

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS E O MÉTODO DA VELOCIDADE NA ESTIMATIVA DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Comparative study between empirical equations and the velocity method for estimating time of concentration

Frederico Carlos Martins de Menezes Filho ¹, Rafael Alan de Sá ²

Recebido em 02 de janeiro de 2019; aceito em 18 de junho de 2019; disponível on-line em 29 de junho de 2019.



PALAVRAS CHAVE:

Hidrologia urbana;
 Tempo de concentração;
 Métodos empíricos;
 Método da velocidade.

KEYWORDS:

Urban hydrology;
 Time of concentration;
 Empirical methods;
 Velocity method.

RESUMO: Tão importante para projetos hidrológicos, a estimativa do tempo de concentração (t_c) é realizada pela utilização de equações empíricas obtidas em estudos internacionais; desconsiderando-se, muitas vezes, os limites de aplicabilidade a que foram propostas. Não obstante, observa-se a não utilização do método da velocidade do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), o mais recomendado para a estimativa do referido tempo em bacias urbanas. Deste modo, o presente artigo objetivou analisar qual a estimativa de “ t_c ”, utilizando equações empíricas versus a adoção do método da velocidade, resulta no melhor ajuste de projeto. Para tal, compararam-se os valores obtidos entre os métodos por meio da construção de 168 cenários hipotéticos oriundos da combinação entre parâmetros como a declividade, a extensão do escoamento natural; do escoamento em canais rasos revestidos e do escoamento em canais artificiais. Calculou-se, então, para todos cenários, a vazão de projeto pelo Método Racional. Pela discrepância dos valores obtidos para os tempos de concentração e vazões entre as equações e o método da velocidade, ressalta-se a importância do levantamento em campo da bacia em estudo, bem como do conhecimento das faixas de aplicação de equações empíricas. Verificou-se que a influência das extensões de escoamentos em trechos naturais ou definidos, afetará sobremaneira nas vazões de projeto calculadas; demonstrando a importância da definição do método mais apropriado pelo projetista.

ABSTRACT: So important for hydrological projects, the estimation of the time of concentration (t_c), is realized by the use of empirical equations obtained in international studies. The limits of applicability to which they have been proposed are often disregarded. Nevertheless, the use of the NRCS (Natural Resources Conservation Service) velocity method, the most recommended for the estimation of “ t_c ” in urban basins, is not observed. Thus, the present paper aims to analyze the estimate of t_c using empirical equations versus the adoption of the velocity method. For this, the values obtained between the methods were compared by means of the construction of 168 hypothetical scenarios resulting from the combination of parameters such as slope, the extension of the sheet flow; the extension of the flow in shallow concentrated flow and open-channel flow. After this stage, the flow by the Rational Method was calculated for all scenarios. By the discrepancy of the values obtained for the times of concentration and flow between the equations and the speed method; we highlight the importance of the field survey of the basin under study, as well as the knowledge of the application ranges of empirical equations. As observed, the influence of the extensions of flows in natural or defined stretches will greatly influence peak flows; showing the importance of the definition of the most appropriate method by designer.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: menezesfilho.frederico@gmail.com (F. C. M. Menezes Filho)

Engenheiro Civil, Doutor, Professor Adjunto, Universidade Federal de Viçosa – Campus Rio Paranaíba (UFV-CRP).

² e-mail: rafaalmot92@gmail.com (R. A. Sá)

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa – Campus Rio Paranaíba (UFV-CRP).

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

O tempo de concentração (t_c) é um dos parâmetros mais importantes para estudos hidrológicos, seja para o cálculo de vazões, hidrogramas de projeto ou chuvas (SILVEIRA, 2005; FANG et al. 2008; ALMEIDA et al., 2014). Em aplicações práticas de engenharia, é utilizado como entrada em ferramentas comuns de projetos hidrológicos como o Método Racional ou o Método do Hidrograma Unitário (MICHAELIDIS, 2018), sendo um parâmetro principal para uma variedade de modelos hidrológicos modernos (GRIMALDI et al., 2012). Além disso, o " t_c " refere-se ao tempo, a partir do início da precipitação necessário para que toda a bacia contribua na seção de interesse, representando, assim, o tempo que leva a água dos limites da bacia para chegar a saída da mesma (VILLELA e MATTOS, 1975; MAGALHÃES, 1989; CANHOLI, 2005).

Nesse aspecto, conforme explicitam Amanthea e Nascimento (2015), a consideração do tempo de concentração como o tempo necessário para que toda a bacia contribua para a seção de estudo, presume a mesma como um reservatório para o escoamento superficial direto, geralmente representado pela combinação de efeitos de translação e armazenamento.

Azevedo Netto et al. (1998) e Gribbin (2009) definem, de modo similar, o tempo de concentração como o tempo necessário para o escoamento ocorrer do ponto hidráulicamente mais remoto, na bacia de drenagem, até o exutório.

Costa, Siqueira e Menezes Filho (2007) reafirmam a definição dada pelos autores supracitados, como o tempo gasto pela gota de água que precipita na cabeceira de uma bacia hidrográfica para chegar à seção transversal de interesse, como a seção de uma barragem, de uma ponte ou de um projeto de captação para abastecimento público.

Embora haja divergências quanto ao início da contagem do tempo de concentração e, como apontam Collischonn e Dornelles (2013), ser

um conceito relativamente abstrato, o mesmo depende de diversas características fisiográficas da bacia hidrográfica, sendo as mais frequentes, na formulação empírica: o comprimento, a declividade do talvegue ou curso d'água principal, a rugosidade do canal e alguns atributos de chuva (SHARIFI e HOSSEINI, 2011).

Silveira (2005) avaliou de maneira intensa o desempenho das fórmulas empíricas para a estimativa de tempos de concentração apresentando as limitações e possíveis usos fora das faixas previstas, por exemplo, equações obtidas para bacias urbanas e utilizadas para bacias rurais e vice-versa.

Como observa Azevedo Netto (1998), pela obtenção de dados como a declividade do talvegue ou curso d'água principal e o seu comprimento, tais equações têm sido usadas de maneira generalizada. Muitas vezes, pela grande quantidade de equações empíricas dispostas na literatura, é frequente o uso generalizado das mesmas sem a devida preocupação da acurácia e precisão de cada equação (WONG, 2005; SHARIFI e HOSSEINI, 2011).

Neste aspecto, além da não observância quanto às limitações de utilização das referidas equações como relatado por Silveira (2005), outro aspecto a ser levado em conta, por exemplo, para bacias urbanas é a desconsideração do escoamento em trechos de canais naturais rasos ou ainda sobre as vertentes da bacia, que seriam utilizados caso fossem adotados o enfoque cinemático ou o método da velocidade do *Natural Resources Conservation Service* (NRSC, 1986); numa abordagem contemplativa da divisão de trechos e da estimativa do tempo de percurso em cada parcela de escoamento.

Além da grande maioria dos métodos de cálculo para o tempo de concentração terem sido baseados em observações e medições experimentais em bacias rurais, a grande dispersão entre os valores calculados poderá incorrer em variações sensíveis das vazões de pico dos hidrogramas de projeto (CANHOLI, 2005).

Vale destacar que consoante Pruski, Brandão e Silva (2001), o erro na estimativa do (t_c) será tanto maior quanto menor for a duração considerada, uma vez que é maior a variação da intensidade de precipitação com o tempo nesta condição.

Ressalta-se, portanto, a grande importância da estimativa do tempo de concentração já que a subestimativa deste incorrerá na superestimativa das vazões de pico e vice-versa (FANG et al., 2008).

1.1. OBJETIVO

Neste contexto, o referido trabalho tem como objetivo comparar, por meio de cenários para uma bacia hipotética, os valores obtidos para o tempo de concentração, empregando equações empíricas utilizadas

para bacias urbanas e o método da velocidade, verificando-se, também, a influência na estimativa das vazões pelo Método Racional.

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho dividiu-se em sete etapas que são ilustradas no fluxograma da Figura 1.

2.1 METODOLOGIA COM ENFOQUE CINEMÁTICO

Consoante Canholi (2005), três tipos de escoamento encontram-se em bacias urbanas, a saber: o escoamento superficial, o escoamento em canais rasos e o escoamento em canalizações. Tais escoamentos e tempos respectivos, podem ser visualizados na Figura 2.

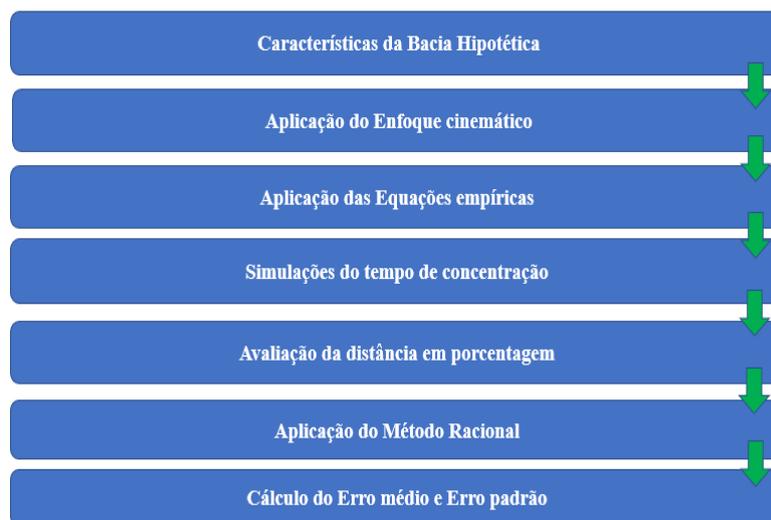


FIGURA 1: Fluxograma das etapas metodológicas.

FONTE: Autoria própria.

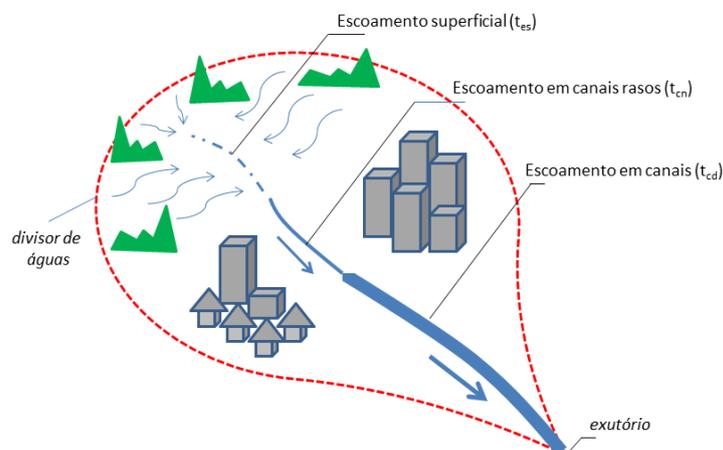


FIGURA 2: Bacia hipotética representando os tipos de escoamento em bacias urbanas. Legenda: t_{es} : tempo de escoamento superficial, t_{cn} : tempo em canais rasos e t_{cd} : tempo em canais definidos. **FONTE:** Autoria própria.

O método cinemático ou método da velocidade do NRCS, para o cálculo do tempo de concentração, traduz-se na soma dos tempos decorridos do escoamento em cada tipo de superfície, seja ela superfície natural, canal raso ou canal artificial.

Deste modo, a fim de comparar os valores dos tempos de concentração calculados por meio das equações empíricas e pelo enfoque cinemático, definiu-se uma bacia hipotética, ilustrada pela Figura 2 e com características dispostas no Quadro 1, com os respectivos escoamentos supracitados.

