

ESTUDO DO EFEITO DA CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM NA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO VIA GEOPROCESSAMENTO

Dário Macedo Lima (*), Adriano Rolim da Paz

* Universidade Federal da Paraíba, dario_jpmacedo@hotmail.com.

RESUMO

O Tempo de Concentração (T_c) é definido como o tempo necessário para que, mediante um evento de precipitação, o escoamento superficial gerado em toda a área da bacia hidrográfica contribua no exutório dela e é normalmente estimado a partir da análise das características geomorfológicas da bacia. Para isso, existem diversas formulações empíricas, dentre elas está a desenvolvida pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS). Para o escoamento em canal, o método propõe a utilização da equação de Manning, que estima a velocidade média da água a partir do nível da água, da declividade do fundo, da geometria da seção transversal e da rugosidade das paredes. Na natureza, essas características do canal variam espacialmente e para considerar essa variação é indicado que se identifiquem N sub-trechos homogêneos ao longo da drenagem, em que essas características podem ser consideradas constantes. Logo o tempo de deslocamento da água no canal pode ser encontrado pela soma do tempo de deslocamento ao longo desses sub-trechos. Nesse contexto, esse plano de trabalho visa contribuir avaliando como diferentes níveis de discretização da rede de drenagem e a caracterização das seções transversais dos cursos d'água influenciam o cálculo do T_c pelo método NRCS aplicado de forma automatizada via geoprocessamento, tomando a bacia hidrográfica do rio Cuiá (40 km² de área), localizada em João Pessoa, como área de estudo. Para tanto foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno da região e dados de batimetria das seções transversais dos canais pertencentes à bacia. Essas seções foram caracterizadas e os rios foram subdivididos em trechos homogêneos, admitindo que durante determinado trecho o canal possui as características da seção caracterizada a montante. O T_c foi estimado para três níveis de discretização, partindo daquele que leva em consideração um maior número de trechos homogêneos (nível A), até um nível que leva em consideração um menor número de trechos homogêneos (C), além do nível B, considerado intermediário. Os resultados mostraram que em relação ao nível A, os níveis B e C apresentaram valores de T_c menores 17,4% e 15,6%, respectivamente, revelando que o nível de caracterização da rede de drenagem interferiu consideravelmente nos valores de T_c . Dada essa sensibilidade do T_c a esse número de trechos homogêneos, é possível afirmar que quanto maior o número de trechos homogêneos, menor a probabilidade de erro na estimativa do T_c .

PALAVRAS-CHAVE: Tempo de concentração, Método NRCS, Escoamento em canal, Bacias hidrográficas, Hidrologia.

INTRODUÇÃO

Atualmente, ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido empregados para obter grande parte das informações necessárias em estudos hidrológicos, a partir do processamento automático de dados de elevação do terreno (BURROUGH & MCDONNEL, 1998, apud PAZ & COLLISCHONN, 2008).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é a forma de armazenar dados de elevação do terreno mais comum na hidrologia. Ele armazena os dados topográficos a partir de uma grade ou matriz em que cada elemento contém um valor que corresponde à altitude local (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). A representação mais tradicional de um MDE é através de uma imagem raster, onde cada pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial (BURROUGH & MCDONNEL, 1998, apud PAZ & COLLISCHONN, 2008).

A crescente disponibilidade de dados de sensoriamento remoto e dos Modelos Digitais de Elevação do terreno tem motivado o desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos, onde a bacia hidrográfica pode ser subdividida em uma matriz, geralmente representada por uma imagem raster, em que cada célula ou pixel da imagem contém um valor distinto para certo parâmetro hidrológico, que expressa as características do local que o elemento representa. Dessa forma, é possível considerar a variabilidade espacial das propriedades da bacia (PAZ & COLLISCHONN, 2008; ZUAZO et al., 2014)

Métodos conhecidos como SDTT (*Spatially Distributed Travel Time*) atribuem a cada elemento de representação da bacia o valor do tempo de deslocamento da água escoando superficialmente desde aquele ponto representado até o exutório, permitindo simular a resposta de uma bacia a um evento de precipitação em termos de vazão gerada no exutório (ZUAZO et al., 2014).

Além de poder servir de base para modelos hidrológicos distribuídos, conhecer o tempo de deslocamento da água até o exutório em cada ponto da bacia permite estimar de forma automatizada um parâmetro conhecido como tempo de concentração.

O T_c pode ser definido como o tempo de viagem da gota de água da chuva que atinge a região mais remota da bacia, desde o início de seu escoamento, até o momento em que atinge o exutório (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). Outros autores definem o T_c como o tempo necessário para que, mediante um evento de precipitação, o escoamento superficial gerado em toda a

área da bacia hidrográfica contribua no exutório desta (SILVEIRA, 2005). Por conseguinte, o maior tempo de deslocamento da água apresentado entre os pixels poderia ser considerado como o valor do T_c , uma vez que nesse tempo, o escoamento superficial gerado por todos os pixels estaria passando no exutório da bacia.

Essa abordagem automatizada via geoprocessamento e baseada no processamento do MDE para estimativa do T_c é relativamente recente, isso porque, tradicionalmente, o T_c é determinado de forma manual ou semiautomática, selecionando visualmente quais pontos candidatos a serem os mais distantes ou que proporcionem os maiores tempos de deslocamento da água ao longo da bacia (CASTRO et al., 2015).

O T_c é um parâmetro muito importante no entendimento do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, muito utilizado para estimar vazões de pico em estudos de simulação hidrológica do processo de transformação chuva-vazão. Por exemplo, o método racional, usado em projetos de drenagem urbana, utiliza o T_c para determinar a intensidade média da chuva através da curva intensidade-duração-frequência (IDF). O parâmetro também é utilizado para dimensionar o Hidrograma Unitário segundo a metodologia proposta pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), antigo *Soil Conservation Service* (SCS). Essa metodologia utiliza o T_c no cálculo da duração do tempo de pico e vazão de pico (FANG et al., 2008).

