

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO EM MICRODRENAGEM: SUBSÍDIOS À GEOMORFOLOGIA URBANA

Hydrodynamic Modelling of Surface Runoff in Urban Micro-Drainage: Contributions to Urban Geomorphology

Luiz Humberto de Freitas Souza

Doutor em Geografia, Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia, Brasil.

luizhumbertofsouza@gmail.com

Silvio Carlos Rodrigues

Doutor em Geografia, Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

silgel@ufu.br

Resumo

A intensificação da urbanização, associada às mudanças climáticas, tem ampliado a ocorrência de alagamentos urbanos, exigindo abordagens capazes de integrar a morfologia urbana e a dinâmica do escoamento superficial. Este estudo aplica o modelo hidrológico-hidráulico PCSWMM à escala da microdrenagem no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (MG), simulando dois cenários urbanísticos (1989 e 2014) sob chuva de projeto ($Tr = 50$ anos). Foram estimados indicadores hidrodinâmicos, como a vazão de pico e a altura da lâmina d'água, o que revela a influência da impermeabilização progressiva e da configuração espacial do uso do solo nos riscos de alagamento. Os resultados evidenciam a relevância da modelagem como ferramenta de análise integrada à Geomorfologia Urbana e à Hidrologia, subsidiando estratégias sustentáveis de manejo das águas pluviais e políticas públicas de resiliência socioambiental.

Palavras-chave: Geomorfologia Urbana, Drenagem Urbana, Modelagem Hidrológico-Hidráulica, PCSWMM.

Abstract

The intensification of urbanisation, combined with climate change, has increased the occurrence of urban flooding, necessitating approaches that integrate urban morphology and surface runoff dynamics. This study applies the PCSWMM hydrologic-hydraulic model at the micro-drainage scale on the Santa Mônica Campus of the Federal University of Uberlândia (MG), simulating two urban development scenarios (1989 and 2014) under a design storm ($Tr = 50$ years). Hydrodynamic indicators, such as peak discharge and water depth, were estimated, revealing the influence of progressive imperviousness and the spatial configuration of land use on flood risk. The results demonstrate the relevance of modelling as an integrated analytical tool in Urban Geomorphology and Hydrology, supporting sustainable stormwater management strategies and public policies aimed at socio-environmental resilience.

Keywords: Urban Geomorphology, Urban Drainage, Hydrological-Hydraulic Modelling, PCSWMM.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação da urbanização, associada às mudanças climáticas, tem ampliado alagamentos e inundações, evidenciando a necessidade de compreender a relação entre a morfologia urbana e o escoamento superficial como desafio científico e prático para a mitigação de riscos e o planejamento territorial (IPCC, 2013). Nesse contexto, a Geomorfologia, dedicada ao estudo das formas, materiais e processos do relevo, consolidou-se por meio do diálogo interdisciplinar, incorporando vertentes como a Antropogeomorfologia (Lóczy, 2010), a Hidrogeomorfologia (Sidle; Onda, 2004) e, em especial, a Geomorfologia Urbana (Coates, 1984; Jorge, 2011), ampliando seu escopo sem reduzi-la a um campo fechado (Barros; Valadão, 2018).

Na Geomorfologia Urbana, a análise ultrapassa a leitura restrita do tecido construído, permitindo integrar processos naturais e antrópicos em áreas urbanizadas. Essa abordagem permite identificar elementos-chave — áreas impermeáveis, padrões de drenagem e sistemas de escoamento — essenciais para compreender a dinâmica pluvial urbana e os riscos de enchentes e alagamentos, sobretudo na escala da microdrenagem, na qual o *layout* viário, a impermeabilização progressiva e a disposição das edificações estruturam o direcionamento do fluxo (Souza, 2024).

Nesse quadro, a drenagem urbana passou por uma reinterpretação conceitual, incluindo, além do controle de cheias, dimensões ambientais, sanitárias, sociais e econômicas, alinhadas à ecologia urbana e ao planejamento sustentável (Yu, 2021; Gonçalves, 2022). Apesar desse avanço, a resposta hidrológica de bacias urbanizadas continua complexa e condicionada por múltiplos fatores (Tucci, 2001).

Inserido nesse contexto, este estudo aplica o *Personal Computer Storm Water Management Model* (PCSWMM) à escala de microdrenagem, com ênfase no Escoamento Superficial Direto (ESD) em vias do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (MG). Foram simulados dois cenários urbanísticos (1989 e 2014) sob chuva de projeto com tempo de retorno de 50 anos, a fim de estimar indicadores hidrodinâmicos — vazão de pico e altura da lâmina d'água — que evidenciam a relação entre morfologia urbana e padrões locais de escoamento. O estudo integra aportes da Geomorfologia Urbana e da Hidrologia para subsidiar práticas de manejo e aprofundar a compreensão do escoamento superficial em áreas urbanas.

