

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA URBANIZAÇÃO SOBRE AS VAZÕES DO RIO BETIM POR MEIO DO USO DO SOFTWARE STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM) E SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

Filipe Gomes de Matos ¹ & Viviane Borda Pinheiro Rocha ²

RESUMO – Este trabalho analisa a influência da urbanização na dinâmica hidrológica da bacia do Rio Betim, por meio de modelagem hidrológica associada ao uso de ferramentas de geoprocessamento. O objetivo principal consiste em compreender de que forma as mudanças no uso e na cobertura do solo, decorrentes do crescimento urbano, impactam as vazões deste rio. Para isso, o *Storm Water Management Model* (SWMM) foi empregado na simulação de cenários históricos, permitindo a avaliação das alterações hidrológicas ao longo do tempo e a projeção de estratégias de manejo hídrico sustentável. Os resultados indicam que a modelagem hidrológica por meio do SWMM constitui uma ferramenta robusta para a avaliação do comportamento hidrológico em cenários distintos de uso e ocupação do solo e para o suporte ao planejamento de ambientes urbanos mais resilientes.

Palavras-Chave – Urbanização; Modelagem Hidrológica; SWMM; Drenagem Urbana.

ABSTRACT – This study analyzes the influence of urbanization on the hydrological dynamics of the Betim River watershed through hydrological modeling combined with geoprocessing tools. The main objective is to understand how changes in land use and land cover resulting from urban growth affect river flows. For this purpose, the Storm Water Management Model (SWMM) was applied to simulate historical scenarios, enabling the assessment of hydrological alterations over time and the projection of sustainable water management strategies. The results indicate that hydrological modeling using SWMM is a robust tool for analyzing hydrological behavior under different land use and vegetation scenarios and supporting the planning of more resilient urban environments.

Key-words – Urbanization; Hydrological Modeling; SWMM; Urban Drainage.

1) Aluno Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, e-mail: filipegomes@ufmg.br

2) Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos e do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, e-mail: viviane.pinheiro@ehr.ufmg.br

INTRODUÇÃO

O planejamento urbano brasileiro do século XIX foi fortemente fundamentado na abordagem higienista, a qual priorizava a canalização e a retificação dos corpos d'água com o objetivo de expandir a malha viária e promover o desenvolvimento urbano. Entretanto, ao longo do século XX e, especialmente, no início do século XXI, muitos países em desenvolvimento vivenciaram uma intensa transformação urbanística, marcada pelo rápido e, frequentemente, desordenado crescimento das cidades. Esse processo, em grande parte, ocorreu sem o devido planejamento, agravando problemas como a deficiência de infraestrutura urbana e o comprometimento dos corpos hídricos, perpetuando desafios ambientais e sociais (Santos, 1985).

Segundo Rodrigues *et al.* (2023), a supressão da cobertura vegetal natural, associada à impermeabilização dos solos e a outras atividades antrópicas, está diretamente relacionada ao aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos de precipitação, intensificando a recorrência de inundações e alagamentos nos centros urbanos.

Tucci (2007) ressalta que, em áreas urbanizadas, as vazões de pico do escoamento superficial podem ser ampliadas em até sete vezes quando comparadas a áreas não urbanizadas. Nesse contexto, o conhecimento detalhado da superfície urbana torna-se fundamental para o planejamento urbano eficiente, a formulação de legislações adequadas e o correto dimensionamento dos sistemas de drenagem urbana (Garotti e Barbassa, 2010), elementos essenciais para a mitigação dos impactos associados a eventos pluviométricos intensos e à redução dos riscos de inundações.

Diante desse histórico de ocupação urbana desordenada, o estudo de bacias hidrográficas urbanas assume papel cada vez mais relevante, sobretudo pela necessidade de desenvolver técnicas e ferramentas capazes de minimizar os efeitos negativos do crescimento populacional acelerado aliado à ausência de planejamento integrado, realidade que caracteriza grande parte das cidades brasileiras (Garcia e Paiva, 2006).

