- Área semipermeável considerada área de influência igual a 1,2x a projeção da área construída.
27,18	15,00	54,00	31,00	
(*) ARC - Área Real do Campus Santa Mônica..... 27,18 ha (**) ACPT - Área Construída Pavto Térreo..... 4,07 ha Área Parcelada..... 23,55 ha Área Permeável..... 14,60 ha Área Semipermeável (1,2x Área Construída)..... 4,88 ha Área Impermeável (pavimentada)..... 3,63 ha				

Fonte: Plano Diretor Físico da Instituição (DICIE-UFU, 1991). Organização: O autor.

Quadro 8 – Diretrizes Urbanísticas: Cenário correspondente ao levantamento topográfico da R&V 2013-2014.

DIRETRIZES URBANÍSTICAS - CAMPUS SANTA MÔNICA – R&V, 2013-2014				
ÁREA REAL DO CAMPUS (ha)	OCUPAÇÃO DA TERRA			OBS.:
	TAXA DE OCUPAÇÃO T.O. (%)	ÁREA PERMEÁVEL (%)	ÁREA SEMI-PERMEÁVEL + ÁREA IMPERM. (%)	
ARC*	ACPT**/ARC			1- Dados Estimados Extraídos do Levantamento R&V Eng ^a Ltda. (2014); 2- Área semipermeável considerada área de influência igual a 1,2x a projeção da área construída; 3- ARC sofreu redução devido ao ajuste do sistema viário.
26,10	21,00	35,00	44,00	
(*) ARC - Área Real do Campus Santa Mônica..... 26,10 ha (**) ACPT - Área Construída Pavto Térreo..... 5,52 ha Área Parcelada..... 21,16 ha Área Permeável..... 9,02 ha Área Semipermeável (1,2x Área Construída)..... 6,62 ha Área Impermeável (pavimentada)..... 4,94 ha				

Fonte: Levantamento topográfico (R&V, 2013-2014). Organização: O autor.

Observa-se que, tanto no primeiro cenário quanto no mais recente, existem dois limites que delimitam as fronteiras do campus: o "limite real", composto por barreiras físicas como muros, alambrados e portões, e o "limite legal" ou de fato, que abrange 28,00 hectares, conforme a Planta Cadastral de Propriedades (DIRIE-UFU, 2018). Notavelmente, em relação ao "limite real", os quadros anteriores indicam uma redução da área, passando de 27,18 hectares no primeiro caso para 26,10 hectares no segundo, devido aos ajustes no desenho urbanístico externo, adaptado principalmente para atender ao aumento do volume de tráfego de veículos.

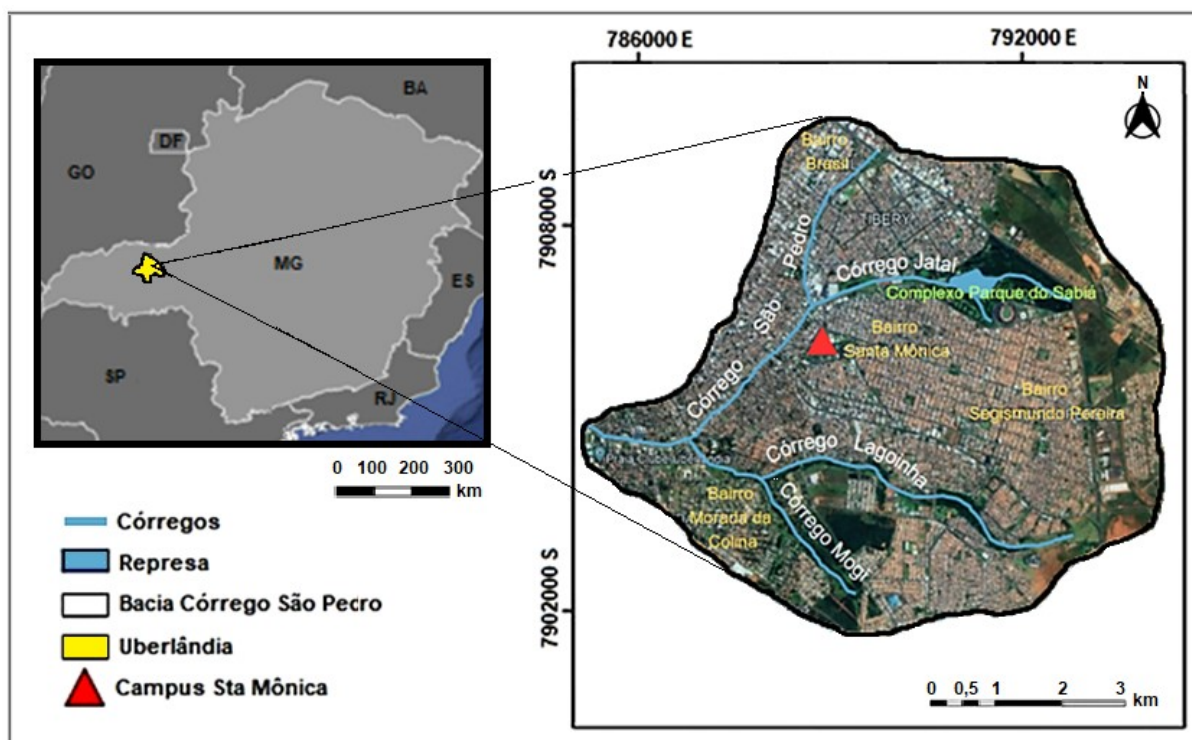
A porção da área semipermeável em ambos os casos inclui a soma das áreas descobertas localizadas entre os blocos e outras edificações, como estacionamentos e espaços verdes. Essa categoria abrange elementos superficiais, como pisos de bloquetes, britamento e vegetação rasteira e arbustiva. Para fins de contabilização, foi adotado um critério estimativo que considera a área semipermeável como a área construída acrescida de 20%

2.2.2 Hidrologia

Geralmente, as bacias hidrográficas são definidas como áreas delimitadas por divisores de água, drenadas por um canal fluvial principal com afluentes e subafluentes, formando uma unidade hidrológica. No entanto, em ambientes urbanos, diferentes sistemas de captação e drenagem podem coexistir, comportando-se de maneira semelhante a uma bacia hidrográfica convencional. Esses sistemas são caracterizados como áreas de contribuição (Goudie, 2004). A Norma Brasileira NBR 10844 (ABNT, 1989), que estabelece diretrizes para projetos prediais de drenagem de águas pluviais, define área de contribuição como a soma das áreas das superfícies que interceptam a chuva e conduzem as águas para um ponto específico de escoamento (exutório). Essas áreas podem incluir glebas, quadras, lotes, ruas, entre outros elementos.

O Campus Santa Mônica está localizado hidrograficamente na bacia do córrego São Pedro, conforme ilustrado na Figura 22, que abrange uma área total de 48,201 km². A maior parte dos limites desta bacia está concentrada em áreas urbanas. Além da área urbanizada, uma porção expressiva da bacia é designada como zona de transição, indicando uma área propensa à expansão. Uma pequena fração está localizada fora do perímetro urbano.

Figura 22 - Localização do Campus Santa Mônica na bacia hidrográfica do córrego São Pedro.



Fonte: Adaptado de Caixeta (2017). Organização: O autor.

Ramos *et al.* (2003) destacam que a escolha de diferentes métodos para definir a área de contribuição ou área drenada pode resultar em divergências consideráveis. Nesse contexto, o mapeamento de áreas urbanas torna-se extremamente sensível ao procedimento de cálculo da transferência de fluxo entre as células que compõem a matriz da área de estudo. A confiabilidade dos resultados está diretamente ligada à utilização de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) mais precisos e acurados. O desfecho de qualquer análise que dependa dos dados da área de contribuição será influenciado pela escolha da resolução espacial dos dados utilizados.

A pesquisa de Andrade *et al.* (2014) enfatiza o papel do desenho urbano das encostas da bacia do córrego São Pedro, influenciando diretamente a dinâmica do escoamento superficial direto. O padrão de arruamento existente direciona as águas pluviais para o canal principal, que foi canalizado em meados de 1970 e teve suas galerias expandidas ao longo das décadas seguintes, formando o traçado atual da Avenida Rondon Pacheco (Figura 23a). Em eventos importantes de precipitação, a avenida enfrenta grandes vazões de escoamento superficial proporcionado por bairros vizinhos, sendo o pico de vazão acelerado pelas condições de impermeabilização do solo. O efeito adverso supera a capacidade dos sistemas de drenagem, caracterizando a resposta hidrológica atual da bacia hidrográfica (Figura 23b).

Figura 23 (a) – Obra de expansão da galeria de águas pluviais do Córrego São Pedro (1992); (b) – Inundação na Avenida Rondon Pacheco registrada em 30/05/2013.



Fonte: (a) Google Imagens; (b) Jornal Estado de Minas. Organização: O autor.

Os fatores como o escoamento de alta dispersão causado pela impermeabilização do solo e a influência de uma morfologia caracterizada por ruas pavimentadas não são os únicos responsáveis pelas inundações recorrentes na Avenida Rondon Pacheco (Medeiros, 2015; Danelon, 2023). Além desses elementos, uma característica natural também contribui para a concentração de águas pluviais: a geometria circular da bacia hidrográfica, evidenciada pelo

Coefficiente de Compacidade ou índice de Gravelius ($K_c = 1.109$). Essa geometria proporciona condições favoráveis para a ocorrência de inundações, uma vez que o escoamento proveniente de diferentes setores da bacia tende a atingir o canal principal com tempos de contribuição semelhantes.

É notório que a área de estudo está situada em uma das vertentes mencionadas, com um dos acessos voltados para a Avenida João Naves de Ávila, que, em conjunto com a Avenida Rondon Pacheco, constitui a principal via de transporte da cidade de Uberlândia. Nesse contexto, Danelon (2023) destaca que a expansão urbana tem provocado sensíveis alterações na bacia do córrego São Pedro, devido ao elevado índice de impermeabilização do solo. O padrão de arruamento presente no bairro Santa Mônica e nas áreas adjacentes, por exemplo, contribui para os processos de concentração de fluxo, com os quarteirões funcionando como afluentes do canal principal, agravando os picos de cheia (Medeiros, 2015).

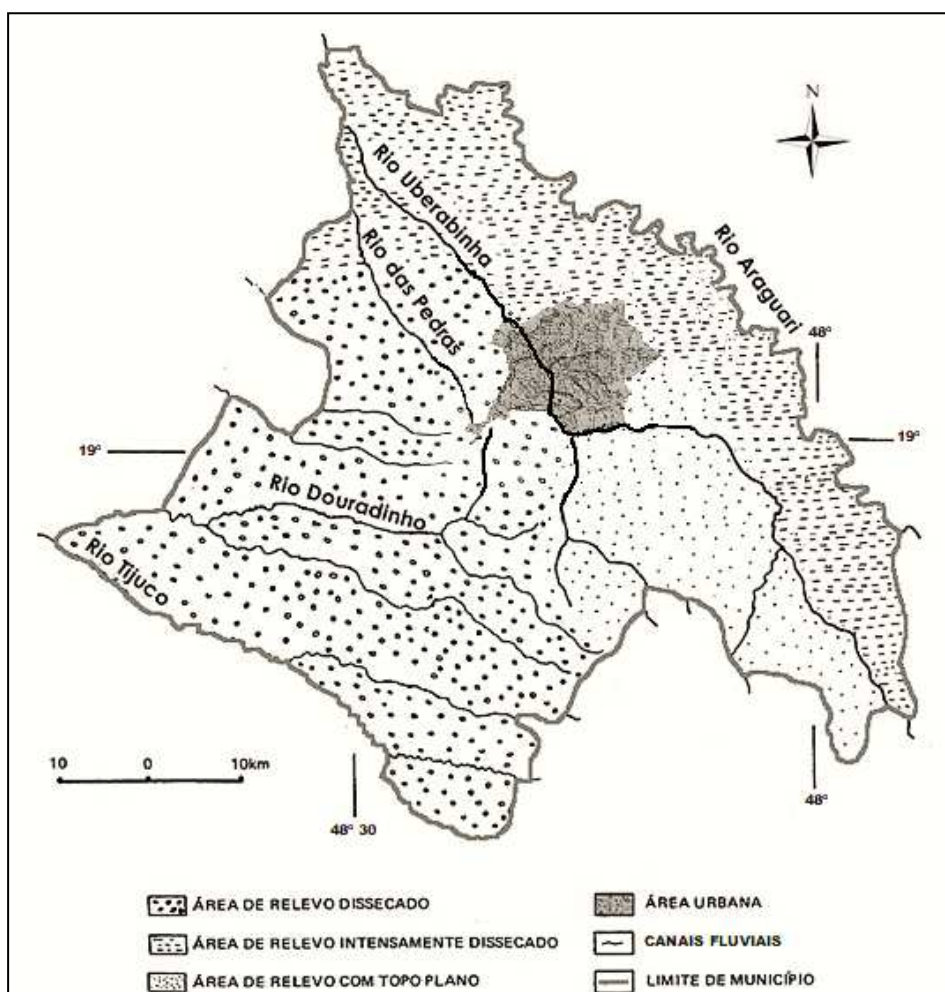
Ma *et al.* (2022) destacam que o desenvolvimento urbano resulta da interação entre atividades humanas e o meio ambiente, afetando a dinâmica das águas pluviais superficiais. A morfologia da bacia hidrográfica urbana é fundamental na determinação do curso do fluxo, e a complexidade desses espaços é evidenciada pela transferência regional do escoamento, que pode ocorrer através das vias de tráfego. Assim, uma área com alagamentos críticos pode não ser o local prioritário para mitigação. Em relação à captação externa de águas pluviais, a contribuição dos bairros adjacentes ao campus, como Santa Mônica e Progresso, é mínima devido ao cercamento com muretas e muros.

Considerando o momento em que o Plano Diretor da UFU foi desenvolvido, o documento destaca a necessidade de implementação de soluções integradas de captação, em conjunto com o sistema viário interno, e a construção de praças com pavimento permeável. Essas medidas visam garantir melhores condições de infiltração e escoamento superficial. Apesar das restrições para o aumento de áreas impermeáveis nos campi estabelecidas pelo Plano, Prieto (2005) conclui que as propostas delineadas foram praticamente ignoradas. Nesse contexto, Resende *et al.* (2009) ressalta que as relações envolvendo "clima, solos, organismos e aspectos socioeconômicos", especialmente os atributos "solo-água-cobertura superficial", devem ser consideradas nas análises de bacias, notadamente devido ao impacto direto na resposta hidrológica.

2.2.3 Geomorfologia

No âmbito mais amplo, o município de Uberlândia está situado no domínio dos Planaltos e Chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná, especificamente na subunidade do Planalto Setentrional desta (Radambrasil, 1983; CPRM, 2010). Predominantemente, apresenta um relevo tabular, levemente ondulado, com altitudes inferiores a 1.000 m (Baccaro, *et al.*, 2001; Rodrigues; Augustin & Nazar, 2023). Baccaro (1999) destaca que o relevo da região é predominantemente dissecado em formas tabulares amplas, exibindo escarpas com desnível superior a 150 m (Figura 24), e altitudes variando entre 600 e 900 metros (Silva & Mendes, 2018). Em linhas gerais, as formas geomorfológicas estão condicionadas às características das rochas desde a base até o topo, evidenciado nas proximidades do rio Araguari, onde são encontradas rochas pré-cambrianas do Grupo Araxá, basalto e arenito intertrapeado da Formação Serra Geral, além de arenitos cretáceos do Grupo Bauru, recobertos por sedimentos terciários e quaternários (Rodrigues, Augustin & Nazar, 2023).

Figura 24 – Unidades Geomorfológicas do Município de Uberlândia – MG.



Fonte: Adaptado de Baccaro (1999). Organização: O autor.

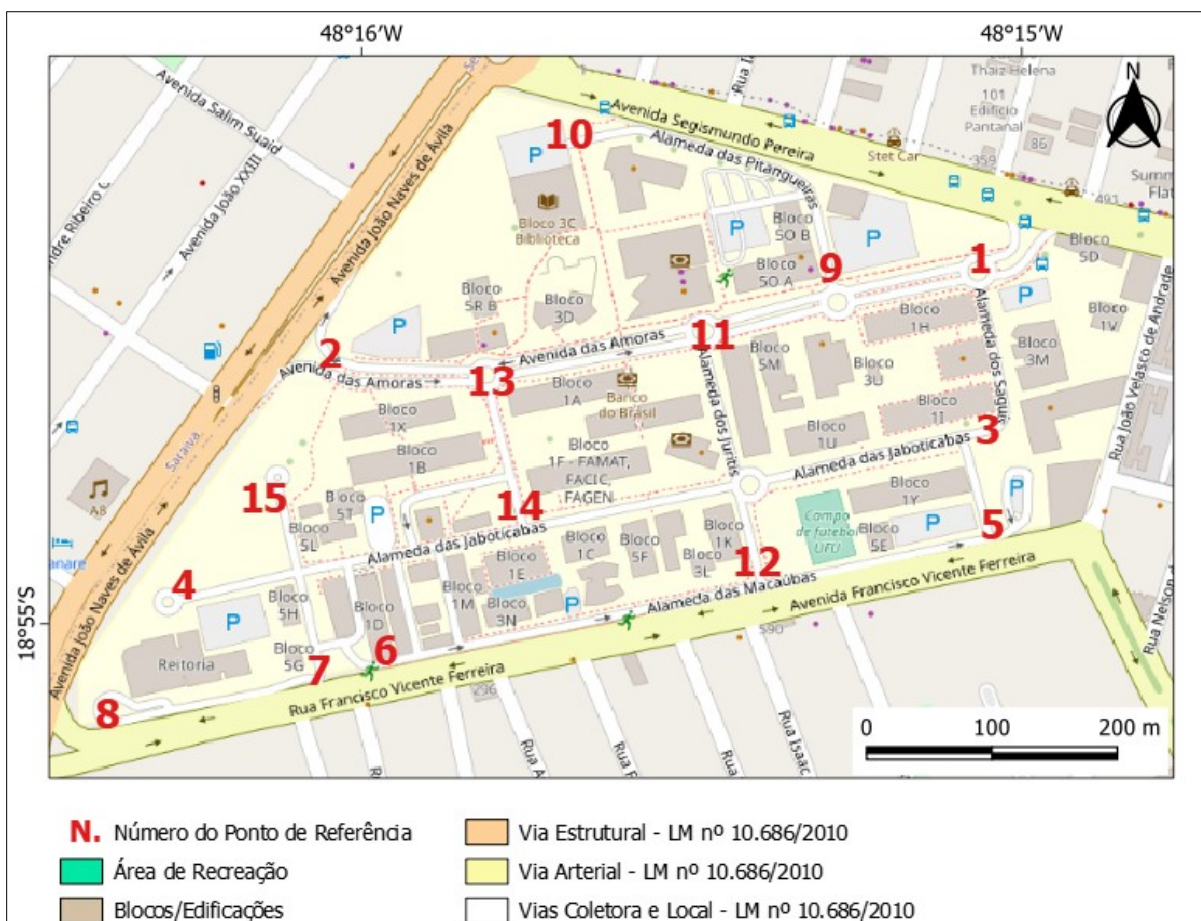
A cidade de Uberlândia está predominantemente situada no médio curso da bacia hidrográfica do rio Uberabinha, com sua borda leste abrangendo parte da bacia hidrográfica do rio Araguari (Borges *et al.*, 2021; Rosa & Ferreira, 2022). Notavelmente, há uma carência de estudos dedicados à Cartografia Geomorfológica de detalhe, especialmente em relação aos seus aspectos morfométricos (Pereira, 2021). No entanto, Silva & Mendes (2018) conduziram um mapeamento que identificou formas suavemente onduladas (índice de inclinação - $i\%$ de 3% a 8%), abrangendo praticamente todos os setores da cidade. Além disso, observa-se a presença de relevo ondulado ($i\%$ de 8% a 20%) nas proximidades dos cursos d'água, como o córrego São Pedro (canalizado) e formas fortemente onduladas ($i\%$ de 20% a 45%) no quadrante noroeste do perímetro urbano, seguindo o leito do rio Uberabinha (Medeiros, 2015; Rosa, 2017; Silva & Mendes, 2018). Conforme indicado pelo Plano Diretor (UFU, 1991), a área de estudo está localizada em uma encosta suave.

Feltran Filho & Lima (2007) empregaram técnicas morfométricas consolidadas por vários autores, tais como Horton (1945), Schumm (1956), Strahler (1952), Leopold, Wolman & Miller (1964), Christofletti (1980) e Feltran Filho (1982), para avaliar índices de relações numéricas considerando atributos de área e topografia na bacia do Uberabinha. Essa abordagem permitiu a obtenção de informações pertinentes sobre variáveis quantitativas e qualitativas, possibilitando uma análise espacial consequente. Entretanto, o estudo de Feltran Filho & Lima (2007) teve como limitação o uso de cartas topográficas editadas pelo IBGE, com a complementação dos canais fluviais por imagens de satélite TM/Landsat 5 do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), ambas na escala de 1:100.000. Isso restringiu as análises do perímetro urbano de Uberlândia a uma simples indicação do seu contorno, sem possibilidade de detalhamento dos aspectos morfométricos, claramente impedido pela generalização gráfica da escala utilizada.

Rosa & Ferreira (2022) propuseram uma divisão da paisagem na bacia hidrográfica do rio Uberabinha, com base na concepção geossistêmica clássica da escola francesa (Bertrand, 1968; Tricart, 1977), abrangendo o período de 1985 a 2020. Embora tenham obtido sucesso na análise detalhada e multiescalar da área, a cartografia dos elementos fisiográficos ficou restrita à representação do contexto físico fora do perímetro urbano. É evidente que a complexidade do ambiente e a incompatibilidade da escala espacial impedem uma abordagem mais específica da morfologia urbana, limitando, assim, as análises geomorfológicas nesta área específica.

Foi realizado um recorte da área de estudo, incluindo suas ruas internas e respectivas denominações. Em seguida, foram determinados 15 pontos de referência para a análise da declividade, abrangendo as vias locais do campus (Figura 25).

Figura 25 - Pontos de referência para análise da declividade das vias locais do Campus Santa Mônica.



Fonte: Adaptado de *OpenStreetMap* (OSM, 2023). Organização: O autor. Obs.: A Lei Municipal n.º 10.686/2010 estabelece as diretrizes do sistema viário do Município de Uberlândia.

A análise da declividade das vias de tráfego nos trechos específicos foi conduzida utilizando o suplemento QGIS "*Profile Tool*" para análise dos perfis topográficos em cada trecho. A avaliação das médias percentuais foi antecedida por uma validação amostral, empregando medidas de tendência central e de variação, conforme apresentado na Tabela 8.

A média da declividade obtida foi de aproximadamente 2,65%, com exceção das áreas de platôs e estacionamentos, que são mais planas. Destaca-se, entretanto, que os taludes próximos à confluência das avenidas João Naves de Ávila e Segismundo Pereira apresentam desníveis mais acentuados, variando em torno de 10%.

Tabela 8 - Declividades médias por trecho viário.

N.º Ponto / Altitude (m)		Trecho (na direção do tráfego das avenidas e no eixo médio da via)	Distância (m)	Δy (m)	Declividade média por trecho (%)
1 870,62	2 854,48	Avenida das Amoras (sentido 1-2)	520,82	16,14	3,10 %
3 872,62	4 857,67	Alameda das Jaboticabas (sentido 3-4)	688,01	14,95	2,17 %
5 874,33	6 863,43	Alameda das Macaúbas (sentido 5-6)	518,81	10,90	2,10 %
7 862,30	8 859,45	Alameda das Macaúbas (sentido 7-8)	150,66	2,85	1,89 %
9 867,86	10 858,75	Alameda das Pitangueiras (sentido 9-10)	281,41	9,11	3,24 %
12 871,36	11 867,43	Alameda dos Juritis (sentido 12-11)	201,64	3,93	1,95 %
14 865,15	13 861,52	Rua “sem nome” (sentido 14-13)	124,29	3,63	2,92 %
7 862,83	15 856,26	Avenida Universitária (ref. Figura 21) (sentido 7-15)	170,41	6,57	3,85 %
				$\bar{x} =$	2,65 %
				$s =$	0,72 %

NOTA: De acordo com a regra empírica para conjuntos de dados com distribuições aproximadamente simétricas, como descrito por Larson e Farber (2010), cerca de 95% das amostras estão situadas dentro de ± 2 desvios padrão da média. Essa observação justifica a utilização da medida de tendência central obtida (2,65%) como referência para a declividade na área de estudo.

Fonte: R&V (2013-2014); DIRIE-UFU (2018); QGIS *Team Developer* (2020). Organização: O autor.

Cabe ressaltar que, nas proximidades do ponto 1 identificado na Figura 25, situado nas coordenadas geográficas de latitude 18° 55' 01,93584"S e longitude 48° 15' 19,46908"W, encontra-se o Marco Geodésico do IBGE n.º 93616. Esse marco consiste em um pilar cilíndrico de concreto com altura de 1,10 m, cujas características estão detalhadas no relatório correspondente disponível no Banco de Dados Geodésicos - BDG (IBGE, 2023). O referido relatório também apresenta a altitude geométrica (h) medida no marco, a qual é de 861,547 m. Importante notar que a altitude obtida para o ponto 1, com base no Modelo Digital do Terreno (MDT) derivado do levantamento topográfico contratado pela UFU (R&V, 2013-2014), é de 870,62 m. A discrepância observada entre as altitudes mencionadas decorre da diferença conceitual entre a altitude ortométrica (acima do nível médio do mar) e a altitude geométrica ou elipsoidal. Essas altitudes são associadas a superfícies de referência distintas, resultando em uma aparente divergência entre os valores relatados (MAPGEO2015 - IBGE, 2015). Contudo, a modelagem proposta utiliza exclusivamente o Modelo Digital de Terreno (MDT) criado a partir do levantamento realizado pela R&V (2013-2014) como referência altimétrica.

Conforme enfatizado por Feng *et al.* (2020), a dinâmica do escoamento superficial está intrinsecamente ligada à elevação média e à relação espacial entre os elementos físicos da malha celular dimensionada. A topografia desempenha um papel elementar na determinação da direção do fluxo, uma vez que a água se desloca de montante para jusante. O comportamento altimétrico da área de estudo também pode ser observado nas Figuras 26, 27 e 28 a seguir.

Figura 26 - Direção dos perfis topográficos A-A' e B-B'.

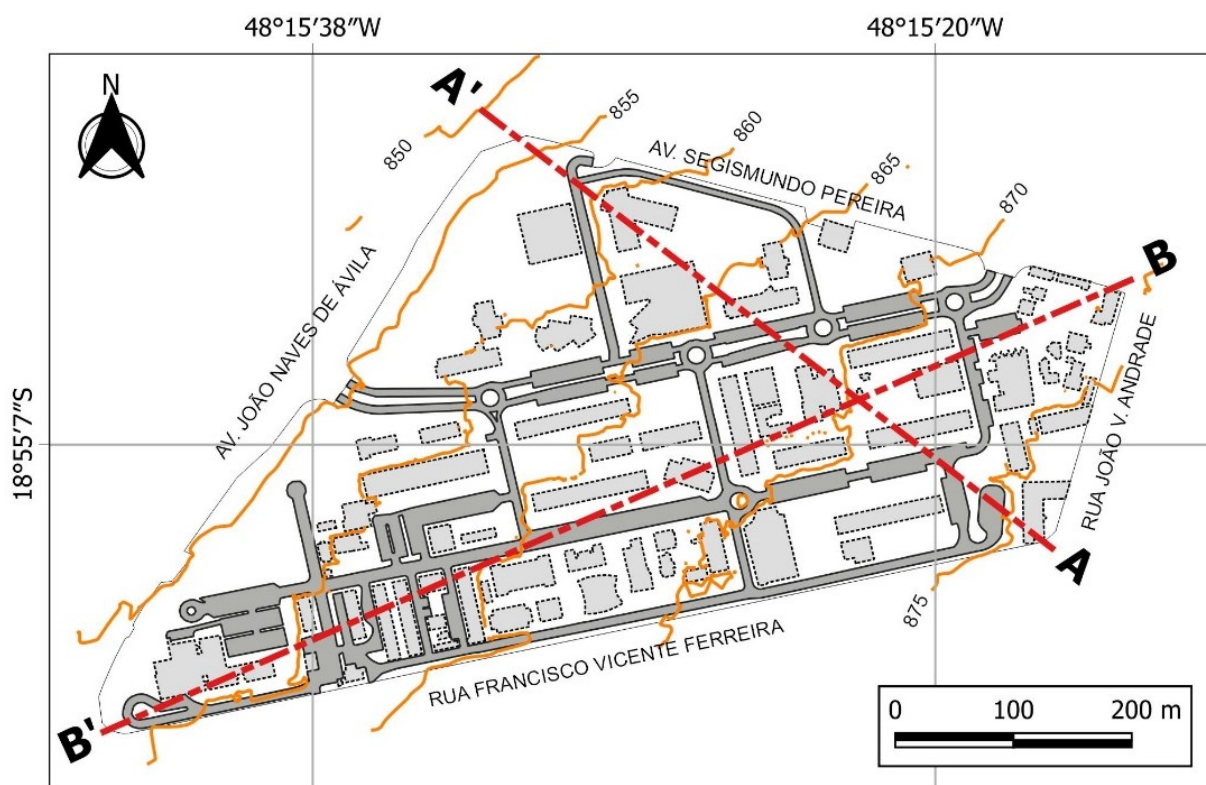
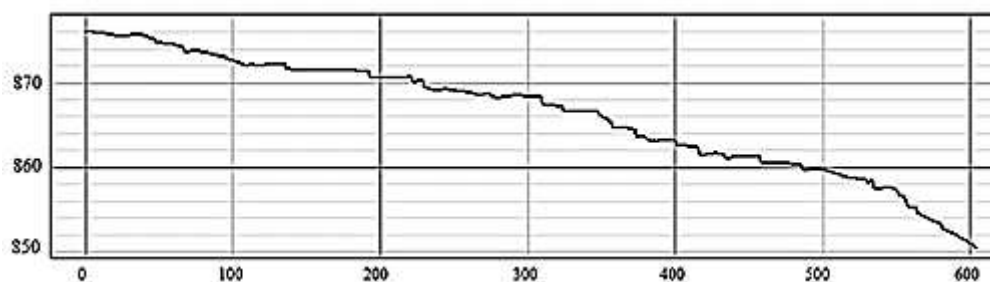
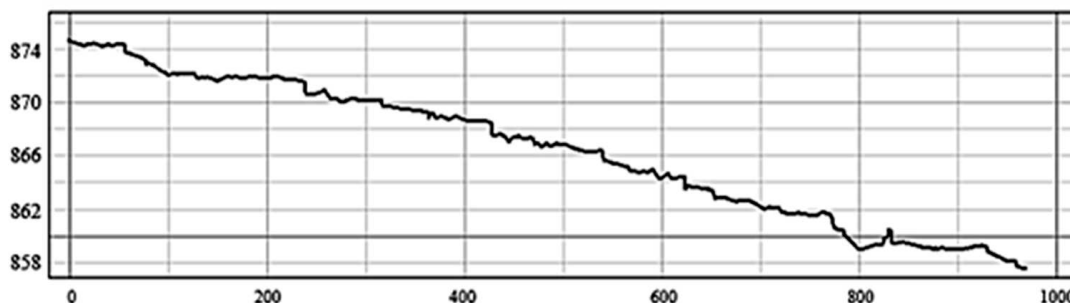


Figura 27 - Perfil topográfico A-A'



Fonte: Levantamento Topográfico Planialtimétrico Cadastral do Campus Santa Mônica (R&V, 2013-2014).
Organização: O autor

Figura 28 - Perfil topográfico B-B'.



Fonte: Levantamento Topográfico Planialtimétrico Cadastral do Campus Santa Mônica (R&V, 2013-2014).
Organização: O autor.

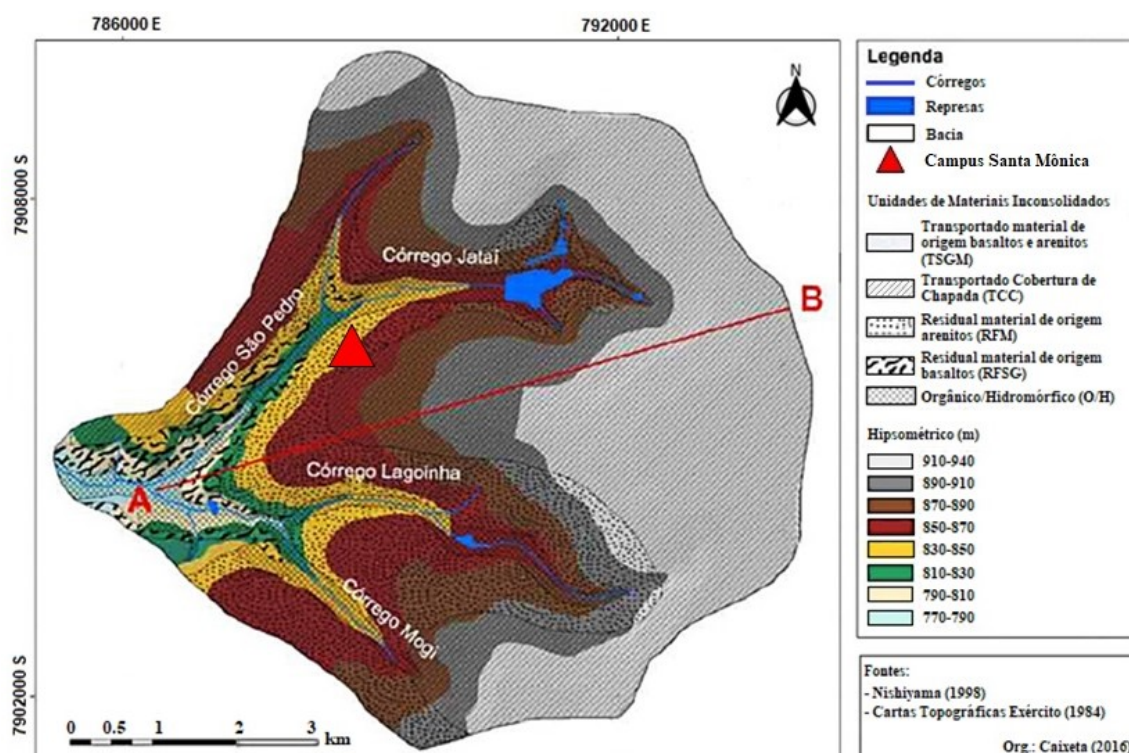
No que diz respeito à morfometria, é essencial destacar que a análise quali-quantitativa baseia-se na relação entre as características geométricas e os elementos da dinâmica hidrológica de uma bacia hidrográfica. Os parâmetros elementares considerados incluem: perímetro (P), área (A), fator de forma (F), que é a razão entre a largura média e o quadrado do comprimento axial, coeficiente de compactidade (K_c), obtido pela razão entre o perímetro da bacia (P) e o perímetro de um círculo de área equivalente (\sqrt{A}), declividade média (S), densidade de drenagem (Dd), que é a relação entre o comprimento dos cursos d'água (L_c) e a área da bacia (A), e sinuosidade (S_n), que é a relação entre o comprimento do canal principal (L) e o comprimento do talvegue (L_w) (Christofolletti, 1980; Dias, 2015).

No entanto, é necessário realizar uma avaliação crítica dos parâmetros utilizados, especialmente quando aplicados a áreas urbanas com características morfológicas específicas, como lotes e ruas. Esses elementos, embora desempenhem funções de captação e canalização, exigem a definição precisa de seu formato e dimensões de acordo com as necessidades do modelo adotado. No caso do PCSWMM, um *software* com Sistema de Informação Geográfica (SIG) incorporado, a leitura geométrica da maioria das formas urbanas é extraída do Modelo Digital do Terreno (MDT), que fornece informações espaciais tridimensionais.

2.2.4 Materiais Inconsolidados

Caixeta (2017) realizou um estudo detalhado na bacia do córrego São Pedro, focando na análise dos atributos e propriedades do meio físico, com ênfase no papel do solo na infiltração das águas pluviais. A autora procurou conectar eventos de inundação urbana aos impactos socioambientais resultantes do desenvolvimento desordenado da cidade, destacando a importância contínua do planejamento territorial urbano frente às limitações do meio físico. Foram identificados aspectos deposicionais de superfície, naturais e antrópicos, incluindo a granulometria e a permeabilidade do solo. Essas informações geotécnicas foram fundamentais para compreender a dinâmica de infiltração e escoamento superficial na bacia. A Figura 29 mostra os limites das unidades de materiais inconsolidados, a hipsometria e a indicação da seção A-B. A sobreposição entre os materiais inconsolidados identificados por Nishiyama (1998) e o Modelo Digital de Elevação (MDE) elaborado por Caixeta (2017) possibilitou a compreensão da predominância da unidade "Transportado Cobertura de Chapada" (TCC), que cobre cerca de 50% da área da bacia do córrego São Pedro, acima da altitude de 860 m.

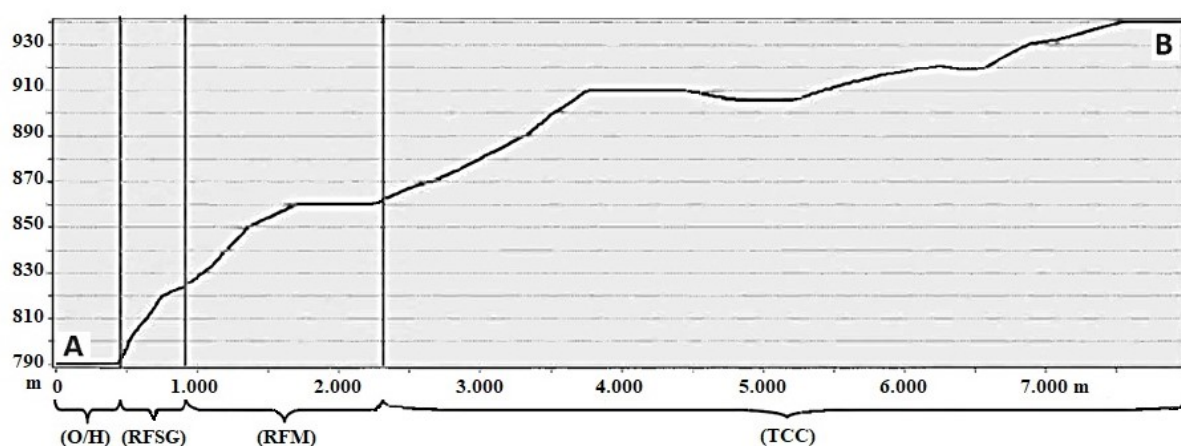
Figura 29 - Limites das unidades de materiais inconsolidados e hipsometria da bacia do córrego São Pedro.



Fonte: Adaptado de Caixeta (2017). Organização: O autor.

À medida que as altitudes decaem, ocorrem limites litoestratigráficos de materiais inconsolidados. Entre os valores 825 m e 860 m constata-se a presença de material “Residual da Formação Marília” (RFM). De 795 m a 825 m sucede o substrato “Material Transportado de Origem Basaltos” (RFSG) adjacente à unidade de “Coberturas Orgânicas e/ou Hidromórficas” (O/H), presente em altitudes abaixo de 795 m. A Figura 30 apresenta o perfil topográfico A-B.

Figura 30 - Perfil topográfico A-B.



Fonte: Adaptado de Caixeta (2017). Organização: O autor.

Adicionalmente, registra-se a presença de "Material de Origem de Basaltos e Arenitos" (TSGM) nas margens da foz do córrego São Pedro no rio Uberabinha. Observa-se que a área do Campus Santa Mônica abrange a interface entre a unidade "Transportado Cobertura de Chapada" (TCC) e a "Residual da Formação Marília" (RFM), na altitude média de 850 m. Essa transição é caracterizada por solos de granulometria predominantemente argilo-arenosa da unidade TCC, com variações em frações mais arenosas influenciadas pelo material Residual da Formação Marília (RFM).

Os mapas desenvolvidos por Caixeta (2017), tiveram como base elementar as cartas topográficas do Ministério do Exército de 1984, na escala 1:25.000, que contribuíram para a elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia e a extração de informações topográficas do terreno. O método amostral utilizado por esse autor se restringe à coleta de amostras deformadas do solo a uma profundidade inferior a 1,00 m, preferencialmente em terrenos baldios, sem a presença de aterros e edificações (Caixeta; Ferreira; Nishiyama, 2019). No entanto, a localização ordenada dos pontos amostrais sobre as unidades de materiais inconsolidados foi possível a partir dos estudos referenciais de Nishiyama (1998). Ressalta-se que, de acordo com a coluna estratigráfica do Município de Uberlândia desenvolvida por

Nishiyama (1998), a cobertura cenozoica, composta por depósitos holocênicos aluvionares (areias e cascalhos), coluvionares (areias argilosas e argilas) e leques aluvionares (areias), predomina a uma profundidade majoritariamente inferior a 20 metros.

Conforme indicado no Plano Diretor (UFU, 1991), as atividades antrópicas ao longo do tempo no Campus Santa Mônica foram marcadas por obras que envolveram intenso transporte e movimentação de terra, seguidas de operações de corte e aterro. Essas ações visaram preparar o terreno e criar condições adequadas para o assentamento das edificações.

Observou-se uma ênfase na criação de platôs com bordas definidas por taludes periféricos, que alteraram as características naturais dos materiais inconsolidados superficiais. Essas estruturas, também conhecidas como tabuleiros, são visíveis em diversas áreas do campus, especialmente em locais de maior declive.

As Elevações ou Superposições Tecnogênicas resultam do acréscimo de materiais sobre o terreno, podendo ocorrer tanto por intervenção humana direta, configurando Tecnoformas de Acumulação, quanto de maneira indireta, contribuindo para a formação de Geotecnofomas de Acumulação (CEN/SBCR, 2023).

A alteração da cobertura natural impacta significativamente o ciclo hidrológico (Toronto and Region Conservation, 2006). Os efeitos imediatos começam com a preparação do terreno para obras, onde a remoção da vegetação afeta processos de interceptação, desaceleração e devolução da água à atmosfera por meio da evaporação e transpiração.

A desestruturação das condições naturais da superfície e a compactação do material mobilizado reduzem a permeabilidade, diminuem a recarga das águas subterrâneas e resultam em um aumento repentino do escoamento superficial. Além disso, o trabalho de movimentação da terra em áreas com topografia irregular altera a rugosidade da superfície do terreno, introduzindo uma nova dinâmica ao fluxo de escoamento na área modificada.

Particularmente, a influência desse método construtivo é evidente nas numerosas escadarias que proporcionam acesso aos blocos mais antigos do Campus Santa Mônica. Essas estruturas evidenciam uma época em que as considerações sobre as condições e possibilidades de transposição das barreiras físicas eram frequentemente negligenciadas nos projetos de arquitetura e urbanismo.

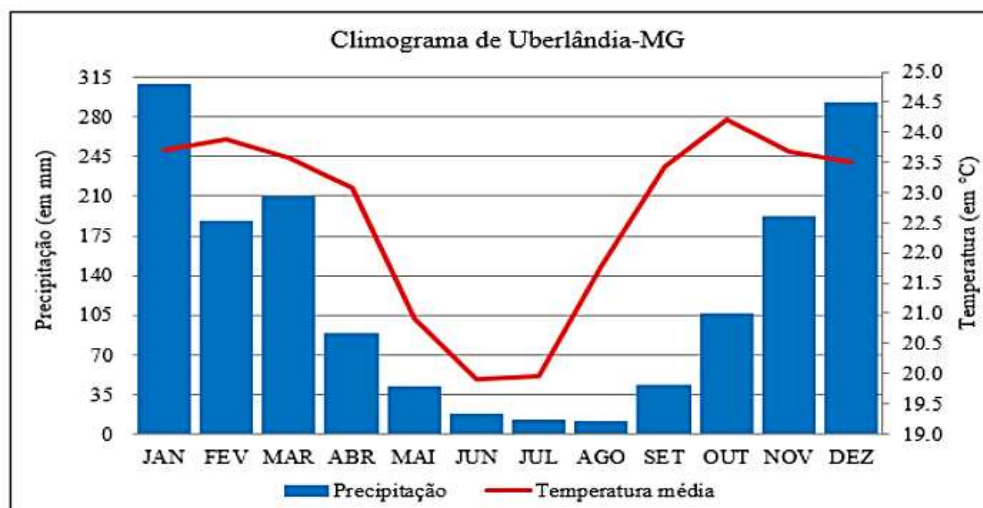
2.2.5 Clima

A análise da dinâmica do escoamento superficial destaca a influência climática como um fator elementar. Eventos extremos de precipitação, conforme delineados por Vicente (2004), desempenham um papel indispensável nessas investigações. Além disso, a taxa de impermeabilização do solo causada pela expansão urbana e as condições da infraestrutura de drenagem exercem impacto direto na capacidade de captação, transporte e destino das águas pluviais (Borges *et al.*, 2021).

De acordo com as conclusões de Petrucci (2018), ao realizar uma síntese das médias compensadas de temperatura e totais de precipitação para a cidade de Uberlândia/MG, com base nos dados da série histórica de 1981 a 2015 da estação climatológica convencional no Campus Santa Mônica, observou-se que a precipitação se concentra nos meses de outubro a março. Os picos ocorrem nos meses de janeiro e dezembro, registrando 309 mm e 292 mm, respectivamente, nessa sequência.

No estudo de Petrucci (2018), é apresentado um climograma que sintetiza os valores das médias compensadas de temperatura e totais de precipitação (Figura 31).

Figura 31 – Climograma com as médias compensadas de temperatura e precipitação.



Fonte: Petrucci (2018).

Durante o período de estiagem, compreendido entre os meses de abril a setembro, as médias de precipitação se mantêm abaixo dos 100 mm, sendo que julho e agosto se destacam como os meses com os menores valores médios, registrando 10 mm e 11 mm, respectivamente. A precipitação média anual para toda a série histórica foi calculada em 1.507,0 mm.

Silva e Assunção (2004) já haviam identificado dados semelhantes, porém, para a série histórica compreendida entre 1981 e 2003. Os resultados revelaram uma pluviosidade média de 1.583,6 mm, com chuvas mal distribuídas entre outubro e março, responsáveis por 86,7% das precipitações anuais. Dezembro destacou-se com a maior média mensal (318,6 mm), enquanto junho e agosto registraram as mínimas médias pluviométricas. Na época, os autores também concluíram que Uberlândia estava categorizada, de acordo com a classificação dos macroclimas do Brasil, na região climática subtropical úmida (Cwa).

