

ANÁLISE DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM QUATRO BACIAS EXPERIMENTAIS

Camyla Innocente^{1*} & *Pedro Luiz Borges Chaffe*² & *Aline de Almeida Mota*³ & *Fernando Grison*⁴
& *Masato Kobiyama*⁵

Resumo – O tempo de concentração (t_c) é utilizado como parâmetro de entrada em modelos hidrológicos e auxilia na definição da resolução temporal de programas de monitoramento. Uma de suas definições é o tempo em que uma partícula demora para chegar do ponto hidráulicamente mais distante da bacia até a exutória. Esse trabalho explora seis formas de calcular o valor de t_c a partir do hidrograma e hietograma monitorados. Os eventos são de quatro bacias experimentais (0,05, 6,95, 11,45 e 64,45 km²) monitoradas durante seis meses. O método que pareceu mais coerente foi aquele que calcula o valor de t_c como o tempo entre o centro de massa da precipitação efetiva e o pico da vazão total. Os valores de t_c variaram para esse método de 0,33 a 7,33 horas para a menor bacia e de 2,5 a 32 horas para a maior bacia.

Palavras-Chave – tempo de concentração; precipitação efetiva, bacia experimental.

AN ANALYSIS OF THE TIME OF CONCENTRATION OF FOUR EXPERIMENTAL CATCHMENTS

Abstract – The time of concentration (t_c) is used as an input parameter in hydrological models and also supports to determine to the necessary temporal resolution for monitoring programs. It may be defined as the time for particle of water to travel from the hydraulically most distant point to the watershed outlet. This work explores six ways of calculating the value of t_c from the observed hydrograph and hietograph. The events are from four experimental watersheds (0.05, 6.95, 11.45 and 64.45 km²) that were monitored for six months. The method that seemed most consistent was the one to consider t_c as the time between the center of mass of the rainfall excess and the peak of the total flow. The estimated values of t_c ranged from 0.33 to 7.33 hours in the smallest basin and from 2.5 to 32 hours in the largest basin.

Keywords – time of concentration, rainfall excess, experimental catchment.

¹ Mestranda do programa de pós-graduação em engenharia ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, *campus* Trindade E-mail: camylainnocente@gmail.com.

² Professor do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, *campus* Trindade. E-mail: pedro.chaffe@ufsc.br

³ Professora do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Chapecó. E-mail: aline.mota@uffs.edu.br

⁴ Professor do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Chapecó. E-mail: fernando.grison@uffs.edu.br

⁵ Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

O tempo de concentração (t_c) tem muitas aplicações na hidrologia, podendo servir de parâmetro de entrada de modelos hidrológicos ou auxiliar na definição de resolução temporal de monitoramento e sistema de alerta contra inundações, por exemplo. Uma das definições de t_c é o tempo em que uma partícula demora em chegar do ponto mais distante hidráulicamente à exutória da bacia. Essa definição conceitual não é facilmente entendida quando se analisa o hidrograma e o hietograma. Assim surge uma dúvida: O que representaria o tempo de viagem das partículas ao analisar um gráfico chuva-vazão?

O t_c pode ser calculado a partir do fim da precipitação ao ponto de inflexão do hidrograma (Kobiyama et al., 2006). Mas essa verificação acaba sendo muito subjetiva (McCuen, 2009). O t_c calculado do centro de massa do hietograma ao centro de massa do hidrograma nos daria uma visão de velocidade média. Porém, o t_c representa a velocidade do escoamento rápido, então, seria necessário considerar apenas a precipitação efetiva, mas a distribuição da precipitação efetiva é de difícil de estimativa (Bartlett et al., 2016). Por fim, o t_c entre o pico do hietograma e o pico do hidrograma entraria novamente a questão da incerteza da distribuição da chuva efetiva, do pico da precipitação total representar o pico da precipitação efetiva. Estimar o t_c a partir de hidrogramas de evento pode apresentar uma grande variação do valor entre os eventos, podendo essa variação chegar a 500% para uma mesma bacia (Grimaldi et al., 2012).