Nesse cenário, a modelagem hidrológica e hidráulica destaca-se como uma ferramenta essencial para a compreensão e a previsão do comportamento dinâmico das águas em bacias hidrográficas urbanas (Neto et al., 2014). Por meio dessas técnicas, torna-se possível analisar alternativas de manejo e planejamento, avaliar os efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo, investigar impactos associados às mudanças climáticas, além de subsidiar a tomada de decisão no âmbito da gestão dos recursos hídricos (Fan e Collischonn, 2014).

Os modelos hidrológicos consistem em representações matemáticas dos sistemas hídricos, capazes de simular os processos de transformação da precipitação em escoamento e a propagação das

vazões ao longo da rede de drenagem. Destacam-se, nesse contexto, os modelos distribuídos e semi-distribuídos de transformação chuva–vazão, que possibilitam uma representação mais detalhada dos processos hidrológicos, fornecendo suporte técnico para o planejamento de infraestruturas e a gestão eficiente das águas pluviais em regiões suscetíveis a inundações (Fan e Collischonn, 2014).

Paralelamente ao avanço das técnicas de modelagem, a implementação de políticas públicas voltadas ao saneamento e à drenagem urbana, bem como a ampliação das redes de monitoramento hidrometeorológico, tem contribuído significativamente para o aprimoramento dos estudos hidrológicos em áreas urbanas. A disponibilidade de séries históricas de precipitação e vazão, associada a bases cartográficas de alta resolução obtidas por meio de levantamentos topográficos detalhados e técnicas de geoprocessamento, cria condições favoráveis para a calibração e validação de modelos hidrológicos e hidráulicos, ampliando a confiabilidade das simulações e o entendimento do funcionamento das bacias urbanas.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo tem como objetivo estabelecer cenários retrospectivos de ocupação da bacia urbana do Rio Betim, por meio do ajuste de parâmetros de modelagem no SWMM, desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) (Rossman e Simon, 2022), e avaliar as alterações no regime hidrológico desse curso d'água induzidas pelas mudanças no uso e ocupação do solo ao longo das últimas décadas, com apoio intensivo de ferramentas baseadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

O presente estudo valeu-se da utilização de um modelo já calibrado, de propriedade da Universidade Federal de Minas Gerais, desenvolvido e calibrado por Vieira (2022). Esse modelo precursor, que totaliza as 76 sub-bacias mostradas na Figura 1, serviu como base para a análise atual, facilitando a definição de parâmetros iniciais e aprimorando a compreensão das dinâmicas hidrológicas da bacia do Rio Betim.

Os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos a partir da plataforma MapBiomas (Projeto MapBiomas – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil), abrangendo o período de 1985 a 2022. As informações cronológicas da cobertura foram integradas em um SIG para a classificação em categorias como áreas urbanas, vegetação e corpos d'água. Essa abordagem permitiu identificar a expansão urbana e outras transformações na paisagem ao longo dos anos. Os mapas produzidos são mostrados na Figura 2.