Em uma classificação mais recente, Novais *et al.* (2018) delimitaram grande parte do município como Tropical Semisseco Meridional, influenciado por Zonas de Convergência de Umidade (ZCOUs) e Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o período chuvoso (novembro-março). O subdomínio é semisseco, caracterizado por seis meses secos entre abril e setembro. O tipo climático é meridional, com a ocorrência periódica de frentes frias, a presença do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e raras formações de geadas (uma a cada 5 anos).

Ao examinar os volumes pluviométricos mais relevantes em um intervalo de 24 horas na cidade de Uberlândia, ao longo de uma série temporal de 34 anos, Petrucci (2018) observou uma considerável variação interanual. As máximas anuais variaram de 48,0 a 147,0 mm, registradas em dezembro de 1996 e janeiro de 2002, respectivamente. As maiores concentrações de precipitação em 24 horas foram identificadas em janeiro de 2002 e 1983, totalizando 147,0 mm e 126,8 mm, respectivamente. O autor também concluiu que o trimestre compreendido por novembro, dezembro e janeiro concentra os valores mais elevados ao longo da série histórica de 1981 a 2015, apresentando, portanto, um potencial maior para a ocorrência de eventos desastrosos.

2.3 Modelo Proposto

Inicialmente, foram dedicados esforços à seleção de um *software* de código aberto para modelar a dinâmica do Escoamento Superficial Direto em áreas urbanas. Buscou-se um programa capaz de simular a resposta chuva-vazão em formato 1D, com a capacidade de apresentar resultados de forma gráfico-numérica. Uma das opções identificadas foi o modelo clássico de simulação pluvial, *Storm Water Management Model* – SWMM (Modelo de Gestão de Águas Pluviais), desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - U.S. EPA, 2010).

No entanto, uma das incertezas relacionadas ao SWMM diz respeito à sua limitação na identificação segura da localização e extensão da água de superfície, devido à aleatoriedade presente nos processos de escoamento superficial difuso (Fu *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2020).

Diante da adversidade identificada, buscou-se na literatura informações sobre a modelagem unidirecional de águas pluviais urbanas, visando verificar a disponibilidade de soluções que já incorporassem recursos 2D diretamente na interface de determinados *softwares* de simulação. No entanto, constatou-se que essa abordagem foi amplamente adotada por sistemas comerciais que optaram por integrar módulos acessórios, componentes hidrodinâmicos bidimensionais e ferramentas SIG. Exemplos incluem o *Personal Computer Storm Water Management Model* – PCSWMM (uma versão mais avançada do SWMM), InfoWorks (uma versão atualizada do *Wallingford Model*), Sobek Urban, MIKE Urban, entre outros (Yang *et al.*, 2020).

As observações de Jain *et al.* (2016), Yim (2016), Hamouz *et al.* (2020), Lappicy *et al.* (2020), Yang *et al.* (2020) e Sidek *et al.* (2021), ressaltando a ausência de uma interface espacial nos modelos SWMM e suas limitações para análises de escoamento superficial em bacias hidrográficas urbanas, foram o impulso para optar pela versão educacional do PCSWMM.

A obtenção da assinatura da versão profissional do *software* PCSWMM possibilitou a realização da modelagem mista integrada (1D/2D). Isso incluiu a geração de malhas de fluxo direcional sobre o sistema viário, a integração e análise dos dados de entrada e saída por meio das ferramentas do seu Sistema de Informação Geográfica (SIG) autônomo, bem como a apresentação e otimização do projeto.

O comportamento dinâmico do fluxo das águas captadas pela área de estudo resulta da combinação de sub-bacias, cada uma com diferentes tipos de cobertura do solo, e da rede viária que proporciona acesso a esses parcelamentos. O escoamento superficial gerado nas sub-bacias flui predominantemente em direção aos pontos mais baixos das sarjetas, conhecidos como pontos de descarga, tomadas d'água ou *outlets*. Portanto, a precisão do levantamento utilizado para criar a base cartográfica é fundamental para ampliar as oportunidades de análise dos resultados da modelagem (Jain *et al.*, 2016).

Os sistemas superficiais e subsuperficiais de drenagem desempenham um papel fundamental na modificação do sistema natural das bacias hidrográficas urbanas e, conseqüentemente, na definição dos parâmetros do modelo (Feng *et al.*, 2020; Azevedo Neto & Fernandez, 2015; Veneziani, 2014; SUDERHSA, 2002; Porto, 1995). O sistema superficial compreende os trajetos de fluxo canalizados por ruas, canaletas, sarjetas e canais abertos, além de fluxos retidos em estruturas de retenção, como bolsões. Por outro lado, o sistema subsuperficial é caracterizado principalmente por tubulações e galerias enterradas (Feng *et al.*, 2020).

Além disso, a morfologia dos espaços urbanizados influencia os processos hidrológicos das bacias hidrográficas, especialmente em virtude da presença de relevos artificiais (Chengtai, 1996). Os elementos e depósitos antropogênicos podem, por sua vez, enriquecer ou empobrecer a paisagem morfológica e a geodiversidade natural das cidades (Brandolini *et al.*, 2021). A análise desse sistema complexo requer a inclusão de parâmetros detalhados para sua previsão e dimensionamento. No entanto, é possível adotar abstrações empíricas que viabilizem simulações do modelo. Esta pesquisa foca na contribuição dos componentes superficiais que influenciam o escoamento das águas pluviais, com ênfase no sistema viário.

Dado o objetivo central desta pesquisa, que é simular o Escoamento Superficial Direto (ESD) em uma área urbana dentro dos limites do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Minas Gerais, Brasil, e identificar os padrões de comportamento dinâmico desse fenômeno sob condições hipotéticas de precipitação, a calibração do modelo foi dividida em duas etapas: **calibração hidrológica** e **calibração hidráulica**, que serão abordadas nas seções subsequentes.

O cálculo do *runoff* inicia-se considerando os dados de entrada provenientes da camada *raster* do Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo, juntamente com suas camadas vetoriais correspondentes (*shapefiles*). Posteriormente, ocorre a preparação da modelagem,

estabelecendo a conexão fundamental entre o modelo hidráulico-hidrológico escolhido e a solução SIG definida. Esse processo tem como objetivo sistematizar os resultados do ESD, permitindo uma análise mais aprofundada sobre o comportamento das águas pluviais superficiais, influenciado pelas características topográficas da paisagem.

Nota-se que a considerável quantidade de variáveis a serem integradas no modelo, uma característica comum em territórios delimitados por bacias hidrográficas, reforça a crescente importância do uso de SIGs e técnicas de Sensoriamento Remoto para dar suporte ao processo de modelagem (Dias, 2015). Nesse contexto, destaca-se a relevância do arquivo *raster* do MDT da área de estudo, desempenhando um papel essencial na obtenção das camadas de declividade, curvatura superficial e acumulação de fluxo. A camada que representa as inclinações do terreno está intrinsecamente ligada ao comportamento cinético do escoamento.

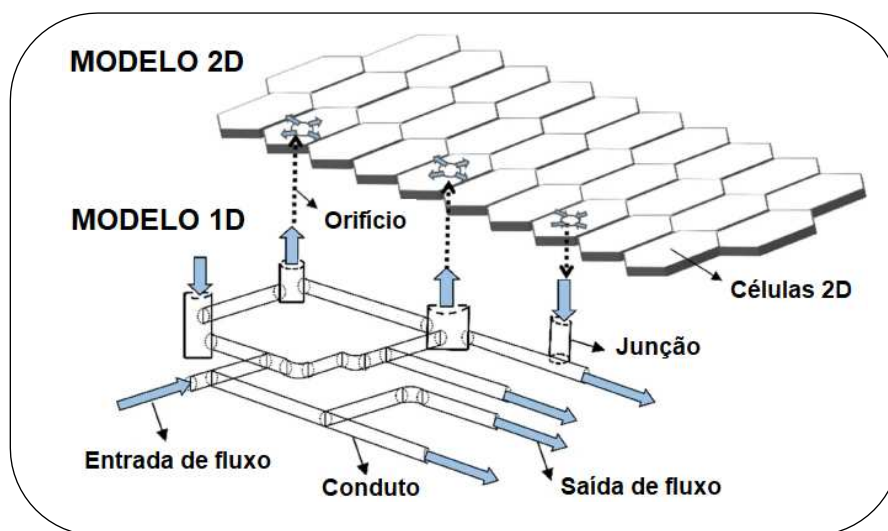
Para proporcionar uma visualização mais clara e uma compreensão aprimorada da simulação, optou-se por utilizar a modelagem bidimensional, buscando expandir a abordagem 1D da dinâmica do escoamento superficial direto. A escolha pelo modelo de superfície 2D do *software* PCSWMM foi influenciada pela presença de uma interface amigável e pela flexibilidade de alternar entre diferentes formatos de dados. Na simulação bidimensional, a representação do fluxo ocorre por meio de células hexagonais 2D, e em relação ao transporte da água canalizada, este está sujeito às equações de conservação da massa e da quantidade de movimento para fluxo gradualmente variado não permanente, isto é, pela aplicação das equações de Saint Venant (U.S. EPA, 2010).

Os modelos de drenagem 1D e de superfície de inundação 2D são integrados pelo PCSWMM por meio do método de conexão por orifício (Xu *et al.*, 2022). O processamento computacional do modelo simula o comportamento da água levando em consideração a elevação média superficial de cada célula hexagonal e as características da cobertura do solo nas áreas de contribuição. Estas são analisadas pela metodologia do NRCS-CN (*Curve Number*) (Pruski, 2014), ou por outro método de infiltração definido a partir das opções disponibilizadas pelo *software*.

Na simulação realizada pelo modelo PCSWMM 1D/2D, cada junção unidimensional é automaticamente conectada a um nó bidimensional. Essa forma de conexão permite a transferência livre do fluxo entre os planos espaciais, representados pela malha de células hexagonais bidimensionais. Nesse tipo de modelagem, torna-se possível abstrair a relação

espacial entre vias canalizadoras de fluxo e outros elementos direcionadores do caudal. O diagrama esquemático do modelo hidrodinâmico acoplado 1D/2D, adotado pelo PCSWMM, é ilustrado na Figura 32.

Figura 32 - Diagrama esquemático do modelo hidrodinâmico acoplado 1D/2D adotado pelo PCSWMM.



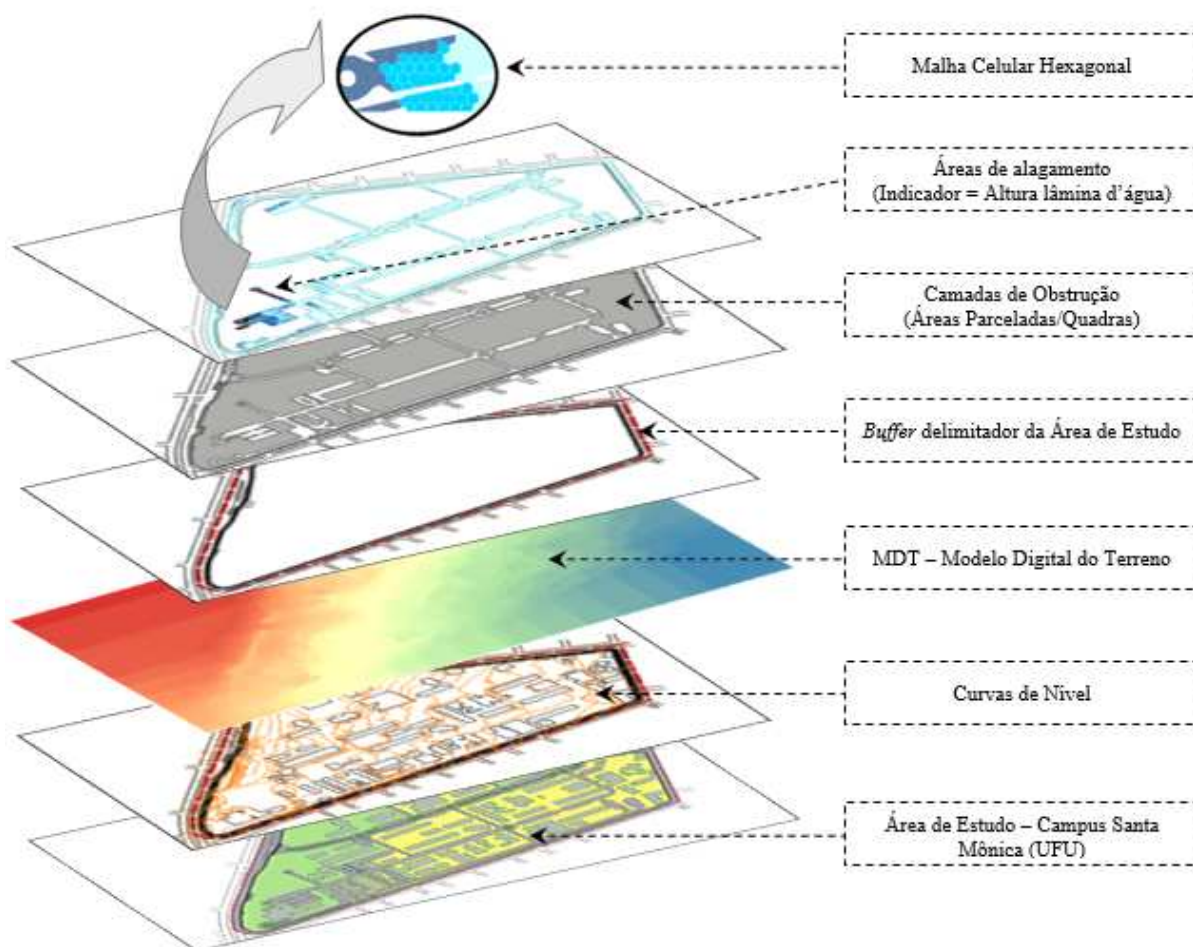
Fonte: Adaptado de Xu *et al.* (2022). Organização: O autor.

De acordo com Feng *et al.* (2020), a elevação média das células 2D desempenha determina a direção das águas pluviais, movendo-se dos pontos mais elevados para altitudes inferiores. O tipo de cobertura do solo tem influência na velocidade e na taxa de infiltração, uma vez que a água se desloca mais rapidamente sobre superfícies impermeáveis e de forma mais lenta sobre áreas permeáveis. Por outro lado, os condutos são elementos responsáveis pelo direcionamento e concentração dos fluxos.

As áreas de solo parceladas (como quadras) exigem duas camadas vetoriais para a execução bem-sucedida do modelo no PCSWMM. A primeira delimita a área de interesse, responsável por estabelecer o limite do espaço físico da simulação. Essa camada é projetada para replicar o perímetro da área de estudo, se estendendo para fora até o canteiro central das vias adjacentes ou até os limites dos lotes da quadra oposta, caso não haja obstáculos na via. Esse *design* cria um *buffer* delimitador essencial para a modelagem. Por outro lado, a segunda camada, ou camadas, de obstrução são fundamentais para definir a malha celular, criada a partir das conexões entre os nós 2D, estabelecendo segmentos com atributos hidráulicos, como condutos, para a construção detalhada do modelo.

A Figura 33 apresenta a sobreposição de camadas elementares do modelo hidráulico da área de estudo considerando o cenário do período 2013-2014. Esse tipo de arranjo permite a criação de "indicadores" por meio de cores que representam os intervalos das alturas da lâmina d'água. Assim, torna-se possível mapear as áreas críticas suscetíveis a alagamentos.

Figura 33 - Sobreposição de camadas elementares do modelo hidráulico.



Fonte: O autor.

Após a modelagem de superfície 1D/2D no *software* PCSWM, os principais resultados englobam não apenas a altura da lâmina d'água, mas também as vazões decorrentes do evento de precipitação. O processamento dos dados gerados pelas condições de contorno proporciona elementos que podem ser organizados e explorados de maneira mais eficiente através do uso de ferramentas SIG. Essa abordagem amplia as possibilidades ao permitir o mapeamento de áreas propensas a alagamentos e a identificação das rotas de concentração de fluxo.

Neste estudo, o QGIS desempenhou um papel essencial na obtenção e avaliação dos parâmetros geométricos, topográficos e hidrográficos da área de estudo. A ferramenta também

foi utilizada para importar os resultados da modelagem em planilhas, organizar os dados do modelo e geoespacializar as informações sobre o escoamento. Embora o QGIS seja amplamente utilizado para a análise e visualização de dados espaciais, Ma *et al.* (2022) destacam que ele não é adequado para cálculos hidráulicos abrangentes e análises matemáticas detalhadas do escoamento superficial. Essa limitação justifica, em parte, a necessidade de integrar dados provenientes das simulações hidrológico-hidráulicas realizadas no PCSWMM. Reconhece-se que tal dificuldade poderia ser mitigada pelo desenvolvimento de *plugins* específicos utilizando o modelador gráfico ou a linguagem *Python*; no entanto, essa abordagem não é o foco deste estudo.

Além dos dados espaciais, a representação do comportamento dos fluxos superficiais é viabilizada pela consideração das chuvas de projeto para os tempos de retorno definidos. De acordo com Camapum de Carvalho *et al.* (2012), a análise da precipitação deve abranger diversos aspectos, com ênfase em sua intensidade e distribuição, pois ambos desempenham um papel importante na definição do volume de água infiltrada e/ou escoada superficialmente. Em regiões tropicais, é necessário considerar que as precipitações características dessas áreas apresentam maior variabilidade e expressividade, tanto em intensidade quanto em distribuição, com a ocorrência frequente de episódios chuvosos e eventos torrenciais, configurando extremos pluviométricos (Ayoade, 2006).

A metodologia do INMET (1999) classifica as chuvas de acordo com sua intensidade, sendo consideradas como: fraca (de 1,1 mm a 5,0 mm por hora ou no máximo 0,8 mm em 10 minutos); moderada (de 5,1 mm até 60,0 mm por hora ou até 6,0 mm em 10 minutos); e forte (acima de 60,0 mm por hora ou até 10,0 mm a cada 10 minutos). Ressalta-se que episódios pluviométricos distribuídos acima de 50 mm em 24 horas são caracterizados como portadores de grande potencial de dano em áreas urbanas (Camapum De Carvalho *et al.*, 2012).

Ao explorar desastres pluviométricos, Silva (2012) destaca a variável intensidade das chuvas como um fator fundamental em suas análises, que abrangeram cidades médias do estado do Paraná, utilizando uma série histórica de 30 anos de dados de precipitação. O autor definiu como evento extremo todos os valores diários acima de 50 mm em cada cidade. Esse critério foi estabelecido após o cálculo estatístico das precipitações, onde classes selecionadas de 10 em 10 mm revelaram que mais de 90% dos eventos de precipitação ocorreram entre 1 e 50 mm. A variabilidade mensal demonstrou verões chuvosos e episódios de precipitação

potencialmente impactantes, com valores acima de 50 mm, causando danos materiais e humanos consideráveis.

Santos e Ferreira (2016) realizaram uma sistematização da variabilidade pluviométrica na região do Triângulo Mineiro ao longo de um período de 33 anos. Utilizaram como critério de tipificação a intensidade de chuva em 24 horas, classificando da seguinte maneira: abaixo de 10 mm como chuva fraca; de 10,1 mm a 20 mm como chuva moderada; de 20,1 mm a 29,9 mm como chuva forte a moderada; e acima de 30 mm como chuva forte.

O Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro (ALERTA RIO, 2022), estabelecido em 1996, é responsável por emitir alertas à população quando há iminência de chuvas intensas que possam resultar em inundações de vias públicas e/ou acidentes geotécnicos em encostas. Esse sistema classifica a intensidade pluviométrica como chuva fraca quando a precipitação é menor que 5,0 mm/h; chuva moderada com intensidade entre 5,0 e 25 mm/h; chuva forte entre 25,1 e 50 mm/h; e muito forte quando a intensidade é superior a 50,0 mm/h. Além disso, é considerada a categoria de pancadas de chuva para eventos de precipitação intensa que ocorrem em curtos períodos de tempo e em áreas espacialmente restritas. A Tabela 9 sintetiza as classificações mencionadas.

Tabela 9 - Síntese das classificações de intensidade de precipitação e características do evento chuvoso.

CLASSIFICAÇÃO	INTENSIDADE	CARACTERÍSTICA DO EVENTO
INMET (1999)	< 5 mm/h	Fraco
	5 a 60 mm/h	Moderado
	> 60 mm/h	Forte
Camapum de Carvalho, <i>et al.</i> (2012); Silva (2012)	> 50 mm/h	Potencialmente Impactante
Santos e Ferreira (2016)	< 10 mm diários	Fraco
	10,1 a 20 mm em 24 horas	Moderado
	20,1 a 29,9 mm em 24 horas	Forte a Moderado
	> 30 mm em 24 horas	Forte
Alerta Rio (2022)	< 5 mm/h	Fraco
	5 a 25 mm/h	Moderado
	25,1 a 50 mm/h	Forte
	> 50 mm/h	Muito Forte

Organização: O autor.

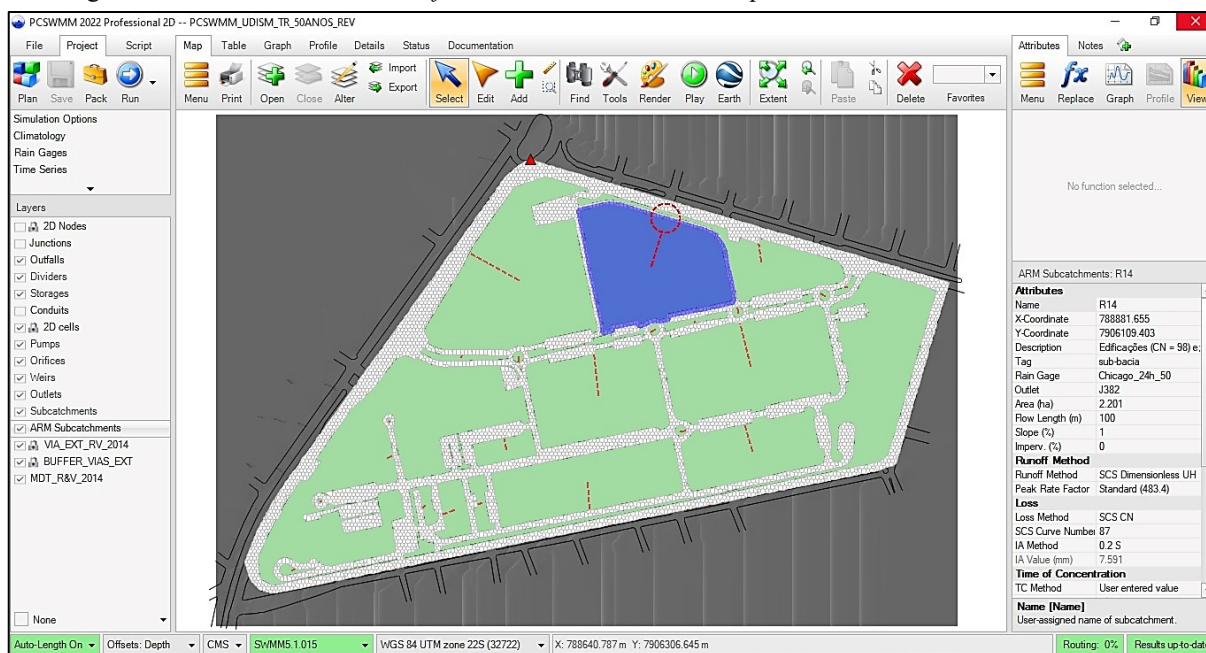
Um exemplo prático das classificações de intensidade de precipitação e das características do evento chuvoso pode ser encontrado na NBR 10844 (ABNT, 1989), que estabelece requisitos e critérios mínimos para os projetos de instalações prediais de águas pluviais. Essa norma recomenda, como referência para a previsão de drenagem em áreas de projeção horizontal inferior a 100 m², a consideração de uma chuva potencialmente impactante, com intensidade de 150 mm/h, conforme indicado por Camapum de Carvalho *et al.* (2012) e Silva (2012). Para outras situações, a norma orienta a utilização da equação de chuvas intensas do local (IDF).

- CAPÍTULO 3 -

Parametrização do Modelo

O procedimento de alimentação do PCSWMM 1D/2D é composto por etapas sistemáticas que garantem a adequação do modelo à área de estudo. Os cenários definidos foram configurados conforme *datum* de referência SRC - EPSG: 32722 - WGS 84 / UTM Zona 22S. A seguir, foram importados os *shapefiles* correspondentes. As séries de chuvas foram criadas no PCSWMM utilizando o método de Chicago e editadas no "*Time Series Editor*". A interface para a alimentação e modificação dos atributos das camadas, incluindo os parâmetros físicos e hidrológicos das sub-bacias, é realizada por meio de formulários específicos (Figura 34). Após a configuração da malha 2D, as opções de modelagem são ajustadas, considerando parâmetros como o modelo de infiltração e o tempo de roteamento. O processamento é então iniciado, seguido pela verificação do relatório de erros, assegurando a integridade e a precisão dos resultados. Os dados resultantes são organizados pelo *software* em matrizes (planilhas).

Figura 34 – Área de trabalho do *software* PCSWMM. Em destaque sub-bacia R14, cenário 2013/2014.



Fonte: PCSWMM 1D/2D, versão 7.6. Organizado pelo autor.

O modelo da área de estudo exigiu a preparação antecipada de três camadas fundamentais: (1) camada vetorial do *buffer* delimitador do Campus Santa Mônica, restrita ao perímetro que inclui a largura total da Rua João Velasco de Andrade e a borda dos canteiros centrais da Rua Francisco Vicente Ferreira e das avenidas João Naves de Ávila e Segismundo Pereira; (2) camada vetorial das áreas parceladas (quadras); e (3) camada do Modelo Digital de Terreno

(MDT). Salienta-se que a dinâmica de escoamento requer a definição espacial do sistema viário local, que é considerado no modelo como uma rede de canais abertos. As formas vetorizadas no *software* AutoCAD foram exportadas no formato *Drawing Exchange Format* (.dxf) para o QGIS. Em seguida foram convertidas em um banco *GeoPackage* e, posteriormente, para os *shapefiles* requeridos. Essa metodologia possibilitou também, a criação dos Modelos Digitais do Terreno (MDTs) para cada cenário, por meio da interpolação das curvas de nível de cada cenário.

O campus foi subdividido em 15 sub-bacias para o ano de 1989 e em 28 sub-bacias para o período de 2013/2014, representando as quadras e canteiros. Essa metodologia permitiu a classificação e padronização dos parâmetros físicos e hidrológicos de cada subárea, além da quantificação e análise dos usos das áreas, considerando suas características impermeáveis, permeáveis e semipermeáveis. Esses dados são essenciais para os cálculos racionais do escoamento (Dias, 2015).

A modelagem exigiu a especificação de um método para quantificação da infiltração, visando determinar a quantidade de água que penetra nas camadas superficiais do solo e estimar a fração excedente da precipitação que resulta no escoamento superficial (Dias, 2015). O PCSWMM oferece várias opções de modelos de infiltração, incluindo as abordagens de Horton e Horton Modificado (Horton, 1941), além dos métodos Green-Ampt e Green-Ampt Modificado (Frida, 2021). Neste estudo, foi adotado o método do Número da Curva (CN), que considera que a capacidade total de infiltração pode ser determinada com base em um número CN tabelado, levando em conta diversas características físicas, incluindo a capacidade de percolação do solo, derivada de suas propriedades granulométricas.

Nunes *et al.* (2011) destacam que o CN descreve o uso e a cobertura da terra em relação ao potencial de produção de escoamento superficial. Seus principais parâmetros incluem os grupos hidrológicos do solo, a condição hidrológica, o histórico de produção de caudais, além do cenário de impermeabilização das áreas de captação e da dinâmica de fluxo gerada por essas áreas. Essa análise considera se as regiões em questão são permeáveis antes de contribuírem efetivamente para o sistema de drenagem (TR-55 – USDA, 1986).

À medida que ocorre o acúmulo de água no terreno e a saturação subsuperficial durante um evento de precipitação, essa capacidade é gradualmente esgotada. Assim, as características do terreno desempenham um papel elementar no potencial de *runoff*, influenciando a taxa de

infiltração em diferentes condições de permeabilidade. De maneira geral, observa-se que, à medida que o valor do CN aumenta, a precipitação excedente ou efetiva também tende a aumentar (Dias, 2015). Os parâmetros essenciais do número da curva incluem o valor característico para o escoamento superficial, associado ao grupo de condutividade hidráulica do solo, e a constante de regeneração, que descreve a condição antecedente do solo (McCuen, 1998).

Outro parâmetro a ser considerado é a variabilidade nos padrões de rugosidade das superfícies semipermeáveis, que resulta em um escoamento difuso. Essa característica é acompanhada por mecanismos de retenção específicos, como adesão e capilaridade, além da infiltração após a drenagem natural. Esses fatores influenciam o tempo de resposta da bacia e o comportamento dos sistemas de drenagem (U.S. EPA, 2010; Dias, 2015).

É notório que o PCSWMM requer, como condição prévia, a definição de pelo menos um nó ou sub-bacia que represente a saída do escoamento geral do sistema (*outfall*). Esse ponto pode corresponder a uma descarga identificada em campo ou a um ponto hipotético abstraído empiricamente para permitir o deflúvio do sistema. Esse mecanismo possibilita a simulação hidrológico-hidráulica do modelo, sem desconsiderar a necessidade de tomadas d'água individualizadas por sub-bacia (*outlets*). Neste estudo, não foram consideradas as contribuições de escoamentos externos ao *buffer* da área investigada.

A adoção de um único *outfall* para o modelo em estudo resulta em um sistema "parcialmente fechado", permitindo, em teoria, compreender a influência dos fatores morfológicos no comportamento hidrodinâmico das águas pluviais. Essa configuração favorece análises mais detalhadas e específicas sobre a problemática em questão. Salienta-se que as soluções de drenagem pluvial existentes na área de estudo foram hipoteticamente ignoradas, visando amplificar os identificadores de vazão e altura da lâmina d'água materializados nos produtos pós-modelagem. Essa abordagem facilita a identificação dos caminhos preferenciais do fluxo acumulado nas vias intrínsecas ao sistema.

Nesse contexto, optar por um sistema hidráulico-hidrológico aberto poderia apresentar desafios que impactariam a viabilidade do modelo, como a necessidade de uma análise detalhada das heterogeneidades em pequena escala, que afetam os fluxos em grande escala, incluindo o traçado das vias externas ao *buffer* e os padrões de cobertura do solo. Além disso,

seria necessário considerar as complexas interações entre os processos e a conectividade da água na paisagem.

O principal mecanismo da modelagem do escoamento superficial direto na área de estudo é fundamentado na aplicação dos princípios hidráulicos, representados pelas equações de Saint-Venant (de continuidade e dinâmica), para simulações espaço-temporais (Henderson, 1966; Alves, 2018). Essas equações são amplamente reconhecidas na literatura acadêmica como fundamentais para descrever o comportamento do escoamento em sistemas hidráulicos complexos.

Considerando o sistema do modelo definido como "parcialmente fechado" e desconsiderando, hipoteticamente, a presença de dispositivos de drenagem superficial, como canaletas e bocas de lobo, foi dimensionada uma malha de células hexagonais que cobre as vias delimitadas pelo *buffer* da área de estudo. A resolução espacial adotada foi de 5 metros entre os centros de gravidade de cada célula (nós de conexão 2D).

Apesar da diversidade de geometrias de malha oferecidas pelo PCSWMM, foi necessário testar um arranjo ideal para os dados primários do modelo, levando em consideração a resolução espacial exigida para as células responsáveis pela captação dos fluxos de escoamento e as limitações de processamento do equipamento utilizado. Esse processo considerou as dificuldades associadas ao roteamento de malhas excessivamente densas.

No presente trabalho, a malha hexagonal utilizada apresentou um arranjo adequado à geometria das vias, à escala espacial de análise e aos dados de entrada. O processamento do modelo foi realizado em um *notebook* equipado com processador Intel(R) Core(TM) i5-10210U, CPU 1.60 GHz e 20,0 GB de RAM. As células hexagonais se ajustaram à presença de obstruções, como meio-fio, gerando formas geométricas que refletem a realidade urbana. Essa adaptação é essencial para analisar com precisão a dinâmica do escoamento, levando em consideração as interferências da morfologia urbana local.

O processamento sofre influência da complexidade do arranjo do modelo, incluindo os dispositivos de drenagem considerados e as diversas junções unidimensionais que desempenham funções de armazenamento, conexão e saída. Essas junções representam o módulo 1D do PCSWMM, responsável pela simulação da direção do fluxo (Xu *et al.*, 2022).

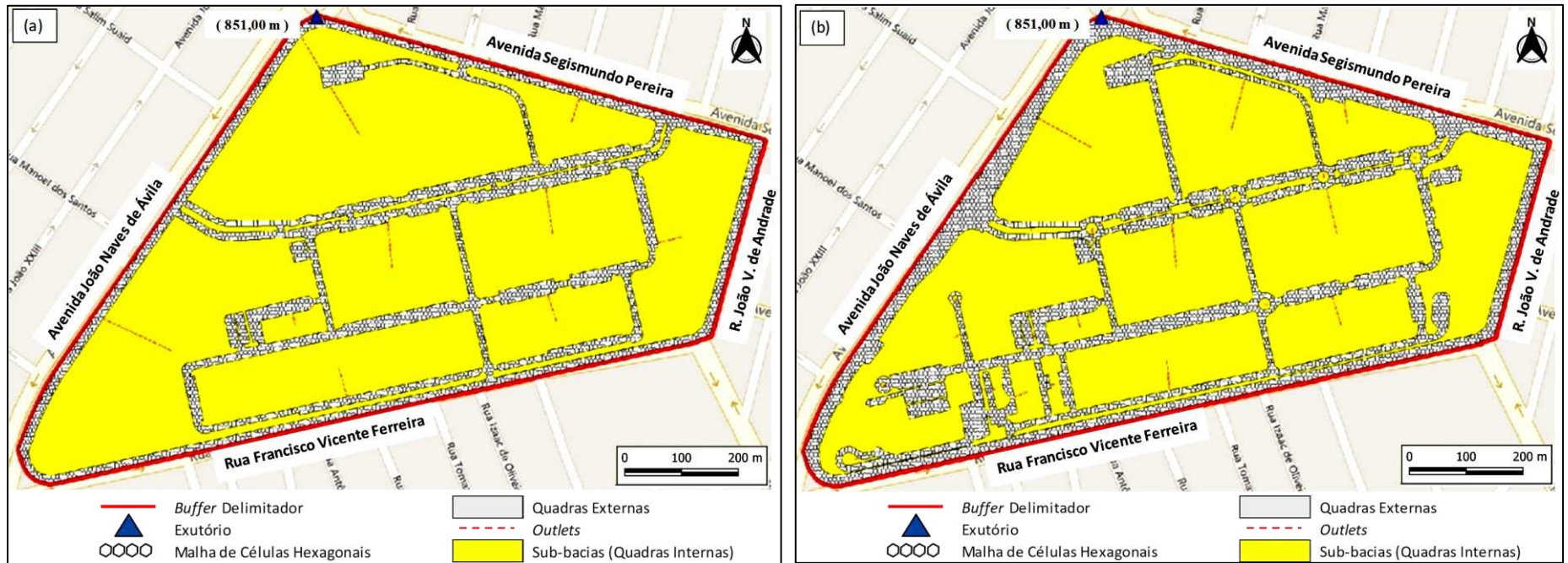
O modelo unidimensional deste estudo possui 2.938 pontos de junção para o cenário de 1989 e 4.139 para o período de 2013/2014. No primeiro caso, são considerados 6.307 condutos, enquanto no segundo, são 9.407, abrangendo toda a extensão das vias internas e externas delimitadas pelo *buffer*.

Uma hipótese inicial para a modelagem é que o escoamento gerado em uma sub-bacia é direcionado para um ponto de saída (*outlet*) automaticamente conectado a um nó da malha celular na rua, permitindo que cada célula do modelo 2D receba a entrada de fluxo das sub-bacias hidrológicas determinadas. Nesse contexto, foi adotada a seleção automática dos pontos de saída (*outlets*) responsáveis pelo escoamento das sub-bacias. O exutório hipotético (n.º OF1) foi estrategicamente posicionado na confluência das avenidas João Naves de Ávila e Segismundo Pereira, na extremidade a jusante da área de estudo, com uma altitude de 851,00 m. Esse elemento foi conectado ao nó de junção n.º J1_2 pelos condutos n.º C6307 no cenário de 1989 e n.º C9407 para o período de 2013/2014. Para ambos os casos, os condutos de conexão foram definidos empiricamente como tubulações de concreto, com coeficiente de rugosidade de Manning (n) igual a 0,010, seção circular de diâmetro de 1,00 m e comprimento aproximado de 2,75 m.

O transporte do fluxo foi simulado pelo método da onda difusiva, que simplifica o modelo da onda dinâmica ao desconsiderar os termos de aceleração convectiva e local das equações de Saint-Venant, considerados irrelevantes para os objetivos deste estudo. O roteamento do fluxo na superfície livre dos canais, representados pelas ruas, ocorre por meio dos condutores conectados automaticamente pelo PCSWMM nas projeções dos nós de conexão 2D. A profundidade padrão dos elementos bidimensionais, denominada "Geometria 1", é estabelecida em 30,00 m, proporcionando uma margem de variação adequada para a altura da lâmina d'água simulada. A largura dos condutos (1D) é variável; no entanto, o PCSWMM considera uma seção padrão do tipo retangular aberta ("Geometria 2"), automaticamente definida durante a modelagem 2D. Os principais elementos do modelo são apresentados nas Figuras 35 – a; b.

Salienta-se que a modelagem 2D possibilita a representação mais detalhada dos processos hidrológicos e hidráulicos, capturando as interações complexas entre o escoamento superficial e a infraestrutura do sistema viário. A retenção de fluxo nas células, por exemplo, é fundamental para simular o acúmulo de água em áreas de drenagem deficitária (zona morta), facilitando a visualização e a comunicação dos indicadores preestabelecidos.

Figura 35 (a) - Elementos do modelo proposto para o cenário correspondente ao ano de 1989; (b) - Elementos do modelo proposto para o cenário correspondente ao período 2013/2014.

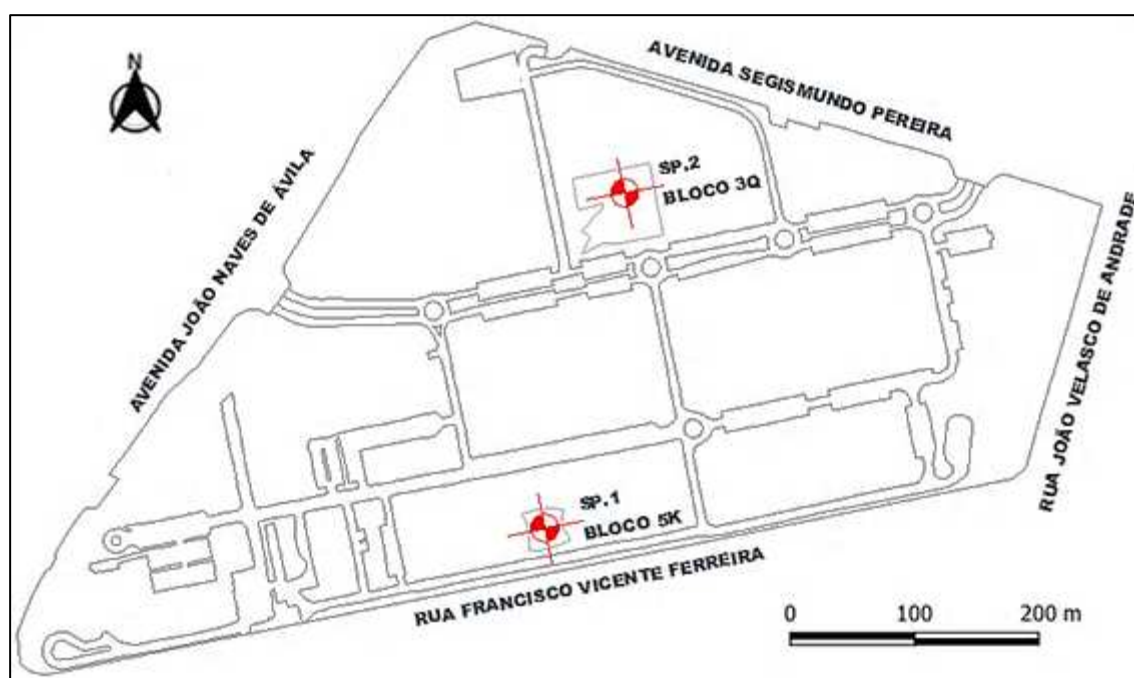


Fonte: PCSWMM com imagem de fundo (*backdrop*) Bing Maps - Microsoft® (2023). Organização: O autor.

3.1 Número da Curva (NRCS-CN)

Os solos da área de estudo foram classificados com base nos perfis geotécnicos elaborados por uma empresa especializada em sondagens e fundações de obras civis, nos anos de 2002 e 2003. Esses perfis resultaram de prospecções realizadas por meio do ensaio de penetração padrão (*Standard Penetration Test* - SPT), conforme estabelecido pela NBR 6484 (ABNT, 2001) e reconhecido na América do Sul pela norma norte-americana ASTM D1586/1967 (Schnaid & Odebrecht, 2012). O objetivo das prospecções era obter dados para o dimensionamento dos elementos de fundação dos blocos 3Q e 5K do Campus Santa Mônica. Este estudo considerou exclusivamente os resultados de dois furos de sondagem: SP.1 – Bloco 5K e SP.2 – Bloco 3Q (Figura 36).

Figura 36 - Localização dos furos de sondagem: SP.1 – Bloco 5K e SP.2 – Bloco 3Q - Campus Santa Mônica.



Fonte: O autor.

Embora o ensaio SPT seja predominantemente utilizado para prever a capacidade de carga geotécnica dos elementos de fundação (Souza, 2007; Das, 2012; Schnaid & Odebrecht, 2012; Alonso, 2019), os resultados utilizados nesta pesquisa se restringem à coluna "classificação" do material coletado, especialmente para os solos identificados até 1,50 m de profundidade. Esses dados são adequados para a classificação do grupo hidrológico análogo, conforme o método do número da curva (NRCS-CN) (Porto, 1995; Tucci, 2001; SUDERHSA, 2002; Pruski, 2014), conforme indicado no Quadro 5.

As figuras a seguir mostram recortes das planilhas que compõem os relatórios de sondagem à percussão realizadas no SP.1 – Bloco 5K (Figura 37) e SP.2 – Bloco 3Q (Figura 38).

Figura 37 - Recorte da planilha de sondagem à percussão do furo SP.1 – Bloco 5K (Relatório 01/2004).

COTAS (m)		N.A. e DATA	AVANÇO e REVS.	CAMADAS	ENSAIO DE PENETRAÇÃO				PROF. (m)	GRÁFICO DO N° DE GOLPES / 30cm	CLASSIFICAÇÃO
-0.09					0/	N/15	N/15	N/15		10 20 30	
										----- INICIAIS	
										----- FINAIS	
				1	0	2	2	2			ARGILA SILTOSA MARROM MOLE
				2	0	1	2	1	-1.00		ATERRO
				3	0	1	1	1			ARGILA SILTOSA MARROM MUITO MOLE A MÉDIA

Fonte: Adaptado de SONDOTEC (2002; 2003). Organização: O autor.

Figura 38 - Recorte da planilha de sondagem à percussão do furo SP.2 – Bloco 3Q (Relatório 05/2002).

COTAS (m)		N.A. e DATA	AVANÇO e REVS.	CAMADAS	ENSAIO DE PENETRAÇÃO				PROF. (m)	GRÁFICO DO N° DE GOLPES / 30cm	CLASSIFICAÇÃO
-1.08					0/	N/15	N/15	N/15		10 20 30	
										----- INICIAIS	
										----- FINAIS	
				1	0	1 25	1 30	-			ARGILA ARENOSA MARROM MUITO MOLE A MOLE
				2	0	1 26	2 30	-			
				3	0	1 18	2 20	1			

Fonte: Adaptado de SONDOTEC (2002; 2003). Organização: O autor.

Um dado adicional a ser observado na coluna “ensaio de penetração” é a soma dos valores dos penúltimos e últimos “N/15”, que representa o número total de golpes (N) aplicados ao conjunto amostrador do equipamento necessários para avançar os 30 cm finais do ensaio em cada camada amostral (Souza, 2007; Alonso, 2019). Essa soma corresponde ao parâmetro SPT, que indica o comportamento do material em resposta à energia aplicada durante o processo, permitindo a interpretação de sua resistência (Souza, 2007; Das, 2012; Alonso, 2019 e 2020).

Em áreas predominantemente urbanizadas, a presença de solo impermeável é inevitável. Nesses casos, adotamos os valores de CN definidos para bacias urbanas e suburbanas, conforme especificado na Tabela 7, estabelecendo um CN igual a 98.

No entanto, McCuen (1998) sugere que o coeficiente final, conhecido como "CNw composto", seja calculado como a soma do coeficiente atribuído à área permeável (ou semipermeável) e à área impermeável, ponderado pela fração da área impermeável, conforme a seguinte equação (Equação 10):

$$CN_W = CN_p(1 - f) + f(98) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

CNw = número CN composto da área urbana em estudo.

CNp = número CN da área permeável da bacia em estudo.

f = fração de área impermeável da bacia em estudo.

Conforme Tomaz (2002), a equação em questão é válida apenas quando a porcentagem total de área impermeabilizada excede 30%. Na área de estudo, é essencial considerar os Quadros 7 e 8, que resumem as diretrizes urbanísticas relacionadas ao plano viário e à topografia do Plano Diretor de 1989, bem como o levantamento topográfico da R&V 2013-2014. Esses dados confirmam que a condição estabelecida por Tomaz (2002) é satisfeita.

Geologicamente, o material deposicional de superfície na área de estudo é composto pelo contato entre as unidades "Transportado Cobertura de Chapada" (TCC) e "Residual da Formação Marília" (RFM), conforme identificado nos estudos de Nishiyama (1998) e Caixeta (2017). Essa caracterização é complementada pelo zoneamento pedológico da bacia do rio Uberabinha realizado por Rosa (2017), que indica a predominância de solos argilo-arenosos da unidade TCC na área de estudo, com alternância de frações mais arenosas influenciadas pelo material da unidade RFM.

De acordo com Rosa (2017), os solos da área de estudo, classificados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), são majoritariamente Latossolos Vermelhos Distróficos. Esses solos são comuns em toda a área urbana de Uberlândia, especialmente em regiões de morfologia plana e suavemente ondulada. Nas médias vertentes em direção ao vale do rio Uberabinha, observa-se uma associação de Latossolos Vermelhos Distroféricos e Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos.