2. GEOMORFOLOGIA URBANA E HIDROLOGIA

A Geomorfologia Urbana consolidou-se nas últimas décadas pelo reconhecimento da intensa intervenção humana sobre o meio físico, em que o relevo urbano estrutura o ambiente construído (Fujimoto, 2005; Guerra; Marçal, 2006). Inserida no debate sobre o ser humano como agente geomorfológico, aproxima-se da Antropogeomorfologia, mas distingue-se por concentrar-se nas formas e processos derivados da urbanização, configurando campo analítico próprio (Lóczy, 2010; Thornbush; Allen, 2018). Como subárea da Geomorfologia Antropogênica, privilegia as formas artificiais do relevo e as interações entre processos naturais e antrópicos, em escalas temporais curtas e com metodologias específicas de mapeamento urbano (Thornbush; Allen, 2018; Brandolini *et al.*, 2020; Souza; Rodrigues; Danelon, 2024). Nas cidades, esses processos intensificam-se pela transformação da paisagem e por alterações do regime fluvial (Coates, 1984).

A configuração morfológica do espaço urbano condiciona as trajetórias preferenciais de escoamento, justificando a organização da drenagem em diferentes escalas: microcaptação (nível de bairro), sub-bacia (nível distrital) e captação urbana (nível municipal ou regional) (Bacchin *et al.*, 2013). Essas escalas articulam-se à subdivisão técnico-funcional dos sistemas de drenagem: (i) microdrenagem, formada por condutos ou canais que coletam e conduzem águas pluviais em áreas inferiores a 2 km²; (ii) macrodrenagem, responsável pelo transporte das vazões concentradas a jusante por meio de obras de maior porte (Miguez, 2015); e (iii) drenagem na fonte, que atua diretamente no lote ou edificação, interceptando o fluxo antes de sua inserção na rede pública (Tucci; Bertoni, 2003). O dimensionamento desses sistemas fundamenta-se em conceitos hidrológicos clássicos, como o tempo de retorno (T_r), que expressa a probabilidade de ocorrência de um evento extremo em dado ano e orienta o cálculo das chuvas de projeto (Gribbin, 2014). Entre os métodos de transformação da chuva em vazão, destaca-se o método racional, aplicável a bacias de até 3 km², cuja formulação é apresentada na Equação 1.

$$Q = C.i.A \quad (1)$$

Em que, Q é a vazão de pico (m³/s), C o coeficiente de deflúvio, i a intensidade da chuva (mm/h) e A a área de contribuição (ha). O valor de C reflete uso/cobertura da terra e grau de impermeabilização (Porto, 1995).

A intensidade da chuva (i) é estimada pelas curvas Intensidade–Duração–Frequência (IDF) (Equação 2), obtidas a partir de séries pluviométricas históricas e ajustadas por parâmetros estatísticos (Wilken, 1978):

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

Petrucci; Oliveira (2019) aplicaram a distribuição de Gumbel para estimar chuvas de projeto em Uberlândia-MG, destacando que a definição da chuva e sua distribuição temporal influenciam diretamente a forma e o pico dos hidrogramas, os quais podem ser obtidos pelos métodos Chicago (Keifer; Chu, 1957), Huff (1967) e Yen; Chow (1980). Além do método racional, análises de macrodrenagem recorrem ao Hidrograma Unitário de Sherman (1932) e aos métodos do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), como o Curve Number (CN) e o Hidrograma Unitário Triangular (HUT), amplamente aplicados em estudos urbanos (Gribbin, 2014; Lima, 2017). A qualidade dos resultados, contudo, depende de estudos hidrológicos complementares, abrangendo a fisiografia da bacia, a geomorfologia, a geologia e a hidrometria (Wilken, 1978).

O avanço das geotecnologias e a maior disponibilidade de dados de alta resolução expandiram as possibilidades de modelagem e gestão, com os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) desempenhando papel central na discretização de bacias e na aplicação de modelos distribuídos (Lima, 2017). Nesse cenário, o *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela U.S. EPA, consolidou-se como referência internacional ao adotar sub-bacias como unidades hidrológicas básicas na simulação do escoamento urbano. Paralelamente, práticas inovadoras, como a captação e o reuso de águas pluviais (*Rainwater Harvesting* – RWH), as soluções de baixo impacto (*Low Impact Development* – LID) ou drenagem sustentável (*Sustainable Drainage Systems* – SuDS) (Bacchin *et al.*, 2013; Ruangpan *et al.*, 2020) e, de forma mais integrada, o conceito de Cidades Esponjas (Yu, 2021), consolidam-se como alternativas para mitigar a impermeabilização e fortalecer a resiliência urbana. Essas estratégias dialogam diretamente com a agenda dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS/ONU), sobretudo os voltados à adaptação climática, ao manejo sustentável da água e à promoção de cidades mais inclusivas e resilientes.

3. MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRÁULICA

A modelagem hidrológico-hidráulica é ferramenta essencial para integrar dados morfológicos, climáticos e hidrológicos, simulando os efeitos da urbanização sobre o escoamento superficial e identificando áreas suscetíveis a alagamentos, em estreita relação com a Geomorfologia Urbana (Souza, 2024). A evolução da cartografia geomorfológica clássica para métodos digitais, apoiados em MDEs, SIG e sensoriamento remoto, consolidou a geomorfometria contemporânea e ampliou a capacidade de análise da transformação topográfica em meio urbano (Bruwier *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021).

As aplicações variam de modelos empíricos a representações hidrodinâmicas 1D, 2D e 3D, empregadas em estudos de enchentes urbanas (Veneziani, 2014; Luo *et al.*, 2022). Entre os *softwares* disponíveis, o SWMM, desenvolvido pela U.S. EPA, consolidou-se como referência, embora limitado pela ausência de interface espacial robusta (Gribbin, 2014; Sidek *et al.*, 2021).