2.1.1 Tempo de escoamento em superfície

O tempo de escoamento em superfície (t_{es}) será definido considerando a faixa de 50 a 100 m a montante do talvegue, caracterizando-se por pequenas espessuras de lâminas d'água com velocidade baixa conforme descrevem Canholi (2005) e NRCS (1986). Este tempo depende da declividade, da rugosidade do terreno e da intensidade da chuva e foi obtido pela Equação 1.

$$t_{es} = \frac{0,091(n.L)^{0,8}}{P^{0,5}I^{0,4}} \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

t_{es} - tempo de escoamento superficial (h);

n - coeficiente de rugosidade de Manning;

L - extensão do trecho (m);

$P^{0,5}$ - lâmina precipitada em 24 horas com período de recorrência de 2 anos (mm);

I - declividade do terreno (m/m).

Os valores para o coeficiente de rugosidade de Manning podem ser consultados na literatura por meio de tabelas (WILKEN, 1978; PORTO, 1999; AKAN e HOUGHTALEN, 2003). A lâmina precipitada poderá ser obtida por meio de uma equação da intensidade de chuva definida para o local de estudo. Já a extensão e a declividade são determinadas em campo ou por meio do uso de mapas e/ou geoprocessamento.

2.1.2 Tempo de escoamento em canais rasos

Após o escoamento superficial, o escoamento passa-se a concentrar formando canais rasos, podendo ser calculado de modo cinemático, pela Equação 2 (CANHOLI, 2005 e NRCS, 1986).

$$t_{cn} = \frac{L}{3600.V} \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

t_{cn} - tempo de escoamento em canais rasos (h);

L - extensão do trecho (m);

v - velocidade (m/s).

Para a estimativa da velocidade média em canais rasos dispôs-se do gráfico apresentado na Figura 3.

Buscando apenas a utilização de equações no presente estudo, procedeu-se a linearização dos dados dispostos em gráfico di-log na Figura 3, executando-se um ajuste por modelo potencial.

QUADRO 1 : Características da bacia hipotética.

Canal artificial	Coeficiente de Manning	Profundidade(m)	Coeficiente de Runoff (c)
Retangular (concreto)	0,013*	0,15 a 0,60*	0,65**

FONTE: * AKAN e HOUGHTALEN (2003); ** WILKEN (1978).

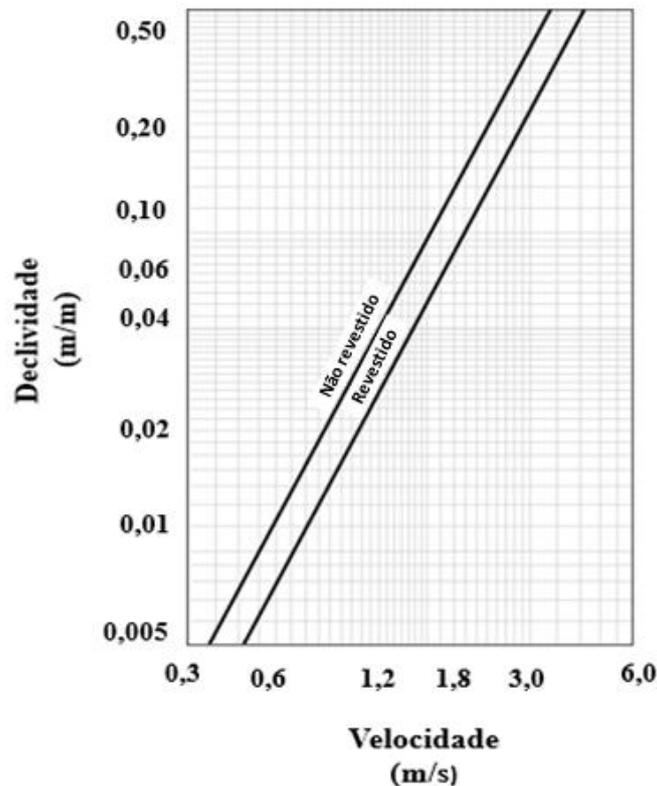


FIGURA 3: Velocidades médias estimadas para escoamento em canais rasos.

FONTE: Adaptado de NRCS (1986).

De posse das equações potenciais, com $R^2=0,99$, fez-se a linearização, obtendo-se a equação geral para o cálculo da velocidade em canais revestidos, conforme a Equação 3:

$$v = 10^{\left[\frac{(\log l + \log \alpha_1)}{\beta_1}\right]} \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

v = velocidade (m/s);
 l = declividade (m/m);
 $\alpha_1 = 0,0245$;
 $\beta_1 = 2,015$.

2.1.3 Tempo de escoamento em canalizações

O tempo de escoamento em canalizações pode ser obtido pela Equação 2, porém para a determinação da velocidade, utiliza-se a equação de Manning (Equação 4), conhecendo-se a seção do canal, declividade e a rugosidade.

$$V = \frac{1}{n} \times S^{\frac{1}{2}} \times Rh^{\frac{2}{3}} \quad \text{Eq. [4]}$$

Em que:

V = velocidade média do escoamento (m/s);
 n = coeficiente de rugosidade de Manning ($s/m^{5/2}$);

S = declividade longitudinal de fundo do canal (m/m);

$Rh^{2/3}$ = raio hidráulico do canal (m).

Considerou-se para a bacia hipotética, na definição do tempo de escoamento em canalizações, um canal retangular com base $B = 10$ m e profundidade $H = 5$ m.

2.1.4 Tempo de Concentração

Por fim, somam-se as três parcelas para estimar o tempo de concentração, conforme a Equação 5 (CANHOLI, 2005 e NRCS, 1986):

$$t_{cr} = t_{es} + t_{cn} + t_{cd} \quad \text{Eq. [5]}$$

Em que:

t_{cr} - tempo de concentração (horas);
 t_{es} - tempo de escoamento em superfície (horas);
 t_{cn} - tempo de escoamento em canais rasos (horas);
 t_{cd} - tempo de escoamento em canais ou galerias definidas (horas).

2.2 MÉTODOS EMPÍRICOS

As equações empíricas, utilizadas no presente trabalho, estão reunidas no Quadro 2. A escolha das mesmas pautou-se na consideração das equações definidas para bacias urbanas ou utilizadas para tal. Neste aspecto, destaca-se a equação de Kirpich, que mesmo formulada com dados de bacias rurais é bastante utilizada em bacias urbanas (TUCCI, 2004; SILVEIRA, 2005).

2.3 INTERVALO DE VARIAÇÃO DA EXTENSÃO DOS TRECHOS E DAS DECLIVIDADES

No intuito de se avaliar a influência da

extensão de trechos e da declividade, na estimativa do tempo de concentração pelas duas metodologias abordadas neste trabalho, arbitraram-se cenários hipotéticos. Tomando-se a bacia hipotética, Figura 2, variaram-se as extensões dos trechos representativos de escoamento superficial, dos canais rasos e dos canais definidos, bem como as declividades.

No Quadro 3, estão as faixas de variação para as extensões de trechos e declividades adotadas, tanto quanto os incrementos (Δ) assumidos para as variações.

QUADRO 2 : Resumo das equações empíricas para estimativa do tempo de concentração.

Nome	Equação	Área (Km ²)	S(%)	L (Km)
Kirpich	$tc = 0,0663 \times L^{0,77} \times S^{-0,385}$	< 0,45	3/10	< 1,2
McCuen	$tc = 2,25 \times i^{-0,7164} \times L^{0,5552} \times S^{-0,2070}$	0,4 – 16	< 4	< 10
Carter	$tc = 0,0977 \times L^{0,6} \times S^{-0,3}$	< 21	< 0,5	< 12
Eagleson	$tc = 0,274 \times n \times R^{-0,67} \times L \times S^{-0,5}$	< 21	-	-

Legenda: tc: tempo de concentração; L: comprimento do talvegue principal ou fundo de vale; S: declividade, i: intensidade pluviométrica, R: raio hidráulico. **FONTE:** SILVEIRA (2005).

QUADRO 3: Resumo das situações consideradas na estimativa do tempo de concentração pelo enfoque cinemático.

Tempo de escoamento	Extensões consideradas (L)			Declividades (%)
	1ª situação	2ª situação	3ª situação	
Superficial (tes)	50 a 100 m $\Delta = 10$ m	Constante (75 m)	Constante (75 m)	1%; 1,5%; 2%; 3%; 5% e 10%.
Canais rasos (tcr)	Constante (500 m)	0 a 1.000 m $\Delta = 100$ m	Constante (500 m)	
Canais definidos (tcd)	Constante (1.000 m)	Constante (1.000 m)	0 a 10.000 m $\Delta = 1.000$ m	

FONTE: Autoria própria.

As extensões dos trechos foram expressas em porcentagem para facilitar a comparação dos resultados. Desse modo, a extensão em porcentagem foi obtida por meio da Equação 6:

$$L = \frac{(L_i \times 100)}{L_t} \quad \text{Eq. [6]}$$

Em que:

L = extensão do trecho em porcentagem (%);

L_i = extensão do cenário analisado (m);

L_t = limite superior de extensão da inclinação analisada (m).

2.4 O MÉTODO RACIONAL

Após a obtenção dos tempos de concentração considerando o enfoque cinemático e as equações empíricas, executou-se para efeitos de comparação, o cálculo das vazões pelo Método Racional (Equação 7), tomando-se como base a bacia hipotética em estudo.

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad \text{Eq. [7]}$$

Em que:

Q = vazão (m^3/s);

C = coeficiente de escoamento superficial;

i = intensidade de chuva (m/s);

A = área (m^2).

Para o cálculo da intensidade pluviométrica dispôs-se da utilização do programa PLUVIO 2.1 UFV, 2006), para obtenção dos parâmetros da equação idf (Equação 8). O município tomado, como exemplo, para o estudo foi o município de Rio Paranaíba-MG.

$$idf = \frac{(1472,679 \times T^{0,175})}{(15,594 + t)^{0,765}} \quad \text{Eq. [8]}$$

Em que:

T: tempo de retorno (anos);

t = duração (min).

A área da bacia foi calculada considerando uma faixa de 50 metros de largura em toda sua extensão, respeitando a área máxima de até 3 km^2 (300 ha) para o Método Racional,

consoante Festi (2005). Além disso, ao se adotar este valor, seguiu-se as recomendações de limites de áreas para as equações empíricas, citadas no presente trabalho. Sendo o produto da largura pela extensão considerada em cada cenário, a área definida para o cálculo da vazão pelo Método Racional.

2.5 ERRO RELATIVO, ERRO MÉDIO, DESVIO PADRÃO E ERRO-PADRÃO DAS VAZÕES

Após a obtenção das vazões, calculou-se o erro relativo, o erro médio, o desvio padrão e o erro padrão, a fim de comparar em porcentagem, a diferença entre os valores obtidos de tempo de concentração, por meio das equações empíricas e pelo método da velocidade. O erro relativo, de acordo a Equação 9, mostra o quão próximos estão os valores, e é dado pela seguinte expressão (SILVEIRA, 2005; MOTA e KOBAYAMA, 2015):

$$E = \frac{|VME - VMC|}{VMC} \quad \text{Eq. [9]}$$

Em que:

E = erro relativo;

VME = vazão obtida pelas equações empíricas;

VMC = vazão obtida pelo método da velocidade.

Além disso, calculou-se o erro relativo médio, de cada método através da Equação 10 (SILVEIRA, 2005):

$$Em = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n Ei \quad \text{Eq. [10]}$$

Em que:

E_m = erro médio relativo;

E_i = erro relativo;

n = número de amostras.

