

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL

LETÍCIA MARTINS DE OLIVEIRA

COEFICIENTE DE ESCOAMENTO DE ENCHENTE EM DUAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS EXPERIMENTAIS EM UBERLÂNDIA - MG

UBERLÂNDIA

2018

LETÍCIA MARTINS DE OLIVEIRA

COEFICIENTE DE ESCOAMENTO DE ENCHENTE EM DUAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS EXPERIMENTAIS EM UBERLÂNDIA - MG

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador: Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho

UBERLÂNDIA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

- O48c
2018
- Oliveira, Letícia Martins de, 1992
Coeficiente de escoamento de enchente em duas bacias hidrográficas experimentais em Uberlândia - MG / Letícia Martins de Oliveira. - 2018. 74 f. : il.
- Orientador: Hudson de Paula Carvalho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.716>
Inclui bibliografia.
1. Qualidade ambiental - Teses. 2. Bacias hidrográficas - Uberlândia (MG) - Teses. 3. Escoamento superficial - Uberlândia (MG) - Teses. 4. Indicadores ambientais - Teses. I. Carvalho, Hudson de Paula. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental. III. Título.

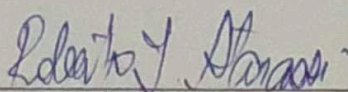
CDU: 574

LETÍCIA MARTINS DE OLIVEIRA

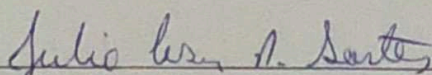
COEFICIENTE DE ESCOAMENTO DE ENCHENTE EM DUAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS EXPERIMENTAIS, EM UBERLÂNDIA - MG

Dissertação aprovada para a obtenção
do título de Mestre no Programa de
Pós-graduação em Qualidade
Ambiental da Universidade Federal de
Uberlândia (MG) pela banca
examinadora formada por:

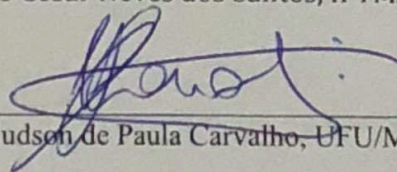
Uberlândia, 27 de fevereiro de 2018.



Prof. Dr. Roberto Terumi Atarassi, UFU/MG



Prof. Dr. Júlio César Neves dos Santos, IFTM/MG



Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho, UFU/MG

Aos meus pais, à Deus e ao senhor Jesus, a quem devo tudo que acontece em minha vida, com muito carinho, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e ao menino Jesus, por terem me abençoado e me erguido em todos os momentos que passei até chegar aqui.

Imensamente, agradeço à senhora Roseli e ao senhor Jacy, meus pais, pelo suporte que me deram em todas as minhas escolhas. E claro, pela paciência e sabedoria que eles me guiaram. E a todos os meus familiares.

Ao Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho, agradeço pela orientação, apoio, correções, paciência e pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento dessa dissertação.

À minha colega, Natália Mendes, pela cooperação durante o transcorrer do meu trabalho.

À equipe e aos colegas do Laboratório de Hidrologia, pelo agradável convívio e auxílio nas atividades internas e de campo. Em especial a querida Márcia Batistela, Lisiane Mendes, João Carlos, Ially Samilly, Pedro Corsino, Fernando Matias e Darione Leal.

À secretária do PPGMQ, Marília Melo, pelo incentivo, apoio, alegria e paciência. Aos meus velhos amigos Arthur Filipe, Bruno Afonso, Janayna Marques e Rayane Pires.

Aos funcionários das fazendas da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) que nos deram todo o suporte necessário durante o desenvolvimento do mestrado.

Ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) e à UFU, pela oportunidade de realização do Mestrado.

Agradeço também aos professores Dr. Roberto Terumi Atarassi e Dr. Júlio César Neves dos Santos, pelo aceite em participarem da minha banca de defesa.

Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 461970/2014-7, pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

A todos, fica o meu muitíssimo obrigada!

Sumário

| | |
|---|----|
| Lista de Figuras | i |
| Lista de Tabelas | ii |
| RESUMO..... | iv |
| ABSTRACT | v |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 15 |
| 2.1 Escoamento Superficial | 15 |
| 2.2 Coeficiente de escoamento de enchente (C)..... | 17 |
| 2.3 Metodologias para estimativas do escoamento superficial..... | 18 |
| 2.3.1 Método Racional..... | 18 |
| 2.3.2 Método CN – SCS | 20 |
| 2.3.3 Coeficiente C oriundo da literatura técnica | 23 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 26 |
| 3.1 Localização das áreas de estudo | 26 |
| 3.1.1 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória..... | 26 |
| 3.1.2 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha..... | 27 |
| 3.2 Caracterização pedoclimática da região onde se localizam as bacias estudadas..... | 28 |
| 3.3 Imagens espaciais | 29 |
| 3.4 Instrumentos | 29 |
| 3.5 Estações de monitoramento hidrológico..... | 30 |
| 3.6 Monitoramento da vazão <i>in loco</i> para determinação das curvas chaves | 35 |
| 3.7 Obtenção das curvas chaves | 37 |
| 3.8 Delimitação das bacias experimentais | 37 |
| 3.9 Tipo de solo das Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Água Vermelha | 39 |
| 3.10 Uso do solo das Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Água Vermelha | 40 |
| 3.11 Coeficiente de escoamento de enchente (C)..... | 42 |
| 3.11.1 Determinação do coeficiente C observado | 42 |
| 3.11.2 Estimativa do coeficiente C pelo método Racional..... | 48 |
| 3.11.3 Estimativa do coeficiente C pelo método do <i>Soil Conservation Service</i> (CN – SCS) | 49 |
| 3.11.4 Estimativa do coeficiente C oriundo da literatura técnica | 52 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 54 |
| 4.1 Coeficiente C observado..... | 54 |

| | |
|---|----|
| 4.2 Estimativa do coeficiente C pelo método CN-SCS | 55 |
| 4.3 Estimativa do coeficiente C pelo método racional | 59 |
| 4.4 Estimativa do coeficiente C da literatura..... | 61 |
| 4.5 Comparação dos coeficientes de escoamento de enchente (C) | 62 |
| 5 CONCLUSÃO | 68 |
| REFERÊNCIAS | 69 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Mapa de localização da BHEGL e de suas estações de monitoramento hidrológico..... | 27 |
| Figura 2 - Mapa de localização da BHEAV e de suas estações de monitoramento hidrológico..... | 28 |
| Figura 3 - Pluviômetro na estação meteorológica automática localizada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória..... | 30 |
| Figura 4 - Estação Fluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória. (A) Sensor de nível na seção de controle; (B) Caixa metálica com o Datalogger | 31 |
| Figura 5 - Estação Hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha. (A) Sensor de nível na seção de controle; (B) <i>Datalogger</i> e pluviômetro | 32 |
| Figura 6 - Estação Pluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha | 33 |
| Figura 7 - Método de Simpson para cálculo de área | 36 |
| Figura 8 - Mapa de tipos de solo na BHEGL | 39 |
| Figura 9 - Mapa de tipos de solo na BHEAV | 40 |
| Figura 10 - Mapa de uso do solo na BHEGL | 41 |
| Figura 11 - Mapa de uso do solo na BHEGL | 42 |
| Figura 12 - Procedimento para a separação do escoamento superficial direto | 44 |
| Figura 13 – Box-plots dos coeficientes C na BHEGL..... | 63 |
| Figura 14 – Box-plots do coeficiente C na BHEAV | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores do coeficiente de escoamento de enchente propostos por Wilken (1978) | 24 |
| Tabela 2 - Valores do coeficiente de escoamento de enchente, em função dos tipos de superfície, recomendados pela ASCE (1992) para período de retorno de 2 a 10 anos | 24 |
| Tabela 3 - Valores do coeficiente de escoamento de enchente, em função do uso do solo, recomendados pela ASCE (1992) com período de retorno de 2 a 10 anos | 24 |
| Tabela 4 - Valores do coeficiente de escoamento usados na cidade de Austin, nos Estados Unidos da América, recomendados por Chow (1988) | 25 |
| Tabela 5 - Relação das estações de monitoramento de chuva e nível dos córregos nas bacias experimentais em estudo. | 34 |
| Tabela 6 - Coeficiente C observado na BHEGL | 54 |
| Tabela 7 - Coeficiente C observado na BHEAV | 54 |
| Tabela 8 - Valores de CN obtidos para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória | 55 |
| Tabela 9 - Valores de CN obtidos para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha | 56 |
| Tabela 10 - Valores de CN retificados, retenção de água no solo e abstração inicial por evento chuvoso na BHEGL | 56 |
| Tabela 11 - Valores de CN retificados, retenção de água no solo e abstração inicial por evento chuvoso na BHEAV | 57 |
| Tabela 12 - Estimativa do C pelo método CN – SCS na BHEGL | 58 |
| Tabela 13 - Estimativa do C pelo método CN – SCS na BHEAV | 58 |
| Tabela 14 - Estimativa do C pelo método racional na BHEGL | 59 |
| Tabela 15 - Estimativa do C pelo método racional na BHEAV | 60 |
| Tabela 16 - Valores de C selecionados de acordo com os tipos de superfícies existentes na BHEGL | 61 |
| Tabela 17 - Valores de C selecionados de acordo com os tipos de superfícies existentes na BHEAV | 61 |
| Tabela 18 - Resumo dos valores de C obtidos na BHEGL | 63 |
| Tabela 19 - Erro quadrático provenientes da comparação dos valores de C observados com os estimados na BHEGL | 64 |

| | |
|--|----|
| Tabela 20 - Resumo dos valores de C obtidos na BHEAV | 65 |
| Tabela 21 - Erro quadrático provenientes da comparação dos valores de C observados com os estimados..... | 67 |

RESUMO

OLIVEIRA, LETÍCIA MARTINS. **Coeficiente de escoamento de enchente em duas bacias hidrográficas experimentais em Uberlândia-MG**. 2018. 74f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG¹

Frente ao notório crescimento do aproveitamento dos recursos hídricos, a compreensão da dinâmica de uma bacia hidrográfica torna-se substancial. O escoamento superficial direto, uma das fases do ciclo, se configura como um dos conceitos mais fundamentais na hidrologia, uma vez que é necessário para o dimensionamento de obras hidráulicas. O coeficiente de escoamento de enchente representa a quantidade de escoamento que determinada bacia hidrográfica é capaz de gerar em eventos chuvosos. Esse coeficiente é dependente de vários fatores, como umidade do solo, cobertura, características das chuvas e etc. Em bacias hidrográficas relativamente pequenas o conhecimento e as informações quali-quantitativas dos recursos hídricos são ainda incipientes. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou medir diretamente o coeficiente de escoamento de enchente (C) em duas bacias hidrográficas experimentais, localizadas no cerrado mineiro, e estimá-lo por três metodologias distintas: método racional, método CN-SCS e por meio de valores contidos em tabelas da literatura técnica. Os valores de C calculados a partir da precipitação efetiva observada apresentaram variação na BHEGL, de 0,004 a 0,074 e na BHEAV a variação se deteve entre 0,0003 a 0,014. Enquanto os valores a partir da precipitação efetiva estimada pelo método CN-SCS, na BHEGL, variaram entre 0,000001 e 0,328, e na BHEAV entre 0,0001 e 0,35. Quando esse cálculo foi realizado pelo método Racional, na BHEGL, o C alternou entre 0,017 a 0,262 e na BHEAV variou de 0,01 a 0,16. Por outro lado, quando o coeficiente C foi estimado a partir de tabelas contidas na literatura técnica, o mesmo variou, na BHEGL de 0,325 a 1 (com valor médio de 0,34) e na BHEAV, de 0,29 a 1 (com média de 0,42). Em ambas as bacias experimentais, nenhum dos valores de C obtidos pelos diferentes métodos concordaram bem entre si. A maior diferença, tanto na BHEGL quanto na BHEAV, foi percebida entre o valor médio do C observado e o C da literatura técnica. O método Racional se apresentou mais adequado para a estimativa do parâmetro C. Essa variação é resultado da variabilidade dos valores de C encontrados neste trabalho, o que por sua vez, reflete a complexidade relacionada a esse parâmetro.

Palavras-chave: Escoamento superficial. método racional. método CN-SCS. índice ϕ .

¹ Orientador: Hudson de Paula Carvalho – UFU

ABSTRACT

OLIVEIRA, LETÍCIA MARTINS. **Runoff coefficient in two experimental watersheds in Uberlândia-MG**. 2018. 74f. Dissertation (Master in Environmental and Environmental Quality), Federal University of Uberlândia, Uberlândia - MG

With the notorious increase in the use of water resources, the understanding of the dynamics of a watershed turns out to be very important. The direct runoff, one of the phases of the cycle, is one of the most fundamental concepts in hydrology. The runoff coefficient represents the amount of runoff that a given river basin is capable of generating during rainy events and also summarizes all the factors that affect the generated flow. When focusing on relatively small watersheds, the knowledge and the quali-quantitative data on water resources are still incipient. In this context, the present work aimed directly measure the runoff coefficient (C) of two experimental river watersheds located in the Cerrado of Minas Gerais, and to estimate by three different methodologies: rational method, SCS Runoff Curve Number Method and by means of values contained in tables of the technical literature. Values of C calculated by using the observed effective precipitation presented variation for the Experimental Watershed of Glória Creek (EWGL) which went from 0.004 to 0.074, while for the Experimental Watershed of Água Vermelha Creek (EWAV), the variation was between 0.0003 and 0.014. Unlike the previous method, the values of effective precipitation estimated by the CN-SCS method varied between 0.000001 and 0.328 for the EWGL and between 0.0001 and 0.35 for the EWAV. When calculations were performed with the Rational method, C alternated between 0.017 to 0.262 in EWGL, while in EWAV it ranged from 0.01 to 0.16. On the other hand, when the coefficient C was estimated from tables often found in the technical literature, it varied from 0.325 to 1 (mean value of 0.34) for the EWGL and for the EWAV, it went from 0.29 to 1 (with mean of 0.42). On both experimental watersheds, none of the values of C obtained by the different methods came close to matching when compared with each other. The largest difference, both in EWGL and EWAV, was observed between the mean value of C directly measure and C from the technical literature. The Rational method was more adequate for the estimation of C. This variation is a result of the variability of the values of C found in this work, which in turn, reflects the complexity related to this parameter.