Nesse sentido, estimar o T_c se tornou habitual no dimensionamento de projetos de estruturas hidráulicas e de saneamento, e também para estudar os impactos de cenários de mudança de uso e ocupação do solo, como desmatamento e urbanização, no que se refere à ocorrência de enchentes (CASTRO et al., 2015). Sabe-se também que o T_c tem influência significativa nos resultados da modelagem hidrológica, Bondelid et al. (1982 apud FANG et al., 2008) identificaram que cerca de 75% dos erros encontrados nas estimativas de vazão de pico poderiam estar relacionados a falhas na determinação do T_c .

O T_c pode ser medido através da aplicação de métodos baseados em traçadores radioativos e químicos. No entanto, na prática, geralmente são utilizadas fórmulas empíricas, como a equação proposta por Kirpich em 1940 e largamente usada nos Estados Unidos e a equação de Giandotti, proposta em 1934 e bastante utilizada na Itália (GRIMALDI et al., 2012). As formulações para determinação do T_c geralmente são baseadas em características como topografia, percentual de impermeabilização da bacia, uso do solo, coeficientes de rugosidade da superfície e dos rios, distâncias e declividades de caminhos de fluxo ao longo da superfície e ao longo dos rios, etc (SILVEIRA, 2005).

Uma metodologia muito difundida, intensamente adotada também nos Estados Unidos, é o método desenvolvido pelo NRCS, pertencente ao Departamento de Agricultura dos EUA, e que se baseia na determinação da velocidade da água e do seu respectivo tempo de deslocamento (NRCS, 1986). O método NRCS utiliza dois tipos de equação, de acordo com a característica (escoamento superficial ou escoamento em canal) do local onde está sendo feito o cálculo. Autores como McCuen et al. (1984) consideram o valor de T_c obtido pelo método NRCS como o mais próximo da realidade, e o utilizam como padrão para comparação com os resultados de T_c para outras formulações empíricas.

Para o escoamento em canal, o método propõe a utilização da Equação de Manning, que estima a velocidade média da água em um canal a partir do nível da água, da geometria da seção transversal do canal, da declividade do fundo e da rugosidade das paredes, considerando o escoamento permanente e uniforme (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Muitos desses parâmetros usados no método, e que derivam da caracterização da rede de drenagem, não são estimados diretamente no campo ou por meio dos mapas e mesmo quando obtidos por metodologias razoáveis, baseadas nos conhecimentos da engenharia, diferentes analistas acabam chegando a resultados que costumam divergir (FANG et al., 2007). Por esse motivo, a implementação do método NRCS é considerada mais complexa do que a aplicação das outras equações empíricas (ROUSSEL et al. 2006).

Em um estudo realizado por Fang et al. (2007), o T_c foi estimado pelo método NRCS por três grupos independentes de pesquisadores em 96 bacias hidrográficas localizadas no Texas, EUA. Cada um desses grupos caracterizou as seções transversais dos canais segundo seus critérios e metodologias, definindo o nível da água, a geometria da seção, a declividade do fundo e a rugosidade das paredes. Como resultado, para as mesmas bacias, as estimativas de T_c variaram em média 50%. Em algumas bacias, a diferença relativa entre o T_c medido entre um grupo e outro chegou a 90%. Fang et al. (2007) relacionam esses resultados ao fato de a caracterização do canal estar bastante relacionada às considerações e premissas de cada grupo de pesquisadores, principalmente no que se refere às propriedades geométricas do canal, dada a dificuldade de medição e a consequente dependência da experiência e interpretação do analista.

Ainda no mesmo estudo, um dos grupos de pesquisadores determinou o T_c nas 96 bacias classificando o canal como de seção transversal retangular e em seguida, considerando o canal trapezoidal. Como resultado, observou-se uma diferença média relativa de 12% nos valores de T_c . Nesse sentido, baseado nesses estudos, é possível afirmar que a caracterização da seção transversal exerce significativa influência nos resultados de T_c .

Adicionalmente a essa problemática da dificuldade e subjetividade na obtenção dos dados que caracterizam o canal, está associada o fato de que na natureza, essas mesmas características da rede de drenagem variam espacialmente. Para considerar essa variação, é indicado identificar N sub-trechos homogêneos ao longo da drenagem, em que essas características e por conseguinte a velocidade da água possam ser consideradas constantes e de escoamento permanente e uniforme. O tempo de deslocamento da água no canal pode ser encontrado pela soma do tempo de deslocamento ao longo desses sub-trechos. Sabe-se

que na verdade não existe a rigor tal homogeneidade. Porém, trata-se de uma simplificação necessária para aplicação do método, e que isso tem certa subjetividade e dependência da disponibilidade de informações para caracterizar a rede de drenagem.

Apesar dessa indicação e devido à dificuldade para obtenção de dados, estudos como os de Melesse e Graham (2004), Fang et al. (2007), e Grimaldi (2012) simplificam o cálculo do Tc, considerando todo o canal como um único trecho homogêneo. Além disso, consideram que a seção transversal possui uma forma geométrica constante, representada geralmente por um trapézio, retângulo ou triângulo. As dimensões dessas seções transversais são estimadas ou de forma subjetiva, ou por análise de sensibilidade (comparando os resultados obtidos por cada configuração de caracterização da seção transversal aos dados observados em campo), ou ainda por meio de fotografias aéreas.

Nesse sentido, este plano de trabalho visa contribuir avaliando como diferentes níveis de discretização da rede de drenagem e a caracterização das seções transversais dos cursos d'água influenciam o cálculo do tempo de concentração pelo método NRCS aplicado de forma automatizada via geoprocessamento, tomando a bacia hidrográfica do rio Cuiá, localizada em João Pessoa, como área de estudo.

Para tanto foi utilizado o MDE da região e dados de batimetria das seções transversais dos canais pertencentes à bacia. Essas seções foram caracterizadas e os rios foram subdivididos em trechos homogêneos, admitindo que durante determinado trecho o canal possui as características da seção caracterizada a montante. O Tc foi estimado para três níveis de subdivisão ou discretização da rede de drenagem e os resultados permitiram avaliar a sensibilidade do parâmetro Tc ao nível de caracterização dos cursos d'água. A partir desses resultados é possível refletir sobre a necessidade ou não de uma análise mais aprofundada sobre as características do canal em estudos hidrológicos, considerando fatores como o custo dessa análise em termos de tempo e capital, nível de confiabilidade dos resultados que se deseja alcançar e os objetivos da modelagem hidrológica.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudos e dados disponíveis

Foi utilizada como área de estudo a bacia hidrográfica do rio Cuiá (Fig. 1), localizada na mesorregião do litoral paraibano e na microrregião de João Pessoa, ocupando uma área de aproximadamente 40 km², com altitude média de 5 metros.