Depois de se obter a média do erro relativo, efetuou-se o cálculo do desvio padrão, conforme a Equação 11. Essa é uma medida que expressa o grau de dispersão dos valores em um conjunto de dados. Assim, obtém-se o quanto o conjunto do erro relativo é uniforme, sendo que, mais próximo de zero demonstra maior homogeneidade dos dados (SILVEIRA, 2005):

$$S = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E_m)^2}{n-1}} \quad \text{Eq. [11]}$$

Em que:

S = desvio padrão (%);

E_i = erro relativo;

E_m = erro médio relativo;

n = número de amostras.

Assim, para calcular a precisão do cálculo da média das amostras, obtém-se o erro padrão, de acordo com a Equação 12:

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq. [12]}$$

Em que:

S_x = erro padrão (%);

S = desvio padrão;

n = número de amostras.

3. RESULTADOS

Foram realizadas 168 simulações em cenários hipotéticos criados a partir da variação do escoamento natural, em canais rasos e canais artificiais. Pôde-se analisar as diferenças entre os valores obtidos pela comparação entre o método da velocidade e as equações empíricas.

3.1 PRIMEIRA SITUAÇÃO - VARIAÇÃO DA EXTENSÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A primeira variação para a devida comparação entre os métodos relacionou-se ao escoamento natural. As equações de Kirpich, Carter, McCuen e Eagleson não consideram essa variação, pois o escoamento natural não compreende talvez definido requerido por essas equações. Essa variação é um caso particular do método da velocidade que considera um tempo de escoamento em superfícies.

Deste modo, a utilização das equações empíricas sempre resultará em valores constantes, apresentando diferenças nos valores apenas quando se varia a declividade, conforme ilustra a Figura 4 para a equação de Kirpich.

Verifica-se, pela Figura 4, uma grande disparidade entre os valores obtidos comparando as duas metodologias. O enfoque cinemático apresenta tempo de concentração maior que a equação de Kirpich. O mesmo fora observado quando comparado com as equações de Carter, McCuen e Eagleson.

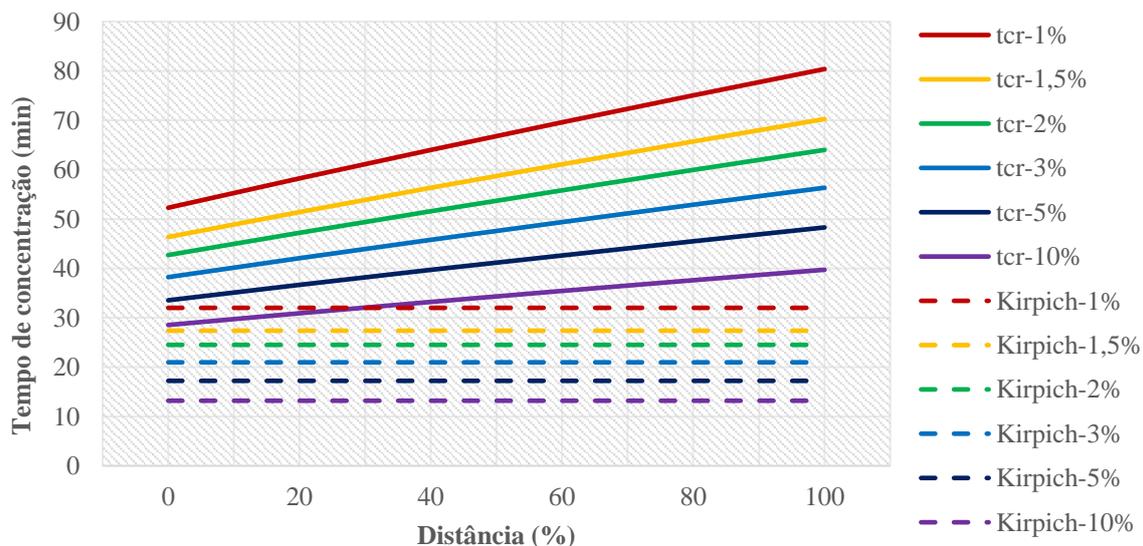


FIGURA 4: Tempos de concentração obtidos para o escoamento superficial entre a equação de Kirpich e o método da velocidade com variação das declividades.

FONTE: Autoria Própria.

À medida que se aumenta a distância percentual, o tempo de concentração fica ainda maior que o empírico. Com isso, observa-se que as equações de Kirpich, Carter, McCuen e Eagleson são mais conservadoras que o emprego do enfoque cinemático, pelo motivo de não considerarem o escoamento em superfícies, propiciando maiores vazões calculadas, já que a intensidade pluviométrica é inversamente proporcional ao tempo de concentração, considerado igual a duração do evento de chuva pelo Método Racional.

Analisando-se a influência dos valores de tempo de concentração nas vazões obtidas pelo Método Racional, observa-se a magnitude das mesmas conforme a Figura 5, em que se demonstra a comparação da equação empírica de Kirpich e a abordagem do método da velocidade.

Como esperado, para as duas abordagens realizadas, quanto maior a inclinação do terreno menor é o tempo de concentração,

visto que a inclinação acentuada colabora para que o escoamento seja mais rápido. Do mesmo modo, as equações empíricas apresentam valores superiores de vazão, por não considerarem o tempo inicial em superfícies, incorrendo no aumento das vazões calculadas pelo Método Racional. Tal fato, vai de encontro a segurança; todavia poderá gerar maior custo para obras simples.

Conforme a Tabela 1, o menor erro médio, no valor de 24,21 %, refere-se à equação de Eagleson, e o maior erro médio entre as vazões calculadas é de 51,69 %, para a equação de Kirpich, uma das equações mais utilizadas em bacias urbanas.

Outro fator que o estudo aponta é a proximidade dos valores dos resultados das equações de Kirpich e Carter, como exposto na Tabela 1, com erros padrões e médios respectivamente de 51,69, e 51,29% e 1,97% e 2,09%.

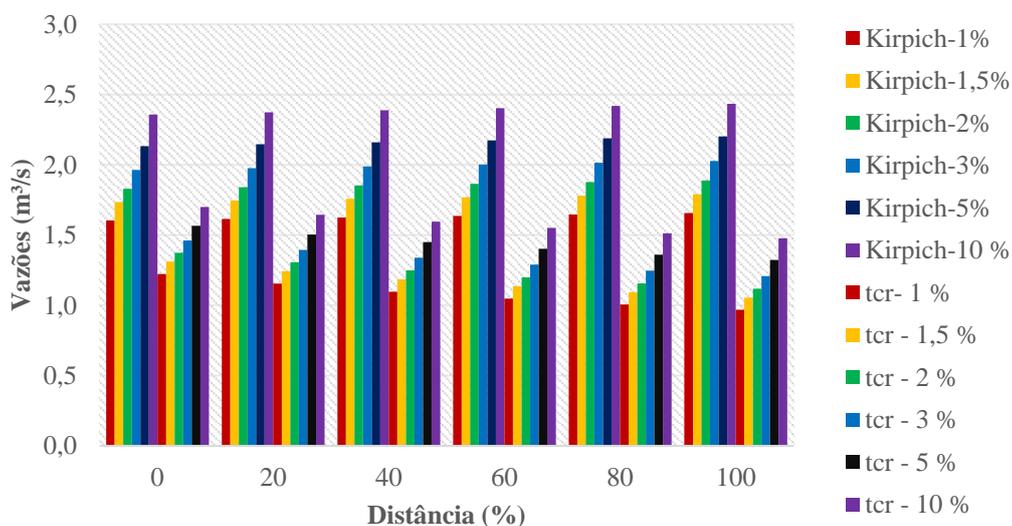


FIGURA 5: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Kirpich e o método da velocidade.

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 1: Valores dos erros médio e erros padrão decorrentes da comparação de vazões obtidas pelo método da velocidade e pelas equações empíricas.

Erro	Equação			
	Kirpich	McCuen	Eagleson	Carter
EM (%)	51,69	35,80	24,21	51,29
EP (%)	1,97	3,43	5,10	2,09

FONTE: Autoria Própria.

3.2 SEGUNDA SITUAÇÃO - VARIAÇÃO DA EXTENSÃO EM CANAIS RASOS

Os resultados obtidos para esta análise estão ilustrados como exemplo na Figura 6, retratando-se o método de Eagleson. Considerando a variação da extensão em canais rasos, as diferenças se acentuam com a distância como esperado; demonstrando maiores valores para a abordagem cinemática.

Assim, percebe-se que o método por equações empíricas é mais conservador que o enfoque cinemático; incorrendo em maiores valores para as vazões.

Ademais, é de grande importância analisar o que isso interfere nas vazões quando se utilizam as duas abordagens. Aplicando-se o Método Racional para a bacia hipotética, tem-se os resultados apresentados na Figura 7. Verificam-se vazões superiores obtidas pela equação de Eagleson, quando comparadas às obtidas pelo enfoque cinemático. À medida que se aumenta a extensão dos trechos, aumenta-se a vazão usando os métodos empíricos, quase que proporcionalmente. Todavia, pelo enfoque cinemático, as vazões aumentam de modo sutil com o aumento das extensões.

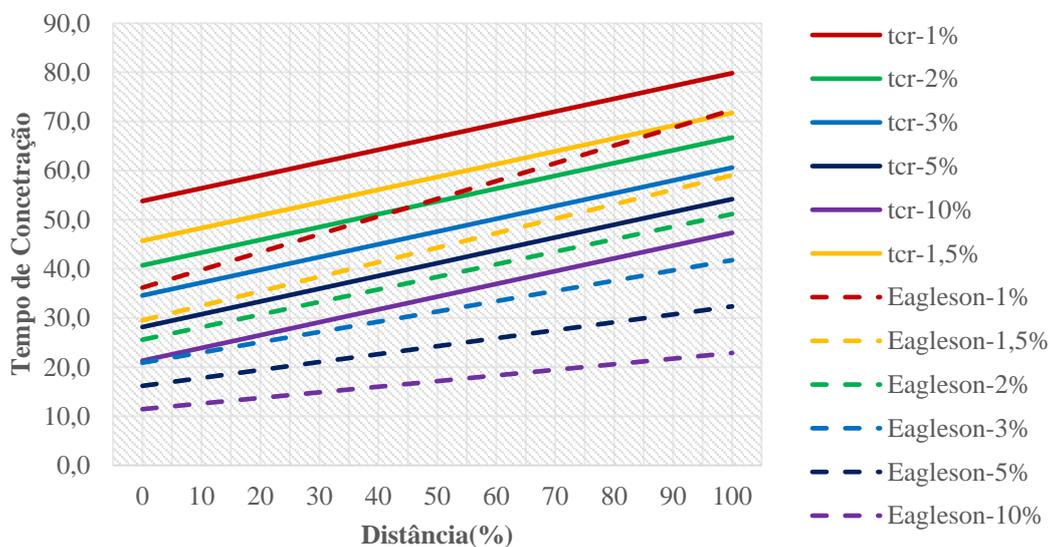


FIGURA 6: Tempos de concentração obtidos para o escoamento superficial entre a equação de Eagleson e o método da velocidade com variação das declividades.

FONTE: Autoria Própria.