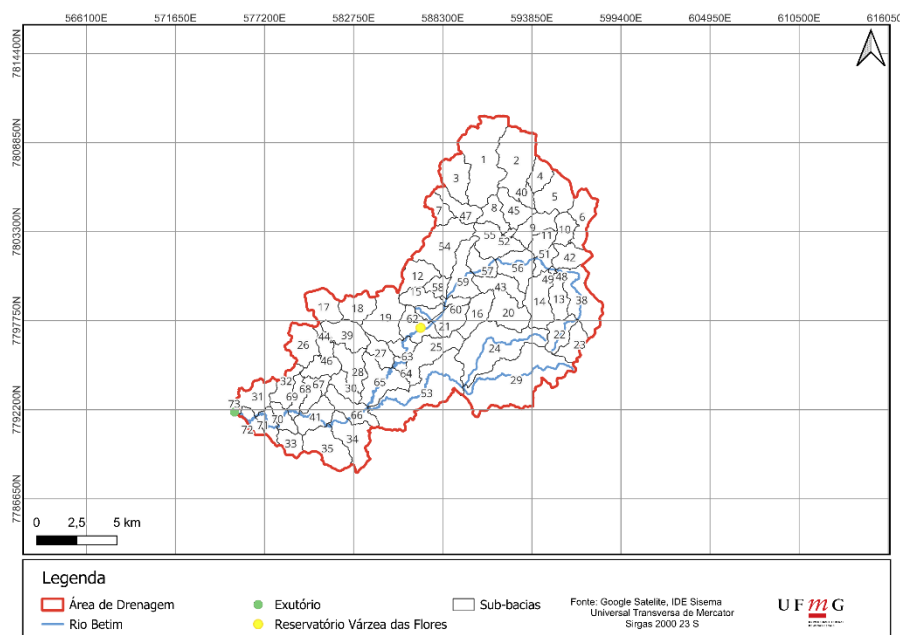


Figura 1: Discretização da Bacia do Rio Betim para Modelagem Hidráulico-Hidrológica no SWMM.

Foram utilizadas informações de precipitação horária provenientes das estações pluviométricas mantidas pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Neste estudo, foram adotados os dados das estações Angola, Guanabara e Teresópolis, com séries temporais de resolução horária, referentes ao período de abril de 2021 a março de 2022. A Figura 3 apresenta a localização dos postos pluviométricos utilizados.

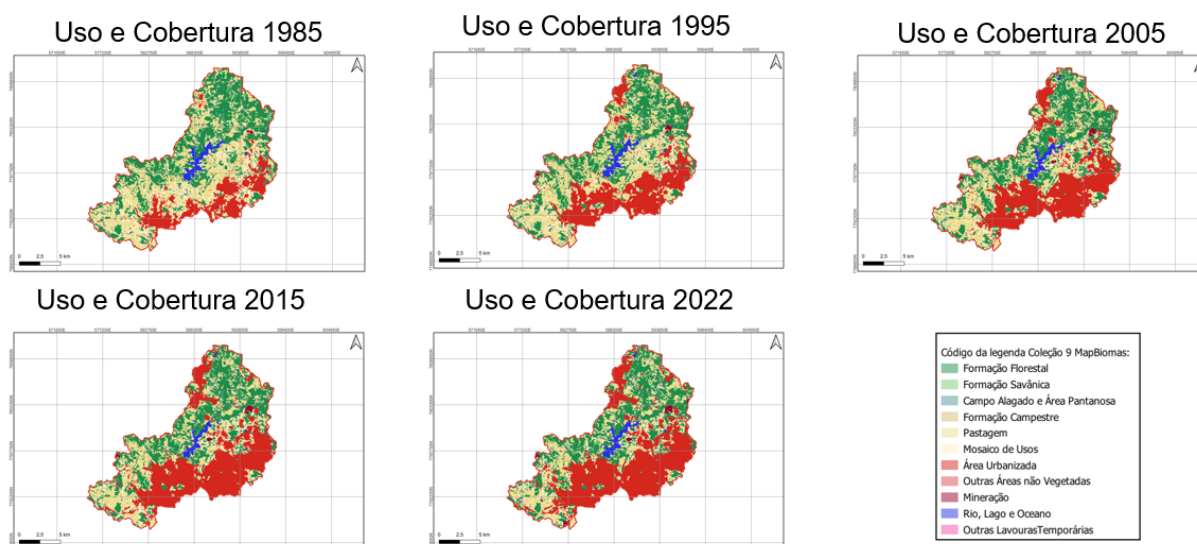


Figura 2: Mapas de Cobertura e Uso do Solo na bacia do rio Betim, abrangendo o período de 1985 a 2022.