Há diversas fórmulas para estimar o t_c . Algumas estão relacionadas às características físicas da bacia (Dooge, 1956), considerando que o t_c não varia com a condição antecedente do solo e com as características da precipitação. Outras mudam conforme a intensidade de precipitação (Loukas & Quick, 1996). Existe a Fórmula SCS *lag*, que considera o estado antecedente da bacia ao considerar o *Curve Number* (Folmar et al., 2007). Essas fórmulas tendem a subestimar o t_c calculado a partir da análise do hidrograma (Mota, 2012; Innocente, 2016),

O objetivo deste trabalho foi analisar a correlação do tempo de concentração com o volume de precipitação efetiva. O parâmetro t_c foi estimado por meio de 6 métodos com base em informações de hidrogramas e hietogramas de 4 bacias de diferentes escalas (0,05, 6,45, 11,45 e 64,41 km²).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

As quatro bacias estudadas neste trabalho se localizam no município de Rio Negrinho-SC (Figura 1). A menor bacia, denominada bacia Araponga, possui área de 0,05 km², é coberta por floresta nativa e apresenta declividade média do canal de 0,30 (Mota, 2012). A maior bacia é denominada bacia do rio dos Bugres (RB01), possui área de 64,45 km² e as outras duas bacias são embutidas a essa, denominadas RB11, com 6,95 km² e RB10, com 11,45 km². A cobertura do solo é predominantemente de floresta nativa, mas possui partes reflorestadas, agricultura e solo exposto (Cardoso, 2013).

Série de chuva e vazão

O monitoramento de precipitação e vazão (Figura 2) foi realizado durante o período de 17/12/2011 a 12/06/2012, sendo realizado pelos trabalhos de Grison (2013), Cardoso (2013) e Mota et al. (2017). Os pontos de monitoramento fluviométrico e pluviométricos estão mostrados na Figura 1.

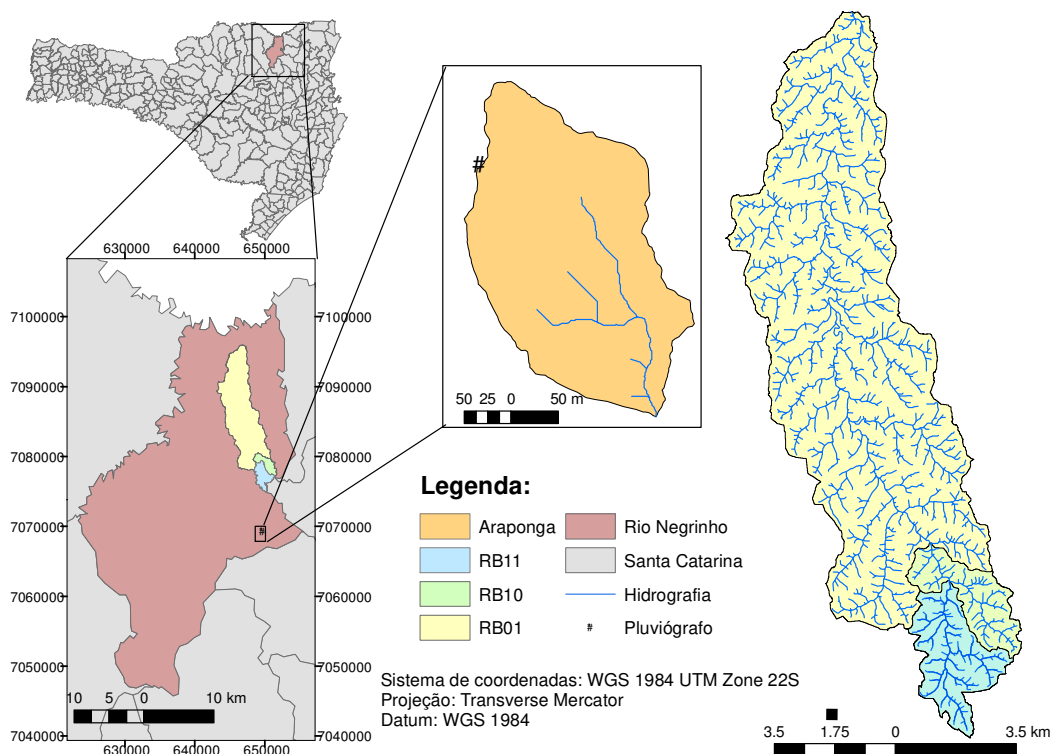


Figura 1- Mapa de localização das bacias estudadas nesse trabalho

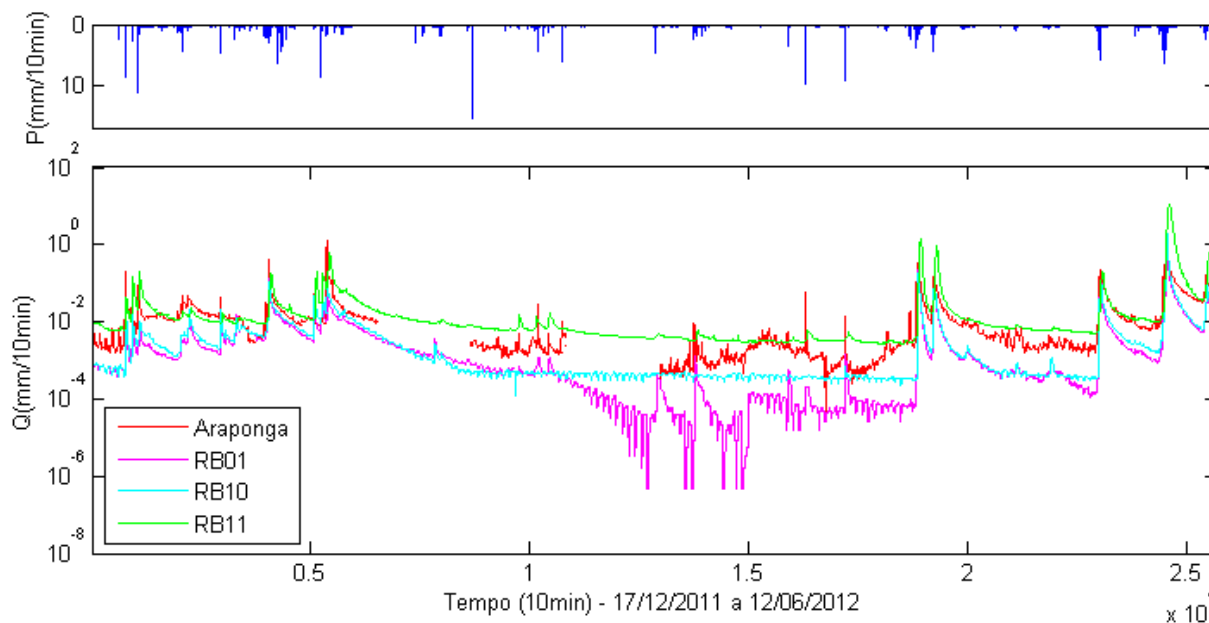


Figura 2 – Série de chuva (P) e vazão (Q) analisadas com resolução temporal 10 minutos, normalizadas conforme a área da bacia.

Separação de eventos

Para separar os eventos, foi necessário determinar o começo e o fim do escoamento superficial proveniente de um evento de precipitação. Para fazer a separação do escoamento de base e determinação do escoamento superficial, utilizou-se o filtro de Eckhardt (Eckhardt, 2005):

$$b_i = \frac{(1 - BFI)ab_{i-1} + (1 - a)BFIQ_i}{1 - a BFI} \quad (1)$$

onde, b_i é o escoamento de base no tempo i ; a é uma constante de recessão que relaciona períodos consecutivos de recessão; Q_i é o escoamento total no tempo i e BFI é o índice de fluxo de base máximo, sendo que este parâmetro pode estar relacionado a características geológicas e de cobertura do solo. É necessário calibrar duas variáveis, a e BFI . O escoamento superficial será o escoamento de total menos o escoamento de base.

Os parâmetros utilizados para as bacias RB01 e RB11 foram retirados do trabalho de Carlotto et al. (2015), que calibrou esse filtro para essas bacias. Para a bacia da Araponga utilizou-se o mesmo valor de RB11 e para a bacia RB10 utilizou-se os mesmos parâmetros da RB01, dada as semelhanças de tamanho entre essas bacias.

Em muitos momentos entre os eventos existia uma pequena flutuação no hidrograma. Então atribuiu-se escoamento superficial nulo quando o escoamento fosse menor que 0,005 mm.

Determinação da precipitação efetiva

Para a determinação da precipitação efetiva é necessário, primeiramente, determinar o volume de precipitação efetiva de cada evento. A precipitação efetiva é determinada como:

$$P_{ef} = \frac{V_{Esc}}{A} \quad (2)$$

onde, a precipitação efetiva (P_{ef}) está em mm, volume escoado superficialmente (V_{Esc}) em m^3 e área da bacia (A) está em m^2 .

Para estimar a distribuição temporal da precipitação efetiva foi utilizado o *curve number* (CN). Este método considera que há duas perdas distintas durante o evento de precipitação. Primeiramente, a abstração inicial (Ia), a qual é toda chuva que infiltra ou evapora e não há escoamento superficial nenhum. Após a abstração inicial, uma parte da precipitação total (P_{acu}) se perde e outra parte vira escoamento superficial (P_{efacu}). O valor de P_{efacu} está relacionado ao solo, por meio do CN , sendo calculado como:

$$P_{efacu} = \begin{cases} 0 \rightarrow P_{acu} \leq Ia \\ \frac{(P_{acu} - Ia)^2}{P_{acu} - Ia + \left(\frac{25400}{CN} - 254\right)} \rightarrow P_{acu} > Ia \end{cases} \quad (3)$$

Nessa equação, a precipitação total e efetiva está acumulada no tempo.

Bartlett et al. (2016) afirmam que o CN não pode ser simplesmente utilizado para outros tipos de solos ou em outras regiões fora do meio-oeste dos EUA, onde o método foi calibrado. Neste trabalho a calibração do CN foi feita por evento. Enquanto não houvesse escoamento superficial, a precipitação efetiva era considerada nula, determinando-se, então, o Ia . O CN foi determinado a partir do começo do escoamento superficial até o final do evento utilizando-se a Equação 3.

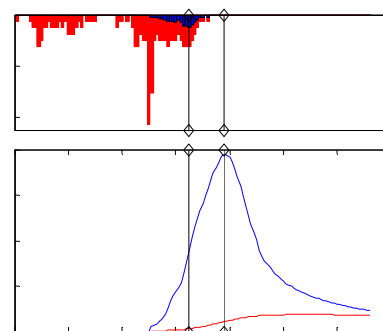
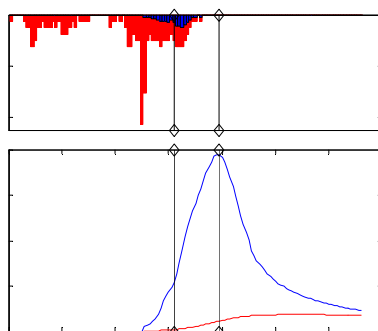
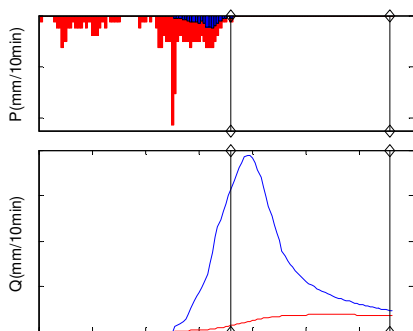
Determinação do tempo de concentração

Com base em McCuen (2009), o presente trabalho utilizou na determinação de t_c seis métodos os quais encontram-se na Figura 3.

Método 1 - Tempo entre o fim da precipitação efetiva e o fim do escoamento superficial.

Método 2 - Tempo entre o centro de massa da precipitação efetiva e o centro de massa do escoamento superficial.

Método 3 - Tempo entre a precipitação efetiva máxima e o pico da vazão total.



Método 4 - Tempo entre o centro de massa da precipitação efetiva ao pico do escoamento superficial

Método 5 - Tempo entre o centro de massa da precipitação efetiva e o pico da vazão total

Método 6 - Tempo entre o começo do escoamento superficial ao pico da vazão total

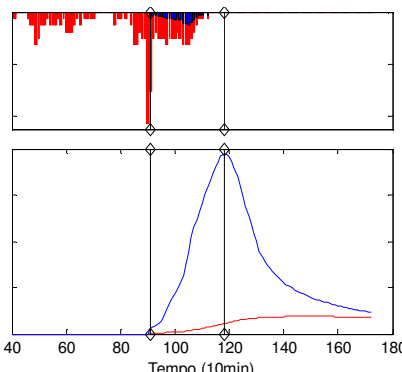
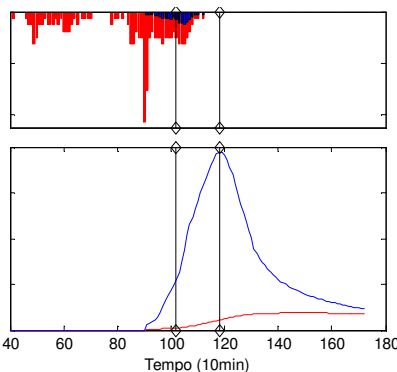
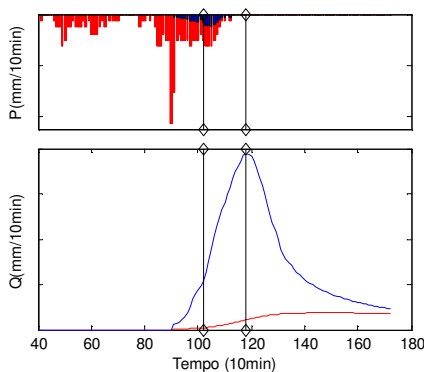


Figura 3 – Demonstração do cálculo do tempo de concentração a partir de seis métodos. Nota-se que a precipitação em vermelho é a precipitação total e em azul é a precipitação efetiva. A vazão em vermelho é o escoamento de base e em azul a vazão total. A diferença graficamente entre o Método 4 e o Método 5 é apenas um passo de tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho efetuou a separação de seis a oito eventos por bacia, para o período analisado de seis meses. Mota (2012) separou um número maior de eventos (30) para essa mesma série de dados para a bacia da Araponga. Esta diferença ocorre, pois Mota (2012) realizou a separação visual dos eventos e neste trabalho a metodologia utilizada não permite a separação de pequenos eventos. Além disso, os eventos separados não foram os mesmos para todas as bacias, pois nas bacias maiores os eventos de precipitação próximos se juntam devido ao maior tempo de resposta da bacia.

Os métodos 1 e 6, nos quais efetivamente o filtro é determinante para o ponto final e o inicial do escoamento superficial, apresentam menor correlação com a precipitação efetiva, para a

maioria das bacias. Isso pode ser um indício que o filtro pode não ser uma boa escolha para determinar o ponto de inflexão (Figura 4 e Tabela 1).

O método 5, entre o centroide da precipitação efetiva e o pico da vazão, aparece como sendo uma boa escolha para representar o t_c na bacia do rio dos Bugres e suas bacias embutidas, se o critério for a correlação com a precipitação efetiva. No caso da bacia do rio Araponga, o método 2 foi o que apresentou as maiores correlações e significativas com a precipitação efetiva. A diferença entre os métodos 5 e 2 é apenas na determinação do ponto final, que no método 2 é no centroide do escoamento superficial. Isso pode estar relacionado às diferenças de geração de escoamento entre as bacias da Araponga e do rio dos Bugres, inclusive a de menor escala (RB11).

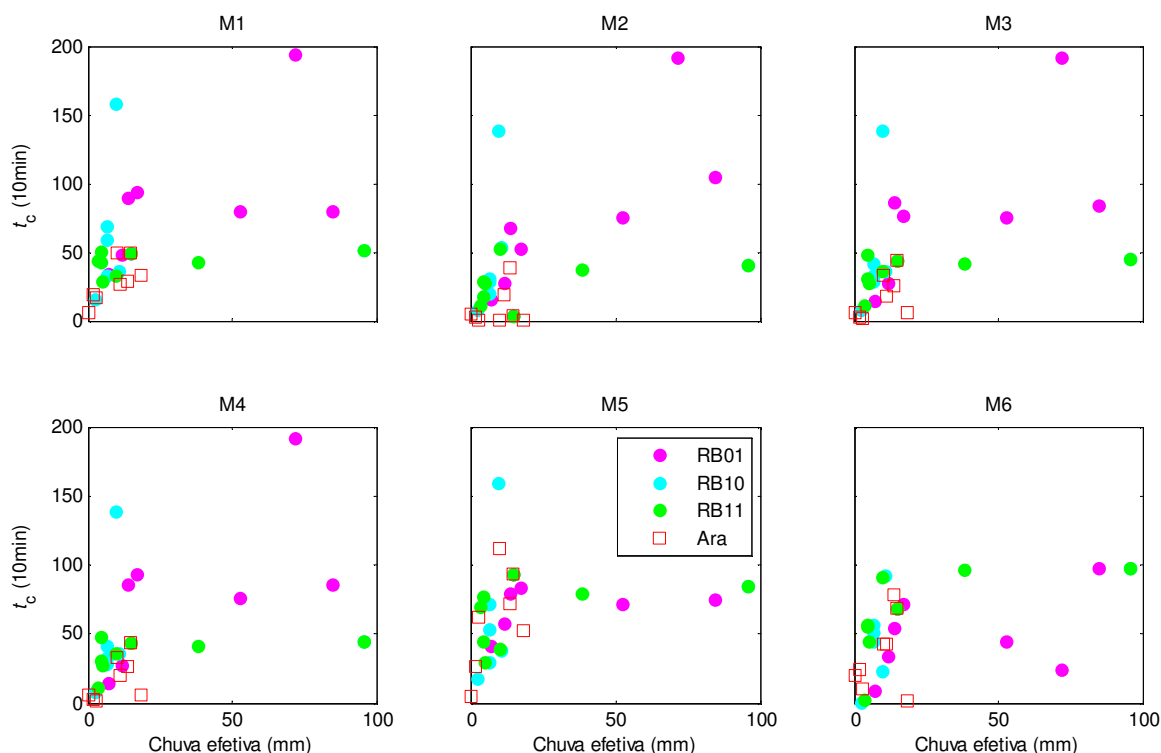


Figura 4 – Relação entre os tempos de concentração com a precipitação efetiva. Nota-se que M_i é o método i , e Ara é Araponga.

Tabela 1-Tabela de correlação entre os tempos de concentração das bacias e a precipitação efetiva. Em negrito estão apresentados os valores mais significativos.

	Kendall				Spearman			
	Araponga	RB01	RB10	RB11	Araponga	RB01	RB10	RB11
Método 1	0,43	0,04	0,21	-0,21	0,57	0,01	0,21	-0,24
Método 2	0,62	0,55	0,36	0,11	0,75	0,65	0,36	0,14
Método 3	-0,04	0,64	0,21	0,43	0,00	0,79	0,29	0,50
Método 4	0,33	0,57	0,71	0,43	0,51	0,69	0,81	0,45
Método 5	0,33	0,62	0,71	0,43	0,51	0,73	0,81	0,45
Método 6	0,36	0,43	0,57	0,29	0,45	0,52	0,71	0,50

Em geral, quanto maior a área da bacia, maiores as médias e variações de t_c . Os métodos 1 e 6 não apresentam resultados coerentes, pois o tempo de concentração praticamente não varia com o

aumento da área da bacia. Isso deveria acontecer especialmente para as bacias embutidas (RB10 e RB11) na bacia do rio dos Bugres (RB01). Os métodos 2, 3, 4 e 5, pareceram coerentes em relação a todas as bacias, pois a bacia RB01 possui um tempo de concentração médio muito maior, o comportamento da RB11 e RB10 é parecido e o tempo de concentração da bacia da Araponga mostrou valores menores (Figura 5).

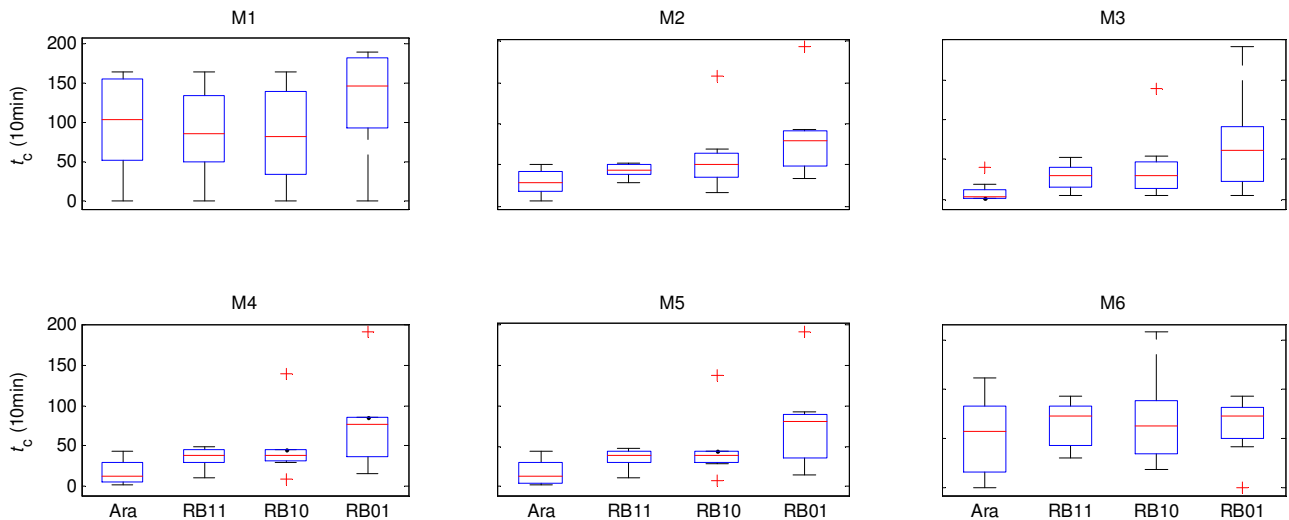


Figura 1 – Variação do tempo de concentração para cada bacia, para cada método. Nota-se que Ara é Araponga.

CONCLUSÕES

A partir da metodologia utilizada para separação de escoamento e separação de eventos, os métodos de estimativa do t_c que pareceram menos coerentes foram os métodos 1 e 6, que consideram diretamente o ponto de início e fim do escoamento. Esses pontos são muito instáveis de acordo com a calibração do filtro. Além disso, esses métodos apresentaram valores muito maiores de tempo de concentração do que os outros métodos.

Os métodos 2, 3, 4 e 5, que consideram o comportamento geral do hidrograma e do hietograma apresentaram resultados bastante semelhantes, com destaque ao método 5, que mostrou-se em geral o método mais relacionado com a precipitação efetiva. Os valores de t_c variam de 0,33 a 7,3 horas na Araponga (0,05 km²), de 1,83 a 8 horas na RB11 (6,95 km²), de 1,33 a 23,2 horas na RB10 (11,45 km²) e de 2,5 a 32 horas na RB01 (64,45 km²).

REFERÊNCIAS

- BARTLETT, M. S.; PAROLARI, A. J.; MCDONNELL, J. J.; PORPORATO, A. (2016) Beyond the SCS-CN method: A theoretical framework for spatially lumped rainfall-runoff response. *Water Resources Research*, v. 52, n. 6, p. 4608–4627
- CARDOSO, A. T (2013). Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho - SC. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- CARLOTTO, T.; CHAFFE, P. L. B.; SILVA, R. V.; GRZYBOWSKI, J. M. V. (2016) Uma ferramenta computacional de análise de séries temporais de vazão e caracterização de bacias hidrográficas. In *Anais XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília Nov 2016, p. 1–8,

- DOOGE, J.C.I. (1956) Synthetic unit hydrographs based on triangular inflow. 103 f. M.S. Thesis, Iowa State University.
- ECKHARDT, K.(2005) How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, v. 19, n. 2, p. 507–515
- FOLMAR, N.D.; MILLER, A.C.; WOODWARD, D.E. (2007) History and development of the NRCS lag time equation. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, v.43, n.3, p. 829-838
- GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; TAURO, F.; PORFIRI, M. (2012) Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, v. 57, n. March 2015, p. 217–228
- GRISON, F. (2013) Estudo da geometria hidráulica do rio dos Bugres, no município de Rio Negrinho - SC. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2013. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- INNOCENTE, C. (2016) Uma abordagem de sistemas lineares na análise do processo chuva-vazão de uma sub-bacia do rio dos Bugres. 2016. 133p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- KOBIYAMA, M.; GRISON, F. ; LINO, J.F.; SILVA, R.V. (2006) Estimativa Morfométrica e Hidrológica do Tempo de Concentração na Bacia do Campus da UFSC, Florianópolis - SC. In: *Anais I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste (1: 2006: Curitiba)*, Curitiba: UFPR, 11p.
- LOUKAS, A. & QUICK, M.C. (1996) Physically-based estimation of lag time for forested mountainous watersheds. *Hydrol. Sci. J.*, v.41, n.1, p.1- 19
- MCCUEN, R. H. (2009) Uncertainty Analyses of Watershed Time Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 14, n. 5, p. 490–498
- MOTA, A. A. (2012) Tempo de concentração em pequena bacia experimental. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- MOTA, A. DE A.; GRISON, F.; GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. ,(2017) Instalação de uma pequena bacia experimental florestal: estudo de caso da bacia do Rio Araçuaçu. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 22, n. 1, p. 73–80