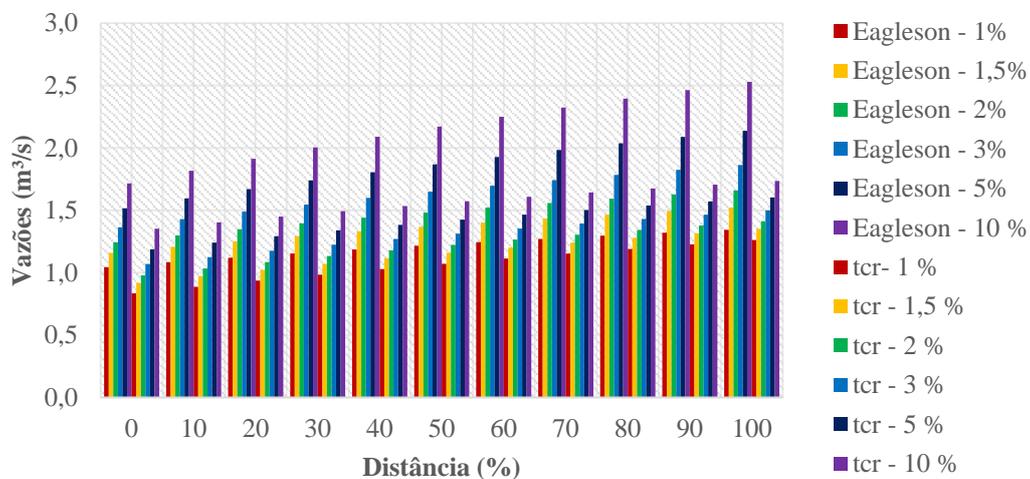


FIGURA 7: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Eagleson e o método da velocidade.

FONTE: Autoria Própria.

Além disso, comparando-se os erros médios e os erros padrão pela comparação entre as vazões obtidas para canais rasos, verificam-se os maiores valores para as equações de Kirpich e de Carter e o menor valor obtido para a equação de Eagleson, com o valor de 13,02 % para o erro médio e 2,12% para o erro padrão (Tabela 2).

Outro importante resultado é a proximidade dos valores dos resultados das equações de Kirpich e Carter em relação ao erro médio, respectivamente de 30,08% e 30,82% e erros padrões, respectivamente de 3,69% e 4,19%, consoante a Tabela 2. Já as equações de McCuen e Eagleson, apresentaram valores distintos para a variação das extensões em canais rasos, com valores obtidos de erro médio percentual, respectivamente de 22,02% e 13,02 %.

3.3 TERCEIRA SITUAÇÃO - VARIAÇÃO DA EXTENSÃO EM CANAIS DEFINIDOS

Consoante a Figura 8, tomando-se como exemplo a equação de Carter, observam-se as diferenças entre os tempos de concentração obtidos pelas duas abordagens.

Como observa-se, os tempos de concentração obtidos pela equações empírica e pelo método da velocidade, nos limites iniciais, distanciam-se e, depois apresentam um intervalo em comum e se distanciam novamente até os limites finais. Interpretando os resultados, da Figura 8, fixando-se a declividade em 10%, tem-se que em certas porcentagens de extensão, o método da velocidade apresenta maior tempo de concentração, como no intervalo de 0 a 64%.

TABELA 2: Valores dos erros médio e erros padrão resultantes da comparação de vazões obtidas pelo método da velocidade e pelas equações empíricas.

Erro	Equação			
	Kirpich	McCuen	Eagleson	Carter
EM (%)	30,08	22,02	13,02	30,82
EP (%)	3,69	2,14	2,12	4,19

FONTE: Autoria Própria.

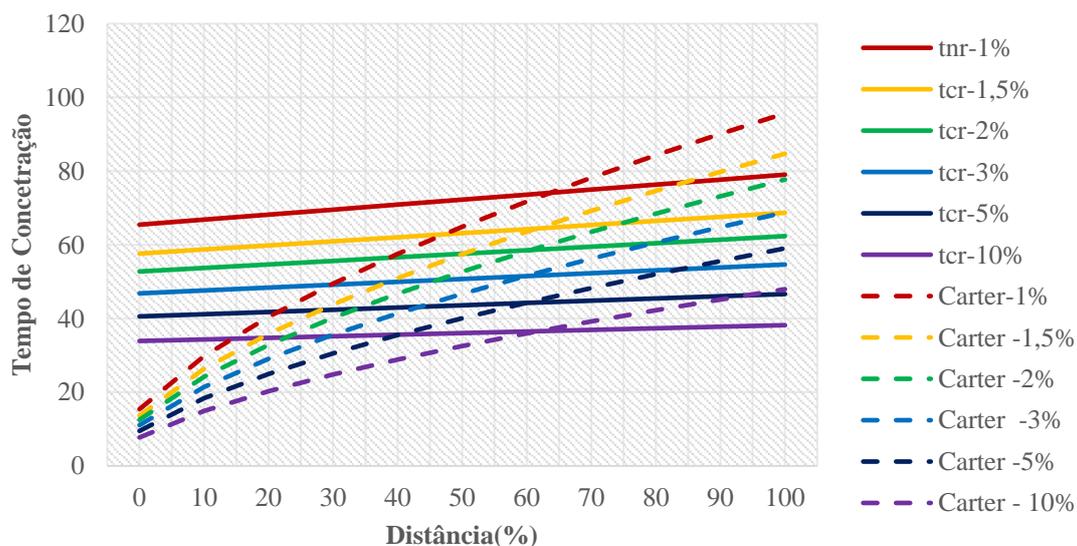


FIGURA 8: Tempos de concentração obtidos para o escoamento superficial entre a equação de Carter e o método da velocidade com variação das declividades.

FONTE: Autoria Própria.

Adiante, o método do NRCS e a equação de Carter, apresentam um ponto de interseção em 65%. Assim, continuando no intervalo da porcentagem de extensão, variando-se de 66% a 100%, Carter apresenta um valor de tempo de concentração superior ao método das velocidades.

Entende-se, por esta comparação, a importância ou não da preponderância de trechos canalizados para a estimativa do tempo de concentração pelas duas abordagens adotadas no presente estudo.

Verifica-se, também, por meio da Figura 8, a influência da declividade como nas outras comparações realizadas, na redução do tempo de concentração com o aumento daquela.

Quanto às vazões, analisando a Figura 9, percebe-se que a vazão apresenta valores diferentes nos extremos, decorrentes das variações obtidas pelo tempo de concentração, abordadas na Figura 8.

Como o tempo de concentração teve uma disparidade nos extremos, a vazão seguiu o mesmo critério. Além disso, a equação calculada que apresentou menor erro médio, na porcentagem da extensão do trecho canalizado, foi a de Carter, com erros médios e padrões respectivamente -2,46% e 7,93%.

Ademais, conforme a Tabela 3, os erros médio e padrão obtidos pela comparação entre as vazões utilizando as duas abordagens, apresentaram pouca diferença. Tal resultado baseia-se na origem das equações, calculadas principalmente na consideração de canais ou talwegues bem definidos.

Portanto, a única equação que apresentou valor distinto e inferior foi a de Eagleson, com valor de -28,22% para o erro médio e erro padrão de 8,55%. Tal fato corrobora os resultados anteriores para essa equação, sugerindo que a mesma possua uma base considerando escoamento superficial ou escoamento em canais rasos.

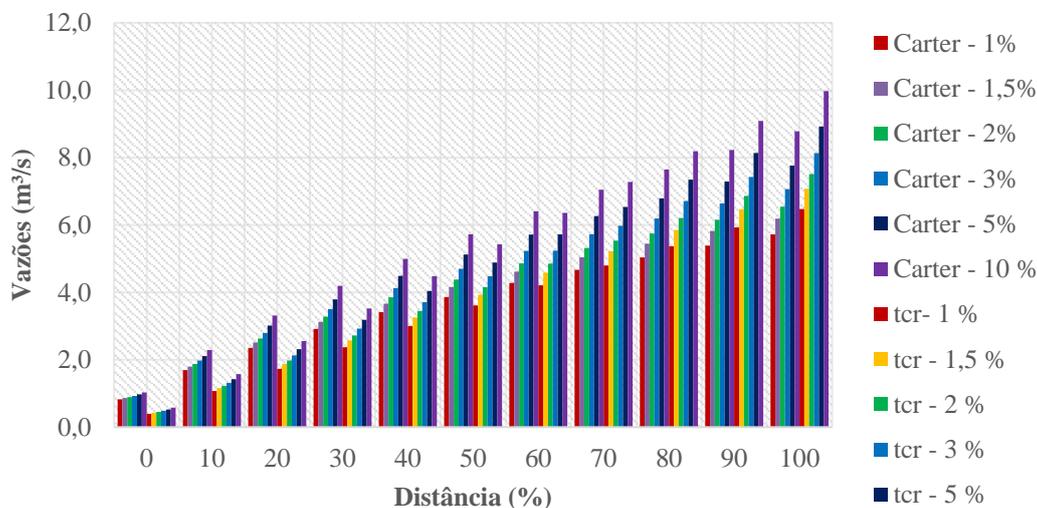


FIGURA 9: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Carter e o método da velocidade.

FONTE: Autoria Própria.

TABELA 3: Valores dos erros médio e erros padrão resultantes da comparação de vazões obtidas pelo método da velocidade e pelas equações empíricas.

Erro	Equação			
	Kirpich	McCuen	Eagleson	Carter
EM (%)	-10,35	-7,32	-28,22	-2,46
EP (%)	8,18	6,44	8,55	7,93

FONTE: Autoria Própria.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo comparou a utilização de equações empíricas versus a abordagem cinemática no cálculo do tempo de concentração. Por meio de uma bacia hipotética, definiram-se situações de variação da declividade e da extensão de trechos (superficiais, canais rasos e canais definidos) para avaliar a influência destas na estimativa do tempo de concentração e nas vazões obtidas pelo Método Racional.

A estimativa rápida e direta por meio de dados físicos como a declividade e comprimento do curso d'água principal ou talvegue, da rugosidade do canal principal e de dados de chuva, conduzem a resultados distintos do método da velocidade. Como discutido neste estudo, geralmente a abordagem cinemática é substituída por equações empíricas, que podem não representar as características físicas da bacia onde foram formuladas, incorrendo na subestimativa ou superestimativa de vazões em projetos hidrológicos ou hidráulicos.

Sendo assim, ressalta-se a importância do conhecimento da bacia de estudo; realizando-se o levantamento em campo para determinação de trechos em canais rasos ou definidos, tão quanto, em paralelo, a utilização de sistemas de informação geográfica, subsidiando um maior detalhamento da bacia hidrográfica. Tais informações influirão na determinação do tempo de concentração e conseqüente vazão de projeto.

Comparando-se o método da velocidade com as equações empíricas, a equação de Eagleson foi a que apresentou o menor erro médio igual a 24,21%, com erro padrão de 5,10%, para variação em canais superficiais. Além disso, a mesma equação apresentou o menor erro para canais rasos de 13,02%, com erro padrão de 2,12%. Por outro lado, a equação de Carter foi a equação que apresentou menor erro médio para variação da extensão do escoamento em canais definidos, com erro médio de -2,46%, e erro padrão de 7,93%.

Deste modo, o estudo possibilitou verificar a influência das extensões dos trechos superficiais, em canais rasos ou definidos; mostrando a divergência dos resultados e apontando, por exemplo, que para bacias com considerável escoamento superficial ou em canais rasos, a equação de Eagleson, poderia ser utilizada em substituição ao método cinemático por apresentar menor erro médio relativo. No mesmo enfoque, tal equação deveria ser descartada para o uso em bacias com grande preponderância de canais definidos, sendo a equação de Carter a mais indicada para os cenários hipotéticos definidos.