Destaca-se que a elaboração da carta geológica do Município de Uberlândia, realizada por Nishiyama (1998), utilizou fotografias aéreas na escala 1:25.000 e folhas topográficas na escala 1:100.000. Por outro lado, os estudos sobre unidades de paisagem e zoneamento da bacia do rio Uberabinha, conduzidos por Rosa (2017), também utilizaram cartas topográficas na escala 1:100.000, mesma escala aplicada na elaboração da carta geológica de Nishiyama.

Com base na classificação dos relatórios dos furos de sondagem SPT apresentados nas Figuras 37 e 38, observa-se que, até 1,50 m de profundidade, predominam argilas com frações expressivas de silte e areia (neste caso específico, areia no furo SP.2 – bloco 3Q). No furo SP.1, localizado na área do bloco 5K, foi identificado aterro até a profundidade de 1,50 m. No entanto, o solo encontrado é semelhante ao da camada adjacente inferior, sugerindo que o material local foi mobilizado para a construção do platô.

Vale ressaltar que a extrapolação das características do solo para toda a área de estudo atende ao propósito de desenvolver "indicadores" de fluxo do ESD e pontos de alagamento. Embora um refinamento que considere as condições específicas de antropização das quadras, como o grau de compactação do material por setores e a presença de depósitos orgânicos, possam fornecer detalhes mais precisos, o critério de simplificação adotado não compromete o objetivo mencionado.

Com base nas características do solo local, foi possível classificar o grupo hidrológico utilizando o método Curva-Número (CN - SCS). A área de estudo foi enquadrada no "Grupo C" (conforme Quadro 5), que inclui materiais com teor total de argila entre 20% e 30%.

O próximo passo foi determinar a condição de umidade antecedente do solo nas áreas descobertas, próximas aos blocos e edificações. Optou-se pela condição de umidade normal - Tipo II – intermediária (Quadro 6), seguindo o padrão das tabelas do número CN. Isso dispensa ajustes adicionais para condições de solo seco (Tipo I) ou saturado (Tipo III).

Em seguida, foram consultados os valores de CN para bacias urbanas e suburbanas. Escolheu-se o valor $CN = 79$ como condição de referência, considerando a presença hipotética de cobertura vegetal rasteira ocupando de 50% a 75% da área semipermeável. Aplicando a Equação 10, obteve-se o coeficiente composto $CN_w = 87$, que representa a combinação das características das áreas permeáveis (ou semipermeáveis) e impermeáveis da área de estudo.

3.2 Calibração Hidrológica

Os cálculos das condições hidrológicas na área de estudo foram iniciados com a aplicação da equação IDF (Equação 11), que foi desenvolvida por Petrucci (2018) e Petrucci & Oliveira (2019) especificamente para a cidade de Uberlândia (MG). Essa equação baseou-se na tabulação das ocorrências de precipitações máximas em 24 horas ao longo da série histórica dos anos de 1981 a 2015. Esses dados foram coletados da estação meteorológica convencional localizada no Campus Universitário Santa Mônica da UFU.

$$I = \frac{330,4083 * Tr^{0,1452}}{t^{0,6164}} \quad (\text{Equação 11})$$

Na fórmula fornecida, temos que: "I" representa a intensidade da chuva em mm/h, "330,4083" é a constante de regressão para todos os períodos de retorno, "Tr" é o período de retorno em anos (frequência), "0,1452" é o coeficiente de regressão para todos os períodos de retorno, "t" é o tempo de duração da precipitação em minutos, e "0,6164" é o coeficiente de regressão aplicado a cada período de retorno, os valores de "Tr" e "t" podem ser inseridos. Considerando a duração final de uma hora (60 minutos), é possível determinar, para cada período de retorno, em intervalos de 6 minutos, 10 padrões de intensidade de precipitação, como apresentado na Tabela 10.

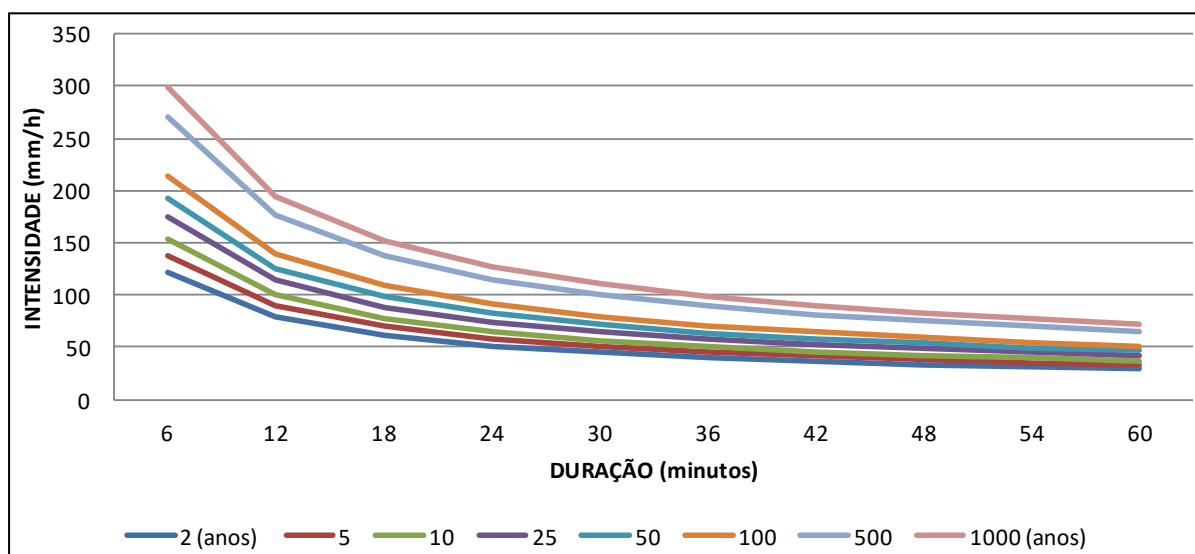
Tabela 10 - Valores de I-D-F para chuvas intensas hipotéticas em Uberlândia-MG.

Tr (anos)	Duração (t = min) *múltiplos de hora									
	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
2	121,0899	78,9866	61,5192	51,5227	44,9017	40,1288	36,4913	33,6081	31,2545	29,2892
5	138,3213	90,2265	70,2735	58,8544	51,2913	45,8391	41,6841	38,3905	35,7021	33,4572
10	152,9673	99,7800	77,7143	65,0862	56,7222	50,6928	46,0978	42,4555	39,4824	36,9997
25	174,7348	113,9789	88,7732	74,3481	64,7939	57,9065	52,6576	48,4970	45,1008	42,2649
50	193,2364	126,0475	98,1729	82,2203	71,6546	64,0378	58,2332	53,6320	49,8763	46,7400
100	213,6970	139,3939	108,5678	90,9261	79,2416	70,8184	64,3991	59,3108	55,1574	51,6890
500	269,9535	176,0897	137,1486	114,8627	100,1023	89,4616	81,3524	74,9246	69,6777	65,2964
1000	298,5372	194,7348	151,6705	127,0249	110,7015	98,9341	89,9663	82,8579	77,0555	72,2102

Fonte: Adaptado de Petrucci (2018) e Petrucci & Oliveira (2019). Organização: O autor.

A relação entre as intensidades de chuva e a progressão do período de retorno é diretamente proporcional, enquanto é inversamente proporcional ao aumento da duração. Dessa forma, é possível notar que as chuvas apresentam maior intensidade nos primeiros minutos de sua ocorrência e em períodos de retorno mais longos, conforme evidenciado por Petrucci (2018) e Petrucci & Oliveira (2019) (Figura 39).

Figura 39 - Curvas IDF para chuvas intensas hipotéticas em Uberlândia-MG.



Fonte: Adaptado de Petrucci (2018) e Petrucci & Oliveira (2019). Organização: O autor.

Em uma análise inicial, é evidente que em todos os períodos de retorno ocorrem precipitações mais intensas durante a duração de 6 minutos. Nota-se que a curva de frequência de 2 anos apresenta um desenvolvimento mais suavizado em comparação com a curva de 1000 anos. No entanto, eventos de chuva mais raros, ou seja, aqueles com um maior intervalo de tempo entre ocorrências, tendem a exibir um padrão de intensidade inversamente proporcional à duração do evento.

A utilização da função intensidade-duração-frequência (IDF) local permite simular as características da precipitação pluviométrica em uma área específica, levando em consideração tanto a duração (em horas) quanto o período de retorno (em anos), conforme definido por estudiosos como Fragozo Júnior (2004), Damé (2010), Pereira *et al.* (2013), Petrucci (2018), Petrucci & Oliveira (2019), Mei *et al.* (2020), e Al-Wagdany (2021).

O PCSWMM oferece diversas opções para a definição de tormentas hipotéticas, incluindo o método de distribuições SCS/NRCS (TR-55 - USDA, 1986), que é composto por quatro distribuições sintéticas de precipitação de 24 horas (Tipo I, Tipo IA, Tipo II e Tipo III). Além

disso, o *software* disponibiliza o padrão de distribuição de chuvas do NOAA - Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos (NOAA, 2022), o método de Huff (1967) derivado de estudos realizados em uma região do estado de Illinois (EUA), e outros métodos, como as tormentas de Chicago (Keifer & Chu, 1957).

Todos esses métodos requerem parâmetros temporais e espaciais de entrada, especialmente a duração da tempestade, o coeficiente "r" (razão entre o tempo de pico do evento e sua duração) e os coeficientes "a", "b", "c" (obtidos da curva IDF). É importante destacar, conforme observado por Silveira (2016), que o método das tormentas de Chicago é amplamente aplicado na literatura da ciência hidrológica.

Com base nisso, o método de Chicago, proposto por Keifer & Chu (1957), foi utilizado para estabelecer o padrão dos hietogramas das chuvas projetadas neste estudo, em conjunto com a função IDF desenvolvida por Petrucci (2018) e Petrucci & Oliveira (2019). Essa abordagem possibilitou a definição das chuvas de projeto necessárias para a simulação das condições de escoamento superficial direto na área de estudo.

O modelo foi calibrado por meio da definição de chuvas de projeto com 24 horas de duração e discretização temporal de 6 minutos. Esse processo foi conduzido iterativamente, variando os períodos de retorno (T_r) para 10 e 50 anos. É necessário ressaltar que, apesar de os hidrogramas obtidos refletirem resultados estatísticos associados ao período de registro pluviométrico investigado por Petrucci (2018) e Petrucci & Oliveira (2019), apresentam incertezas inerentes a métodos semelhantes que utilizam as equações IDF. Isso se deve aos padrões genéricos de tempestades que tais equações podem gerar.

Também é necessário compreender que essas tormentas representam apenas uma fração do volume total dos eventos de precipitação observados e, em conjunto com o padrão calibrado, têm a tendência de resultar em intensidades de pico superestimadas, conforme apontado por James (2005).

Todavia, Petrucci & Oliveira (2019) garantiram a validade da equação de chuvas intensas (IDF) desenvolvida para a cidade de Uberlândia-MG. Os autores afirmam que os resultados obtidos são relevantes e têm potencial para auxiliar no dimensionamento de obras de engenharia urbana, além de informar a tomada de decisão por parte dos gestores públicos.

O PCSWMM exige os seguintes parâmetros de entrada para aplicação do método de Chicago (Keifer & Chu, 1957):

A **intensidade da chuva** dada pela IDF característica para um determinado período de retorno de chuvas intensas, conforme a Equação 2 (seção 1.2), na qual a intensidade diminui com o aumento da duração (Wilken, 1978).

$$i = \frac{a \cdot tr^b}{(t+c)^d} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo “a”, “b”, “c” e “d” constantes a serem determinadas pelo método dos mínimos quadrados, “i” é a intensidade de chuva, em mm/h, “Tr” é o período de retorno, em anos e, “t” a duração da chuva, em minutos ou horas. Geralmente, o valor de “t” é o próprio tempo de concentração “tc” da área contribuinte.

Para definir o arranjo do modelo em questão, foi adotado o valor mínimo de 10 minutos para o tempo de contribuição, conforme recomendado pela literatura sobre drenagem superficial urbana (Wilken, 1978; SUDERHSA, 2002; Tomaz, 2002).

A equação IDF desenvolvida por Petrucci (2018) para a cidade de Uberlândia (Equação 11) foi utilizada na simulação das condições hidrológicas do estudo, considerando o fato desta referência ter como base de concepção estatística, as séries de precipitações registradas entre os anos de 1981 a 2015, obtida a partir da estação meteorológica convencional localizada na própria área de ensaio, ou seja, no Campus Universitário Santa Mônica da UFU.

$$I = \frac{330,4083 * Tr^{0,1452}}{t^{0,6164}} \quad (\text{Equação 11})$$

Além disso, é importante considerar a **intensidade da chuva** antes do pico (t_p) do evento, conforme definido pela Equação 12:

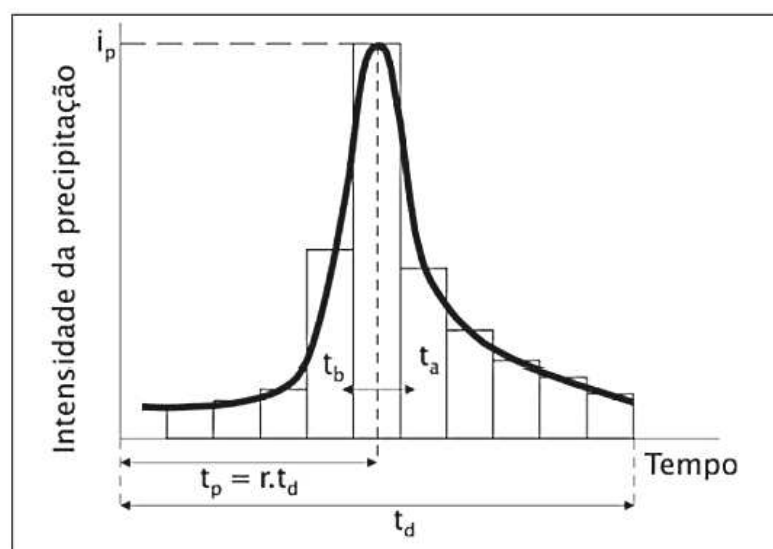
$$i_b = \frac{a \left[(1-b) \left(\frac{t_b}{r} \right)^b + c \right]}{\left[\left(\frac{t_b}{r} \right)^b + c \right]^2} \quad (\text{Equação 12})$$

E a **intensidade da chuva após o instante máximo**, dada pela Equação 13:

$$i_a = \frac{a \left[(1-b) \left(\frac{t_a}{1-r} \right)^b + c \right]}{\left[\left(\frac{t_a}{1-r} \right)^b + c \right]^2} \quad (\text{Equação 13})$$

Sendo “r” o coeficiente adimensional de avanço da tormenta resultante da relação entre o instante de pico (t_p) e a duração do evento (t_d); “ t_b ” representando o tempo anterior ao pico de intensidade, em minutos; e “ t_a ” o tempo posterior ao instante da intensidade máxima, também em minutos (Figura 40).

Figura 40 - Elementos do hietograma do método de Chicago proposto por Keifer & Chu (1957).

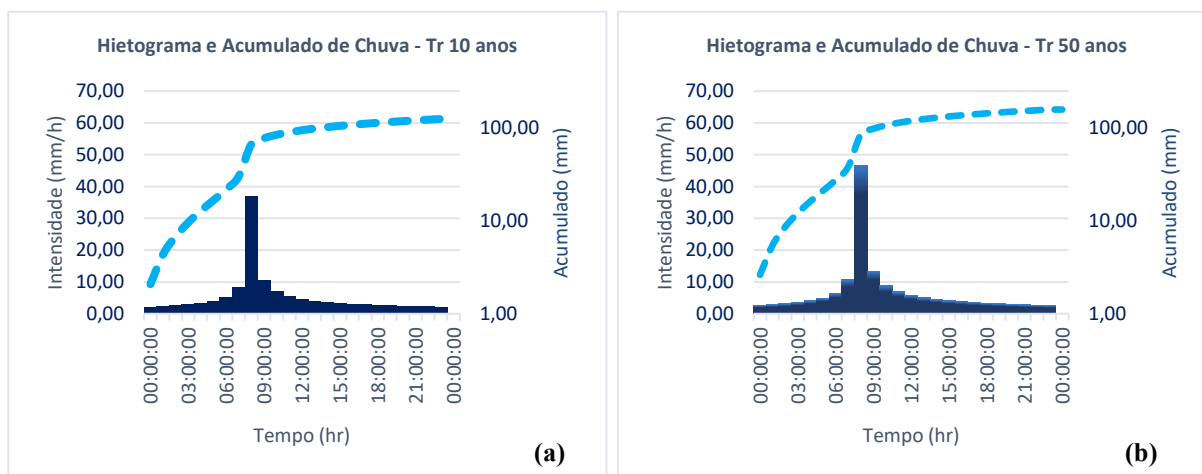


Fonte: Canholi (2014).

Assim, é possível estimar o coeficiente “r” por meio de uma série histórica local ou adotar um valor empírico, como feito neste estudo, onde $r = 0,35$. Como exemplo, a relação calculada por Yen & Chow (1983) para diversas regiões dos Estados Unidos resultou em um coeficiente médio $r = 0,375t_d$ (Canholi, 2014).

A discretização da função contínua proposta por Keifer & Chu (1957) em conjunto com a IDF de Petrucci (2018) possibilitou a determinação de hietogramas com duração $t_d = 24h$, compreendendo T_r 's 10 e 50 anos (Figura 41 - a; b).

Figura 41 (a; b) - Hietogramas e Acumulados de Chuva para Tr: 10 e 50 anos.



Organização: O autor

Canholi (2014) enfatiza a relevância do processo de desagregação temporal da chuva de projeto na determinação dos dispositivos de drenagem urbana. Durante a modelagem experimental, os excedentes hidrológicos calculados para os períodos de retorno (Tr) 10 e 50 anos foram utilizados para alimentar o modelo hidráulico. Isso permitiu que as células 2D recebessem o *input* hidrológico originado das sub-bacias de contribuição (quadra internas), possibilitando o roteamento do arranjo hidrológico-hidráulico concebido no *software* PCSWMM.

Salienta-se que o termo "chuva excedente" se refere à porção de precipitação que escoar superficialmente pela bacia. Existem pelo menos quatro conceitos de uso generalizado para determinar a parcela de precipitação que infiltra (Canholi, 2014). São eles: a razão de infiltração variável e específica do local; a razão constante de infiltração; o balanço de massa; e o número da curva (NRCS-CN), que, por sua vez, é o método empregado neste estudo.

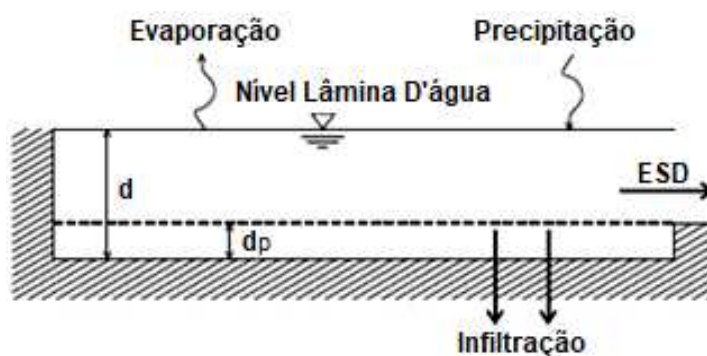
3.3 Calibração Hidráulica

Antes de abordar a concepção hidráulica necessária para o modelo, é fundamental distinguir entre a precisão de dados exigida em projetos, planos ou outros dispositivos de gestão urbana e a simulação hipotética de um fenômeno. No primeiro caso, a ênfase está na exatidão dos dados, conforme as normas técnicas estabelecidas, para o dimensionamento adequado de elementos urbanos, como dispositivos de drenagem. Na segunda situação, que é o foco deste estudo, busca-se simular hipoteticamente um fenômeno específico. O objetivo é compreender a dinâmica associada a esse evento, gerando informações pertinentes para a gestão urbana.

Para compreender a dinâmica do escoamento superficial direto no Campus Santa Mônica e investigar a influência de suas características, os cenários urbanísticos foram discretizados em sub-bacias. Essa abordagem considera as sub-bacias como o elemento principal da modelagem, fundamentada na relação entre o padrão urbano e as condições de escoamento. Essa conexão se deve ao efeito impermeável dos blocos edificados, à tipologia da cobertura das áreas adjacentes semipermeáveis e à ligação desses espaços com as ruas locais.

Com base no manual do usuário do SWMM 5.2 (U.S. EPA, 2022), a representação conceitual do fenômeno de escoamento utilizada por este modelo de gerenciamento de águas pluviais é exemplificada a seguir (Figura 42).

Figura 42 - Visão conceitual do fenômeno do escoamento no software PCSWMM.



Fonte: Adaptado do manual do usuário SWMM 5.2 (U.S. EPA, 2022). Organização: O autor.

Nessa abordagem, cada sub-bacia é tratada como um reservatório não linear, incorporando contribuições de diferentes tipos de precipitação (chuva, neve, etc.) e de qualquer sub-bacia situada a montante. O reservatório hipotético possui vários fluxos de saída, como infiltração, evaporação e escoamento superficial. Sua capacidade total é determinada pelo valor máximo

de armazenamento em depressões, considerando a água proveniente da interceptação e saturação. O escoamento Superficial Direto (ESD) ocorre somente quando a profundidade de água neste reservatório ultrapassa o valor máximo de armazenamento em depressões "dp". Nesse caso, o ESD é calculado pela equação clássica de Manning (1891).

Apesar do enfoque principal na variação da velocidade, a equação de Manning (Equação 14) é amplamente utilizada em estudos e modelagens hidráulicas para analisar a dinâmica do escoamento. Essa equação, fundamentada em bases empíricas, estabelece a relação entre a velocidade do fluxo em um canal ou tubulação, sua geometria, inclinação e o fator de rugosidade do material condutor.

Essencialmente, a equação de Manning possibilita a descrição do equilíbrio de energia entre a gravidade e a resistência oferecida por um determinado conduto, sendo aplicável em cálculos de vazão de canal aberto, perdas por fricção, capacidade, desempenho, entre outras variáveis (Raju, 1981; Carvalho, 2009; Azevedo Neto & Fernandez, 2015). Em unidades do Sistema Internacional, a equação de Manning é expressa como:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

n = coeficiente de rugosidade de Manning;

A = área da seção de escoamento (m²);

Rh = raio hidráulico (m);

S = declividade ou inclinação do gradiente de energia (m/m).

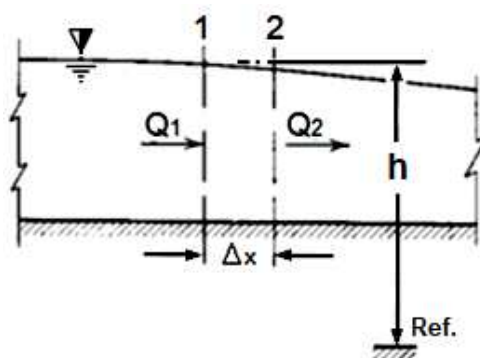
O coeficiente adimensional de Manning "n" varia entre valores próximos de 0 e 1, dependendo das características do material por onde ocorre o escoamento superficial, que pode ocorrer em superfícies livres, condutos fechados ou canais abertos. Alguns dos parâmetros da fórmula podem ser definidos de maneira diferente para frações de área permeável e impermeável da sub-bacia, especialmente os parâmetros "dp" e rugosidade. O

primeiro representa a quantidade de chuva que pode ser armazenada antes do início do escoamento. O segundo é determinado pelo coeficiente de rugosidade de Manning (n), que influencia o tempo de resposta da bacia hidrográfica e a forma do hidrograma (Silveira, 2005; Seidl, 2020).

O fator " n " é empregado pelo PCSWMM para roteamento do transporte hidráulico em condutos livres ou canais abertos, através da aplicação numérica das equações unidimensionais de conservação das massas e quantidade de movimento (equações de Saint Venant, do século XIX). De acordo com Porto (2006), essas fórmulas representam leis fundamentais que servem como base para estudos sobre os transitórios hidráulicos em escoamentos livres.

No que se refere à lei da conservação das massas (equação da continuidade), esta foi formulada inicialmente considerando um volume de controle em uma seção transversal de comprimento Δx muito pequeno, como ilustrado na Figura 43. Nesse contexto, as vazões Q_1 e Q_2 não necessariamente são iguais, divergindo em quantidade.

Figura 43 - Esboço conceitual - Equação da continuidade.



Fonte: Adaptado de Henderson (1966). Organização: O autor.

Considerando " h " como a altura da superfície da água acima do nível de referência, o volume de controle entre as seções 1 e 2 aumenta a uma taxa de variação de $B \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x$, onde " B " representa a largura do topo da seção. Assim, temos a equação da continuidade (Equação 15) em sua forma diferencial, conforme proposto por Henderson (1966).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (\text{Equação 15})$$

A lei da quantidade de movimento afirma que o somatório das forças atuantes sobre um volume de controle é igual à soma da variação temporal da quantidade de *momentum* dentro deste e o fluxo total da quantidade de movimento através da superfície de controle (Henderson, 1966). Portanto, em sua forma diferencial, temos a Equação 16:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + Q \frac{\partial Q}{\partial x} + g \left(\frac{\partial Y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

x = distância na direção do escoamento (m);

A = área molhada da seção transversal (m²);

y = profundidade da lâmina líquida (m);

S₀ = declividade de fundo (m/m);

S_f = declividade da linha de energia (m/m);

g = aceleração da gravidade (m²/s).

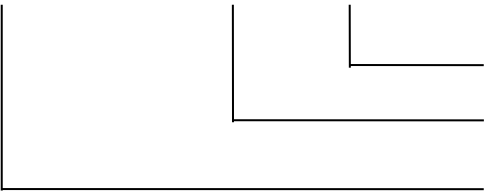
t = tempo (s)

No contexto do PCSWMM, os termos na equação são definidos da seguinte forma: a área "A" refere-se à seção do condutor; "Q" é a vazão escoada; "x" corresponde ao comprimento longitudinal; "S₀" representa a perda de carga; "g" é a aceleração da gravidade; "S_f" indica a declividade devido ao atrito; e "y" representa a carga de pressão no interior do condutor (Xu *et al.*, 2022).

O *software* é capaz de realizar cálculos de modelagem para diferentes condições de escoamento, incluindo movimento essencialmente uniforme, adequado para análises simplificadas; onda cinemática, indicado para redes ramificadas com longos tempos de duração do transporte; e onda dinâmica, utilizado em malhas e condições mais complexas.

Esses métodos de processamento utilizam a equação de Manning para estabelecer a relação entre a vazão e a profundidade do escoamento, a inclinação do conduto ou a linha d'água. Uma exceção ocorre nos casos de escoamentos pressurizados em condutos circulares, nos quais são empregadas as equações de Darcy-Weisbach (do século XIX) ou de Hazen-Williams (do século XX) (U.S. EPA, 2010; Azevedo Neto & Fernandez, 2015; Seidl, 2020). No entanto, destaca-se que a situação de conduto forçado não faz parte do escopo deste trabalho.

As equações de Saint-Venant são empregadas para descrever a transformação do evento de precipitação em escoamento superficial sobre uma bacia hidrográfica, permitindo a geração do hidrograma de fluxo na saída do sistema (Liang & Melching, 2015). É possível decompor a equação da quantidade de movimento (Equação 17) nos seguintes níveis de interpretação hidráulica (Gomes, 2006):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} - g(AS_0 - S_f) = 0 \quad \text{(Equação 17)}$$


Onda Cinemática – Escoamento permanente e uniforme.

Onda Difusiva – Simplificação da onda dinâmica.

Onda Dinâmica – Escoamento não permanente e não uniforme.

De modo geral, a representação da propagação de vazão no processo de modelagem é conduzida com base em várias abordagens das equações de Saint-Venant, que compreendem o conjunto formado pela equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento ou onda dinâmica (Alves, 2018). Em relação aos termos da equação da quantidade de movimento ou onda dinâmica, são estabelecidas as seguintes correspondências (Quadro 9):

Quadro 9 - Termos da equação da quantidade de movimento.

Termos da Equação da Quantidade de Movimento	Correspondência
$\frac{\partial Q}{\partial t}$	Aceleração local - variação da quantidade de movimento devido a variação de velocidade no tempo. Representa o efeito das forças de inércia no escoamento (Chow, 1988).
$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$	Aceleração convectiva - variação da quantidade de movimento devido a variação de velocidade ao longo do conduto. Representa o efeito das forças de inércia no escoamento (Chow, 1988).
$gA \frac{\partial y}{\partial x}$	Termo da força de pressão - diferença das resultantes da pressão hidrostática que atuam na fronteira do volume de controle; proporcional à variação da profundidade do escoamento ao longo do conduto.
gAS_0	Termo da força de gravidade - proporcional à declividade de fundo do condutor.
gAS_f	Termo da força de atrito - proporcional à declividade da linha de energia.

Fonte: Adaptado de Sleigh & Goodwill (2000). Organização: O autor.

O PCSWMM permite escolher o nível de interpretação hidráulica desejado por meio das equações de Saint Venant, possibilitando a seleção entre os modelos de transporte por fluxo uniforme, onda cinemática ou onda dinâmica (U.S. EPA, 2010).

O modelo de transporte por fluxo uniforme representa a forma mais simples de movimentação da água, sem a propagação de vazões. Nesse caso, assume-se que, em cada intervalo de tempo de cálculo, o escoamento apresenta movimento permanente e uniforme (Azevedo Neto & Fernandez, 2015). Esse modelo transfere o hidrograma de entrada no nó de montante do conduto para o nó de jusante, sem atraso ou alteração no movimento e regime. Para relacionar a vazão com a área e a profundidade no conduto, utiliza-se a equação de Manning. Além disso, esse modelo negligencia o armazenamento da água nos condutos, o ressalto hidráulico, as perdas na entrada e na saída, os efeitos de remanso e o fluxo pressurizado.

O critério de onda cinemática resolve a equação da continuidade em conjunto com uma versão simplificada da equação da quantidade de movimento para cada um dos condutos. Este modelo requer que a declividade da superfície livre da água corresponda à declividade do fundo do conduto. É apropriado para redes ramificadas, proporcionando precisão e eficiência

em condições de transporte de água com longos períodos de simulação. No entanto, assim como o modelo de fluxo uniforme, ignora os efeitos de ressalto hidráulico, perdas nas entradas e saídas, remanso e fluxo pressurizado (U.S. EPA, 2010).

Em contrapartida, o modelo hidráulico de onda dinâmica resolve as equações unidimensionais completas de Saint Venant, sendo teoricamente capaz de gerar resultados mais precisos. Contudo, esse método requer incrementos de tempo de cálculo menores, da ordem de 1 minuto ou menos, para garantir a estabilidade numérica da análise (U.S. EPA, 2010).

Amiri *et al.* (2020) destacam que a calibração hidráulica depende da precisão dos parâmetros de frequência, duração e magnitude dos eventos. Isso demanda uma revisão rigorosa dos critérios de majoração e minoração das descargas de inundação, influenciando diretamente os custos associados ao planejamento, projeto e implementação de soluções de drenagem urbana.

Caso haja necessidade de replicar dados de uma bacia para outra, a estatística oferece ferramentas para o teste e a regionalização de variáveis hidrológicas e hidráulicas. Isso é particularmente relevante quando os dados primários disponíveis para o desenvolvimento do modelo são limitados em termos de previsibilidade (Naghattini & Pinto, 2007; Amiri *et al.*, 2020; Souza, Oliveira & Rodrigues, 2023).

- CAPÍTULO 4 -

Resultados e Discussões

4.1 Análise Estatística Preliminar

Os resultados do modelo foram analisados com foco no comportamento estatístico dos histogramas das séries de precipitação total (P) e da chuva efetiva (Pe) (Tabela 11). Posteriormente, foram incluídos os dados de vazão gerada por Pe no exutório (Qex). As análises utilizaram dados da modelagem para o cenário urbanístico de 2013 a 2014. As investigações estatísticas foram realizadas par a par, visando verificar, por meio de testes de hipóteses, a relação causa e efeito entre as variáveis selecionadas. As amostras consideraram um Tempo de Retorno de 10 anos, parâmetro comumente empregado no dimensionamento de microdrenagem. Os hidrogramas das chuvas hipotéticas apresentaram curvas de desenvolvimento semelhantes (Figuras 41 - a; b), indicando a manutenção da relação entre as variáveis para os demais Tempos de Retorno.

Tabela 11 - Séries de precipitação total (P) e chuva efetiva (Pe), para Tr 10 anos.

Data Hipotética do Evento	Espaço Temporal do Evento (hr)	Precipitação "P" Met. Chicago I (mm/hr)	Chuva Efetiva "Pe" (PCSWMM) I (mm/hr)
23/10/2023	00:00:00	2,080	2,010
23/10/2023	01:00:00	2,261	2,170
23/10/2023	02:00:00	2,491	2,380
23/10/2023	03:00:00	2,795	2,650
23/10/2023	04:00:00	3,220	3,000
23/10/2023	05:00:00	3,874	3,520
23/10/2023	06:00:00	5,062	4,390
23/10/2023	07:00:00	8,410	6,180
23/10/2023	08:00:00	37,000	14,240
23/10/2023	09:00:00	10,607	14,210
23/10/2023	10:00:00	6,955	7,990
23/10/2023	11:00:00	5,442	5,970
23/10/2023	12:00:00	4,572	4,890
23/10/2023	13:00:00	3,993	4,220
23/10/2023	14:00:00	3,574	3,740
23/10/2023	15:00:00	3,254	3,380
23/10/2023	16:00:00	2,999	3,100
23/10/2023	17:00:00	2,791	2,880
23/10/2023	18:00:00	2,617	2,700
23/10/2023	19:00:00	2,469	2,530
23/10/2023	20:00:00	2,341	2,400
23/10/2023	21:00:00	2,229	2,280
23/10/2023	22:00:00	2,130	2,170
23/10/2023	23:00:00	2,042	2,080
24/10/2023	00:00:00	0,000	0,000
TOTAL		125,208	105,080

** Provável Outlier*

Fonte: Organização: O autor.

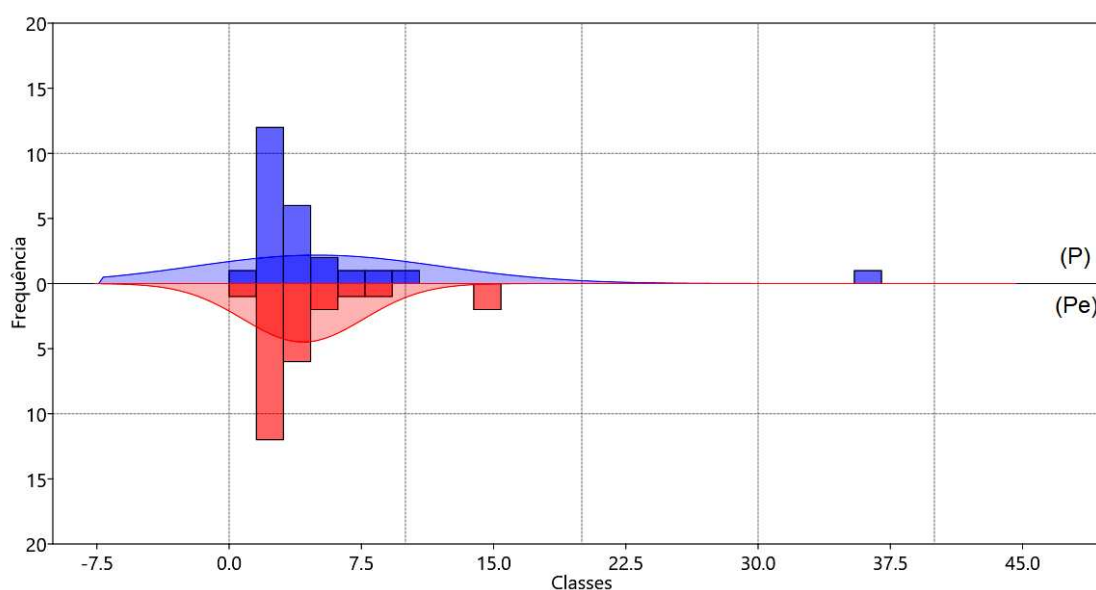
4.1.1 Teste de Significância: Chuva Total (P) e Efetiva (P_e)

O estudo dos hidrogramas busca entender se as amostras de variáveis contínuas, representadas por P e P_e são aceitavelmente simétricas, ou seja, se possuem apenas um ponto máximo centrado no intervalo de classe onde está a média da distribuição, e se os seus histogramas de frequências possuem um contorno que segue, ao menos aproximadamente, o “desenho em forma de sino” da curva normal.

Contudo é necessário salientar que o cumprimento de requisitos estatísticos iniciais apenas condiciona a primeira escolha do pesquisador, uma vez que, se forem preenchidos, é possível utilizar a estatística paramétrica, cujos testes são em geral mais poderosos do que os da estatística não paramétrica, e por efeito devem ter a preferência do investigador, quando o seu emprego for permitido (Campos, 2000).

Os respectivos histogramas das séries de precipitação hipotética (P) definida pelo método de Chicago, e de chuva efetiva (P_e) pós-simulação no *software* PCSWMM, são apresentados na Figura 44. Nota-se que embora apontados prováveis *outliers* na Tabela 11, representados pelos valores: 37,000 e 10,607 mm/hr (chuva hipotética); 14,240 e 14,210 mm/hr (chuva efetiva), a análise e constatação dos dados discrepantes, ou seja, fora do intervalo definido pelos dois conjuntos de variáveis, é refinada posteriormente com o uso de BoxPlot.

Figura 44 - Histograma das séries de precipitação hipotética (P) e efetiva (P_e), definidas pelo método de Chicago, considerando o Tempo de Retorno (Tr) 10 anos.

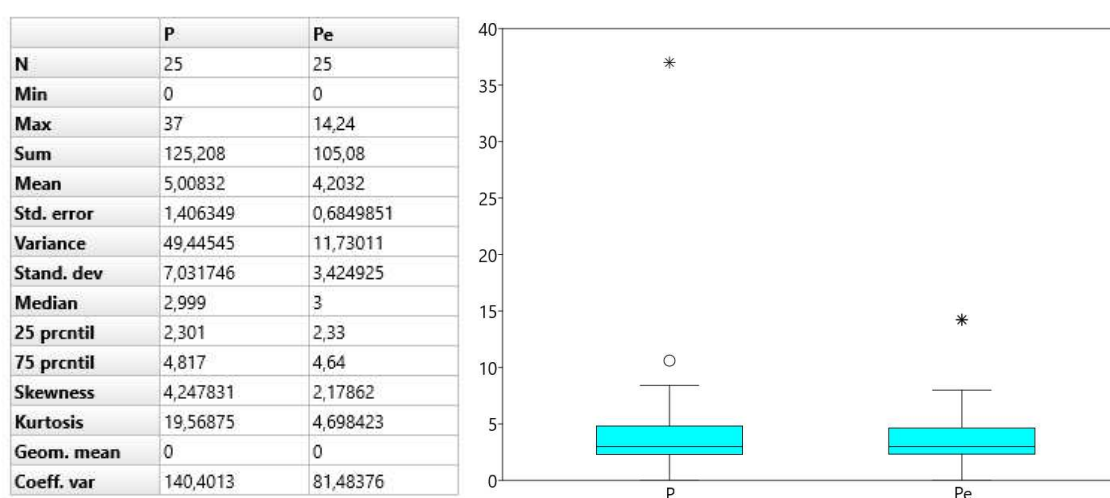


Fonte: Gráficos elaborados no *Past Statistical Software 3.26* (Hammer *et al.*, 2001). Organização: O autor.

Apesar da aparente tendência de distribuição normal (Gaussiana) observada em ambas as séries, a simples análise dos histogramas não prova este comportamento, exigindo, portanto, o uso de outros recursos estatísticos para avaliação da normalidade dos dados.

Assim, foi realizada a estatística descritiva das amostras, seguida de análise por *Box Plot* (Figura 45), processada pelo *Past Statistical Software 3.26* (Hammer *et al.*, 2001). Para cada amostra, os quartis de 25-75% são desenhados usando uma caixa. A mediana é apresentada com uma linha horizontal dentro da caixa. Os valores máximo e mínimo são mostrados com linhas horizontas curtas (“*whiskers*”). Esses elementos gráficos ilustram a posição, dispersão, assimetria, caudas e dados discrepantes, auxiliando na melhor compreensão sobre a variabilidade dos conjuntos. Os *whiskers* são desenhados do topo da caixa até o maior ponto que esteja a menos do que 1.5 vezes dos valores dos quartis 25 e 75%. Valores fora dos limites internos são apresentados como círculos e valores maiores que três alturas da caixa da caixa (“limites externos” – “*outer fences*”), com asteriscos.

Figura 45 - *Box Plot* (P; P_e).

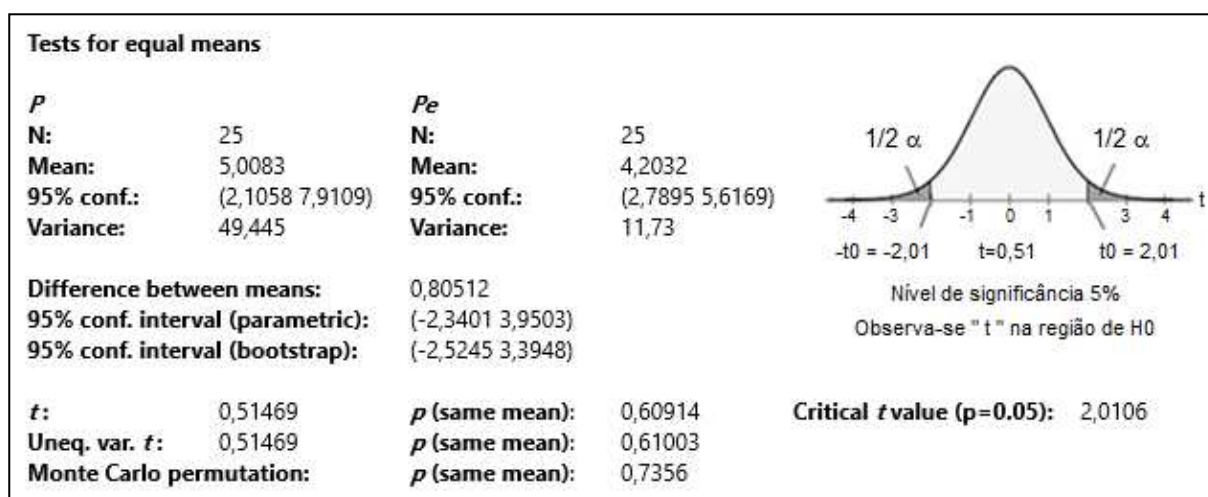


Fonte: Processado pelo *Past Statistical Software*. Organização: O autor.

A análise do *Box Plot* conclui a presença dos *outliers* apontados preliminarmente na Tabela 11. Observa-se também, que o conjunto de dados de chuva hipotética (P) possui maior dispersão que o conjunto de precipitação efetiva (P_e). Contudo é possível apontar alguns aspectos: (i) os valores extremos identificados são típicos da natureza aleatória dos dados, ainda que tenhamos uma série hipotética de precipitação (P) concebida pelo método empírico de Chicago (Keifer & Chu, 1957), sobre a qual é notório dizer que em sua essência emprega curvas IDF deduzidas a partir de uma série histórica de um fenômeno natural, no caso, a

chuva; (ii) ao ignorar os *outliers* nos histogramas da Figura 44, e focar somente no comportamento dos valores remanescentes, podemos deduzir que a distribuição dos dados tende a uma curva de Gauss o que permite utilizar inicialmente, recursos da estatística paramétrica; (iii) a partir do teste de Levene executado no *Past Statistical Software* foi possível comparar a variância dos conjuntos de amostras com a variância geral, resultando em $p\text{-Levene} > 0,05$, confirmando a hipótese de homoscedasticidade; (iv) Considerando o tamanho apropriado das amostras para realização dos testes estatísticos (n_P e $n_{Pe} = 25$), a “tendência” de distribuição normal (Gaussiana) e a homogeneidade dos dados, aplica-se o teste t de *Student*. Os valores resultantes são apresentados na Figura 46 considerando todos os dados de precipitação “P” e de chuva efetiva “Pe”.

Figura 46 - Valores resultantes do teste t-student e padrão de distribuição dos conjuntos de dados amostrais.



Fonte: Processado a partir do aplicativo *Past Statistical Software*. Organização: O autor.

O teste de hipóteses define se o padrão probabilístico de uma variável aleatória pode ser modelado pela função de probabilidade testada (Naghetini & Pinto, 2007). Para fins de análise estatística, foi estabelecido o intervalo de desvios não significativos correspondente a 95% dos valores amostrais ($\alpha = 0,05$). Assim, temos as seguintes hipóteses definidas: **H₀ (hipótese nula ou de nulidade)**: prevê a igualdade (=) entre as médias dos dados de precipitação hipotética (P) e de chuva efetiva (Pe) e; **H₁ (hipótese alternativa)**: considera a diferença (\neq) significativa entre as médias.

Callegari-Jacques (2003) explica que a área caudal associada a um valor calculado de teste é denominada nível descritivo amostral, nível crítico amostral ou simplesmente “valor-p”. Esse parâmetro representa a probabilidade de se obter, ao acaso, um valor igual ou mais extremo

que o valor obtido no teste-t. Portanto, $\alpha = 0,05$ representa um valor particular de “p” inferido como critério de significância estatística do teste de hipóteses. Um “valor-p” $\leq 0,05$ é “estatisticamente significativo”, ou seja, rejeita a hipótese nula (H_0). Se “valor-p” $> 0,05$, temos um resultado “não significativo”, portanto, não rejeita H_0 .

Observa-se na Figura 46, que a estatística de teste-t para as amostras independentes constatou que o efeito da chuva de projeto sobre a chuva efetiva apresenta t-estatístico menor que t-crítico ($0,51469 < 2,0106$), portanto, **não rejeita H_0** . Observa-se que os valores críticos de “t” para intervalos de confiança (α) e os graus de liberdade selecionados, também podem ser obtidos por meio de tabela da distribuição *t-student* (Larson & Farber, 2010).

No caso em análise, pode-se afirmar que o teste-t é “não significativo”, pois o “valor-p” encontrado é maior que 0,05 comprovando que os dados das amostras não diferem significativamente de uma distribuição normal padrão, mesmo com a presença dos *outliers* detectados.