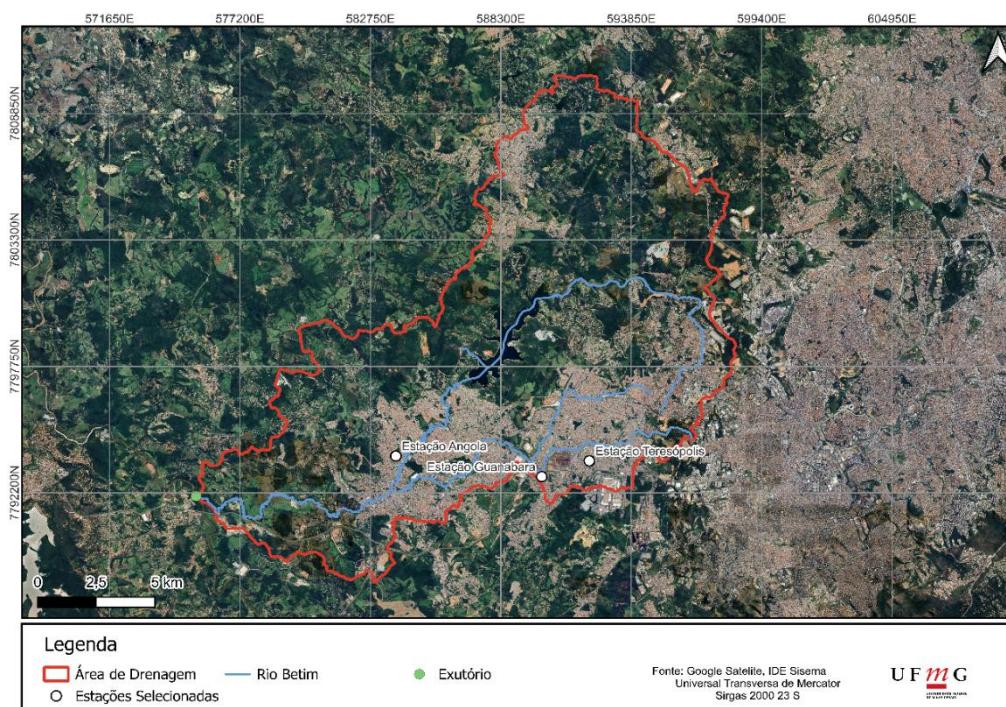


Figura 3: - Localização das Estações Pluviométricas Adotadas

No modelo SWMM, a transformação chuva-vazão nas sub-bacias ocorre por meio de dois processos principais: (i) a função de produção, que realiza a separação dos volumes destinados à interceptação, armazenamento superficial e infiltração, convertendo a precipitação em precipitação efetiva, e (ii) a função de transferência, que conduz o escoamento superficial até o exutório da sub-bacia. Esse processo é ilustrado na Figura 4 (SILVA *et al.*, 2015).

Para a modelagem chuva-vazão e hidráulica de bacias urbanas, é fundamental identificar os dados de entrada e os parâmetros necessários, tanto para a síntese hidrológica quanto para a propagação dos escoamentos pelos condutos e canais. Cabe ressaltar que, no módulo de produção, manteve-se a utilização do método do Curve Number, preconizado pelo Soil Conservation Service dos Estados Unidos, e selecionado no modelo original de Vieira (2022). No SWMM, deve-se indicar o parâmetro *Curve Number* (CN) para as áreas permeáveis.

No presente estudo, as simulações realizadas no SWMM tiveram como objetivo avaliar as alterações nas condições hidrológicas da bacia do rio Betim decorrentes do avanço da urbanização. Assim, para representação das alterações de uso e ocupação do solo ao longo do tempo, alterou-se o parâmetro “*Porcentagem de Área Superficial Impermeável*” para cada sub-bacia, a partir da avaliação do avanço de áreas urbanizadas ao longo das décadas avaliadas, por meio de ferramentas SIG na classificação do uso e cobertura do solo, permitindo a quantificação das áreas impermeáveis das sub-bacias nos cenários de 1985, 1995, 2005, 2015 e no cenário atual. Partiu-se do princípio que o CN das áreas permeáveis remanescentes manteve-se estável ao longo do tempo referente aos

cenários, embora uma avaliação detalhada também seria possível para quantificação precisa desse parâmetro, por meio do mapeamento das alterações ao longo dos cenários estudados em termos de cobertura vegetal e de uso e ocupação do solo nas áreas não impermeabilizadas.