Keywords: Surface runoff. rational method. CN-SCS method. index ϕ .

1 INTRODUÇÃO

A eficaz gestão dos recursos hídricos de modo a garantir o uso múltiplo da água, é um dos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Para tal, é necessário o conhecimento das condições das bacias hidrográficas (características de uso, ocupação, manejo agrícola, fisiografia) bem como de sua hidrografia (regime, quantidade, qualidade dos corpos hídricos).

O entendimento do ciclo hidrológico é imprescindível para a compreensão da dinâmica de uma bacia hidrográfica, pois direta ou indiretamente ele é afetado pelas modificações do meio natural. O escoamento superficial direto, uma das fases do ciclo, se configura como um dos conceitos mais fundamentais na hidrologia e por isso, diversos métodos foram concebidos para serem utilizados em seu estudo.

Dois modelos podem ser viáveis para fins de estimação da vazão máxima de escoamento em pequenas bacias: método racional e método do número da curva do *Soil Conservation Service* (CN-SCS). Devido à simplicidade de suas aplicações, ambos são amplamente usuais nos estudos hidrológicos e no dimensionamento de estruturas hidráulicas.

Esses modelos traduzem a transformação da chuva em escoamento para a estimativa de escoamento superficial direto, bem como servem como instrumento que auxiliam a compreensão dos impactos oriundos dos processos de modificações da superfície. Essa relação chuva-escoamento é valiosa para o adequado planejamento hídrico, ambiental e econômico de uma bacia hidrográfica, uma vez que diversas obras hidráulicas necessitam do conhecimento do quão capaz é a bacia na geração de escoamento.

Além desses modelos, há modelos que fornecem a infiltração média de uma bacia, como o índice ϕ , que é fundamental para o escoamento superficial, conforme descrito em Tucci (2015) e Mello e Silva (2013).

O coeficiente de escoamento de enchente se configura como a relação entre o volume total de escoamento superficial de determinado evento chuvoso e o volume total de chuva precipitada, ou seja, representa a quantidade de escoamento que determinada bacia hidrográfica é capaz de gerar em eventos chuvosos (TUCCI, 2000). Esse coeficiente sintetiza todos os fatores que afetam o escoamento.

Em bacias hidrográficas pequenas o conhecimento e as informações qualitativas dos recursos hídricos são ainda incipientes. Nunes e Fiori (2007) salientaram em suas pesquisas a deficiência brasileira nos estudos de regimes hidrológicos, quanto a ausência

de dados fluviométricos consistentes e representativos. Situação essa que torna imprescindível pesquisas básicas a fim de caracterizá-las hidrologicamente de modo a disponibilizar informações para pesquisas mais avançadas e específicas.

Geralmente, as bacias onde são feitos estudos dos componentes hidrológicos são denominadas de bacias experimentais. Conforme detalhado em Paiva e Paiva (2016), estudos em bacias experimentais visam a estimativa de parâmetros, avaliação detalhada de processos físicos, químicos, e biológicos do ciclo hidrológico, além de calibração de modelos, aplicação e comparação de testes estatísticos.

Sendo assim, o presente trabalho objetivou medir diretamente o coeficiente de escoamento de enchente (C) em duas bacias hidrográficas experimentais, localizadas no cerrado mineiro, e estimá-lo por três metodologias distintas: método racional, método CN-SCS e por meio de valores indicados na literatura técnica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Escoamento Superficial

O escoamento superficial é uma das fases do ciclo hidrológico e trata da água oriunda das precipitações que, por efeito da gravidade, se desloca sobre a superfície do terreno, sendo um dos conceitos mais fundamentais em hidrologia. Ele ocorre após o início de um evento de chuva quando a superfície do solo já esteja saturada com água, isto é, quando a precipitação excede a velocidade de infiltração. Mohamoud et al. (1990) menciona que o excedente preenche as depressões na superfície do solo e posteriormente, inicia-se o escoamento.

A umidade do solo é de fundamental importância no controle dos processos hidrológicos, especialmente na geração do escoamento superficial (HEBRARD et al., 2006). No período inicial do evento chuvoso toda a precipitação se infiltra no solo, à medida que a chuva cai, a capacidade de infiltração do solo tende a diminuir até o ponto de saturação do mesmo (máxima quantidade que o solo consegue absorver) momento em que o excedente será escoado sobre a superfície. O escoamento superficial carrega substâncias e objetos até as cotas mais baixas da bacia hidrográfica, podendo contribuir para a poluição hídrica. Ele também contribui para a erosão hídrica ao transportar as partículas desagregadas do solo ocasionadas pelo impacto das gotas de chuva (BAGARELLO et al., 2018; LIMA et. al, 2018; RICHARDSON e AMANKWATIA, 2018).

A compreensão do escoamento superficial é de suma importância no planejamento do manejo agrícola e de obras de engenharia tais como reservatórios, barragens, canalização de rios, sendo, de acordo com Mello e Silva (2013), a fase mais importante do ciclo hidrológico para os estudos hidrológicos. Conforme Tucci (2015), há diferença de escoamento entre bacias rurais e urbanas. Em bacias urbanas o escoamento é regido pela superfícies impermeáveis e pelos sistemas de esgotos pluviais. Já em áreas rurais o escoamento é influenciado pelo tipo de cobertura vegetal, sendo que grande parte do volume de precipitação infiltra no solo.

Segundo esse mesmo autor, o escoamento comporta-se como não-linear, isto é, a vazão depende da área, profundidade e rugosidade. O grau de escoamento é dependente de fatores climáticos, relacionados a precipitação, bem como de fatores fisiográficos, obras hidráulicas presentes nas bacias e o uso do solo que podem intensificar ou atenuar o escoamento superficial.

Dentre os fatores relacionados à precipitação, a intensidade e a duração são diretamente proporcionais ao escoamento de forma que quanto maior a intensidade da chuva, mais rapidamente o solo atingirá a sua capacidade de infiltração gerando o escoamento. Tucci (1993) ressalta que o escoamento reflete as características da precipitação e principalmente de sua intensidade. Quão maior for a duração de uma chuva mais chances haverá de acontecer o escoamento. Caso os solos da bacia já tenham recebido uma precipitação anterior, mais suscetível à produção de escoamento essa bacia estará, uma vez que o solo estará previamente úmido.

No que concerne aos fatores fisiográficos, tem-se a permeabilidade, capacidade de infiltração, área e forma da bacia, entre outros. A permeabilidade da bacia está relacionada com a capacidade da mesma em absorver água, ou seja, quanto mais superfícies permeáveis a bacia contiver, mais chances da água infiltrar de forma a reduzir o volume de chuva escoado pela bacia hidrográfica (WANG et al., 2010; PARK et al., 2014; RADECKI-PAWLIK et al., 2014).

A área da bacia está relacionada diretamente com a potencialidade hídrica da mesma. Bacias com grandes áreas tendem a amortecer o escoamento, ao passo que pequenas bacias geram-no em um tempo menor. Nessas bacias, as chuvas convectivas são de grande relevância, pois podem provocar grandes enchentes.

Sua forma influencia no tempo de pico do escoamento. Em bacias hidrográficas com formato mais alongado as vazões são amortecidas. Por outro lado, em bacias mais arredondadas, as águas percorrem um menor caminho pelo curso d'água principal e logo se concentram no exutório, sendo mais propensas a enchentes. As obras de engenharia podem aumentar o pico de vazão, como a canalização de rios, ou o atenuarem, como fazem os reservatórios, ao regularizar a vazão. As barragens de forma geral retardam o processo de escoamento superficial.

Sriwongsitanon e Taesombat (2011) ao investigarem os efeitos da cobertura do solo no coeficiente de escoamento na Bacia do rio Ping Ping, na Tailândia, constataram como o uso do solo afeta o comportamento do escoamento. Resultados análogos da influência do uso do solo na resposta hidrológica de bacias foram encontrados nos estudos de Tucci e Clarke (1997), Tucci (2000) e Mahe et al. (2004).

2.2 Coeficiente de escoamento de enchente (C)

A precipitação total é o quantitativo de toda a chuva que caiu na bacia durante um evento chuvoso. Já a precipitação denominada efetiva corresponde a fração dessa precipitação total que origina o escoamento superficial, ou seja, corresponde ao que realmente escoou e chegou até a seção de controle da bacia. Nessa parcela são desconsiderados os volumes infiltrados, evaporados, interceptados pelas plantas e os retidos nas depressões do terreno.

Segundo Tucci (2000), o coeficiente de escoamento de enchente é a relação entre o volume total de escoamento superficial de determinado evento chuvoso e o volume total de chuva precipitado, ou seja, representa a quantidade de escoamento que determinada bacia hidrográfica é capaz de gerar em eventos chuvosos.

Esse mesmo autor em seu estudo constatou a variabilidade que o coeficiente de escoamento de enchente possui, devido ao fato dele ser em função de vários outros componentes da bacia, tais como: tipos de cobertura, solos, condições de umidade, declividade, retenções, entre outros. O coeficiente de escoamento C deve representar os efeitos integrados de todos esses fatores (SOEN, 2008).

Como bem salientado por esse autor, o C obtido em tabelas de manuais, muitas vezes, não partem de dados de campo e trazem consigo um teor de subjetividade que depende do autor, além de variarem de um evento chuvoso para outro.

Por isso, uma vez conhecido o coeficiente C, esse valor não irá representar um valor fixo, mas sim proporcionar uma noção do quão aquela bacia é capaz de gerar escoamento (CHOW et al., 1988). Segundo Macrae et al. (2010), espera-se que o coeficiente de escoamento aumente à medida que a bacia se torna mais húmida com os sucessivos eventos chuvosos.

O coeficiente de escoamento C pode ser estimado de várias maneiras, como pelo método racional que fornece diretamente o seu valor. Há também métodos que fornecem a precipitação efetiva, variável esta imprescindível para o cálculo de C. De acordo com Tucci (2015), a precipitação efetiva pode ser determinada por meio de equações de infiltração, que estimam e representam matematicamente esse processo, como os métodos de Horton e Green e Ampt; por meio de relações funcionais, como as estabelecidas por Kohler e Richards (1962) e o método CN-SCS (1957); e por meio de índices, que separam o escoamento pela definição de um fator constante como os índices W , α , ϕ .

2.3 Metodologias para estimativas do escoamento superficial

2.3.1 Método Racional

O método racional parte de uma análise simplificada do escoamento superficial e é amplamente utilizado em todo o mundo para a estimativa da vazão de pico em pequenas bacias hidrográficas (MAIDMENT, 1992). Conforme mencionado por Chow et al. (1988), esse método teve sua origem no século XIX e, devido a sua simplicidade, vem sendo amplamente aplicado. Chow et al. (1964), citam que Emil Kuichling mencionou, em 1889, esse método pela primeira vez na literatura norte americana para estimar vazões máximas de escoamento em projetos de rede de esgoto, e que os princípios do mesmo já haviam sido explicitados por Mulvaney, em 1851.

O modelo original do método racional (Equação 1) consiste em uma simplória e dedutiva da equação que transforma chuva em vazão.

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (1)$$

Em que:

Q é a vazão de pico, em $L^3 T^{-1}$;

C é o coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

I é a intensidade da precipitação, em $L^3 (L^2 T^{-1})$;

A é a área da bacia hidrográfica, em L^2 .

Outras fórmulas do método racional são encontradas na literatura e são derivadas da Equação 1 pelo rearranjo de unidades.

Chow et al. (1964) ressaltam que ao usar esse método é preciso assumir algumas hipóteses, dentre elas, a premissa de que a taxa máxima de escoamento, devido a uma certa intensidade de chuva na área da bacia, é atingida quando toda a área da bacia estiver contribuindo simultaneamente para o exutório, ou seja, admite-se que a duração da precipitação equivale ao tempo de concentração da bacia hidrográfica. Admite-se ainda que a intensidade da precipitação é constante durante o evento chuvoso, a frequência de ocorrência da vazão de pico é a mesma que frequência da chuva que produziu o evento, a precipitação é distribuída uniformemente sobre a área de drenagem da bacia, o escoamento é diretamente proporcional à intensidade da chuva.

Esse mesmo autor salienta também que há críticas da inadequacidade desse método e por isso modificações em sua estrutura surgiram, no entanto, mesmo sendo alvo de críticas, principalmente direcionadas ao coeficiente C, ainda é muito utilizado no campo hidrológico.

O coeficiente C representa a parcela da precipitação que atinge a seção de controle da bacia na forma de escoamento superficial. Esse processo para se efetivar depende de inúmeros e complexos fatores, como da chuva, tipo de solo, ocupação do terreno, umidade do solo no início da precipitação, interceptação, entre outros. Fatores esses que na equação 1 são todos acoplados no C, e é este o núcleo das críticas relacionadas ao método racional. Esse coeficiente também é denominado de coeficiente *runoff* e deve ser compreendido como o coeficiente de deflúvio, cuja função é tornar proporcionais a área da bacia e a intensidade de precipitação com a vazão (PINTO et al., 1976).

Segundo a *American Society of Civil Engineers- ASCE* (1992), esse método quando aplicado corretamente pode fornecer estimativas satisfatórias para vazões máximas em pequenas bacias hidrográficas.

Vale destacar que, na hidrologia, o conceito de pequena bacia é relativo e não há uma definição bem esclarecida da sua magnitude. Diante disso, diversos autores recomendam limites para a aplicabilidade do método racional. Para Akan (1993) o método deve ser aplicado para bacias com área de drenagem inferior a 13 km². Enquanto Porto (1995) admite o uso desse método somente para áreas de até 3 km² de extensão. O Departamento de Transporte do Texas – TxDOT (2016), mais restritivo, recomenda o uso do método para as bacias hidrográficas urbanas ou rurais com áreas inferiores a 80 ha, isto é, até 0,8 km². Young (2009) estimou o coeficiente de escoamento do método racional de 72 bacias rurais com áreas de 0,45 a 76,6 km² no estado norte-americano do Kansas e constatou que o método é plausível de ser aplicado em bacias com áreas maiores do que geralmente é sugerido, uma vez que não foi encontrado uma tendência entre o coeficiente C e a área. Essa não correlação entre área e o coeficiente C também foi encontrada por Dharkal et al., (2012), ao estimar o coeficiente de escoamento para 90 bacias no Texas-EUA. Estes mesmos autores mencionam que Pilgrim e Cordery (1993) e o Comitê conjunto da ASCE e da *Water Pollution Control Federation – WPCF* (ASCE, 1960) também sustentam em seus estudos a aplicabilidade do método para área maiores do que normalmente é sugerido.