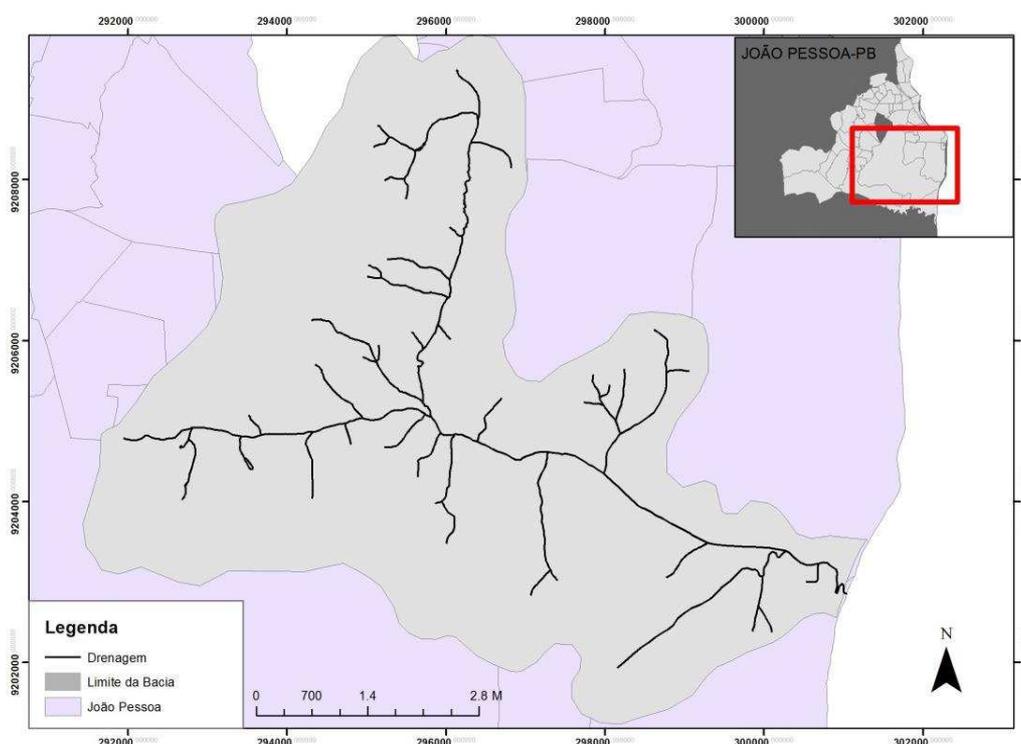


Figura 1: Localização da bacia do rio Cuiá.

Um dado inicial necessário foi a delimitação dessa bacia hidrográfica (Fig. 2-a), obtida a partir do processamento inicial do MDE da região (Fig. 2-b).

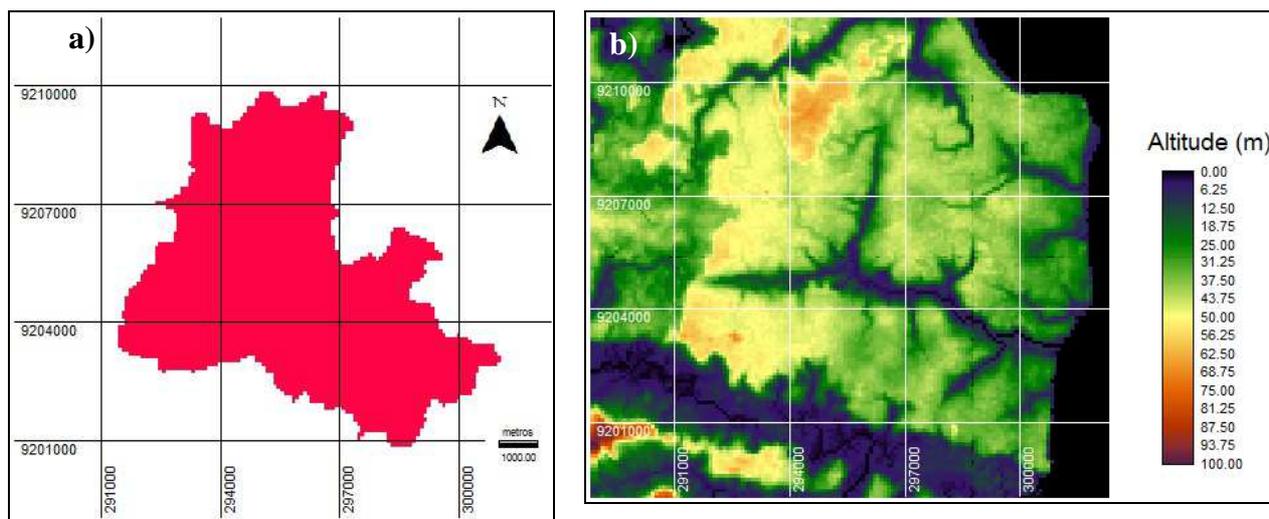


Figura 2: a) Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Cuiá; b) MDE da região da bacia do rio Cuiá.

Além de delimitar a bacia hidrográfica, o processamento do MDE também permite definir a rede de drenagem (Fig. 3-a), que também é um dado inicial necessário.

Mapas de uso e ocupação do solo também foram utilizados (Fig. 3-b). Adicionalmente, foram necessários dados de batimetria e o memorial fotográfico de 23 seções transversais da rede de drenagem da bacia do Cuiá.