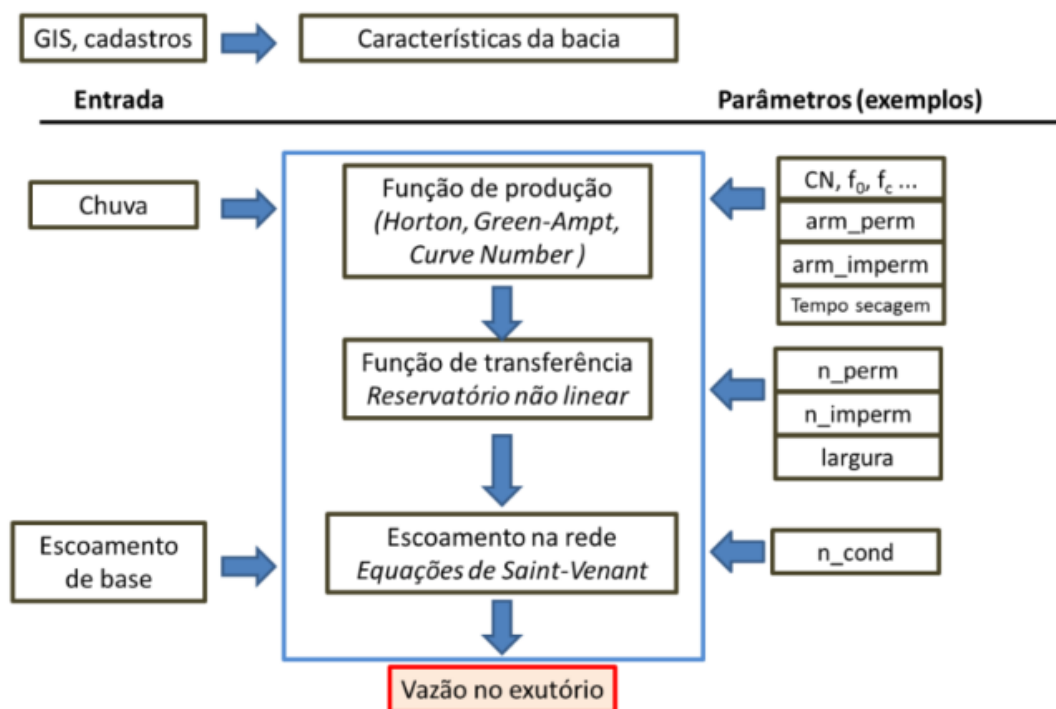


Figura 4 - Processos simulados pelo SWMM para transformação chuva-vazão.

Fonte: Silva et al (2015)

A Tabela 1 apresenta a síntese estatística dos principais parâmetros físicos e hidrológicos adotados nas simulações das 76 sub-bacias do modelo SWMM. Observa-se que a declividade média foi de 15,31%, variando entre 9,83% e 23,84%, enquanto o coeficiente de rugosidade de Manning para áreas impermeáveis permaneceu constante ($n = 0,01$). Para as áreas permeáveis, os valores de rugosidade apresentaram média de 0,21 e variação entre 0,09 e 0,52, refletindo a diversidade de cobertura do solo presente na bacia. Destaca-se que os valores mínimos e máximos no que concerne à porcentagem de impermeabilização coincidem com aqueles utilizados em 2 sub-bacias representativas de situações opostas em termos de antropização, ou seja, a que apresentou os valores mínimos ao longo dos cenários é a menos urbanizada, enquanto aquela que mostrou os valores máximos é a mais urbanizada, e ambas mantiveram esse aspecto em todos os cenários avaliados.

