

Impactos da urbanização no sistema de macrodrenagem: Estudo hidráulico-hidrológico da bacia do Barro Preto – Mariana/MG

Matheus Filipe da Silva Pereira¹,* Aline de Araújo Nunes²

¹Discente do curso de Engenharia Urbana. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 35400-000, Ouro Preto/MG, Brasil

²Docente do Departamento de Engenharia Urbana. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 35400-000, Ouro Preto/MG, Brasil

*E-mail do autor correspondente: matheusfilipe25@gmail.com

Submetido em: 12 dez. 2024. Aceito em: 13 jan. 2025

Resumo

Os córregos e rios urbanos são fundamentais para a drenagem das bacias hidrográficas e para a preservação ambiental. Contudo, a urbanização tem intensificado problemas ambientais, como o aumento do escoamento superficial. Este estudo analisa os impactos da urbanização na bacia do Barro Preto, em Mariana (MG), considerando os cenários de uso do solo de 2007 e 2024. Por meio do software HEC-HMS para a construção do modelo hidrológico e QGIS para o geoprocessamento, identificou-se que, em 17 anos, as áreas impermeabilizadas cresceram significativamente, com aumento de 255,45% nas zonas residenciais e redução de até 71,70% das áreas naturais. Como consequência, as vazões de pico cresceram 92% para um Tempo de Retorno (TR) de 10 anos, e 72% e 62% para TR de 25 e 50 anos, respectivamente, superando a capacidade da infraestrutura atual. O estudo destaca a necessidade de um Plano Diretor de Drenagem Urbana, associado a políticas públicas para regulamentar o uso do solo, manter e aprimorar as redes de drenagem e implementar estratégias sustentáveis. Portanto, a urbanização intensiva na bacia do Barro Preto causou impactos ambientais e sociais significativos, sendo assim, recomenda-se priorizar a drenagem urbana e estabelecer políticas públicas eficazes para uso do solo e redução da poluição hídrica.

Palavras-chave: Urbanização, Macrodrenagem, Hidrologia, QGIS, Gestão de Riscos, Inundação.

Abstract

Impacts of Urbanization on the Macrodrenage System: Hydraulic-Hydrological Study of the Barro Preto Basin – Mariana/MG

Urban streams and rivers are essential for watershed drainage and environmental preservation. However, urbanization has exacerbated environmental issues, such as increased surface runoff. This study analyzes the impacts of urbanization on the Barro Preto watershed in Mariana (MG), considering land-use scenarios from 2007 and 2024. Using the HEC-HMS software for hydrological modeling and QGIS for geoprocessing, it was identified that over 17 years, impervious areas increased significantly, with a 255.45% rise in residential zones and up to a 71.70% reduction in natural areas. Consequently, peak flows increased by 92% for a 10-year Return Interval (RI) and by 72% and 62% for RIs of 25 and 50 years, respectively, surpassing the capacity of the current infrastructure. The study highlights the need for an Urban Drainage Master Plan, coupled with

public policies to regulate land use, maintain and enhance drainage networks, and implement sustainable strategies. Therefore, intensive urbanization in the Barro Preto watershed has caused significant environmental and social impacts. It is recommended to prioritize urban drainage and establish effective public policies for land use and water pollution reduction.

Keywords: Urbanization, Macrodrenage, Hydrology, QGIS, Risk Management, Flooding.

Introdução

Os córregos e rios urbanos desempenham um papel crucial na drenagem de bacias hidrográficas e na manutenção da flora e fauna aquáticas. Contudo, o avanço da urbanização tem intensificado problemas ambientais e de saúde pública, como o descarte inadequado de efluentes domésticos nos corpos d'água e a crescente impermeabilização do solo urbano. Esse processo resulta em maior escoamento superficial de águas pluviais, alterando significativamente o ciclo hidrológico. Conforme observado por Ferreira et al. (2025), áreas próximas a rios sempre foram atrativas, tanto para ocupações ribeirinhas quanto para a urbanização de margens de grandes rios que atravessam cidades. Sendo assim, as populações que residem em tais áreas são afetadas diretamente por eventos hidrológicos mais extremos, sendo potencializado pelo processo de urbanização das cidades.

Nesse sentido, o aumento do escoamento superficial pode alcançar níveis críticos e causar sérios prejuízos ambientais, econômicos e sociais, especialmente durante eventos hidrológicos intensos. As enchentes urbanas decorrem de fatores como parcelamento excessivo do solo, ocupação de áreas ribeirinhas, obstrução de canais por resíduos e sedimentos, além de infraestruturas de drenagem mal dimensionadas (Tucci, 2020). Assim, compreender a relação entre urbanização e as características físicas de uma bacia hidrográfica é fundamental para gerenciar os

riscos associados a fortes chuvas, inundações e alagamentos.

A utilização de ferramentas de geoprocessamento e modelos hidrológicos tem se tornado uma prática consolidada em cidades brasileiras e internacionais. Essas tecnologias possibilitam simulações de chuvas com diferentes intensidades para uma determinada bacia, favorecendo o planejamento e o dimensionamento eficiente de infraestruturas de drenagem urbana. Além disso, os recursos de geoprocessamento permitem mapear áreas vulneráveis a inundações, integrar informações georreferenciadas e avaliar mudanças no uso e ocupação do solo ao longo do tempo (Campos et al., 2024). Nesse cenário, torna-se crucial analisar os efeitos da urbanização no ciclo hidrológico, considerando o aumento da impermeabilização e do escoamento superficial. Infraestruturas de macrodrenagem subdimensionadas agravam os eventos de inundação, colocando em risco a população e causando prejuízos econômicos significativos.