Para superar essa limitação, a CHI desenvolveu o PCSWMM, que integra um SIG autônomo à modelagem hidrológico-hidráulica, possibilitando simulações mais realistas e a avaliação de cenários estratégicos de manejo sustentável das águas pluviais (Yang *et al.*, 2023). Estudos acadêmicos comprovam sua aplicabilidade (Yim, 2016; Bibi, 2022), embora persista o desafio de articular algoritmos automatizados à interpretação crítica da paisagem urbana.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A simulação do ESD, em escala de microdrenagem (microcaptação) com o PCSWMM, exigiu a seleção de sítio geográfico representativo. Os requisitos considerados foram: (i) predominância de uso e cobertura urbanos; (ii) parcelamento do solo em quadras e lotes; e (iii) infraestrutura viária consolidada. Com base nesses critérios, adotou-se como área de estudo o Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), situado na margem esquerda do córrego São Pedro, sub-bacia hidrográfica do Rio Uberabinha, em Minas Gerais (Figura 1).

A escolha da área de estudo foi respaldada pela disponibilidade de dois cenários urbanísticos contrastantes: o primeiro, de 1989, obtido a partir do Plano Diretor Físico da UFU (DICIE-UFU, 1991), e o segundo, de 2013–2014, derivado do Levantamento Topográfico Planialtimétrico Cadastral. Esta última base, em formato “.dwg” (AutoCAD Drawing), foi fornecida pela DICIE-UFU, referida ao SIRGAS 2000, com projeção UTM,

curvas de nível de 1 m e escala 1:1000. No cenário de 1989, os dados foram digitalizados a partir do levantamento mais recente, validado pela ausência de alterações substantivas na morfologia do terreno, exceto pela implantação de blocos sobre platôs previamente terraplenados.

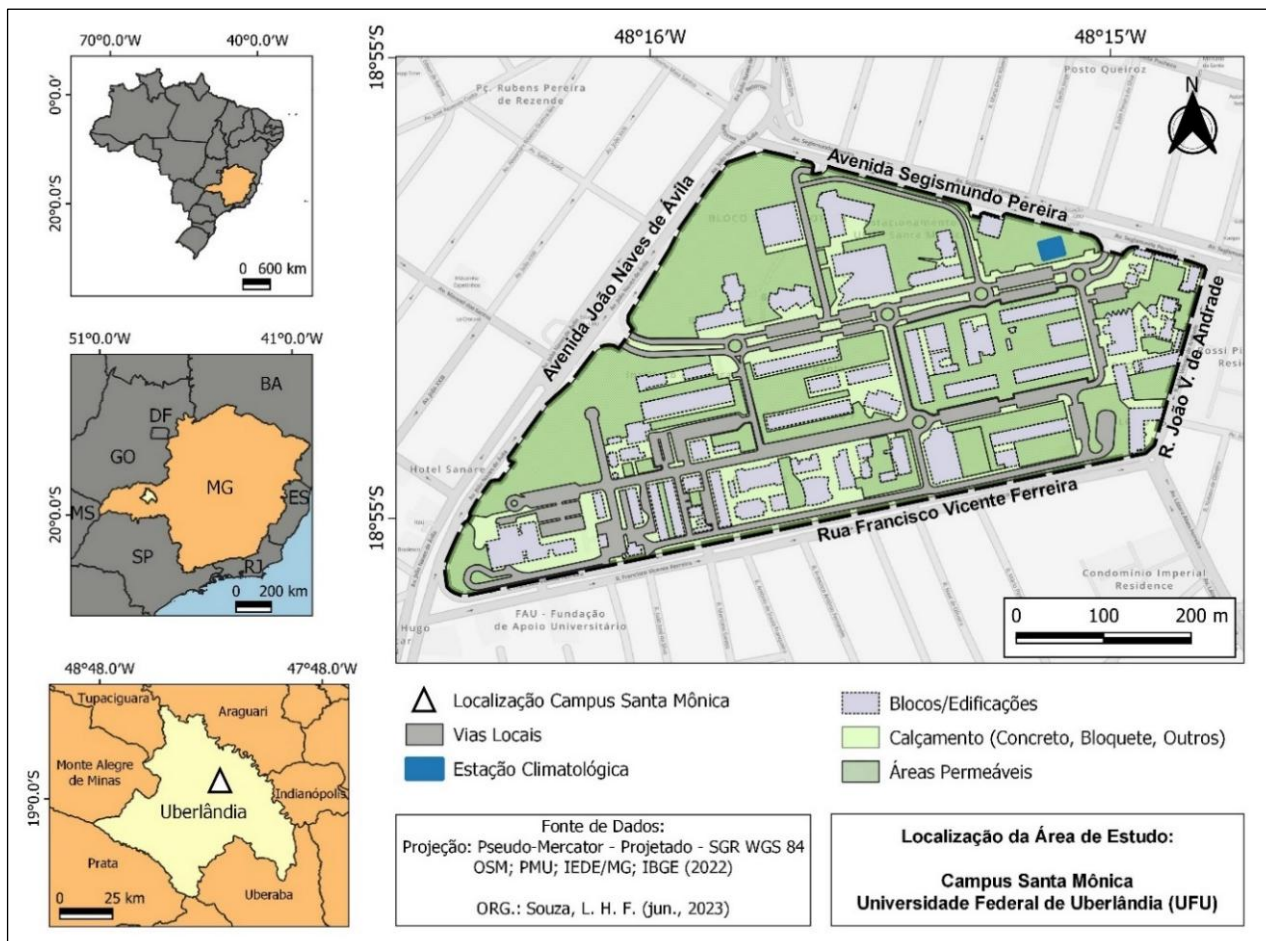


Figura 1 - Localização da Área de Estudo.