Segundo Dharkal et al. (2012) e Peregrino e Cordery (1993), os limites gerais para a noção do conceito de “pequena” e “média”, seria de 25 km² para a primeira e 550 km² para segunda.

O método Racional, conforme Mello e Silva (2013), superestima a vazão de pico, pois considera que todo o deflúvio gerado é convertido em vazão de pico desconsiderando a distribuição das vazões ao longo do tempo. Corroboram com essa informação, pesquisadores que já aplicaram o método racional, como Hotchkiss e McCallum (1995) e Genovez (1991).

O coeficiente de escoamento superficial, também denominado de coeficiente de escoamento de enchente ou somente como coeficiente “C”, da fórmula racional, consiste na parcela de chuva que se transforma em escoamento superficial. Essa transformação se intensifica quão maior for a intensidade e duração da precipitação. Além dessas, a distribuição da chuva, as características do solo (tipo, uso e ocupação, umidade antecedente), bem como a impermeabilização e inclinação também afetam o escoamento. Portanto, o coeficiente de escoamento de enchente reflete e é afetado pelas condições biofísicas da bacia hidrográfica. Por isso, o valor numérico de C deve representar todas essas características, dever este que é alvo de críticas entre os hidrólogos (PAIVA e PAIVA, 2016).

O coeficiente C varia entre 0 e 1, quanto mais próximo de 0 menor será o escoamento produzido pela bacia, pois a maior parte da água será infiltrada no solo e/ou será retida pela vegetação, ao passo que ao se aproximar de 1, a bacia gerará maior escoamento superficial, isto é, a quantidade de água infiltrada será menor. (MELLO e SILVA, 2013).

Dentre as variáveis do método racional, o coeficiente de escoamento é o menos preciso, tendo em vista que, na fórmula, implica em uma taxa constante, o que na realidade não acontece, conforme salienta Chow et al. (1988).

Na literatura, aplicações com o método racional detectaram uma superestimação da vazão de pico comprovando ser indicado apenas para pequenas bacias hidrográficas. Jabur e Rizzi (2011) ao estimarem a vazão máxima por diferentes métodos, constaram que o método racional superestima as vazões. Nessa mesma linha de estudo, Trommer et al., [20--] ao analisarem o escoamento estimado com o observado em 66 eventos de chuva de 15 bacias no centro oeste da Flórida-EUA, verificaram que o método acertou no valor da vazão de pico em apenas 1 evento, superestimou 45 e subestimou 20 eventos, sendo a estimativa média um indicativo da superestimação das vazões máximas.

2.3.2 Método CN – SCS

O método do número da curva (CN) (conhecido como CN-SCS) utiliza a precipitação total e uma combinação das características de infiltração de água no solo, uso da terra, tipo de solo, condição de umidade inicial do solo e condição hidrológica para a obtenção do

escoamento superficial direto ou precipitação efetiva gerados por eventos chuvosos em uma bacia hidrográfica. Esse método foi desenvolvido na década de 1950 para atender às necessidades de planejamento do antigo *Soil Conservation Service* (SCS) - que desde 1994 passou a se chamar *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) - do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Originalmente, o método CN foi concebido para a estimativa do volume de escoamento em pequenas bacias hidrográficas e vem sendo estendido para outras situações, como a estimativa de precipitação diária em modelos contínuos (ASCE, 2009). O guia *National Engineering Handbook Hydrology* (comumente denominado como NEH) consolida-se como a principal fonte de informações acerca do método.

Essa metodologia permite averiguar os impactos do uso do solo na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica e seus resultados podem ser aplicados em planejamentos, dimensionamentos de obras hidráulicas e nos estudos de enchentes.

A equação geral definida por esse método é dada pela Equação 2 e o seu embasamento é físico. Ela consiste na proporção da relação da diferença atual com a potencial entre a chuva total e o escoamento superficial, com a relação entre o escoamento atual e o potencial, considerando as perdas que o processo está sujeito.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (2)$$

Em que:

P_e = precipitação efetiva, em mm;

P = chuva total, em mm;

I_a = abstração inicial, em mm;

S = potencial de armazenamento de água no solo, em mm.

Essas perdas são computadas no termo abstração inicial (I_a) que engloba, principalmente, a interceptação inicial, a porção retida nas depressões do relevo e a infiltração ou seja, a I_a representa a altura da água precipitada que fica retida na bacia até o início da formação do escoamento superficial. Conforme a USDA (1986), estudos em pequenas bacias dos Estados Unidos permitiram a correlação de equivalência da I_a de 20% do potencial de armazenamento de água no solo ($I_a = 0,2S$). Assim, a Equação 2 pode ser reescrita na forma da

Equação 3, que calcula o escoamento direto de um evento (P_e) decorrente de uma chuva (P) e de um índice de armazenamento (S).

$$P_e = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad (3)$$

Importante salientar, que a Equação 3 é aplicada para casos em que o total precipitado na bacia seja superior à abstração inicial, isto é, maior que 20% do potencial de armazenamento de água no solo. Este, por sua vez, é correlacionado ao número da curva (CN), por meio da Equação 4.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

Onde:

S: potencial de armazenamento de água no solo, em mm;

CN: número da curva, varia de 1 a 100, adimensional.

O parâmetro CN tal como o C do método racional, caracteriza as condições biofísicas da bacia hidrográfica (solo, uso do solo, condição hidrológica da bacia) e reflete o seu potencial de escoamento superficial. Valores de CN próximos de 1 (número um) denotam uma baixa capacidade de geração de escoamento superficial ao passo que, para CN igual a 100 (número 100) toda a precipitação escoar superficialmente.

O CN é dependente do grupo hidrológico do solo, uso e manejo da terra e umidade antecedente do solo da bacia (ASCE, 2009). A sua obtenção é possível pela conexão dessas características em tabelas disponibilizadas na publicação *National Engineering Handbook Hydrology* (NEH, 2004) que se referem às condições médias de umidade. Tais tabelas foram desenvolvidas a partir de experimentos em pequenas bacias norte-americanas em condições médias de umidade antecedente do solo. Segundo a USDA (1986), a detecção dos usos existentes nas bacias é possível, principalmente, por meio de fotografias aéreas, mapas e reconhecimento de campo.

Esse método agrupa os solos norte-americanos em quatro grupos (A, B, C e D), de acordo com a produção de escoamento e capacidade de infiltração, levando em conta a classe de solo com a cobertura vegetal e saturação na qual o solo se encontra imediatamente antes do

evento de chuvoso. Sendo os solos do grupo A, aqueles que geram um menor escoamento e maior infiltração ao passo que os solos do grupo D, o inverso.

Como a umidade antecedente do solo é um dos fatores que influenciam o valor do CN, este necessita ser corrigido a partir do momento que a condição real extrapola a situação média de quantidade de chuva antecedente, geralmente contabilizados dos últimos cinco dias.

Devido ao método CN levar em consideração as condições norte-americanas, há na literatura diferentes considerações do enquadramento dos grupos hidrológicos bem como dos limiares da condição antecedente de umidade. Exemplos brasileiros que propõem a classificação e o limite de acordo com a perspectiva *in loco* são descritos por Lombardi Neto et al. (1989), Sartori et al. (2004), Sartori et al. (2005) e Mello e Silva (2013).

A precisão da aplicação do método depende da seleção do valor de CN adequado, o que, por sua vez, exige uma compreensão das características da superfície das bacias hidrográficas.

Diversos autores apresentaram estudos com aplicação do método CN, entre eles Hotchkiss e McCallum (1995) que testaram o método a fim de encontrar a estimativa de vazão de pico mais aceitável para uso em pequenas bacias hidrográficas agrícolas em Nebraska; e Tucci (2000) que analisou o coeficiente de escoamento e vazão máxima em bacias hidrográficas urbanas.

Watts e Hawke (2003) consideraram em seu estudo que a CN apresenta uma consistência mais arquitetada entre uso do solo e a resposta hidrológica e, por isso, é mais interessante de ser utilizada para estimativa de picos de vazão do que o coeficiente C do método racional, o qual apresenta uma incerteza por abranger uma série de fatores.

2.3.3 Coeficiente C oriundo da literatura técnica

O coeficiente C pode ser definido a partir de equações, mencionadas em Pinto (1976), como a fórmula de Gregory, que tem como variável a duração da chuva; a fórmula de Horner, que além do tempo considera também a porcentagem de impermeabilização da bacia. Além disso, o (C) também pode ser obtido diretamente em tabelas de manuais, como naquelas elaboradas por Wilken (1978), detalhada na Tabela 1; pela ASCE (1992) com período de retorno de 2 a 10 anos, apresentada nas Tabelas 2 e 3; e pela tabela de valores de (C) sugeridos e usados na cidade de Austin, mencionado em Chow (1988), para períodos de retorno maiores (Tabela 4). Essa tabela também foi apresentada em Genovez (2001) e em

Mello e Silva (2013). Geralmente os valores de C recomendados para projetos são aqueles apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 1 - Valores do coeficiente de escoamento de enchente propostos por Wilken (1978)

| Zonas | Coeficiente de escoamento (C) |
|--|--------------------------------------|
| Edificações muito densas | 0,7 – 0,95 |
| Edificação não muito densa | 0,6 – 0,7 |
| Edificação com poucas superfícies livres | 0,5 – 0,6 |
| Edificação com muitas superfícies livres | 0,25 – 0,5 |
| Subúrbios com alguma edificação | 0,1 – 0,25 |
| Mata, parques e campos de esporte | 0,05 – 0,2 |

Fonte: Wilken (1978)

Tabela 2 - Valores do coeficiente de escoamento de enchente, em função dos tipos de superfície, recomendados pela ASCE (1992) para período de retorno de 2 a 10 anos

| Características da superfície | Coeficiente de escoamento (C) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Pavimentado: | |
| asfalto | 0,7 – 0,95 |
| concreto | 0,7 – 0,95 |
| bloco | 0,7 – 0,85 |
| telhado | 0,75 – 0,95 |
| Grama, em solo arenoso: | |
| plano (declividade > 2%) | 0,05 – 0,1 |
| média (2% < declividade < 7%) | 0,1 – 0,15 |
| íngreme (declividade > 7%) | 0,15 – 0,20 |
| Grama, em solo argiloso: | |
| -plano (declividade > 2%) | 0,13 – 0,17 |
| -média (2% < declividade < 7%) | 0,18 – 0,22 |
| -íngreme (declividade > 7%) | 0,25 – 0,35 |

Fonte: ASCE (1992)

Tabela 3 - Valores do coeficiente de escoamento de enchente, em função do uso do solo, recomendados pela ASCE (1992) com período de retorno de 2 a 10 anos

| Uso | Coeficiente de escoamento C |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Área comercial | |
| central | 0,70 a 0,90 |
| bairros | 0,50 a 0,70 |
| Área residencial | |
| residências isoladas | 0,30 a 0,50 |
| unidades múltiplas, separadas | 0,40 a 0,60 |
| unidades múltiplas, conjugadas | 0,60 a 0,75 |
| subúrbio | 0,25 a 0,40 |
| áreas com apartamentos | 0,50 a 0,70 |
| Área industrial | |
| - indústrias leves | 0,50 a 0,80 |
| - indústrias pesadas | 0,60 a 0,90 |
| Parques e cemitérios | 0,10 a 0,25 |
| Praças | 0,20 a 0,35 |
| Pátios ferroviários | 0,20 a 0,35 |

| | |
|-------------------------|-------------|
| Áreas sem melhoramentos | 0,10 a 0,30 |
|-------------------------|-------------|

Fonte: ASCE (1992)

Tabela 4 - Valores do coeficiente de escoamento usados na cidade de Austin, nos Estados Unidos da América, recomendados por Chow (1988)

| Tipos de superfície | | Período de retorno (anos) | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 500 |
| Área Urbana | | | | | | | | |
| Asfalto | | 0,73 | 0,77 | 0,81 | 0,86 | 0,90 | 0,95 | 1,00 |
| Concreto/ telhado | | 0,75 | 0,80 | 0,83 | 0,88 | 0,92 | 0,97 | 1,00 |
| Áreas com grama | | | | | | | | |
| cobrimento menor que 50% da área | Plano (0-2%) | 0,32 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,44 | 0,47 | 0,58 |
| | Médio (2-7%) | 0,37 | 0,40 | 0,43 | 0,46 | 0,49 | 0,53 | 0,61 |
| | Inclinado(>7%) | 0,40 | 0,43 | 0,45 | 0,49 | 0,52 | 0,55 | 0,62 |
| cobrimento entre 50% a 75% da área | Plano (0-2%) | 0,25 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,37 | 0,41 | 0,53 |
| | Médio (2-7%) | 0,33 | 0,36 | 0,38 | 0,42 | 0,45 | 0,49 | 0,58 |
| | Inclinado(>7%) | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,46 | 0,49 | 0,53 | 0,60 |
| cobrimento maior que 75% da área | Plano (0-2%) | 0,21 | 0,23 | 0,25 | 0,29 | 0,32 | 0,36 | 0,49 |
| | Médio (2-7%) | 0,29 | 0,32 | 0,35 | 0,39 | 0,42 | 0,46 | 0,56 |
| | Inclinado(>7%) | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,44 | 0,47 | 0,51 | 0,58 |
| Áreas rurais | | | | | | | | |
| Campos cultivados | Plano (0-2%) | 0,31 | 0,34 | 0,36 | 0,40 | 0,43 | 0,47 | 0,57 |
| | Médio (2-7%) | 0,35 | 0,38 | 0,41 | 0,44 | 0,48 | 0,51 | 0,60 |
| | Inclinado(>7%) | 0,39 | 0,42 | 0,44 | 0,48 | 0,51 | 0,54 | 0,61 |
| Pastagem | Plano (0-2%) | 0,25 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,37 | 0,41 | 0,53 |
| | Médio (2-7%) | 0,33 | 0,36 | 0,38 | 0,42 | 0,45 | 0,49 | 0,58 |
| | Inclinado(>7%) | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,46 | 0,49 | 0,53 | 0,60 |
| Florestas Reflorestamento | Plano (0-2%) | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,31 | 0,35 | 0,39 | 0,48 |
| | Médio (2-7%) | 0,31 | 0,34 | 0,36 | 0,40 | 0,43 | 0,47 | 0,56 |
| | Inclinado(>7%) | 0,35 | 0,39 | 0,41 | 0,45 | 0,48 | 0,52 | 0,58 |

Fonte: Chow (1988)

Para áreas heterogêneas é interessante que se atribua valores diferenciados para o coeficiente C, conforme a característica de cada subárea, a fim de uma representação mais fidedigna. Assim sendo, esse coeficiente pode ser constituído pela média ponderada dos coeficientes de escoamento para os diferentes tipos de superfície.

