

Influência da escolha do método de determinação do tempo de concentração na incerteza da vazão de projeto em bacias urbanas: estudo de caso

Isabella Machado de Almeida¹; Alexandre Senna de Araújo²; Luciana Emanuelle Sales Magalhães³; Tathiana Rodrigues Caetano⁴ & Hersília de Andrade e Santos⁵

Resumo: O dimensionamento de estruturas de drenagem urbana baseia-se na estimativa da vazão de projeto a partir de modelos hidrológicos. Sua definição resulta da integração entre características da bacia, propriedades da chuva e critérios de risco. Um parâmetro que assume relevância estratégica nos estudos de dimensionamento hidráulico é o tempo de concentração (T_C). Existem diversos métodos de determinação do T_C . Apesar disso, é limitada a discussão sobre a sensibilidade da vazão de projeto frente às diferentes formulações do T_C . Em muitas ocasiões, esse parâmetro é adotado de forma padronizada, sem avaliação das incertezas associadas. Portanto, é importante avaliar a influência da escolha do método de estimativa do T_C na vazão de projeto e no dimensionamento hidráulico das estruturas. No presente estudo, foi selecionada a Bacia do Ribeirão Ressaca, em Belo Horizonte/MG. Foram utilizados nove métodos diferentes de estimativa de T_C e considerados cinco tempos de retorno (T_R) distintos. Em cada combinação de T_C e T_R , foi utilizada a curva intensidade-duração-frequência (IDF) da estação Belo Horizonte e calculada a vazão de projeto. Os resultados obtidos apresentaram o T_C médio de 37,92 minutos, entre as metodologias utilizadas, e um desvio padrão de 10,49 minutos para mais ou para menos em relação ao valor médio de T_C . As vazões de projeto obtidas, apresentaram variações na ordem de 60%, entre a mínima e a máxima, conforme o T_R . Ressalta-se a importância da determinação do T_C , sendo que tal parâmetro influencia o dimensionamento de dispositivos hidráulicos.

Abstract: The design of urban drainage structures is based on estimating the design discharge using hydrological models. Its definition results from the integration of watershed characteristics, rainfall properties, and risk criteria. A parameter of strategic importance in hydraulic design studies is the time of concentration (T_C). There are several methods for determining T_C ; however, discussion on the sensitivity of design discharge to different T_C formulations remains limited. In many cases, this parameter is adopted in a standardized manner, without evaluating the associated uncertainties. Therefore, it is important to assess the influence of the choice of T_C estimation method on the design discharge and on the hydraulic sizing of structures. In this study, the Ribeirão Ressaca watershed, located in Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, was selected. Nine different methods for estimating T_C were used, and five distinct return periods (R_p) were considered. For each combination of T_C and R_p , the intensity-duration-frequency (IDF) curve from the Belo Horizonte station was applied, and the design discharge was calculated. The results showed an average T_C of 37.92 minutes across the methodologies used, with a standard deviation of ± 10.49 minutes relative to the mean T_C . The design discharges obtained exhibited variations on the order of 60% between the minimum and maximum values, depending on the R_p . The importance of determining T_C is emphasized, as this parameter directly influences the sizing of hydraulic structures.

1) CEFET-MG, Avenida Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte/MG, CEP: 30510-000, (31) 3319-6824, imachado2192@gmail.com

2) CEFET-MG, Avenida Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte/MG, CEP: 30510-000, (31) 3319-6824, alexandresenna@hotmail.com

3) CEFET-MG, Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíça, Belo Horizonte/MG, CEP: 30421-169, (31) 3319-7120, luciana.sales.magal@gmail.com

4) CEFET-MG, Avenida Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte/MG, CEP: 30510-000, (31) 3319-6824, tathiana.cefetmg@gmail.com

5) CEFET-MG, Avenida Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte/MG, CEP: 30510-000, (31) 3319-6824, hsantos@cefetmg.br

Palavras-Chave: Tempo de concentração; Dimensionamento hidráulico; Modelo hidrológico; Bacia urbana.

Keywords: Time of concentration; Hydraulic dimensioning; Hydrologic model; Urban basin.

INTRODUÇÃO

O dimensionamento de estruturas de drenagem urbana e de controle de cheias baseia-se na estimativa da vazão de projeto, parâmetro que sintetiza a resposta hidrológica da bacia contribuinte frente a eventos extremos de precipitação. A definição dessa vazão resulta da integração entre características fisiográficas da bacia, propriedades da chuva e critérios de risco admissível. Nesse processo, dois parâmetros assumem papel central: o tempo de concentração (T_C) e o tempo de retorno (T_R) (TUCCI, 2015).

O T_C representa o intervalo de tempo necessário para que toda a área da bacia contribua simultaneamente para a seção de controle após o início da precipitação efetiva. Trata-se de uma variável de ligação entre as características geomorfológicas da bacia e a magnitude da resposta hidrológica estimada por meio da vazão (BALL, 1994; ALMEIDA *et al.*, 2013).

Entretanto, a determinação do tempo de concentração apresenta elevada variabilidade metodológica. Diversas formulações empíricas coexistem na literatura técnica, desenvolvidas a partir de bases experimentais distintas e aplicáveis a diferentes condições de declividade, uso do solo e regime hidrológico (EVANGELISTA *et al.*, 2023). Em bacias urbanas de pequena área, pequenas diferenças na estimativa do T_C podem resultar em variações expressivas na intensidade de chuva selecionada e, conseqüentemente, na vazão de pico calculada. Assim, a escolha do método de determinação do T_C não constitui etapa meramente operacional, mas decisão que influencia diretamente o dimensionamento hidráulico (SULTAN *et al.*, 2022).

Apesar de sua importância no modelo hidrológico, ainda é limitada a discussão sobre a sensibilidade da vazão de projeto frente às diferentes formulações de T_C e às escolhas do T_R . Em muitos casos, tais parâmetros são adotados de forma padronizada ou normativa, sem avaliação explícita das incertezas associadas e de seus impactos técnicos e econômicos (BENGTTSSON, 1991; DOTTO *et al.*, 2014).

Diante desse cenário, torna-se relevante investigar de que forma a escolha do método de estimativa do T_C influencia a vazão de projeto e, conseqüentemente, o dimensionamento hidráulico das estruturas. A análise crítica dessa influência contribui para aprimorar a tomada de decisão em projetos de drenagem, incorporando uma abordagem mais consciente quanto aos níveis de risco e às incertezas inerentes ao processo hidrológico.

MÉTODOS

O presente estudo foi estruturado com o objetivo de avaliar a influência da escolha do método de estimativa do tempo de concentração (T_C) na vazão de projeto e nas implicações para o dimensionamento hidráulico, a partir de uma análise de sensibilidade aplicada a uma bacia urbana real.

A bacia selecionada foi a sub-bacia do Ribeirão Ressaca (Código 4130811), localizada na cidade de Belo Horizonte/MG (Figura 1), em área urbana consolidada, que apresenta sistema de microdrenagem definido e ocupação predominantemente impermeabilizada. Para fins de comparação, foi utilizada uma única bacia urbana como unidade de análise, de modo a manter

constantes as características geométricas, fisiográficas e pluviométricas, permitindo isolar o efeito do T_C sobre os resultados do modelo hidrológico. Foram levantados os seguintes parâmetros físicos:

- Área de drenagem (A);
- Comprimento hidráulico principal (L);
- Declividade média do talvegue (S);
- Percentual de impermeabilização;
- Coeficiente de escoamento superficial (C).

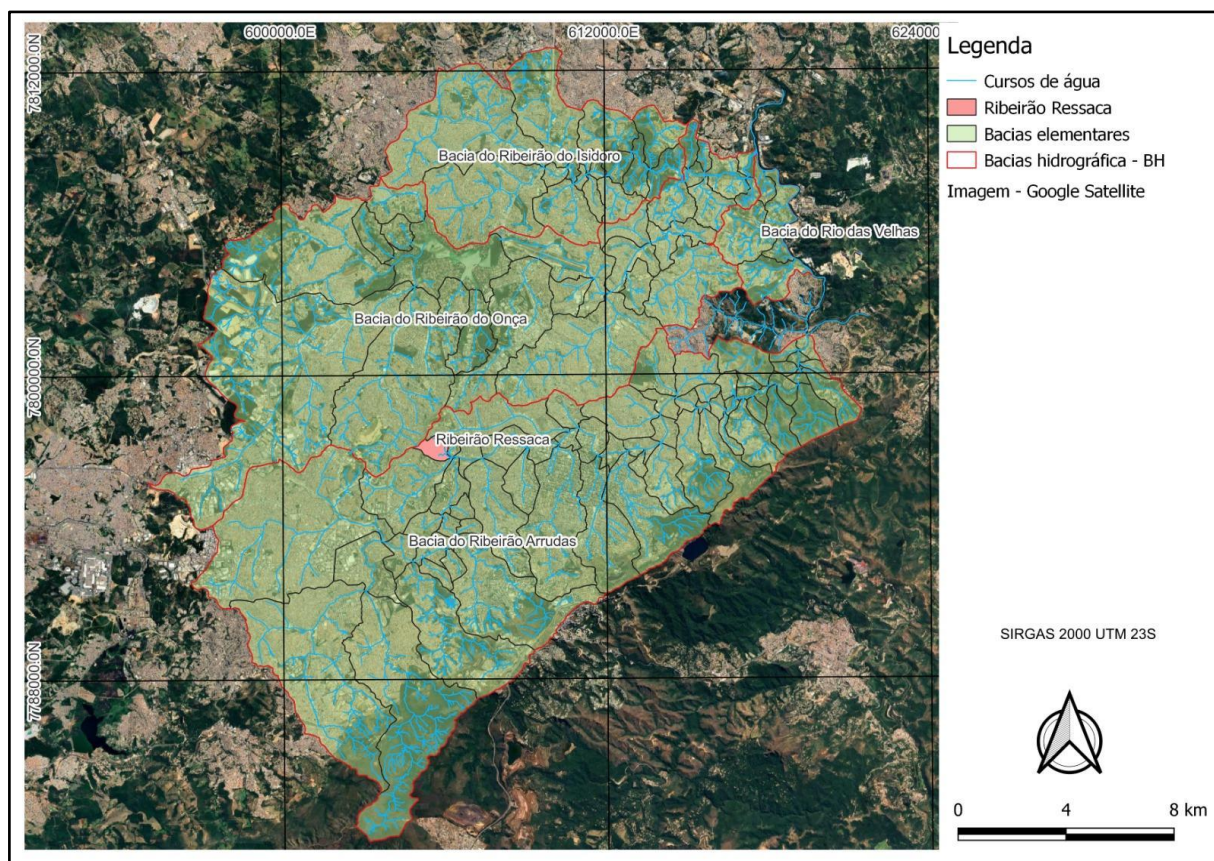


Figura 1 – Mapa de localização da Bacia do Ribeirão Ressaca.

A intensidade de precipitação foi obtida a partir da curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) oficial da localidade, ajustada pela equação paramétrica descrita na Equação (1). Os parâmetros foram obtidos no *software* Plúvio 2.1.

$$i_{T,d} = 0,76542 \cdot d^{-0,7059} \cdot P^{0,5360} \cdot \mu_{T,d} \quad (1)$$

Onde:

- $i_{T,d}$: Intensidade (em mm/h), para o tempo de retorno (em anos) e duração (em horas);
- d : Duração da chuva (em horas);
- P : Precipitação média anual no local (mm/ano);
- $\mu_{T,d}$: Quantil de frequência regional associado ao tempo de retorno e à duração da precipitação (adimensional), calculado conforme Equação (2).

$$\mu_{T,d} = \beta - \left[\alpha \left(\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right) \right] \quad (2)$$

Os valores de β e α são obtidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de β e α

Duração da chuva	15 min	30 min	45 min	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas
β	0,933	0,936	0,932	0,930	0,931	0,930	0,930
α	0,217	0,209	0,221	0,229	0,226	0,229	0,220

Fonte: SGB (2014).

Foi adotado o valor de 1505 mm/ano como precipitação média anual, que corresponde à média das precipitações acumuladas anuais das Normais Climatológicas 1931-1960, 1961-1990 e 1991-2020 da estação meteorológica Belo Horizonte (Código 83587) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021).

O T_C foi determinado por meio da aplicação de diferentes equações empíricas, selecionadas de forma a representar distintas bases conceituais e domínios de aplicação. Os métodos considerados foram: Carter, Corps Engineers, Dooge, Kirpich, Picking, Pilgrim & McDermott, Temez, Ven te Chow e Williams, que estão representados nas Equações (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10) e (11), respectivamente.

$$T_C = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \quad (3)$$

$$T_C = 0,191 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19} \quad (4)$$

$$T_C = 0,365 \cdot A^{0,41} \cdot S^{-0,17} \quad (5)$$

$$T_C = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad (6)$$

$$T_C = 0,0883 \cdot L^{\frac{2}{3}} \cdot S^{-\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$T_C = 0,76 \cdot A^{0,38} \quad (8)$$

$$T_C = 0,3 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19} \quad (9)$$

$$T_C = 0,160 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (10)$$

$$T_C = 0,272 \cdot \left(\frac{A^{0,4} \cdot L}{\sqrt{\frac{4A}{\pi}} \cdot S^{-0,2}} \right) \quad (11)$$

Onde:

- T_C : tempo de concentração (h);
- L : comprimento do curso d'água principal (km);
- S : declividade do curso d'água principal (m/m);
- A : área da bacia hidrográfica (km²).

Cabe registrar que tais formulações foram desenvolvidas a partir de conjuntos de dados distintos, cada qual associado a faixas específicas de área de drenagem, de comprimento e de declividade do talvegue e a determinadas condições de uso e ocupação do solo. A bacia em estudo - de pequeno porte (aproximadamente 1,08 km²), baixa declividade e ocupação urbana consolidada - situa-se no domínio de pequenas bacias para o qual essas equações são usualmente recomendadas, ainda que parte delas tenha sido calibrada em contextos fisiográficos e climáticos diversos, fator que, por si, antecipa parcela da variabilidade observada nos resultados.

Cada método foi aplicado utilizando os mesmos parâmetros geométricos da bacia, permitindo avaliar a influência da variabilidade do T_C decorrente exclusivamente da escolha metodológica. Foram considerados múltiplos cenários de tempo de retorno relativos aos valores usuais de projeto de dimensionamento hidráulico de drenagem urbana, a saber: 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Para cada combinação do método de determinação do T_C em relação ao T_R , foi calculada a intensidade correspondente na curva IDF e, conseqüentemente, a vazão de projeto, pelo Método Racional, representado na Equação (12).

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (12)$$

Onde:

- C: coeficiente de escoamento superficial (adimensional);
- i: intensidade da chuva de projeto (mm/h);
- A: área de drenagem (km²).

A influência relativa do T_C e do T_R , na vazão de projeto foi avaliada por meio da comparação das vazões obtidas nos diferentes métodos de T_C para um mesmo T_R , e pela determinação da variação relativa máxima da vazão, dada pela Equação (13):

$$\Delta Q(\%) = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\min}} \times 100 \quad (13)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os parâmetros físicos da bacia hidrográfica, local de estudo. A delimitação da área de contribuição, o traçado do talvegue e a declividade média foram obtidos a partir da base topográfica pública disponibilizada na plataforma Geonetwork da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 2026), que reúne os metadados geográficos do município. Ressalta-se que a resolução espacial dos dados topográficos de acesso público impõe limitação à precisão do comprimento e da declividade do talvegue, o que deve ser considerado na interpretação dos resultados.

Tabela 2 - Características físicas da sub-bacia do Córrego Ressaca

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Área da bacia	A	1.079.063,4	m ²
Comprimento do talvegue	L	1.286,8	m
Cota da crista	C1	832	m
Cota do exutório	C2	815	m
Desnível altimétrico (C1 - C2)	Δh	17	m
Declividade média	S	0,013211	m/m
Curve Number	CN	87,38	adimensional

A partir das Equações (3) a (11) e com os dados informados na Tabela 2, foram calculados os tempos de concentração. A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados em ordem crescente. Observam-se diferenças expressivas entre as metodologias, sendo divididas basicamente em dois grupos: dos nove métodos avaliados, quatro resultaram em T_C entre 25 e 32 minutos (Carter, Kirpich, Picking e Corps Engineers) e os cinco demais apresentaram T_C entre 44 e 50 minutos (Williams, Ven te Chow, Pilgrim & McDermott, Dooge e Temez), de modo que o maior valor encontrado é praticamente o dobro do menor.

Tabela 3 - Tempos de concentração

Método	Equação	Tempo de concentração (min)	Média (min)	Desvio padrão (min)	Coefficiente de variação (%)
Carter	(3)	24,97	37,92	10,49	28
Kirpich	(6)	25,55			
Picking	(7)	26,51			
Corps Engineers	(4)	31,58			
Williams	(11)	43,88			
Ven te Chow	(10)	45,05			
Pilgrim & McDermott	(8)	46,94			
Dooge	(5)	47,14			
Temez	(9)	49,60			

Tais discrepâncias decorrem menos das variáveis empregadas - predominantemente o comprimento (L) e a declividade (S) do talvegue, com a área (A) em parte das formulações - e mais dos coeficientes e dos expoentes que cada autor calibrou a partir de conjuntos de dados e de condições fisiográficas e climáticas distintos. Exemplo elucidativo é o par Corps Engineers–Temez: ambas as equações adotam os mesmos expoentes e diferem apenas no coeficiente multiplicativo (0,191 e 0,300, respectivamente), o que, por si, faz o T_C de Temez superar o de Corps Engineers em cerca de 57% e o transfira de um grupo ao outro. Confirma-se, assim, que a divergência entre os métodos é, em grande parte, herança do contexto experimental de cada formulação, e não consequência de diferenças estruturais de modelo. O Método de Carter forneceu o menor valor (24,97 minutos), o que não constitui anomalia, mas o comportamento esperado de uma formulação concebida para bacias urbanas de pequeno porte e sensível à declividade. Os elevados desvio padrão (10,49 minutos) e coeficiente de variação (28%) sintetizam essa dispersão e reforçam a importância da escolha criteriosa do método para a obtenção do T_C de uma bacia hidrográfica.

Utilizando os T_R de 5, 10, 25, 50 e de 100 anos, obteve-se a intensidade de precipitação em cada duração de chuva considerada. A Figura 2 ilustra as curvas IDF do local de estudo.

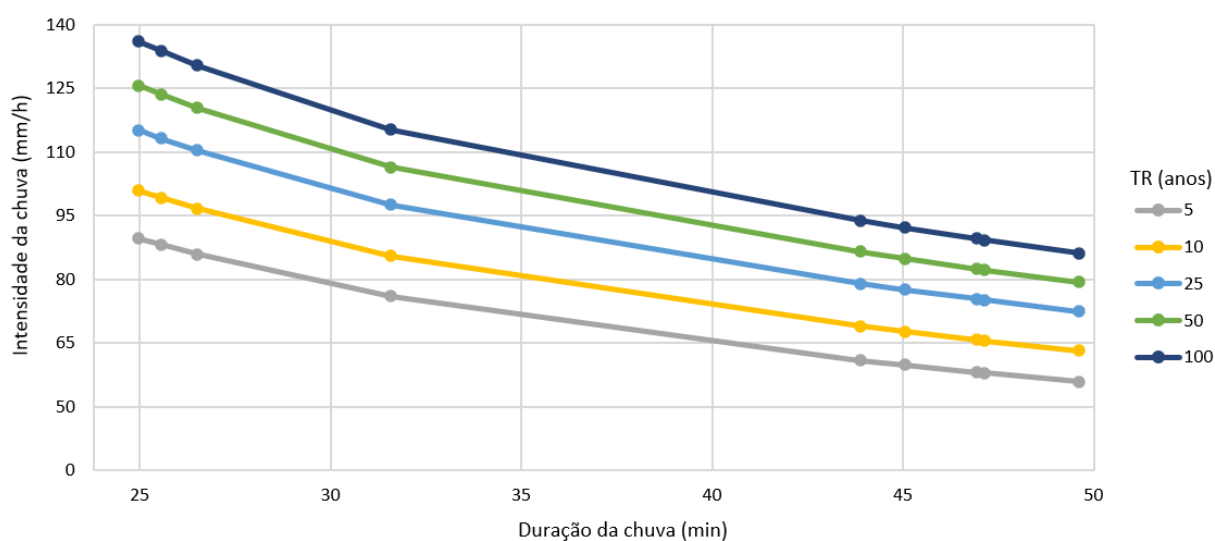


Figura 2 – Curvas IDF da Bacia do Ribeirão Ressaca.

Com os valores de intensidade da chuva, obtidos em cada combinação de T_C e T_R , foram calculadas as vazões de projeto da bacia hidrográfica com o Método Racional. A Figura 3 mostra os resultados encontrados.

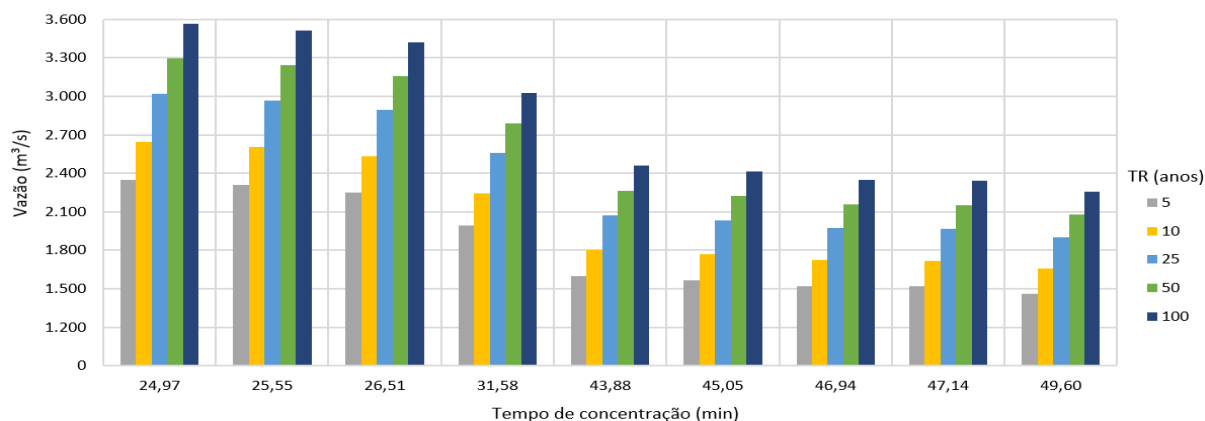


Figura 3 – Vazões de projeto da Bacia do Ribeirão Ressaca.

A partir dos resultados encontrados na Figura 3, percebe-se que a escolha do método de tempo de concentração influencia bastante na vazão de projeto, podendo chegar a índices de variação na ordem de 60%, que representa uma grande diferença desse parâmetro que é peça-chave em qualquer estudo hidrológico e/ou hidráulico. A Tabela 4 mostra os percentuais de variação, entre a vazão mínima e a vazão máxima, em cada T_R considerado. Os resultados obtidos foram calculados a partir da Equação (13).

Tabela 4 - Variação das vazões de projeto

Tempo de retorno	5 anos	10 anos	25 anos	50 anos	100 anos
$\Delta Q_{\min-\max}$	61%	60%	59%	58%	58%

CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento do presente trabalho, pode-se perceber que o tempo de concentração influencia diretamente o resultado do modelo hidrológico utilizado na determinação das vazões de projeto, no âmbito do dimensionamento e da verificação de sistemas de drenagem urbana.

A aplicação de nove formulações empíricas a uma mesma bacia, mantidas constantes as características fisiográficas, geométricas e pluviométricas, conduziu a um T_C médio de 37,92 minutos, com desvio padrão de 10,49 minutos e coeficiente de variação de 28%. Essa dispersão não é aleatória: as metodologias organizaram-se em dois grupos – quatro formulações entre 25 e 32 minutos e cinco entre 44 e 50 minutos –, refletindo as diferentes bases experimentais e os distintos coeficientes de calibração de cada equação, e não diferenças estruturais entre os modelos. Disso decorre que a escolha do método de estimativa do T_C não é etapa meramente operacional, mas decisão de projeto com efeito direto sobre o resultado.

Propagada ao Método Racional, a variabilidade do T_C traduziu-se em diferenças relativas entre a vazão mínima e a máxima da ordem de 60% (de 58% a 61%), praticamente invariantes em relação aos tempos de retorno avaliados. Diferenças dessa magnitude repercutem no hidrograma de cheia e no pico de vazão e, por conseguinte, no dimensionamento e no custo das estruturas, podendo resultar em superdimensionamento ou em subdimensionamento e em níveis de risco distintos dos pretendidos.

Recomenda-se, portanto, a seleção criteriosa do método de estimativa do T_C em coerência com as características da bacia e com a faixa de validade de cada formulação, bem como o emprego de mais de uma metodologia como medida de controle da incerteza. Quanto às abordagens de base física, optou-se, neste estudo, por não empregar o método cinemático, em razão de duas limitações: a dificuldade de definição das velocidades de escoamento e a qualidade da topografia disponível, uma

vez que os dados de acesso público apresentam tamanho de pixel que restringe a precisão na obtenção da declividade e no traçado dos percursos de fluxo. Por essa razão, a análise foi restrita às formulações empíricas, recomendando-se o emprego do método cinemático em trabalhos futuros, condicionado à disponibilidade de topografia de maior detalhamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG) pelo apoio para participação no evento e pela infraestrutura. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do Projeto Universal [456390/2014-6], e pela bolsa de produtividade em pesquisa da autora HAS [308413/2025-3]. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio com infraestrutura de equipamentos [APQ-05415-23] e pela concessão de bolsa de mestrado ao autor ASA. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, I. K.; ANACHE, J. A. A.; ALMEIDA, V. R.; ALVES SOBRINHO, T. (2013). *Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica*. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Brasil, pp. 1-8.
- BALL, J. E. (1994). *The influence of storm temporal patterns on catchment response*. Journal of Hydrology, 158(3-4), pp. 285-303.
- BENGTTSSON, L. (1991). *Effective concentration time for design storms in complex urban basins*. Atmospheric Research, 27(1-3), pp. 137-150.
- DOTTO, C. B. S.; KLEIDORFER, M.; DELETIC, A.; RAUCH, W.; MCCARTHY, D. T. (2014). *Impacts of measured data uncertainty on urban stormwater models*. Journal of Hydrology, 508, pp. 28-42.
- EVANGELISTA, G.; WOODS, R.; CLAPS, P. (2023). *Dimensional analysis of literature formulas to estimate the characteristic flood response time in ungauged basins: a velocity-based approach*. Journal of Hydrology, 627, Part B, pp. 130409.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. (2021). *Gráfico comparativo precipitação acumulada (mm) || Estação: Belo Horizonte (83587)*. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/MG/83587>. Acesso em: 25 abr. 2026.
- PBH - PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. (2026). *Geonetwork*. Disponível em: <https://geonetwork.pbh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>. Acesso em: 19 abr. 2026.
- SGB - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Atlas Pluviométrico do Brasil: Equações Intensidade-Duração-Frequência. Município: Belo Horizonte*. Belo Horizonte: CPRM, 2014. 16pp.
- SULTAN, D.; TSUNEKAWA, A.; TSUBO, M.; HAREGEWEYN, N.; ADGO, E.; MESHESHA, D. T.; FENTA, A. A.; EBABU, K.; BERIHUN, M. L.; SETARGIE, T. A. (2022). *Evaluation of lag time and time of concentration estimation methods for tropical watersheds in Ethiopia*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 40, pp. 101025.
- TUCCI, C. E. M. (2015). *Inundações urbanas*. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (Org.). *Drenagem urbana*. Porto Alegre: ABRH, pp. 15-36.