Apesar da existência de legislações específicas, muitas cidades brasileiras ainda apresentam gestão deficiente das águas pluviais. Em Mariana (MG), por exemplo, a falta de mapeamento e manutenção das estruturas de drenagem, somada às ligações irregulares e redes de esgotamento inadequadas, compromete a eficiência do sistema. Desde a década de 1970, a ausência de políticas públicas voltadas ao ordenamento territorial contribuiu para o crescimento desorganizado, intensificando os

impactos de eventos de inundação e expõem a população a diversos riscos (Souza, 2004).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo analisar o impacto das vazões de pico no sistema de macrodrenagem da bacia do Barro Preto, localizada em Mariana, MG. O estudo considera dois cenários distintos de ocupação territorial, referentes aos anos de 2007 e 2024. A escolha destes anos se justificou para comparar cenários anteriores e posteriores ao processo de urbanização, sendo que a partir de 2007, o imageamento via satélite fica com uma boa resolução, o que permite uma melhor precisão na delimitação dos usos e ocupação do solo. Para investigar a influência da urbanização nas vazões de escoamento superficial, foram considerados os tempos de retorno (TR) de 10, 25 e 50 anos, amplamente adotados em projetos de macrodrenagem tanto no passado quanto no presente.

Material e Métodos

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Doce, situada na região sudeste do Brasil, abrange uma área de aproximadamente 86.715 km², envolvendo os estados de Minas Gerais (86% do território) e Espírito Santo (14%) (CBH-Doce, 2024). Localizado na bacia do Rio Doce, o município de Mariana está situado no estado de Minas Gerais, localizado na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte e na microrregião de Ouro Preto. Segundo informações do CLIMATE DATA (2023), o clima da região é quente temperado (Cwa), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, com temperatura média de 19,7°C e a pluviosidade média anual da região em torno de 1804 mm. Há maior pluviosidade no verão do que no inverno, sendo o período chuvoso compreendido entre os meses de dezembro a março.

A bacia do Barro Preto e córrego que passa por ela não tem nome oficial e deságua no Rio do Carmo. A Figura 1 mostra a bacia de estudo nos dois cenários de análise.

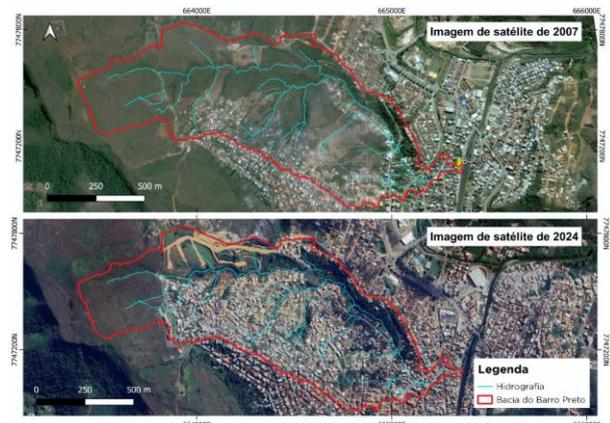


Figura 1. Localização e Evolução da mancha urbana da bacia do Barro Preto.

Diante disso, a área de estudo é uma sub-bacia que compreende vários bairros. Tal sub-bacia tem uma área total de aproximadamente 1 km² e cerca de 2,5 km do talvegue principal. A nascente é localizada no bairro Rosário e o ponto de exutório localizado no bairro Barro Preto. Para uma melhor compreensão da área de estudo, a hidrografia principal foi dividida em trechos (Figura 2), onde:

- Trecho 1 (2.063,30 metros de extensão): Corresponde ao trecho em leito natural, sendo este o mais longo da bacia. Nele há uma declividade mais acentuada e há presença de vegetação densa margeando ao longo do trajeto. Entretanto, há muito descarte de efluentes domésticos, além de outros tipos de resíduos sólidos por parte da população.
- Trecho 2 (121,53 metros de extensão): Canalização em concreto de formato retangular, passando embaixo da Travessa Monsenhor Rafael Coelho.

- Trecho 3 (11,95 metros de extensão): Bueiro Celular em concreto, perpendicular à Travessa Monsenhor Rafael Coelho.
- Trecho 4 (31,97 metros de extensão): Canalização em concreto a jusante do bueiro. Em 2023 o canal era totalmente fechado. Em 2024, ele foi aberto pela Prefeitura.
- Trecho 5 (64,88 metros de extensão): Canalização total do curso d'água, onde há um estrangulamento em termos de altura do canal. O trajeto passa por baixo de vias e casas, e desemboca no Ribeirão do Carmo.

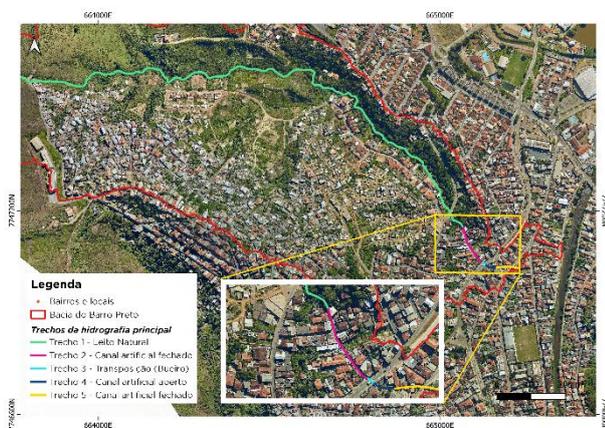


Figura 2. Trechos da hidrografia principal.

Tipologia, uso e ocupação

A bacia do Barro Preto está sobre a Província Geotectônica São Francisco e sob o Domínio dos Grupos Piracicaba, Itabira e Sabará, nos quais predominam rochas metamórficas e sedimentares. O tipo de solo predominante na bacia é classificado como Cambissolo Háplico, sendo que essa classe se comporta como solos fortemente a imperfeitamente drenados. Destaca-se que as características desta classe variam muito de um local para outro, devido à heterogeneidade do material de origem conforme a EMBRAPA (Santos, 2018).

A delimitação do uso e ocupação do solo foi feita de forma manual por meio do QGIS. Para ambos os cenários foi considerado as imagens via

satélite para a delimitação. A Figura 3 mostra os mapeamentos de uso e ocupação do solo de cada cenário.