O coeficiente C varia entre 0 e 1, quanto mais próximo de 0 menor será o escoamento produzido pela bacia, pois a maior parte da água será infiltrada no solo e/ou será retida pela vegetação, ao passo que ao se aproximar de 1, a bacia gerará maior escoamento superficial, isto é, a quantidade de água infiltrada será menor (MELLO e SILVA, 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização das áreas de estudo

Este trabalho foi desenvolvido em duas bacias hidrográficas experimentais pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, em Minas Gerais. As bacias objeto de estudo foram a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória e a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha.

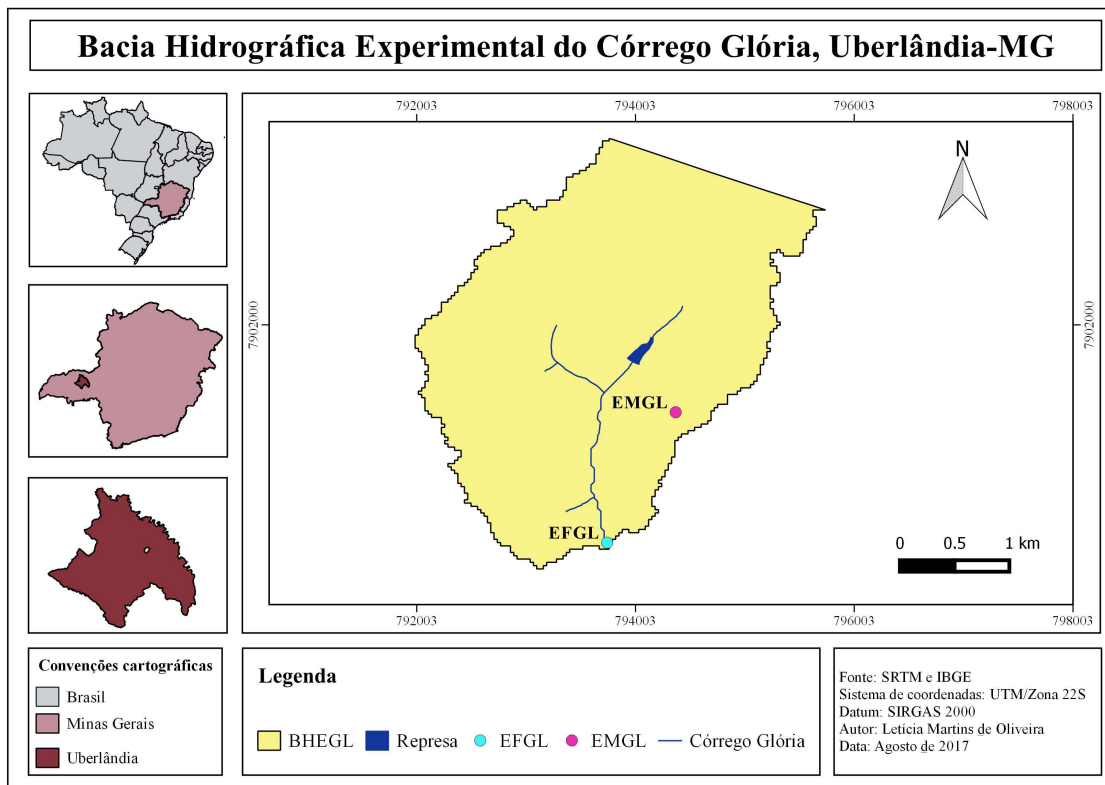
3.1.1 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL) está localizada na parte sudeste do município de Uberlândia (Figura 1), abrangendo parte da Fazenda Experimental do Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Esta bacia apresenta uma área de contribuição de 8,66 km², sendo a seção de controle da mesma definida nas coordenadas 18°58'17,98"S e 48°12'36,07"W. O Córrego do Glória é o rio principal dessa bacia e é afluente da margem direita do rio Uberabinha e subafluente do rio Araguari, este por sua vez deságua no rio Paranaíba.

Na BHEGL estão instaladas a estação meteorológica da Fazenda Experimental do Glória (EMGL) e a estação fluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (EFGL). O mapa da BHEGL, bem como o arranjo espacial dessas estações nessa bacia estão representados na Figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização da BHEGL e de suas estações de monitoramento hidrológico



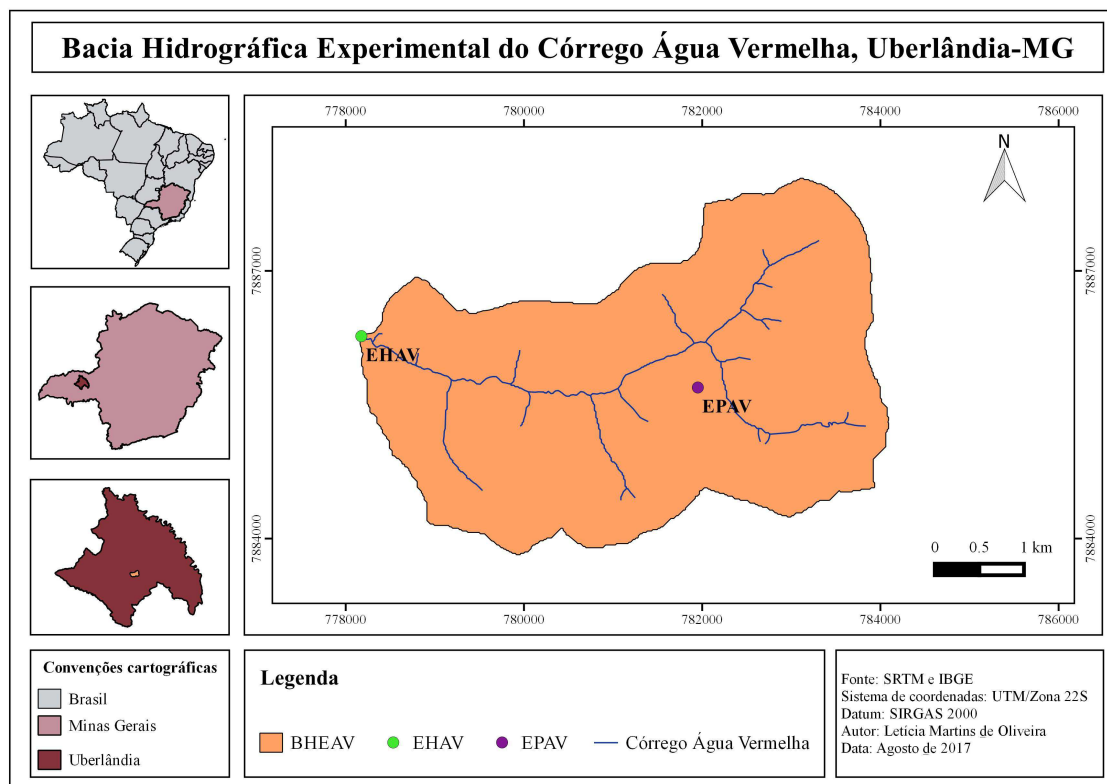
3.1.2 Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV) está localizada a cerca de 14 quilômetros do perímetro urbano de Uberlândia. No interior dessa bacia está situada, a Fazenda Experimental Água Limpa, da UFU.

A BHEAV possui uma área de drenagem de 16,35 km², sendo a seção de controle definida nas coordenadas 19°05'51,5"S e 48°21'22,3"W (Figura 2). O córrego Água Vermelha, o qual dá nome à bacia, é o principal rio dessa bacia. Ele é um dos tributários do rio Tijuco, um dos principais afluentes do rio Paranaíba.

Na BHEAV foram instaladas a estação hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (EHAV) e a estação pluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (EPAL). Essa bacia experimental, juntamente com as estações de monitoramento hidrológico estão representadas na Figura 2.

Figura 2 - Mapa de localização da BHEAV e de suas estações de monitoramento hidrológico



3.2 Caracterização pedoclimática da região onde se localizam as bacias estudadas

O comportamento hidrológico das bacias hidrográficas está intimamente relacionado com as suas características físicas e por isso, procurou-se neste trabalho, relatar as características gerais da região onde as mesmas estão situadas.

O município de Uberlândia, de acordo com Nishiyama (1989), está inserido na Bacia Sedimentar do Paraná, cuja base deposicional é constituída por rochas metassedimentares, de idade pré-cambrianas, dos grupos Araxá, Canastra e Bambuí e rochas, de idade arqueana, do Complexo Goiano.

O clima da região de acordo com a classificação de *Köppen* é o tropical (Aw), com duas estações bem definidas: inverno seco e verão quente e chuvoso, de acordo com a classificação de *Köppen*. Essa alternância das estações secas no inverno e chuvosas no verão ocorre, de acordo com Schneider (1982), devido às massas de ar Tropical Continental (Tc), Tropical Atlântica (Ta), Equatorial Continental (EC) e Polar Atlântica. A temperatura média máxima anual do mês mais quente é aproximadamente 23°C, enquanto a média mínima do mês mais frio está acima de 18°C. Conforme descrito em Assunção (2002), os meses de

dezembro a fevereiro apresentam mais de 50% dos eventos de precipitação, tanto em volume quanto em frequência durante todo o ano.

Baccaro (1991) classifica o relevo de Uberlândia em três categorias: área de relevo dissecado, área de relevo intensamente dissecado e área de relevo com topo plano. O município apresenta declividade suave, normalmente inferior a 30% e tem como cobertura vegetal o cerrado.

Grande parte dos solos sob a vegetação desse bioma pertencem à classe dos latossolos (REATTO et al., 2008), que são solos em estágio avançado de intemperização, com boas condições de drenagem e constituídos por material mineral (EMBRAPA, 2006). Na região de Uberlândia, os latossolos se caracterizam em sua maior parte como latossolo vermelho e latossolo vermelho amarelo, segundo o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2016) no trabalho denominado de Mapas de Geodiversidade de Minas Gerais.

3.3 Imagens espaciais

Neste trabalho foram utilizadas imagens orbitais SRTM, acrônimo de *Shuttle Radar Topography Mission* que foi uma missão espacial feita pelo Serviço Geológico dos EUA (USGS), a fim de obter um modelo digital de toda a terra. Por meio da plataforma *Earth Explorer*, foi possível ter acesso aos modelos digitais de elevação (MDE) produzidos nessa missão com resolução espacial de 30 metros. Além delas, imagens do Google Satélite também foram imprescindíveis, pois por meio delas foi possível a vetorização do uso do solo das áreas estudadas. Além disso, verdades de campo também foram necessárias, a fim de obter confirmação dos usos do solo verificados por meio das imagens orbitais.

3.4 Instrumentos

Vários tipos de instrumentos de monitoramento hidrológico foram utilizados:

- Micromolinetes fluviométricos modelo MCN-1, marca JCTM – para a medição indireta *in loco* da vazão e consequente obtenção de pontos para confecção da curva chave nas seções de controle das bacias estudadas;
- GPS, modelo eTrex Vista HCx – para a captura das coordenadas de localização das verdades de campo;
- Registrador eletrônico de dados (*datalogger*), modelo LogBox-DA, marca Novus – para o armazenamento dos dados;

- Pluviômetros, modelos 260-0111 e 260-25001M-A, marca NovaLynx – para a quantificação da chuva na BHEAV;
- Sensor de nível de água, do tipo transdutor de pressão, modelo DCX-22 AA, marca Keller AG[®] - para medição do nível da água do córrego Glória;
- Sensor de nível de água, do tipo ultrassônico, modelo GUT740, marca *Xi'an Gavin Electronic Technology Co.* – para medição do nível da água do córrego Água Vermelha;
- Estação meteorológica automática, marca/modelo *Campbell Scientific* – para a quantificação da chuva na BHEGL.

3.5 Estações de monitoramento hidrológico

Nesse estudo, todas as variáveis hidrológicas necessárias foram obtidas graças ao monitoramento realizado pelas seguintes estações:

- a) Estação Meteorológica da Fazenda Experimental do Glória (EMGL) (Figura 3);
- b) Estação Fluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (EFGL) (Figura 4);
- c) Estação Hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha(EHAV) (Figura 5);
- d) Estação Pluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (EPAV) (Figura 6).

Figura 3 - Pluviômetro na estação meteorológica automática localizada na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.



Fonte: A autora (2016)

Figura 4 - Estação Fluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória. (A) Sensor de nível na seção de controle; (B) Caixa metálica com o Datalogger



Fonte: Silveira (2016)

Figura 5 - Estação Hidrométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha. (A) Sensor de nível na seção de controle; (B) Datalogger e pluviômetro



Fonte: A autora (2017)

Figura 6 - Estação Pluviométrica da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha



Os sensores de níveis são equipamentos eletrônicos que foram os responsáveis pela aquisição de dados de nível da lâmina d'água, uma vez obtida a série de nível d'água para cada bacia, esta pôde ser transformada em série de vazão por meio da curva chave levantada nas seções de controle das bacias. Já os pluviômetros, sensores de precipitação, foram os responsáveis pelo fornecimento dos dados de chuva, eles são do tipo báscula, ou seja, cada vez que o recipiente de água precipitada atingi uma determinada massa, move-se o eixo gerando um pulso que é registrado pelo *datalogger*. O coletor de dados ou *datalogger*, é um equipamento eletrônico responsável pelo armazenamento de dados hidrológicos captados pelos sensores e foram programados para armazenar a leitura média dos dados a cada cinco minutos, ou seja, todas as informações foram monitoradas de cinco em cinco minutos. A localização de todas as estações que compuseram a base desse trabalho, bem como o período de monitoramento e o período dos dados utilizados estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação das estações de monitoramento de chuva e nível dos córregos nas bacias experimentais em estudo.

| Bacia Hidrográfica Experimental | Estações | Latitude sul | Longitude oeste | Período de monitoramento | Período dos dados |
|--|-----------------|---------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Córrego Glória (BHEGL) | EMGL | 18°57'38" | 48°12'16.8" | 24/10/15 a 06/11/17 | 31/10/15 a 14/03/16 |
| | EFGL | 18°58'17.93" | 48°12'36.07" | 24/10/15 a 06/11/17 | 31/10/15 a 14/03/16 |
| Córrego Água Vermelha (BHEAV) | EHAV | 19°05'51.5" | 48°21'22.3" | 15/12/16 a 06/11/17 | 26/12/16 a 16/10/17 |
| | EPAV | 19°06'8.32" | 48°19'12.93" | 26/05/17 a 06/11/17 | 26/05/17 a 16/10/17 |

Importante mencionar que apesar do monitoramento na BHEGL ter iniciado em outubro de 2015 e finalizado em novembro de 2017, os dados coletados utilizados se restringiram a um período menor (outubro de 2015 a março de 2016), pois ao longo do monitoramento houve alguns entraves como a necessidade de troca do sensor, mudança da localização do mesmo, entre outros problemas técnicos e operacionais.