Como recomendação futura, espera-se verificar a influência de tais discrepâncias nos valores obtidos sobre os volumes de escoamento superficial, por meio da obtenção de hidrogramas de projeto.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAN, A. O; HOUGHTALEN, R. J. (2003). **Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality: Engineering Applications and Computer Modeling**. John Wiley & Sons, New Jersey.
- ALMEIDA, I. K; ALMEIDA, A. K; ANACHE, J. A.A; STEFFEN, J. L; SOBRINHO, T. A. **Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds: a review**. São Paulo. UNESP, Geociências, v. 33, n. 4, p. 661-671, 2014.
- AMANTHEA, N. R; NASCIMENTO, N. O. **Urbanização de baixo impacto (LID): Uso de geotecnologias para estimativa do tempo de concentração de bacia em cenário de pré-desenvolvimento**. RBRH. vol. 20. nº 1. Porto Alegre. P. 249-266. 2015.
- AZEVEDO NETTO, J. M; VILLELA, S. M; ARAÚJO, R. (coord.). **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.
- CANHOLHI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo. Oficina de textos, 2005.
- COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013.
- COSTA, A. R; SIQUEIRA, E; MENEZES FILHO, F. C. M. **Curso básico de hidrologia urbana**. Brasília: ReCESA. 2007. 130 p.

- FANG, X; THOMPSON, D; CLEVELAND, T. G; PRADHAN, P; MALLA, R. **Time of concentration estimated using watershed parameters determined by automated and manual methods.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134 (2), 202-211. 2008.
- FESTI, A. V. **Equações de chuva brasileira.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais, João Pessoa, 20p. 2005.
- GRIBBIN, J. B. **Introdução à Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais.** São Paulo: Cengage Learning, 2009.
- GRIMALDI, S. PETROSELLI. A; TAURO, F; PORFIRI, M. **Time of concentration: a paradox in modern hydrology.** Hydrological Sciences Journal. 57(2), 217-228. 2012.
- MAGALHÃES, P. C. **Hidrologia Superficial.** In: Ramos, F; Occhipinti, A. G; Villa Nova, N.A; Reichardt, K; Magalhaes, P. C. Cleary, R. W. Engenharia Hidrológica. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. v. 2. Rio de Janeiro. Editora UFRJ. 1989.
- MICHAILIDIS, E.M; ANTONIADI, S; KOUKOUVINOS, A; BACCHI, B; EFSTRATIADIS, A. **Timing the time of concentration: shedding light on a paradox.** Hydrological Sciences Journal. 63:5, 721-740. 2018.
- MOTA A.A; KOBAYAMA M. **Reconsideração sobre a fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre Rs, vol. 20, n.1 . p. 55 – 59, jan/mar. 2015.
- NRCS. **Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55.** USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55. 1986.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica.** 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1999.
- PRUSKI, F. F; BRANDÃO, V. S; SILVA, D. D. **Escoamento superficial.** 2 edição. Editora UFV. 2011.
- SHARIFI, S; HOSSEINI, S. M. **Methodology for identifying the best equations for estimating the time of concentration of watersheds in a particular region.** J Irrig Drain Eng. 2011. 137: 712-719. 2011.
- SILVEIRA A. L. L. **Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em Bacias urbanas e rurais.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre Rs, vol. 10, n.1. p. 5 – 23, jan/mar. 2005.
- TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia ciência e aplicação.** 3 ed. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS/ABRH, 2004. 943p.
- UFV (2006). **Plúvio 2.1: Chuvas intensas para o Brasil.** Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa-MG. Disponível em: <http://www.gprh.ufv.br/index.php?area=softwares> . Acesso em: 7 janeiro 2018. Software.
- VILLELA, S. M; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo: Ed. McGraw Hill do Brasil, 1975.
- WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial.** São Paulo: CETESB, 1978. 477p.
- WONG, T. S. W. **Assesment of time of concentration formulas for overland flow.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 131. n. 4. 2005.

APÊNDICE A – Gráficos de comparações dos tempos de concentrações dos métodos empíricos e cinemático.

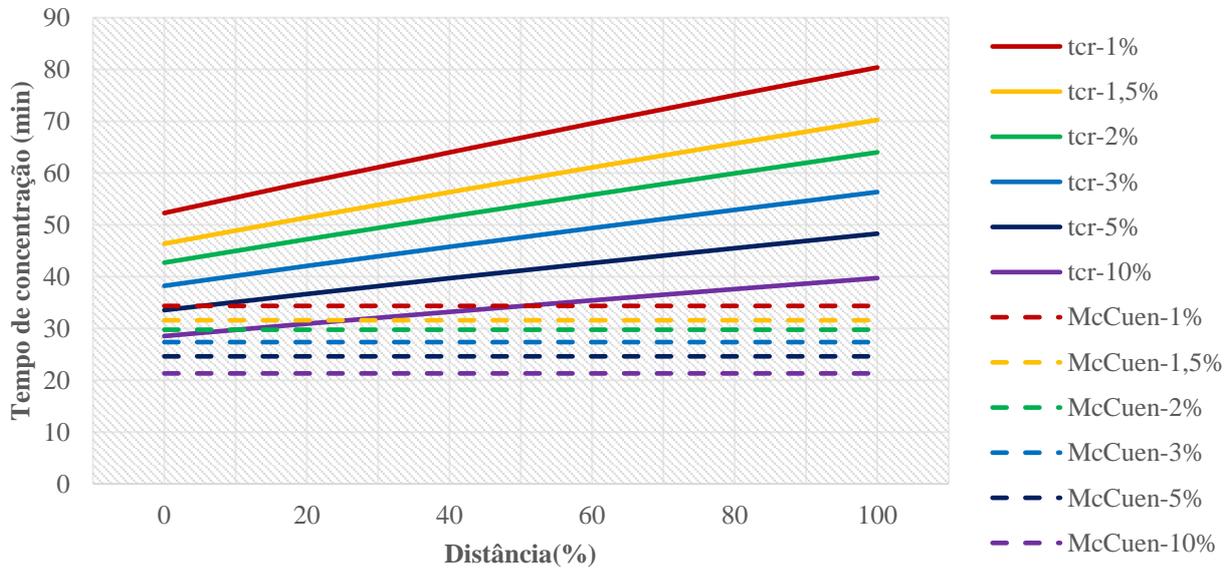


FIGURA A1: Comparação do tempo de concentração, em escoamento superficial entre a equação de McCuen e o método cinemático.
FONTE: Autoria Própria.

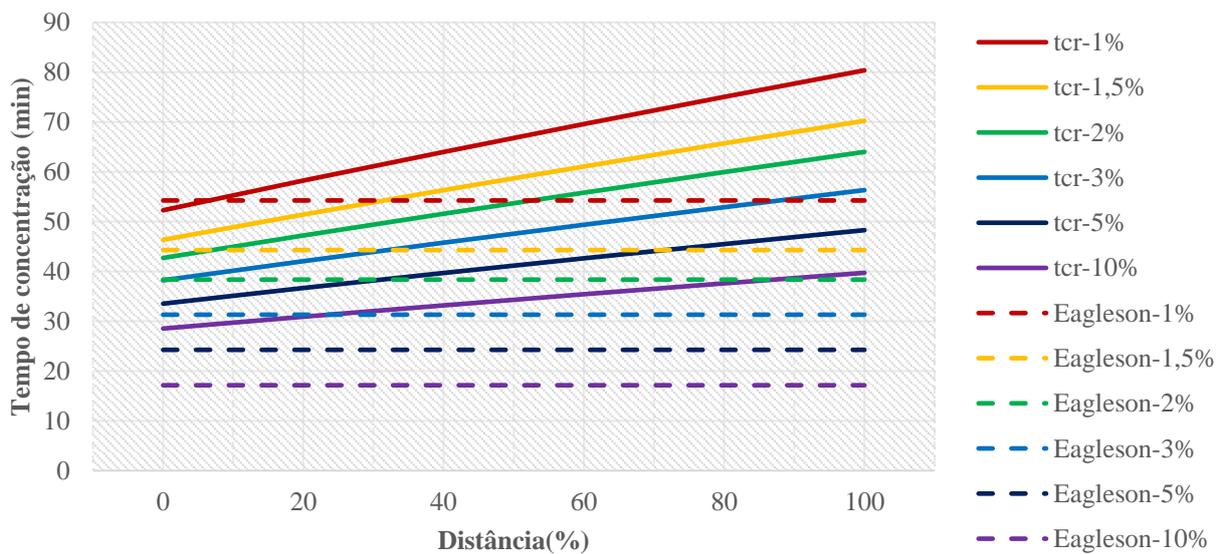


FIGURA A2: Comparação do tempo de concentração, em escoamento superficial entre a equação de Eagleson e o método cinemático.
FONTE: Autoria Própria.

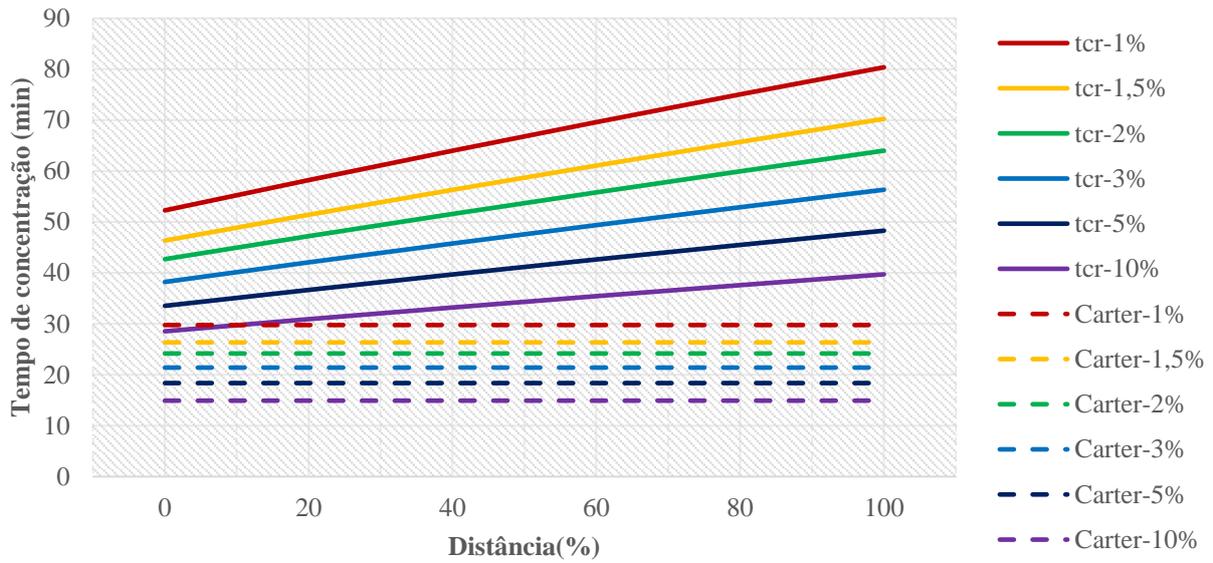


FIGURA A3: Comparação do tempo de concentração, em escoamento superficial entre a equação de Carter e o método cinemático.
FONTE: Autoria Própria.