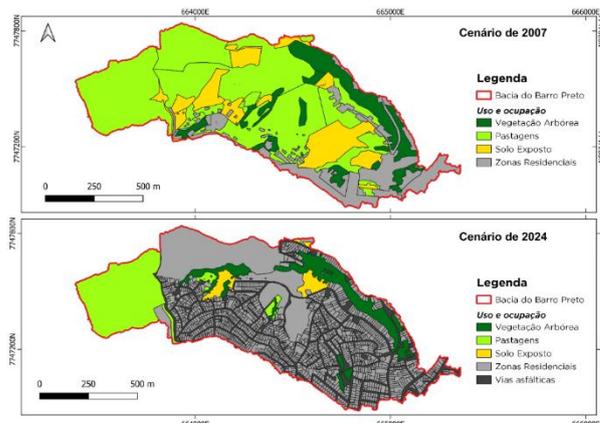


Figura 3. Mapa de uso e ocupação do solo de cada cenário.

Neste trabalho, o método de transformação chuva-vazão que foi utilizado é o *Soil Conservation Service* (SCS) que tem como parâmetro principal o *Curve Number* – CN. Os valores de CN adotados e ponderados estão contidos na Tabela 1. Para cada cenário, foi realizado uma média ponderada a partir da área de cada zona e seu CN respectivo.

Tabela 1. Valores de CN adotados para cada tipologia de uso e ocupação do solo.

Tipologia (Uso e Ocupação)	CN Adotado/ponderado	Referência Bibliográfica / Método
Pastagens	82,0	Tucci (1993) e Sartori (2010)
Solo exposto	84,1	Tucci (1993) e Sartori (2010)
Vegetação arbórea	61,6	Tucci (1993) e Sartori (2010)
Vias asfálticas	98,0	Tucci (1993)
Zonas residenciais / loteamento	90,0	Tucci (1993)

Conforme Tucci (2005), o modelo hidrológico é uma das ferramentas que melhor entende e representa o comportamento de uma bacia

hidrográfica de forma artificial. É nele que será possível compreender os complexos fenômenos naturais atuantes na bacia, por meio de levantamentos de dados, formulações matemáticas e estocásticas. A modelagem matemática hidrológica foi realizada pelo modelo computacional HEC-HMS na versão 4.11.

Assim, foi elaborado um modelo hidrológico semi-distribuído, para se ter um melhor controle dos parâmetros e trazer resultados mais próximos da realidade. Para a delimitação das sub-bacias, foi utilizado o Modelo Digital de Terreno (MDT) tratado pela equipe responsável pela revisão do Plano Diretor com resolução espacial de 1 metro. O MDT foi fornecido pela Prefeitura de Mariana em 2024. Tal subdivisão foi necessária para otimizar os resultados no modelo hidrológico. A bacia do Barro Preto e suas respectivas 11 sub-bacias estão representadas na Figura 4. Considera-se que foi construído um modelo hidrológico semi-distribuído, sendo essa divisão de 11 sub-bacias necessária para aproximar mais de um modelo distribuído que um concentrado, sendo que algumas bacias como a SB-3 e SB-9 foram geradas apenas para conectar com as demais, não tendo necessariamente uma contribuição hídrica.

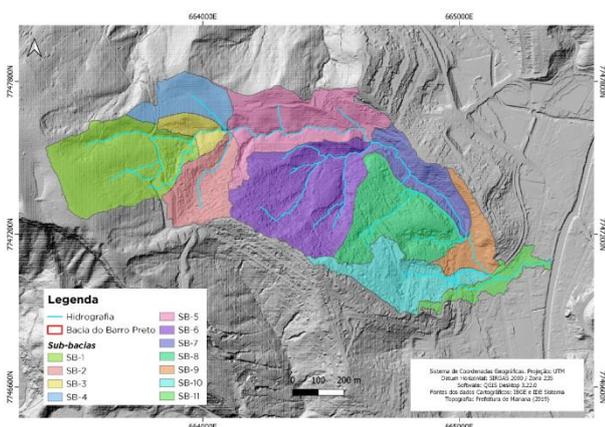


Figura 4. Sub-bacias do Barro Preto.

Tempo de concentração

O tempo de concentração foi calculado pela Equação Empírica de Kirpich (Equação 1), que segundo Silveira (2005) é comumente utilizada na prática da engenharia para bacias urbanas. O tempo de retardo (*Lag Time*) foi considerado correspondente a 60% dos tempos de concentração dos trechos de rio. Conforme recomendado por Pinheiro (2011), para os tempos de concentração inferiores a 5 minutos, foi adotado o valor mínimo de 5 minutos, devido à precisão dos aparelhos que fornecem dados para as relações Intensidade – Duração - Frequência (IDF), associados às chuvas de projeto.

$$t_c = 0,0195 * S_e^{-0,385} * L^{0,77} \quad (1)$$

Onde, t_c é o tempo de concentração (min), L o comprimento axial (m) e S_e a declividade média em m/m.

O comprimento dos rios principais foi obtido pela ferramenta de calculadora de campo no QGIS e a declividade média foi calculada pelo método de declividade equivalente constante S_3 de Villela e Mattos (1975), apresentado pela Equação (2):

$$S_3 = \left[\frac{\sum L_i}{\sum \left(\frac{L_i}{\sqrt{S_i}} \right)} \right]^2 \quad (2)$$

Onde: S_3 : declividade equivalente constante [m/m]; L_i : comprimento de cada trecho [m]; S_i : declividade de cada trecho [m/m].

Assim, calculou-se os tempos de retardo pelo tempo de concentração para cada sub-bacia e trechos de rio (Tabela 2). Para a propagação de cheias nos trechos de rios (*reach*) foi utilizado o método *Lag*, seguindo a mesma lógica de ser composto por uma parcela do tempo de concentração. Vale enfatizar que os trechos do rio do modelo hidrológico (*reach*) e os trechos do rio da bacia como um todo, não são os mesmos. Os

trechos de 1 a 5 são mais informativos e são diferenciados pelas variações de revestimento, singularidades e geometria.

Tabela 2. Quantitativos de áreas referente a cada tipologia de uso e ocupação.