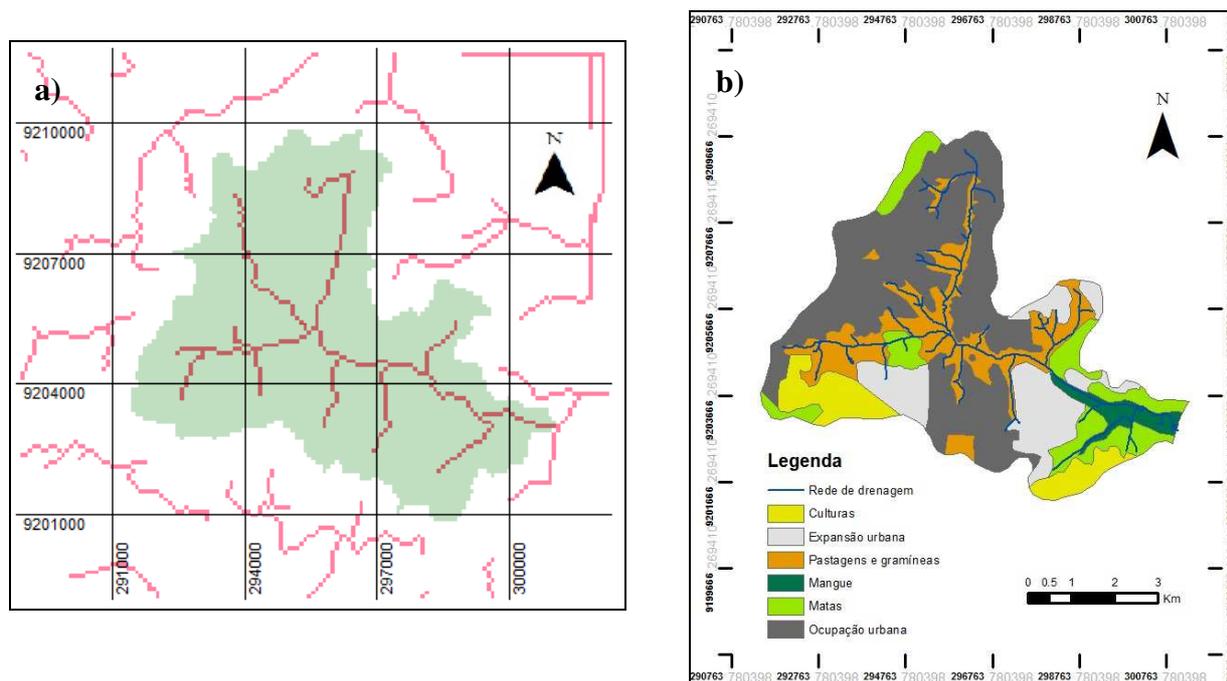


Figura 3: a) Rede de drenagem; b) Mapa de uso do solo da bacia do rio Cuiá.

Visão geral do método NRCS para determinação do tempo de concentração

O método NRCS considera que o tempo de concentração é dado pela soma do tempo de deslocamento da água (desde o ponto mais distante do exutório até o exutório) ao longo da superfície do solo e ao longo dos canais. No trecho em superfície, isto é, desde o ponto mais remoto da bacia até o momento em que a água chega à rede de drenagem, o tempo de deslocamento da água é dado pela Eq.(1), que é uma simplificação da solução da onda Cinemática-Manning (NRCS, 1986).

$$T_s = \frac{5,474 \cdot (n \cdot L_s)^{0,58}}{P_{24}^{0,5} \cdot S^{0,4}} \quad \text{equação (1)}$$

Onde T_s é o tempo de deslocamento em minutos da água na superfície; S é a declividade; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; L_s é o comprimento ao longo do escoamento em metros; e P_{24} é a precipitação com 24 horas de duração (mm), segundo a curva intensidade-duração-frequência (IDF) da área de estudo e para o tempo de retorno de projeto.

O Tempo de Retorno ou Tempo de Recorrência (T_r), representa o número médio de anos durante o qual se espera que a precipitação analisada seja igualada ou superada. Nesse trabalho, o T_c foi estimado para um tempo de retorno de 10 anos.

Para o escoamento em canal, até chegar ao exutório, o método propõe a utilização da Equação de Manning, apresentada na Eq.(2). Considerada uma relação simples, ela possui origem empírica e é atualmente a mais usada no cálculo da velocidade da água em canais.

$$V = \frac{R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad \text{equação (2)}$$

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad \text{equação (3)}$$

Onde V é velocidade média da água no canal (m/s); S é a declividade do fundo (m/m); n é o coeficiente de Manning; R_h é o raio hidráulico (m); A_m é a área molhada da seção transversal (m²); e P_m é o perímetro molhado da seção transversal (m).

O tempo de deslocamento da água em canal é obtido a partir da velocidade média da água e é dado pela Eq.(4).

$$T_c = \frac{L_c}{V} \quad \text{equação (4)}$$

Onde T_c é o tempo de deslocamento da água durante o trajeto no canal (s); e L_c é o comprimento do trecho onde ocorre o escoamento (m).

Caracterização das seções transversais do rio

A partir dos dados de batimetria e do memorial fotográfico, as 23 seções transversais dos rios que compõem a bacia do Cuiá foram caracterizadas quanto aos seguintes aspectos:

- Raio Hidráulico R_h - foi determinado a partir da Eq.(3).
- Coeficiente de rugosidade de Manning n - foi estimado visualmente, de forma subjetiva, a partir de fotografias das seções transversais, adotando-se valores recomendados por Baptista et al. (2011) (Tab. 1), em função do nível de rugosidade das paredes dos canais.
- Declividade do fundo S - é a cota do talvegue da seção analisada subtraída da cota do talvegue da seção a jusante, dividido pela distância entre as duas seções.

Apesar de se conhecer a geometria da seção, a determinação do R_h foi dificultada pela necessidade de se supor um nível da água, que não poderia ser aquele medido durante o levantamento batimétrico, realizado num período seco. Isso porque, como foi visto, o T_c precisa ser estimado para um evento de precipitação com T_r de 10 anos, que produziria um nível maior da água no canal.

Autores como Fang et al. (2007) estimam esse nível da água por meio de imagens de satélite ou fotografias aéreas. Nesse trabalho, esse nível da água foi encontrado de forma subjetiva.

No entanto, também foi calculado o T_c considerando o nível medido durante o levantamento. Dessa forma, é possível comparar a influência dessa incerteza nos resultados finais de T_c .

Tabela 1 – Coeficientes de rugosidade de Manning para canais naturais - Fonte: Baptista et al. (2011)

| Tipo | Características | Rugosidade | | |
|---|----------------------|------------|--------|--------|
| | | Mínima | Normal | Máxima |
| Canais de pequeno porte em planície (B < 30 m) | Limpos | 0,025 | 0,033 | 0,045 |
| | Trechos lentos | 0,050 | 0,070 | 0,080 |
| Canais de pequeno porte em montanhas (B > 30 m) | Leitos desobstruídos | 0,030 | 0,040 | 0,050 |
| | Leitos com matações | 0,040 | 0,050 | 0,070 |
| Canais de grande porte (B > 30 m) | Seções regulares | 0,025 | - | 0,060 |
| | Seções irregulares | 0,035 | - | 0,100 |
| Planícies de inundação | Pastagens | 0,025 | 0,030 | 0,035 |
| | Culturas | 0,020 | 0,040 | 0,050 |
| | Vegetação densa | 0,045 | 0,070 | 0,160 |

Definição dos diferentes níveis de discretização da rede de drenagem

Foram estabelecidos três diferentes níveis de discretização da rede de drenagem representados por A, B e C (Fig. 4), em que A é a discretização máxima, onde foi considerado um maior número de trechos homogêneos e C é a discretização mínima, onde foi considerado um menor número de trechos homogêneos.

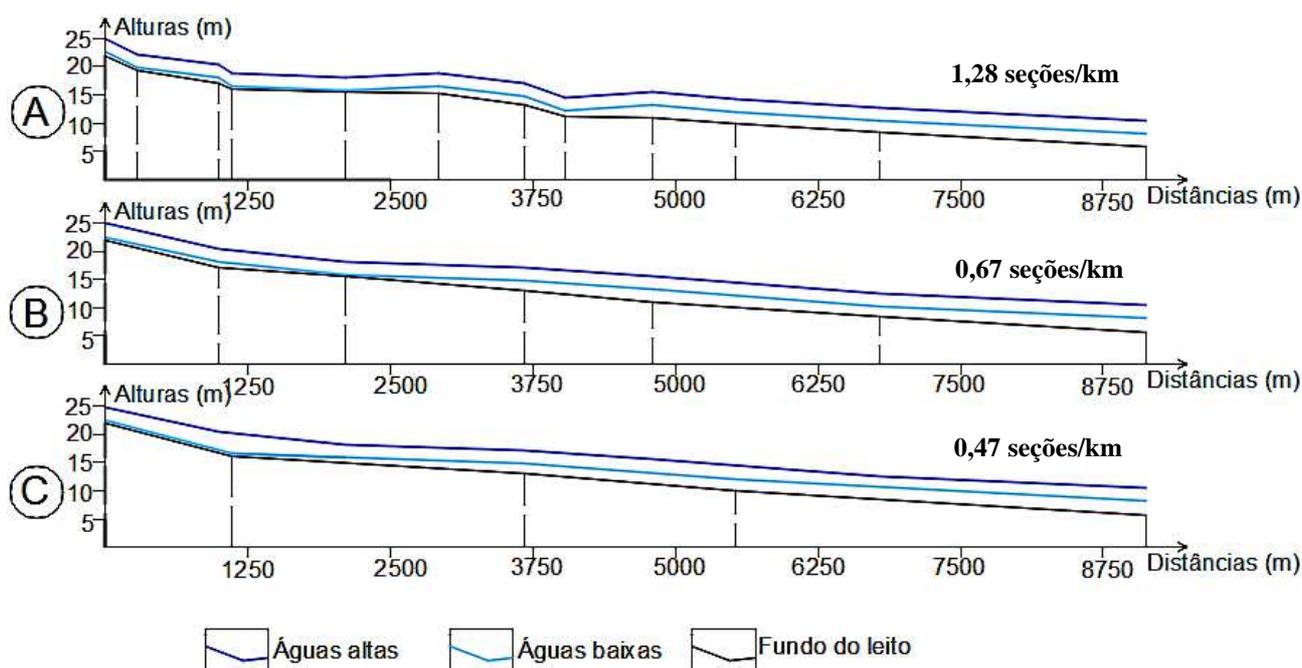


Figura 4: Perfil Longitudinal do rio Cuiá para os níveis de discretização A, B e C.

Cálculo do tempo de deslocamento da água de cada pixel até o exutório

O tempo de deslocamento da água de cada pixel que representa a rede de drenagem (Fig. 3-a) até o exutório foi obtido usando uma rotina em linguagem FORTRAN:

- I. Cada pixel recebeu como atributo as características do sub-trecho que pertence (R_h , n , S);
- II. A partir das Equações (2) e (4), estimou-se a velocidade e o tempo de deslocamento para cada sub-trecho homogêneo a jusante do pixel analisado, determinando-se o tempo de deslocamento da água para ir do pixel avaliado ao exutório. Esse procedimento foi repetido para todos os pixels que compõem a rede de drenagem.

O tempo de deslocamento da água de cada pixel que representa a superfície do solo até o exutório também foi obtido com a aplicação de um programa criado em linguagem FORTRAN, com base na utilização da Eq.(1), similar à abordagem descrita por Castro et al. (2015).

Um quadro resumo das principais etapas assumidas na metodologia aplicada nesse trabalho é apresentado na Fig. 5.

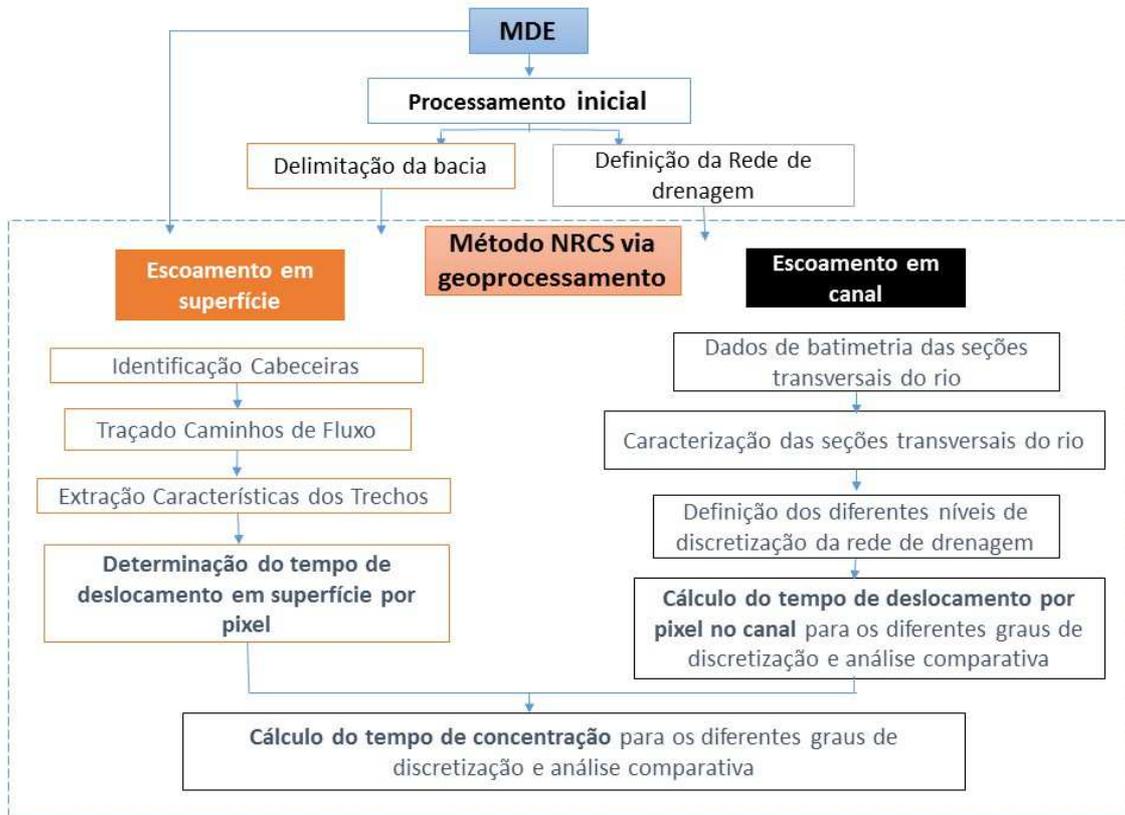


Figura 5: Metodologia - Quadro Resumo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 6-A, 6-B e 6-C apresentam os valores de tempo de deslocamento da água de cada pixel da rede de drenagem até o exutório da bacia, para os níveis de discretização A, B e C, respectivamente.

Avaliando a Fig. 6, é possível constatar que os cenários B e C, menos discretizados, apresentaram menores valores de tempo de deslocamento. Os pixels do nível B apresentaram uma diminuição média de aproximadamente 33% no tempo de deslocamento da água quando comparados ao nível A. Já o cenário C, com o menor número de trechos homogêneos, se comportou da mesma forma, e o tempo de deslocamento diminuiu em média 30% em relação ao nível A.

A Fig. 7 apresenta o tempo de concentração obtido em cada um dos níveis de discretização.

A partir da Fig. 7 é possível identificar que em relação ao nível A, o nível B apresentou um tempo de concentração menor cerca de 17%. Isso significa que considerando a rede de drenagem menos discretizada, consideraríamos que o escoamento superficial gerado em toda a área da bacia estaria contribuindo com o escoamento no exutório 1h e 16min mais cedo.

Para um nível C, com discretização ainda maior, o tempo de concentração reduziria aproximadamente 16% (1h e 8min) em relação ao apresentado em A.

Essa diferença está relacionada a vários aspectos, dentre eles, está a mudança na declividade, causada pelo descarte de algumas seções (Fig. 4). Para a bacia estudada, diminuir o número de trechos homogêneos significou aumentar a declividade, e conseqüentemente a velocidade do escoamento, o que proporcionou uma diminuição do tempo de deslocamento da água.

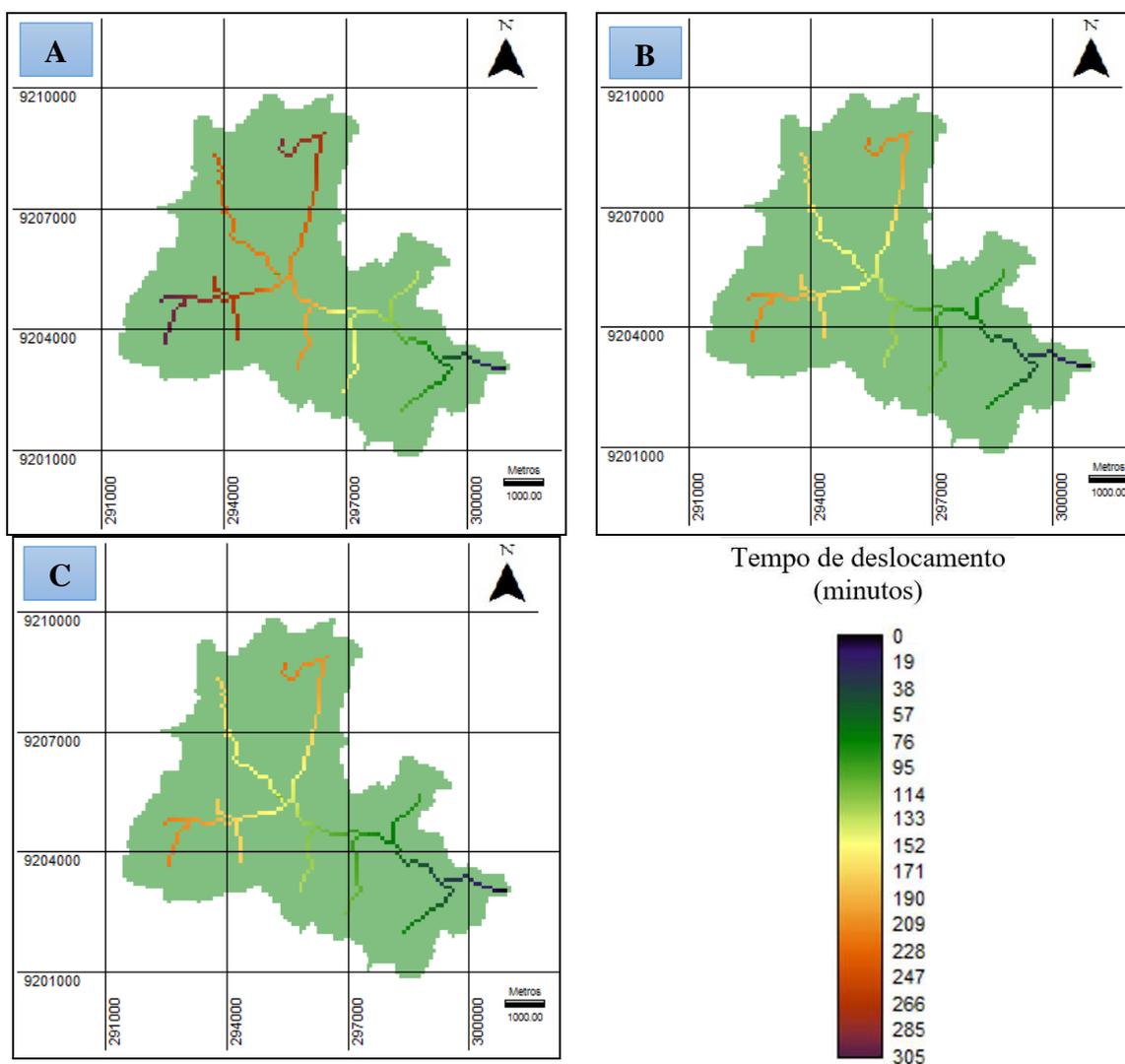


Figura 6: Escoamento em canal: tempo de deslocamento da água do pixel até o exutório da bacia do rio Cuiá, para os níveis de discretização A, B e C.

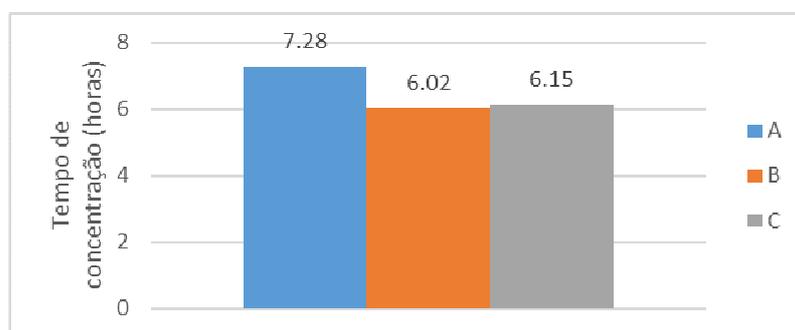


Figura 7: Tempo de concentração estimado para cada um dos níveis de discretização

Já a Fig. 8 compara os valores de T_c obtidos considerando o nível da água baixo, encontrado durante o levantamento topográfico das seções transversais do canal, e considerando o nível da água alto, admitido como sendo aquele que aconteceria em um evento de chuva excepcional.

A Fig. 8 revela que considerando o nível da água como aquele medido durante o levantamento batimétrico das seções, maiores tempos de concentração seriam estimados. Foi identificado que em média, o tempo de concentração estimado para um nível baixo aumentaria cerca de 141% em relação aquele calculado para um nível alto da água no canal. Para o

cenário A, a diferença foi a maior (167%) e o Tc aumentou cerca de 12h. A explicação está no fato de que um nível da água menor propiciou um menor Raio Hidráulico, e pela Eq.(2), um menor Rh indica uma menor energia cinética da água, isso significa que a água demoraria mais tempo para percorrer o mesmo caminho, isso porque numa situação de menor Rh, a rugosidade imposta pelas paredes do canal dificultariam o escoamento de forma mais efetiva. Esses resultados confirmam a tendência de superestimar o Tc ao considerar um escoamento superficial com baixa carga hidráulica (SILVEIRA, 2005).

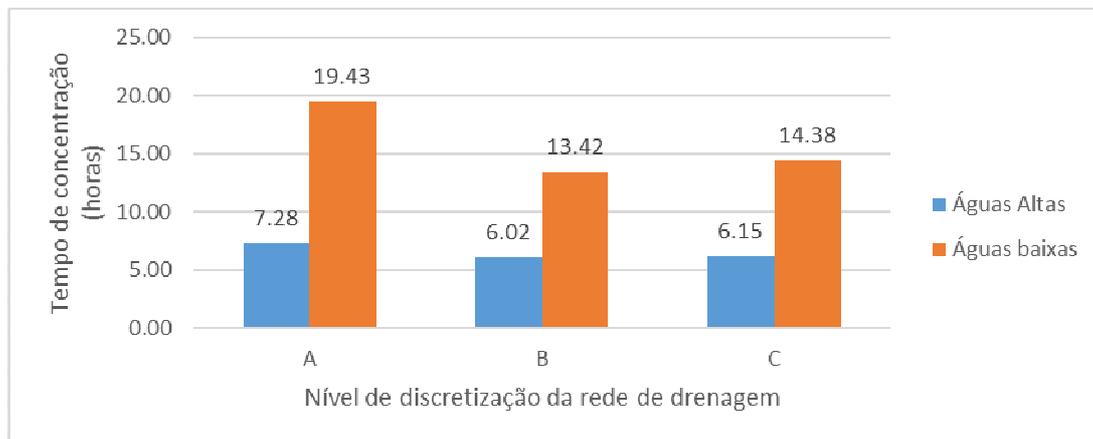


Figura 8: Comparação entre o Tempo de concentração obtido em um cenário de nível da água elevado e nível da água baixo.

Uma dificuldade encontrada para a aplicação do método NRCS via geoprocessamento, e já relatada por Castro et al. (2015), foram os tempos de concentração superestimados em função do cálculo do tempo de deslocamento da água em superfície em vista da aplicação da Eq.(1), devido à ocorrência de declividades muito pequenas. Em geral, apenas uma pequena quantidade de pixels de superfície do solo possui tempos de deslocamento da água muito elevados, que destoam da tendência observada pelos demais pixels, é o que se pode observar no histograma apresentado na Fig. 9, que analisa os tempos de deslocamento da água para cada pixel da bacia em um nível de discretização A.

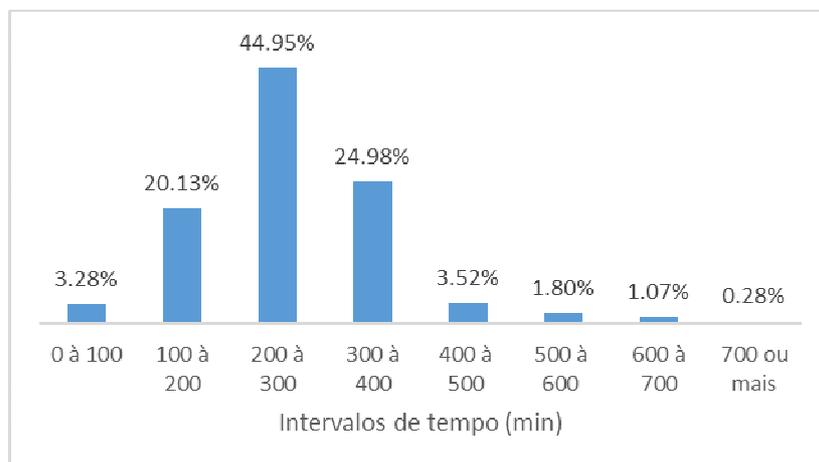


Figura 9: Nível de discretização A: percentagem de pixels que apresentaram tempos de deslocamento dentro dos intervalos indicados

Isso significa que há a tendência de superestimar o Tc se for considerado estritamente o tempo máximo de deslocamento para obtenção do parâmetro. Castro et al. (2015) sugere desconsiderar os maiores tempos de deslocamentos (por exemplo, os 5% maiores), para ignorar esses casos onde o tempo de deslocamento foi superestimado por causa dessa declividade muito pequena. Por esse motivo, nesse trabalho, descartaram-se cerca de 5% dos maiores tempos de deslocamento encontrados.

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados mostram que o nível de caracterização da rede de drenagem interferiu consideravelmente nos valores de tempo de concentração. Isso significa que em estudos de modelagem hidrológica, quanto maior o número de trechos homogêneos, maior será a confiabilidade dos resultados.

Por esse motivo, nesses estudos, é preciso avaliar a viabilidade de realizar um levantamento batimétrico de um maior número de seções, tendo em vista a sensibilidade do Tc ao número de trechos homogêneos e a importância do parâmetro no contexto da previsão hidrológica, em vista da avaliação dos efeitos do desmatamento e da urbanização, e também no contexto dos projetos de estruturas hidráulicas.

Tempos de concentração superestimados resultam em hidrogramas que indicam uma vazão máxima menor, ocorrendo após um maior período de tempo dado o início do evento de precipitação. O que culminaria em previsões hidrológicas menos preocupantes e projetos menos seguros. Por outro lado, tempos de concentração subestimados preveem hidrogramas com vazão máxima elevada, ocorrendo em menor período de tempo após o início da chuva. Nesse contexto, as simulações hidrológicas seriam demasiadamente alarmantes e os projetos seriam mais onerosos, porque seriam superdimensionados.

É necessário compreender também a influência da incerteza e subjetividade na determinação de parâmetros como o número de Manning (n). Estudos realizados por Fang et al. (2007) indicam que o número de Manning, bem como o comprimento do canal, são um dos mais importantes parâmetros na estimativa do Tc pelo método NRCS.

Além disso, o método NRCS também se mostrou sensível ao nível da água no canal que foi assumido. Por isso, encontrar alternativas razoáveis para a determinação desse parâmetro também se faz necessário.

Para o escoamento em superfície cabem estudos que solucionem a problemática dos pixels com tempo de deslocamento superestimados e que busquem avaliar e comparar outras formas de determinação da declividade por meio do MDE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAPTISTA, M. B. **Hidráulica Aplicada**. Porto Alegre: ABRH, 2011.
2. BONDELID, T. R.; MCCUEN, R. H.; JACKSON, T. J. Sensitivity of SCS models to curve number variation. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 20, n. 2, p. 337–349, 1982.
3. BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.
4. CASTRO, V. L. S.; LIMA, D. M.; COSTA, A. H. A.; PAZ, A. R. Processamento de modelo digital de elevação para estimativa do tempo de percurso do escoamento superficial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 6305-6312.
5. COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p. (Coleção ABRH; 12).
6. FANG, X.; THOMPSON, D. B.; CLEVELAND, T. G.; PRADHAN, P. Variations of time of concentration estimates using NRCS velocity method. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 314–322, 2007.
7. FANG, X.; THOMPSON, D. B.; 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**, v. 134, n. 2, p. 202–211, 2008.
8. GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; TAURO, F.; PORFIRI, M. Time of concentration: a paradox in modern hydrology. **Hydrological Sciences Journal**, v. 57, n. 2, p. 217–228, 2012.
9. NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS). **Urban hydrology for small watersheds: Technical Release 55**. 2 ed. Washington, D.C.: 1986. 164 p.
10. MCCUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. Estimating urban time of concentration. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 110, n. 7, p. 887–904, 1984.
11. MELESSE, A. M.; GRAHAM, W. D. Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time method utilizing remote sensing and GIS. **Journal Of The American Water Resources Association**, v. 40, n. 4, p. 863–879, 2004.
12. PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 2, p. 84–95, 2008.

13. ROUSSEL, M. C.; THOMPSON, D. B.; FANG, X.; CLEVELAND, T. G.; GARCIA, A. C. **Timing parameter estimation for applicable Texas watersheds.** Disponível em: <http://library.ctr.utexas.edu/digitized/TexasArchive/phase2/4696-2-lamar.pdf>. Acesso: 06 de Agosto de 2016.
14. SILVEIRA, A. L. 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, 2005.
15. ZUAZO, V.; GIRONÁS, J.; NIEMANN, J. D. Assessing the impact of travel time formulations on the performance of spatially distributed travel time methods applied to hillslopes. *Journal of Hydrology*, v. 519, Part B, p. 1315–1327, 2014.