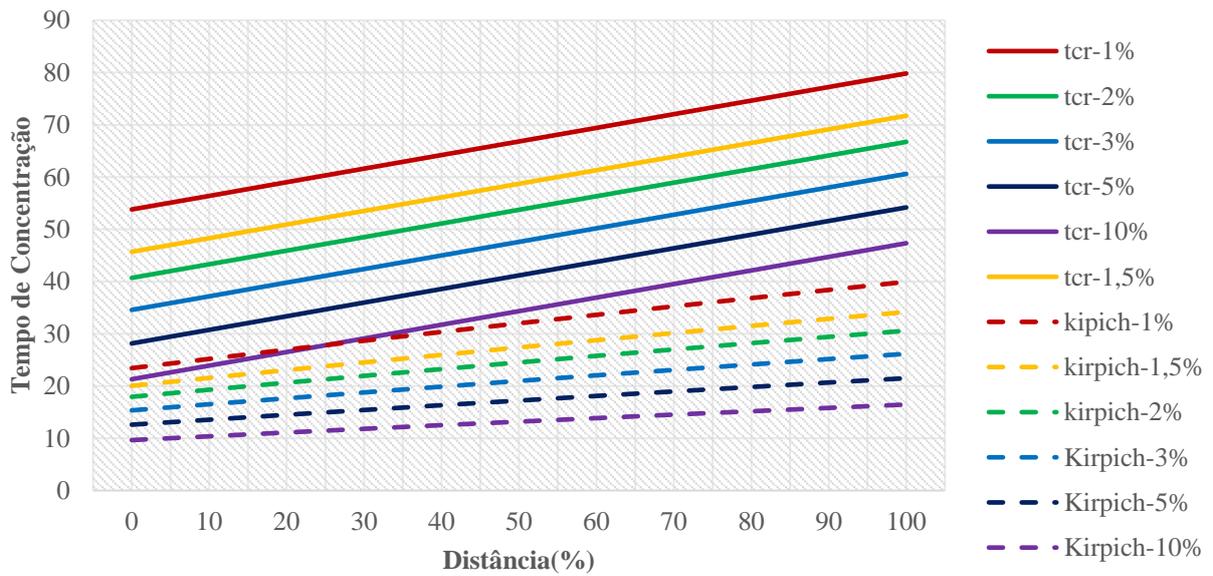


FIGURA A4: Comparação do tempo de concentração, em canais rasos entre a equação de Kirpich e o método cinemático.
FONTE: Autoria Própria.

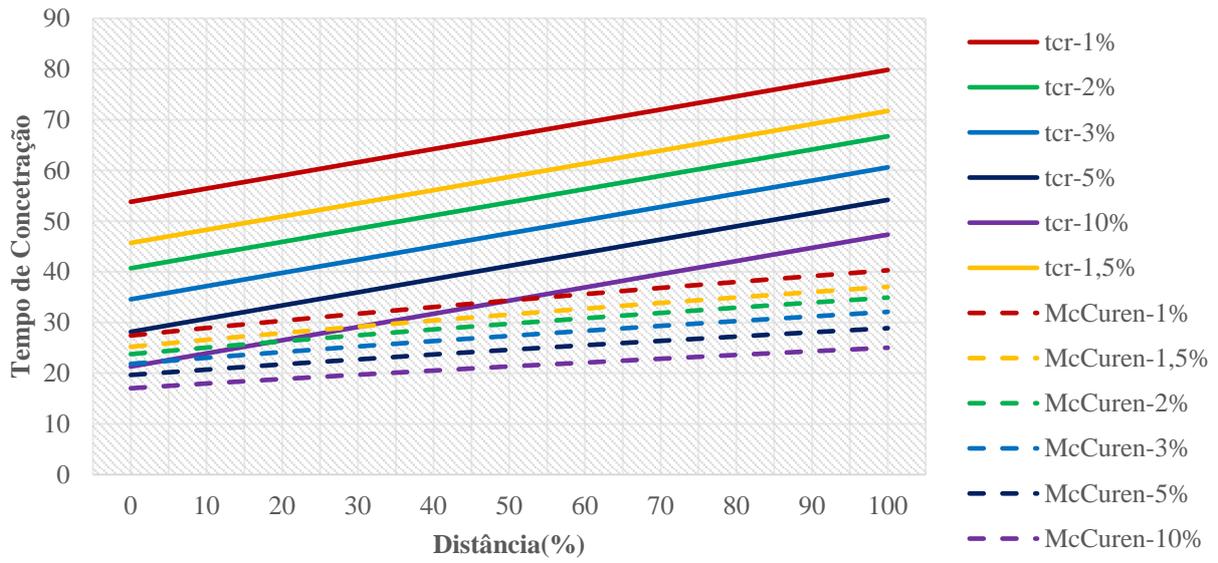


FIGURA A5: Comparação do tempo de concentração, em canais rasos entre a equação de McCuren e o método cinemático.

FONTE: Autoria Própria.

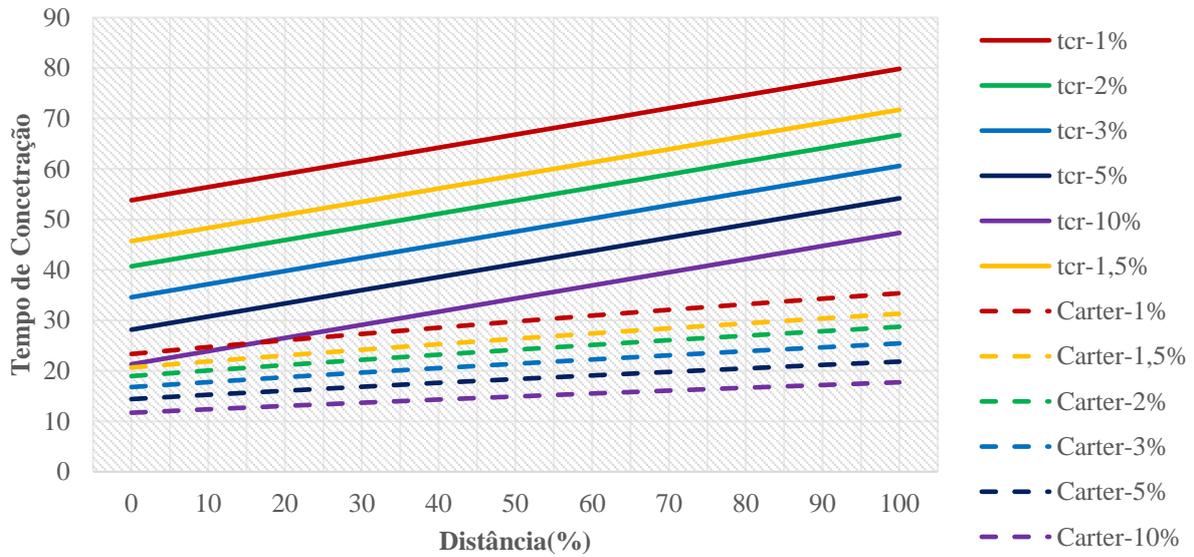


FIGURA A6: Comparação do tempo de concentração, em canais rasos entre a equação de Carter e o método cinemático.

FONTE: Autoria Própria.

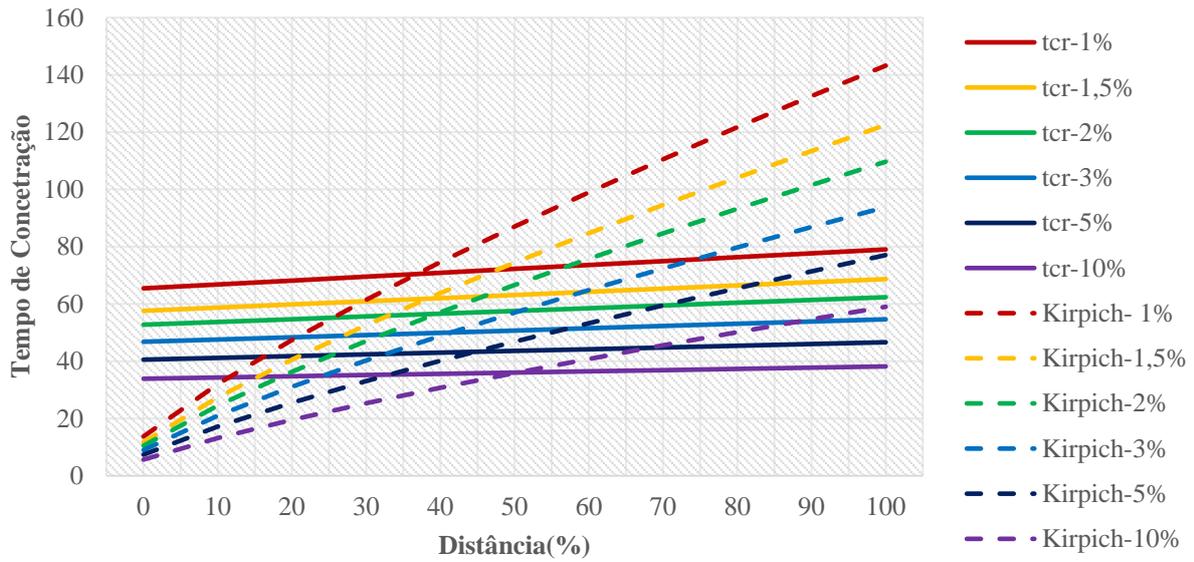


FIGURA A6: Comparação do tempo de concentração, em canais canalizados entre a equação de Kirpich e o método cinemático.

FONTE: Autoria Própria.

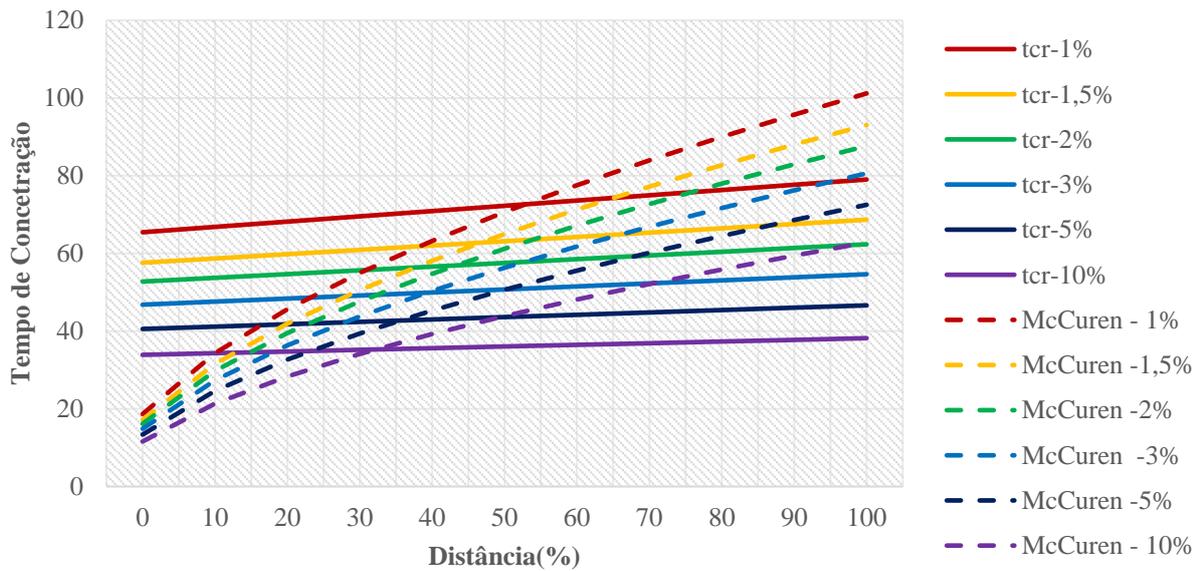


FIGURA A7: Comparação do tempo de concentração, em canais canalizados entre a equação de McCuen e o método cinemático.

FONTE: Autoria Própria.

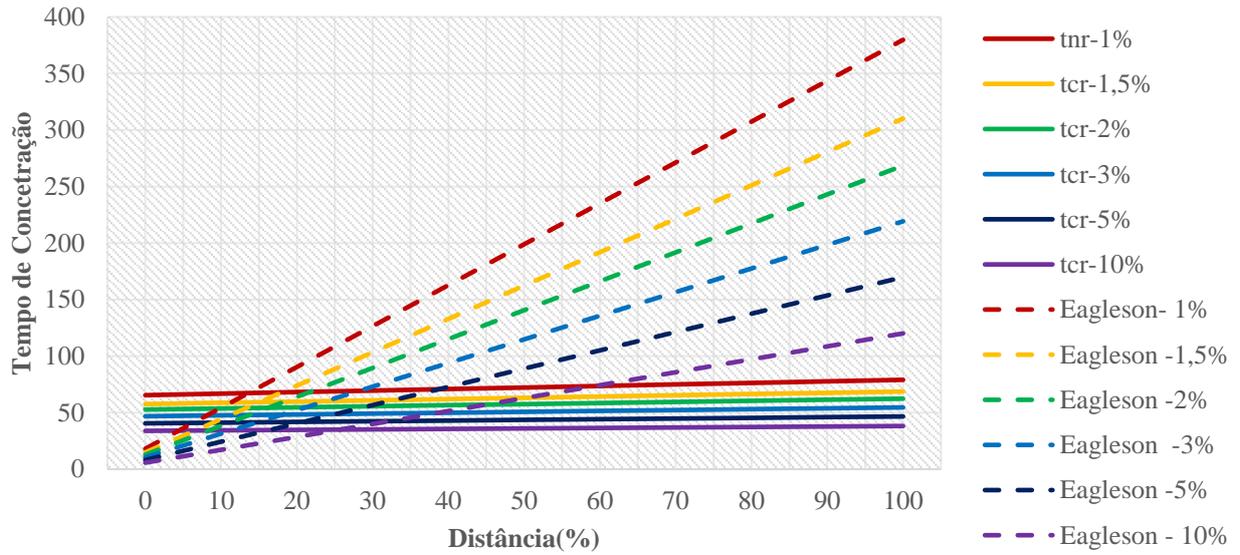


FIGURA A8: Comparação do tempo de concentração, em canais canalizados entre a equação de Eagleson e o método cinemático.

FONTE: Autoria Própria.

APÊNDICE B – Gráficos de comparações de vazões dos métodos empíricos e cinemático.

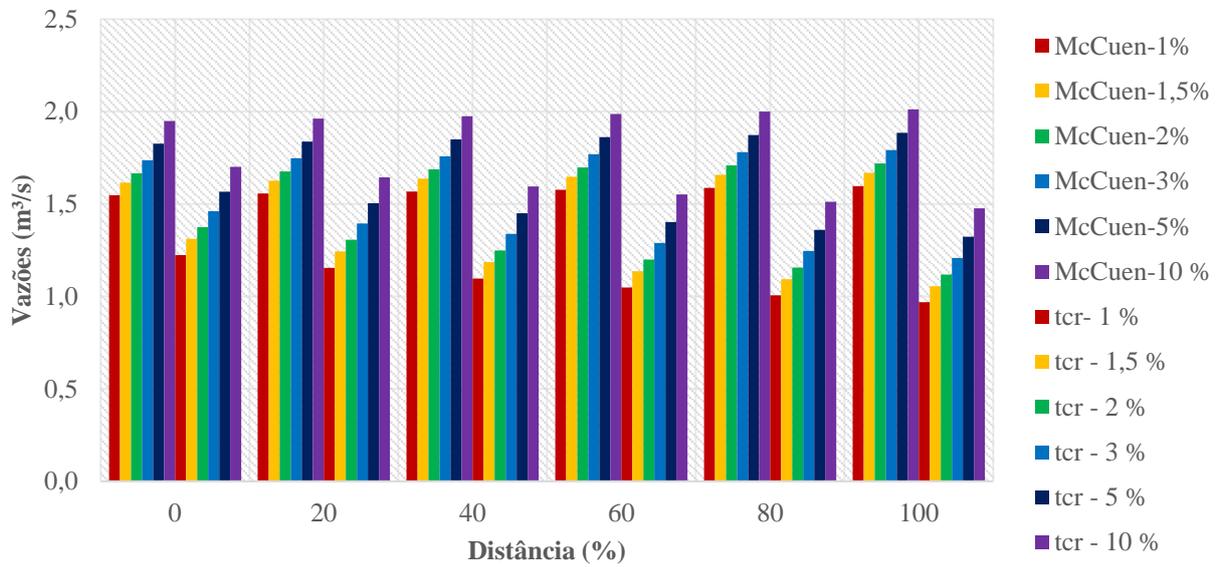


FIGURA B1: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de McCuen e o método da velocidade, escoamento superficial.

FONTE: Autoria Própria.

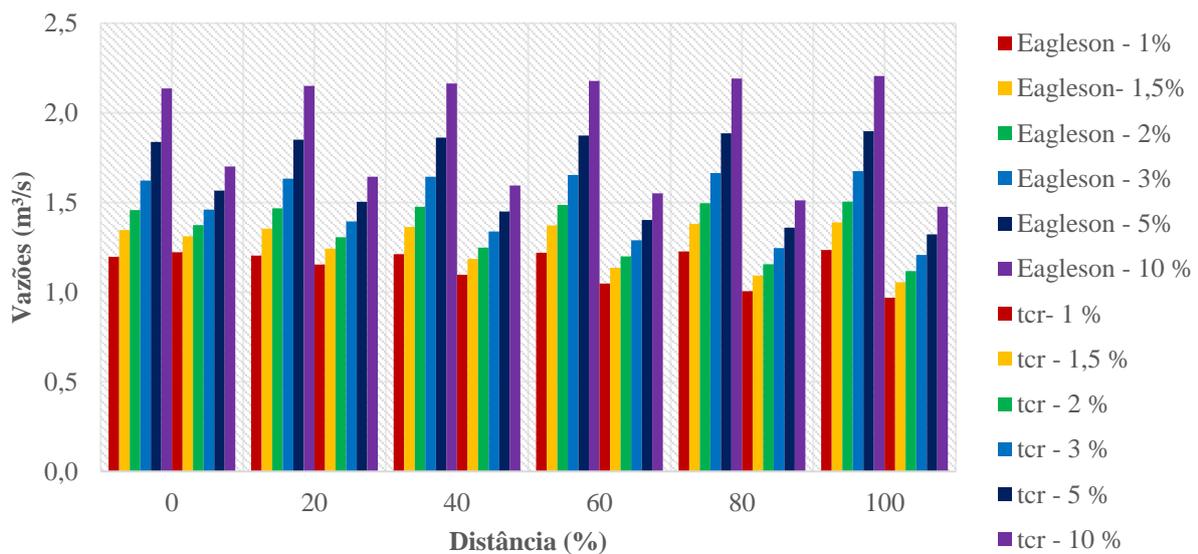


FIGURA B2: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Eagleson e o método da velocidade, escoamento superficial.

FONTE: Autoria Própria.

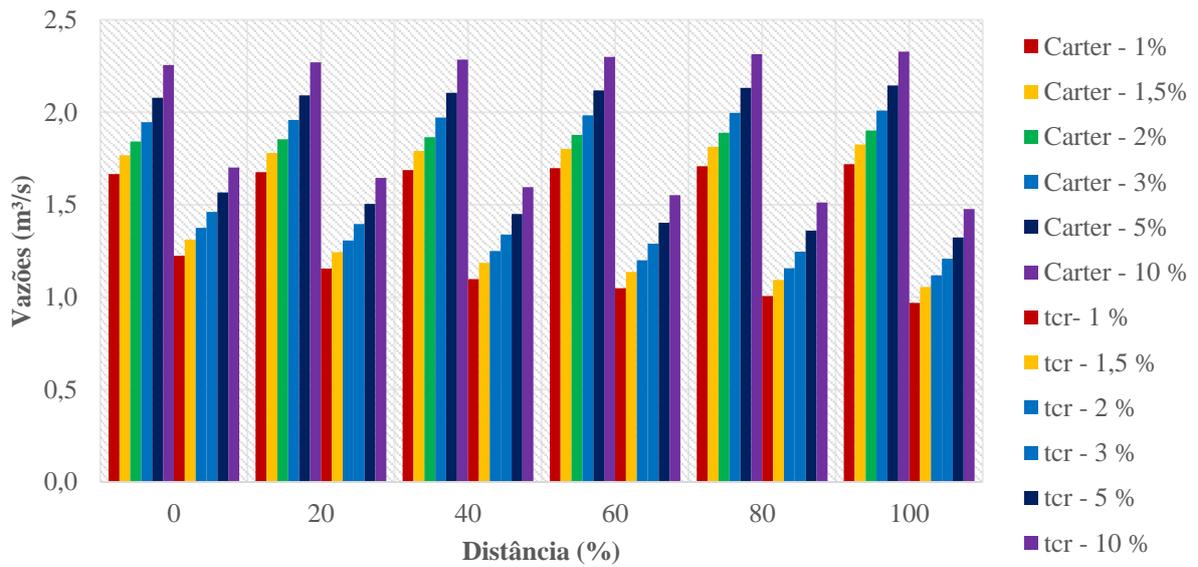


FIGURA B3: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Carter e o método da velocidade, escoamento superficial.

FONTE: Autoria Própria.

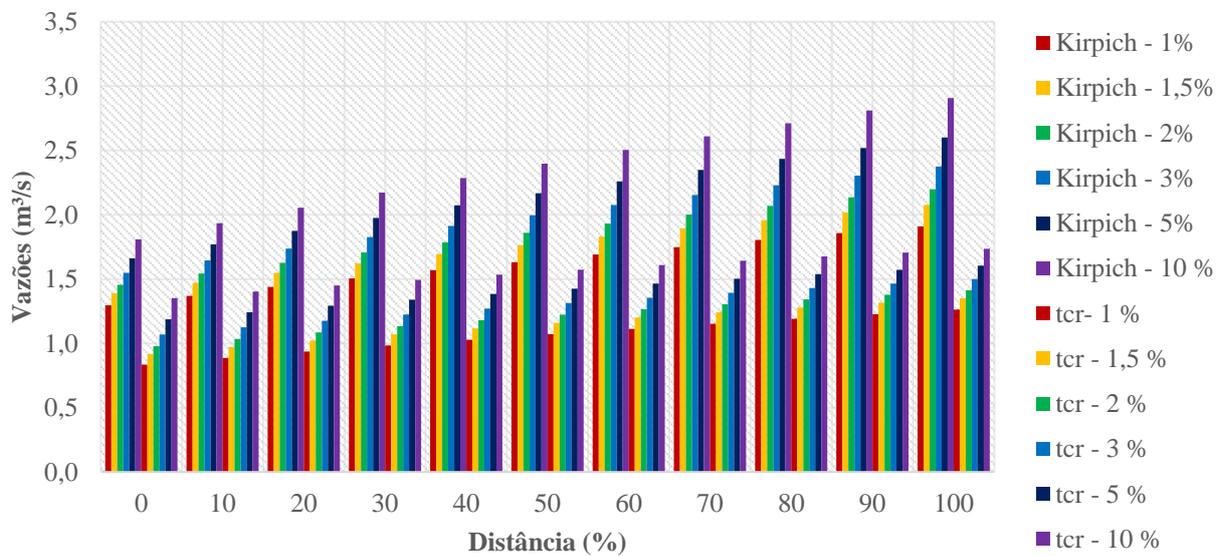


FIGURA B4: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Kirpich e o método da velocidade, escoamento em canais rasos.

FONTE: Autoria Própria.

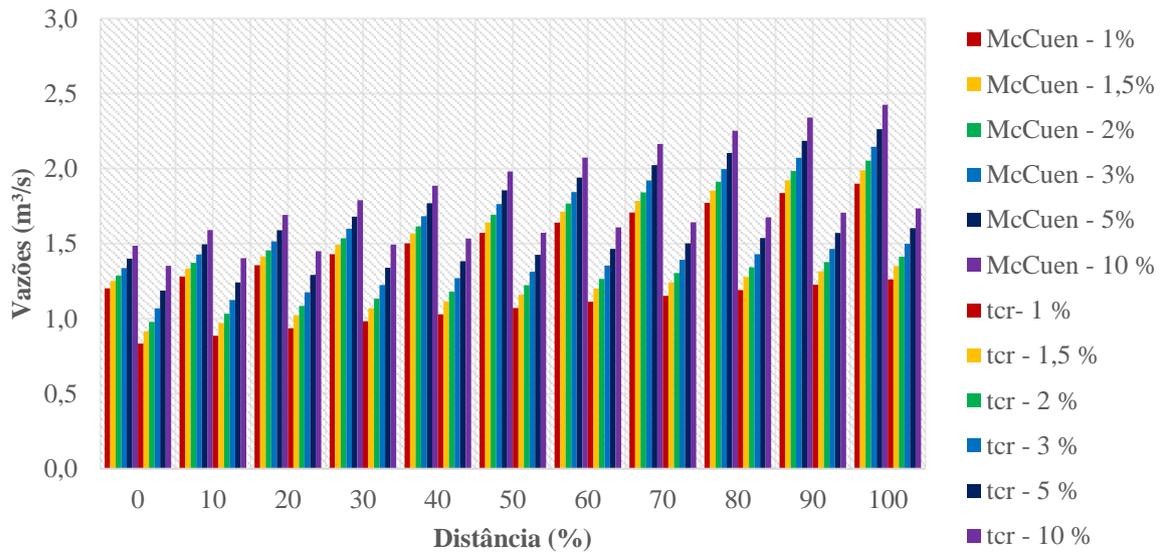


FIGURA B5: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de McCuen e o método da velocidade, escoamento em canais rasos.

FONTE: Autoria Própria.

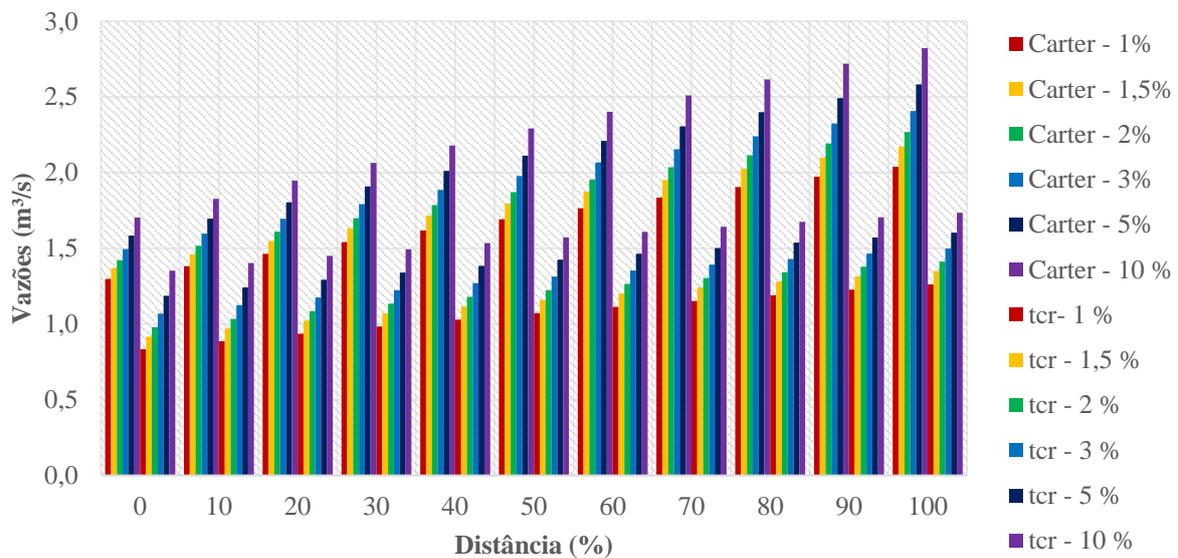


FIGURA B6: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Carter e o método da velocidade, escoamento em canais rasos.

FONTE: Autoria Própria.

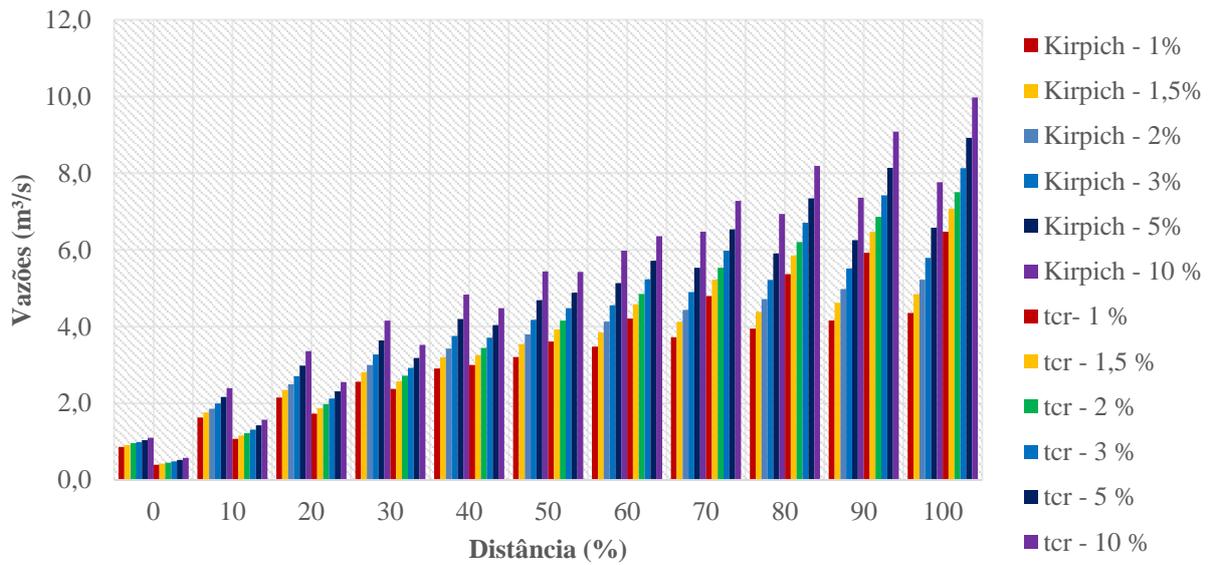


FIGURA B7: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Kirpich e o método da velocidade, escoamento em canalizações.
FONTE: Autoria Própria.

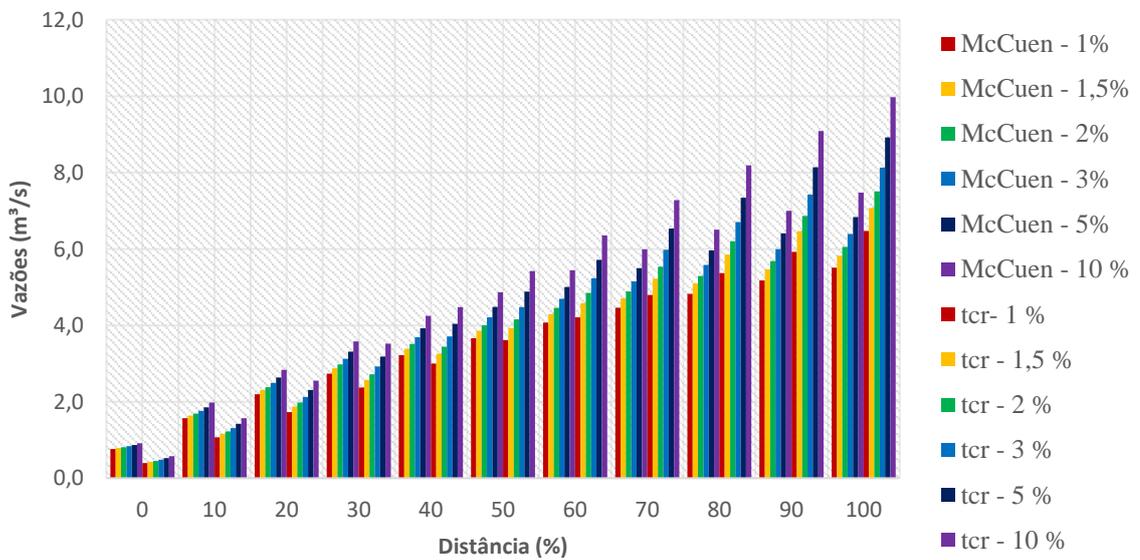


FIGURA B8: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de McCuen e o método da velocidade, escoamento em canalizações.
FONTE: Autoria Própria.

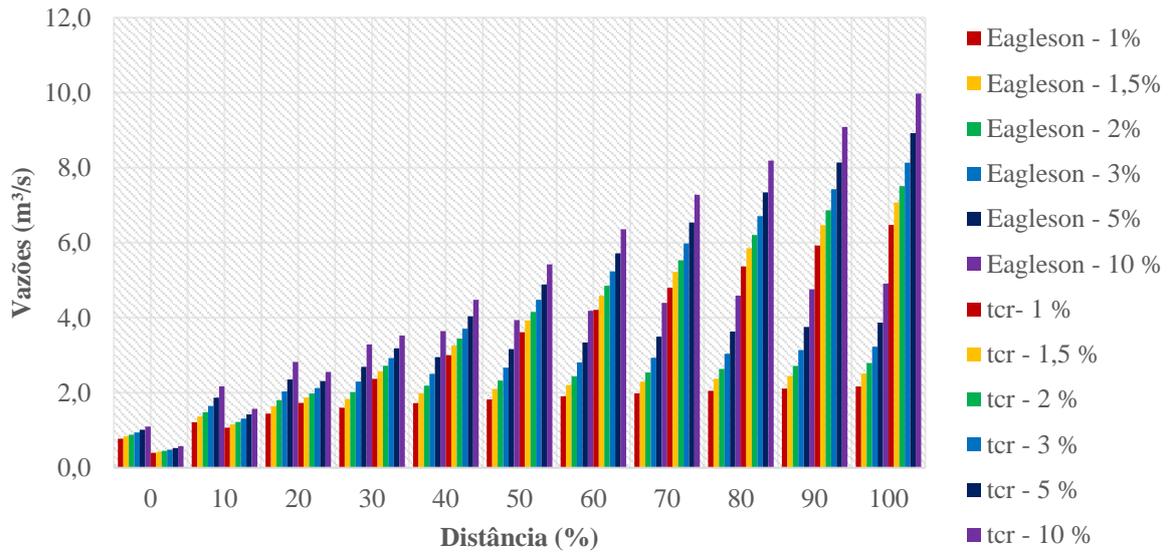


FIGURA B9: Vazões obtidas pela variação da extensão percentual consoante a equação de Eagleson e o método da velocidade, escoamento em canalizações.

FONTE: Autoria Própria.