Ressalta-se que o teste *t-student* foi concebido originalmente para a comparação entre a média de dois conjuntos amostrais, no entanto também é possível empregar, o “*Analysis of Variance*” (ANOVA). Trata-se de um teste mais robusto empregado em circunstâncias mais complexas, com dois ou mais grupos de variáveis, com quantidade e qualidade amostral iguais ou divergentes. Todavia seu uso exige que as variâncias amostrais (s^2_i) sejam semelhantes nas diferentes amostras e que o conjunto “ x_i ” de observações tenha distribuição normal (Callegari-Jacques, 2003).

Ao não rejeitar H_0 verifica-se indícios de forte evidência, ao nível de significância de 5%, para a existência de uma correlação linear, ou seja, uma relação reversa de causa e efeito entre as variáveis, confirmando a distribuição normal (Gaussiana). **Portanto, a análise estatística comprova em um primeiro momento o comportamento dependente da chuva efetiva processada pelo software PCSWMM em relação à precipitação de projeto.**

Nessas condições os dados podem ser representados por pares ordenados (x_i, y_i), sendo “x” a variável independente (ou explanatória) e “ y_i ” a variável dependente (ou resposta). O relacionamento representado graficamente pode, ou não, apresentar um padrão de disposição dos dados. Se a dispersão das amostras se aproximar de uma reta configura-se então uma correlação linear que segundo Larson & Farber (2010), corresponde a existência matemática de uma associação entre duas variáveis quantitativas.

De acordo com Naghettini e Pinto (2007), no estudo de correlação linear de Pearson, temos um par de variáveis que demonstram a relação, na medida em que os pontos do diagrama de dispersão se aproximam de uma reta. O nível de correlação entre uma variável dependente (y_i) e a independente (x_i) é analisado por método gráfico cartesiano, com a produção do respectivo diagrama de dispersão e pela interpretação do coeficiente de correlação linear (r) que representa a intensidade da associação entre duas variáveis quantitativas contínuas (Naghettini & Pinto, 2007). A força da relação entre os dois conjuntos de variáveis é avaliada pelo coeficiente de correlação linear “ r ”, conhecido na literatura como “coeficiente de correlação produto-momento de Pearson” em homenagem ao estatístico inglês Karl Pearson (1857–1936), o qual permite a quantificação da intensidade de interdependência entre os dados emparelhados (Larson & Farber, 2010).

Podemos verificar também nesse estudo, o coeficiente de determinação (R^2) que é igual ao quadrado de “ r ”, utilizado para informar o quanto (proporcionalmente) a fração de variabilidade característica de uma variável pode ser explicada estatisticamente por outra (Callegari-Jacques, 2003).

Uma vez calculado o “ r ”, é possível determinar em tabelas do próprio método escolhido se há evidência suficiente para decidir se o valor- p é significativo ou não. Como o coeficiente de correlação linear “ r ” é calculado a partir de dados amostrais, faz-se necessária uma avaliação preliminar de modo que: as amostras (x_i , y_i) devem ser aleatórias e paramétricas (amostras com distribuição normal); o diagrama de dispersão obtido deve apresentar o padrão de uma reta e; os *outliers* de erro de leitura devem ser removidos. Não sendo o caso, deve-se calcular o valor de “ r ” com e sem o(s) *outlier(s)* (Triola, 2008). A Equação 18 para o cálculo do coeficiente de correlação é uma fórmula simplificada, citada por Triola (2008), Larson & Farber (2010) e Ribeiro (2012):

$$r = \frac{n(\sum xy - (\sum x)(\sum y))}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (\text{Equação 18})$$

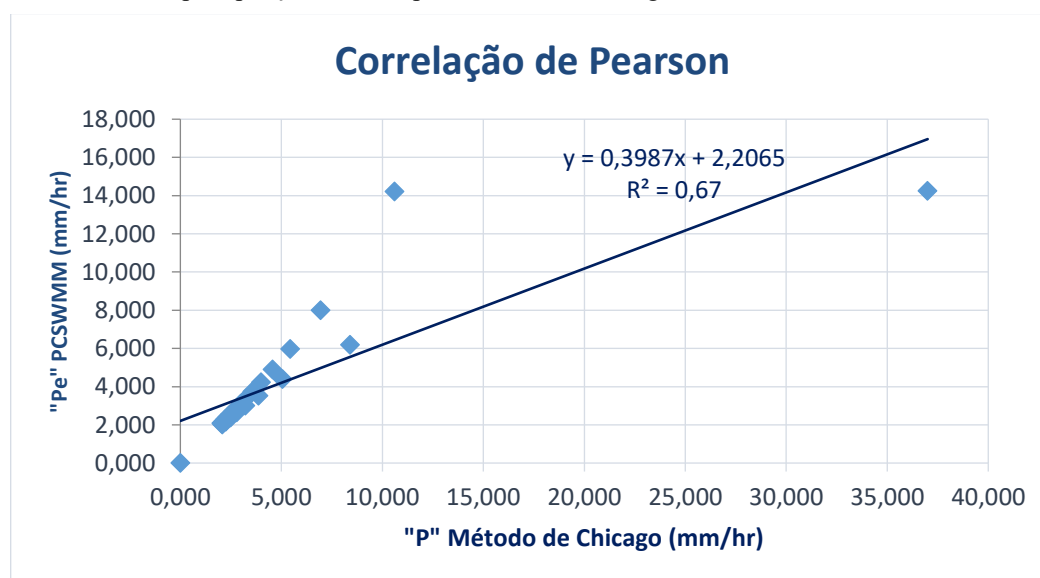
Sendo “ r ” o coeficiente de correlação amostral de Pearson, que pode variar entre -1 e +1; “ n ” o número de pares de variáveis e; “ x ”; “ y ” os valores medidos de ambas as variáveis. Seu cálculo pode ser realizado celeremente pela função “*PEARSON(matriz1;matriz2)*”

disponibilizada por uma planilha eletrônica, sendo a matriz 1 o conjunto de variáveis “P” independentes (x_i) e a matriz 2 o conjunto de valores “P_e” dependentes (y_i).

Considerando que exista um relacionamento funcional entre os valores “ x_i ” e “ y_i ”, responsável pelo aspecto do diagrama, a função deverá explicar parcela a variação de “ y_i ” com “ x_i ”. Entretanto, outra parte da variação permanece inexplicada e deve ser atribuída ao acaso. Assim, admite-se a existência de uma função que explica, em termos médios, a permutação linear entre as variáveis, porém, e com certa frequência, os pontos observados apresentarão uma variação em torno da reta de regressão, devido à existência de uma oscilação aleatória adicional denominada de variação residual (Naghetini & Pinto, 2007).

É possível constatar o nível de correlação entre os pares (x_i, y_i) pelo comportamento do diagrama de dispersão e pela equação de regressão linear, empregando-se os coeficientes obtidos e a representação matemática do grau de aproximação entre as variáveis contínuas. Observa-se na Figura 47 a correlação positiva entre “P” que acompanha a tendência crescente de “P_e”. Importante notar que os *outliers* identificados foram mantidos na análise considerando que o teste *t-student* resultou em não rejeição da hipótese nula (H_0).

Figura 47 - Gráfico de dispersão, equação de regressão e coeficiente de determinação entre os conjuntos de dados de precipitação definida pelo método de Chicago “P” e de chuva efetiva “P_e”.



Fonte: Elaborado no *software* Excel. Organização: O autor.

Após a definição da correlação “ r ” verificamos as seguintes hipóteses: H_0 , que diz **não existir correlação** entre as duas variáveis e H_1 , que **considera a existência de correlação**. No respectivo caso, o teste executado no aplicativo *Past Statistical Software*, resultou em $p <$

0,05, e, portanto, rejeita-se a hipótese nula (H_0), indicando que há uma correlação estatisticamente significativa entre os grupos.

Naghetini & Pinto (2007) afirmam que o modelo de regressão linear simples será perfeito se todos os pontos da amostra utilizados na estimativa dos parâmetros estiverem sobre a reta ajustada. Entretanto, a ocorrência de um modelo perfeito dificilmente será observada, principalmente quando se tratarem de variáveis aleatórias hidrológicas (Souza; Oliveira & Rodrigues, 2023).

Nota-se que os avanços computacionais favorecem cálculos mais exatos para os testes estatísticos eliminando a consulta de tabelas padronizadas e o consequente uso de valores aproximados como referência conclusiva (Callegari-Jacques, 2003). Todavia, e apesar das soluções tecnológicas e planilhas eletrônicas para estatística, deve-se considerar a importância do conhecimento sobre o uso da análise de regressão e suas implicações. Tal fato explica o início das análises deste estudo pelo gráfico de dispersão de modo contemplar a existência de possível relação gráfica visual entre as variáveis explicativas “ x_i ” e a resposta “ y_i ”. Somente após, partiu-se para a verificação das suposições do modelo de regressão (homoscedasticidade, normalidade e independência) e a consequente apropriação dos resultados.

Uma vez assumida a possibilidade da existência de correlação entre os pares ordenados, pôde-se avaliá-la qualitativamente quanto a sua intensidade (Tabela 12), empregando o critério citado por Callegari-Jacques (2003):

Tabela 12 - Critério qualitativo para avaliação da intensidade do $|r|$.

$ r $	A correlação é dita:
0	Nula
0 --- 0,3	Fraca
0,3 --- 0,6	Regular
0,6 --- 0,9	Forte
0,9 --- 1	Muito Forte
1	Plena ou perfeita

Fonte: Callegari-Jacques (2003).

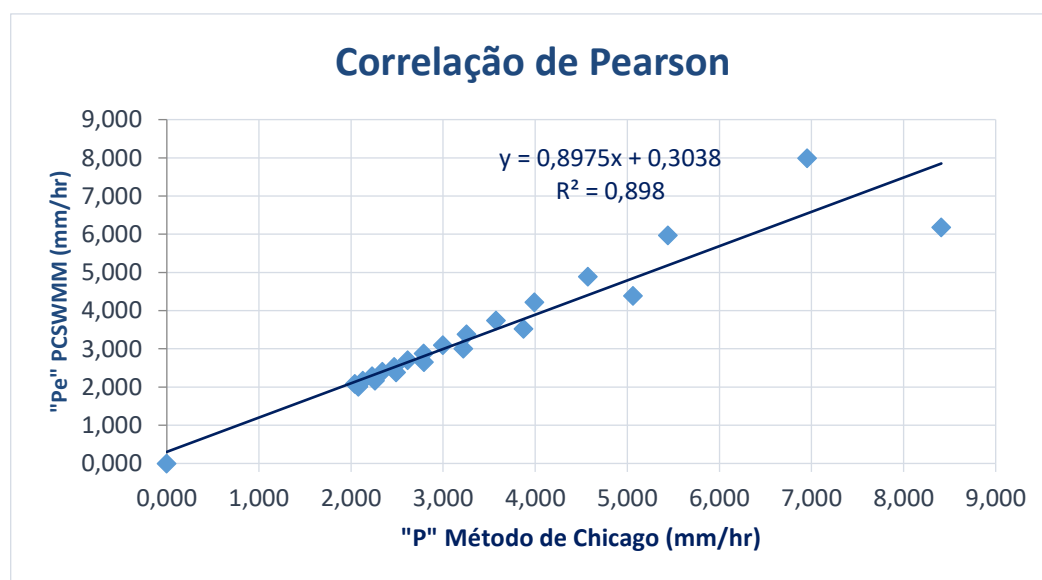
No caso em análise, foi definido como referência um valor $|r| \geq 0,90$ de modo a garantir uma correlação linear muito forte entre as séries (Silvia & Shimakura, 2006). Contudo foi obtido $|r|$ igual a 0,8185, ou seja, uma correlação positiva e forte tal que, aproximadamente 82% da

variação observada nos dados de chuva efetiva resultante da simulação hidrológica realizada no PCSWMM, podem ser “explicadas” pela variação da chuva total concebida pelo Método de Chicago.

Salienta-se que é possível avaliar esse mesmo parâmetro, empregando-se a tabela de valores críticos de Pearson, onde as variáveis de entrada são o número de pares de dados da amostra e o nível de significância da correlação amostra-população; e o dado de saída é o coeficiente de correlação crítico (r_c), abaixo do qual a correlação é insatisfatória (Lima, 2018).

Complementarmente, nota-se que o valor de $|r|$ é altamente influenciado pelos *outliers* identificados, os quais, se retirados da correlação apresentada na Figura 47 importam em expressivo aumento da intensidade do “r” que salta para 0,9476, superando o valor de referência $|r| \geq 0,90$ (Figura 48). Contudo trata-se apenas de uma hipótese, pois se sabe que não há controle absoluto sobre o comportamento de um evento natural, e que é comum as amostras conterem tanto *outliers* originados por falhas de registro como por anomalias características do próprio fenômeno.

Figura 48 - Gráfico de dispersão, equação de regressão e coeficiente de determinação entre os conjuntos de dados de precipitação (hipotética) definida pelo método de Chicago “P” e de chuva efetiva “P_e”, pós-simulação no PCSWMM – sem *outliers*.



Fonte: Elaborado no software Excel. Organização: O autor.

É preciso salientar que a natureza dos dados mistos (empíricos e observados) aliados ao emprego de métodos determinísticos requer extrema cautela quanto ao uso de testes estatísticos de um coeficiente de correlação, para atendimento como parâmetro decisório, de

modo que é sempre recomendável considerar a possibilidade de que haja outros fatores modificadores dos níveis de associação entre as variáveis.

Para acrescentar maior confiabilidade à correlação adotou-se complementarmente o teste “*Analysis of Variance*” (ANOVA), efetuado a partir do aplicativo *Past Statistical Software*, o qual resultou nas seguintes informações (Figura 49):

Figura 49 - Valores resultantes do teste ANOVA para o conjunto de dados (P; P_c).

Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	ρ (same)
Between groups:	8,10273	1	8,10273	0,2649	0,6091
Within groups:	1468,21	48	30,5878		Permutation ρ (n=99999)
Total:	1476,32	49			0,7327
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	-0,899402	Var(error):	30,5878	ICC:	-0,0302948
ω^2 :	0				
Levene's test for homogeneity of variance, from means				ρ (same):	0,3671
Levene's test, from medians				ρ (same):	0,5886
Welch F test in the case of unequal variances: F=0,2649, df=34,78, ρ =0,61					

Fonte: Processado a partir do aplicativo *Past Statistical Software*. Organização: O autor.

Considerando $\alpha = 0,05$ inferido como critério de significância estatística constata-se no teste ANOVA, um p-valor “não significativo”, ou seja, maior que 0,05, tal como constatado no teste *t-student*. Observa-se por esse mesmo raciocínio, que o teste de igualdade das variâncias das amostras aponta para um p-valor, também, “não significativo”, assegurando a não rejeição da hipótese nula de homoscedasticidade. Todavia, os métodos de análise de frequência assim como a elaboração dos gráficos de probabilidade normal dos erros também contribuem para a verificação da hipótese de normalidade entre os resíduos (Naghetini & Pinto, 2007).

Todavia, há duas condições a serem consideradas na análise de regressão linear simples, além da linearidade, ou seja, a **normalidade** e a **homoscedasticidade dos resíduos** (diferença entre o valor observado da variável “ y_i ” e o valor predito pela reta de regressão “ ye ”). A primeira estabelece que os valores de “ y_i ” são normalmente distribuídos para cada valor de “ x_i ” e a hipótese de homoscedasticidade estabelece que os resíduos ou erros são realizações de uma variável aleatória independente e normalmente distribuída, com média zero e variância

constante. Entretanto, para pequenas amostras, as definições podem não ser conclusivas (Naghattini & Pinto, 2007).

Ressaltando que quando um valor de “ y_e ” é previsto a partir de um valor de “ x_i ”, essa previsão é pontual. Todavia, é possível construir uma estimativa para cada intervalo de “ y_e ” predito, calculando antecipadamente, o erro padrão da estimativa (Larson & Farber, 2010). A medida da dispersão dos pontos amostrais em torno da reta de regressão ou erro padrão da estimativa (S_e) é calculada considerando uma “distribuição-t” (t-crítico) correspondente ao nível de confiança (α) adotado, com (n-2) graus de liberdade (gl) de modo que, a partir de sua estimativa pode-se determinar o intervalo de previsão (E) para o valor real da variável observada (y_i), para atender o intervalo de confiança: $y_e - E < y_i < y_e + E$.

A Equação 19 é utilizada para calcular a referida medida da dispersão dos pontos amostrais em torno da reta de regressão (S_e):

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - y_e)^2}{n-2}} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde, “ S_e ” é o erro padrão da estimativa; “ y_i ” é o valor da precipitação efetiva na bacia; “ y_e ” é o valor estimado da precipitação a partir da equação de regressão linear e; “n-2” são os graus de liberdade, em que “n” é o número de pares de dados.

Pela Equação 20, calcula-se o intervalo de previsão (E):

$$E = t_c S_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{n(X_i - X_m)^2}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}} \quad (\text{Equação 20})$$

Onde, “E” é o intervalo de previsão para o valor real da variável “ y_i ”; “ S_e ” é o erro padrão da estimativa; “ x_i ” é o valor da precipitação definida pelo Método de Chicago; “ X_m ” é a média dos valores observados; “ t_c ” é o valor crítico da distribuição-t correspondente ao nível de confiança (α) adotado; “n” é o número de pares de variáveis.

Uma outra medida fundamental para entender o ajuste de uma regressão é o erro padrão da estimativa (S_e). O modelo de regressão linear simples será perfeito se todos os pontos da amostra utilizados na estimativa dos parâmetros estiverem sobre a reta ajustada, porém, a ocorrência de um modelo com tal perfeição dificilmente será observada, principalmente quando se tratarem de variáveis aleatórias hidrológicas (Naghetini & Pinto, 2007). Nesse caso, a regressão possibilitará apenas uma estimativa aproximada de um valor de y_e para um dado valor de x_i .

Os cálculos do erro padrão da estimativa (S_e) e os intervalos de previsão (E), bem como os principais resultados do estudo de correlação linear para os pares (P ; P_e), são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Estudo do erro padrão da estimativa (S_e) e intervalos de previsão (E) para os pares (P ; P_e).

Data	Dados	Chuva Total	Chuva Efetiva		Equação (Pearson): $y = 0,3987x + 2,2065$			$Y_e - E < Y_i < Y_e + E$	
Hipotética		$X_i = P$ (mm/hr)	$Y_i = P_e$ (mm/hr)	X_i^2	Estimado (Y_e)	$(Y_i - Y_e)^2$	$(X_i - X_m)^2$	E Interv. previsão	Situação
23/10/2023	1	2,080	2,010	4,33	3,04	1,05	8,58	3,40	OK
23/10/2023	2	2,261	2,170	5,11	3,11	0,88	7,55	3,40	OK
23/10/2023	3	2,491	2,380	6,21	3,20	0,67	6,34	3,40	OK
23/10/2023	4	2,795	2,650	7,81	3,32	0,45	4,90	3,39	OK
23/10/2023	5	3,220	3,000	10,37	3,49	0,24	3,20	3,39	OK
23/10/2023	6	3,874	3,520	15,01	3,75	0,05	1,29	3,39	OK
23/10/2023	7	5,062	4,390	25,62	4,22	0,03	0,00	3,39	OK
23/10/2023	8	8,410	6,180	70,73	5,56	0,38	11,57	3,40	OK
23/10/2023	9	37,000	14,240	1369,00	16,96	7,39	1023,47	4,58	OK
23/10/2023	10	10,607	14,210	112,51	6,44	60,44	31,35	3,43	ATENÇÃO
23/10/2023	11	6,955	7,990	48,37	4,98	9,06	3,79	3,39	OK
23/10/2023	12	5,442	5,970	29,62	4,38	2,54	0,19	3,39	OK
23/10/2023	13	4,572	4,890	20,90	4,03	0,74	0,19	3,39	OK
23/10/2023	14	3,993	4,220	15,94	3,80	0,18	1,03	3,39	OK
23/10/2023	15	3,574	3,740	12,77	3,63	0,01	2,06	3,39	OK
23/10/2023	16	3,254	3,380	10,59	3,50	0,02	3,08	3,39	OK
23/10/2023	17	2,999	3,100	8,99	3,40	0,09	4,04	3,39	OK
23/10/2023	18	2,791	2,880	7,79	3,32	0,19	4,92	3,39	OK
23/10/2023	19	2,617	2,700	6,85	3,25	0,30	5,72	3,40	OK
23/10/2023	20	2,469	2,530	6,10	3,19	0,44	6,45	3,40	OK
23/10/2023	21	2,341	2,400	5,48	3,14	0,55	7,11	3,40	OK
23/10/2023	22	2,229	2,280	4,97	3,10	0,66	7,72	3,40	OK
23/10/2023	23	2,130	2,170	4,54	3,06	0,78	8,28	3,40	OK
23/10/2023	24	2,042	2,080	4,17	3,02	0,88	8,80	3,40	OK
24/10/2023	25	0,000	0,000	0,00	2,21	4,87	25,08	3,42	OK
Média		5,01	4,20	$r=0,8185$	$R^2=0,6700$	Erro padrão estimativa (S_e) =		1,63	
Σ		125,21	105,08	1813,77	105,08	92,91	$\alpha =0,05$	$tc =$	2,0322
		Desv Pad $S_{Y_i} =$		3,42					

Fonte: Processado a partir de planilha eletrônica. Organização: O autor.

Naghetini & Pinto (2007) alertam para a necessidade de verificação da regressão linear pela comparação do erro padrão da estimativa (S_e), com o desvio padrão (S_{y_i}) da variável dependente, considerando que ambos apresentam as mesmas unidades. Caso a equação de regressão se ajuste bem aos dados amostrais, o erro padrão da estimativa se aproximará de zero. Entretanto, se " S_e " estiver muito próximo do desvio padrão de " y_i ", o ajuste entre os

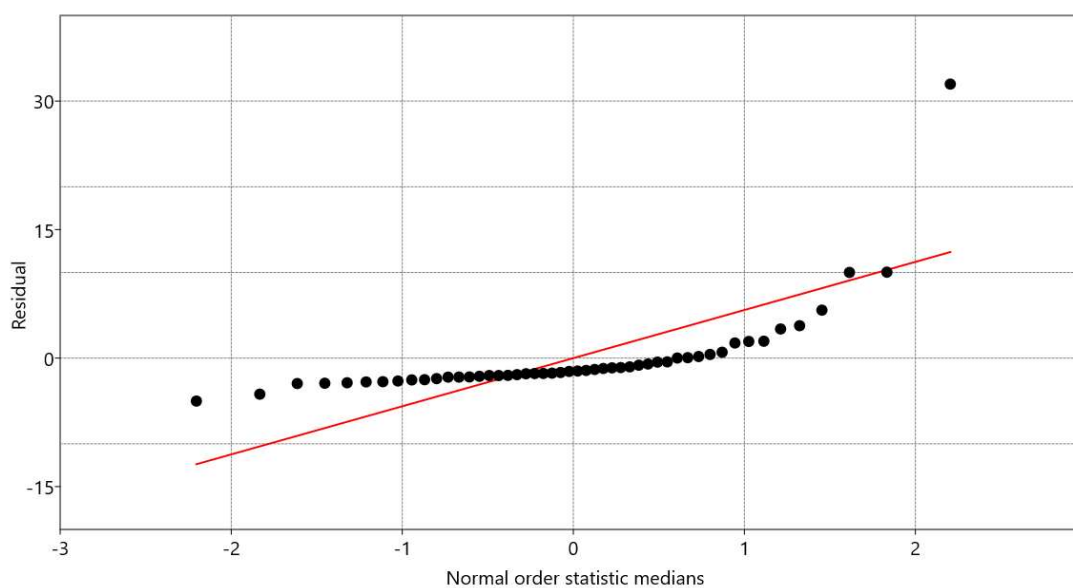
dados amostrais e a equação de regressão podem ser ruins. Resumidamente, quanto menor for o “ S_e ”, menor será amplitude do intervalo de confiança, o que significa maior precisão da estimativa.

Conclui-se pelos resultados apresentados na Tabela 13 que a medida de dispersão dos pares (P; P_e) ratifica o coeficiente de determinação (R^2) encontrado. Embora o estudo do erro padrão apresente “ S_e ” com um valor relativamente distante de zero ($S_e = 1,63$), ainda assim mantem-se longe do desvio padrão ($Sy_i = 3,42$), demonstrando afinidade entre as séries de precipitação. Salienta-se que a coluna “situação” indica se o intervalo de previsão foi satisfeito ou não, exigindo atenção e a devida interpretação, diante de anomalias estatísticas observadas.

Importante destacar que o “ S_e ” tem como influência o fato de que a metodologia aplicada na sua determinação considera que as variáveis estudadas tenham distribuição normal, o que não é muito convencional em registros de chuva, uma vez que esse tipo de amostra apresenta alta variabilidade, dificultando a determinação do padrão de distribuição estatística (Larson & Farber, 2010; Souza; Oliveira & Rodrigues, 2023).

Após constatação da normalidade e homogeneidade das amostras, foi adotada também a análise da normalidade para os resíduos a partir do *Past Statistical*, obtendo-se o seguinte comportamento do gráfico Quantil-Quantil ou “Q-Q Plot” (Figura 50):

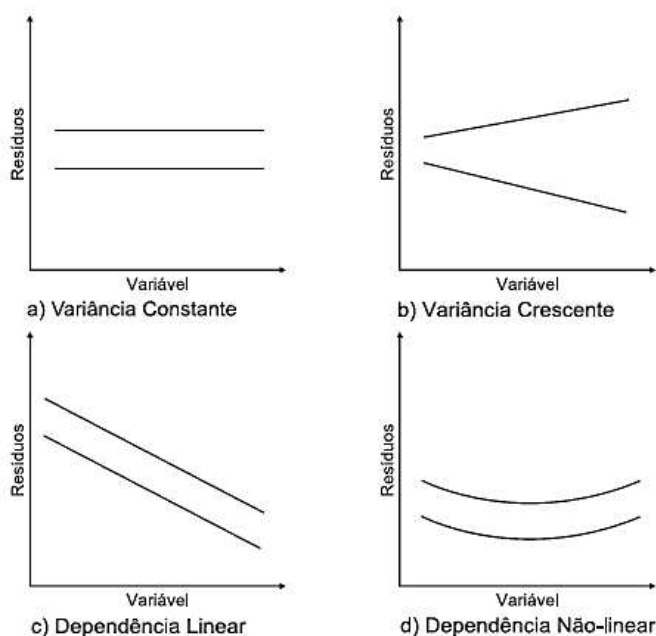
Figura 50 - Comportamento gráfico Q-Q Plot da variância dos resíduos para o conjunto de dados (P; P_e).



Fonte: Processado a partir do aplicativo *Past Statistical Software*. Organização: O autor.

Considerando a hipótese de média nula para os resíduos, identificada no diagrama, é possível verificar por analogia gráfica o comportamento da função característica, de modo a concluir em qual situação de verificação e violação de variância constante se enquadra o padrão representado (Figura 51).

Figura 51 - Situações de verificação e violação de variância constante dos resíduos.

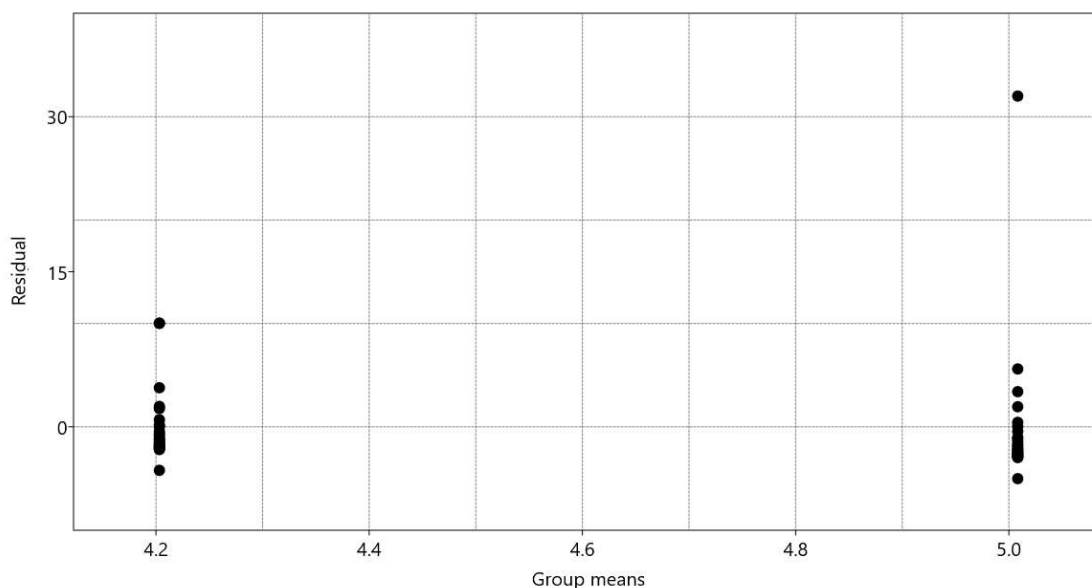


Fonte: Naghettini & Pinto (2007).

Pelo padrão gráfico da Figura 50 em comparação com as situações apresentadas na Figura 51, conclui-se que há uma **dependência não-linear** entre os resíduos das variáveis (P ; P_e). Considerando a subjetividade oferecida pela análise visual adotou-se na sequência um método objetivo para a realização de teste não-paramétrico de aderência à distribuição normal.

Assim, corroborando com a informação gráfica, o resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (*Past Statistical Software*), utilizado na avaliação das diferenças entre os erros, retornou “p-valor” $< 0,05$ que rejeita a hipótese nula de normalidade dos resíduos.

Neste caso, como não há variação constante, nota-se o problema de heteroscedasticidade confirmando que a dispersão dos erros cresce de maneira quadrática com os valores de “x”. Ainda, uma última confirmação pode ser apreciada pelo gráfico das médias dos grupos (P ; P_e) em relação aos resíduos (Figura 52). No caso em análise, percebe-se nítida dispersão assimétrica dos resíduos em torno de “zero”, constatando novamente a heteroscedasticidade.

Figura 52 - Gráfico das médias dos grupos (P; P_e) em relação aos resíduos.

Fonte: Processado a partir do aplicativo Past Statistical Software. Organização: O autor.

Percebe-se no gráfico anterior que a ocorrência de um valor muito extremo na amostra reflete a variabilidade constatada. Conquanto, a heteroscedasticidade identificada parece estar de fato condicionada sensivelmente pela natureza das variáveis e por uma provável omissão (involuntária) de dados mais representativos no modelo de regressão.

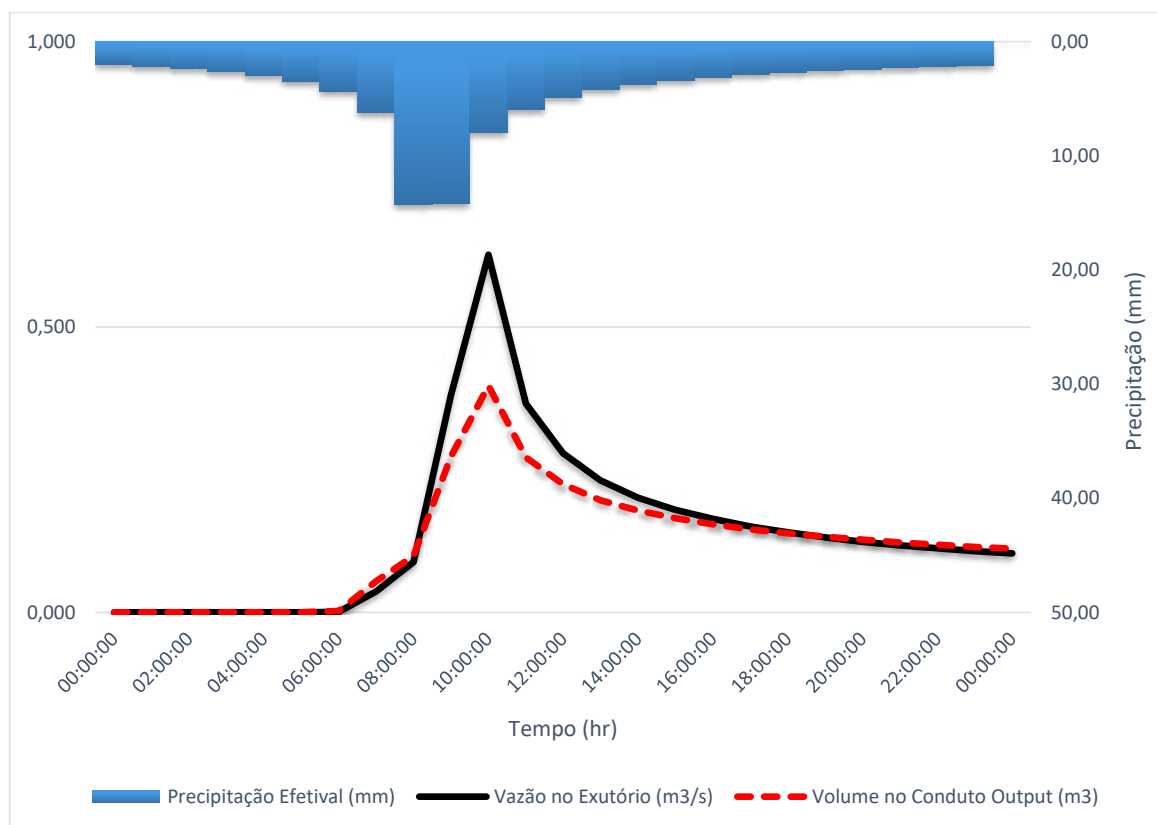
Não obstante, uma forma de avaliar com maior segurança a intensidade da associação entre o conjunto de dados de chuva efetiva (P_e) e de precipitação total (P) seria considerar o aumento do espaço temporal de observação dos fenômenos, aumentando na mesma proporção a quantidade de amostras. Se efetivamente existir uma forte correlação, um aumento “n” ocasionará a redução no erro padrão de “r”, com igual elevação do valor-p do teste-t, tornando-o, eventualmente, mais significativo do ponto de vista estatístico.

A consideração espaço-temporal do hidrograma e da própria resposta hidrológica da bacia hidrográfica, decorre de uma série parâmetros físicos, dentre eles o entendimento de que após o início da chuva ocorre um **tempo de retardo** até que o escoamento inicie e que esse atraso se deve basicamente, as perdas iniciais por interceptação, retenção e armazenamento de água em depressões superficiais.

A Figura 53 apresenta a resposta hidrológica da área de estudo, representada pelo Hidrograma Unitário (HU) que considera a vazão que passa pelo exutório hipotético (Q_{ex}) e o hietograma da chuva efetiva (P_e) para o tempo de recorrência de 10 Anos (Cenário 2013-2014).

Adicionalmente é apresentado o comportamento do volume escoado pelo conduto que antecede o exutório do modelo.

Figura 53 - Resposta hidrológica (Hidrograma Unitário) da área de estudo para Tr 10 anos.



Fonte: Elaborado no software Excel. Organização: O autor.

Salienta-se conforme Gribbin (2014), que nem toda a quantidade de chuva precipitada se transforma em escoamento. Parte é perdida para o próprio processo de *runoff* por meio de infiltração, evaporação, armazenamento em micro e macrodepressões da superfície e até por evapotranspiração. O restante, ou seja, aquilo que não se perde, compreende a precipitação efetiva que se transforma de fato em escoamento.

Entre os momentos que definem o início do fluxo superficial e o seu completo deflúvio, é preciso destacar o **tempo de recessão ou de descida** que compreende o momento de declínio da vazão até o ponto de inflexão da curva do hidrograma (Tucci, 2001). Nesse sentido, e sem risco de prejuízo às análises estatísticas até aqui realizadas, pode-se verificar ainda, que o conjunto amostral de precipitação total (P) “projetado” para o Tr de 10 anos, empregado no modelo alcança todo o espaço temporal necessário entre o princípio e o fim do fenômeno.

Sobre as variáveis "P" e "Pe", conclui-se que não há evidência suficiente, ao nível de significância de 5%, para apoiar a afirmação de que as variâncias dos dados apresentam diferenças significativas. Portanto, observa-se homoscedasticidade entre as amostras. As investigações estatísticas realizadas par a par indicam uma associação entre as variáveis, evidenciando possível relação de causa e efeito.

4.1.2 Teste de Significância: Chuva Efetiva (P_e) e Vazão no Exutório (Q_{ex})

Na seção anterior foi verificado o nível de associação e de relação entre as amostras de chuva total (P) e efetiva (P_e) do modelo proposto. Doravante, pressupondo um exutório hipotético definido na confluência das avenidas João Naves de Ávila com a avenida Segismundo Pereira, à extrema jusante da “unidade hidrológica” caracterizada pela área de estudo, será adotado o mesmo arcabouço estatístico para verificação da aderência entre os resultados da modelagem hidrológico-hidráulica, e as decisões preliminares do arranjo, considerando as seguintes hipóteses: **H₀ (hipótese nula ou de nulidade)** que prevê a igualdade (=) entre as médias de chuva efetiva (P_e) e de vazão roteada no exutório (Q_{ex}), ambas calculadas pelo PCSWMM e; **H₁ (hipótese alternativa)** que considera a diferença (\neq) significativa entre essas médias.

Supondo um valor- $p > 0,05$ teremos um resultado “não significativo” e, portanto, H_0 não será rejeitada. Neste caso, o teste de hipótese resultará em uma concordância entre as médias de chuva efetiva (P_e) e de vazão roteada no exutório (Q_{ex}), ou seja, haverá uma alta probabilidade, maior que 5%, de se observar semelhança entre os dois grupos de variáveis. Entretanto, esse fato indicará tão somente a chance de se observar uma afinidade maior que a observada sob a hipótese alternativa (H_1), não dispensando, portanto, análises mais aprofundadas sobre o comportamento dos dados.

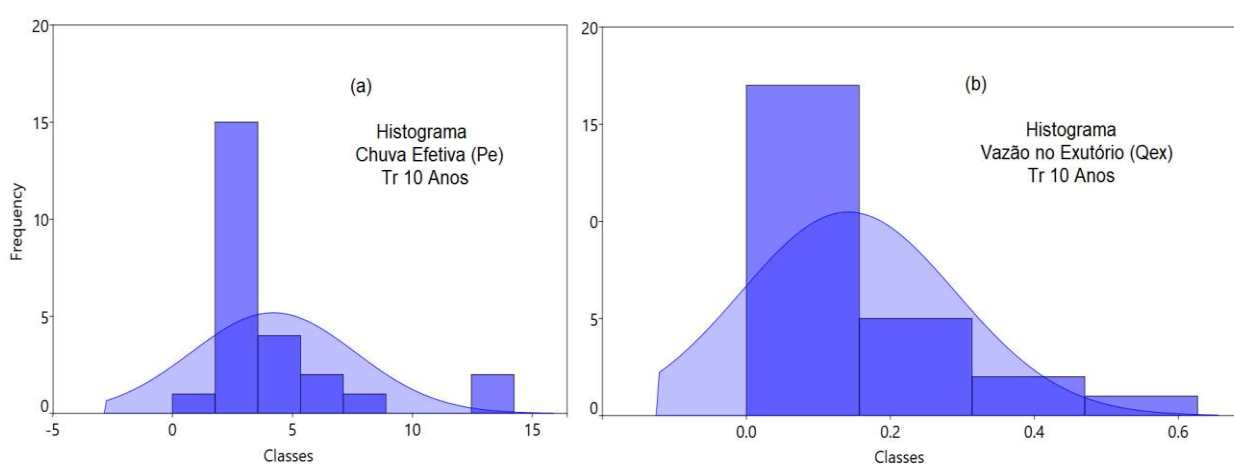
Assim, quanto menor for esse valor (valor- $p \leq 0,05$) mais segurança haverá para se rejeitar H_0 indicando a análise de um evento incomum. Todavia, é necessário observar que mesmo um “valor- p ” muito baixo não constitui prova de que a hipótese nula (H_0) seja totalmente falsa e sim, que muito provavelmente seja, requerendo novamente, uma análise mais sensível do cenário apresentado (Larson & Farber, 2010).

As amostras para avaliação do comportamento estatístico dos dados de chuva efetiva (P_e) e da vazão roteada no exutório (Q_{ex}) são apresentadas na Tabela 14. Os respectivos histogramas elaborados no *Past Statistical Software* estão ilustrados nas Figuras 54 – a; b. Ressalta-se novamente que a série de precipitação (P_e), em avaliação, resulta de um evento hipotético definido para o **Tempo de Retorno (Tr) 10 anos**, a partir do Método de Chicago (Keifer & Chu, 1957). Em todos os casos, foram considerados os dados resultantes da simulação hidrológico-hidráulica do cenário urbanístico com maior ocupação, resultante do levantamento realizado entre os anos de 2013 e 2014 pela R&V.

Tabela 14 - Séries de chuva efetiva (P_e) e vazão roteada no exutório (Q_{ex}), para Tr 10 anos.

Data Hipotética do Evento	Espaço Temporal do Evento (hr)	Chuva Efetiva "Pe"	Vazão (Q_{ex})
		(PCSWMM) I (mm/hr)	OF1 (Exutório) (m ³ /s)
23/10/2023	00:00:00	2,010	0,000
23/10/2023	01:00:00	2,170	0,000
23/10/2023	02:00:00	2,380	0,000
23/10/2023	03:00:00	2,650	0,000
23/10/2023	04:00:00	3,000	0,000
23/10/2023	05:00:00	3,520	0,000
23/10/2023	06:00:00	4,390	0,001
23/10/2023	07:00:00	6,180	0,037
23/10/2023	08:00:00	14,240	0,088
23/10/2023	09:00:00	14,210	0,381
23/10/2023	10:00:00	7,990	0,627
23/10/2023	11:00:00	5,970	0,366
23/10/2023	12:00:00	4,890	0,279
23/10/2023	13:00:00	4,220	0,231
23/10/2023	14:00:00	3,740	0,201
23/10/2023	15:00:00	3,380	0,180
23/10/2023	16:00:00	3,100	0,164
23/10/2023	17:00:00	2,880	0,150
23/10/2023	18:00:00	2,700	0,140
23/10/2023	19:00:00	2,530	0,132
23/10/2023	20:00:00	2,400	0,124
23/10/2023	21:00:00	2,280	0,117
23/10/2023	22:00:00	2,170	0,112
23/10/2023	23:00:00	2,080	0,107
24/10/2023	00:00:00	0,000	0,104
TOTAL		105,080	3,540

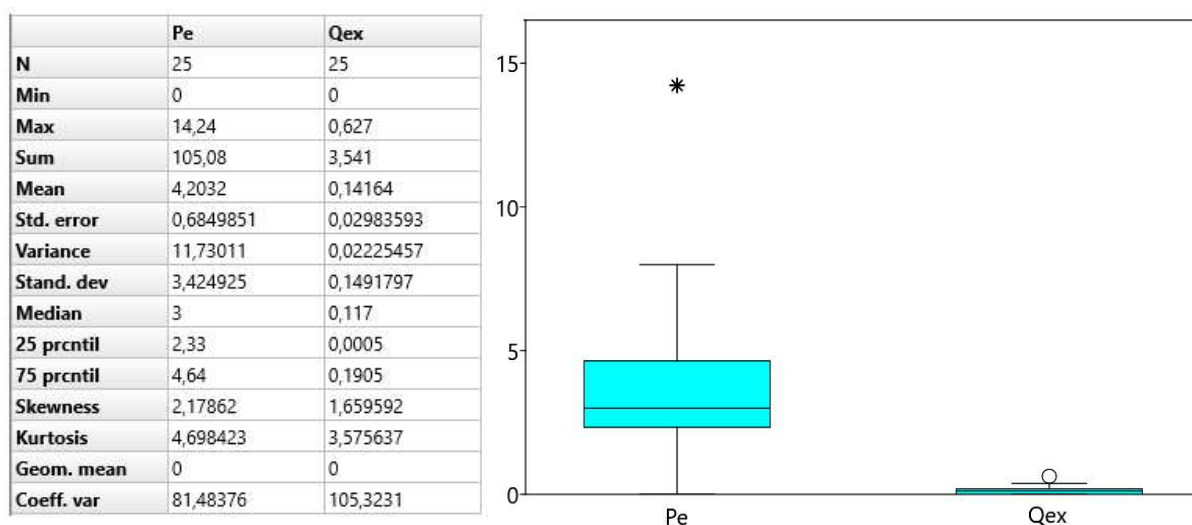
Fonte: Organização: O autor.

Figura 54 - (a) Histograma da série de chuva efetiva (P_e). (b) Histograma da vazão no exutório (Q_{ex}).

Fonte: Gráficos elaborados no *Past Statistical Software*. Organização: O autor.

Apesar da aparente tendência de distribuição normal (Gaussiana) observada em ambas as séries, a mera análise dos histogramas não é suficiente para validar esse comportamento. Portanto, são empregadas outras ferramentas estatísticas para uma avaliação mais robusta da normalidade dos dados. Nesse contexto, procedeu-se à realização da estatística descritiva das amostras, seguida de uma análise por meio de *Box Plot*, conforme apresentado na Figura 55 e processado pelo *Past Statistical Software*, possibilitando o reconhecimento dos respectivos padrões de dispersão dos dados.

Figura 55 - *Box Plot* (Pe; Qex).



Fonte: Processado a partir do suplemento *Real Statistics* do *software* Excel. Organização: O autor.

A análise do *Box Plot* apresenta *outliers* evidenciando maior dispersão no conjunto de dados de chuva efetiva (Pe) quando comparado ao conjunto da vazão roteada no exutório (Q_{ex}). Tal como ocorrido na seção anterior onde os *outliers* dos histogramas de “P” e “P_e” foram chamados à sua desconsideração para possibilitar a abstração da tendência de curva normal (Gaussiana), esse mesmo exercício é adotado de modo que é possível observar uma “tendência” de distribuição dos dados em “forma de sino” nas Figuras 54 – a; b.

Preliminarmente, a partir do teste de Levene executado no *Past Statistical Software*, foi possível comparar a variância dos conjuntos de amostras com a variância geral, resultando em $p\text{-Levene} < 0,05$, confirmando, portanto, uma heteroscedasticidade que por consequência **rejeita uma possível hipótese nula** de que as variâncias dos grupos possam ser homogêneas.

Considerando o tamanho apropriado das amostras para realização dos testes estatísticos (n_{Pe} e $n_{Q_{ex}} = 25$) e, a relativa “tendência” de distribuição normal, porém, com assimetria e heterogeneidade confirmada, é possível admitir como inapropriado o uso do teste-t de *Student*

para previsão do intervalo de confiança, resultando no uso do teste não paramétrico de Mann-Whitney, realizado no *Past Statistical Software*. O resultado, considerando todos os dados de “Pe” e “Qex” são apresentados na Figura 56.