Já o monitoramento na BHEAV iniciou-se mais tardiamente, pois somente ao longo do ano de 2016 foi possível a instalação da EHAV e em dezembro desse mesmo ano, a estação entrou em operação. Posteriormente, foi realizada a instalação da EPAV que entrou em operação em maio de 2017. Devido a isso, para o cômputo de chuva a partir de maio de 2017, na BHEAV, fez-se uma média ponderada em relação às áreas de influência do pluviômetro da EPAV e do pluviômetro da EHAV. Para isso, aplicou-se o método dos polígonos de Thiessen, a fim de encontrar a área de influência de cada pluviômetro.

3.6 Monitoramento da vazão *in loco* para determinação das curvas chaves

A medição da vazão foi realizada de forma indireta com a utilização de um micromolinete fluviométrico na seção de controle de cada bacia estudada.

As campanhas para o levantamento da curva chave de cada bacia foram feitas em diferentes datas. As campanhas na seção de controle da BHEGL ocorreram de outubro de 2015 a setembro de 2017, totalizando 23 campanhas. Na BHEAV o período foi fevereiro de 2017 a setembro de 2017, totalizando 10 campanhas.

Para a obtenção da curva chave, o molinete fluviométrico foi posicionado, ao longo da largura dos córregos, em equidistância de 20 cm. No entanto, nas extremidades das calhas dos rios, devido à baixa velocidade da água, iniciou-se a primeira vertical com distância superior a 20 cm da margem direita e a última com distância superior a 20 cm da margem esquerda.

Na BHEGL, a cada intervalo de 20 cm foram feitas, conforme a profundidade, uma medida de velocidade a 80% e outra a 20% da profundidade, medida a partir da superfície da água. Na BHEAV, devido à profundidade do córrego ser maior e a velocidade da água menor, a cada intervalo de 20 cm foram feitas medições a 20% e 40% em cada vertical, medidas a partir da superfície da água.

Obteve-se as médias do número de rotação de três repetições em cada medida e a velocidade média da água em cada seção do córrego foi determinada pela Equação 5, que foi fornecida pelo fabricante do micromolinete.

$$V_i = 0,02290369 + 0,06409488 * N \quad (5)$$

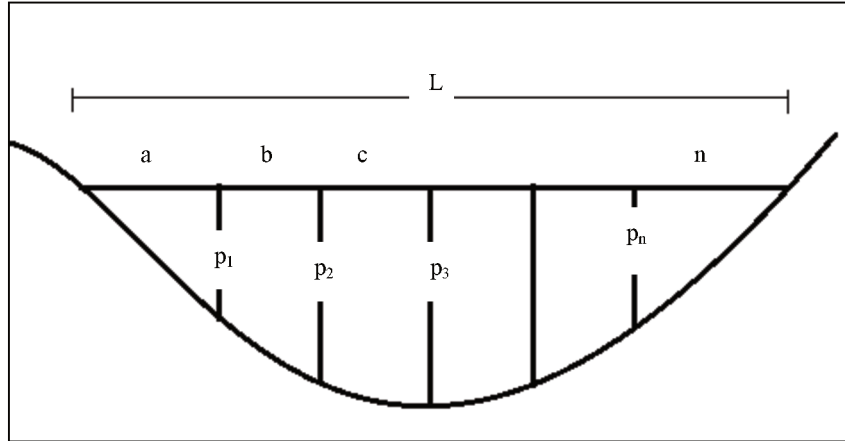
Em que:

V_i = velocidade média da água, em m/s;

N = média do número de rotações, em rps (rotações por segundo).

A área de cada seção foi obtida pelo método de Simpson (Figura 7), o qual permite o cálculo da área de cada seção delimitada por duas verticais, conforme Equação 6.

Figura 7 - Método de Simpson para cálculo de área



$$A_1 = \frac{p_1}{2} a; A_2 = \frac{(p_1 + p_2)}{2} b; A_3 = \frac{(p_2 + p_3)}{2} c; \dots; A_n = \frac{p_n}{2} n \quad (6)$$

Em que:

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ = área de cada trecho do corpo hídrico, em m^2 ;

p_1, p_2, \dots, p_n = profundidade das verticais, em m;

a, b, c, \dots, n = largura do corpo hídrico, em m.

O produto da área de cada seção pela sua velocidade média define a vazão de cada trecho por meio do conceito da equação da continuidade (Equação 7).

$$Q_i = V_i A_i \quad (7)$$

Em que:

Q_i = vazão da i-ésima seção rio, em $m^3 s^{-1}$;

V_i = velocidade da água na i-ésima posição, $m s^{-1}$;

A_i = área da i-ésima seção do rio, m^2 .

Pelo somatório do produto entre a velocidade média e a área em cada seção, a vazão total (Q_t) no exutório de cada córrego foi obtida, conforme explicitado na Equação 8.

$$Q_t = \frac{p_1 a}{2} \times \frac{V_{m1}}{2} + \frac{(p_1 + p_2) b}{2} \times \frac{(V_{m1} + V_{m2})}{2} + \frac{(p_2 + p_3) c}{2} \times \frac{(V_{m2} + V_{m3})}{2} + \dots + \frac{p_n n}{2} \times \frac{V_{mn}}{2} \quad (8)$$

3.7 Obtenção das curvas chaves

A curva chave levantada na seção de controle da BHEGL contou com 20 mensurações e a curva na seção de controle da BHEAV contou com 7 mensurações. As equações das curvas foram geradas no software SigmaPlot® 12.0, seguindo o modelo potencial.

A partir das equações das curvas chaves da BHEGL (Equação 9) e da BHEAV (Equação 10) foi possível a conversão dos dados monitorados pelos sensores de nível de água dos córregos para vazões.

$$Q = 0,0707 \times H^{2,2558} \quad (9)$$

$$Q = 13,6516 \times H^{0,5786} \quad (10)$$

Em que:

Q = vazão, em Ls^{-1} ;

H = altura do nível de água, em cm.

Ressalta-se que a curva chave da seção de controle do córrego Água Vermelha ainda está em construção e apresenta poucos pontos, o que pode interferir no valor da vazão e consequentemente no volume de água escoado pela bacia. Essa condição poderá afetar os valores de coeficiente observado e estimados pelo método Racional.

3.8 Delimitação das bacias experimentais

As informações topográficas foram obtidas pelo MDE, que consiste na representação computacional contínua da topografia do terreno distribuída espacialmente às variações de altitude, isto é, representa de forma real o relevo. Por meio dele foi possível verificar a convergência do escoamento superficial, delimitar a bacia, gerar mapas de declividade e cálculos de áreas.

A missão SRTM *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi uma missão espacial realizada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e National Imagery and Mapping Agency (NIMA) nos anos 2000, a fim de produzir um banco de dados digital para boa parte do planeta Terra. As imagens de cada bacia foram obtidas dessa missão, de

forma gratuita pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos, *United States Geological Survey* (USGS), na plataforma *Earth Explorer* com resolução espacial de 30m.

Com o auxílio da ferramenta TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), no QGIS, foi possível processar os MDEs que, por conseguinte, serviram de base para a delimitação das bacias. O sistema de coordenadas utilizado foi o Universal Transversa de Mercador (UTM) e o referencial geodésico, o SIRGAS 2000.

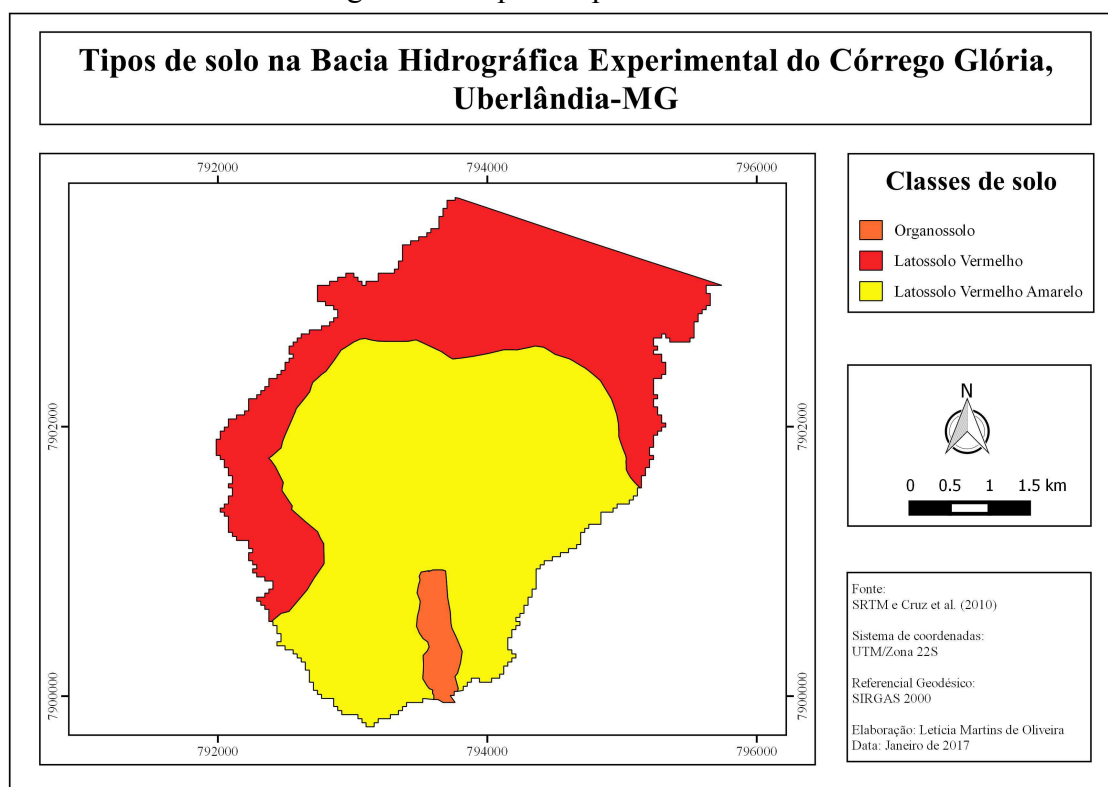
O TauDEM constitui-se de um conjunto de ferramentas para a extração e análise de informações hidrológicas com base em MDE. O primeiro algoritmo do TauDEM a ser executado foi o *Pit Remove*, visando a remoção de buracos no MDE. Para o mapeamento do escoamento de água, foi usado o *D8 FlowDirections*, obtendo como resultado a direção de fluxo superficial e a declividade de cada trecho da bacia. O algoritmo *D8 ContributingArea* também foi utilizado, inicialmente, para a geração da área de contribuição geral do MDE, sendo possível a visualização das sub-bacias. Essa fase foi importante para a definição do ponto de exutório. O próximo algoritmo executado foi o *Stream Definition by Threshold*, responsável pela geração da rede de drenagem geral do MDE, para tanto foi estabelecido um limiar de 200 que determina quantos pixels adjacentes devem formar os canais de drenagem. Posteriormente, criou-se uma camada do tipo ponto, para a marcação do exutório. Após isso, utilizou-se novamente a ferramenta *D8 Contributing Area*, dessa vez informando o local exato do exutório a fim de delimitar especificamente a área de interesse. Por fim, foi necessário executar novamente o *Stream Definition by Threshold* para gerar a rede de drenagem da área de interesse. Após todos esses comandos, transformou-se a delimitação da bacia e rede de drenagem, obtidas pelo TauDEM, do formato raster para vetor, por meio do comando padrão do QGIS denominado de *Conversão*. Por meio deste, foi possível calcular a área total de cada bacia. Vale destacar que, ao se efetuar os procedimentos anteriormente descritos, todos os arquivos gerados automaticamente na tela do QGIS foram removidos da tela e reabertos em seguida, para a continuação das etapas subsequentes, uma vez que esta ação minimiza limitações do TauDEM.

Após a transformação em vetor, referenciou-se o *shapefile* da bacia para o Sistema de coordenada UTM 22S (31982). Procedeu-se com a dissolução do vetor pelo comando *dissolver*, localizado dentro da aba *Geoprocessar* em *vetor*, sendo assim possível calcular a área da bacia na calculadora de campo na tabela de atributos do arquivo gerado pelo *Dissolver*.