A precipitação foi simulada com intervalo temporal de 1 hora, abrangendo o período de 01/01/2022 a 31/03/2022. Em todos os cenários foram adotadas as mesmas alturas de chuva, de modo a isolar os efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo sobre a resposta hidrológica da bacia, eliminando a influência de variações climáticas.

Tabela 1 — Síntese estatística dos principais parâmetros utilizados no SWMM no presente estudo considerando-se as 76 sub-bacias avaliadas.

Parâmetro	Descrição	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Declividade (%)	Declividade média da bacia	9,83	23,84	15,31	3,27
n-imperv	Coefficiente “n” de Manning da parcela impermeável da bacia	0,01	0,01	0,01	0,00 (constante)
n-perv	Coefficiente “n” de Manning da parcela permeável da bacia	0,09	0,52	0,21	0,10
d-imperv (mm)	Profundidade do armazenamento em depressões da parcela impermeável da bacia	6,00	8,64	7,16	0,45
d-perv (mm)	Profundidade do armazenamento em depressões da parcela permeável da bacia	1,24	2,99	1,88	0,33
Imperv. 1985 (%)	% da área superficial impermeável da bacia – cenário de 1985	0,13	30,6	4,12	5,68
Imperv. 1995 (%)	% da área superficial impermeável da bacia – cenário de 1995	0,22	50,0	8,18	11,32
Imperv. 2005 (%)	% da área superficial impermeável da bacia – cenário de 2005	0,28	68,0	10,78	15,18
Imperv. 2015 (%)	% da área superficial impermeável da bacia – cenário de 2015	0,32	72,0	12,39	16,73
Imperv. Atual (%)	% da área superficial impermeável da bacia – cenário atual (2022)	0,90	79,09	20,54	17,98

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No cenário de 1985, observou-se o menor percentual de áreas impermeáveis, associado a maiores taxas de infiltração e resposta hidrológica mais atenuada. Com o avanço da urbanização ao longo dos cenários subsequentes, ocorreu aumento progressivo da impermeabilização do solo, especialmente devido à expansão das áreas urbanas e da infraestrutura viária, resultando na redução das áreas permeáveis e no aumento do escoamento superficial.

Os resultados foram obtidos no exutório da bacia modelada, localizado a jusante da confluência do rio Betim com o ribeirão Areias, considerando uma área de drenagem de aproximadamente 186 km², que engloba praticamente toda a área urbanizada da bacia.

A Figura 5 apresenta os valores médios diários das alturas de chuva infiltradas para os diferentes cenários. Observa-se uma redução sistemática da infiltração ao longo do tempo, com destaque para o contraste entre os cenários de 1985 e o cenário atual, evidenciando a influência direta

da urbanização sobre esse processo hidrológico. Os resultados ora apresentados poderiam ser mostrados em intervalo temporal menor para ressaltar outros aspectos, como a resposta da bacia aos eventos pluviométricos mais intensos do período, mas aqui priorizou-se o intervalo diário a fim de se enfatizarem as alterações em termos de volumes infiltrados ao longo do período simulado em todos os cenários.