Figura 56 - Resultado do teste de Mann-Whitney para os conjuntos de dados amostrais (Pe; Qex).

Tests for equal medians			
<i>Pe</i>		<i>Qex</i>	
N:	25	N:	25
Mean rank:	18,56	Mean rank:	6,94
Mann-Whitn U:	22		
z:	5,6345	p (same med.):	1,7552E-08
Monte Carlo permutation:		p (same med.):	0,0001

Fonte: Processado a partir do aplicativo *Past Statistical Software*. Organização: O autor.

O teste não paramétrico de Mann-Whitney da Figura 56 resultou em um valor-p muito menor que o nível de significância ($p < 0,05$) e, portanto, a hipótese nula é rejeitada. Neste caso há uma diferença significativa entre as medianas ou que leva a constatar que os dados das amostras diferem significativamente de uma distribuição normal. Empregando-se o teste de Kruskal-Wallis, também executado no aplicativo *Past Statistical Software*, foi comprovado valor- $p < 0,05$, constatando a diferença significativa entre as medianas dos dois grupos.

Os testes paramétricos como os empregados na seção anterior requerem que as amostras tenham distribuição normal. No caso dos pares (Pe; Qex) foi constatado claramente, um comportamento divergente deste, o que exigiu testes não paramétricos que, embora requeiram menos requisitos e possam ser utilizados em mais situações, são menos eficientes se comparados aos paramétricos. O teste de Kruskal-Wallis, por exemplo, consegue testar a igualdade das medianas de duas ou mais populações sem, contudo, exigir o caráter de distribuição normal. Caso tenham esse comportamento pode-se utilizar o teste t de *Student* até duas amostras e/ou o método ANOVA, para comparar as médias de três ou mais grupos (Moya, 2020).

Nota-se a importância de discernir a “não significância” da “significância” estatística nos processos naturais. A significância estatística para um determinado “ α ” depende do número de observações e da magnitude da diferença. Assim, um resultado não significativo estatisticamente indica que é provável que a diferença seja casual, determinado por efeito de

amostragem. Por outro lado, um resultado estatisticamente significativo indica que a diferença é confiável, e menor que 5% a probabilidade de ser falsa (Callegari-Jacques, 2003).

Na modelagem em estudo, a relevante diferença entre as médias das amostras de “Pe” e “Qex” indica a presença de processos aleatórios entre o início e o fim do escoamento que contribui para a desproporcionalidade entre o *input* e *output* do sistema.

Para verificar a existência de uma correlação linear entre duas variáveis quantitativas, provenientes de amostras com distribuição normal, utiliza-se o coeficiente de correlação linear de Pearson. Todavia, na ausência de uma “tendência” Gaussiana, ou seja, diante de amostras com características não paramétricas, pode-se empregar o Teste de Correlação de Spearman. Assim, temos as seguintes hipóteses: **H₀**, que diz **não existir correlação** entre as duas variáveis e **H₁**, que **considera a existência de correlação**.

Salienta-se que os valores de “p” desse tipo de correlação não se aplicam para postos de dados em pares. Caso o valor da estatística do teste seja maior do que α , deve-se aceitar a hipótese nula e concluir que não há evidência suficiente de existência de uma correlação entres os postos (Moya, 2020).

No respectivo caso, o teste executado no aplicativo *Past Statistical Software*, resultou em $p < 0,05$, e, portanto, rejeita-se a hipótese nula (H_0), indicando que há uma correlação estatisticamente significativa entre os grupos. Para o estudo da correlação de Spearman foi definido um valor $|rs| \geq 0,90$ como critério qualitativo de intensidade. Contudo o $|rs|$ calculado resultou em 0,483, ou seja, uma correlação positiva e regular tal que, aproximadamente 48% da variação observada nos dados de vazão no exutório resultante da simulação hidrológica realizada no PCSWMM podem ser “explicadas” pela variação da chuva efetiva.

Conforme dito na seção anterior, há duas hipóteses a serem consideradas para análise de regressão linear simples, além da linearidade, ou seja, a **normalidade** e a **homoscedasticidade dos resíduos** (diferença entre o valor observado da variável “Y_i” e o valor predito pela reta de regressão “Y_e”). Quando o valor de “Y_e” (P_e) é previsto a partir de um valor de “X_i” (Q_{ex}), essa previsão é pontual. Neste caso, foi concebida uma estimativa por intervalo para cada “Y_e” predito calculando o erro padrão da estimativa (S_e), considerando neste caso, a correlação de Spearman. Os cálculos de “S_e”, os intervalos de previsão (E) e demais resultados, são apresentados na Tabela 15. Salienta-se que a coluna “situação” indica

se o intervalo de previsão foi satisfeito ou não, exigindo atenção e a devida interpretação das anomalias estatísticas observadas.

Tabela 15 - Estudo do erro padrão da estimativa (S_e) e intervalos de previsão (E) para os pares (P_e ; Q_{ex}).

Data Hipotética	Dados	Chuva Total $X_i = P$ (mm/hr)	Chuva Efetiva $Y_i = P_e$ (mm/hr)	X_i^2	Equação (Spearman): $y = 0,5215x + 6,22$ Estimado (Ye)	$(Y_i - Y_e)^2$	$(X_i - X_m)^2$	Ye - E < Yi < Ye + E E Interv. previsão	Situação
23/10/2023	1	2,010	0,000	4,04	7,27	52,83	4,81	18,25	OK
23/10/2023	2	2,170	0,000	4,71	7,35	54,05	4,13	18,23	OK
23/10/2023	3	2,380	0,000	5,66	7,46	55,67	3,32	18,20	OK
23/10/2023	4	2,650	0,000	7,02	7,60	57,79	2,41	18,17	OK
23/10/2023	5	3,000	0,000	9,00	7,78	60,60	1,45	18,14	OK
23/10/2023	6	3,520	0,000	12,39	8,06	64,89	0,47	18,11	OK
23/10/2023	7	4,390	0,001	19,27	8,51	72,40	0,03	18,10	OK
23/10/2023	8	6,180	0,037	38,19	9,44	88,47	3,91	18,22	OK
23/10/2023	9	14,240	0,088	202,78	13,65	183,82	100,74	20,98	OK
23/10/2023	10	14,210	0,381	201,92	13,63	175,55	100,14	20,97	OK
23/10/2023	11	7,990	0,627	63,84	10,39	95,26	14,34	18,54	OK
23/10/2023	12	5,970	0,366	35,64	9,33	80,42	3,12	18,19	OK
23/10/2023	13	4,890	0,279	23,91	8,77	72,10	0,47	18,11	OK
23/10/2023	14	4,220	0,231	17,81	8,42	67,06	0,00	18,10	OK
23/10/2023	15	3,740	0,201	13,99	8,17	63,51	0,21	18,10	OK
23/10/2023	16	3,380	0,180	11,42	7,98	60,89	0,68	18,12	OK
23/10/2023	17	3,100	0,164	9,61	7,84	58,87	1,22	18,14	OK
23/10/2023	18	2,880	0,150	8,29	7,72	57,33	1,75	18,15	OK
23/10/2023	19	2,700	0,140	7,29	7,63	56,07	2,26	18,17	OK
23/10/2023	20	2,530	0,132	6,40	7,54	54,88	2,80	18,18	OK
23/10/2023	21	2,400	0,124	5,76	7,47	53,99	3,25	18,20	OK
23/10/2023	22	2,280	0,117	5,20	7,41	53,17	3,70	18,21	OK
23/10/2023	23	2,170	0,112	4,71	7,35	52,41	4,13	18,23	OK
23/10/2023	24	2,080	0,107	4,33	7,30	51,80	4,51	18,24	OK
24/10/2023	25	0,000	0,104	0,00	6,22	37,41	17,67	18,64	OK
Média		4,20	0,14	$r=0,5215$	$R^2=0,2720$	Erro padrão estimativa (Se) =		8,60	
Σ		105,08	3,54	723,19	210,30	1781,24	$\alpha = 0,05$	$t_c =$	2,0639
		Desv Pad SYi =		0,15					

Fonte: Processado a partir de planilha eletrônica. Organização: O autor.

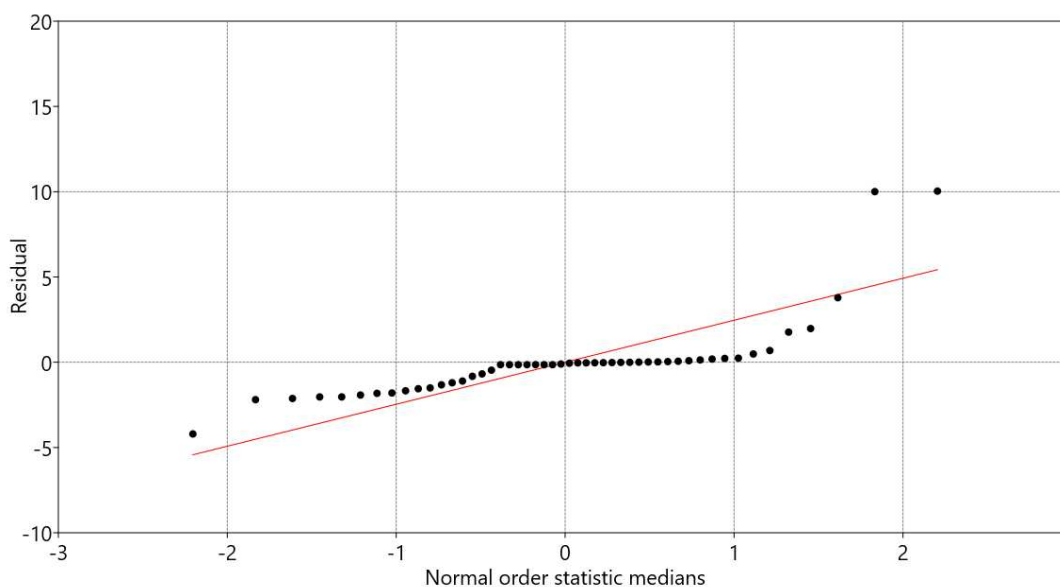
Considerando Naghetini & Pinto (2007), caso a equação de regressão se ajuste bem aos dados amostrais, o erro padrão da estimativa se aproximará de zero. Entretanto, se “ S_e ” estiver muito próximo do desvio padrão de “ y_i ”, o ajuste entre os dados amostrais e a equação de regressão podem ser falhos.

Observada a primeira verificação orientada por Naghetini & Pinto (2007) e com base nos resultados apresentados na Tabela 15, conclui-se que o estudo do erro padrão apresenta “ S_e ” com valor distante de zero ($S_e = 8,60$), ou seja, há evidências que apontam para dados amostrais desarmônicos. Entretanto, esse mesmo valor encontra-se consideravelmente distante do desvio padrão ($S_{y_i} = 0,15$) o que aponta, contraditoriamente, para uma afinidade entre as séries culminando, neste caso, em uma indefinição quanto ao resultado do estudo do erro padrão da estimativa (S_e) e intervalos de previsão (E) para os pares “ P_e ” e “ Q_{ex} ”.

De todo modo, observando os resultados dos testes que constataram a diferença significativa entre as medianas dos dois grupos, buscou-se compreender também o comportamento dos

resíduos a partir do *Past Statistical*, obtendo-se o seguinte comportamento do Q-Q Plot (Figura 57):

Figura 57 - Comportamento gráfico Q-Q Plot da variância dos resíduos para o conjunto de dados (P_e ; Q_{ex}).



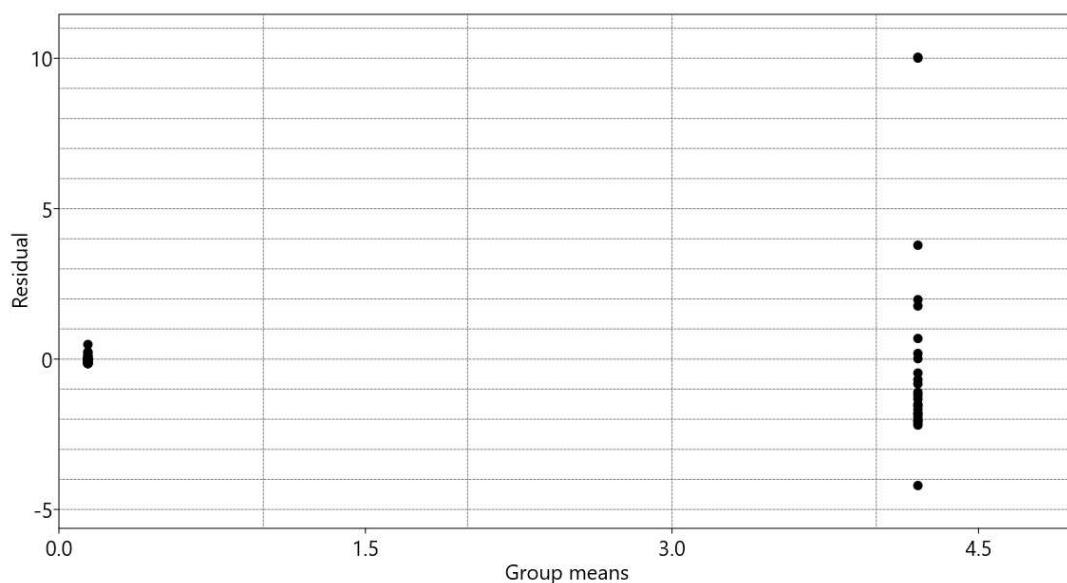
Fonte: Processado a partir do aplicativo *Past Statistical Software*. Organização: O autor.

Considerando a hipótese de média nula para os resíduos, identificada no diagrama, é possível verificar por analogia gráfica o comportamento da função característica, de modo a concluir em qual situação de verificação e violação de variância constante se enquadra o padrão representado.

Pelo padrão gráfico da Figura 57 e pela comparação com as situações apresentadas na Figura 51, conclui-se que há uma **dependência não-linear** entre os resíduos das variáveis (P_e ; Q_{ex}). Não diferente, o resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk realizado também no *Past Statistical Software*, para avaliação das diferenças entre os erros, retornou “p-valor” $< 0,05$ que rejeita a hipótese nula de normalidade dos resíduos.

Neste caso, como não há variação constante, temos uma heteroscedasticidade com a dispersão dos erros evoluindo de maneira anômala com os valores de “x”. Ainda, uma última confirmação pode ser apreciada pelo gráfico das médias dos grupos (P_e ; Q_{ex}) em relação aos resíduos (Figura 58). No caso em análise, percebe-se nítida dispersão assimétrica dos resíduos em torno de “zero”, constatando novamente a heteroscedasticidade.

Figura 58 - Gráfico das médias dos grupos (P_e ; Q_{ex}) em relação aos resíduos.



Fonte: Processado a partir do aplicativo *Past Statistical Software*. Organização: O autor.

Percebe-se no gráfico anterior (Figura 58) que a ocorrência de valores extremos na amostra de “ Q_{ex} ” reflete a variabilidade constatada. Assim, a heteroscedasticidade parece estar de fato relacionada à natureza das variáveis e, como justificada na seção anterior, pode haver uma ou mais omissões involuntárias de dados no modelo de regressão.

Em relação às variáveis “ P_e ” e “ Q_{ex} ”, constata-se que existe evidência suficiente, ao nível de significância de 5%, para respaldar a alegação de que as variâncias apresentam diferença significativa, indicando assim a presença de heteroscedasticidade entre as amostras. No entanto, as análises estatísticas realizadas de forma comparativa sugerem uma possível relação de causa e efeito entre as variáveis. Esse entendimento é respaldado pelas evidências observadas nas análises do padrão da estimativa (S_e) e nos intervalos de previsão (E), as quais indicam um nível de associação com provável interdependência entre os pares.

Pode-se inferir estatisticamente que o arranjo preliminar do modelo PCSWMM é consistente, permitindo, assim, sua extensão para o uso do Tempo de Retorno (Tr) de 50 anos, conforme inicialmente estabelecido nos objetivos desta pesquisa.

4.2 Produtos Pós-modelagem

O uso e ocupação do solo da área de estudo, considera o número da curva de escoamento superficial (CN), sobretudo a Tabela 7 (seção 1.5) que trata dos valores de CN para bacias urbanas e suburbanas. Os produtos cartográficos compreendem os cenários urbanísticos referentes ao Plano Diretor do Campus Santa Mônica (UFU, 1991) e ao levantamento topográfico planialtimétrico cadastral realizado entre os anos de 2013 e 2014. As seguintes categorias foram determinadas (Quadro 10).

Quadro 10 – Categorias de uso e ocupação do solo do Campus Santa Mônica.

Uso e Cobertura ⁽¹⁾	Número da Curva (CN)	Coefficiente de <i>Runoff</i>	Legenda
Condição boa - Cobertura com gramíneas - Acima de 75% da área	74	$C < 0,55$	
Condição justa - Cobertura com gramíneas - Entre 50% e 75% da área	79	$0,55 \leq C < 0,75$	
“CNw composto” Edificações (CN = 98) Área adjacente às edificações (CN = 79)	87	$0,75 \leq C < 0,95$	
Ruas pavimentadas	98	$C \geq 0,95$	

(1) Grupo Hidrológico do Solo - NRCS = Classe C

Fonte: Organizado pelo autor.

O coeficiente de *runoff* ("C"), também conhecido como coeficiente de deflúvio, é calculado dividindo a vazão de escoamento superficial da área de contribuição pelo total precipitado. Esse coeficiente varia de 0 a 1, onde valores próximos de 0 indicam alta capacidade de infiltração do solo ou do material de superfície e valores próximos de 1 refletem baixa capacidade de percolação, resultando em um aumento no escoamento superficial direto (ESD). Este parâmetro é influenciado por uma série de fatores, que podem variar de acordo com as características da área de estudo, tais como: tipo de solo, quantidade e qualidade da cobertura vegetal, topografia, uso da terra, intensidade e duração da chuva, e presença de sistemas de drenagem.

Considerando os valores de referência da Tabela 3 (seção 1.2), é possível constatar no Campus Santa Mônica elementos típicos da morfologia urbana, como a escassez de espaços vazios e uma expressiva densidade ocupacional de formas construídas, notadamente no cenário 2013-2014.

Uma das alterações espaciais observada na comparação entre os dois cenários abordados está relacionada à ampliação de áreas edificadas e áreas semipermeáveis adjacentes ($0,75 \leq C < 0,95$), ocupadas por elementos superficiais de calçamento e paisagismo, entre outros, em detrimento de áreas com boa cobertura de gramíneas ($C < 0,55$). Essa mudança reflete uma transformação com tendência de aumento da taxa de ocupação e redução de áreas permeáveis disponíveis. Decorre, por consequência, a modificação da dinâmica de fluxo superficial, com efeitos sobre o direcionamento das rotas de escoamento e sobre o pico de vazão do hidrograma local.

A partir dos dados obtidos pós-modelagem no *software* PCSWMM, para os TR's de 10 e 50 anos, foram realizadas análises comparativas e mapas temáticos considerando os indicadores da dinâmica do fluxo de ESD (Escoamento Superficial Direto) com base nas medidas de vazão ($Q = m^3/s$) e do comportamento dos pontos de alagamento atribuídos à distribuição espacial da altura da lâmina d'água ($H_a = m$), sintetizado no Quadro 11.

Quadro 11 – Produtos cartográficos resultantes pós-modelagem.

Indicadores	Produtos Cartográficos	Tempos de Retorno (Tr)	Total Precipitado em 24h (mm)	Pico de Precipitação em 24h (mm)	Cenários Urbanísticos
Dinâmica do Fluxo de ESD Vazão ($Q = m^3/s$)	Mapa 1	10 anos	125,21	37,00	Ano 1989
					Ano 2014
	Mapa 2	50 anos	158,18	46,74	Ano 1989
					Ano 2014
Pontos de Alagamento Altura da Lâmina D'água ($H_a = m$)	Mapa 3	10 anos	125,21	37,00	Ano 1989
					Ano 2014
	Mapa 4	50 anos	158,18	46,74	Ano 1989
					Ano 2014

Fonte: Organizado pelo autor.

Com o objetivo específico de constatar a relação entre os padrões de escoamento e alagamento identificados, é possível comprovar nos mapas 1, 2, 3 e 4 apresentados (Figuras 59 a 62), clara influência do *layout* das vias de tráfego sobre o comportamento da vazão e da concentração das águas pluviais, sobretudo quando colocado em comparação o desenho urbano estabelecido pelo cenário urbanístico do ano de 1989, com as transformações morfológicas da área de estudo observadas em 2014. A proposta do desenho ou projeto do sistema viário, e a escolha de alternativas construtivas em desarmonia com a morfometria do terreno, contribuíram para a redistribuição do fluxo de escoamento.

Figura 59 – Mapa 1 – Dinâmica do Fluxo de Escoamento Superficial Direto (ESD) – Cenários 1989 e 2014 – Tr 10 Anos.

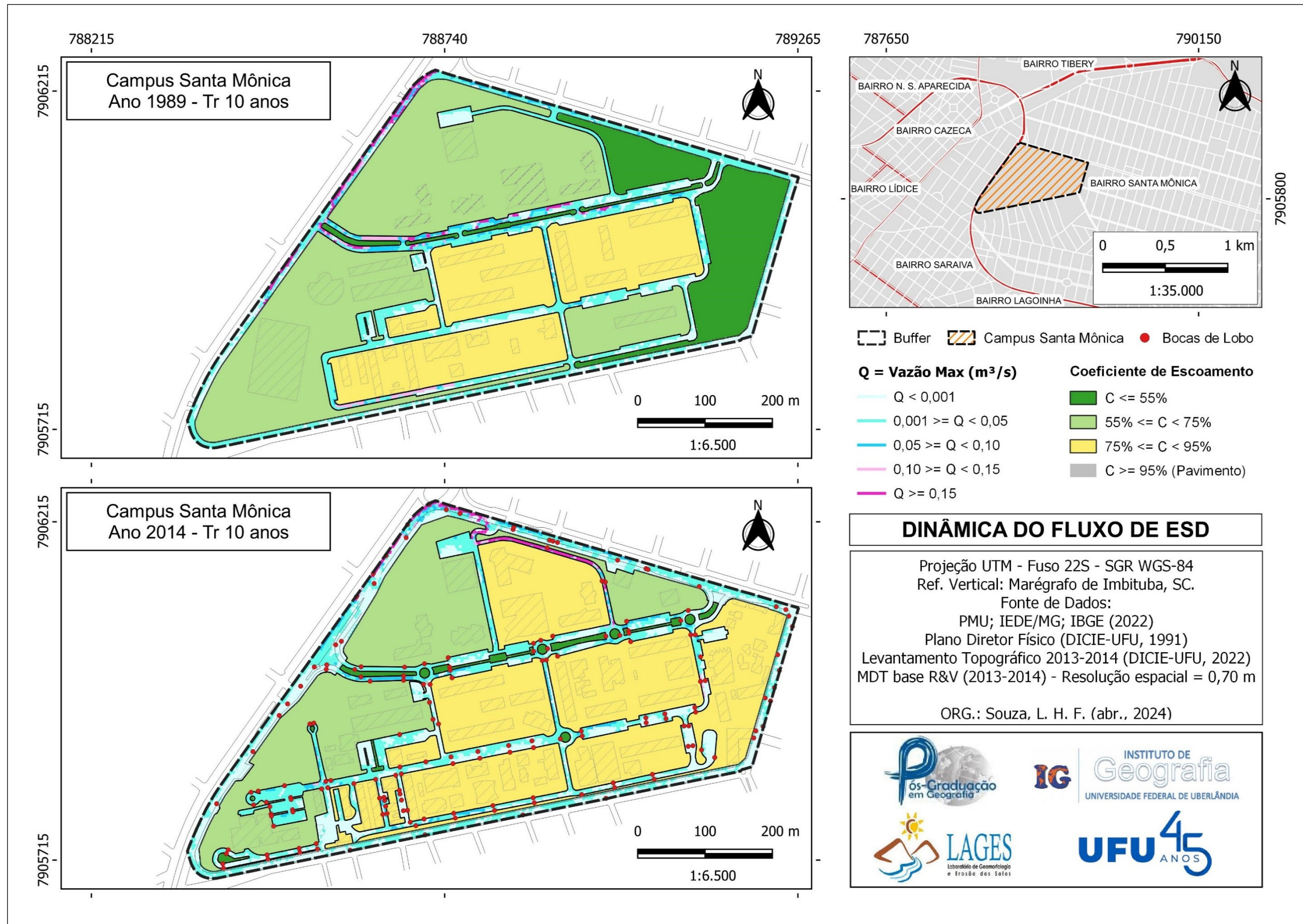


Figura 60 – Mapa 2 – Dinâmica do Fluxo de Escoamento Superficial Direto (ESD) – Cenários 1989 e 2014 – Tr 50 Anos.

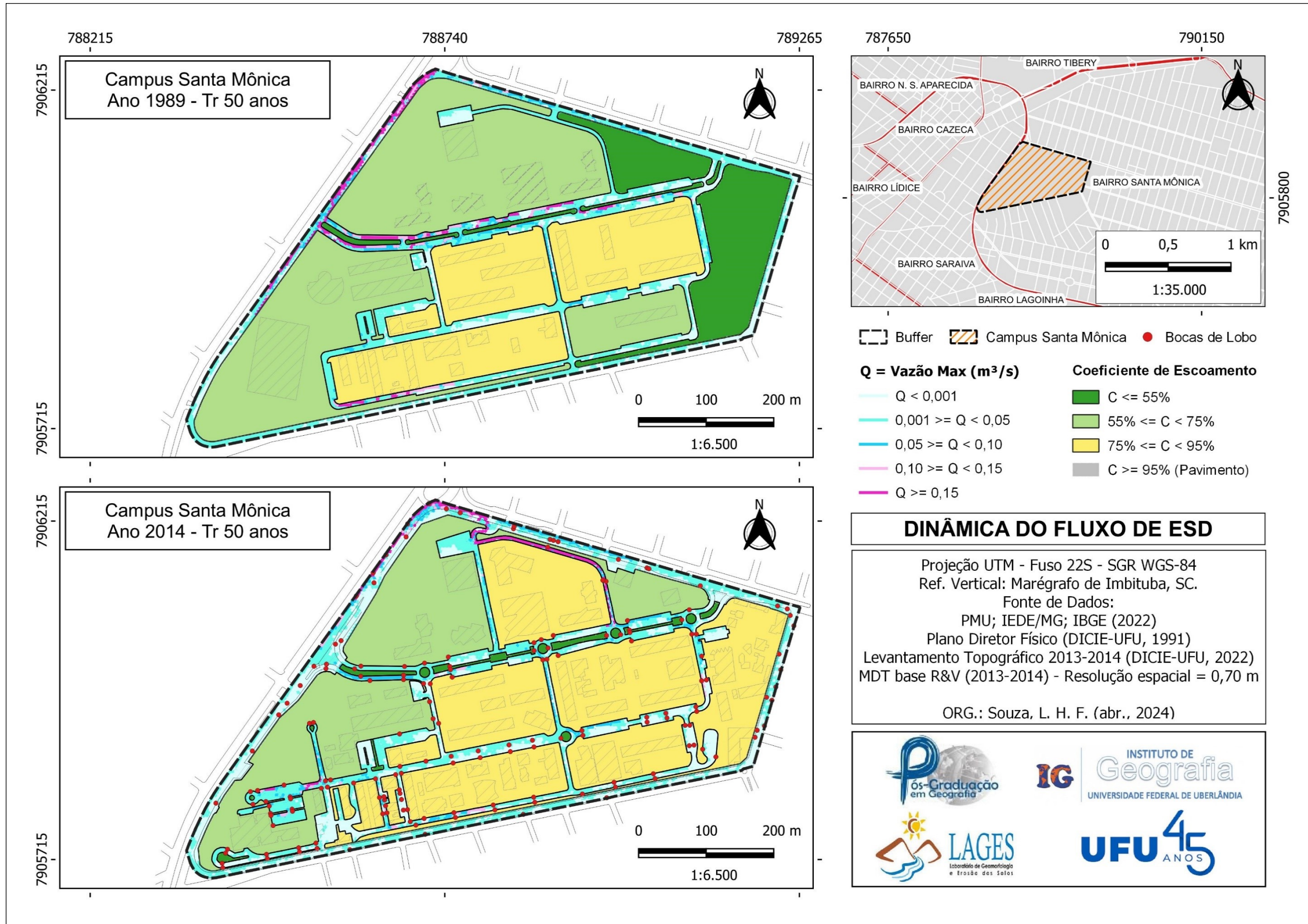


Figura 61 – Mapa 3 – Pontos de Alagamento – Cenários 1989 e 2014 – Tr 10 Anos.

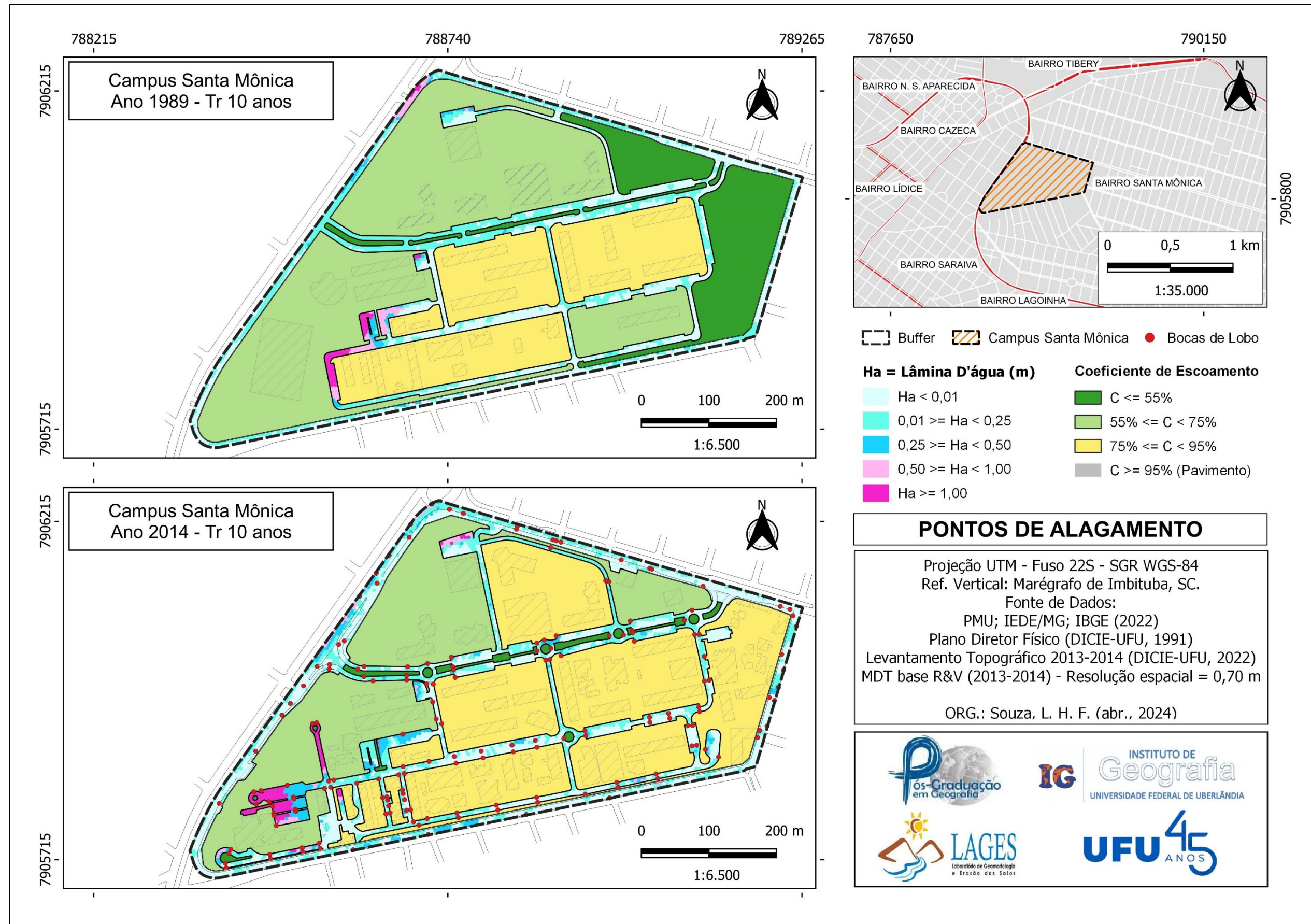
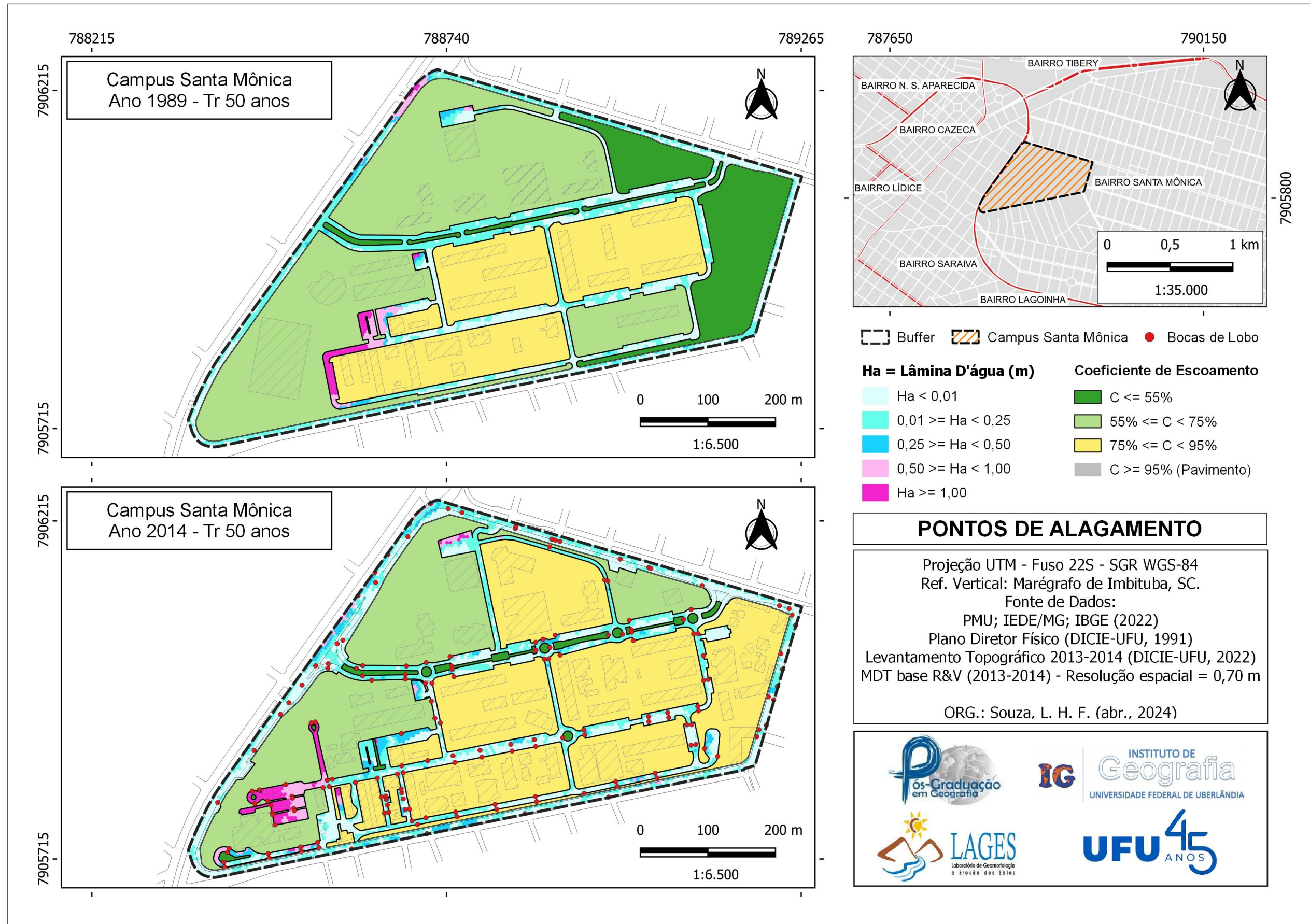


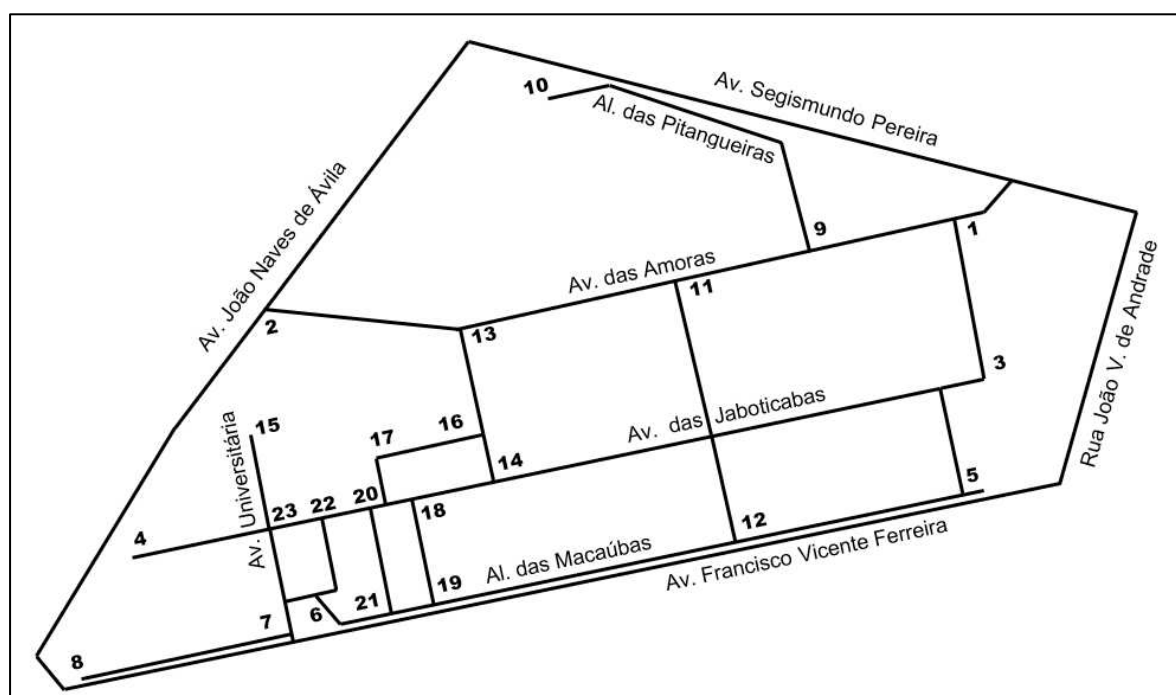
Figura 62 – Mapa 4 – Pontos de Alagamento – Cenários 1989 e 2014 – Tr 50 Anos.



As bocas de lobo do Campus foram identificadas e mapeadas com base no cenário de 2014, que reflete com mais precisão as condições urbanas atuais da área de estudo. O objetivo desse procedimento foi analisar o indicador de áreas alagadas, que mostra a quantidade de água retida nas células definidas no PCSWMM, permitindo a avaliação do comportamento dos depósitos identificados em comparação com o posicionamento atual das bocas de lobo. Essa análise é particularmente influenciada pela hipótese que desconsidera a presença de soluções de microdrenagem na modelagem.

Um dos principais desafios na modelagem de chuva-escoamento em áreas urbanas é a interação complexa entre as estruturas hidráulicas e a diversidade do ambiente urbano. Os "controladores estruturais", conforme definido por Danelon & Barcelos (2022), que incluem desde mudanças morfológicas devido ao parcelamento de lotes até infraestruturas viárias como viadutos e túneis, que atuam ao criar barreiras ou redirecionar o escoamento. As transformações na geomorfologia urbana causadas pelas atividades humanas em uma determinada bacia exigem concomitante adaptação dos sistemas de drenagem de águas pluviais. O Quadro 12 apresenta interpretações de situações observadas nos mapas produzidos, considerando como referência espacial, o diagrama ilustrativo do sistema viário do Campus Santa Mônica com seus principais trechos ordenados (Figura 63).

Figura 63 – Diagrama ilustrativo do sistema viário do Campus Santa Mônica com trechos ordenados.



Fonte: Organizado pelo autor.

Quadro 12 – Situações de destaque obtidas pós-modelagem e pós-mapas resultantes.

Mapas	Trecho	Situações observadas	Principais controladores estruturais
N.º 1 e 2 Dinâmica do Fluxo de ESD ANO 1989 Tr 10 e 50 anos	1 – 2 Avenida das Amoras	A dinâmica hidrológico-hidráulica do escoamento nesse trecho é influenciada principalmente pela topografia e pela presença de obstáculos físicos, como os canteiros centrais que separam as duas pistas de rolamento. As variações na vazão do escoamento superficial direto (ESD) são resultado das mudanças de direção causadas pelos "retornos viários". Essa configuração promove a canalização e a concentração do fluxo ao longo da via, especialmente próximo ao ponto de referência n.º 2.	Meio-fio dos canteiros centrais e declividade do greide da rua.
	9 – 10 Alameda das Pitangueiras	A vazão constante observada nesse trecho é consequência da divisão do fluxo no acesso intermediário localizado entre a via interna e a Avenida Segismundo Pereira.	Acesso viário.
	5 – 6 Alameda das Macaúbas	A intensidade da vazão aumenta consideravelmente no último terço do trecho devido à inclinação mais acentuada dessa seção, que é de aproximadamente 5,8%, superando a média do trecho, que é de 2,10%.	Declividade do greide da rua.
N.º 1 e 2 Dinâmica do Fluxo de ESD ANO 2014 Tr 10 e 50 anos	1 – 2 Avenida das Amoras	A alteração no uso da terra no Campus, com um aumento das áreas semipermeáveis, resultou em um incremento na vazão do escoamento superficial direto (ESD) e no redirecionamento do fluxo. A introdução de um acesso para pedestres entre o trecho analisado e o estacionamento da biblioteca também contribuiu para dispersar o escoamento. Embora o fluxo permaneça concentrado próximo ao ponto de deságue na Avenida João Naves de Ávila, as mudanças na configuração viária contribuem claramente para redistribuir o volume de água escoado. Adicionalmente, a presença de faixas elevadas para a travessia de pedestres ao longo do trecho é um elemento a ser considerada, pois favorece a dissipação da energia do ESD.	Meio-fio dos canteiros centrais, rotatórias e faixas elevadas para travessia de pedestres.
	9 – 10 Alameda das Pitangueiras	As alterações no uso da terra e no <i>layout</i> viário, incluindo a eliminação do acesso intermediário para a Avenida Segismundo Pereira, impacta a concentração de vazão, especialmente na última metade do trecho analisado. O confinamento da água no canal viário, seguindo os critérios do modelo, facilita a identificação do caminho preferencial do fluxo concentrado. O extravasamento da vazão ocorre por meio da abertura para passagem de pedestres próxima ao estacionamento da biblioteca, com o escoamento desaguando na Avenida Segismundo Pereira.	Rua e abertura para passagem de pedestres.
	5 – 6 Alameda das Macaúbas	A intensificação da vazão no último terço do trecho, devido à maior declividade dessa seção, continua perceptível, porém, é mitigada pela dissipação do fluxo causada por acessos viários adjacentes, sobretudo no entorno do ponto n.º 6.	Declividade do greide da rua e abertura de novos acessos viários.

<p>N.º 3 e 4 Pontos de Alagamento ANO 1989 Tr 10 e 50 anos</p>	1 – 2 Avenida das Amoras	Há clara tendência de formação de lâmina d'água ao longo da via, especialmente a partir da seção intermediária da Avenida das Amoras, acompanhada pela presença de áreas com lâmina d'água relevante ao final do trecho desta avenida.	Meio-fio dos canteiros centrais.
	9 – 10 Alameda das Pitangueiras	É possível observar, embora parcialmente, a presença de lâmina d'água relevante no estacionamento da biblioteca, abrangendo o último terço da Alameda das Pitangueiras. Esse aspecto confirma a tendência de espraiamento do fluxo de ESD próximo ao ponto n.º 10.	Platô do estacionamento da biblioteca.
	16 – 17 20 – 23 7 – 23	O acúmulo importante de água nessas áreas é atribuído à topografia do Campus, que inclui platôs nas proximidades do ponto n.º 17, e ao critério de uso de camadas de bloqueio no modelo para favorecer a identificação dos pontos críticos de alagamento, conforme esclarecido na seção 4.1 deste estudo.	Platôs de estacionamento.
<p>N.º 3 e 4 Pontos de Alagamento ANO 2014 Tr 10 e 50 anos</p>	1 – 2 Avenida das Amoras	A alteração no uso da terra no Campus e a redefinição dos canteiros na Avenida das Amoras contribuíram para redirecionar o fluxo de água e reduzir os pontos com concentração expressiva de lâmina d'água. A criação de um acesso para pedestres entre o trecho analisado e o estacionamento da biblioteca também ajudou a dissipar o escoamento. Embora o fluxo ainda se concentre próximo à Avenida João Naves de Ávila, as mudanças na configuração viária contribuem para redistribuir o volume de água escoado. Além disso, a presença de faixas elevadas para travessia de pedestres ao longo do trecho também é um elemento importante para retenção do fluxo de ESD.	Meio-fio dos canteiros centrais, rotatórias e faixas elevadas para travessia de pedestres.
	9 – 10 Alameda das Pitangueiras	A concentração de água ao longo da Alameda das Pitangueiras é notável, especialmente devido ao critério de uso de camadas de bloqueio no modelo.	Canalização viária.
	16 – 17 4 – 20 15 – 23	Há, de fato, um acúmulo expressivo de água nessas áreas e suas proximidades, o que pode ser atribuído à topografia do terreno, com platôs próximos aos pontos 4 e 17, e ao critério de bloqueio utilizado no modelo.	Platôs de estacionamento.
	4 – 23 Avenida das Jaboticabas 7 – 8 Alameda das Macaúbas	A observação de uma tendência natural de acúmulo de águas pluviais nesses setores é decorrente da convergência do fluxo canalizado pelas ruas a montante para o platô a jusante. Contudo, a lâmina d'água nessas áreas, conforme indicado nos mapas de pontos de alagamento, é superestimada devido ao critério de bloqueio adotado no modelo. A concentração de bocas de lobo, especialmente no entorno do ponto n.º 4 (estacionamento da Reitoria), corrobora a tendência de alagamento nesses locais.	Canalização viária e declividade nula do platô do estacionamento.
	18 – 19 20 - 21	Os trechos perpendiculares às Avenidas das Jaboticabas e das Macaúbas, alinhados às curvas de nível do terreno, recebem uma parcela do excedente de águas pluviais não captadas a montante, que são drenadas pelas avenidas mencionadas. A concentração de bocas de lobo nessas áreas confirma os resultados da simulação.	Canalização viária e declividade nula do greide da rua.