Sub-bacias /Trechos de rio	Área de drenagem (km ²)	Comprimento do rio principal (m)	Declividade equivalente do rio principal (m/m)	Tempo de concentração (min)	Lag Time (min)
SB-1	0,156	594,345	0,1873	5,08	3,05
SB-2	0,065	425,759	0,1367	5,00	3,00
SB-3	0,023	143,882	0,0776	5,00	3,00
SB-4	0,051	201,220	0,2086	5,00	3,00
SB-5	0,127	721,583	0,0612	9,08	5,45
SB-6	0,178	694,063	0,1449	6,32	3,79
SB-7	0,056	621,938	0,0235	11,71	7,03
SB-8	0,116	662,566	0,0982	7,09	4,25
SB-9	0,040	204,986	0,0083	7,44	4,46
SB-10	0,080	453,200	0,0990	5,27	3,16
SB-11	0,032	495,215	0,0220	10,08	6,05
Reach-0	-	143,882	0,0776	5,00	3,00
Reach-1	-	721,583	0,0612	9,08	5,45
Reach-2	-	621,938	0,0235	11,71	7,03
Reach-3	-	204,986	0,0083	7,44	4,46
Reach-4	-	285,220	0,0071	10,20	6,12

Chuvas de projeto

Para os cenários de 2007 e 2024, as precipitações de projeto foram obtidas por meio da Equação IDF, resultante de uma interpolação que utilizou o Método do Inverso da Quinta Potência de localidades conhecidas, fornecida pelo software Plúvio versão 2.1, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa – UFV.

$$i = \frac{838,136 \cdot TR^{0,188}}{(t + 9,632)^{0,710}} \quad (3)$$

Onde, i = intensidade máxima de chuva (mm/h), TR = Tempo de retorno (anos) e t = duração da chuva (minutos).

Foi adotado o primeiro quartil com 50% probabilidade de excedência, que é recomendado por Huff (1967) para precipitações com duração

inferior a 6 horas. Realizou-se a simulação as durações de 30 a 120 minutos, tendo em vista que bacias pequenas e urbanizadas tendem ter a duração crítica em durações mais curtas.

Avaliação da capacidade hidráulica das estruturas de macrodrenagem

No ano de 2023, um evento de inundação ocorreu no bairro Barro Preto, especificamente na Travessa Monsenhor Rafael Coelho – Trecho 2. De acordo com informações fornecidas pela Defesa Civil de Mariana (2023), a travessa está localizada sobre um canal revestido de concreto, onde a lâmina de água atingiu 1,5 metros. Este evento ocorreu no dia 12 de fevereiro de 2023, durante a tarde, com uma precipitação de 63,9 mm em uma duração de 60 minutos.

Além da população diretamente afetada no Trecho 2 (Travessa), a população à jusante, no Trecho 4, também foi impactada (Figura 5). No mesmo evento, no trecho à jusante registrado pela Defesa Civil, foi observada uma lâmina de água de aproximadamente 80 centímetros acima do canal, conforme marcas deixadas nas paredes e medidas *in loco*.



Figura 5. Inundação do Trecho 4 a jusante do bueiro.

Foto: Redes sociais (fevereiro/2023).

Em visitas de campo, foi realizada a medição da geometria do canal do Trecho 4 e do emboque do Trecho 5 (Figura 6). Os locais são retangulares, com declividade média de 0,0206 m/m no Trecho 4. Não há como ter certeza se a geometria do Trecho 5 varia ao longo do trajeto, sendo difícil avaliar a capacidade mediante a tais incertezas. Mas, entende-se que a largura do emboque continuou a mesma do Trecho 4 - com 3,00 metros, porém a altura do canal de concreto reduziu de 1,30 para 1 metro em termos de geometria da seção.



Figura 6. Canal aberto (Trecho 4) com emboque do canal fechado (Trecho 5).

Não foi possível também avaliar a capacidade hidráulica do Trecho 2 (Travessa) e Trecho 3 (Bueiro), devido ao desconhecimento da geometria do canal revestido e da singularidade, e pela dificuldade de acesso para medições em campo. Apesar do Trecho 4 ter dimensões conhecidas na medição *in loco* de 2024, não se tem o conhecimento se a altura do canal era a mesma em 2023 quando tal Trecho era revestido.

À luz do exposto, para avaliar a capacidade hidráulica das estruturas de macrodrenagem da bacia em estudo, foi analisada a capacidade do Trecho 4, porém considerando a seção geométrica do emboque do Trecho 5, pois tal Trecho é a seção de controle devido ao estrangulamento geométrico.

Aplicando a Equação IDF (Equação 3) para o evento de fevereiro de 2023, pode-se dizer que a chuva que atingiu a bacia naquele evento corresponde a um TR de 10 anos. Sendo assim, foi comparada a vazão de pico referente a cada cenário para o evento de inundação de 2023 (TR de 10 anos), considerando a seção crítica do Trecho 5 e a duração real do evento de 1 hora. Na sequência, foi verificada a capacidade hidráulica do canal considerando o TR de 25 anos e a duração crítica, conforme recomendação técnica

para projetos de canais de macrodrenagem, que adotam um TR de 25 anos (Brasil, 2020).

Assim, com o suporte do software SisCCoH versão 1.1, verificou-se a capacidade hidráulica dos trechos em análise, considerando-o como canal, em escoamento livre, de seção regular e uniforme. Conforme especificado no manual técnico do software (Alexandre; Baptista; BARCELOS, 2019), é possível selecionar uma das variáveis a serem calculadas como a profundidade de fluxo, rugosidade de Manning, a vazão ou a declividade. A vazão é calculada pela equação de Manning (Equação 4), a profundidade se dá pela razão da área molhada e largura superior, a velocidade é por meio da Equação da continuidade (Equação 5) e o número de Froude (Equação 6).

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I} \quad (4)$$

$$Q = U \cdot A \quad (5)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot A}} \quad (6)$$

Onde: U: velocidade (m/s); Q: a vazão (m³/s); Rh: Raio hidráulico (m); I: Declividade de fundo média (m/m); A: área da seção (m); Fr: número de Froude; g: aceleração da gravidade (m/s²)

O número de Froude divide o escoamento em 3 tipos de regime:

- Fr < 1: Escoamento subcrítico (ou fluvial)
- Fr = 1: Escoamento crítico
- Fr > 1: Escoamento supercrítico (ou torrencial)

Resultados e Discussão

Conforme a Tabela 3, percebe-se as mudanças significativas na bacia em termos de uso e ocupação do solo. As zonas residenciais aumentaram em mais de três vezes (aumento de 255%), tendo reduções significativas das áreas de pastagens (redução de 71,7%). Essa mudança não afeta apenas visualmente, mas também influencia na dinâmica de escoamento superficial das precipitações. Em termos de CN, tiveram aumentos consideráveis de áreas impermeáveis em decorrência de tal mudança ao longo do tempo como pode ser observado na Tabela 4.

Para o cenário de 2024, a duração crítica (duração que produziu a maior vazão de pico) para os TR de 10, 25 e 50 anos foi de uma hora (60 minutos). Já para o cenário de 2007, a duração crítica para os TR de 10, 25 e 50 anos foi de 1 hora e meia (90 minutos). Considerando as durações críticas supracitadas, as vazões e volumes gerados em cada cenário são apresentadas na Tabela 5, os volumes na Tabela 7 e os hidrogramas de cada TR são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9.

Ao comparar os hidrogramas dos cenários de 2007 e 2024, nota-se uma similaridade com os hidrogramas hipotéticos para áreas urbanizadas e não urbanizadas descritos por Tucci (2007).

Tabela 3. Quantitativos de áreas referente a cada tipologia de uso e ocupação.

Tipologia (Uso e Ocupação)	Cenário de 2007		Cenário de 2024		Aumento/Redução Percentual
	Área m ²	Percentual	Área m ²	Percentual	
Pastagens	518.252,00	56,05%	146.662,20	15,86%	-71,70%
Solo exposto	135.352,00	14,64%	117.955,40	12,76%	-12,85%
Vegetação arbórea	111.010,00	12,01%	91.214,66	9,86%	-17,83%
Zonas residenciais	160.026,77	17,31%	568.808,51	61,52%	+255,45%

Tabela 4. Resumo do CN ponderado calculado para cada sub-bacia.

Sub-bacias	Cenário de 2007		Cenário de 2024	
	CN Ponderado	Percentual da Área impermeável	CN Ponderado	Percentual da Área impermeável
SB-1	82,08	0,20%	83,48	17,66%
SB-2	82,76	19,10%	89,44	82,68%
SB-3	82,00	0,00%	85,25	74,92%
SB-4	82,00	0,00%	88,81	85,77%
SB-5	79,07	1,13%	83,83	72,75%
SB-6	80,37	9,52%	89,68	92,07%
SB-7	71,71	18,45%	74,34	48,34%
SB-8	83,45	10,94%	91,40	99,51%
SB-9	78,12	57,68%	86,03	82,37%
SB-10	85,12	65,86%	89,32	93,02%
SB-11	88,48	94,39%	92,89	99,99%

Tabela 5. Resumo das vazões de pico e volumes em cada cenário.

Cenário	TR 10		TR 25		TR 50		Duração crítica
	Qmáx. (m³/s)	Volume (m³)	Qmáx. (m³/s)	Volume (m³)	Qmáx. (m³/s)	Volume (m³)	
2007	14,5	33.700	19,5	43.800	24,0	53.000	1,5 hora
2024	27,8	48.100	33,6	58.200	38,8	67.100	1 hora
Aumento Percentual	92%	43%	72%	33%	62%	27%	-

No presente estudo, o cenário de 2007 comporta-se como uma área não urbanizada, enquanto o de 2024 assemelha-se a uma área urbanizada. Essa evolução no uso e ocupação do solo resultou em uma vazão de pico para 2024 significativamente superior à de 2007, com um aumento percentual variando entre 62% e 92% para os tempos de retorno de 50 e 10 anos, respectivamente. Ou seja, a taxa de aumento da vazão é maior quando o tempo de retorno da precipitação é menor. Em relação ao tempo correspondente ao pico do hidrograma, observou-se uma redução entre 33% e 42%, implicando que o volume de água chegará mais rápido em uma bacia mais urbanizada, com mais áreas impermeáveis.

Resultados semelhantes foram identificados por Quinonez Fernandez (2019) na bacia do córrego Matilde-cuê, no Paraná, ao considerar os cenários dos anos de 1950 e 2013. Nesse estudo, o impacto nas vazões máximas apresentou um aumento de 103% para o TR de 2 anos e 66,8% para o TR de 20 anos para a duração de 1 hora (duração crítica do estudo). Em termos de comparação, para o TR de 10 anos encontrou um aumento de 75% na vazão de pico e o presente estudo, para o mesmo TR, teve 92% de aumento. Os aumentos percentuais estão bem próximos, sendo que tal diferença se deve às condições particulares e período de análise de cada localidade.

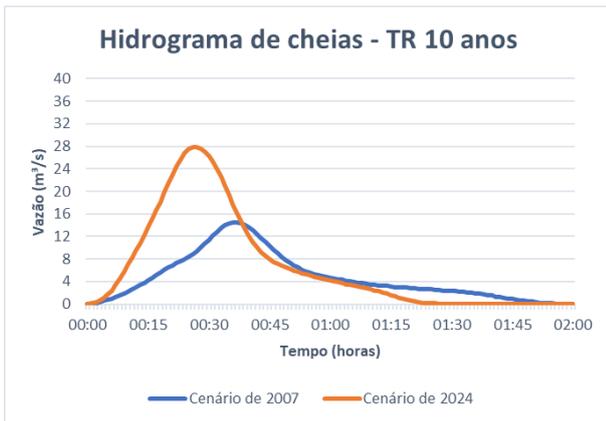


Figura 7. Hidrograma de cheias referente ao TR de 10 anos.

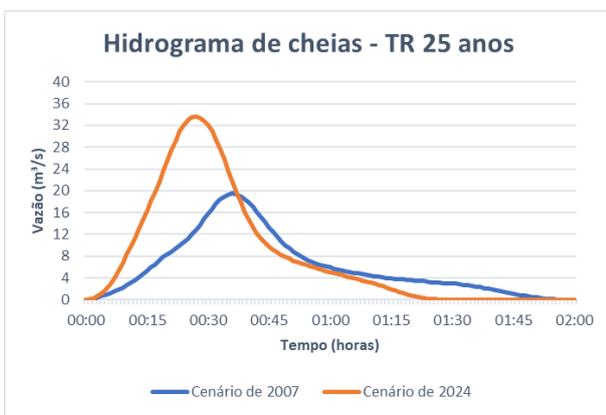


Figura 8. Hidrograma de cheias referente ao TR de 25 anos.

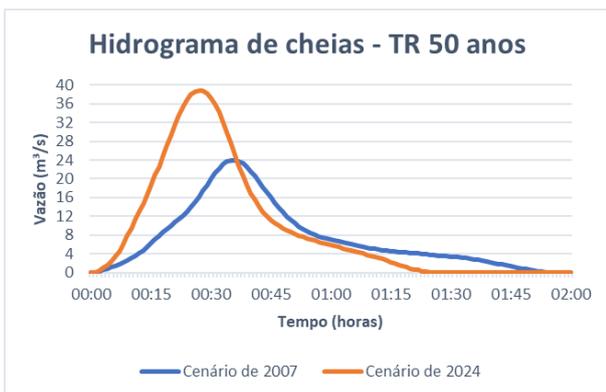


Figura 9. Hidrograma de cheias referente ao TR de 50 anos.

Ao analisar os resultados obtidos para o cenário de 2024, percebe-se que o aumento da vazão de pico para o TR de 50 anos (62%) é inferior ao do TR de 10 anos (92%). Isso se explica

pelo limite de absorção do solo em relação ao evento pluviométrico; quando o solo atinge a saturação, qualquer incremento além da capacidade de infiltração é convertido em escoamento superficial. Resultados similares foram obtidos em outros estudos, como o de Palla e Gnecco (2015), que observaram reduções nas vazões de pico de 45%, 37% e 31% para os TR de 2, 5 e 10 anos, respectivamente, ao utilizarem cenários de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto (*Low Impact Development – LID*).

No que se refere aos volumes gerados, conforme demonstrado na Tabela 5, observou-se um aumento variando entre 14.100 e 14.400 m³ de 2007 a 2024, considerando as chuvas simuladas. Esse incremento representa aumentos de 43%, 33% e 27% para os TR de 10, 25 e 50 anos, respectivamente.

Diante disso, os principais impactos da urbanização, conforme analisado pelos hidrogramas, foram: o aumento da vazão máxima, a antecipação do pico e o incremento do volume de escoamento superficial. Em relação às inundações localizadas, Tucci (2007) ressalta que tais fenômenos podem ser provocados por estrangulamento da seção de rios, remansos devido à macrodrenagem, rios principais e lagos, ou por erros na execução de projetos de drenagem. Esses tipos de inundações podem ocorrer de forma isolada ou combinada.

Avaliando a capacidade hidráulica do canal para o evento de inundação de 2023, simulou-se as vazões de pico correspondentes à duração da chuva de 1 hora de cada cenário no software SisCCoH 1.1 (Tabela 6). Destaca-se a consideração da altura de 1 metro do canal do Trecho 4 para 2023.

Tabela 6. Parâmetros hidráulicos do Trecho 4 para o evento de inundação (TR de 10 anos).

Parâmetros	Cenário de 2007	Cenário de 2024
Área molhada (m ²)	2,35	3,75
Número de Froude	2,22	2,12
Profundidade do fluxo (m)	0,76	1,25
Vazão (m ³ /s)	13,8	27,8
Velocidade (m/s)	6,06	7,41

Para o TR de 10 anos (Figura 10), o cenário de 2007 gera a vazão de 13,8 m³/s para a duração de 1 hora, resultando em uma borda livre de 24 centímetros. Já para o cenário de 2024 (Figura 11), o canal extravasaria, considerando a vazão de 27,8 m³/s e mesma duração, com uma lâmina d'água de 25 centímetros acima do canal. As velocidades em ambos os cenários estão bem elevadas, mas apenas o cenário de 2007 está próximo do limite máximo suportado pelo revestimento de concreto, de 6,00 m/s, conforme especificado por Chavez (2016).

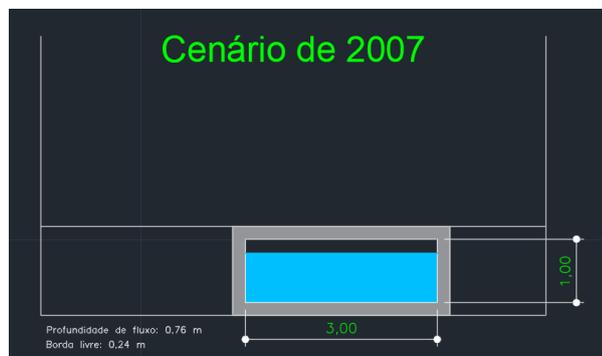


Figura 10. Seção transversal do canal para o cenário de 2007.

Como mostra a Tabela 6, o número de Froude resultante foi de 2,22 e 2,12 para os cenários de 2007 e 2024, respectivamente. Logo, como o número de Froude é maior que 1, o regime de escoamento é supercrítico em ambos os cenários considerados. Isso significa que a velocidade do fluxo é maior do que a velocidade das ondas de

superfície. Tal regime de escoamento é menos estável e mais turbulento em comparação ao regime subcrítico.



Figura 11. Seção transversal do canal para o evento de fevereiro de 2023.

A diferença da lâmina d'água encontrada no evento de inundação (25 centímetros) destoa dos 80 centímetros registrados em 2023 para o Trecho inundado (Figura 11), próximo aos Trechos 4 e 5. Entende-se que de 2023 a 2024 não teve mudanças significativas no uso do solo, justificando a comparação em anos diferentes. Assim, pode-se levantar algumas hipóteses dessa diferença:

- Não se tem conhecimento das profundidades reais em 2023, devido ao nível de assoreamento elevado e modificações na altura do canal com a retirada do revestimento;
- A transição do bueiro (Trecho 3) para o canal revestido (Trecho 4), em 2023, tinha uma abertura, o que poderia ter gerado turbulência pelo choque da onda da cheia na tampa do canal de concreto na época;
- A transição do Trecho 1 (maior extensão e trecho natural) e o Trecho 2 (começo do trecho canalizado) teve uma mudança brusca na declividade média do rio, o que poderia ter gerado um ressalto hidráulico pela transição dos regimes de escoamento, potencializando a altura da lâmina

d'água somado com a intensidade pluviométrica do evento;

- Em alguns dos trechos a montante, possivelmente na transição do Trecho 1 para o Trecho 2, pode ter acontecido alguma obstrução de um objeto grande, como um tronco de árvore ou algum outro objeto móvel, restringido o fluxo de escoamento e/ou causando uma sobre-elevação do nível de água, atingindo a população do Trecho 2;
- Ao longo dos trechos, há variações na geometria do canal, com alargamentos e estrangulamentos pontuais tanto em largura quando em profundidade.

Esta verificação hidráulica teve como objetivo validar o modelo hidrológico. Apesar da lâmina d'água não ter atingido a cota inundada no ano de 2023, o modelo foi capaz de validar que o canal não suportou o evento em si. Diante disso, pode-se verificar se o canal do Trecho 4 suporta a vazão de um TR de 25 anos, considerando a geometria medida em campo em 2024 (após a abertura do revestimento).

Considerando a avaliação para o cenário de 2024, quanto à recomendação técnica, a Tabela 7 apresenta os parâmetros hidráulicos calculados para uma condição atual. Assim, considerando a vazão de 33,6 m³/s para a duração crítica de 1 hora e meia, o canal do Trecho 4 não suporta a vazão para o TR de 25 anos, tendo uma lâmina d'água excedente de 14 centímetros. A velocidade de 7,78 m/s está acima da recomendação de 6,00 m/s para o revestimento de concreto (Chavez, 2016) e o número de Froude (2,02) indica que o regime de escoamento é supercrítico. Destaca-se que a altura do canal considerada para este caso foi de 1,30 metros, conforme detalhado no item 3.4. A Figura 12 apresenta a seção transversal do Trecho 4, com os resultados obtidos.



Figura 12. Seção transversal do Trecho 4 em 2024, dimensões medidas *in loco*.

Tabela 7. Parâmetros hidráulicos do cenário de 2024 para TR de 25 anos.

Parâmetros	Trecho 4
Área molhada (m ²)	4,32
Número de Froude	2,07
Profundidade do fluxo (m)	1,44
Vazão (m ³ /s)	33,6
Velocidade (m/s)	7,79

Considerações Finais

Nos últimos 17 anos, a bacia do Barro Preto passou por um intenso processo de urbanização. Muitas áreas foram ocupadas irregularmente, sem a devida fiscalização quanto ao cumprimento dos parâmetros urbanísticos exigidos pela legislação vigente à época. Como consequência, houve um aumento considerável das áreas impermeabilizadas por edificações e pavimentação asfáltica. As zonas residenciais expandiram-se em 255,45%, enquanto as áreas naturais sofreram reduções de até 71,70%. Todas as sub-bacias experimentaram aumentos expressivos nas áreas impermeáveis.

Diante desse cenário, o impacto das vazões de escoamento superficial no sistema de macrodrenagem foi considerável. Em 17 anos, para o tempo de retorno (TR) de 10 anos, a vazão de pico quase dobrou, com um aumento de 92%;

para os TR de 25 e 50 anos, os aumentos foram de 72% e 62%, respectivamente. O sistema de macrodrenagem existente (Trecho 4) não é capaz de suportar as vazões simuladas para o cenário de 2024.

É importante destacar que a verificação pontual não é a abordagem mais adequada. O ideal seria a realização de um modelo hidráulico fluvial, com o levantamento cadastral de todas as seções e singularidades. No entanto, devido à ausência desse levantamento topobatimétrico das seções e às incertezas associadas às variações ao longo do canal, torna-se extremamente difícil desenvolver e calibrar o modelo, bem como gerar a mancha de inundação no terreno para verificar a cota de inundação em diferentes pontos.

O evento de 2023, que atingiu a região, correspondeu a uma chuva com TR de 10 anos. Com essa referência, em 2007, o canal do Trecho 4 era capaz de suportar tal chuva; entretanto, em 2024, o canal não suporta, apresentando uma lâmina d'água excedente de 25 centímetros. Ressalta-se que a modelagem hidráulica é a mais indicada para calibrar os parâmetros com base nas cotas obtidas no evento de 2023. No entanto, não foi possível realizar essa modelagem devido à falta de dados cadastrais do sistema de macrodrenagem.

Evidencia-se, portanto, a importância da elaboração de um Plano Diretor de Drenagem Urbana para o município, visando diagnosticar as redes existentes e definir especificações técnicas a serem adotadas para estudos hidrológicos e hidráulicos. Embora o Plano Diretor estabeleça diretrizes para a adoção de medidas mais sustentáveis e de mitigação de inundações, é necessário um compromisso político para garantir o cumprimento dessas diretrizes.

A realização de limpezas e desassoreamento no córrego é fundamental para assegurar o

desempenho adequado das estruturas de macrodrenagem existentes na região. Recomenda-se a ampliação do Trecho 4, em conjunto com medidas de desassoreamento, programas de educação da população local e políticas públicas. Essa combinação pode minimizar e mitigar os impactos das inundações que têm afetado e continuarão a afetar a área de estudo. No entanto, eventos superiores aos TR projetados continuarão a provocar inundações, tornando necessária a implantação de sistemas de alerta adequados para as populações em áreas de risco.

Uma outra medida adicional de destaque seria o incentivo ao uso de Técnicas Compensatórias (TC) em Drenagem Urbana, como política pública e orientação técnica, que visa facilitar a infiltração de águas pluviais e reduzir o escoamento superficial, amortecendo a vazão de pico (Oliveira; Barbassa; Gonçalves, 2016). Estudos em Belo Horizonte demonstraram reduções expressivas da vazão de pico, como 20,6% na bacia do Córrego Cachoeirinha (Pereira et al., 2022) e até 51% (Santos et al., 2022), variando conforme a área disponível para aplicação das TC.

Portanto, o processo de urbanização, tanto ordenado quanto desordenado, na bacia do Barro Preto causou impactos ambientais e antrópicos significativos, seja pelo despejo de efluentes domésticos e resíduos sólidos, seja pelas inundações que atingiram as regiões mais baixas da bacia. Assim, recomenda-se que o município priorize a drenagem urbana e estabeleça políticas públicas eficazes para o uso e ocupação do solo, além de medidas para reduzir os impactos ambientais e a poluição dos corpos hídricos.

Referências

ALEXANDRE, Gladstone Rodrigues; BAPTISTA, Márcio Benedito; BARCELOS, Josiane Marinho. **Manual Técnico do SisCCoH**. Belo Horizonte: Pimenta de Ávila Consultoria e Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, 2019.

BRASIL. **Manual para apresentação de propostas para sistemas de drenagem urbana sustentável e de manejo de águas pluviais**. Brasília: Ministério das Cidades, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/selecoes-2023/eixos/arquivos/manual-propostas-ogu_drenagem-urbana. Acesso em: 07 ago. 2023.

CAMPOS, Fábio Luiz Mação; DOMINGUES, Mariana Soares; COELHO, André Luiz Nascentes; BRESSIANI, Danielle de Almeida. Modelagem hidrológica da bacia do Rio Iconha - ES: potencialidades, desafios e soluções para pequenas bacias hidrográficas. **Geoconexões**, v. 3, n. 20, p. 78–104, 2024. DOI: 10.15628/geoconexes.2024.17478. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/geoconexoes/article/view/17478>. Acesso em: 6 jan. 2025.

CHAVEZ, J. D. R. **Escoamento – Canais, Fórmulas Empíricas, perda de carga**. Notas de Aula - HIDROLOGIA E HIDRÁULICA APLICADAS (LOB1216). Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Departamento de Ciências Básicas e Ambientais. Lorena: [s.n.]. Acesso em: 30 jun. 2024.

CLIMATE DATA. **Clima: Mariana—MG**. 2023. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/mariana-25091/>. Acesso em: 30 jul. 2023.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH-DOCE). **A bacia**. 2024. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>. Acesso em: 1 jun. 2024

DEFESA CIVIL DE MARIANA. 2023. Inundação na Travessa Monsenhor Rafael Coelho, Barro Preto, Mariana - MG.

FERREIRA, Willian José; SILVA, Rodrigo Cesar da; BAIÃO, Cheila Flávia de Praga; RODRIGUES, Rafael Barbosa; RIBEIRO, Thiago Fantus, TARGA, Marcelo dos Santos. Modelagem hidrológica em bacias urbanizadas: O impacto da mudança do uso do solo pelo método CN. **Aracê**, v. 7, n. 1, p. 741–757, 2025. DOI: 10.56238/arev7n1-044. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/2703>. Acesso em: 6 jan. 2025.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967. DOI 10.1029/WR003i004p01007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR003i004p01007>. Acesso em: 28 jul. 2023.

OLIVEIRA, Alinne Prado de; BARBASSA, Ademir Paceli; GONÇALVES, Luciana Márcia. Aplicação de

técnicas compensatórias de drenagem na requalificação de áreas verdes urbanas em Guarulhos-SP. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, p. 1114-1128, 2016.

PALLA, Anna; GNECCO, Ilaria. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 361–368, 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.06.050

PEREIRA, Matheus Filipe da Silva; SOUZA, Tamara Daiane de; SOUZA, Isabela Veiga de; CAMPOS, Júlia Pereira; FLORIANO, Marcela de Oliveira. Aplicação de técnicas compensatórias na bacia Córrego Cachoeirinha com modelagem hidráulico-hidrológica. *In*: 32^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, 2022, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://congressoabes.com.br/anais/>. Acesso em: 12 jul. 2023.

PINHEIRO, Mario Cicareli. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

QUINONEZ FERNANDEZ, Oscar Vicente. Efeitos da mudança do uso da terra sobre a vazão máxima no Córrego Matilde-Cuê, Marechal Cândido Rondon, Paraná. **Revista Geografar**, v. 14, n. 1, p. 131-148, 2019.

SANTOS, Ana Luiza; FELIX, Ana Luíza S. S.; OLIVEIRA, Júlia M. et al. Modelagem hidráulico-hidrológica com o uso de técnicas compensatórias: estudo de caso para a bacia Córrego Itaituba, município de Belo Horizonte. *In*: XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2022, Brasília. **Anais [...]**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://anais.abrhydro.org.br/job.php?> Acesso em: 12 jul. 2023.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos; JACOMINE, Paulo Klinger Tito; ANJOS, Lúcia Helena Cunha dos; OLIVEIRA, Virlei Álvaro de; LUMBRERAS, José Francisco; COELHO, Maurício Rizzato; ALMEIDA, Jaime Antonio de; ARAÚJO FILHO, José Coelho de; OLIVEIRA, João Bertoldo de; CUNHA, Tony Jarbas Ferreira (org.). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (5^o ed)**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. E-book. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SIBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2023

SARTORI, Aderson. **Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN**. 2010. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo/UNICAMP, Campinas, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=465332>. Acesso em: 24 abr. 2024.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos**. v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.

SOUZA, Leonardo Andrade de. **Diagnóstico do meio físico como contribuição ao ordenamento territorial do município de Mariana (MG)**. 2004. 182 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/910c0dd4-d4d9-47a2-8a75-d919877874c8>. Acesso em: 30 jul. 2023.

TUCCI, Carlos E. M (org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Editora da UFRGS/ABRH, 1993. 9ª reimpressão: 2020.

TUCCI, Carlos. E. M (org.). **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/Rhama, 2007.

TUCCI, C. E. **Modelos hidrológicos**. 2a ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005.

TUCCI, C. E. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 1993.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill, 1975.