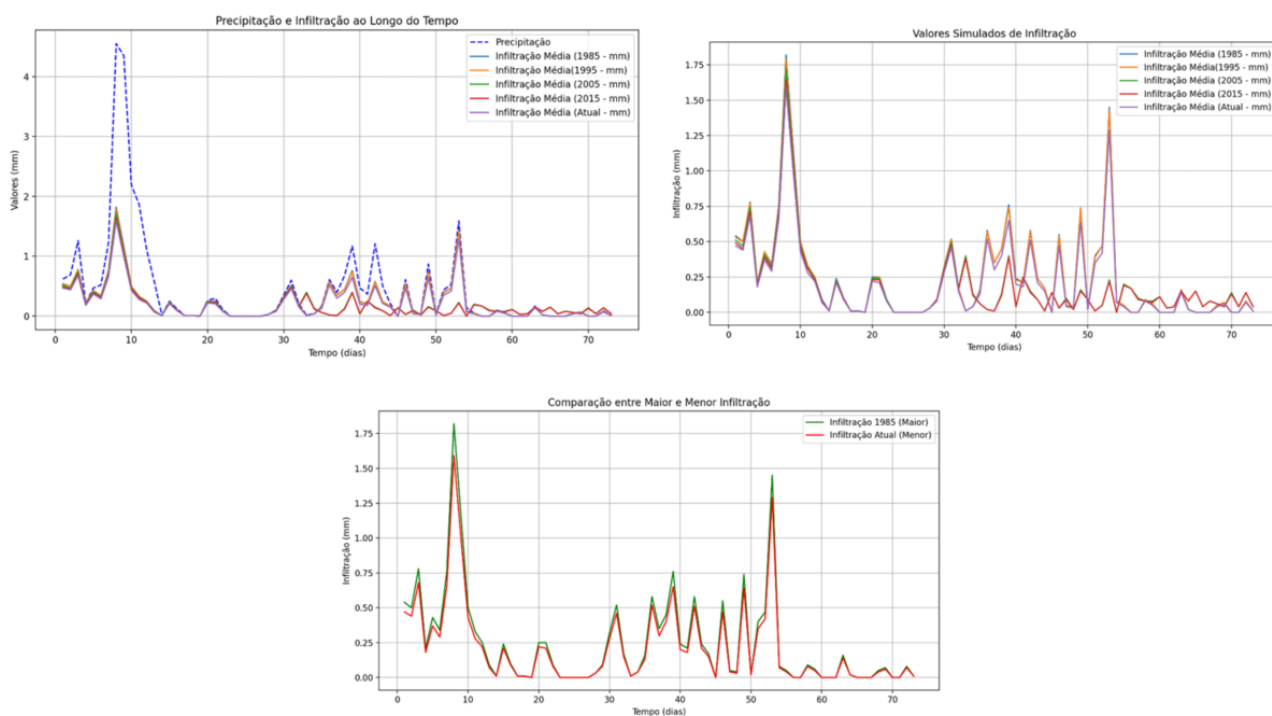


Figura 5 - Valores médios diários das alturas de chuva infiltradas para os diferentes cenários de uso e ocupação do solo analisados.

A Tabela 2 sintetiza a evolução da área impermeável média ponderada da bacia e a infiltração total acumulada no período simulado para os cenários analisados, evidenciando a progressão das transformações hidrológicas ao longo das décadas. Entre 1985 e o cenário atual, a impermeabilização média da bacia cresceu de aproximadamente 4,4% para 18,5%, um aumento de mais de quatro vezes, enquanto a infiltração total acumulada no período simulado reduziu cerca de 13%, passando de 17,98 mm para 15,66 mm.

A Figura 6 ilustra a variação temporal das vazões médias diárias e a comparação entre os cenários com maiores e menores valores. Verifica-se que, no cenário atual, os picos de vazão são mais elevados e de curta duração, enquanto no cenário de 1985 as vazões apresentam menores valores e resposta hidrológica mais gradual, comportamento associado ao aumento da impermeabilização e à aceleração do escoamento superficial ao longo das décadas.

Tabela 2 — Evolução da impermeabilização média na bacia e da infiltração acumulada por cenário, para o período simulado.

Cenário	Impermeabilização média (%)	Infiltração acumulada (mm)	Variação da infiltração em relação a 1985
1985	~4,4	17,98	—
1995	~7,5	17,69	-1,6%
2005	~9,7	17,26	-4,0%
2015	~11,0	16,57	-7,8%
Atual (2022)	~18,5	15,66	-12,9%