Fonte: Organizado pelo autor.

Durante a pesquisa de campo, foi observado um evento de alagamento em 1º de outubro de 2023, notadamente entre os trechos de n.º 17 a 20, após uma precipitação de 14,2 mm em uma hora (Figura 64). Ademais, outra ocorrência, porém de menor intensidade, foi registrada em 28 de março de 2024, com 6,8 mm de chuva também em uma hora (Figura 65).

Figura 64 – Trecho n.º 17 – 20. Ocorrência de alagamento pós-precipitação de 14,2 mm em uma hora. Visão a partir do ponto n.º 20



Figura 65 – Trecho n.º 17 – 20. Ocorrência de alagamento pós-precipitação de 6,8 mm em uma hora. Visão a partir do ponto n.º 17



Fonte: Registros fotográficos: A. L. F. (Fig. 64); L.H.F.S. (Fig. 65). Dados de precipitação (INMET, 2023/2024).

Próximo ao local mencionado há uma boca de lobo em pleno funcionamento e sem obstruções. No entanto, esse único dispositivo não consegue drenar suficientemente a água da "zona morta" que se forma próxima ao ponto n.º 17, onde a lâmina d'água excedente fica abaixo da boca de lobo mencionada.

É notório que, mesmo em casos em que há dispositivos de drenagem implantados, é comum que as sarjetas, bocas de lobo (BL's) e condutos pluviais se tornem locais de depósito e escoamento de resíduos sólidos, o que pode comprometer a capacidade de captura e escoamento do sistema, também conhecida como "engolimento" (SUDERHSA, 2002). Essa propriedade depende, entre outras variáveis, da inclinação longitudinal da rua e da forma da seção transversal da depressão junto a boca de lobo.

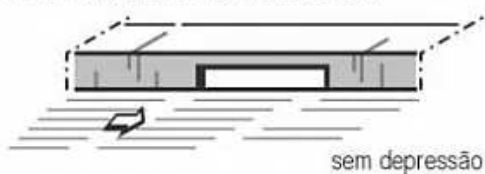
A classificação das BL's segundo a SUDERHSA (2002) compreende três grupos principais: as de meio-fio (guia), as de sarjeta (grelha) e as combinadas (Figura 66). Além disso, há a possibilidade de combinação de diferentes tipos em um único dispositivo. Na área de estudo em questão, são observados quase todos os tipos mencionados, bem como outras geometrias, posicionadas distantes da sarjeta, situadas quase centralmente na via e constituídas por grelhas

de captação com leve depressão. Exemplos desse tipo de BL ocorrem ao longo da Avenida das Jaboticabas, no trecho n.º 3-14.

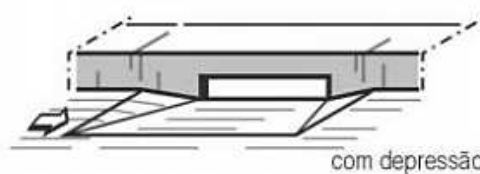
Segundo Li *et al.* (1954), em áreas sem bocas de lobo com depressão na sarjeta, é recomendável optar por BL's equipadas com grelhas ou modelos combinados. A capacidade de "engolimento" desses dispositivos geralmente varia de 85 l/s a mais de 100 l/s, dependendo das características e das condições locais (SUDECAP, 2022; Pinto Coelho & Lima, 2011).

Figura 66 – Classificação dos principais tipos de bocas de lobo.

a. BOCA-DE-LOBO DE GUIA

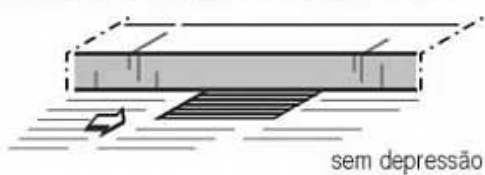


sem depressão

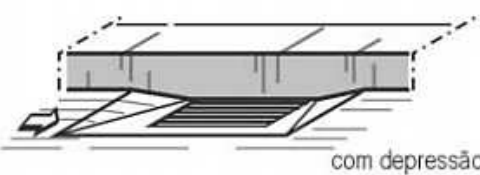


com depressão

b. BOCA-DE-LOBO COM GRELHA

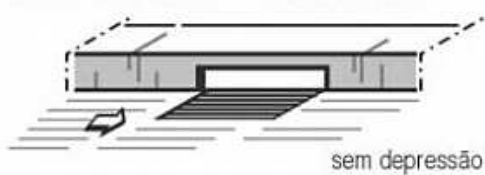


sem depressão

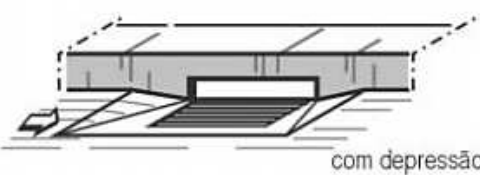


com depressão

c. BOCA-DE-LOBO COMBINADA

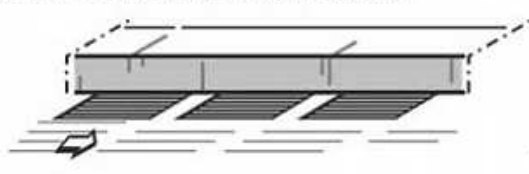


sem depressão



com depressão

d. BOCA-DE-LOBO MÚLTIPLA

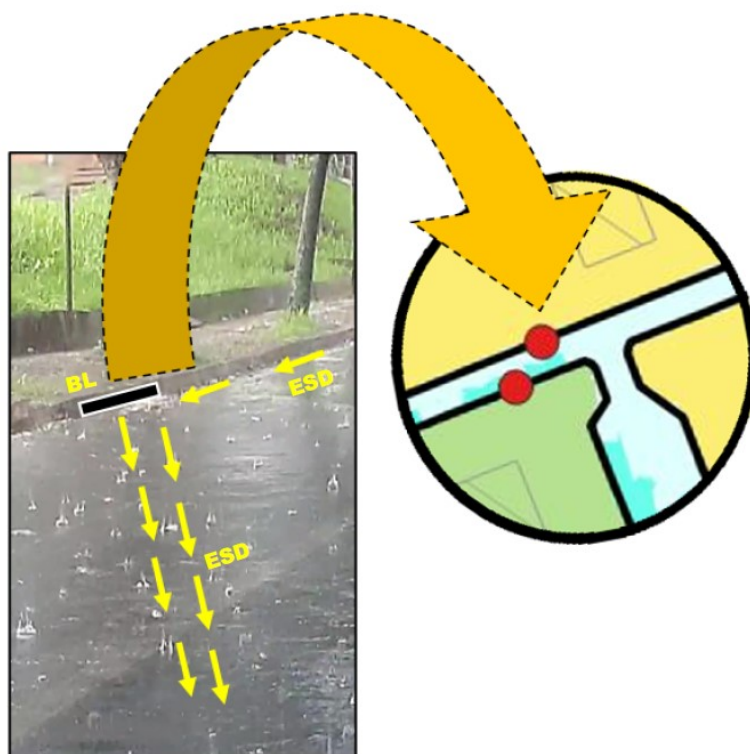


Fonte: SUDERHSA (2002). Organizado pelo autor.

No trecho n.º 13-14, temos um exemplar de boca de lobo de guia (meio-fio) em uso, flagrado no dia 19 de janeiro de 2024, durante uma precipitação com registro de 8,6 mm em uma hora (INMET, 2024). Nos **mapas com indicação das bocas de lobo**, é possível observar o referido dispositivo próximo ao ponto n.º 16, mais precisamente no sentido da Avenida das Jaboticabas para a Avenida das Amoras, do lado direito, captando vazão menor que 85 l/s.

Considerando o nível de detalhe proporcionado pela escala do modelo, dada a resolução espacial do MDT (0,70 x 0,70 m), os mapas (Tr's 10 e 50 anos) são capazes de demonstrar com relativa precisão o comportamento **dinâmico do fluxo de escoamento** na boca de lobo. Este é o caso dos mapas correspondentes ao cenário de 2014, nos quais é possível observar o redirecionamento do ESD, provocado pela posição do dispositivo de guia, sob influência direta da morfologia da rua, especialmente de sua declividade transversal (Figura 67).

Figura 67 – Comportamento dinâmico do fluxo de ESD (cenário ano 2014), flagrado em boca de lobo de guia, localizada no trecho n.º 13-14, entre Avenida das Jaboticabas e Avenida das Amoras.



Fonte: Registro fotográfico: S.C.R. Dados de precipitação (INMET, 2024). Organizado pelo autor.

As faixas elevadas para travessia de pedestres e rotatórias (Figuras 68 e 69), mencionadas no Quadro 12, como importantes controladores estruturais do fluxo de ESD, sobretudo na Avenida das Amoras, também foram flagradas em carga de escoamento, no dia 28 de março de 2024, imediatamente após a precipitação de 6,8 mm em uma hora (INMET, 2024).

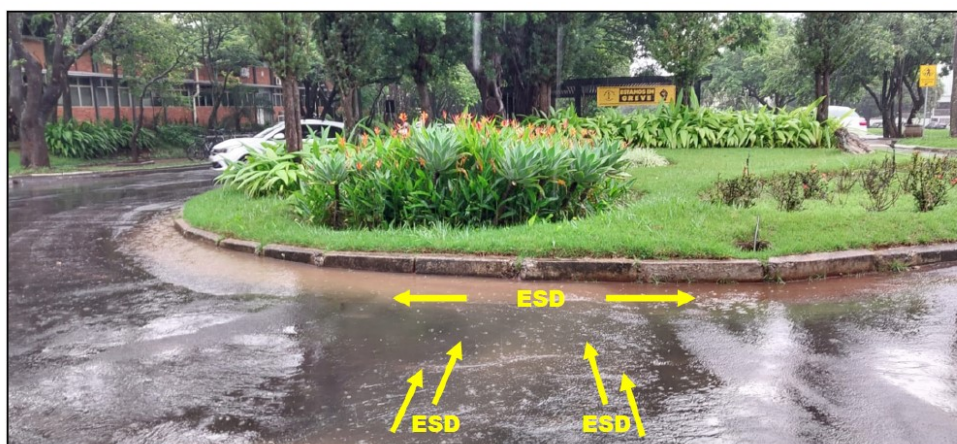
Figura 68 – Faixa elevada para travessia pedestres, próximo ao ponto n.º 1 do Campus Santa Mônica, em carga de escoamento, imediatamente após precipitação.



Fonte: Registro fotográfico: L.H.F.S. Dados de precipitação (INMET, 2024). Organizado pelo autor.

A faixa elevada para travessia de pedestres (Figura 68) é um dispositivo instalado em trechos da pista onde o pavimento é elevado, seguindo critérios estabelecidos pela Resolução CONTRAN n.º 738 de 06/09/2018. Seu comprimento e largura seguem padrões definidos, garantindo as condições de drenagem superficial da via e a segurança dos pedestres, sem obstáculos ou riscos à sua circulação. No entanto, conforme observado na Figura 68, há represamento de água devido ao entupimento do conduto de drenagem entre o meio-fio (guia) e a travessia. Esse tipo de controlador estrutural contribui diretamente para o barramento e redirecionamento do fluxo de escoamento superficial.

Figura 69 – Rotatória no ponto n.º 1 do Campus Santa Mônica, em carga de escoamento, imediatamente após precipitação.



Fonte: Registro fotográfico: L.H.F.S. Dados de precipitação (INMET, 2024). Organizado pelo autor.

Controle semelhante é causado pela rotatória ou interseção giratória (Figura 69). Esse elemento é empregado no controle de tráfego, caracterizado por uma "ilha" central circular

fictícia, com a finalidade de organizar o fluxo de veículos na interseção, permitindo apenas uma faixa de circulação no sentido anti-horário, reduzindo a velocidade de aproximação e ordenando as conversões (CET, 2020). Há nítidas semelhanças entre o comportamento do tráfego e a dinâmica do ESD nesses dispositivos, ou seja, existe o mesmo controle estrutural, sobretudo quanto à organização, redução da velocidade e ordenamento de conversões do escoamento.

Quanto aos limites do Campus Santa Mônica, também é possível inferir sobre o comportamento do ESD, porém com ressalvas a serem consideradas nesse tipo de análise devido às restrições atribuídas aos limites do *buffer* de estudo.

Setores da baixa vertente como no cruzamento entre as avenidas João Naves de Ávila e Segismundo Pereira, podem apresentar um maior acúmulo de fluxo hídrico devido às condições do hidrograma, notadamente nesta seção urbana da bacia do córrego São Pedro, onde podem ocorrer processos de erosão remontante. Isso significa que o fluxo d'água pode encontrar aberturas no pavimento, expondo o substrato subsuperficial e iniciando um processo de erosão da base que sustenta o leito carroçável, formando pequenas estruturas tubulares (*piping*) que se estendem em subsuperfície contra a direção do fluxo, originando formas características de erosão interna. Essa remoção de material pode resultar em colapso generalizado do pavimento local e das áreas circundantes.

De acordo com Lima (2017), anterior às operações do Corredor Estrutural Leste, dedicado ao transporte público por ônibus no eixo viário da Avenida Segismundo Pereira, em meados de 2018, eram comuns danos causados ao pavimento devido ao fluxo intenso de águas pluviais nas proximidades do Campus Santa Mônica, sem, contudo, representar contribuição ao fluxo interno da área de estudo. O projeto do corredor incluiu melhorias no sistema de micro e macrodrenagem da avenida buscando corrigir antigos problemas de captação e escoamento, e ao mesmo tempo, reduzir as contribuições diretas para as vazões de pico da Avenida Rondon Pacheco no antigo leito do córrego São Pedro (Figura 28). Embora as adaptações na infraestrutura tenham contribuído para a diminuição desse tipo de ocorrência, não se pode afirmar o mesmo em eventos de precipitação com intensidade extraordinária.

Considerando os limites do *buffer* da área de estudo, sobretudo na confluência do mencionado cruzamento de avenidas, é possível identificar elementos que demonstram a convergência do ESD para o exutório do modelo hidrológico-hidráulico.

O desabamento de parte de um dos muros do Campus Santa Mônica durante intenso evento de precipitação ocorrido no dia 2 de fevereiro de 2013 confirma a tendência do direcionamento das águas pluviais para a região do cruzamento mencionado (Figura 70 - a; b). Nessa data foi registrado pela estação meteorológica da UFU, entre 17h00 e 18h00, um volume extraordinário de chuva de 37,6 mm (INMET, 2013). Supostamente, o excedente de ESD canalizado pela Alameda das Pitangueiras, extravasou próximo ao ponto n.º 10 e seguiu margeando a divisa interna, paralela a Avenida Segismundo Pereira, em direção aos fundos do estacionamento da Biblioteca, vindo a ser barrado pelo muro, que atuou como controlador estrutural. Pressupõe-se que a força do empuxo resultante contribuiu para a desestabilização da alvenaria, que veio ao chão.

Figura 70 (a) – Cruzamento viário da Avenida João Naves de Ávila com Avenida Segismundo Pereira; (b) – Desabamento de parte do muro do Campus Santa Mônica no ano de 2013.

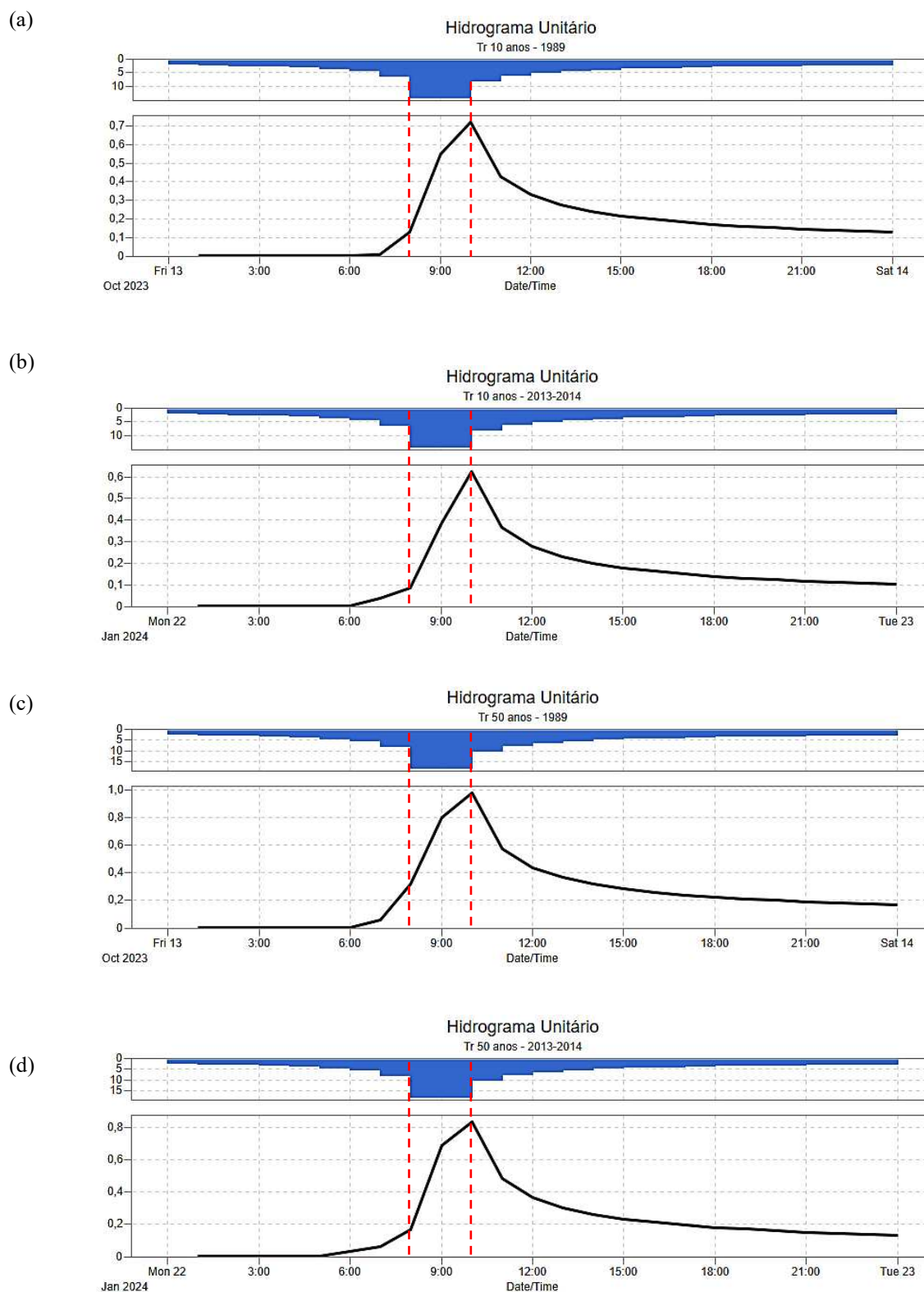


Fonte: (a) Google Imagens (2015); (b) Jornal G1 Triângulo Mineiro (2013). Organização: O autor

Embora seja necessário considerar o Hidrograma Unitário (HU) do evento para avaliar seu comportamento e comparar com o padrão projetado nesta tese, é possível afirmar que 37,6 mm em uma hora é um valor muito próximo da intensidade obtida pelo método de Chicago para um evento de mesma duração, com T_r de 10 anos. Guardadas as devidas proporções e mesmo sem possuir os dados da chuva efetiva ("Pe") contabilizada neste evento, pode-se presumir que esse valor tenha sido superior ao volume obtido para o T_r de 50 anos.

Tucci (1995) aborda o conceito de HU como um elemento essencial para representar a vazão em relação ao tempo e, conseqüentemente, a área sob sua curva reflete o volume do ESD ocasionado pela precipitação efetiva. Ao analisar os hidrogramas para T_r 's de 10 e 50 anos, em ambos os cenários de ocupação da área de estudo, concebidos pelo *software* PCSWMM (Figura 71 - a; b; c; d), é possível inferir a resposta hidrológica correspondente.

Figura 71 (a; b) – Hidrogramas Unitários Tr 10 anos (Cenários 1989; 2013-2014); (c; d) – Hidrogramas Unitários Tr 50 anos (Cenários 1989; 2013-2014).



Fonte: Resultados do modelo hidrológico-hidráulico da área de estudo no PCSWM. Organização: O autor.

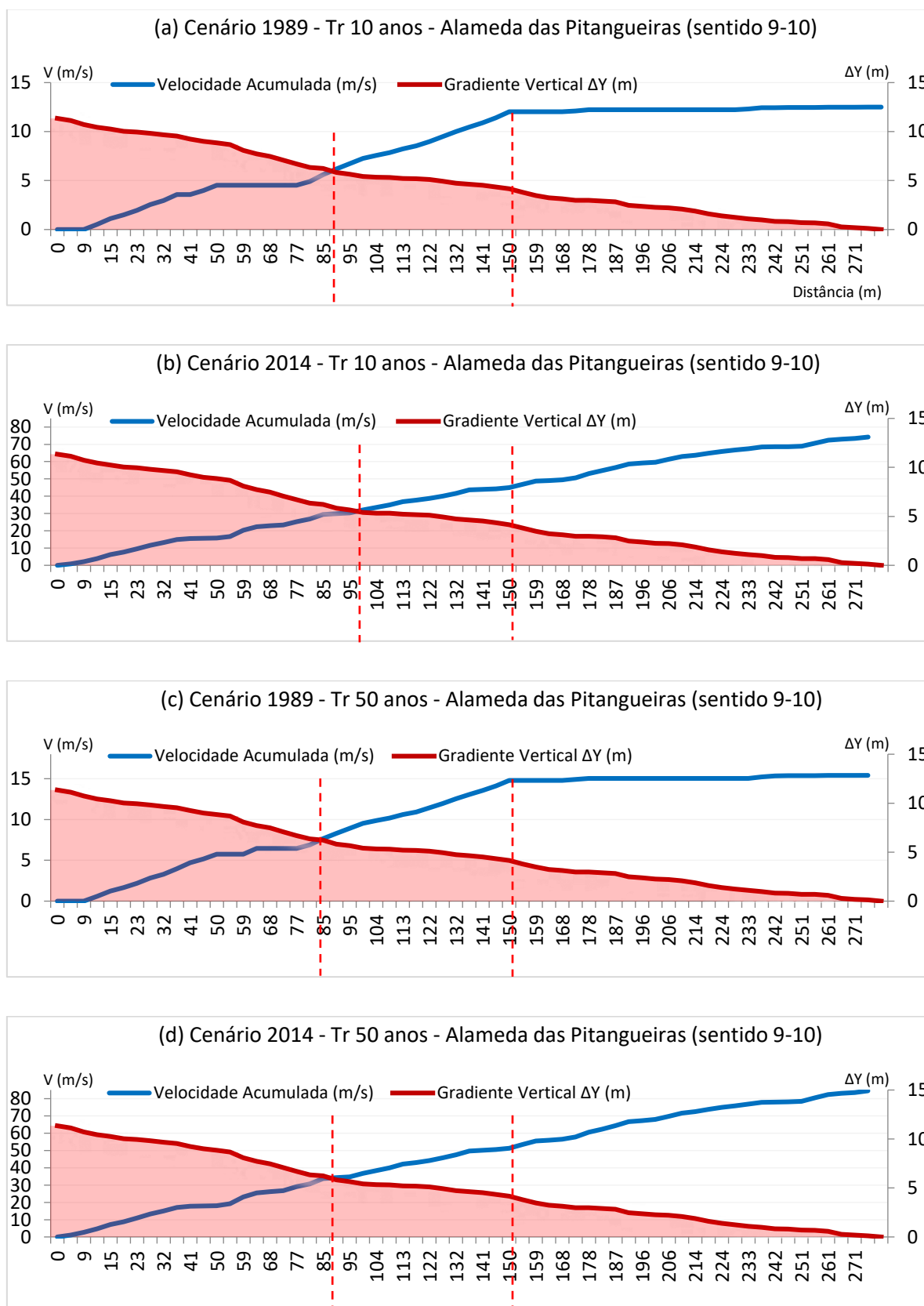
Nos hidrogramas analisados, é perceptível o intervalo de tempo entre o início da precipitação e o início do escoamento. Esse atraso na resposta é atribuído às perdas iniciais, que incluem a interceptação da água pela vegetação, retenção por formas construídas e armazenamento em depressões ao longo da superfície de escoamento, tanto nas sub-bacias quanto ao longo do sistema viário local. Em geral, o segmento ascendente até o pico do hidrograma apresenta um gradiente maior do que o trecho de recessão, indicando a predominância do ESD nesse período. No entanto, ao comparar a evolução gráfica entre os cenários estudados com o mesmo tempo de recorrência, tornam-se notáveis as diferenças no comportamento dos segmentos ascendentes resultantes.

É fundamental ressaltar que a resposta hidrológica da área de estudo também é influenciada diretamente pelos dispositivos de drenagem instalados e outros elementos mencionados, que modificam a dinâmica hidrológica. Em relação à microdrenagem, especialmente as bocas de lobo, é essencial reiterar sua contribuição na captação e condução das águas pluviais. A consideração desses dispositivos é necessária para a compreensão dos padrões de escoamento do sistema. Ao analisar os hidrogramas, é fundamental considerar não apenas os aspectos naturais do ambiente, mas também as intervenções humanas, as quais interferem sobremaneira na resposta hidrológica.

A interpretação do ESD pode ser complementada pela análise gráfica do seu comportamento dinâmico em um trecho viário. Neste caso emprega-se como exemplo a Alameda das Pitangueiras, no sentido de 9 a 10. Os respectivos gráficos elaborados permitem maior esclarecimento sobre os reflexos da mudança do desenho urbano nesse trecho entre os anos de 1989 e 2014, para Tr's de 10 e 50 anos (Figura 72 - a; b; c; d), sobretudo em relação a supressão da ligação que havia entre esta via e a Avenida Segismundo Pereira em 1989, e os efeitos de sua eliminação sobre a velocidade do escoamento, além das situações de destaque mencionadas no Quadro 12.

Esse tipo de análise compreende ferramenta na avaliação espacial do comportamento dinâmico do fluxo, proporcionando uma abordagem comparativa mais abrangente dos efeitos das alterações da paisagem sobre a dinâmica hidrológica. Nesse aspecto, os resultados indicam que a consolidação da proposta urbana em suas diferentes morfologias tem o potencial de alterar o comportamento da velocidade do ESD em um mesmo intervalo espacial.

Figura 72 (a; b) – Comportamento Dinâmico Velocidade ESD Tr 10 anos (Cenários 1989; 2014); (c; d) – Comportamento Diâmico Velocidade ESD Tr 50 anos (Cenários 1989; 2014);



Fonte: Resultados do modelo hidrológico-hidráulico da área de estudo. Organização: O autor.

Durante todas as iterações da modelagem, abrangendo os dois cenários urbanos, não foram identificados erros significativos de continuidade. Esse resultado reforça a estabilidade observada nas estatísticas preliminares dos dados. Vale ressaltar que análises multivariadas, como as realizadas neste estudo, podem ser conduzidas utilizando a linguagem de programação R. Essa ferramenta representa uma opção sofisticada para execução de estudos estatísticos, criação de gráficos, elaboração de documentos e relatórios, entre outras funcionalidades. Os pacotes R que incluem modelos hidrológicos estão cada vez mais acessíveis como recurso de código aberto amplamente adotado pela comunidade hidrológica (Astagneau, *et al.*, 2021).

A movimentação da água na escala de captação envolve processos complexos, principalmente devido à heterogeneidade e não linearidade das propriedades físicas presentes. A modelagem hidrológica requer uma simplificação cuidadosa que abrange tempo, espaço e processos hidrológicos para tentar representar o comportamento médio dos eventos naturais (Astagneau, *et al.*, 2021).

A escolha da calibração empírica (manual) em detrimento da ferramenta *Sensitivity-based Radio Tuning Calibration* (SRTC) integrada ao PCSWMM, utilizando os parâmetros hidrológicos e hidráulicos disponíveis, não resultou em prejuízo na diferença percentual entre o escoamento final (*output*) e o inicialmente produzido (*input*). Em todas as simulações realizadas, o erro de continuidade foi de 0%, indicando alta qualidade e precisão das informações de base utilizadas para a escala de trabalho adotada, especialmente quando comparadas com dados reais da área de estudo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho aprimora a compreensão dos processos hidrológicos e geomorfológicos em áreas urbanas, com ênfase na microdrenagem. Nesse contexto, a morfologia antropogênica desempenha um papel fundamental na análise holística da paisagem.

O modelo hidrodinâmico proposto incorporou abstrações importantes. Para possibilitar a identificação dos fenômenos em análise, como fluxo de escoamento e pontos de alagamento, dispositivos de drenagem local foram desconsiderados, adotando-se um sistema hidráulico-hidrológico denominado "parcialmente fechado". A escolha desse sistema intermediário entre os modelos "aberto" e "fechado" fundamentou-se na necessidade de alinhar a modelagem aos objetivos e à escala da pesquisa.

Este sistema inclui chuvas de projeto, a definição de um exutório hipotético e condições empíricas de permeabilidade do solo, especialmente nas áreas semipermeáveis. As heterogeneidades externas ao *buffer* da área de estudo, relativizadas, não afetaram as simulações realizadas nem a compreensão da conectividade dinâmica do escoamento superficial no campus.

Considerando o contexto apresentado, esta pesquisa foi conduzida a partir da seguinte problemática: **qual é o grau de relevância da conexão entre as formas antropogênicas e os resultados da modelagem hidrodinâmica das águas pluviais no âmbito da Geomorfologia Urbana?**

O estudo confirma a hipótese de que a morfologia urbana na escala de microdrenagem, incluindo o formato do sistema viário e das edificações, influencia a dinâmica do escoamento superficial. Alterações morfológicas, especialmente aquelas decorrentes da implantação de equipamentos de infraestrutura viária e da impermeabilização das superfícies, modificam os parâmetros do ciclo hidrológico, especialmente em relação ao direcionamento, à convergência e à deposição das águas pluviais. Esses aspectos evidenciam a conexão entre as formas antropogênicas e os resultados dos modelos hidrodinâmicos urbanos.

Os resultados obtidos para os diferentes cenários de ocupação do solo na área de estudo revelaram efeitos variados, mesmo com a manutenção da intensidade dos fenômenos de precipitação definidos. Essa variação é atribuída à rápida taxa de alteração que a área

experimentou nos últimos 25 anos, diferenciando os cenários urbanísticos correspondentes aos anos de 1989 e 2014.

A disposição em grade das ruas na área de estudo e a presença de "controladores estruturais" atuam no redirecionamento e na concentração das águas pluviais. Esperava-se identificar um "escoamento difuso" resultante do deslocamento do fluxo entre os obstáculos impostos pela morfologia urbana, especialmente devido à alternância de direção provocada pelo padrão viário em contraste com a morfometria, gerando um comportamento de fluxo sinuoso.

Durante a comparação dos resultados da modelagem com as situações de campo, observou-se que a ausência, o subdimensionamento ou a má localização dos dispositivos de microdrenagem podem comprometer a captação eficiente das águas pluviais. Essa diminuição da eficiência resulta na concentração de volume e no aumento da velocidade do fluxo, acarretando efeitos adversos.

O debate científico inicial desta pesquisa, que investiga a aplicação de métodos indiretos para o cálculo das vazões de projeto em bacias hidrográficas urbanas, destacou sua relevância ao enfatizar a importância da análise prévia dos parâmetros morfológicos utilizados na alimentação dos modelos hidrodinâmicos. Há uma lacuna de oportunidades neste campo, que poderia ser explorada por meio dos diversos modelos hidrodinâmicos disponíveis, sejam eles de código aberto ou proprietários, destinados a diferentes aplicações.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU (IPCC, 2023) enfatiza as consequências adversas dos fatores antropogênicos nas cidades. É fundamental ressaltar que a interação humana com o clima, tanto no presente quanto no futuro, especialmente seus impactos, impulsiona a necessidade urgente de desenvolver novas abordagens que integrem medidas de mitigação e adaptação para enfrentar a severidade dos fenômenos naturais.

Observa-se que o ambiente urbano reúne uma complexa diversidade de formas, suscetíveis a remodelações e alterações. Sua morfologia peculiar influencia diretamente a reconfiguração do fluxo das águas pluviais e a modulação dos processos hidrológicos. Essa influência é especialmente evidente quando se considera a perspectiva hidrogeomorfológica (Goerl *et al.*, 2012).

O recorte amostral adotado neste estudo possui potencial para ser replicado em outras áreas, mantendo a análise em escala de microcaptação. No entanto, é essencial utilizar essa técnica

com cautela, devido à sua sensibilidade à qualidade dos parâmetros de entrada (Diakakis, 2011; Camarasa-Belmonte & Soriano-García, 2012).

A análise da dinâmica do fluxo superficial e do comportamento da lâmina d'água na área de estudo permite, além das repercussões discutidas, um importante acréscimo sobre a tendência de acúmulo de águas pluviais no estacionamento do bloco da reitoria do Campus Santa Mônica. Essa observação destaca a necessidade de considerar a capacidade de drenagem específica, especialmente em relação ao escoamento pluvial gerado durante eventos de precipitação intensa.

A localização atual das bocas de lobo evidencia a qualidade da modelagem realizada e destaca a problemática da impermeabilização, refletindo uma patologia estrutural crônica enfrentada pelas cidades em geral. Os resultados observados na região da reitoria do campus são consequência direta das transformações morfológicas ocorridas ao longo do tempo, especialmente entre os cenários urbanísticos considerados. Em 1989, a área permeável correspondia a 54%, e a reitoria e seu entorno não existiam. Nos 25 anos seguintes, houve a supressão de 65% das áreas permeáveis, substituídas por novas edificações, estacionamentos, asfalto e outros elementos que impedem a infiltração da água.

O Plano Diretor da UFU (DICIE-UFU, 1991) destacava a necessidade de soluções integradas para a captação de águas pluviais, em conjunto com o sistema viário, e a construção de praças com pavimento permeável. No entanto, apesar das restrições estabelecidas por esse instrumento para o aumento de áreas impermeáveis, a maioria das propostas delineadas foram ignoradas (Prieto, 2005). Isso ocorreu, presumivelmente, em parte devido à pressão para expandir a infraestrutura física da Universidade.

A instalação de bocas de lobo no estacionamento da reitoria pode ser uma estratégia para mitigar os efeitos do escoamento concentrado. No entanto, essa abordagem frequentemente adota uma perspectiva higienista, concentrando-se principalmente em direcionar o escoamento para jusante (Baptista & Nascimento, 2002). Em essência, esse procedimento busca apenas transferir o problema de um ponto A para um ponto B, sem considerar as repercussões na alteração do padrão de escoamento e os impactos da aceleração do fluxo no ciclo hidrológico.

Considerando que a área de estudo é um espaço público e acadêmico, temos um laboratório extenso para a experimentação de boas práticas na gestão das águas pluviais. Estruturalmente,

o estacionamento da reitoria poderia ser avaliado para uma possível substituição do asfalto betuminoso por pavimento permeável. Além disso, seria interessante explorar outras alternativas permeáveis que promovam a redução do escoamento superficial e o recarregamento do lençol freático.

A partir dos resultados deste estudo, abrem-se possibilidades para aprofundar a compreensão do comportamento do escoamento e do potencial de armazenamento residual das águas pluviais, fornecendo elementos para a análise de viabilidade da utilização de Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana (SuDS). Isso inclui o projeto e a execução de jardins de chuva e calçadas permeáveis como estruturas de biorretenção (Xu *et al.*, 2023), além da revitalização viária com base na filosofia de vias verdes (Yu *et al.*, 2006).

Alternativas, que integram o grupo de soluções de infraestrutura verde e azul, estão alinhadas ao conceito de cidade esponja (Jiang *et al.*, 2017; Peng *et al.*, 2022). A principal razão para essa consideração é apoiar os sistemas de drenagem tradicionais na recepção do escoamento proveniente de superfícies impermeáveis, gerenciando-o por meio da retenção temporária e da infiltração no solo (Burszta-Adamiak *et al.*, 2023; Raimondi *et al.*, 2023).

Outra possibilidade a ser explorada é o uso de sistemas de aproveitamento de águas pluviais como uma alternativa complementar para atender à demanda por água não potável (reuso) e controlar a produção de escoamento na fonte. Nesse contexto, os resultados obtidos são claramente aplicáveis, pois permitem identificar fluxos concentrados de escoamento na escala de microdrenagem e depósitos de água na superfície.

Conforme Xu *et al.* (2023), a Holanda e os Estados Unidos estão na vanguarda da utilização dos recursos de águas pluviais urbanas. No Brasil, existem instrumentos regulatórios ou compulsórios que estimulam o reuso de águas pluviais; no entanto, ainda há muito a ser feito nesse aspecto, especialmente em relação aos estudos de viabilidade das medidas de captação, armazenamento e tratamento desse recurso, mesmo para usos não potáveis (Dornelles, 2012; Sant'Ana & Medeiros, 2017; Raimondi *et al.*, 2023).

No contexto do Campus Santa Mônica, há uma demanda por projetos de aproveitamento de águas pluviais, que oferecem benefícios ambientais e econômicos imediatos para a instituição e a comunidade. A água de reuso, respeitando as devidas restrições, poderia ser utilizada em diversas aplicações, como em vasos sanitários, mictórios, lavagem de pisos, irrigação de jardins e reserva para combate a incêndios, entre outras funcionalidades.

Um exemplo adequado para a instalação de reservatórios para aproveitamento de águas pluviais são os estacionamentos do campus, onde a modelagem identificou uma tendência de concentração do escoamento superficial. Nesse contexto, além da área de estudo e na escala de microcaptação, os resultados de simulações específicas poderiam ajudar a identificar espaços apropriados para a implementação de reservatórios destinados ao reuso de água. Essa abordagem favorece não apenas a retenção na fonte geradora, mas também a promoção de práticas sustentáveis de gestão hídrica.

Embora os objetivos deste estudo não estejam diretamente relacionados à investigação sobre a disponibilidade de sistemas de armazenamento de água da chuva, é importante considerar esse aspecto em futuras pesquisas. Entre os benefícios das boas práticas de gestão, destaca-se a redução imediata das contribuições que impactam os picos de vazão e os volumes de água lançados na rede pluvial pública (Dornelles, 2012).

Também se propõe, a título de estudo futuro, a avaliação da importância da participação ativa dos cidadãos na coleta de dados científicos para aplicação em modelos preditivos, por meio da ciência cidadã, favorecendo a obtenção de informações primárias "in loco". Essa prática pode auxiliar no ajuste dos modelos preditivos e contribuir para a difusão da consciência ambiental de forma mais ampla (Bravo & Sluter, 2018; 2022). Trata-se de uma ferramenta singular a ser reconhecida e valorizada no âmbito da Geografia e da Geomorfologia, possibilitando uma visão mais completa da dinâmica dos espaços públicos e abrindo espaço para soluções inovadoras e sustentáveis (Souza & Rodrigues, 2024).

Revisitando a obra de Penteadó (1983), conclui-se que os sistemas de processos e respostas em ambientes antrópicos influenciam variáveis relacionadas ao fluxo de matéria e energia nas áreas urbanas, alterando formas e processos frequentemente não previstos nos projetos de engenharia. Nesse contexto, reafirma-se o papel interdisciplinar da Geomorfologia e a importância de sua prática nos currículos escolares.

Não se trata de apologia ao corporativismo científico, mas do reconhecimento do potencial dessa área de pesquisa em diversos âmbitos curriculares e profissionais. Isso possibilita a identificação de problemas ambientais e a proposição de soluções práticas para os impactos antrópicos, especialmente no campo do planejamento e gestão urbana.

A replicabilidade dos métodos e ferramentas utilizados nesta tese requer a adoção de uma abordagem interdisciplinar e intersetorial, com a participação e colaboração intensiva de

diversos segmentos da sociedade (Tucci, 2005). Um primeiro passo para alcançar a gestão holística desejada é aprimorar tanto as medidas estruturais quanto as não estruturais, envolvendo a responsabilidade dos atores públicos e privados na gestão do escoamento na fonte. Além disso, é fundamental reconsiderar aspectos básicos relacionados à regulamentação e às diretrizes técnicas.

Destaca-se, a título de exemplo, a carência de referências da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para projetos específicos de drenagem urbana, o que leva os profissionais a recorrer a literaturas estrangeiras para compreender normativas aplicáveis a diferentes realidades geográficas. Isso evidencia a urgência de uma padronização mais abrangente dos conhecimentos técnicos sobre o tema.

Adicionalmente, essa conclusão ressalta o recente Decreto nº 12.041, de 5 de junho de 2024, que institui o “Programa Cidades Verdes Resilientes”. O objetivo deste programa é elevar a qualidade ambiental e fortalecer a resiliência das cidades brasileiras frente aos impactos das mudanças climáticas. Ele visa promover a integração de políticas urbanas, ambientais e climáticas, incentivando práticas sustentáveis e valorizando os serviços ecossistêmicos proporcionados pelo “verde urbano” (Brasil, 2024).

Nesse contexto, recorre-se a Bonab *et al.* (2023) para argumentar que uma cidade verde também pode ser inteligente, adotando uma abordagem holística. Isso implica que as três unidades semânticas que compõem o termo “cidade verde inteligente” — e os conceitos que elas representam — devem ser integradas dinamicamente para formar uma entidade coesa. Sem sinergia entre esses três componentes, uma cidade pode rapidamente regredir a um centro urbano poluído, apesar de seu avanço tecnológico, ou se tornar uma cidade verde com uma paisagem natural impressionante, mas dependente de infraestrutura tecnológica obsoleta e ineficiente.

Em um cenário que exige cada vez mais a mitigação dos impactos e a adaptação às mudanças climáticas, especialmente em países vulneráveis socioeconômica e ambientalmente, é fundamental ir além da mera legitimidade de programas governamentais efêmeros, que frequentemente têm pouca relevância e não produzem os efeitos esperados. Na prática, há uma necessidade urgente de explorar novas fontes de financiamento, tanto nacionais quanto internacionais, públicas e privadas, para garantir recursos suficientes e contínuos para pesquisa, capacitação, projetos, operação, execução e manutenção de tecnologias sustentáveis

(UN CC: LEARN, 2024). Essa abordagem é essencial para enfrentar a visão frequentemente distópica associada aos desafios urbanos.

Este estudo conclui que o desenvolvimento de projetos de drenagem pluvial não pode se restringir apenas a elementos técnicos baseados em fórmulas matemáticas, pois essa abordagem é insuficiente diante da complexidade dos cenários urbanos. Sob uma perspectiva taxonômica, a área de captação deve ser considerada, dentro do contexto da bacia hidrográfica, como uma unidade hidro-geomorfológica essencial para a análise. Diferentemente dos empreendimentos que se limitam à escala do projeto, essa abordagem holística permite uma contextualização mais ampla, reconhecendo a importância dos processos geomorfológicos temporo-espaciais e das variáveis que compõem a morfologia na compreensão e interpretação da dinâmica hidrológica urbana.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Instalações prediais de águas pluviais** - NBR-10844, 1989.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos** - NBR-6484, 2001.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gerenciamento de projeto, programa e portfólio – contexto e conceitos** – NBR- ISO-21500, 2021.
- ABREU, A. A. de. A Teoria Geomorfológica e sua Edificação: análise crítica. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 4, n. 1-2, p. 5-23, jan./dez. 1983. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19830001>
- AB'SABER, A. N. **Geomorfologia do sítio urbano de São Paulo**. 1956. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1956.
- AB'SABER, A. N. Um conceito de Geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o quaternário. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 18, p. 1-23, 1969. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002164075>.
- AGUILAR, R. G., OWENS, R., GIARDINO, J. R. The expanding role of anthropogeomorphology in critical zone studies in the Anthropocene. **Geomorphology**, v. 366, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107165>
- AKHTER, M. S.; HEWA, G. A. The Use of PCSWMM for Assessing the Impacts of Land Use Changes on Hydrological Responses and Performance of WSUD in Managing the Impacts at Myponga Catchment, South Australia. **Water**, v. 8, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8110511>
- ALAM, Z. R. **Utilizing GIS in the development of detailed distribution urban drainage models**. Toronto Metropolitan University. Thesis. 2014. DOI: <https://doi.org/10.32920/ryerson.14652438.v1>
- ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v. 47, Issues 2–4, p. 107-124, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00083-1)
- ALLASIA, D. G., *et al.* Decreasing flood risk perception in Porto Alegre – Brazil and its influence on water resource management decisions. **Proc. IAHS**, 370, 189–192, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/piahs-370-189-2015>
- ALERTA RIO. **Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Centro de Operações Rio (COR), 2022. Disponível em: <http://alertario.rio.rj.gov.br/>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- ALFIERI, L. *et al.* Advances in pan-European flood hazard mapping. **Hydrological Processes**, v. 28, p. 4067-4077, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.9947>
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129 - 137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- ALONSO, U. R. **Exercícios de fundação**. 3. ed. Ed. Edgard Blucher: São Paulo, 2019.
- ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle**. 3. ed. Ed. Edgard Blucher: São Paulo, 2020.
- ALTAFINI, D., *et al.* Mapeando a estrutura espacial de áreas urbanas propensas a inundações e suas tendências de mudança: um estudo de rede para a região metropolitana de Porto Alegre no Brasil. **Cartographica: Revista**

Internacional de Informação Geográfica e Geovisualização, 58, no. 4, 205-226, 2023. Acesso em: 11 maio 2024

ALVARÃES, A. C. T. Utilização de mapas conceituais no ensino superior como instrumento de análise de resolução de problemas através da aprendizagem significativa. In: Semin. Nac. de Pesq. em Educação, 2, 2008, Santa Cruz do Sul. **Anais[...]**. Santa Cruz do Sul: UNISC. 16p. 2008. Disponível em: <https://convibra.org/congresso/res/uploads/pdf/325_0.pdf>. Acesso em: 13 out. 2022.

ALVES, A. *et al.* Multi-criteria Approach for Selection of Green and Grey Infrastructure to Reduce Flood Risk and Increase CO-benefits. **Water Resour. Manage**, 32, p. 2505–2522, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1943-3>

ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável**: Impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica. 2018. 76 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/20423>>. Acesso em: 05 abr. 2023.

AL-WAGDANY, A. S. Construction of IDF curves based on NRCS synthetic rainfall hyetographs and daily rainfall records in arid regions. **Arabian Journal of Geosciences**, 14, 527, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06922-w>

AMIRI, B. J. *et al.* Regionalization of flood magnitudes using the ecological attributes of watersheds. **Geocarto International**, v. 35:9, p. 917-933, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1552321>

ANDRADE, L., A.; BLUMENSCHNEIN, R. Cidades sensíveis à água: cidades verdes ou cidades compactas, eis a questão? **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**. 59. 2013. DOI: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n10.2013.12124>

ANDRADE, *et al.* Elaboração de um mapa de risco de inundações da bacia hidrográfica do Córrego São Pedro, área urbana de Uberlândia-MG. **Caderno de Geografia**. 24(41), 2014. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2014v24n41p1>

APPELS, W. M. *et al.* Influence of spatial variations of microtopography and infiltration on surface runoff and field scale hydrological connectivity. **Advances in Water Resources**, v. 34, 2011, p. 303-313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.12.003>

ARANHA, L. S. M.; SOUZA, C. J. de O. A água nos processos modeladores do relevo no domínio tropical: um mapa conceitual. **Terra e Didática**, Campinas, SP, v. 9, n. 2, p. 94–104, 2015. DOI: <https://doi.org/10.20396/td.v9i2.8637397>

ARNOLD JR., C. L.; GIBBONS, C. J. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. **Journal of the American Planning Association**, Chicago, n. 62:2, 1996, p. 243-258. Published online: 26 nov. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01944369608975688>

ASTAGNEAU, P. C. *et al.* Technical Note: Hydrology Modelling R Packages – a Unified Analysis of Models and Practicalities from a User Perspective. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 7, 2021, pp. 3937–3973. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-25-3937-2021>

AUSUBEL, D. P. **Educational psychology**: a cognitive view. Nova York: Holt, Rinehart and Winston, 1968.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 11 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

AXELSSON, C. *et al.* Urban policy adaptation toward managing increasing pluvial flooding events under climate change. **Journal of Environmental Planning and Management**, 64:8, 1408-1427, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1823346>

AZEVEDO NETO, J. M. de; FERNANDEZ, M. F. y. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2015. 632 p.

- BACCARO, C. A. D. Estudos geomorfológicos do município de Uberlândia. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 1, n. 1, 1989. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v1-1989-61555>
- BACCARO, C. A. V.; FERREIRA, I. L.; ROCHA, M. R.; RODRIGUES, S. C. Mapa geomorfológico do Triângulo Mineiro: uma abordagem morfoestrutural-escultural. **Sociedade & Natureza**, v. 13, n. 25, p. 115-127, 2001. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v13-2001-29958>
- BACCHIN, K., *et al.* A multi-scale approach in the planning and design of water sensitive environments. **Novatech** – 8^o International Conference on planning and technologies for sustainable management of Water in the City, 2013, Lyon, France. 2013. Disponível em: <<https://hal.science/hal-03303450/document>>. Acesso em: 13 mai. 202.
- BAKER, V. R. The modern evolution of geomorphology - Binghamton and personal perspectives, 1970–2019 and beyond. **Geomorphology**, v. 366, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.028>
- BALASCH, J. C., *et al.* Reconstruction of the 1874 Santa Tecla's rainstorm in Western Catalonia (NE Spain) from flood marks and historical accounts. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 10(11), 2317-2325, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-2317-2010>
- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. Aspectos institucionais e de financiamento dos sistemas de drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 7 (1), p. 29-49, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v7n1.p29-49>
- BARNARD, T. E. *et al.* Evolution of an Integrated 1D/2D Modeling Package for Urban Drainage. In: JAMES, W. *et al.* (Comp.). **Contemporary Modeling of Urban Water Systems. Guelph, On Canada**: Computational Hydraulics International, 2007. Cap. 18, p. 343-365. Disponível em: <<https://www.chijournal.org/R227-18>>. Acesso em: 12 mar. 2022.
- BARRIENDOS, M., *et al.* The "Prediflood" database of historical floods in Catalonia (NE Iberian Peninsula) AD 1035-2013, and its potential applications in flood analysis. **Hydrology and Earth System Sciences**, 18(12), 4807-4823, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-18-4807-2014>
- BARROS, P. H. C. A.; VALADÃO. Aquisição e produção do conhecimento em geomorfologia: a investigação geomorfológica e seus conceitos fundantes. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 22, n. 2, p. 416-436, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2018.123896>
- BEATLEY, Timothy. **Biophilic cities: integrating nature into urban design and planning**. Island Press, 2011.
- BEM, D. A. **Estudo de Hidrograma Unitário Geomorfológico de uma sub-bacia urbana do Ribeirão das Pedras**. 2016. 88 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Campinas. 2016. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2016.979461>
- BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto de Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.4, p.5-16, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v5n4.p5-16>
- BERGGREN, K., *et al.* Climate changed rainfalls for urban drainage capacity assessment. **Urban Water Journal**, v. 11, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.851709>
- BERTALANFFY, L. V. **General System Theory**. Foundations Development Applications. George Braziller: New York, 1968.
- BERTALANFFY, L. V. The theory of open systems in physics and biology. **Science**. Washington, v. 111, p. 23-29, 1950. DOI: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.111.2872.23>
- BERTI, D., *et al.* Geological setting, hazards and urban growth in some historical towns in Italy. **Atti 32nd IGC-Firenze**, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, v. 6, p. 1–72. 2004. Disponível em: <<http://eprints.bice.rm.cnr.it/835/>>. Acesso em: 18 mar. 2023.

- BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física Global: Esboço Metodológico. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, [S.l.], v. 8, dec. 2004. Tradução: Olga Cruz. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v8i0.3389>. Publicado originalmente, na "Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest", Toulouse, v. 39n. 3, p. 249-272, 1968, sob título: Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. Publicado no Brasil no Caderno de Ciências da Terra. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, n. 13, 1972.
- BIBI, T. S. Modeling urban stormwater management in the town of Dodola based on landuse and climate change using SWMM 5.1. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101267>
- BIBI, T. S., KARA, K. G. Evaluation of climate change, urbanization, and low-impact development practices on urban flooding. **Heliyon**, v. 9, 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12955>
- BIBI, T. S. *et al.* Application of PCSWMM for assessing the impacts of urbanization and climate changes on the efficiency of stormwater drainage systems in managing urban flooding in Robe town, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 45, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101291>
- BIRGANI, Y. T.; AZDANDOOST, F. An Integrated Framework to Evaluate Resilient-Sustainable Urban Drainage Management Plans Using a Combined-adaptive MCDM Technique. **Water Resour. Manage.**, v. 32, p. 2817–2835, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1960-2>
- BODOQUE, J. M. *et al.* Developing reliable urban flood hazard mapping from LiDAR data. **Journal of Hydrology**, v. 617(A), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128975>
- BONAB, A. B. *et al.* Theoretical and analytical assessment of smart green cities. **Journal of Cleaner Production**, v. 410, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137315>
- BONNEY, R. *et al.* Citizen science: a developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. **BioScience**, v. 59, p. 977-984, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
- BORGES, M., *et al.* A influência do relevo e coberturas superficiais no uso e ocupação das terras urbanas: Alagamentos sazonais em topos de cimeira na cidade de Uberlândia-MG. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 41, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5216/bgg.v41.64729>
- BOTELHO, R. G. M. Bacias Hidrográficas Urbanas. In: GUERRA, A.J.T. (org). **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 2011.
- BOWEN, R. The Hydrologic Cycle. In: **Surface Water**. Springer, Boston, MA. 1982. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3918-2_2
- BRANCO, E. A., ROQUETTI, D. R., MORETO, E. M. O sistema terrestre (land system) como plataforma de integração e interpretação das complexas relações ambiente-sociedade. **Sustentabilidade em Debate**. 8. 111-125. 2017. DOI: [10.18472/SustDeb.v8n3.2017.24518](https://doi.org/10.18472/SustDeb.v8n3.2017.24518).
- BRANDOLINI P., CAPPADONIA C., LUBERTI G.M. *et al.* Geomorphology of the Anthropocene in Mediterranean urban areas. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 44, p. 461-494, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133319881108>
- BRANDOLINI, P. *et al.* Geomorphological mapping in urban áreas. **Journal of Maps**, v. 17:4, p. 1-5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1952671>
- BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. **Resolução CONTRAN n.º 738**, de 06 de setembro de 2018. Estabelece critérios e procedimentos para a implantação da faixa elevada para travessia de pedestres. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 set. 2018. Seção 1, p. 72.
- BRASIL. **Decreto n.º 12.041, de 5 de junho de 2024**. Institui o Programa Cidades Verdes Resilientes. Brasília, DF: 203º da Independência e 136º da República, 2024. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d12041.htm>. Acesso em: 07 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979.** Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, ano 158º da Independência e 91º da República, 1979. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm>. Acesso em: 23 set. 2022.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001.** Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília, DF: 180º da Independência e 113º da República, 2001. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm>. Acesso em: 07 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012.** Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; [...]; e dá outras providências. Brasília, DF: 191º da Independência e 124º da República, 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm>. Acesso em: 07 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.** Atualiza o marco legal do saneamento básico [...]. Brasília, DF: ano 199º da Independência e 132º da República, 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm>. Acesso em: 23 set. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL: **Levantamento de recursos naturais:** geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Folha SE. 22, Goiânia, vol. 31. Rio de Janeiro, 1983, 768 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=217157&view=detalhes>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). **Classificação e codificação brasileira de desastres (COBRADE).** 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protacao-e-defesa-civil-sedec/DOCU_cobrade2.pdf>. Acessado em: 20 fev. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021.** Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília/DF, 2021. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 26 fev. 2022.

BRAVO, J. V. M. **A confiabilidade semântica das informações geográficas voluntárias como função da organização mental do conhecimento espacial.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 2014. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1884/37998>>. Acesso em: 15 jul. 2024.

BRAVO, J. V. M., SLUTER, C. R. O Mapeamento Colaborativo: seu surgimento, suas características e o funcionamento das plataformas (Collaborative Mapping: its emergence, characteristics and how does it work). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, 2018. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.5.p1902-1916>

BRAVO, J. V. M., SLUTER, C. R. Crowdsourcing Map-Using and Map-Generating Tasks into OpenStreetMap. **The Professional Geographer**, 75(2), 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/00330124.2022.2094424>

BROWNE, S. *et al.* Stormwater management impacts of small urbanising towns: The necessity of investigating the ‘devil in the detail’. **Science of the Total Environment**, v. 757, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143835>

BRUNNER, G. W. **HEC-RES River Analysis System - User's Manual Version 4.1.** US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016. 962 p. Disponível em: <http://drm.cenn.org/trainings/Flood%20Modelling/Other%20Documents/Software/HECRAS/manuals/HEC-RAS_4.1_Applications_Guide.pdf>. Acesso em 09/03/2022.

BRUWIER, M. *et al.* Influence of urban forms on surface flow in urban pluvial flooding. **Journal of Hydrology**, v. 582, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124493>

BÜDEL, J. **Klima – Geomorphologie.** Berlin, Stuttgart: Borntraeger. 1977. 304p.

BUYUKOZKAN, G. *et al.* A review of urban resilience literature. **Sustainable Cities and Society**, v. 77, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103579>

BURSZTA-ADAMIAK, E, *et al.* Rain garden hydrological performance – Responses to real rainfall events, **Science of The Total Environment**, v. 887, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164153>.

BZDOK, D. *et al.* Statistics versus machine learning. **Nat Methods**, v. 15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.4642>

CABANEK, A., ZINGONI DE BARO, M.E.; NEWMAN, P. Biophilic streets: a design framework for creating multiple urban benefits. **Sustain Earth**, v. 3, 7. 2020. DOI: <https://10.1186/s42055-020-00027-0>

CAILLEUX, A. Review of [Chorley, R.J., Beckinsale, R.P. and Dunn, A.J. The history of the study of landforms or the development of geomorphology. Vol. 2. The life and work of William Morris Davis. London, Methuen and Co., 874 p., 1973. **Cahiers de géographie du Québec**, v. 18, p. 397–398. 1974. DOI: <https://doi.org/10.7202/021207ar>

CAIXETA, A. C. M. **Diversidade geoambiental e potencial de infiltração na bacia do córrego São Pedro, em Uberlândia - MG**. 2017. 207 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2017.138>

CAIXETA, A. C. M; FERREIRA, V. de O.; NISHIYAMA, L. Caracterização geotécnica e geoambiental da bacia do córrego São Pedro - Uberlândia/MG: uma contribuição ao planejamento da drenagem urbana. **Sociedade & Natureza**, v. 31, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v31-2019-46344>

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. *et al.* **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais**. Brasília: Faculdade de Tecnologia, 2012. p. 581-606. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350189579_Topicos_sobre_infiltracao_teorica_e_pratica_aplicadas_a_solos_tropicais. Acesso em: 13 nov. 2022.

CAMARASA-BELMONTE, A. SORIANO-GARCÍA, M. J. Flood risk assessment and mapping in peri-urban Mediterranean environments using hydrogeomorphology. Application to ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). **Landscape and Urban Planning**, v. 104, Issue 2, 2012. p 189-200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.009>

CAMPOS, G. M. **Estatística Prática para Docentes e Pós-Graduandos**. Ribeirão Preto: Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto (USP), atualizado em 2000. Site elaborado com apoio do Programa de Incentivo à Produção de Material Didático do SIAE, Pró-Reitorias de Graduação e Pós-Graduação da USP. Disponível em: http://www.forp.usp.br/restauradora/gmc/gmc_livro/gmc_livro_prefacio.html. Acesso em: 30 abr. 2023.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. Oficina de Textos. São Paulo, 2014. 372 p.

CAPRA, F. **O ponto de mutação: a ciência, a sociedade e a cultura emergente**. Cultrix, São Paulo: 2006.

CARMON, N.; SHAMIR, U. Water-sensitive planning: integrating water considerations into urban and regional planning. **Water and Environment Journal**, v. 24, n. 3, p. 181-191, 2010.

CARVALHO, J. A. **Obras hidráulicas**. Lavras: Editora UFLA, 2009. 266 p. Texto Acadêmico 63. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/41376/1/TA%2063%20-%20Obras%20Hidr%C3%A1licas.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2022.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: 2ª ed., Coleção Caminhos da Geografia, Contexto, 1995. 147 p.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: 2005. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7522594/mod_resource/content/1/Geomorfologia%20Valter%20Casseti.pdf. Acesso em: 04 jun. 2024.

CEN/SBCR - COMITÊ EXECUTIVO NACIONAL. Breve estado da arte do Sistema Brasileiro de Classificação de Relevância (SBCR): Contribuições de e para a Sociedade Científica Geomorfológica. **Revista Brasileira de Geografia (RBG)**, Rio de Janeiro, v. 67, ed. 2, p. 212-227, 2023. Organismo interinstitucional, composto por representantes da área de Geomorfologia da Diretoria de Geociências do IBGE, do SBG/CPRM e da Diretoria da UGB DOI: https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375_2022_n2_212-227.

CET. Companhia de Engenharia de Tráfego. **Manual de Sinalização Urbana – Rotatória**, v. 14, rev. 01, 2020. Disponível em: <https://www.cetsp.com.br/media/1233872/msuol14rotatoriainirrotatriarotatoriaverderev01.pdf>. Acesso em: 27 de abril de 2024.

CHAN, F. K. S. *et al.* “Sponge City” in China—A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. **Land Use Policy**, v. 76, p. 772-778, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005>

CHENGTAI, D. An approach to theory and methods of Urban Geomorphology. **Chinese Geographical Science**, v. 6, p. 89-96, 1996. Disponível em: <http://egeoscienc.neigae.ac.cn/en/article/id/9229>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

CHI. **Personal Computer Storm Water Management Model (PCSWMM)**. Disponível em: <https://www.pcswmm.com/Features>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

CHORLEY, R. J. Geomorphology and general systems theory. **U.S. Geological Survey Prof. Paper**, n. 500b, 10 p., 1962, (Este trabalho foi transcrito e traduzido em Notícia Geomorfológica. Campinas. v. 11, n. 21, p. 3-22, 1971.

CHOW V.T., MAIDMENT D.R., MAYS L.W. **Applied Hydrology**. 1 ed. New York, McGraw Hill, 1988, 572 p.

CLARK, M. P. *et al.* The evolution of process-based hydrologic models: Historical challenges and the collective quest for physical realism. **Hydro Earth Syst Sci.** Jul;21(7):3427-3440, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-3427-2017>

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980, 186 p.

COATES, D. R. Urban geomorphology. In: FINKL C.W. (eds) **Applied Geology**. Encyclopedia of Earth Sciences Series, v. 3. Springer, Boston, MA. 1984. DOI: https://doi.org/10.1007/0-387-30842-3_74

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T., CUNHA, S. B.da. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. cap. 3, p. 93-148.

COLTRINARI, L. Z. D. Geomorfologia: Caminhos e Perspectivas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 1, n. 1, 2000. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v1i1.68>

COOK, A., MERWADE, V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, v. 377, Issues 1–2, p. 131-142, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>

COOKE, R. U. *et al.* **Urban geomorphology in drylands**. Oxford University Press. 1982.

CORRÊA, C. V. S. **Zoneamento geoambiental da região compreendida pelas folhas topográficas São José dos Campos e Jacareí-SP**. 2013. 171 f. Dissertação - (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/92729>>. Acesso em 12 nov. 2022.

COSTA, T. O. **Eventos de precipitação extrema associados às inundações na área urbana de Bragança-PA**. 199 f., 2014. Dissertação, PPGGEO. UFSM, Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: http://w3.ufsm.br/ppggeo/images/dissertacoes/dissertacoes_2014/DISSERTACAO_VERSAO_FINAL_TARCISIO_2.pdf>. Acesso em 15 ago. 2021.

- COSTABILE, P. *et al.* Flood mapping using LIDAR DEM. Limitations of the 1-D modeling highlighted by the 2-D approach. **Natural Hazards**, v. 77, p. 181-204, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1606-0>
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2010. 131 p. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16735>>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- CUNHA, S. B. da. Morfologia dos canais urbanos nos trópicos úmidos: A experiência no Brasil. **VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física / II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física**. Universidade de Coimbra, 2010. Disponível em: <<https://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema3/sandra>>. Acesso em: 3 fev. 2022.
- DAMÉ, R. de C.F.; TEIXEIRA, C.F.A.; TERRA, V.S.S.; ROSSKOFF, J.L.C. Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, UAEE/UFCEG, v. 14, n. 1, p. 46-54, 2010. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/>>. Acesso em: 18 maio 2022.
- DANELON, J. R. B. **Processos Antropogênicos Induzidos em meios urbanizados, seu estudo a partir da Geomorfologia Antropogênica no município de Uberlândia - MG**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.203>
- DANELON, J. R. B.; BARCELOS, A. C. Processos antropogênicos induzidos em ambientes urbanizados. **Mercator**, Fortaleza, v. 21, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21033>
- DAS, BRAJA M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7 ed. Rio de Janeiro: Cengage. 2012
- DAWOD, G. M.; MIRZA, M. N.; AL-GHAMDI, K. A. GIS-based estimation of flood hazard impacts on road network in Makkah city, Saudi Arabia. **Environmental Earth Sciences**, v. 67, n. 8, p. 2205–2215, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1660-9>
- DEEP, Connecticut Department of Energy and Environmental Protection. **Connecticut Stormwater Quality Manual**. Bureau of Water Management. CT, Connecticut, EUA. 2004. Disponível em: <<https://portal.ct.gov/DEEP/Water-Regulating-and-Discharges/Stormwater/Stormwater-Manual>>. Acesso em: 29 mai. 2022.
- DEL MONTE, M., *et al.* Geomorphological classification of urban landscapes: the case study of Rome (Italy). **Journal of Maps**, v. 12, p. 178-189, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1187977>
- DENG, J, *et al.* Determination of runoff response to variation in overland flow area by flow routes using UAV imagery. **Journal of Environmental Management**, v. 265, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109868>
- DIAKAKIS, M. A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece. **Natural hazards**, v. 56, p. 803-814, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9592-8>
- DIAS, R. L.; PEREZ FILHO, A. Novas considerações sobre geossistemas e organizações espaciais em Geografia. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 409–421, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v29n3-2017-4>
- DIAS, V. S. **Uso de modelo hidrológico em bacia hidrográfica urbana para previsão de enchentes. Estudo de caso: Microbacia do Córrego Jataí - Uberlândia/MG**. 2015. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (UFU), Uberlândia, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14214>>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology**. Long Grove, IL: Waveland Press, 2015.
- DIODATO, N., *at al.* A millennium-long reconstruction of damaging hydrological events across Italy. **Scientific Reports**, 9(1), 1-10, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-46207-7>

- DORNELLES, F. **Aproveitamento de água de chuva no meio urbano e seu efeito na drenagem pluvial**. 2012. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/55968/000851396.pdf?sequence=1>. Acesso em: 4 maio 2024
- DU, J., CHENG, L., ZHANG, Q. *et al.* Different Flooding Behaviors Due to Varied Urbanization Levels within River Basin: A Case Study from the Xiang River Basin, China. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 10, p. 89–102, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-018-0195-4>
- DUMEDAH, G. *et al.* Characterizing urban morphology types for surface runoff estimation in the Oforikrom Municipality of Ghana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 34, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100796>
- ELLIS, E.C., Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. v. 369, p. 1010-1035, 2011. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0331>
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5a ed., Brasília: EMBRAPA Solos, 2018.
- EPA. **Storm Water Management Model (SWMM)**. U.S, 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. Acessado em 11 mar. 2022.
- ESPINOSA, P. *et al.* When Urban Design Meets Fluvial Geomorphology: A Case Study in Chile. In: THORNBUSH, M. J.; ALLEN, C. D. **Urban Geomorphology, Landforms and Processes in Cities**. Elsevier. 2018. 362 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811951-8.00009-6>
- FACCINI, F. *et al.* Urban geomorphology of Genoa old city (Italy). **Journal of Maps**, v. 17, p. 51-64, 2021. DOI: 10.1080/17445647.2020.1777214
- FAIRBRIDGE, R.W. Exhumed landscape. In: **Geomorphology**. Encyclopedia of Earth Science. Berlin, Heidelberg. 1968a. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_120
- FAIRBRIDGE, R.W. Cryology, cryosphere, cryergy. In: **Geomorphology**. Encyclopedia of Earth Science. Berlin, Heidelberg. 1968b. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_76
- FARIAS, A. **Inundações urbanas em Francisco Beltrão/PR: riscos e vulnerabilidades socioambientais**. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2019. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/66322>. Acesso em: 26 fev. 2022.
- FELTRAN FILHO, A. **Contribuição à análise fluviométrica da bacia do rio Piracicaba**. 188 f. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 1982.
- FELTRAN FILHO, A.; LIMA, E. F de. Considerações morfométricas da bacia do rio Uberabinha - Minas Gerais. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 19, n. 1, 2007. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v19-2007-9342>
- FENG, B. *et al.* Urban flood hazard mapping using a hydraulic–GIS combined model. **Natural Hazards**, v. 100, p. 1089–1104, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03850-7>
- FERNÁNDEZ, D.S.; LUTZ, M.A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. **Engineering Geology**, v. 111, Issues 1–4, 2010, p. 90-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- FERRANTE, C. *et al.* Can a fully integrated approach enclose the drainage system design and the flood risk analysis?. **Transportation Research Procedia**. 45. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.089>
- FERRARESI, M. Roma não foi feita para o clima de hoje. Haverá tempo para salvá-la? **National Geographic Portugal**, [S. l.], 27 ago. 2023. Meio Ambiente. Disponível em: https://www.nationalgeographic.pt/meio-ambiente/roma-nao-foi-feita-para-clima-hoje-havera-tempo-para-salva-la_3990. Acesso em: 11 maio 2024.
- FERRARI, J. **Investigação da morfologia original e antropogênica do Arroio Cadena, Santa Maria/RS**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geografia da IGEO/UFRGS). Porto Alegre, 2018. 161 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/189253>. Acesso em: 10 fev. 2022.

- FERREIRA, I. L. **Estudos geomorfológicos em áreas amostrais da Bacia do Rio Araguari-MG: uma abordagem da cartografia geomorfológica.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geografia do PPGEO/UFU). Uberlândia, 2005. 128 p. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2005.73>
- FERREIRA, M. G. de B. **Análise regional da distribuição temporal de precipitações sub diárias para o Estado de Minas Gerais.** 2015. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1181M.pdf>. Acesso em: 18 maio 2022.
- FIERZ, M. M. A teoria do equilíbrio dinâmico em Geomorfologia. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 605-629, mês. 2016. ISSN 2179-0892. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2015.107614>
- FLETCHER, T. D. *et al.* SUDS, LID, BMPs, WSUD SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage, **Urban Water Journal**, v. 12, p. 525-542, 2015. DOI: <https://10.1080/1573062X.2014.916314>
- FOLLETT, R., STREZOV, V. An analysis of citizen science based research: usage and publication patterns. **PLoS One**. v. 10, 2015. DOI: <https://10.1371/journal.pone.0143687>
- FRAGOSO JÚNIOR, C. R. Regionalização da vazão máxima instantânea com base na precipitação de projeto. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**, UFRGS, v.1, n.1, p.5-13, 2004. Disponível em: <https://dokumen.tips/documents/revista-brasilena-de-recursos-hidricos.html>. Acesso em: 18 maio 2022.
- FRIDA, E. Å., *et al.* Evaluating three commonly used infiltration methods for permeable surfaces in urban areas using the SWMM and STORM. **Hydrology Research**, v. 52, p. 160–175. 2021. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2021.048>
- FU, J. C.; JANG, J. H.; HUANG, C. M.; LIN, W. Y.; YEH, C. C. Cross-analysis of land and runoff variations in response to urbanization on basin, watershed, and city scales with/without green infrastructures. **Water (Switzerland)**, v. 10, no. 2, 26, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10020106>
- FUJIMOTO, N. S. V. M. Considerações sobre o ambiente urbano: um estudo com ênfase na geomorfologia urbana. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, São Paulo, 16, 76-80, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0008>
- GAO, H., SABO, J.L., CHEN, X. *et al.* Landscape heterogeneity and hydrological processes: a review of landscape-based hydrological models. **Landscape Ecology**, v. 33, p. 1461–1480, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0690-4>
- GAVA T. B. S. *et al.* **Aplicações de mapas conceituais na educação como ferramenta metacognitiva.** Vitória: UFES. 11p, 2009. Disponível em: <http://portal.unemat.br/media/oldfiles/enfermagem/docs/formacaocontinuada/aplicacoesdemapasconceituaisnaeducacao.pdf>. Acesso em: 13 out. 2022.
- GERASIMOV, I. P. Essai d'interprétation geomorphologique du schéma général de la structure geologique de l'URSS. **Problèmes de Géographie Physique**. v. 12, p. 1-15, 1946.
- GIARDINO, M., *et al.* Dynamic geomorphology and historical Iconography. Contributions to the knowledge of environmental changes and slope instabilities in the Apennines and the Alps. In: G. Lollino, *et al.* (Eds.), **Engineering geology for Society and territory**, v. 8, p. 463–468, 2015.. Springer International Publishing Switzerland.
- GIARDINO, J.; R, MARSTON, R. A. Engineering geomorphology: an overview of changing the face of earth. **Geomorphology**, v. 31, Issues 1–4, p. 1-11, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00069-0)
- GILBERT, G. K. The Geology of the Henry Mountains. Washington, D. C.: **Department of the interior**. 1877. 212 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/70039916>

GOBATTI, L., COELHO LEITE, B. C. Vegetated roofs rainwater management experimental research in Brazil: A georeferenced exhaustive review of a continental-size country. **Cleaner Production Letters**, v. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2022.100013>

GOERL, R. F. *et al.* Hidrogeomorfologia: princípios, conceitos, processos e aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 13, n. 2, 2012. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.166>

GOMES, V. U. **Estudo comparativo dos modelos da onda cinemática e da onda difusiva na análise de propagação de cheias, em função dos parâmetros hidráulicos da bacia**. 2006. 89 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/17012/1/2006_dis_vugomes.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2022.

GONÇALVES, L. S. M. **Desenvolvimento de ferramenta para simulação de dispositivos de drenagem urbana sustentável utilizando eventos de chuva característicos**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/16454>>. Acesso em: 19 mar. 2023.

GONG, S. *et al.* An initial parameter estimation approach for urban catchment modelling. **Urban Water Journal**, v. 20, p. 171-183, 2023. DOI: 10.1080/1573062X.2022.2155851

GOOGLE. **Earth-Mapas**. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-18.91830555,-48.25946666,864.84774157a,1134.84322138d,35y,0h,0t,0r>>. Acesso em: 27 nov. 2022.

GOUDIE, A. Human influence in geomorphology. **Geomorphology**. v. 7, Issues 1–3, p. 37-59, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90011-P](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90011-P)

GOUDIE, A. S. **Encyclopedia of Geomorphology**. Routledge Ltd, London. p.1202, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.1366>

GOULDEN, S. *et al.* From conventional drainage to sustainable stormwater management: Beyond the technical challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 219, p. 37-45, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.066>

GREGORY, K. J. The human role in changing river channels. **Geomorphology**. v. 79, p. 172-191, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.018>

GRIBBIN, J. E. **Introdução a Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**: Tradução da 4ª edição norte-americana. Cengage Learning Brasil, 2014. E-book. ISBN 9788522116355. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522116355/>>. Acesso em: 08 mai. 2023.

GRIFFITHS, J. S., HEARN, G.J. Engineering geomorphology: A UK perspective. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. 42, 39–44, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02592618>

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite vs. distributed Curve Numbers: effects on estimates of storm runoff depths. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 5, p. 1015-1023, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb04150.x>

GUERRA, A. J. T. (Org.) **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011, 277p.

GUERRA, A. J. T. Início do processo erosivo. In: GUERRA, A.J.T., SILVA, A.S., BOTELHO, R.G.M. **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. cap. 1, p. 17-55.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

GUIMARÃES, L. F. *et al.* The challenges of urban river restoration and the proposition of a framework towards river restoration goals, **Journal of Cleaner Production**, v. 316, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128330>

- GUO, J.C.Y. Rational hydrograph method for small urban catchments. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 6(4): p. 352–356, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:4\(352\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:4(352))
- HACK, J. T. Interpretation of erosional topography in humid temperate regions. **American Journal of Science**, n. 258, p. 80-97, 1960. Disponível em: <http://earth.geology.yale.edu/~ajs/1960/ajs_258A_11.pdf/80.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- HAFF, P. K. Neogeomorphology. **EOS**, v. 83, p.310-317. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002EO000223>
- HALLEMA, D.W., MOUSSA, R., SUN, G. *et al.* Surface storm flow prediction on hillslopes based on topography and hydrologic connectivity. **Ecological Processes** 5, 13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0057-1>
- HAMMER, O. *et al.* PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**, 4, 9 p., 2001. Disponível em: <https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm>. Acesso em: 06 jun. 2024.
- HAMOUIZ, V. *et al.* Modelling runoff reduction through implementation of green and grey roofs in urban catchments using PCSWMM. **Urban Water Journal**, 17:9, 813-826, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1828500>
- HAN, J.; HE, S. Urban flooding events pose risks of virus spread during the novel coronavirus (COVID-19) pandemic. **Science of the Total Environment**, v. 755, p. 142-491, 2021.
- HANZEN, E. Negligência e manejo errado das comportas pioraram enchente na capital: Entrevista com professor do IPH-UFRGS Gino Gehling. **Jornal Extra Classe**, Porto Alegre - RS, p. 0-1, 8 maio 2024. Disponível em: <https://www.extraclasse.org.br/ambiente/2024/05/negligencia-e-manejo-errado-das-comportas-pioraram-enchente-na-capital/>. Acesso em: 11 maio 2024
- HAWKINS, R. H. *et al.* **Curve number hydrology**: state of the practice. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2009. ISBN 978-0-7844-1004-2. Disponível em: <<http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/55128/1/410.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- HEARN, G. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling. **Bull Eng Geol Environ**, 78, 723–742, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1166-5>
- HEGARTY, S. *et al.* Using citizen science to understand river water quality while filling data gaps to meet United Nations Sustainable Development Goal 6 objectives, **Science of The Total Environment**, v. 783, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146953>
- HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. 1ed., Macmillan Publishing Co. Inc., New York, N.Y. 1966. Disponível em: <<https://heidarpour.iut.ac.ir/sites/heidarpour.iut.ac.ir/files//u32/open-henderson.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2022.
- HESSE, R. Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation models. **Applied Geography**, v. 46, 2014, p. 11-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.10.004>
- HIDALGO NUNES, L. Urbanização e produção de risco aos desastres naturais: exemplos da América do Sul. In: LOURENÇO, L. F.; MATEUS, M. A. (org.). **Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos: Homenagem ao Professor Dr. Fernando Rebelo**. Coimbra: Departamento de Geografia. Faculdade de Letras. Universidade de Coimbra, 2013. p. 181-195. Disponível em: <https://www.uc.pt/fluc/depgeotur/publicacoes/Livros/livro_homenagem_FRebelo>. Acesso em: 27 fev. 2022.
- HOFFMANN, T. C. P.; MENDONÇA, F.; GOUDARD, G. **Eventos climáticos extremos**: inundação e gestão de riscos no Paraná. In: MENDONÇA, F. Riscos Climáticos: vulnerabilidade e resiliência associados. Judiai: Paco Editorial, 2014, p. 223-260.
- HOLLING, C. S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual review of ecology and systematics**, v. 4, n. 1, p. 1-23, 1973.

- HORTON, R. E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 5, p. 399-417, 1941. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x>
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and the drainage Basins: hidrophysical approach to quantitative morphology. **GSA Bulletin**, 56(3):275-370, 1945. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- HORTON, R. E. The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle, **Eos Trans. AGU**, 14(1), p. 446– 460, 1933. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- HOUSER, C. *et al.* The Field Geomorphologist in a Time of Artificial Intelligence and Machine Learning. **Annals of the American Association of Geographers**, v. 112:5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/24694452.2021.1985956>
- HUANG, H. *et al.* Effect of growing watershed imperviousness on hydrograph parameters and peak discharge. **Hydrological Processes**, Taiwan, n. 22, p. 2075-2085, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6807>
- HUANG, Y. *et al.* Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 7, n. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1421>
- HUANG, P.; TUN LEE, K. Distinctions of geomorphological properties caused by different flow-direction predictions from digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 30:2, p. 168-185, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1079913>
- HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- HUGGETT, R. J., **Fundamentals of Geomorphology**. New York: Routledge (Routledge Fundamentals of Physical Geography), 3. ed. 2011. Disponível em: https://sudartomas.files.wordpress.com/2012/11/fundamentalsofgeomorphology_routledgefundamentalsofphysicalgeography.pdf. Acesso em: 06 fev. 2022.
- HUSSAIN, E. *et al.* Modeling the effects of rainfall on vehicular traffic. **Journal of Modern Transportation**, v. 26, p. 133–146. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0155-0>
- IMPERIALE, A. J.; VANCLAY, F. Understanding the social dimensions of resilience: The role of the Social Sciences in Disaster Risk Reduction, Climate Action, and Sustainable Development. **Sustainable Development**, 32: p. 1371-1375, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.2675>
- INMET. **Mapa de Estações Meteorológicas**. Estação A507, Uberlândia - MG. 2013. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 1 abr. 2024.
- INMET. **Normais Climatológicas do Brasil**: Prefácio 1991-2020. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/normais/normaisclimatologicas.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- INSTITUTO CIDADES SUSTENTÁVEIS, **Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades—Brasil**. Disponível em: <https://idsc.cidadessustentaveis.org.br/>. Acesso em: 21 jun. 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Modelo para conversão de altitudes geométricas (dadas pelos GNSS) em altitudes físicas (compatíveis com o Datum Vertical do SGB)**. MAPGEO2015, 2015. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/10855-modelo-de-ondulacao-geoidal.html?=&t=sobre>. Acesso em: 06 mai. 2023.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/regioes_geograficas/#/home. Acesso em: 22 mai. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos e regiões fitoecológicas**. Rio de Janeiro, 2019, 179 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101648.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Manual de Observações Meteorológicas**. 3. ed., Brasília: INMET. 1999. p. 36-62.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., 2013.

IPCC. **Report Climate Change 2013**. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. IPCC, 2018.

IPCC. **AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023**. AR6 SYR Core Writing Team Meeting 4 (10-12 March 2023, Interlaken, Switzerland). 2023.

JAIN, G. V. *et al.* Estimation of sub-catchment area parameters for Storm Water Management Model (SWMM) using geo-informatics. **Geocarto International**, v. 31, n. 4, p. 462–476, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1054443>

JAMES, W. **Rules for Responsible Modeling**. 4th ed. Guelph, Ontario, Canada: 1937. Compiled and published by CHI (Computational Hydraulics International). 2005. 307 p. Disponível em: <https://www.chiwater.com/Files/R184_CHI_Rules.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2022.

JANICE MARTINS, M.; *et al.* A Geomorfologia Urbana como subsídio para o planejamento territorial no município de Oiapoque-AP: O Caso. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 1–17, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.v4n2.2023.409>

JEFFERSON, A. J., *et al.* Geomorphology of the Anthropocene: Understanding the surficial legacy of past and present human activities. **Anthropocene**, v. 2, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2013.10.005>

JIANG, Y., ZEVENBERGEN, C., FU, D. Understanding the challenges for the governance of China’s “sponge cities” initiative to sustainably manage urban stormwater and flooding. **Natural Hazards**, v. 89, p. 521–529, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2977-1>

JOLY, F. **Point de vue sur la geomorphologie**. Annales de géographie. Universidade de Paris. p. 522-541. 1977. Disponível em: <https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1977_num_86_477_17626>. Acesso em: 04 jun. 2024.

JONES, D. K. *et al.* Tracking geomorphic signatures of watershed suburbanization with multitemporal LiDAR. **Geomorphology**, v. 219, p. 42-52, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.038>

JORGE, M.C.O. Geomorfologia Urbana: Conceitos, Metodologias e Teorias. In: GUERRA, A.J.T. (org). **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 2011.

KAYA, E. *et al.* Spatial data analysis with R programming for environment, Human and Ecological Risk Assessment: **An International Journal**, 25:6, 1521-1530, 2019. DOI: <https://10.1080/10807039.2018.1470896>

KEIFER, C. J.; CHU, H. H. Synthetic storm pattern for drainage design. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v.83, n.4, p.1-25, 1957. DOI: <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000104>

KEILER, M., KNIGHT, J. & HARRISON, S. Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. **Philosophical Transactions of the Royal Society, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 368, 2461–2479, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0047>

KOBIYAMA, M. (Org.). **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2006. Disponível em: <https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2014/07/Livro_Prevencao_de_Desastres_Naturais.pdf>. Acesso em 15/08/2021.

KONDOLF, G.M., PODOLAK, K. Space and Time Scales in Human-Landscape Systems. **Environmental Management**, 53, 76–87, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0078-9>

KROPF, Karl. The handbook of urban morphology. **John Wiley & Sons**, 2018. DOI: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118747711>

LAIMER, H.J. Engineering geomorphology: A novel professional profile to face applied challenges in earth surface dynamics in mid-Europe. **Earth Surface Processes and Landforms**, 46(11), 2127–2135, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5176>

LAINO, E.; IGLESIAS, G. Scientometric review of climate-change extreme impacts on coastal cities. **Ocean & Coastal Management**, v. 242, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106709>

LANNA, A. E. Elementos de estatística e probabilidades. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS: ABRH, 2001. v. 4, cap. 4, p. 79-176. ISBN 85-7025-298-6.

LAPPICY, T.; COSTA, M. E.; KOIDE, S. Uso do SWMM para modelagem de cenários em uma lagoa de detenção e uma área de expansão. **XIII Encontro Nacional de Águas Urbanas**, Porto Alegre/RS, 2020. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/346108962>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. Tradução Luciane Ferreira Pauleti Vianna. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LEAL FILHO, W. Assessing the impacts of climate change in cities and their adaptive capacity: Towards transformative approaches to climate change adaptation and poverty reduction in urban areas in a set of developing countries. **Science of The Total Environment**, v. 692, p. 1175-1190, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.227>

LEAL, M., RAMOS, C., PEREIRA, S. Different types of flooding lead to different human and material damages: the case of the Lisbon Metropolitan Area. **Natural Hazards**, v. 91, P. 735–758, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3153-3>

LEANDRO, J. *et al.* A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling, **Journal of Hydrology**, v. 535, 2016, p. 356-365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.060>

LEOPOLD, L. B. **Hydrology for urban land planning: a guidebook on the hydrologic effects of urban land use**. Washington: Geological survey circular - United States Department of the Interior, 1968. 18 p. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/circ/1968/0554/report.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2021.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. **Fluvial processes in geomorphology**. San Francisco, 1964.

LI, D., *et al.* A hybrid method for evaluating the resilience of urban road traffic network under flood disaster: An example of Nanjing, China. **Environ Sci Pollut Res**, v. 29, 46306–46324 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19142-w>

LI, J., YANG, L., PU, R. *et al.* A review on anthropogenic geomorphology. **Journal of Geographical Sciences**, 27, 109–128, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1367-7>

LI, W. *et al.* Hydraulic Behavior of Storm-Water Inlets: IV. Flow into Depressed Combination Inlets. **Sewage and Industrial Wastes**, v. 26, n. 8, p. 967–75, 1954. DOI: <http://www.jstor.org/stable/25032543>

LI, X. *et al.* Influence of urban forms on long-duration urban flooding: Laboratory experiments and computational analysis. **Journal of Hydrology**, v. 603, Part C, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127034>

LIANG, J.; MELCHING, C. S. Experimental evaluation of the effect of storm movement on peak discharge. **International Journal of Sediment Research**, v. 30, n. 2, p.167-177, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.03.004>

LIMA, A. J. Estimativa da série de precipitação de uma bacia sem dados históricos. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 40, ed. 67, 2018. DOI 10.5902/2179460X34407. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/download/34407/pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2023.

LIMA, D. M. **Aplicação do MDE de alta resolução espacial em uma abordagem distribuída do modelo NRCS-CN-HUT**. 2017. 88 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, [S. l.], 2017. Disponível em: <<http://ct.ufpb.br/>>. Acesso em: 18 maio 2022.

LIMA, M. K. G. **Análise da implantação de valas de detenção na Avenida Segismundo Pereira, bacia do córrego Jataí, na cidade de Uberlândia/MG**. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.133>

LÓCZY, D. **Anthropogenic Geomorphology**. Hungary: Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-3058-0. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/272403864_Anthropogenic_Geomorphology>. Acesso em: 08 fev. 2022.

LORO, M. *et al.* Identification of optimal landforms to reduce impacts on the landscape using LiDAR for hosting a new Highway. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 66, p. 99-114, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.06.006>

LOURENÇO, L.; AMARO, A. (coord.). **Riscos e crises: da teoria à plena manifestação**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2018. 55 p. DOI 10.14195/978-989-26-1697-1_1. Disponível em: <<https://ucdigitalis.uc.pt/pombalina/item/68045>>. Acesso em: 27 fev. 2022.

LUO, P. *et al.* Urban flood numerical simulation: Research, methods and future perspectives. **Environmental Modelling & Software**, v. 156, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105478>

MA, C. *et al.* An integrated quantitative framework to assess the impacts of disaster-inducing factors on causing urban flood. **Nat Hazards** v.113, p.1903–1924, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05375-y>

MACHADO, G. M. V. *et al.* Geohistorical evolution and the new geological map of the city of Vitória, ES, Brazil. **Ocean & Coastal Management**, v. 151, p. 45-52, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.10.026>

MAKSIMOVIĆ, Č., *et al.* Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. **Journal of Hydraulic Research**, v. 47(4), p.512-523, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221686.2009.952207>

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20:7, p. 703-726, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>

MANCHIKATLA, S. K, UMAMAHESH, N. V. Simulation of flood hazard, prioritization of critical sub-catchments, and resilience study in an urban setting using PCSWMM: a case study. **Water Policy**, v. 24 (8), p. 1247–1268, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2166/wp.2022.291>

MANNING, R. *et al.* On the flow of water in open channels and pipes. **Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland**, v. XX, p. 161-207, 1891; v. XXIV, p. 179-207, 1895. Disponível em: <<https://digitalcollections.tcd.ie/concern/works/r207ts96k?locale=en>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias** – Coleção 08/2023 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <https://mapbiomas.org/visao-geral-da-metodologia>. Acesso em: 25 jun 2024.

MARQUES NETO, R.; OLIVEIRA, T. A. A geomorfologia nos estudos integrados da paisagem: enfoque evolutivo e dinâmico na interpretação dos sistemas geomorfológicos. In: CARVALHO JÚNIOR, O. A. *et al.* (ed.). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. [S. l.: s. n.], 2022. cap. 29, p. 813-844. Disponível em: <<https://livros.unb.br/index.php/portal/catalog/book/376>>. Acesso em: 16 mar. 2023.

MARINHO FILHO, G. M. *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, ed. 2, p. 35 a 47, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.18316/268>.

MARK, O. *et al.* Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. **Journal of Hydrology**, v. 299, p. 284-299, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.014>

MARTIN, R. Paleogeomorphology. **Geomorphology**. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 1968. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_271

MASCARÓ, J. L. **Loteamentos Urbanos**, 2 ed. Porto Alegre: Mais Quatro Editora, 2005. 210 p.

McCUEEN, R.H. **Hydrologic Analysis and Design**. 2a ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1998, ISBN 0-13-134958-9, 814 p.

McCUEEN, R.H., WONG, S. L., RAWLS, W.J. Estimating urban time of concentration. **Journal of hydraulic Engineering**, v. 110, n. 7, p. 887-904, 1984. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:7\(887\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:7(887))

MCDONNELL, J.J. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. **Hydrological Processes**, v. 17: p. 1869-1875. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.5132>

MDE, Maryland Department of Environmental Resources. **Low-Impact Development: An Integrated Design Approach**. Prince George's County, Maryland, EUA, 1999. Disponível em: <https://www.princegeorgescountymd.gov/DocumentCenter/View/86/Low-Impact-Development-Design-Strategies-PDF>>. Acesso em: 29 mai. 2022.

MEDEIROS, T. S. **A Geografia como base para um plano diretor de drenagem pluvial em Uberlândia-MG**. 2015. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Catalão - GO, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufcat.edu.br/items/6e7cd23d-4910-4688-9681-287795946f7c/full>. Acesso em: 20 set. 2024.

MEHRYAR, S.; SURMINSKI, S. National laws for enhancing flood resilience in the context of climate change: potential and shortcomings, **Climate Policy**. v.21:2, p. 133-151, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1808439>

MEI, C., LIU, J., WANG, H. *et al.* Urban flood inundation and damage assessment based on numerical simulations of design rainstorms with different characteristics. **Sci. China Technol. Sci.** 63, 2292–2304, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11431-019-1523-2>

MENDIONDO, E. M. e TUCCI, C. E. M. Escalas Hidrológicas I: Conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, v. 2, n. 1, 1997. p. 59-122. Disponível em: <http://www.abrh.org/>>. Acesso em: 19 fev. 2022.

MENDONÇA, F.A. CHRISTOPHERSON, R.W. Geossistemas – Uma introdução à geografia física. Tradução: Francisco Eliseu Aquino... (*et al.*). Porto Alegre: Bookman, 7ª edição, 2012. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], v. 10, jun. 2012. ISSN 2237-8642. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v10i1.30609>.

MENERO, Erica *et al.* Evolução da implementação de um Sistema de Alerta no Brasil no âmbito do Plano Nacional de Gestão de Risco e Resposta à Desastres: Estudo de Caso. In: IWAMA, Allan Yu *et al.* **Riscos ao Sul: Diversidade de Riscos de Desastres no Brasil**. Ubatuba, SP: Isso dá um livro, 2023. cap. 18, p. 419-441. ISBN 978-65-994944-3-7. Disponível em: <http://www.riesgosalsurbrasil.org/conteudo.html>. Acesso em: 9 fev. 2024.

MENEZES FILHO, F. C. M. de; RIBEIRO DA COSTA, A. Sistemática de cálculo para o dimensionamento de galerias de águas pluviais: uma abordagem alternativa. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 4, n. 1, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v4i1.18162>

MESCERJAKOV, Ju P. Les concepts de morphostructure et de morphosculture, um nouvel instrument de l'analyse géomorphologique. **Annales de Géographie**, v 77, n. 423, p. 539-552, 1968.

MIGUEZ, M. **Drenagem Urbana - Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade**. Grupo GEN, 2015. E-book. ISBN 9788595155695. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155695/>>. Acesso em: 08 mai. 2023.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2005, 81 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/2576>>. Acesso em: 18 mai. 2021.

MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais e aprendizagem significativa**. 2010. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/mapasport.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2022.

MOROZ-CACCIA GOUVEIA, I. C. **Da originalidade do sítio urbano de São Paulo às formas antrópicas: aplicação da abordagem da Geomorfologia Antropogênica na Bacia hidrográfica do Rio Tamanduateí, na Região Metropolitana de São Paulo**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Física do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP, São Paulo, 2010. 384 p. DOI: 10.11606/T.8.2010.tde-31012011-123012

MOROZ-CACCIA GOUVEIA, I. C.; RODRIGUES, C. Mudanças morfológicas e efeitos hidrodinâmicos do processo de urbanização na bacia hidrográfica do rio Tamanduateí – Região Metropolitana de São Paulo. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 21, n. 1, p. 257-283, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2017.105342>

Moser, S. C., Ekstrom, J. A. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 107(51), 22026–22031, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107>

MOULINEC, C. *et al.* An efficient hydrodynamics suite for massively parallel architectures. **Computers and Fluids**, vol. 51, no. 1, p. 30–34, 15 Dec. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.003>.

MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. Morphologie fractale du réseau hydrographique. **Hydrological Sciences Journal**, Montpellier, n. 38, p. 187-201, 1993. DOI: 10.1080/02626669309492662.

MOYA, C. R. **Como escolher o teste estatístico: um guia para o pesquisador iniciante**. São Paulo: Ed. da Autora, 2020. 41 p. Disponível em: <<https://www.sbquadril.org.br/app/uploads/2021/10/Como-escolher-o-teste-estati%CC%81stico-Um-guia-para-o-pesquisador-iniciante.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2023.

MULUGETTA, Y., URBAN, F. Deliberating on low carbon development. **Energy Policy**, v. 38, Issue 12, 2010, Pages 7546-7549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.049>

MUNNA, G. M. *et al.* Runoff prediction of Surma basin by curve number (CN) method using ARC-GIS and HEC-RAS. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 11, 100129, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100129>

NAGHETTINI, M.; PORTELA, M. M. **Probabilidades e estatística aplicadas à hidrologia**. Lisboa: [s. n.], 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/231621634_Probabilidade_e_Estatistica_Aplicadas_a_Hidrologia>. Acesso em: 18 mai. 2021.

NAGHETTINI, M; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/454>>. Acesso em: 1 mar. 2022.

NANÍA, L. S.; GÓMEZ, M.; DOLZ, J. Experimental study of the dividing flow in steep street crossings. **Journal of Hydraulic Research**, v. 42, n. 4, p. 406–412, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9728406>

NASCIMENTO, F. A. *et al.* O método do Soil Conservation Service revisitado: verificação de validade de premissas e aplicabilidade em projetos de mineração. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió – AL. **Anais[...]** p. 1-20, 2011. Disponível em: <https://www.abrhydro.org.br/sgcv3/publicacao.php?pub=3&id=81&publicacao=anais_simposios>. Acesso em: 21 fev. 2023.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Precipitation Frequency Data Server (PFDS)**. USA, Office of Water Prediction, Silver Spring: US Dept of Commerce, NOAA, National Weather Service. 2022. Disponível em: <<https://www.weather.gov/owp/hdsc>>. Acesso em: 19 nov. 2022.

- NAUMANN, S. *et al.* Design, implementation and cost elements of Green Infrastructure projects. **Final report to the European Commission, DG Environment**, 2011. Contract n.º 070307/2010/577182/ETU/F.1, Ecologic institute and GHK Consulting. Disponível em: <<https://www.ecologic.eu/3933>>. Acesso em: 13 jul. 2022.
- NIR, D. **Man, a Geomorphological Agent: An Introduction to Anthropogenic Geomorphology**. Jerusalem: Keter Publishing House and D. Reidel Publishing Co. Google Scholar. 1983.
- NISHIYAMA, L. **Procedimentos de mapeamento geotécnico como base para análises e avaliações ambientais do meio físico, em escala 1:100 000**: aplicação no município de Uberlândia - MG. 1998. 372 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/ São Carlos, 1998.
- NKWUNONWO, U. C., *et al.* A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. **Scientific African**, v. 7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>
- NOVAIS, G. T.; BRITO, J. L. S.; SANCHES, F. O. Unidades climáticas do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 23, p. 223-243, 2018.
- NOVO, E. M. L de M. Métodos e Técnicas Aplicadas aos estudos geomorfológicos. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v8-1996-61709>
- NUNES, F. G. **A Influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do rio Atuba**. 2007. 187f. Dissertação (Mestrado em Hidrologia) – Setor de ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- NUNES, F. G.; FIORI, A. P.; FIRPO, G. Estimativa de coeficientes de escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Atuba: Curitiba e região metropolitana Paraná/ Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 65, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/geo.v65i0.6647>
- NUNES, H. K. de B.; BASTOS, F. de H. Ocupação urbana e processos antropogeomorfológicos em Teresina, PI: considerações a partir da abordagem histórica. **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 43, p. e198453, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.198453>
- O'CALLAGHAN, J. F., MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, Issue 3, p. 323-344, 1984. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- OLIVEIRA, C. A. A. A Designação do Guaíba. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 12, n. 12, p. 25–51, 1979. DOI: 10.22456/1807-9806.21759
- OLIVEIRA, I. R. de. Tratar a cidade como ecossistema: contribuições teórica e prática visando à sustentabilidade urbana. **Tecnologia e Ambiente**, [S.l.], v. 24, p. 33 - 55, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18616/ta.v24i0.4365>
- OMM. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. WMO-TD n. 1203, Geneva, Switzerland. 2017. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2015). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em: 26 fev. 2022.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2016). **Habitat III: nova agenda urbana**. Disponível em <<https://habitat3.org/about/>>. Acesso em: 26 fev. 2022.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2018). **São Paulo terá perto de 24 milhões de habitantes em 2030**. Disponível em <<https://news.un.org/pt/story/2018/10/1645482>>. Acesso em: 26 fev. 2022.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2022). **Relatório de Desenvolvimento Humano 2021/2022**. Disponível em <<https://www.undp.org/pt/angola/publications/relatorio-do-desenvolvimento-humano-2021/2022>>. Acesso em: 21 mar. 2023.

ORLANDINI, S. *et al.* Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. **Water resources research**, v. 39(6), 2003. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002WR001639>

PAES, L. A. B. A utilização da metodologia pmbok no gerenciamento de projetos: uma análise das novas práticas propostas na 5ª edição. **REGRAD - Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM** - [S.l.], v. 7, n. 1, 2014. Disponível em: <<https://revista.univem.edu.br/REGRAD/article/view/764>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

PECHLIVANIDIS *et al.* Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. **GlobalNEST International Journal**. 13. 193-214, 2011. DOI: <https://doi.org/10.30955/gnj.000778>

PELOGGIA, A. U. G. A ação do homem enquanto ponto fundamental da geologia do Tecnógeno: proposição teórica básica e discussão acerca do caso do município de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 257-268, 1997. Disponível em: <<http://bjg.siteoficial.ws/1997/n.3/4.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2022.

PENG, X., *et al.* From Sponge Cities to Sponge Watersheds: Enhancing Flood Resilience in the Sishui River Basin in Zhengzhou, China. **Water**, v. 14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14193084>

PENTEADO, M. M. **Fundamentos de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 3 ed. 185 p., 1983. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81427.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2024.

PEREIRA, C. E. *et al.* Definição da chuva de projeto por métodos tradicionais para a cidade de Uberlândia-MG. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves-RS, 2013. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3853>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

PEREIRA, J. S. **Mapeamento das voçorocas e análise da susceptibilidade erosiva no município de Uberlândia, MG**. 2021 197 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.5529>

PEREIRA, C. R. P.; CUNHA da, S. B. Geomorfologia fluvial e gestão de risco de inundações. In: CARVALHO JÚNIOR, O. A. *et al.* (ed.). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. [S. l.: s. n.], 2022. cap. 5, p. 124-142. Disponível em: <<https://livros.unb.br/index.php/portal/catalog/book/376>>. Acesso em: 16 mar. 2023.

PETRUCCI, E. **Características do clima de Uberlândia-MG: análise da temperatura, precipitação e umidade relativa - Uberlândia**. 2018. 245 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

PETRUCCI, E.; OLIVEIRA, L. A. de. Relações entre Intensidade, Duração e Frequência das precipitações máximas de 24 horas e equação de chuvas intensas para a cidade de Uberlândia-MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], v. 25, ago. 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/57767/39230>>. Acesso em: 04 set. 2022.

PIADEH, F. *et al.* A critical review of real-time modelling of flood forecasting in urban drainage systems. **Journal of Hydrology**, v. 607, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127476>

Pica, A. *et al.* Urban Geomorphology Methods and Applications as a Guideline for Understanding the City Environment. **Land**, v. 13, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13070907>

PINTO COELHO, M. M. L.; LIMA, J. G. A. Eficiência hidráulica de bocas de lobo situadas em sarjetas de greide contínuo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 16, n. 2, 2011. DOI: <https://10.21168/rbrh.v16n2.p133-143>.

PIKE, R.J. *et al.* Chapter 1 Geomorphometry: A Brief Guide. Editor(s): Tomislav Hengl, Hannes I. Reuter. **Developments in Soil Science**, Elsevier, v. 33, 2009, p. 3-30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9)

PILGRIM, D. H.; CORDERY, I. Rainfall temporal patterns for design floods. **Journal of the Hydraulics Division**, v.101, n.1, p.81-95, 1975. DOI: <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004197>

PIMENTEL, L. **Hidrologia** - Engenharia e Meio Ambiente. Grupo GEN, 2015. E-book. ISBN 9788595155510. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155510/>. Acesso em: 08 mai. 2023.

PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 23, p. 4-26, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>

PORTELA, M. M. **Modelação Hidrológica**. Instituto Superior Técnico - DECivil, SHRHA. Lisboa, 2006. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/>. Acesso em: 21 mai. 2022.

PORTO, R. *et al.* Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS: ABRH, v. 4, cap. 21, 2001. p. 805-847. ISBN 85-7025-298-6.

PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: **Drenagem urbana**. TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. Porto Alegre/RS, Editora da UFRGS e ABRH, 1995, 428 p.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC-USP, 2006.

POSSA, T. M., *et al.* Hydrological-hydrodynamic simulation and analysis of the possible influence of the wind in the extraordinary flood of 1941 in Porto Alegre. **RBRH**, 27, e29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220028>

PRAKASH, M.; ROTHAUGE, K.; CLEARY, P. W. Modelling the impact of dam failure scenarios on flood inundation using SPH. **Applied Mathematical Modelling**, v. 38, no. 23, p. 5515–5534, 1 Dec. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.03.011>

PRIETO, É. C. **Os desafios institucionais e municipais para implantação de uma cidade universitária: o Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia**. 2005. 219 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, [S. l.], 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16274>. Acesso em: 8 nov. 2022.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S., SILVA, D.D. Escoamento superficial. Viçosa: UFV, 2014, 88 p.

QUEIROGA, A. A.; *et al.* Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação aplicando diferentes modelos digitais de elevação no modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND). **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 43, p. e191008, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.191008>

QUEIROZ-STEIN, G. de., *et al.* Mudanças climáticas, negacionismo e instituições participativas no Brasil: efeitos da estratégia ambiental do governo Bolsonaro (2019-2022). **Revista Brasileira de Ciência Política**, 17 (3), 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1981-3821202300030005>

QUINN, P. F. B. J. *et al.* The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological processes**, v. 5(1), p.59-79, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>

R&V SERVIÇOS DE ENGENHARIA E TOPOGRAFIA LTDA. (ed.). **Levantamento topográfico planialtimétrico cadastral**. Uberlândia: Divisão de Cadastro Integrado do Espaço Físico, DICIE-UFU, 2013-2014. AutoCAD drawing. Disponibilizado por email: dicie@prefe.ufu.br. Acesso em: 27 jun. 2022.

RAHMATI, O. *et al.* Contribution of physical and anthropogenic factors to gully erosion initiation. **Catena**, v. 210, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105925>

RAIMONDI, A. *et al.* Rainwater Harvesting and Treatment: State of the Art and Perspectives. **Water**, v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15081518>

RAIMONDI, A. *et al.* Probabilistic modeling of sustainable urban drainage systems. **Urban Ecosyst** 26, 493–502 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01299-4>

RAJU, K.G.R. **Flow through open channels**. 1. ed. New Delhi: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1981. 330p.

RAMOS, V. M. *et al.* Avaliação de Metodologias de Determinação do Cálculo de Áreas de Contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 4, n. 2, 2003. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v4i2.23>

RANE, N. Potential Role and Challenges of ChatGPT and Similar Generative Artificial Intelligence in Architectural Engineering. **International Journal of Artificial Intelligence and Machine Learning**, v. 4, n. 1, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4607767>

REBELO, F. **Riscos naturais e ação antrópica: estudos e reflexões**. 2. ed. rev. e atual. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2003. 290 p. DOI: 10.14195/978-989-26-0467-1. Disponível em: <<https://ucdignitalis.uc.pt/pombalina/item/56719>>. Acesso em: 27 fev. 2022.

REGO, R. L.; MENEGUETTI, K. S. A respeito de morfologia urbana. Tópicos básicos para estudos da forma da cidade. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 33, n. 2, p. 123-127, 2011. DOI: 10.4025/actascitechnol.v33i2.6196

REMO, J. W., & PINTER, N. Retro-modeling the middle Mississippi River. **Journal of Hydrology**, 337(3-4), 421-435. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.008>

REMO, J. W., *et al.* The use of retro-and scenario-modeling to assess effects of 100+ years river of engineering and land-cover change on Middle and Lower Mississippi River flood stages. **Journal of Hydrology**, 376(3-4), 403-416, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.049>

RENTACHINTALA, L. R. N. P., *et al.* Urban stormwater management for sustainable and resilient measures and practices: a review. **Water Sci Technol**, v. 85, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.017>

RESENDE, M. *et al.* **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5 ed. rev. Lavras: UFLA, 2009.

REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G. Gestão de águas pluviais urbanas. In: SANTOS, A. S. P.; JÚNIOR, A. A. O. **Engenharia e Meio Ambiente - Aspectos Conceituais e Práticos**. Grupo GEN, 2021. E-book. ISBN 9788521637523. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637523/>>. Acesso em: 08 mai. 2023.

REZENDE, P. S.; MARQUES, D. V.; OLIVEIRA, L. A. de. Construção de modelo no QGIS e utilização do método de processo analítico hierárquico - AHP para mapeamento de riscos à inundação na área urbana de Paracatu - MG. **Caminhos de Geografia**, [S. l.], v. 18, n. 61, p. 01-18, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG186101>

RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. **Boletim de Geografia Teorética**. Rio Claro: v23(4646):288-294, 1993.

RIBEIRO, R. G. **Modelagem para previsão de inundações utilizando correlação chuva – vazão**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1104>. Acesso em: 02 mai. 2023.

ROCHA, L. L. L.; RIBEIRO, R. J. C. Reservatórios de retenção e infiltração de águas pluviais: uma análise sob a ótica urbana.: Estudo de caso da cidade de Natal/RN. **Paranoá**, [S. l.], v. 11, n. 22, p. 16-31, 2018. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n22.2018.02

RODRIGUES, C. A Teoria Geossistêmica e sua contribuição aos estudos geográficos e ambientais. São Paulo: **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v. 14, p. 69-77, 2001. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2001.0014.0007>

RODRIGUES, C. Morfologia original e morfologia antropogênica na definição de unidades espaciais de planejamento urbano: exemplo na metrópole paulista. **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 17, p. 101-111, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0017.0008>

RODRIGUES, C.; MOROZ-CACCIA GOUVEIA, I. C. Importância do fator antrópico na redefinição de processos geomorfológicos e riscos associados em áreas urbanizadas do meio tropical úmido: exemplos na

Grande São Paulo. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 66-94.

RODRIGUES, S. C.; DE SOUZA, N. C. Mapeamento da fragilidade ambiental no trecho de vazão reduzida do rio Araguari (MG) utilizando técnicas de geoprocessamento. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 129-142, 2013. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2013.75443>

RODRIGUES, S. C.; DANELON, J. R. B.; BARCELOS, A. C. A Geomorfologia e as interações humanas: Contribuições Teóricas da Geomorfologia Antropogênica. **Physis Terrae**, v. 4, n. 1-2, p. 45-63, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21814/physisterrae.4159>

RODRIGUES, S. C.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; NAZAR, T. I. S. M. Mapeamento Geomorfológico do Estado de Minas Gerais: uma proposta com base na morfologia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 24, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i1.2233>

RODRIGUEZ, F.; ANDRIEU, H.; CREUTIN, J.-D. Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1-4, p. 146-168, 2003. DOI:10.1016/S0022-1694(03)00246-4

RODRIGUEZ, F.; ANDRIEU, H.; MORENA, F. A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. **Journal of Hydrology**, v. 351, n. 3-4, p. 268-287, 2008. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.12.007

ROSA, R. M. **Unidades de paisagem e zoneamento: subsídios para o planejamento ambiental na bacia do rio Uberabinha-MG**. 2017. 118 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2017.318>

ROSA, R. M.; FERREIRA, V. de O. Aspectos morfográficos, morfométricos e de cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do rio Araguari, Minas Gerais, Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, [S. l.], v. 2, n. 44, p. 57-80, 2022. Disponível em: <<https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/8570>>. Acesso em: 15 jul. 2024.

ROSA, R. M.; FERREIRA, V. de O. Compartimentação multiescalar da paisagem da bacia do rio Uberabinha (Minas Gerais, Brasil) sob a perspectiva geossistêmica. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 34, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-63507>

ROSS, J. L. S. Relevo Brasileiro: uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 4, p. 25-39, 1985. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.1985.0004.0004>

ROSS, J. L. S. As Unidades Morfoesculturais do Brasil: uma nova proposta de classificação do relevo brasileiro. In **Anais[...]** do III Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Nova Friburgo-RJ, 1989.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. n. 8, p. 63-73, 1994. Disponível em: <<https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/365/o/Ross.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2022.

ROSS, J. L. S.; MOROZ-CACCIA GOUVEIA, I. C. A taxonomia do relevo e a cartografia geomorfológica regional. In: CARVALHO JÚNIOR, O. A. *et al.* (ed.). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. [S. l.: s. n.], 2022. cap. 25, p. 705-736. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/ugb/livros>>. Acesso em: 26 set. 2022.

ROSSO, R. Nash Model Relation to Horton Order Ratios, **Water Resour. Res.**, v. 20, p. 914-920, 1984. DOI:10.1029/WR020i007p00914

RUANGPAN, L. *et al.* Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v.20, p. 243-270, 2020, DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-20-243-2020>

SAADI, A. A Geomorfologia como ciência de apoio ao planejamento urbano em Minas Gerais. **Geonomos**, v.5, n.2, p. 1-4, 1997. DOI: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v5i2.174>

- SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15(3), 1977, p. 234-281. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, V. 48(1), 1990, p. 9-26. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- SANT'ANA, D. R.; MEDEIROS, L. B. P. **Aproveitamento de águas pluviais e reúso de águas cinzas em edificações: Padrões de qualidade, critérios de instalação e manutenção**. Relatório técnico apresentado para a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal. Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.adasa.df.gov.br/>. Acesso em: 12 mai. 2024.
- SANTOS FILHO, R. D. Antropogeomorfologia Urbana. In: GUERRA, A.J.T. (org). **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 2011.
- SANTOS, J. G.; FERREIRA, V. O. A variabilidade pluviométrica na Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba-MG. **GeoTextos**, Salvador, v.12, n. 1, p.233-265, 2016. DOI: <https://doi.org/10.9771/1984-5537geo.v12i1.15791>
- SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **RBGF: Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, v. 2, n. 03, p. 01-19, 2009. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v2i3.232624>
- SANTOS, O. J.; ROSS, J. Fragilidade ambiental urbana. **Revista da ANPEGE**. v. 8, p. 127-144. 2012. DOI: 10.5418/RA2012.0810.0009
- SAÑUDO-FONTANEDA, L.A., ROBINA-RAMÍREZ, R. Bringing community perceptions into sustainable urban drainage systems: The experience of Extremadura, Spain. **Land Use Policy**, v. 89, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104251>
- SCHEIDEGGER, A. E. Hydrogeomorphology. **Journal of Hydrology**, v. 20, p. 193-215, 1973. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90061-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90061-9)
- SCHEIDEGGER, A. E. Physical Geomorphology. In: Theoretical Geomorphology. **Springer**, Berlin, Heidelberg, 1991. 434 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75659-7>
- SCHNAID, F., ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2. ed., Oficina de Textos, São Paulo, 2012.
- SCHUMANN, G.; BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; MATGEN, P.; PAPPENBERGER, F. Progress in integration of remote sensing-derived flood extent and stage data and hydraulic models. **Reviews of Geophysics**, vol. 47, no. 3, Sep. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008RG000274>
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. **GSA Bulletin**, (67):597-646, 1956. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO E LICENCIAMENTO - SMUL. Prefeitura de São Paulo. O fenômeno da ocupação esparsa no processo de expansão da área urbanizada no Município de São Paulo. **Informes Urbanos**, São Paulo, ed. 58, p. 1-31, 2023. Disponível em: https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2023/06/58_IU_MANCHA-URBANA-1.pdf. Acesso em: 17 set. 2024
- SEIBERT, J., MCGLYNN, B. L. A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. **Water resources research**, v. 43(4), 2007. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006WR005128>
- SEIDL, M., *et al.* Impact of urbanisation (trends) on runoff behaviour of Pampulha watersheds (Brazil). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p.14259–14270. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06029-6>

- SEYEDASHRAF, *et al.* Many-Objective Optimization of Sustainable Drainage Systems in Urban Areas with Different Surface Slopes. **Water Resour Manage**, v. 35, p. 2449–2464, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02840-4>
- SEYEDASHRAF, O., *et al.* Assisting decision-makers select multi-dimensionally efficient infrastructure designs – Application to urban drainage systems. **Journal of Environmental Management**, v. 336, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117689>
- SHARIFI, A. Urban sustainability assessment: An overview and bibliometric analysis. **Ecological Indicators**, v. 121, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107102>
- SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, v. 108, p. 501-505. 1932.
- SHRESTHA, A. *et al.* Effects of stormwater infrastructure data completeness and model resolution on urban flood modeling. **Journal of Hydrology**, v. 607, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127498>
- SIDEK, L.M. *et al.* Application of PCSWMM for the 1-D and 1-D–2-D Modeling of Urban Flooding in Damansara Catchment, Malaysia. **Applied Sciences**, v. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199300>
- SIDEK, L.M. *et al.* Application of PCSWMM for the 1-D and 1-D–2-D Modeling of Urban Flooding in Damansara Catchment, Malaysia. **Applied Sciences**, v. 11, 9300, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199300>
- SIDLE, R., ONDA, Y. Hydrogeomorphology: Overview of an emerging science. Japan: **Hydrological Processes**. 597 - 602. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.1360>
- SIGALA, D. R.; PÉREZ, M. G. G. Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México. **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, [s. l.], v. XXXVI, n. 2, p. 69-83, 2015. Disponível em: <<https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/291/251>>. Acesso em: 19 mai. 2021.
- SILVA, C. A. **Os desastres pluviométricos nas grandes e médias cidades do Paraná – 1980-2010**. 2012. 153p. Dissertação (mestrado) - Setor Ciências da Terra, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2012. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/32051>>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- SILVA, E.M. da; ASSUNÇÃO, W.L O clima da cidade de Uberlândia-MG. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 16, n. 30, 2004. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/9181>>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- SILVA, N. R.; MENDES, P. C. O Geoprocessamento na identificação dos pontos de alagamentos e inundações na área urbana de Uberlândia-MG no período de 2011 a 2016. **Brazilian Geographical Journal: Ituiutaba**. v. 9, n. 1, p. 119-136, jan./jun. 2018. Acesso em: 11 jul. 2023.
- SILVA, B. L.; SOARES, I. A. A integração Metodológica de Modelos no Contexto dos Sistemas Ambientais (Methodological Integration of Models in the Context of Environmental Systems). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 6, p. 1898-1909, 2017. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p1898-1909>.
- SILVA, R. E. **Assinaturas topográficas humanas (ATH's) no contexto dos canais derivados multifuncionais e suas repercussões hidrogeomorfológicas**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Uberlândia, 2018. 266 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.606>
- SILVA, T. M. Raízes dos mapeamentos geomorfológicos e perspectivas atuais. **Humboldt - Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, v. 1, ed. 2, 2021. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/humboldt/article/view/57380>>. Acesso em: 25 set. 2022.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS: ABRH, 2001. v. 4, cap. 2, p. 35-51. ISBN 85-7025-298-6.

SILVEIRA, A. L. L. Cumulative equations for continuous time Chicago hyetograph method. **Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 646-651, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011615094>

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/231244>. Acesso em: 15 mar. 2022.

SILVEIRA, A. L. L. Hidrologia urbana no Brasil, in: BRAGA, B.; TUCCI, C.E.M.; TOZZI, M. **Drenagem Urbana, Gerenciamento, Simulação, Controle**. Porto Alegre: 1998, Editora da Universidade. ABRH Publicações, nº 3. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/48996483/Hidrologia-urbana-no-Brasil>. Acesso em: 13 mai. 2021.

SILVEIRA, A. L. L., LOUZADA, J.A., BELTRAME, L.F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS: ABRH, 2001. v. 4, cap. 9, p. 35-51. ISBN 85-7025-298-6.

SILVIA & SHIMAKURA. **Interpretação do coeficiente de correlação**. 2006. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>. Acesso em: 02 mai. 2023.

SINGH, V.P. Hydrologic modeling: progress and future directions. **Geoscience Letters**, v. 5, n. 15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>

SLEIGH, P. A; GOODWILL, I.M. **The St Venant Equations**. Notas: School of Civil Engineering - University of Leeds. 2000. Disponível em: <http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE3400/stvenant.pdf> >. Acesso em: 27 nov. 2022.

SMITH, L.C. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review. **Hydrological Processes**, v. 11: 1427-1439, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199708\)11:10<1427::AID-HYP473>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199708)11:10<1427::AID-HYP473>3.0.CO;2-S)

SOUSA, M. M. de. **Comparação Entre Ferramentas de Modelagem Unidimensional e Quasi-Bidimensional, Permanente e Não- Permanente, em Planejamento e Projetos de Engenharia Hidráulica**. 2010. 160 p. Dissertação (Mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.aquafluxus.com.br/wp-content/uploads/2015/08/Matheus-Martins-de-Sousa.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2022.

SOUSA PINTO, N. L. *et al.* **Hidrologia Básica**. São Paulo, Edgard Blücher, Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material Escolar, 1976.

SOUSA, R. V. B.; ROCHA, P. C. Inundações e conceitos correlatos: revisão bibliográfica e análise comparativa. In: CARVALHO JÚNIOR, O. A. *et al.* (ed.). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. [S. l.: s. n.], 2022. cap. 10, p. 250-262. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/livros>. Acesso em: 14 mar. 2023.

SOUZA, L. H. de F.; FERREIRA, I. L.; RODRIGUES, S. C. Cartografia digital aplicada ao mapeamento geomorfológico. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 16, n. 30, 2006. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v16-2004-9184>

SOUZA, L. H. de F. **Representação gráfica de feições lineares do relevo: Proposta de aplicação de simbologia linear digital na cartografia geomorfológica**. Orientador: Silvio Carlos Rodrigues. 2006. 105 p. Dissertação (Mestrado: Geografia e Gestão do Território) - UFU - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31737/5/RepresentacaoGraficaFeicoes.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2022.

SOUZA, L. H. de F. Identificação de matacões por meio de sondagem a percussão de simples reconhecimento do subsolo na cidade de Uberlândia (MG). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 8, n. 24, p. 86–95, 2007. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG82415568>

SOUZA, L. H. de F.; OLIVEIRA, L. A. de; RODRIGUES, S. C. Análise temporal de chuva-vazão em uma seção amostral do rio Claro, região noroeste de Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 24, n. 92, p. 356–374, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG249264177>

SOUZA, L. H. de F.; RODRIGUES, S. C. Análise Cienciométrica: Alcance da Prática da Ciência Cidadã na Geomorfologia com Ênfase no Ambiente Urbano. In: XX SBGFA - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2024, Universidade Federal da Paraíba. **Anais: Resumo Expandido - Aceito em: 08/07/2024 [...]**. João Pessoa – PB: [s. n.], 2024. Tema: ET 01 - A Geomorfologia no contexto das mudanças ambientais: novos avanços teóricos, tecnológicos e no campo das aplicações

STEFANIDIS, S., STATHIS, D. Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). **Natural Hazards**, v. 68, 2013, p. 569–585 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0639-5>

STOFFEL, M., HUGGEL, C. Effects of climate change on mass movements in mountain environments. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, 36(3), 421–439, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133312441010>

STRAHLER, A. N. Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis. **American Journal of Science**, n. 248, p. 673-696, 1950. DOI: 10.2475/ajs.248.10.673

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **GSA Bulletin**, 63(10):1117-1142, 1952. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

SUDECAP. **Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem Urbana**. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/obras-e-infraestrutura/informacoes/publicacoes/instrucao-estudos-e-projetos-de-drenagem>>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SUDERHSA. **Manual de Drenagem Urbana: Região Metropolitana de Curitiba/PR**. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, p. 1–150, 2002.

SUERTEGARAY, D.M.A. (Org.). **Terra feições ilustradas**. 3. ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS. 264p., 2008.

SUERTEGARAY, D.M.A. Geomorfologia: novos conceitos e abordagens. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 7, 1997, Curitiba. **Anais[...]** Curitiba. p. 24-30, 1997.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water resources research**, v.33(2), p.309-319. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1029/96WR03137>

TAROLLI, P., SOFIA, G. Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. **Geomorphology**, v. 255, 2016, p. 140-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.007>

TATE, E., RAHMAN, M.A., EMRICH, C.T. *et al.* Flood exposure and social vulnerability in the United States. **Natural Hazards**, v. 106, p. 435–457, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04470-2>

TAVANTI, D. R. **Desenvolvimento urbano de baixo impacto aplicado ao processo de planejamento urbano**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: UFSCar. 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4300?show=full>>. Acesso em: 29 mai. 2022.

TAVARES, C. M. G.; FERREIRA, C. C. M. A relação entre a orografia e os eventos extremos de precipitação para o município de Petrópolis- RJ. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], v. 26, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.71123>

TENG, J.; JAKEMAN, A. J.; VAZE, J.; CROKE, B. F. W.; DUTTA, D.; KIM, S. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**, v. 90, p. 201–216, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>

- THAKUR, S.; JAYARAM D. Resilience in the Anthropocene: discourses of development, climate change, and security in South Asia. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 67, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2024.101425>
- THOMPSON, S. E. *et al.* Role of microtopography in rainfall-runoff partitioning: An analysis using idealized geometry. **Water Resources Research**, v. 46, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009WR008835>
- THORNBUSH, M. J. Archaeogeomorphology as an application in physical geography. **Applied Geography**, v. 34, p. 325-330, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.12.005>
- THORNBUSH, M. J. Geography, urban geomorphology and sustainability. **Área, Royal Geographical Society (with IBG)**, v. 47, p. 350-353, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/area.12218>
- THORNBUSH, M. J.; ALLEN, C. D. **Urban Geomorphology, Landforms and Processes in Cities**. Elsevier. 2018. 362 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02169-1>
- TOMAZ, P. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais: piscinões, galerias, bueiros, canais**. São Paulo: Navegar Editora, 2002.
- TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. 2009. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 169p. Disponível em: http://www.sidec.sp.gov.br/defesacivil/media/OSDownloads/1438375861_DesastresNaturais.pdf. Acesso em: 15 ago. 2021.
- TORONTO AND REGION CONSERVATION. **Water Budget Discussion Paper**. Toronto: Gartner Lee, 2006. Disponível em: <https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2013/01/Water-Budget-Discussion-Paper.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2023.
- TRICART, J. **Principes et méthodes de la geomorphologie**. Paris: Masson. 1965. 496p.
- TRICART, J. **Précis de Géomorphologie. Géomorphologie structurale**. Paris: SEDES. 1968. 313p.
- TRICART, J. Cartographie Geomorphologique. Travaux de Ja RCP 77. **Memoires et Documents**, NS 12, p. 1-267, 1972.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. 91 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/ecodinamica.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2021.
- TRICART, J.; CAILLEUX, A. **Introduction à la géomorphologie climatique**. Paris: SEDES, 1965.
- TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 9. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2005. 656 p.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre/RS, Editora da UFRGS, ABRH, 1995, 428 p.
- TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS: ABRH, 2001. v. 4, cap. 11, p. 391-441. ISBN 85-7025-298-6.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**. 2a ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH, 2001, ISBN 85-7025-298-6.
- TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco, 2005.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (orgs). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 28 mar. 2023.
- TUCCI, C. E. M. Efeito climático sobre as inundações. In: ABES - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Webinar: Efeitos climáticos: Drenagem, consequência ou solução**, 2024. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=s1NLq8RQi0I>. Acesso em: 10 jul. 2024.

TUNG, Yk., WONG, Cl. Assessment of design rainfall uncertainty for hydrologic engineering applications in Hong Kong. **Stoch Environ Res Risk Assess**, 28, 583–592, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0774-2>

TURNER, A. B. *et al.* Flood modeling using a synthesis of multi-platform LiDAR data. **Water**, v. 5, n. 4, p. 1533-1560, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/w5041533>

UN CC, Learn. Módulo 6: Introdução ao planejamento para a mudança climática. In: **Curso online introdutório sobre mudança climática**. Brasil: UNESCO, 2024. Disponível em: <https://uncclearn.org/course/view.php?id=24&page=overview>. Acesso em: 14 fev. 2024.

UNEP. **Climate in Peril**: A popular guide to the latest IPCC reports. 2009. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/climate-peril-popular-guide-latest-ipcc-reports>. Acesso em: 11 fev. 2024.

U.S. Environmental Protection Agency. **Manual do Usuário EPA SWMM 5.0**: Modelo de Gestão de Drenagem Urbana. Tradução de LENHS, UFPB. João Pessoa. 2010. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/menu/swmm>. Acesso em: 09 mar. 2022.

U.S. Environmental Protection Agency. **Storm Water Management Model Reference Manual**: Volume I – Hydrology (Revised). US EPA. 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#software%20and%20compatibility>. Acesso em: 22 set. 2022.

U.S. Environmental Protection Agency. **Storm Water Management Model Reference Manual**: Volume II – Hydraulics. US EPA. 2017. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#software%20and%20compatibility>. Acesso em: 22 set. 2022.

U.S. Environmental Protection Agency. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2**. US EPA. 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#software%20and%20compatibility>. Acesso em: 22 set. 2022.

UN ENVIRONMENT. **Global environmental outlook - GEO6: healthy planet, healthy people**. Nairobi, Kenya: UNEP. 2019. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/38868>. Acesso em: 22 set. 2022.

UNDRR. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030**. United Nations, 2015. Disponível em: http://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf. Acesso em: 09 fev. 2024.

UNESCO. **UN World Water Development Report 2020**: Water and Climate Change. Paris. 2020. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2020/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

UNFCCC. **Paris Agreement - Status of Ratification**. Disponível em: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>. Acesso em: 26 fev. 2022.

UNISDR. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Terminology on disaster risk reduction**. Geneva: UNISDR, 2017. Disponível em: <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>. Acesso em: 09 de fev. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Plano Diretor Físico-Territorial dos Campi da Universidade Federal de Uberlândia – UFU**. Uberlândia: Divisão de Cadastro Integrado do Espaço Físico, DICIE-UFU, 1991. Disponível em: <http://www.prefe.ufu.br/unidades-organizacionais/projetos-e-orcamentos-prefeitura-universitaria/divisao-de-cadastro>. Acesso em: 10 nov. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Mapa Campus Santa Mônica**. Uberlândia: Diretoria de Infraestrutura, DIRIE-UFU, 2018. Disponível em: <https://ufu.br/assunto/infraestrutura>. Acesso em: 10 nov. 2022.

USDA. Urban Hydrology for Small Watersheds. **Technical Release 55 (TR-55)**. Washington: U. S. Department of Agriculture (USDA). 1986, 164 p.

- VACONDIO, R.; ROGERS, B. D.; STANSBY, P. K.; MIGNOSA, P. SPH Modeling of Shallow Flow with Open Boundaries for Practical Flood Simulation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, no. 6, p. 530–541, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000543](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000543)
- VAN ECK, N.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- VANELLI, F. M., *et al.* The 1974 Tubarão River flood, Brazil: reconstruction of the catastrophic flood. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, 8(3), 231-245, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/23249676.2020.1787251>
- VARGAS-HERNÁNDEZ, J.G., ZDUNEK-WIELGOŁASKA, J. Urban green infrastructure as a tool for controlling the resilience of urban sprawl. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, p. 1335–1354, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00623-2>
- VENEZIANI, Y. **A abordagem da geomorfologia antropogênica e de modelagens hidrológica e hidráulica na bacia do Córrego Três Pontes (SP) para determinação de picos de vazão e da vulnerabilidade a inundações.** 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. DOI:10.11606/D.8.2014.tde-30112015-133046
- VENKATESH, B., & VELKENNEDY, R. Formulation of citizen science approach for monitoring Sustainable Development Goal 6: Clean water and sanitation for an Indian city. **Sustainable Development**, v. 31, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.2373>
- VICENTE A. K. **Eventos extremos de precipitação na região metropolitana de Campinas.** 2004. 149p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2004. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2005.332026>
- VISSMAN, W. Jr.; HARBAUGH, T.E.; KNAPP, J.W. **Introduction to hydrology.** New York, Intext Educational, 1972.
- VILES, H.A. Scale Issues in Weathering Studies. **Geomorphology**. 2001, v. 41(1). p. 63-72. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00104-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00104-0)
- VITTE, A. C. O desenvolvimento do conceito de paisagem e a sua inserção na Geografia Física. **Mercator**, Fortaleza, v. 6, n. 11, p. 71 a 78, 2008. ISSN 1984-2201. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/58> >. Acesso em: 14 fev. 2023.
- V.P.I.S; W.; LI, G., Urban sprawl and its stress on the risk of extreme hydrological events (EHes) in the Kelani River basin, Sri Lanka. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 68, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102715>
- WANG, T. *et al.* Modelling of Singapore's topographic transformation based on DEMs. **Geomorphology**, v. 231, 2015, p. 367-375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.12.027>
- WANG, X, LIU, T., YANG, W. Development of a robust runoff-prediction model by fusing the Rational Equation and a modified SCS-CN method, **Hydrological Sciences Journal**, v. 57:6, p. 1118-1140, 2012. DOI: 10.1080/02626667.2012.701305
- WERBROUCK, I. *et al.* Digital Elevation Model generation for historical landscape analysis based on LiDAR data, a case study in Flanders (Belgium). **Expert Systems with Applications**, v. 38(7), p. 8178-8185, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.162>.
- WILKEN, P. S. **Águas Pluviais: Contribuição ao Estudo dos Métodos de Dimensionamento de Estruturas Hidráulicas para o Esgotamento de Águas Pluviais.** 1ª ed. São Paulo: Edição do autor, 1971.
- WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial.** São Paulo: CETESB, 1978.
- WOOD, E.F. *et al.* Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. **Journal of Hydrology**, 102, 1, 29–47, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90090-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90090-X)

XU, H., *et al.* Amplification of Flood Risks by the Compound Effects of Precipitation and Storm Tides Under the Nonstationary Scenario in the Coastal City of Haikou, China. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 13, p. 602–620, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-022-00429-y>

YANG, Y.; SUN, L.; LI, R.; YIN, J.; YU, D. Linking a Storm Water Management Model to a Novel Two-Dimensional Model for Urban Pluvial Flood Modeling. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 11, n. 4, p. 508–518, 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00278-7>

YANG, P. *et al.* Assessment of compound flooding through seamless linkage of coastal hydrodynamic and inland catchment models. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 46, p. 31–43, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2022.11.001>.

YAO, Y. *et al.* Evaluating the response and adaptation of urban stormwater systems to changed rainfall with the CMIP6 projections. **Journal of Environmental Management**, v. 347, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119135>

YEN, B.C., CHOW, V.T. Design hyetographs for small drainage structures. **Journal of Hydraulic Engineering**, 106, 1055–1076, 1980.

YEN, B. C.; CHOW, V. T. **Local design storms**. U. S. Dept. of Transportation, Federal Highway, 1983. Administration, Washington, D.C. YIM, S. *et al.* Applying PCSWMM for stormwater management in the Wat Phnom sub catchment, Phnom Penh, Cambodia. **Journal of Geography, Environment and Earth Science International**, v. 5(3): p. 1–11, 2016. DOI: 10.9734/JGEEESI/2016/23525

YOGI, F., CORREA, C. J. P., ARRUDA, E. M. *et al.* Sensitivity analysis of rainfall–runoff parameters models to estimate flows. **Applied Water Science**, v. 11, 25, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01348-3>

YOUNG, K.D. *et al.* Development of an Improved Approach for Selecting Storm-Water Best Management Practices. **J. Water Resour. Plan Manag.** v. 137, p. 268–275, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000110](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000110)

YOUNOS, T. Paradigm shift: Holistic approach for water management in urban environments. **Frontiers of Earth Science**, v. 5, p. 421–427, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0209-7>

YU, K., *et al.* The evolution of Greenways in China. **Landscape and Urban Planning**, v. 76, Issues 1–4, 2006, p. 223–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.09.034>

ZAMBRANO, F. C.; RUOSO, E. G.; KOBIYAMA, M. **Resultado de trabalho de campo no dia 06/05/2024 para reconhecimento da mancha de inundação na Zona Sul de Porto Alegre**. Nota Técnica do Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN) do IPH/UFRGS, Porto Alegre, p. 1–6, 6 maio 2024. Disponível em: https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2024/05/NT_inundacao_POA-Sul.pdf. Acesso em: 10 maio 2024

ZILLOTTO, M., *et al.* Environmental Sanitation in Porto Alegre City, Brazil: A Basic Step towards Sustainable Development. **Sustainability**, v. 16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072672>

ZINDA, J. A., LI Y., LIU, J. C-E. China’s summons for environmental sociology. **Current Sociology**, v. 66(6), p. 867–885, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0011392118778098>

ZOPPOU, C. Review of urban storm water models. **Environmental Modelling & Software**, v. 16, Issue 3, p. 195–231, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)

ZWOLIŃSKI, Z. *et al.* Anthropogeomorphological Metamorphosis of an Urban Area in the Postglacial Landscape: A Case Study of Poznań City. In: THORNBUSH, M. J.; ALLEN, C. D. **Urban Geomorphology, Landforms and Processes in Cities**. Elsevier. 2018. p. 55–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02169-1>

ANEXO 1

Levantamento Topográfico Planialtimétrico Cadastral (DICIE-UFU, 2022).

**PONTOS DE PARTIDA
 DISTÂNCIA TOPOGRAFIA**

MOSM N: 7.905.722.979 E: 788.464.132 Z: 859.938
 M1SM N: 7.905.739.337 E: 788.567.720 Z: 863.228

Convenções

	VERTICES TIPO M		POSTE		CK CIMENTO-variacao P: 0 a 30cm
	VERTICES TIPO V		ANTENA		CK ELETRICA-variacao P: 0 a 30cm
	VERTICES TIPO P		ÁRVORES		CK ESCUDO-variacao P: 0 a 25cm
	BOCA DE LOBO(BLS.TOPO 871.051) FUNDO 869.801		X.FIBRA OPTICA-variacao P: 0 a 45cm		CK DRENAGEM-variacao P: 0 a 40cm
	ILUMINÁRIA		X.ATERRAMENTO-variacao P: 0 a 50cm		Plus

COTA-TOPO 872.252
 FUNDO 870.352

OBSERVAÇÃO:
 PROFUNDIDADES VARIADAS DAS CAIXAS CADASTRAIS ENCONTRADAS NO CAMPUS

Planta de Situação

LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO
 Folha: Única

MÓVEL: CAMPUS SANTA MONICA
 PROPRIETÁRIO: UFU-MG
 MUNICÍPIO(S): UBERLÂNDIA Estado UF: MG
 COARCA(S): UBERLÂNDIA
 CARTÓRIO: UBERLÂNDIA
 MAT./TRANC.: M - 27.008 - 27.007 - 27.006 - 27.005 - 27.100 - 3.100 - 44.574 e M - 44.575
 MT - 55.488
 CÓDIGO INCR.:
 DATA: 21/01/2014 Escala: 1:1000

Quadro de áreas e perímetros:

Descrição	Área (m²)	Perímetro (m)
CAMPUS SANTA MONICA		
Área Total:	258.926,8506M2	
Perímetro Total:	2.355,6854M	

Quadro de assinaturas:

Prop: _____
 PROP-UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

 RICARDO DOS SANTOS SOUZA - CREA 96679/D