Fonte: O autor.

Com base nos dois cenários, complementados por observações de campo e imagens de satélite, realizou-se a classificação do uso e ocupação do solo no Campus Santa Mônica. Em 1989, segundo o Plano Diretor da UFU, a área real do campus abrangia 27,18 ha, com taxa de ocupação de 15% e área construída projetada em 4,07 ha. Do total, 54% correspondiam a áreas permeáveis (14,60 ha), 18% a áreas semipermeáveis (4,88 ha) e 13% a áreas impermeáveis pavimentadas (3,63 ha), somando 86% da área parcelada (23,55 ha). No cenário de 2013–2014, conforme levantamento cadastral da R&V Ltda., a área real foi reduzida para 26,10 ha, em função de ajustes no sistema viário externo, e a taxa de ocupação aumentou para 21%, com 5,52 ha de área construída. Nesse período, as áreas permeáveis representavam 35% da superfície (9,02 ha), enquanto as

semipermeáveis correspondiam a 25% (6,62 ha) e as impermeáveis pavimentadas a 19% (4,94 ha), totalizando 79% da área parcelada (21,16 ha). Em ambos os cenários, a área semipermeável foi estimada como 1,2 vezes a projeção da área construída. O sistema viário interno manteve-se inalterado, com duas vias longitudinais e ruas transversais pavimentadas. As atividades antrópicas registradas no Plano Diretor do Campus Santa Mônica envolveram cortes e aterros para implantação de edificações, resultando em compactação do solo, redução da permeabilidade, limitação da recarga subterrânea e intensificação do escoamento superficial.

A topografia apresenta declividade média de 2,65%, típica de relevo tabular levemente ondulado (Rodrigues; Augustin; Nazar, 2023), com platôs destinados a edificações e estacionamentos e taludes mais acentuados junto à confluência das avenidas João Naves de Ávila e Segismundo Pereira, onde as declividades chegam a 10%. O campus situa-se na transição entre a unidade geomorfológica Transportado Cobertura de Chapada (TCC) e a Residual da Formação Marília (RFM), a cerca de 850 m de altitude, com predominância de solos argilo-arenosos da TCC e variações mais arenosas associadas à RFM, caracterizadas em mapeamentos de Nishiyama (1998) e Caixeta (2017), elaborados a partir de fotografias aéreas e cartas topográficas em escalas de 1:25.000 e 1:100.000.

Do ponto de vista climático, Uberlândia enquadra-se no domínio Tropical Semisseco Meridional, caracterizado por seis meses secos (abril–setembro), ocorrência periódica de frentes frias, atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e raras geadas, além da influência das Zonas de Convergência de Umidade (ZCOUs) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o período chuvoso (novembro–março). Nesse regime, as chuvas concentram-se entre outubro e março, com máximos em dezembro-janeiro (~300 mm/mês), enquanto na estação seca os totais ficam <100 mm; em 1981–2015, a média anual foi 1.507 mm (Petrucci, 2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A concepção do modelo exigiu três camadas principais: (i) *buffer* da área de estudo; (ii) sub-bacias; e (iii) Modelo Digital do Terreno (MDT). As formas vetoriais foram geradas no AutoCAD e exportadas em formato *.dxf, convertidas posteriormente no QGIS para GeoPackage e, em *shapefiles*, possibilitando a interpolação das curvas de nível e a geração dos MDTs para cada cenário.

O transporte do fluxo foi simulado pela onda difusiva, que simplifica a onda dinâmica ao desconsiderar os termos de aceleração convectiva e local das equações de Saint-Venant (Gomes, 2006). O roteamento em superfície livre foi processado pelo PCSWMM que adota condutos interconectados às projeções de nós 2D.

A área de estudo foi subdividida em 15 sub-bacias no cenário de 1989 e em 28 no de 2013–2014, correspondentes a quadras e canteiros, permitindo quantificar áreas permeáveis, semipermeáveis e impermeáveis geradoras de escoamento superficial. O modelo foi concebido como sistema parcialmente fechado, desconsiderando a rede de drenagem existente para priorizar a estimativa da lâmina d'água. No PCSWMM, definiu-se um exutório hipotético na confluência das avenidas João Naves de Ávila e Segismundo Pereira (cota 851,00 m) e configurou-se malha hexagonal de 5 m, ajustada à geometria viária (Figura 2a–b). A saída do sistema foi interligada a conduto de concreto, com diâmetro de 1,00 m, coeficiente de Manning ($n = 0,010$) e comprimento de 2,75 m.

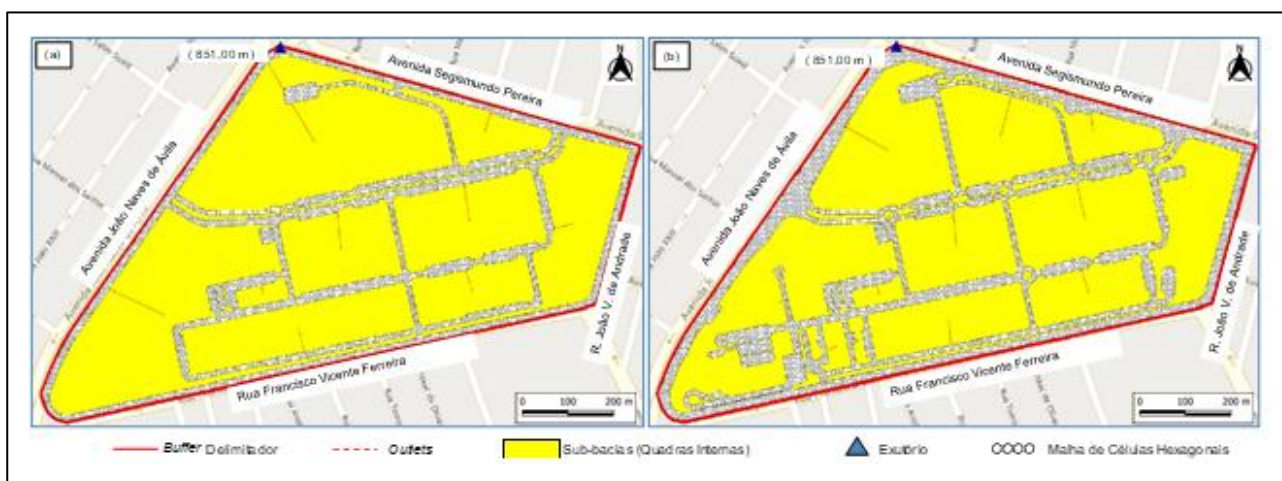


Figura 2a-b - Elementos do modelo proposto para os cenários de 1989 e 2013–2014.

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

A parametrização ocorreu em etapas sistemáticas, iniciando com a definição do sistema de referência cartográfica (SRC – EPSG: 32722, WGS 84 / UTM Zona 22S) e a importação dos *shapefiles* e do modelo digital de terreno (MDT). As condições hidrológicas iniciais foram estabelecidas pela IDF de Petrucci (2018), subsidiando a chuva de projeto (Equação 3).

$$I = \frac{330,4083 * Tr^{0,1452}}{t^{0,6164}} \quad \text{(Equação 3)}$$

Em seguida, as séries de precipitação foram geradas no PCSWMM pelo método de Chicago. A discretização das sub-bacias ocorreu com a atribuição de parâmetros hidrológicos (tempo de concentração, coeficiente CN-SCS, declividade e percentual de impermeabilização) em formulários específicos, além da vinculação à série de chuva para Tr 50 anos, definida de modo a garantir vazões relevantes para a produção simulada de escoamento. Os parâmetros hidráulicos da malha bidimensional foram configurados incluindo a definição das células hexagonais, a atribuição do coeficiente de rugosidade de Manning de acordo com o uso e ocupação do solo, a inserção da camada de obstrução e a delimitação do exutório do sistema.

O modelo de infiltração adotado foi o *Curve Number* (SCS). Após ajustes de consistência do modelo e a execução das simulações, os resultados foram exportados em matrizes, tratados e espacializados no QGIS, o que possibilitou a análise integrada das condições hidrológicas e hidráulicas simuladas. A Figura 3 exemplifica a sobreposição das camadas do cenário 2013–2014, destacando o indicador de altura da lâmina d'água.

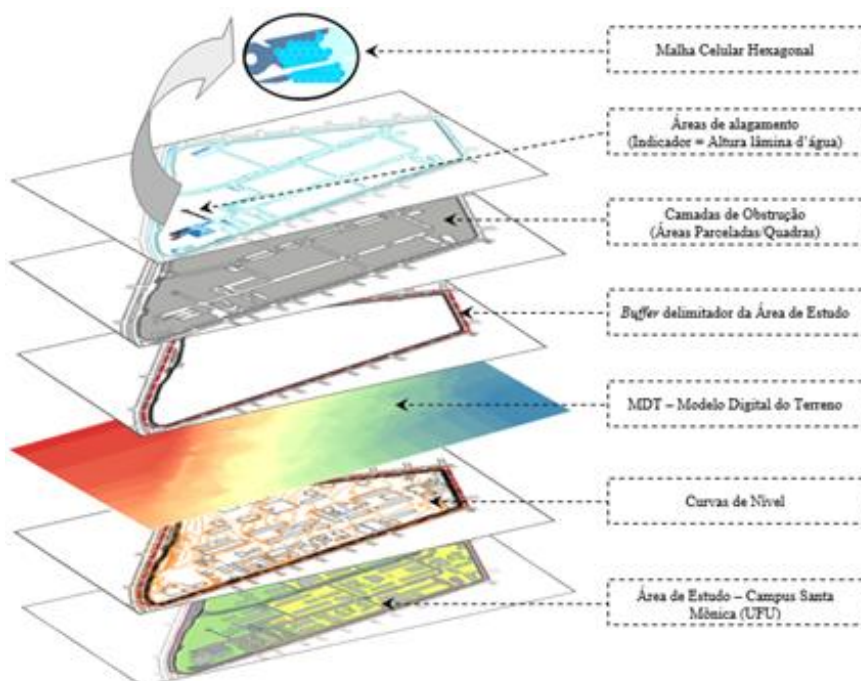


Figura 3 - Sobreposição de camadas elementares do modelo concebido.
Fonte: O autor.

5.1. Produtos pós-modelagem

A área de estudo foi classificada no Grupo Hidrológico C (CN-SCS), com solos 20–30% de argila e condição de umidade antecedente II. Para a parametrização do uso e cobertura do solo, definiram-se quatro categorias: (i) áreas gramadas em condição boa,

com cobertura superior a 75% (CN = 74); (ii) áreas gramadas em condição justa, com cobertura entre 50% e 75% (CN = 79); (iii) edificações e áreas adjacentes, representadas por um CN composto (CNw = 87), calculado segundo McCuen (1998); e (iv) ruas pavimentadas, associadas ao valor máximo de impermeabilização (CN = 98).

Com base nos resultados pós-modelagem para o tempo de retorno de 50 anos, foram elaborados mapas temáticos do Escoamento Superficial Direto (ESD), evidenciando a distribuição espacial das vazões de pico (Q, em m³/s) e a localização dos pontos críticos de alagamento, estimados pela altura da lâmina d'água (Ha, em m) (Figuras 4 e 5).

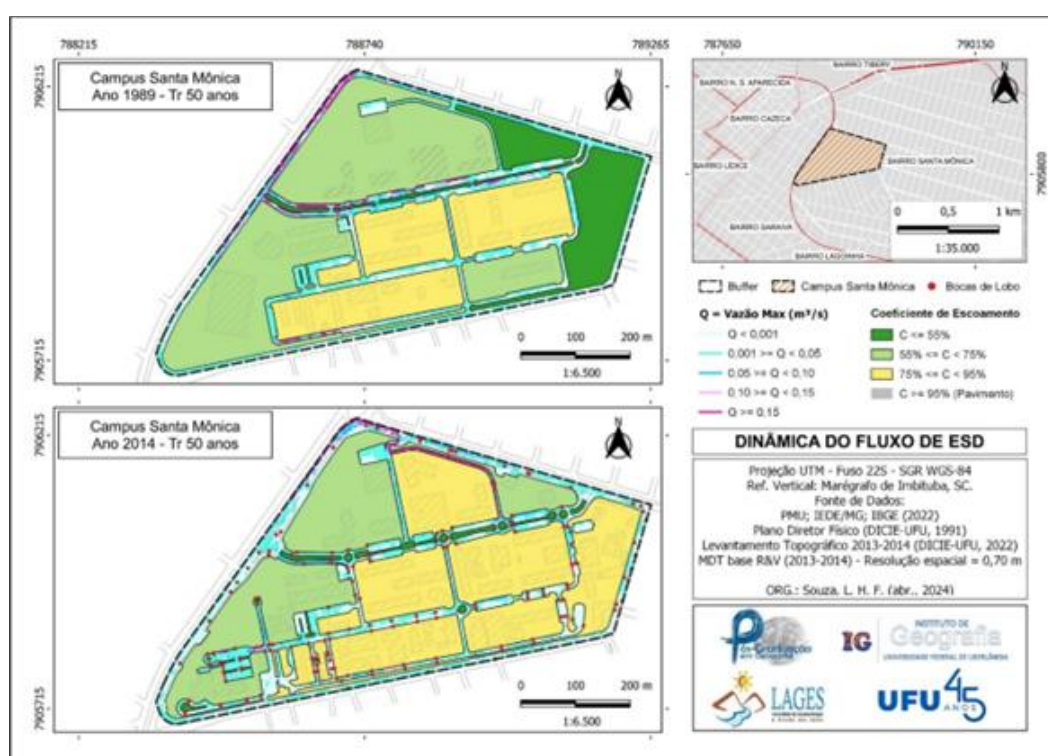


Figura 4 - Dinâmica do Fluxo de ESD – Cenários 1989 e 2014 – Tr 50 Anos.

Fonte: O autor.

As bocas de lobo do Campus foram cadastradas com base no cenário de 2014, representativo das condições urbanas atuais, para avaliar o indicador de áreas alagadas no PCSWMM, definido como acúmulo hídrico nas células da malha. Esse procedimento possibilitou analisar a correspondência entre o armazenamento superficial de água e a localização desses dispositivos. Na comparação dos cenários, destacou-se a expansão de áreas edificadas e semipermeáveis ($0,75 \leq C < 0,95$), como calçamentos, pavimentos de lazer e elementos paisagísticos, em detrimento das gramadas em condição boa ($C < 0,55$). Tal transformação reflete a intensificação da taxa de ocupação e a redução das superfícies permeáveis, com impacto direto no controle dos fluxos pluviais. Considerando o *buffer* da

área de estudo, sobretudo na confluência viária das avenidas principais, identificou-se a convergência do Escoamento Superficial Direto (ESD) em direção ao exutório definido no modelo.

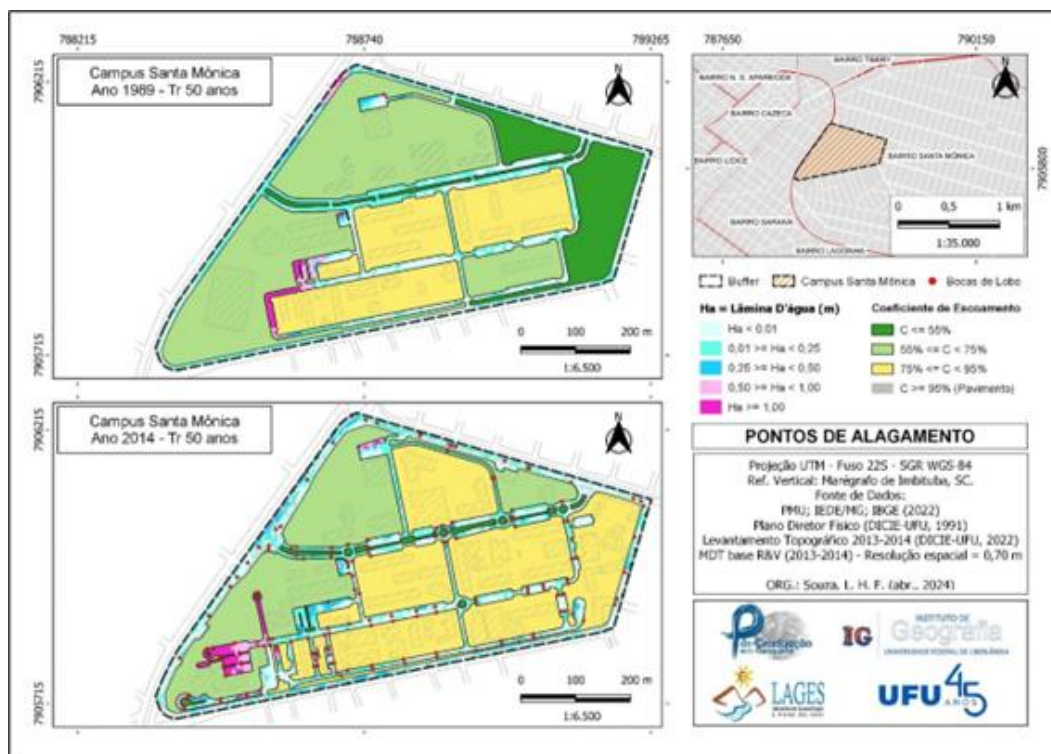


Figura 5 - Pontos de Alagamento – Cenários 1989 e 2014 – Tr 50 Anos.

Fonte: O autor.

A comparação entre os cenários de 1989 e 2014, sob precipitação de projeto, evidencia mudanças na dinâmica do ESD. Em 1989, a maior proporção de áreas permeáveis e gramadas resultava em $C \leq 0,55$, com reduzida ocorrência de pontos de alagamento e menores vazões de pico. Em 2014, a expansão de áreas edificadas e semipermeáveis, associada ao adensamento da rede viária interna, aumentou a impermeabilização e concentrou fluxos em direção às bocas de lobo cadastradas. Essa transformação espacial, marcada pela substituição de superfícies vegetadas por pavimentação, intensificou a convergência dos escoamentos e aumentou as cargas hidráulicas sobre a microdrenagem.

Os resultados também apontam a ampliação de pontos suscetíveis a alagamento no cenário de 2014. Hidrodinamicamente, além do aumento das vazões pontuais, observaram-se células com maior acúmulo hídrico ($Ha > 0,25$ m), especialmente nas áreas de confluência viária e junto ao exutório. Tais evidências confirmam a influência da morfologia urbana na modificação dos padrões de drenagem e reforçam a relevância do PCSWMM

como ferramenta de análise integrada entre uso do solo, eficiência da microdrenagem e risco de alagamentos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstraram que a transformação morfológica da área de estudo nos últimos 25 anos impactou sensivelmente a dinâmica do Escoamento Superficial Direto (ESD). A comparação entre 1989 e 2014 revelou que a supressão de áreas permeáveis e a intensificação de pavimentos e edificações elevaram os volumes de escoamento e a suscetibilidade a alagamentos, confirmando a influência decisiva da expansão urbana sobre os padrões hidrológicos locais.

Os trabalhos de campo para avaliação da microdrenagem evidenciaram limitações relevantes: ausência de bocas de lobo em determinados pontos, subdimensionamento em outros e implantação inadequada em trechos críticos. Esses fatores comprometem a eficiência de captação e intensificam a concentração de fluxos.

A compatibilidade entre os resultados da modelagem hidrológico-hidráulica e a posição atual das bocas de lobo reforça a robustez metodológica do estudo, indicando que esses dispositivos foram concebidos como tentativas de controle da dinâmica do escoamento. A análise também demonstra a fragilidade estrutural do sistema urbano frente à impermeabilização progressiva, que reduz a efetividade das soluções implementadas.

Diante desse quadro, destaca-se a adoção de práticas inovadoras para a gestão das águas pluviais, como sistemas de reuso, técnicas de infiltração e dispositivos de *Low Impact Development* (LID) e *Sustainable Drainage Systems* (SuDS). Essas estratégias podem mitigar os efeitos adversos da urbanização, reduzir custos de manutenção da infraestrutura e ampliar a resiliência socioambiental.

Paralelamente, a adoção de uma abordagem hidrogeomorfológica integrada, que reconheça a bacia hidrográfica como unidade fundamental de análise, possibilita contextualizar as intervenções em escala compatível com a complexidade dos processos hidrológicos e morfológicos, superando as limitações de enfoques restritos ao perímetro da área de estudo. Embora consistentes, os resultados limitam-se à escala do Campus Santa Mônica e ao recorte temporal (1989–2014). Pesquisas futuras devem considerar possíveis cenários climáticos — obtidos por séries IDF atualizadas ou modelos de projeção — e sua replicação em outros contextos urbanos.

REFERÊNCIAS

BACCHIN, K.; ASHLEY, R.; VEERBEEK, W.; PONT, M. B. A multi-scale approach in the planning and design of water sensitive environments. In: NOVATECH – INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLANNING AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE MANAGEMENT OF WATER IN THE CITY. 8., 2013, Lyon, **Proceedings...** Lyon, 2013. p.1-11.

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>.

BIBI, T. S. Modeling urban stormwater management in the town of Dodola based on land use 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>.

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>.

BRUWIER, M.; MARAVAT, C.; MUSTAFA, A.; TELLER, J.; PIROTTON, M.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; DEWALS, B. 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>.

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>.

COATES, D. R. Urban geomorphology. In: FINKL, C. W. (ed.). **Applied geology**. Encyclopedia of Earth Sciences Series, Boston: Springer, 1984.

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, n. 16, p. 76-80, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0008>.

GILBERT, G. K. **The geology of the Henry Mountains**. Washington: Department of the Interior, 1877. 212p. DOI: <https://doi.org/10.3133/70039916>.

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 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Hidráulica e Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

GONÇALVES, L. S. M. **Desenvolvimento de ferramenta para simulação de dispositivos de drenagem urbana sustentável utilizando eventos de chuva característicos**. 2022. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

GRIBBIN, J. E. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2014. 544p.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 190p.

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>.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **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: Cambridge University Press, 2013. 1535p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

JORGE, M. C. O. Geomorfologia urbana: conceitos, metodologias e teorias. In: GUERRA, A. J. T. (org.). **Geomorfologia urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

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>.

LI, X.; ERPICUM, S.; MIGNOT, E.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTON, M.; DEWALS, B. Influence of urban forms on long-duration urban flooding: laboratory experiments and computational analysis. **Journal of Hydrology**, v. 603, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127034>.

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 Eng. Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

LÓCZY, D. **Anthropogenic geomorphology**. Hungary: Springer, 2010. 250p.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3058-0>.

LUO, P.; LUO, M.; LI, F.; QI, X.; HUO, A.; WANG, Z.; HE, B.; TAKARA, K.; NOVER, D.; WANG, Y. 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>.

McCUEN, R. H. **Hydrologic analysis and design**. New Jersey: Prentice-Hall, 1998. 814p.

MIGUEZ, M. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. Grupo GEN, 2015. 384p.

NIR, D. **Man, a geomorphological agent: an introduction to anthropogenic geomorphology**. Jerusalem: Keter Publishing House 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) –, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

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**, v. 25, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.57767>.

PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (orgs.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: UFRGS; ABRH, 1995. 428p.

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**, v. 24, n. 1, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.20502/rbq.v24i1.2233>.

RUANGPAN, L.; VOJINOVIC, Z.; SABATINO, S. D.; LEO, L. S.; CAPOBIANCO, V.; OEN, A. M. P.; McCLAIN, M. E.; LOPEZ-GUNN, E. Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 20, p. 243-270, 2020.

DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-20-243-2020>.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, v. 108, p. 501-505, 1932.

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, n. 19, p. 9300, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199300>.

SIDLE, R.; ONDA, Y. Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 597-602, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.1360>.

SOUZA, L. H. de F. **Modelo hidrodinâmico para análise de escoamento superficial em microdrenagem: uma contribuição à geomorfologia urbana**. 2024. 254 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.5509>.

SOUZA, L. H. de F.; RODRIGUES, S. C.; DANELON, J. R. B. Contribuições da geomorfologia no contexto da modelagem hidrológico-hidráulica do escoamento superficial urbano. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 44, p. e225331, 2024.

DOI: <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdq.2024.225331>.

THORNBUSH, M. J.; ALLEN, C. D. **Urban geomorphology, landforms and processes in cities**. Elsevier, 2018. 362p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**. Porto Alegre: Editora da Universidade; ABRH, 2001. 943p.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (orgs.). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 27p.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 1995. 428p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Storm Water Management Model (SWMM)**. Washington, D.C.: EPA, 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. Acesso em: 11 mar. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Plano diretor físico-territorial dos campi da Universidade Federal de Uberlândia – UFU**. Uberlândia: 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.

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. 468 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB, 1978. 477p.

YANG, P.; LAW, A. W. K.; XU, S.; SIM, S. T. V.; CHAN, H.; CHITWATKULSIRI, D.; LOC, H. H.; IRVINE, K. N. 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>.

YEN, B. C.; CHOW, V. T. Design hyetographs for small drainage structures. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 106, p. 1055-1076, 1980.

YIM, S.; AING, C.; MEN, S.; SOVANN. Applying PCSWMM for stormwater management in the Wat Phnom sub catchment, Phnom Penh, Cambodia. **Journal of Geography, Environment and Earth Science International**, v. 5, n. 3, p. 1-11, 2016. DOI: <https://doi.org/10.9734/JGEESI/2016/23525>.

YU, K. Climate adaptation and resilience. **Landscape Architecture Frontiers**, v. 9, n. 6, p. 4-7, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15302/J-LAF-1-010021>.