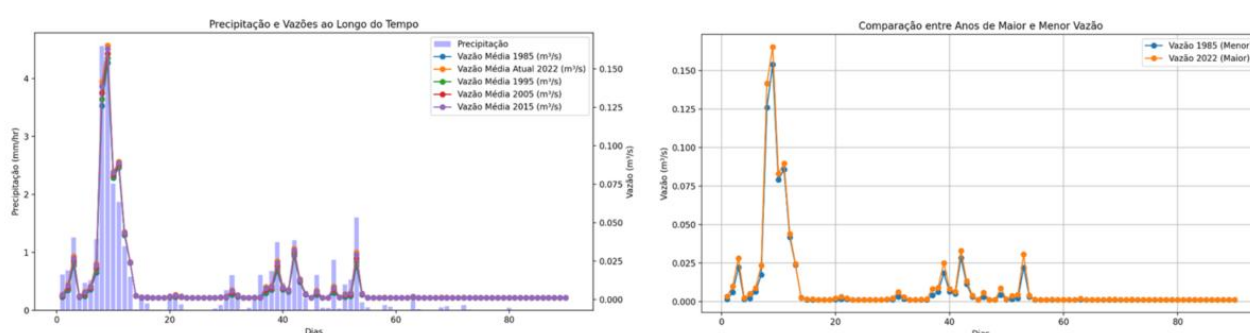


Figura 6 – Vazões médias diárias para os diferentes cenários de uso e ocupação do solo analisados.

De forma geral, os resultados evidenciam que as alterações no uso e ocupação do solo exerceram influência sobre processos hidrológicos da bacia do rio Betim, notadamente a infiltração, foco desta avaliação, reforçando a importância da adoção de estratégias de planejamento urbano e gestão hídrica que considerem os efeitos da impermeabilização do solo.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a modelagem hidrológica e hidráulica da bacia do Rio Betim, localizada nos municípios de Contagem e Betim (MG), por meio do modelo de transformação chuva–vazão SWMM, para compreensão dos impactos sobretudo sobre a infiltração e o escoamento superficial induzidos por alterações no uso e ocupação do solo ocorridas ao longo das últimas décadas na referida bacia. O modelo original, previamente desenvolvido e calibrado em estudo anterior, foi elaborado a partir da caracterização das propriedades físicas da bacia, incluindo seções transversais dos canais obtidas junto à Prefeitura e parâmetros como área, declividade e uso e ocupação do solo.

Os resultados indicaram que o avanço da urbanização intensifica o escoamento superficial, reduz a infiltração, e aumenta a velocidade do fluxo, reduzindo o tempo de base dos hidrogramas de cheia e acelerando a propagação das vazões ao longo da rede de drenagem, o que pode potencializar a ocorrência de inundações e aumentar a magnitude das vazões de pico. Esses achados reforçam a

necessidade de um planejamento urbano integrado à gestão dos recursos hídricos, adotando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, sendo os modelos hidrológicos e hidráulicos ferramentas essenciais para subsidiar esse processo.

REFERÊNCIAS

- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Análise hidrológica de bacias urbanas com o uso de modelos hidrológicos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 89–102, 2014.
- GARCIA, L. A. V.; PAIVA, J. B. D. Modelagem hidrológica aplicada à drenagem urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 45–58, 2006.
- GAROTTI, L. M.; BARBASSA, A. P. Avaliação de impactos da urbanização sobre a drenagem urbana. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 153–162, 2010.
- NETO, A. J. S. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada à drenagem urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 123–134, 2014.
- RODRIGUES, M. R. et al. Urbanização, impermeabilização do solo e eventos hidrológicos extremos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 16, n. 1, p. 45–61, 2023.
- ROSSMAN, L. A.; SIMON, M. A. *Storm Water Management Model (SWMM): User's Manual – Version 5.2*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2022.
- SANTOS, M. *Espaço e método*. São Paulo: Nobel, 1985.
- SILVA, P. R. et al. Modelagem hidrológica aplicada à drenagem urbana com o SWMM. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 745–758, 2015.
- TUCCI, C. E. M. *Gestão de águas urbanas*. Porto Alegre: ABRH, 2007.
- VIEIRA, F. M. *Modelagem hidrológica de inundações na bacia do ribeirão Betim*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem à UFMG pelo amparo concedido para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema.