

TEMPO DE CONCENTRAÇÃO NA SUB BACIA DO BAIXO DOCE, BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS E RURAIS: MODELAGEM E TRANSPORTE DE FLUÍDOS

Luiza Bruna Gonçalves Ferreira¹, Fernando Neves Lima²

RESUMO

Com o avanço da urbanização, cresce a demanda por sistemas de drenagem mais eficientes frente aos eventos hidrológicos extremos. O tempo de concentração (T_c) é um parâmetro essencial na hidrologia, representando o intervalo necessário para que a água da chuva percorra a maior distância dentro de uma bacia hidrográfica até o exutório. Sua estimativa precisa é fundamental para o dimensionamento de estruturas hidráulicas e para o planejamento urbano. Em Minas Gerais, diversas fórmulas empíricas estrangeiras são utilizadas e adaptadas para estimar o TC em bacias urbanas e rurais, variando conforme características físicas da bacia. O estudo realizado na sub-bacia do Rio Doce analisa essas fórmulas, comparando seus erros percentuais de erro relativo, com o objetivo de orientar sua aplicabilidade em projetos de engenharia. A metodologia baseia-se em dados de estações fluviométricas para determinar o tempo de pico (T_p) e estabelecer relações chuva-vazão, visando identificar a equação mais adequada ao caso estudado. Os resultados pretendem contribuir para o dimensionamento mais preciso de estruturas de drenagem, evitando tanto o subdimensionamento, que pode causar inundações, quanto o superdimensionamento, que implica em custos excessivos.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas hidráulicas. Hidrologia. Tempo de concentração.

ABSTRACT

With the advance of urbanization, there is growing demand for more efficient drainage systems in the face of extreme hydrological events. Concentration time (T_c) is an essential parameter in hydrology, representing the time required for rainwater to travel the longest distance within a watershed to the outlet. Its accurate estimation is fundamental for the design of hydraulic structures and for urban planning. In Minas Gerais, several foreign empirical formulas are used and adapted to estimate the TC in urban and rural basins, varying according to the physical characteristics of the basin. The study conducted in the Rio Doce sub-basin analyzes these formulas, comparing their relative error percentages, with the aim of guiding their applicability in engineering projects. The methodology is based on data from fluviometric stations to determine the peak time (T_p) and establish rainfall-runoff relationships, aiming to identify the most appropriate equation for the case studied. The results aim to contribute to the more accurate dimensioning of drainage structures, avoiding both undersizing, which can cause flooding, and oversizing, which implies excessive costs.

KEYWORDS: Hydraulic structures. Hydrology. Concentration time.

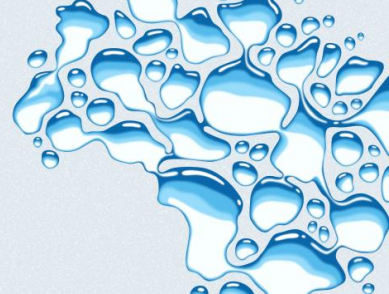
INTRODUÇÃO

A análise do tempo de concentração (T_c) é essencial para o planejamento de sistemas hidráulicos, especialmente em regiões com histórico de eventos extremos, como a sub-bacia do Rio Doce. Esse parâmetro representa o tempo necessário para que a água da chuva percorra a maior distância até o exutório, influenciando diretamente na vazão de pico. Segundo Silveira (2005), o desempenho das fórmulas de TC varia significativamente entre bacias urbanas e rurais, sendo necessário avaliar criteriosamente a escolha do método conforme as características locais. Na sub-

¹ Luiza Bruna Gonçalves Ferreira. Universidade Federal de Itajubá. Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água. Itabira, Minas Gerais, Brasil. E-mail: luizabrunne@gmail.com.

² Fernando Neves Lima. Instituto de Engenharias Integradas Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos-PROFAGUA. Universidade Federal de Itajubá. Itabira, Minas Gerais, Brasil. E-mail: lima.fernando@unifei.edu.br.





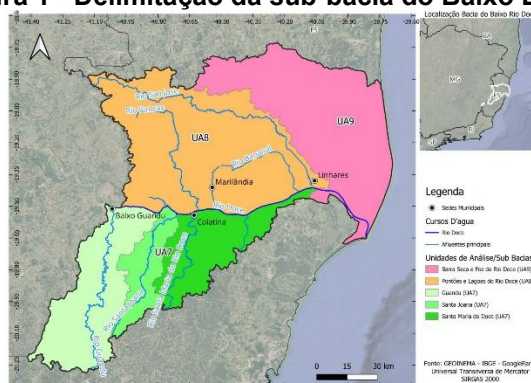
bacia do Baixo Doce, que inclui áreas urbanas e rurais, a escolha da fórmula adequada para estimar o Tc é decisiva para o desempenho das estruturas de drenagem. Métodos como Kirpich, Giandotti, SCS e Onda Cinemática oferecem abordagens distintas, cada uma com aplicabilidade específica conforme as características da bacia. Porto (1991) destaca que o Tc pode ser estimado por equações baseadas em características físicas da bacia ou por métodos como hidrogramas tempo-área, que considera o uso e ocupação de solo, sendo especialmente útil em cenários com mudanças no uso da terra. O Tc também é fundamental para entender a resposta das bacias às chuvas, especialmente em áreas urbanas, onde a impermeabilização do solo intensifica os riscos de inundações. A modelagem hidrológica e o transporte de fluidos são ferramentas importantes para prever impactos e orientar o planejamento urbano e ambiental.

Apesar dos avanços, ainda há incertezas na previsão da poluição difusa gerada por enxurradas, devido à complexidade dos processos envolvidos. Por isso, estudar o Tc e os fatores que o influenciam como área, declividade, tipo de solo, uso do solo e rede de drenagem é crucial para uma gestão hídrica eficiente e sustentável.

MATERIAIS E MÉTODOS

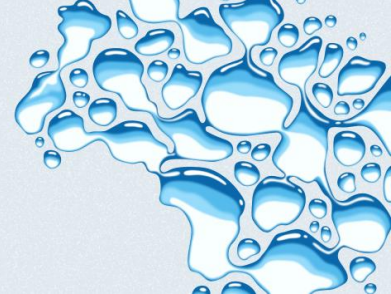
Este trabalho está sendo desenvolvido com foco na análise do tempo de concentração (Tc) na sub-bacia do Baixo Rio Doce, que abrange áreas urbanas e rurais com distintas características fisiográficas. A metodologia proposta envolve a seleção e aplicação de nove fórmulas empíricas e semiempíricas amplamente utilizadas na prática profissional, como Kirpich, SCS, Onda Cinemática, entre outras. A escolha dessas fórmulas baseia-se em sua recorrência em projetos técnicos e na experiência da autora em estudos hidrológicos. Estão sendo coletados dados físicos da bacia, como área, declividade, comprimento do talvegue e uso do solo, além de registros históricos de eventos extremos. A análise comparativa entre as fórmulas está em andamento, com apoio de ferramentas de geoprocessamento (SIG), visando compreender as variações nos resultados e orientar a escolha mais adequada para diferentes contextos.

Figura 1 - Delimitação da sub-bacia do Baixo Doce.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As fórmulas selecionadas para análise incluem abordagens empíricas, semiempíricas e conceituais, cada uma com diferentes pressupostos e aplicabilidades. Entre elas estão: Kirpich, indicada para pequenas bacias com escoamento superficial; SCS - Método Cinemático, que considera parâmetros físicos como rugosidade e declividade; Ondas Cinemáticas, sensível às condições climáticas e à cobertura do solo; GB Williams, baseada em comprimento e declividade; Ven Te Chow, voltada para áreas agrícolas; Corps Engineers, desenvolvida para grandes projetos; SCS Lag, que foca no tempo de retardo; Simas-Hawkins, indicada para bacias



rurais; e George Ribeiro, uma fórmula nacional adaptada às condições brasileiras. Cada equação será aplicada à mesma bacia para fins comparativos, permitindo avaliar sua precisão e adequação ao contexto local.

Tabela 1 – Fórmulas de Tempo de Concentração com Expressões

Fórmulas	Expressão Matemática	Descrição
SCS - Método Cinemático	$T_c = 1000/60 \times \Sigma(L/V)$	Baseada em velocidade média do fluxo, rugosidade, declividade e comprimento do talvegue.
GB Williams	$T_c = (0,61 \times L) / (A^{0,11} \times S_e^{0,20})$	Utiliza comprimento do canal, área da bacia e declividade média.
Ondas Cinemáticas	$T_c = 7,35 \times n^{0,6} \times i^{-0,4} \times L^{0,6} \times S^{-0,3}$	Considera rugosidade de Manning, intensidade da chuva e declividade.
Kirpich	$T_c = 0,0663 \times L^{0,77} \times S^{-0,385}$	Indicada para bacias pequenas, considera comprimento e diferença de altitude.
Ven Te Chow	$T_c = 0,160 \times L^{0,64} \times S^{-0,32}$	Adaptação do SCS para áreas agrícolas, usa fatores de deflúvio e climáticos.
Corps Engineers	$T_c = 0,191 \times L^{0,76} \times S^{-0,19}$	Desenvolvida para grandes projetos, usa comprimento do talvegue e declividade média.
SCS Lag	$T_c = 0,057 \times (1000/CN - 90,7) \times L^{0,8} \times S^{-0,5}$	Foca no tempo de retardo, utiliza CN, comprimento do talvegue e declividade.
Simas-Hawkins	$T_c = 0,322 \times A^{0,594} \times L^{-0,594} \times S^{-0,150} \times S_{SCS}^{0,313}$	Considera área da bacia e declividade, indicada para bacias rurais.
George Ribeiro	$T_c = 0,222 \times (1,05 - 0,2p^{-1}) \times LS^{-0,04}$	Fórmula nacional, baseada em comprimento do talvegue e declividade.

Fonte: Autoria própria (2025).

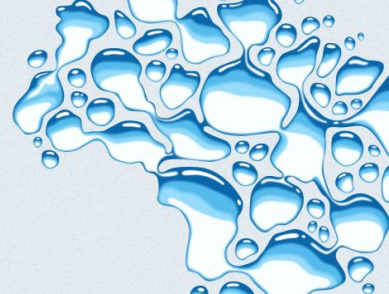
RESULTADOS

Os resultados preliminares obtidos até o momento indicam variações significativas entre os tempos de concentração estimados pelas diferentes fórmulas aplicadas à sub-bacia do Baixo Rio Doce. A aplicação das nove equações selecionadas revelou que os valores de T_c podem variar consideravelmente, mesmo quando aplicados sobre os mesmos dados físicos da bacia. Fórmulas como Kirpich apresentaram resultados mais compatíveis com áreas rurais e pequenas bacias, enquanto métodos como SCS - Método Cinemático e Ondas Cinemáticas demonstraram maior sensibilidade às condições urbanas, especialmente em regiões com alta impermeabilização do solo.

Essas diferenças reforçam a importância de considerar as características específicas da bacia hidrográfica no momento da escolha da fórmula, como o tipo de escoamento predominante, a cobertura vegetal, a declividade e o uso do solo. A coleta de dados físicos e históricos está sendo consolidada para permitir uma análise mais robusta e comparativa entre os métodos.

DISCURSSÕES

A partir dos resultados iniciais, observa-se que a escolha da fórmula para estimar o tempo de concentração não deve ser feita de forma padronizada, mas sim com base em uma análise criteriosa das condições locais da bacia. A diversidade de abordagens entre os métodos estudados evidencia que cada fórmula possui limitações e pressupostos que podem impactar diretamente na precisão dos resultados.



A discussão está sendo aprofundada com base na análise dos dados obtidos, buscando identificar os fatores que mais influenciam essas diferenças. A etapa atual do estudo está focada na validação dos resultados por meio de comparação com registros históricos de eventos extremos e modelagens hidrológicas, utilizando ferramentas de geoprocessamento (SIG) e dados de estações fluviométricas. Essa abordagem permitirá avaliar a confiabilidade de cada fórmula e propor diretrizes técnicas para sua aplicação em projetos de engenharia hídrica, contribuindo para o planejamento urbano e a mitigação de riscos hidrológicos.

CONCLUSÃO

Embora este estudo ainda esteja em fase de desenvolvimento, os resultados preliminares já evidenciam a complexidade envolvida na estimativa do tempo de concentração em bacias hidrográficas com diferentes características físicas e padrões de ocupação do solo. A aplicação de múltiplas fórmulas empíricas e semiempíricas tem demonstrado variações significativas nos valores obtidos, o que reforça a importância de uma abordagem criteriosa e contextualizada na escolha do método mais adequado.

A continuidade da pesquisa permitirá aprofundar a análise comparativa entre os modelos, validar os resultados com dados observacionais e propor diretrizes técnicas que contribuam para o dimensionamento mais preciso de estruturas hidráulicas. Espera-se que, ao final do estudo, seja possível oferecer subsídios práticos para profissionais da área de recursos hídricos, promovendo soluções mais eficazes e sustentáveis para o planejamento urbano e rural, especialmente em regiões vulneráveis como a sub-bacia do Baixo Rio Doce.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá – Campus Theodomiro Carneiro Santiago, pela estrutura e apoio institucional ao desenvolvimento deste trabalho. Ao professor orientador Fernando, pela orientação técnica e acadêmica ao longo da pesquisa. Aos colegas de curso, pela troca de experiências e incentivo contínuo durante a graduação. Aos familiares, pelo suporte emocional e motivacional em todas as etapas da jornada acadêmica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, I. K.; ANACHE, J. A. A.; ALMEIDA, V. R.; ALVES SOBRINHO, T. **Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH, 2013.
- ARAUJO, B. A. M.; SILVEIRA, C. S.; SOUZA, J. L.; MAIA JUNIOR, J. V. F.; ALMEIDA, F. A. F.; STUDART, T. M. C. **Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias urbanas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., [s.d.]. Anais [...].
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988.
- PIROLI, E. L. **Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas**. São Paulo: Editora Unesp Digital, 2022.
- PORTO, R. M. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Edusp, 1991.
- SILVEIRA, A. L. **Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 1, p. 5–23, jan./mar. 2005.