3.9 Tipo de solo das Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Água Vermelha

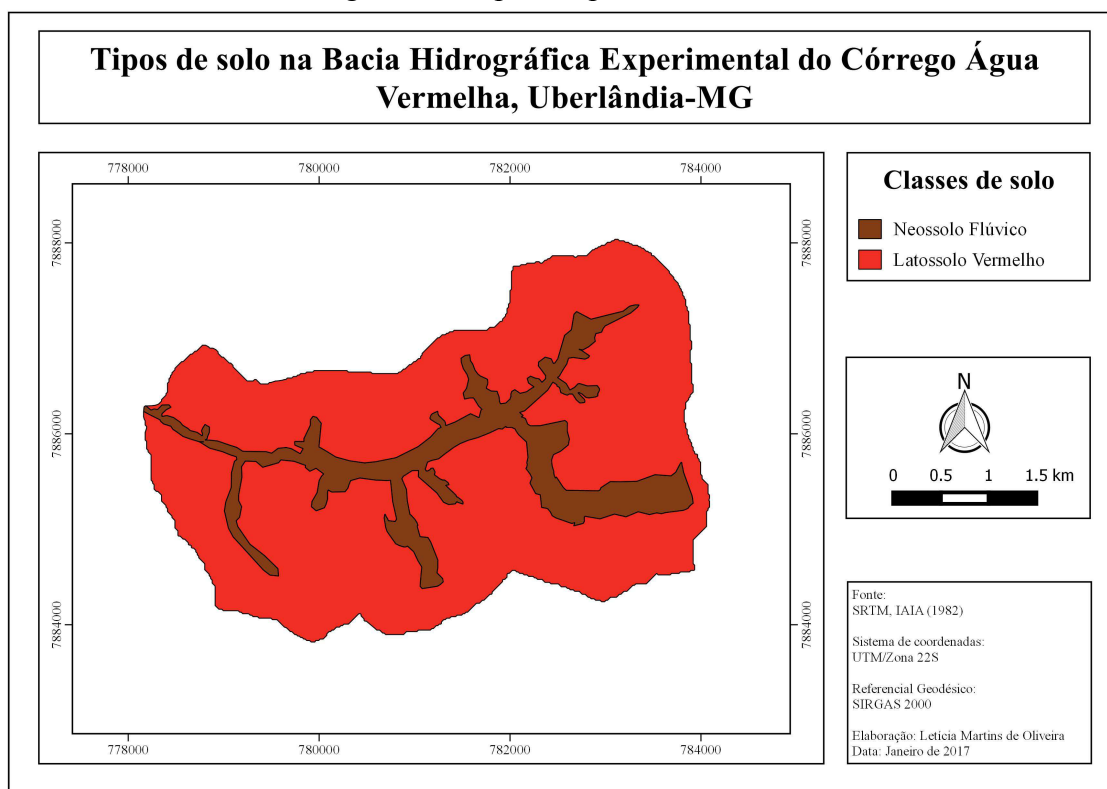
Para o conhecimento dos dados pedológicos na Bacia Experimental do Córrego do Glória, utilizou-se o trabalho desenvolvido pelos pesquisadores Cruz, Pinese e Rodrigues (2010). Esses autores objetivaram diagnosticar a fragilidade ambiental de toda a Bacia Hidrográfica do Glória. Para isso, dentre outros procedimentos, os autores coletaram amostras de solo, analisaram e classificaram-no, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), em latossolo vermelho, latossolo vermelho amarelo, organossolo e cambissolo. Com o arquivo *shapefile* de solos da Bacia Hidrográfica do Glória, foram detectados a presença de três classes de solo, a saber: latossolo vermelho, latossolo vermelho amarelo e organossolo, ilustrados na Figura 8.

Figura 8 - Mapa de tipos de solo na BHEGL



As classes de solo presentes na Bacia Experimental do Córrego Água Vermelha, foram obtidas por meio do Levantamento Detalhado dos Solos da Estação Experimental Regional do Triângulo Mineiro - executado muito próximo a Fazenda Água Limpa - pelo Instituto do Açúcar e do Alcool (IAIA, 1982). O levantamento extrapolado para a Água Vermelha, detectou, latossolo vermelho e neossolo flúvico, ilustrados na figura 9.

Figura 9 - Mapa de tipos de solo na BHEAV



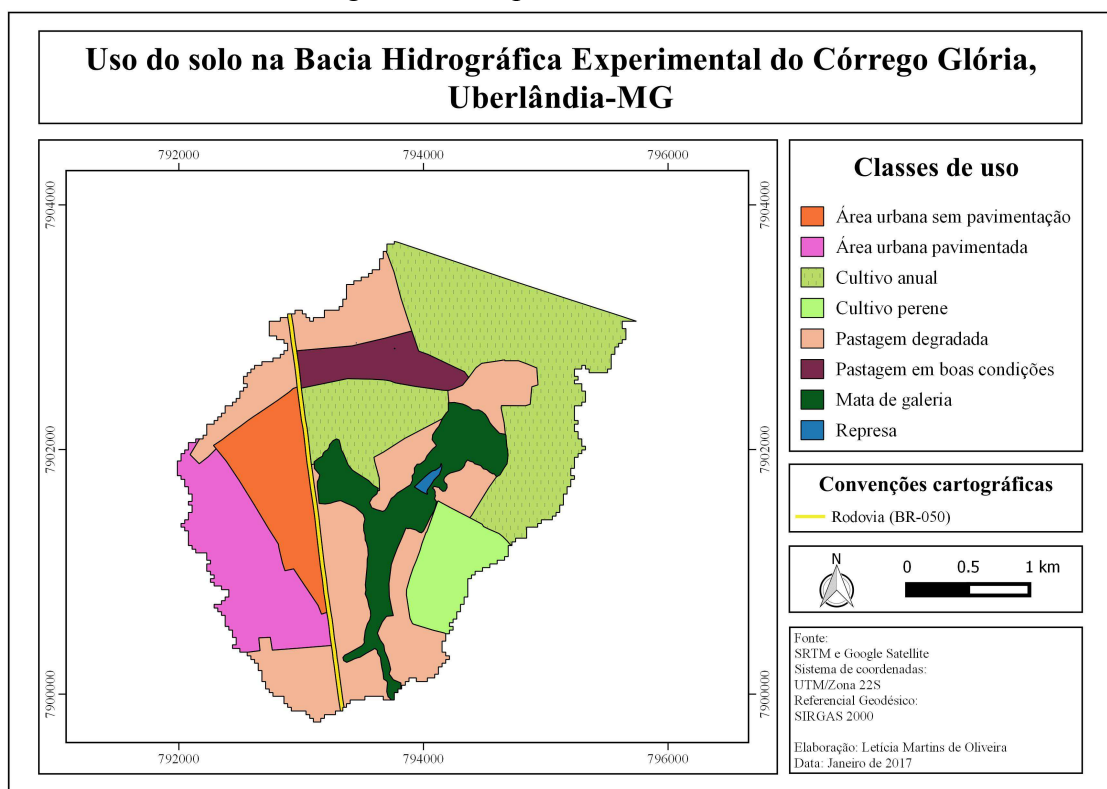
3.10 Uso do solo das Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Glória e Água Vermelha

O mapeamento do uso do solo ocorreu por meio da interpretação visual em tela, utilizando a sincronização do *Google Earth* com o *software* de geoprocessamento QGIS 2.6, a partir do *Open Layers plugin*. A delimitação das feições foram obtidas, manualmente, a partir da vetorização sobre a imagem do *Google Satellite* no QGIS, procurando manter a escala de 1:5.000. A validação dos mapas foram realizadas em campo o que possibilitou reforçar e corrigir as vetorizações de uso do solo realizadas em ambiente computacional.

Os nomes das classes foram atribuídos conforme os tipos de usos descritos nas tabelas do guia *National Engineering Handbook Hydrology* (NEH, 2004).

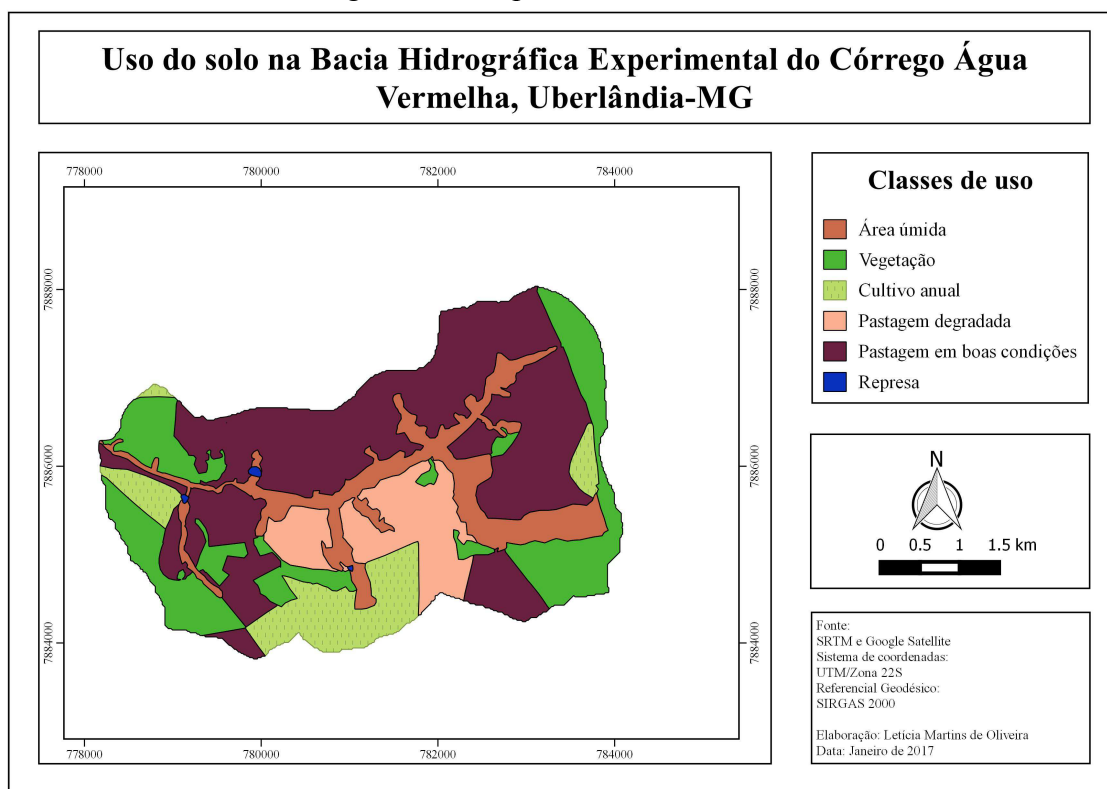
Na BHEGL foram elencadas, ao todo, nove classes de uso do solo: área urbana sem pavimentação, área urbana pavimentada, cultivo anual, cultivo perene, pastagem degradada, pastagem em boas condições, mata de galeria e represa, representadas na Figura 10.

Figura 10 - Mapa de uso do solo na BHEGL



Na BHEAV foram elencadas seis classes de uso do solo, a saber: vegetação, cultivo anual, pastagem degradada, pastagem em boas condições, área úmida e represa, ilustradas na Figura 11.

Figura 11 - Mapa de uso do solo na BHEGL



3.11 Coeficiente de escoamento de enchente (C)

O coeficiente de escoamento de enchente (C) pode ser estimado de diversas maneiras e deve representar os efeitos integrados de todos os fatores que o influencia nos processos de geração de escoamento superficial.

Neste trabalho, o coeficiente C observado foi obtido com a aplicação do índice ϕ e os estimados foram obtidos por três formas distintas, a saber: método racional, método CN– SCS e por meio de valores tabelados, segundo a ASCE (1992) e Chow (1988).

O valor de C foi obtido para cada um dos eventos de chuvas monitorados. Ao todo, foram analisados 18 eventos entre 31/10/15 a 14/03/16 na BHEGL. Na BHEAV foram analisados 21 eventos entre 26/12/16 a 16/10/17.

3.11.1 Determinação do coeficiente C observado

O índice ϕ foi utilizado para determinar volume de precipitação que infiltrou ou ficou retida nas depressões do terreno, valor esse a ser desconsiderado na mensuração da precipitação efetiva, variável esta imprescindível para o cálculo do C. Esse índice representa a

infiltração média em cada evento de chuva na bacia (Equação 11), conforme descrito em Tucci (2015) e Mello e Silva (2013).

$$\phi = \frac{PT - ESD}{N} \quad (11)$$

Onde:

ϕ = taxa de retenção média no solo de cada evento, em mm;

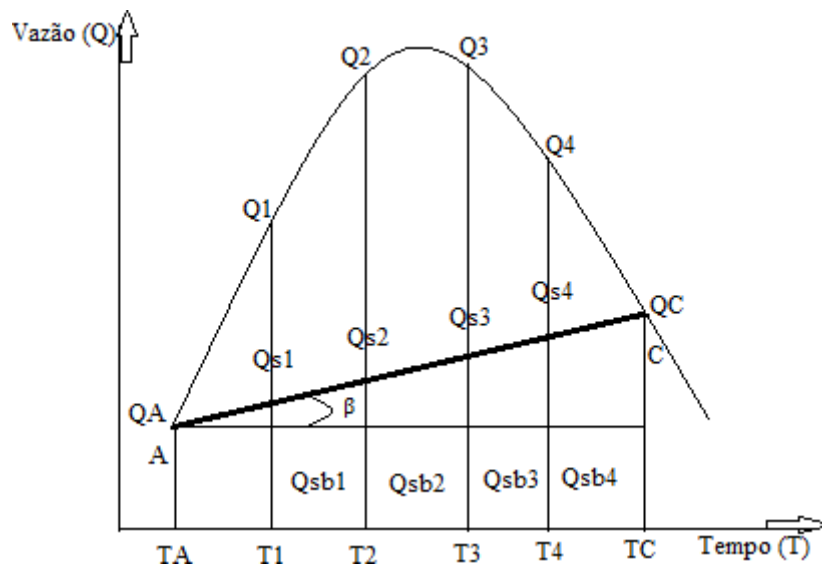
PT = precipitação total de cada evento, em mm;

ESD = lâmina de escoamento superficial direto ou precipitação efetiva gerado por cada evento, em mm;

N = número de ocorrências de precipitação em cada evento.

A precipitação total de cada evento foi obtida pelos pluviômetros das estações de monitoramento. O escoamento superficial direto foi obtido por meio de uma metodologia proposta em Mello & Silva (2013) que resulta no escoamento superficial direto pela separação do escoamento subterrâneo do escoamento total ao considerar o comportamento linear do escoamento subterrâneo, conforme explicitado na Figura 12. A área acima da reta AC é subdividida de acordo com o intervalo de tempo entre as medições de vazões e pela regra dos trapézios calcula-se a área dessa região do hidrograma que corresponde ao escoamento superficial direto. Assim, a largura é igual ao intervalo de tempo entre as medições e a altura igual às vazões provenientes do escoamento superficial direto.

Figura 12 - Procedimento para a separação do escoamento superficial direto



Fonte: Adaptado de Mello e Silva (2013)

A separação das parcelas do escoamento total foram realizadas pela observação do instante da ocorrência dos pontos A e C nas planilhas dos dados monitorados de precipitação, nível e vazão de cada bacia alvo do estudo.

O ponto A representa o momento em que há uma brusca inclinação na curva do escoamento, isto é, instante em que o hidrograma começa a sua ascensão. Na planilha, esse momento foi identificado visualmente nos valores de vazão, quando esta começou a aumentar, ou seja, acompanhou-se o decréscimo da vazão até o primeiro valor que foi percebido o seu crescimento, adotando o valor imediatamente anterior como a vazão do ponto A e o tempo correspondente a essa vazão como TA.

O ponto C representa, após o evento chuvoso, o retorno da vazão do rio à normalidade ou o fim da depleção do escoamento superficial direto. Na planilha, esse momento foi identificado pela interligação da visualização do hidrograma por meio do logaritmo da vazão seguinte pelo logaritmo da vazão anterior (equação 12), a fim de suavizar a amplitude da vazão para encontrar uma série de valores estáveis. Quando esse valor foi encontrado, adotou-se a vazão e o tempo como sendo respectivamente o QC e o TC do ponto C.

$$Q = \frac{\text{Log}_Q}{\text{Log}_{Q-i}} \quad (12)$$

De posse dos pontos A e C, para cada evento chuvoso calculou-se a inclinação da reta que une esses dois pontos por meio da equação 13:

$$m = \operatorname{tg}(\beta) = \frac{(QC - QA)}{(TC - TA)} \quad (13)$$

Em que:

m = inclinação da reta AC;

QA = vazão no ponto A, em L s⁻¹;

QC = vazão no ponto C, em L s⁻¹;

TA = tempo no ponto A, em s;

TC = tempo no ponto C, em s.

Essa inclinação foi multiplicada pelo intervalo de tempo entre as medições da vazão – conforme descrito no item 3.5, o *datalogger* armazenou os dados de cinco em cinco minutos – para a obtenção do valor a ser adicionado a cada vazão do escoamento subterrâneo, conforme equação 14.

$$J = m\Delta T \quad (14)$$

Onde:

J= valor a ser incrementado às vazões, em L s⁻¹;

ΔT = intervalo de tempo entre as vazões = 300s.

O valor J foi adicionado ao escoamento subterrâneo a partir de QA e as vazões subterrâneas foram calculadas conforme a equação 15.

$$Q_{SB1} = QA + J; Q_{SB2} = Q_{SB1} + J; Q_{SB3} = Q_{SB2} + J; \dots \quad (15)$$

Em que:

Q_{SB1}, Q_{SB2}, \dots = vazão subterrânea no tempo 1, no tempo 2, e assim sucessivamente, em L s⁻¹.

Dessa forma, as vazões do escoamento superficial direto foram obtidas pela diferença entre a vazão total e a sua respectiva vazão subterrânea, equação 16.

$$Q_{S1} = Q1 - Q_{SB1}; Q_{S2} = Q2 - Q_{SB2}; Q_{S3} = Q3 - Q_{SB3}; \dots \quad (16)$$

$$Q_{S1} = Q1 - Q_{SB1}; Q_{S2} = Q2 - Q_{SB2}; Q_{S3} = Q3 - Q_{SB3}; \dots$$

Onde:

Q_{S1}, Q_{S2}, Q_{S3} = vazões superficiais diretas nos tempos 1, 2, 3 e sucessivamente, em $L s^{-1}$.

$Q1, Q2, Q3$ = vazões provenientes da equações geradas no SigmaPlot® a partir das curvas chaves nos tempos 1, 2, 3 e sucessivamente, em $L s^{-1}$.

Por fim, o volume de escoamento superficial foi obtida pela regra dos trapézios que consiste em multiplicar a vazão pelo intervalo de tempo entre as medições, para cada evento de chuva, conforme explicitado no numerador da Equação 17. Sendo essa relacionada com a área da bacia para a obtenção da lâmina escoada para cada evento chuvoso.

$$ESD = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Si} \times \Delta T)}{A} \quad (17)$$

Em que:

ESD = lâmina de escoamento superficial direto em um evento chuvoso, em mm;

N = número de vazões que compõe o escoamento superficial direto;

Q_{Si} = vazões provenientes da contribuição do escoamento superficial direto, em $L s^{-1}$;

ΔT = intervalo de tempo entre as vazões coletadas, neste estudo, considerou-se 300s.

A = área total de drenagem, em m^2 .

Uma vez obtido todas variáveis, o índice ϕ foi determinado para cada evento chuvoso. O seu valor foi considerado igual à taxa de absorção máxima de água pelo solo. Assim, caso a precipitação total, em um determinado instante, seja maior que o valor ϕ significa que essa precipitação contribui para o escoamento superficial ao passo que, em um tempo subsequente, se a precipitação for menor que ϕ a quantidade de água não absorvida anteriormente poderá ser absorvida nesse intervalo de tempo.

A fim de encontrar o instante em que a precipitação efetiva ocorreu, utilizou-se a metodologia detalhada em Silveira (2016). De posse dos valores de precipitação total e do ϕ calculou-se a diferença desses valores, sendo os positivos os representantes dos momentos em que a precipitação supera a capacidade de absorção do solo implicando no escoamento da água, conforme equação 18.

$$EP = PT_i - \phi, \text{ se } PT_i - \phi > 0 \quad (18)$$

Em que:

EP = excesso da precipitação, em mm;

PT_i = precipitação total no intervalo de tempo i, em mm.

Definiu-se que quando a precipitação total fosse menor à capacidade de absorção do solo, a água infiltraria no solo e não escoaria, assim haveria um bônus de absorção de água pelo solo, como explicitado na equação 19.

$$Bo = PT_i - \phi, \text{ se } PT_i - \phi < 0 \quad (19)$$

Onde:

Bo = bônus de absorção de água pelo solo, em mm.

PT_i = precipitação total no intervalo de tempo i, em mm.

Posteriormente, calculou-se o bônus médio em relação ao número de excessos da precipitação. Para isso, somou-se os intervalos em que houve infiltração e dividiu-o pelo número de eventos em que houve o escoamento. A equação 20 exemplifica esse procedimento:

$$Bo_m = \frac{\sum Bo}{N_{EP}} \quad (20)$$

Onde:

Bo_m = bônus médio de absorção de água pelo solo, em mm;

N_{EP} = número de excessos da precipitação.

Posto isso, os bônus médios foram retirados dos eventos que apresentaram os excessos, equação 21.

$$A = Ep - Bo_m \quad (21)$$

Esse procedimento foi repetido somente para os casos em que A fosse maior que zero até ao final restar somente valores de A positivo, ou seja, restar somente as excessos e nenhuma absorção. A precipitação efetiva foi determinada pelo somatório dos últimos valores positivos, equação 22.

$$PE_{\emptyset} = \sum A \quad \text{se } A > 0 \quad (22)$$

Assim, o coeficiente de escoamento de enchente para cada evento chuvoso de cada bacia, foi determinado pela equação 23;

$$C_{obs} = \frac{PE_{\phi}}{PT} \quad (23)$$

Em que:

C_{obs} = coeficiente de escoamento de enchente observado, adimensional;

PE_{ϕ} = precipitação efetiva obtida por meio do índice ϕ , em mm;

PT = precipitação total no evento que gerou o escoamento superficial, em mm.

3.11.2 Estimativa do coeficiente C pelo método Racional

O coeficiente de enchente foi estimado por meio da fórmula e princípios empregados no método Racional. A Equação 24 apresenta um rearranjo da equação Racional aplicada para cada evento chuvoso, de cada bacia em estudo.

$$C_{rac} = \frac{Q_{máx}}{278 \cdot I \cdot A} \quad (24)$$

Em que:

C_{rac} = coeficiente de escoamento de enchente estimado pelo método Racional, adimensional;

$Q_{máx}$ = vazão de pico de cada hidrograma, em Ls^{-1} ;

I = intensidade da precipitação de cada hidrograma, mmh^{-1} ;

A = área total da bacia hidrográfica, em m^2 .

Segundo os princípios do método Racional, o tempo de concentração equivale ao intervalo desde o início da precipitação efetiva até o final do escoamento (STRAUB et al., 2000). Dessa forma, a intensidade da precipitação pôde ser calculada pela relação da precipitação total com a diferença entre o instante que se inicia a precipitação efetiva e o instante em que se encerra a depleção do escoamento superficial direto (Equação 25).

$$I = \frac{PT}{T_{pc} - T_{ipe}} \quad (25)$$

Onde:

I = intensidade da precipitação, mmh^{-1} ;

PT = precipitação total, em mm;

T_{pc} = tempo no hidrograma onde se verificou o encerramento do escoamento superficial, em h;

T_{ipe} = tempo de início da precipitação efetiva, considerado como o instante no qual houve o primeiro caso de excesso de chuva, em h.

3.11.3 Estimativa do coeficiente C pelo método do *Soil Conservation Service* (CN – SCS)

Para determinar a precipitação efetiva pelo método CN, desenvolvido pelo SCS, foi necessário o conhecimento do uso do solo, tipo de solo, grupo hidrológico, umidade e da quantidade de precipitação nos cinco dias anteriores ao início do evento chuvoso, a fim de obter o valor da curva número (CN).

O uso e tipo de solo foram conhecidos conforme descrito na seção 4.1. Para a definição do grupo hidrológico consultou-se o guia *National Engineering Handbook Hydrology* (NEH, 2009). Este guia agrupa os solos norte-americanos em quatro grupos (A, B, C e D), de acordo com a produção de escoamento e capacidade de infiltração. Os solos do grupo A, são aqueles que geram um menor escoamento e maior infiltração ao passo que os solos do grupo D, o inverso.

- a) Grupo A: Os solos neste grupo têm baixo potencial de escoamento quando completamente molhado e a água é transmitida livremente através do solo. Geralmente, tem menos do que 10% de argila e mais de 90% de areia ou cascalho e têm texturas de cascalho ou areia.
- b) Grupo B: Os solos neste grupo têm moderadamente baixo potencial de escoamento quando completamente molhado e a transmissão de água através do solo não está impedida. Apresentam tipicamente entre 10% e 20% de argila e 50% a 90% de areia e areia arenosa ou texturas arenosas.
- c) Grupo C: Os solos neste grupo têm moderadamente alto potencial de escoamento quando completamente molhado e transmissão de água através do solo é um pouco restrita. Normalmente, contém entre 20% e 40% de argila e menos de 50% de areia.
- d) Grupo D: Os solos neste grupo possuem alto potencial de escoamento quando completamente molhado e o movimento de água através do solo é restrito ou

muito restrito. Tipicamente, apresenta mais de 40% de argila, menos de 50% de areia e tem texturas argilosas. (NHE, 2009)

Conforme as características de cada grupo, constatou-se que os solos presentes na BHEGL seriam enquadrados como grupo hidrológico C, ao passo que os solos da BHEAV seriam enquadrados como grupo hidrológico B.

O CN de cada tipo de uso do solo para cada bacia foi obtido pelo cruzamento da cobertura do solo com o grupo hidrológico nas tabelas do guia *National Engineering Handbook Hydrology* (NEH, 2004). Como ambas as bacias de estudo apresentaram mais de um tipo de cobertura superficial dentro de seus limites, para cada uma, obteve-se os valores de CN dos usos e relacionou-os a área ocupada por eles em relação a área total da bacia, a fim de se obter um único valor de CN para cada bacia. A metodologia de cálculo está explicitada na Equação 26.

$$CN_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^n CN_i A_i}{A} \quad (26)$$

Em que

$CN_{\text{médio}}$ = valor médio do CN para cada bacia alvo de estudo;

CN_i = valor do número da curva obtido em tabelas para cada uso, adimensional;

A_i = área ocupada por cada tipo de uso, em km^2 ;

A = área total da bacia hidrográfica, em km^2 .

O quantitativo de chuva, nos últimos cinco dias, foram determinados pelo somatório dos valores registrados nos pluviômetros instalados nas áreas de estudo possibilitando conhecer o grau de umidade que o solo se encontrava previamente a cada evento chuvoso. Para a devida correção dos valores de CN usados para o cômputo do CN médio de cada bacia, adotou-se os seguintes limites:

- a) Condição I: chuvas nos últimos 5 dias $< 13 \text{ mm}$;
- b) Condição II: chuvas nos últimos 5 dias entre 13 e 53 mm;
- c) Condição III: chuvas nos últimos 5 dias $> 53 \text{ mm}$.

Como os valores de CN (NEH, 2004) usados foram obtidos para as condições médias de umidade antecedente enquadradas na condição II, para os eventos classificados nas

condições I e III, os valores de CN foram devidamente retificados, por meio das Equações 27 e 28:

$$CN(I) = \frac{4,2 \times CN(II)}{10 - (0,058 \times CN(II))} \quad (27)$$

$$CN(III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + (0,13 \times CN(II))} \quad (28)$$

Onde:

CN (I) = curva número para a condição I de umidade antecedente, adimensional;

CN (II) = curva número para a condição II de umidade antecedente, adimensional;

CN (III) = curva número para a condição III de umidade antecedente, adimensional.

De posse dos valores de CN corrigidos para cada condição, procedeu-se ao cálculo do potencial de retenção de água no solo (S) para cada evento chuvoso, por meio da Equação 29.

$$S = \frac{25400}{CN_{I,II,III}} - 254 \quad (29)$$

Onde:

S = potencial de armazenamento de água no solo, em mm;

CN_{I,II,III} = curva número para a condição I ou II ou III de umidade antecedente, adimensional;

Uma vez conhecido o potencial de armazenamento de água no solo de cada evento chuvoso, aplicou-se a regra da abstração inicial (Equação 30) para fins de comparação com o total precipitado no evento de modo que este fosse superior àquele.

$$I_a = 20\% \cdot S \quad (30)$$

Em que:

I_a = abstração inicial, em mm;

Por fim, a precipitação efetiva obtida por meio da metodologia proposta pelo SCS pôde ser estimada por meio da Equação 31.

$$PE_{scs} = \frac{(PT - 0,2S)^2}{PT + 0,8S} \quad (31)$$

Em que:

PE_{scs} = precipitação efetiva estimada pelo modelo proposto pelo SCS, em mm;

PT = precipitação total do evento chuvoso que gerou o hidrograma, em mm.

É importante ressaltar que a equação 19 só pode ser aplicada se a precipitação total for superior à abstração inicial. Assim, o coeficiente de escoamento de enchente para cada evento chuvoso, em que a PE_{scs} foi maior que a I_a , para cada bacia, foi determinado pela equação 32.

$$C_{scs} = \frac{PE_{scs}}{PT} \quad (32)$$

Em que:

C_{scs} = coeficiente de enchente com precipitação efetiva estimada pela metodologia do CN-SCS, adimensional;

PE_{scs} = precipitação efetiva obtida pelo método CN-SCS, em mm;

PT = precipitação total do evento chuvoso que gerou o hidrograma, em mm.

3.11.4 Estimativa do coeficiente C oriundo da literatura técnica

Como alguns usos existentes nas bacias experimentais estudadas não tinham correspondente igual ou similar em uma só fonte de dados, utilizou-se duas tabelas disponíveis na literatura para a composição do C tabelado, a tabela da ASCE (1992) e a tabela mencionada por Chow (1988) da cidade de Austin.

Uma vez selecionado os valores de (C) conforme os diferentes tipos de superfícies existentes nas bacias em estudo, fez-se uma média ponderada desses diversos valores de (C) por bacia, conforme a Equação 33.

$$C_{lit} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{A} \quad (33)$$

Em que

C_{lit} = coeficiente de escoamento superficial de cada bacia, oriundo da literatura técnica (ASCE (1992) e CHOW (1988)), adimensional;

C_i = coeficiente de escoamento superficial para a subárea i , oriundo da literatura técnica (ASCE (1992) e CHOW (1988)), adimensional;

A_i = subárea, km^2 ;

A = área da bacia, km^2 .

Em ambas as bacias existem áreas úmidas e, para esse tipo de superfície, não foi encontrada em nenhuma das tabelas consultadas o valor correspondente. No entanto, a resposta para essa particularidade foi encontrada em Dharkal et al. (2012) que atribuiu um valor C igual a 1 para as zonas úmidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Coeficiente C observado

Os resultados dos C observados na BHEGL e na BHEAV encontram-se apresentados, respectivamente, nas Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 - Coeficiente C observado na BHEGL

| Evento chuvoso | P₅ (mm) | PT (mm) | ϕ (adimensional) | PE_{ϕ} (mm) | C_{obs} (adimensional) |
|-----------------------|---------------------------|----------------|---|--|---------------------------------------|
| 31/10/15 | 19,80 | 12,4 | 2,47 | 0,07 | 0,006 |
| 03/11/15 | 70,00 | 17,2 | 0,71 | 0,23 | 0,013 |
| 07/11/15 | 17,60 | 5,6 | 1,85 | 0,05 | 0,008 |
| 29/11/15 | 4,40 | 33,8 | 1,35 | 1,49 | 0,044 |
| 30/11/15 | 39,40 | 12,2 | 3,04 | 0,05 | 0,004 |
| 06/12/15 | 50,40 | 17,4 | 0,45 | 0,26 | 0,015 |
| 18/12/15 | 0,00 | 4,2 | 0,44 | 0,23 | 0,055 |
| 20/12/15 | 29,60 | 30 | 0,94 | 0,91 | 0,030 |
| 26/12/15 | 2,20 | 13,6 | 0,79 | 0,22 | 0,016 |
| 28/12/15 | 13,80 | 15,4 | 2,18 | 0,14 | 0,009 |
| 04/01/16 | 13,40 | 19,6 | 1,02 | 0,31 | 0,016 |
| 19/01/16 | 130,60 | 20 | 0,89 | 0,50 | 0,025 |
| 04/02/16 | 0,00 | 6,2 | 1,91 | 0,46 | 0,074 |
| 09/02/16 | 32,40 | 15,4 | 1,69 | 0,17 | 0,011 |
| 16/02/16 | 30,60 | 3,6 | 0,71 | 0,07 | 0,020 |
| 29/02/16 | 36,60 | 15,8 | 0,98 | 0,17 | 0,011 |
| 10/03/16 | 10,00 | 17 | 0,89 | 0,14 | 0,008 |
| 14/03/16 | 46,00 | 10 | 1,42 | 0,07 | 0,007 |

Tabela 7 - Coeficiente C observado na BHEAV

| Evento chuvoso | P₅ (mm) | PT (mm) | ϕ (adimensional) | PE_{ϕ} (mm) | C_{obs} (adimensional) |
|-----------------------|---------------------------|----------------|---|--|---------------------------------------|
| 26/12/16 | 0,00 | 35,50 | 3,22 | 0,07 | 0,002 |
| 09/01/17 | 29,00 | 9,00 | 0,36 | 0,05 | 0,006 |
| 12/01/17 | 68,75 | 28,50 | 1,18 | 0,13 | 0,005 |
| 15/01/17 | 64,00 | 14,00 | 0,50 | 0,06 | 0,005 |
| 22/01/17 | 55,75 | 13,25 | 0,57 | 0,07 | 0,005 |
| 31/01/17 | 18,75 | 20,25 | 2,24 | 0,13 | 0,007 |
| 02/02/17 | 20,50 | 30,25 | 1,16 | 0,11 | 0,004 |
| 03/02/17 | 75,25 | 28,75 | 1,91 | 0,05 | 0,002 |
| 04/02/17 | 105,00 | 50,25 | 1,39 | 0,13 | 0,003 |
| 27/02/17 | 30,00 | 25,75 | 1,22 | 0,03 | 0,001 |

| | | | | | |
|----------|-------|-------|------|------|--------|
| 01/03/17 | 34,00 | 10,75 | 0,56 | 0,03 | 0,002 |
| 05/03/17 | 35,00 | 40,25 | 1,15 | 0,11 | 0,003 |
| 10/03/17 | 79,25 | 4,75 | 1,56 | 0,06 | 0,014 |
| 06/04/17 | 0,00 | 21,25 | 1,25 | 0,07 | 0,003 |
| 08/04/17 | 21,25 | 39,75 | 2,33 | 0,11 | 0,003 |
| 13/04/17 | 66,25 | 15,00 | 1,87 | 0,04 | 0,003 |
| 22/04/17 | 5,50 | 12,00 | 0,70 | 0,03 | 0,003 |
| 20/05/17 | 48,00 | 24,25 | 0,90 | 0,03 | 0,001 |
| 22/05/17 | 45,25 | 32,00 | 0,89 | 0,14 | 0,004 |
| 02/10/17 | 18,57 | 31,57 | 0,73 | 0,01 | 0,0003 |
| 16/10/17 | 0,00 | 12,81 | 1,59 | 0,05 | 0,004 |

Nota-se que os valores de C calculados para todos os eventos em cada uma dessas bacias variaram de um evento para outro ao longo do monitoramento. A variação na BHEGL foi de 0,004 a 0,074 e na BHEAV a variação se deteve entre 0,0003 a 0,014. Fato esse explicado pela prévia condição de umidade (P_5) que o solo já se encontrava a cada início de um novo evento de chuva. Essa influência e variação do coeficiente de escoamento também foi encontrada na análise de 1600 eventos de chuva-escoamento de 90 bacias localizadas no Texas, feita por Dhakal et al. (2012).

4.2 Estimativa do coeficiente C pelo método CN-SCS

Na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL), o conjunto das coberturas do terreno aliadas ao tipo de solo determinaram um CN médio de 83,56 e na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha (BHEAV), o CN médio foi de 68,1, conforme explicitado, respectivamente, nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Valores de CN obtidos para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

| Uso do solo | Grupo Hidrológico | Área (km ²) | CN (II) |
|------------------------------|-------------------|-------------------------|---------|
| Área Urbana sem pavimentação | C | 0,729 | 87 |
| Área Urbana pavimentada | C | 1,038 | 98 |
| Cultivo anual* | C | 2,659 | 81 |
| Cultivo perene | C | 0,509 | 81 |
| Pastagem degradada | C | 2,435 | 86 |
| Pastagem em boas condições | C | 0,407 | 74 |
| Mata de galeria | C | 0,863 | 70 |

| | | | |
|-----------------|---|-------|--------------|
| Represa | C | 0,019 | 98 |
| CN médio | | | 83,56 |

Nota: a simbologia “*” destaca que o cultivo anual presente na BHEGL é com curva de nível

Tabela 9 - Valores de CN obtidos para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha

| Uso do solo | Grupo Hidrológico | Área (km ²) | CN (II) |
|----------------------------|-------------------|-------------------------|-------------|
| Área Úmida | B | 2,28 | 98 |
| Vegetação | B | 3,45 | 55 |
| Cultivo anual* | B | 1,78 | 72 |
| Pastagem degradada | B | 0,02 | 79 |
| Pastagem em boas condições | B | 7,04 | 61 |
| Represa | B | 1,77 | 98 |
| CN médio | | | 68,1 |

Nota: a simbologia “*” destaca que o cultivo anual presente na BHEAV é com curva de nível e cobertura vegetal

De acordo com a condição de umidade antecedente do solo (precipitação nos últimos 5 dias - P₅), para cada bacia, o CN médio foi devidamente retificado, conforme a metodologia apresentada na seção 3.11.3. Essa correção interferiu na capacidade de retenção de água no solo (S) e na abstração inicial (Ia), apresentados na Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Valores de CN retificados, retenção de água no solo e abstração inicial por evento chuvoso na BHEGL

| Evento chuvoso | PT (mm) | P ₅ (mm) | Condição CN | CN | S(mm) | Ia(mm) |
|----------------|---------|---------------------|-------------|-------|--------|--------|
| 31/10/2015 | 12,4 | 19,80 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 03/11/2015 | 17,2 | 70,00 | III | 92,12 | 21,72 | 4,34 |
| 07/11/2015 | 5,6 | 17,60 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 29/11/2015 | 33,8 | 4,40 | I | 68,10 | 118,97 | 23,79 |
| 30/11/2015 | 12,2 | 39,40 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 06/12/2015 | 17,4 | 50,40 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 18/12/2015 | 4,2 | 0,00 | I | 68,10 | 118,97 | 23,79 |
| 20/12/2015 | 30 | 29,60 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 26/12/2015 | 13,6 | 2,20 | I | 68,10 | 118,97 | 23,79 |
| 28/12/2015 | 15,4 | 13,80 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 04/01/2016 | 19,6 | 13,40 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 19/01/2016 | 20 | 130,60 | III | 92,12 | 21,72 | 4,34 |
| 04/02/2016 | 6,2 | 0,00 | I | 68,10 | 118,97 | 23,79 |
| 09/02/2016 | 15,4 | 32,40 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |

| | | | | | | |
|------------|------|-------|----|-------|--------|-------|
| 16/02/2016 | 3,6 | 30,60 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 29/02/2016 | 15,8 | 36,60 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |
| 10/03/2016 | 17 | 10,00 | I | 68,10 | 118,97 | 23,79 |
| 14/03/2016 | 10 | 46,00 | II | 83,56 | 49,97 | 9,99 |

Tabela 11 - Valores de CN retificados, retenção de água no solo e abstração inicial por evento chuvoso na BHEAV

| Evento chuvoso | PT(mm) | P ₅ (mm) | Condição CN | CN | S(mm) | Ia(mm) |
|----------------|--------|---------------------|-------------|-------|--------|--------|
| 26/12/2016 | 35,50 | 0,00 | I | 47,27 | 283,30 | 56,66 |
| 09/01/2017 | 9,00 | 29,00 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 13/01/2017 | 28,50 | 68,75 | III | 83,08 | 51,73 | 10,35 |
| 15/01/2017 | 14,00 | 64,00 | III | 83,08 | 51,73 | 10,35 |
| 22/01/2017 | 13,25 | 55,75 | III | 83,08 | 51,73 | 10,35 |
| 31/01/2017 | 20,25 | 18,75 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 02/02/2017 | 30,25 | 20,50 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 03/02/2017 | 28,75 | 75,25 | III | 83,08 | 51,73 | 10,35 |
| 04/02/2017 | 50,25 | 105,00 | III | 83,08 | 51,73 | 10,35 |
| 27/02/2017 | 25,75 | 30,00 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 01/03/2017 | 10,75 | 34,00 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 05/03/2017 | 40,25 | 35,00 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 10/03/2017 | 4,75 | 79,25 | III | 83,08 | 51,73 | 10,35 |
| 06/04/2017 | 21,25 | 0,00 | I | 47,27 | 283,30 | 56,66 |
| 08/04/2017 | 39,75 | 21,25 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 13/04/2017 | 15,00 | 66,25 | III | 83,08 | 51,73 | 10,35 |
| 22/04/2017 | 12,00 | 5,50 | I | 47,27 | 283,30 | 56,66 |
| 20/05/2017 | 24,25 | 48,00 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 22/05/2017 | 32,00 | 45,25 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 02/10/2017 | 31,57 | 18,57 | II | 68,10 | 118,98 | 23,80 |
| 16/10/2017 | 12,81 | 0,00 | I | 47,27 | 283,30 | 56,66 |

Importante ressaltar que a precipitação efetiva foi calculada somente para os eventos chuvosos em que o total precipitado foi superior a abstração inicial, isto é, maior que 20% do armazenamento de água no solo. Por isso, dos 18 eventos analisados na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, seis foram descartados, enquanto que na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha, dos 21 eventos analisados oito foram eliminados devido a esse pressuposto, o qual se faz necessário para a aplicação do método CN.

Portanto, a estimativa do coeficiente C usando o método do CN-SCS foi possível para 12 eventos ocorridos na BHEGL e 13 na BHEAV, respectivamente apresentados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Estimativa do C pelo método CN – SCS na BHEGL

| Evento chuvoso | PT (mm) | PE_{scs} (mm) | C_{scs} |
|-----------------------|----------------|------------------------------|------------------------|
| 31/10/2015 | 12,40 | 0,11 | 0,009 |
| 03/11/2015 | 17,20 | 4,78 | 0,278 |
| 07/11/2015 | 5,60 | - | - |
| 29/11/2015 | 33,80 | 0,78 | 0,023 |
| 30/11/2015 | 12,20 | 0,09 | 0,008 |
| 06/12/2015 | 17,40 | 0,96 | 0,055 |
| 18/12/2015 | 4,20 | - | - |
| 20/12/2015 | 30,00 | 5,72 | 0,191 |
| 26/12/2015 | 13,60 | - | - |
| 28/12/2015 | 15,40 | 0,53 | 0,034 |
| 04/01/2016 | 19,60 | 1,55 | 0,079 |
| 19/01/2016 | 20,00 | 6,56 | 0,328 |
| 04/02/2016 | 6,20 | - | - |
| 09/02/2016 | 15,40 | 0,53 | 0,034 |
| 16/02/2016 | 3,60 | - | - |
| 29/02/2016 | 15,80 | 0,60 | 0,038 |
| 10/03/2016 | 17,00 | - | - |
| 14/03/2016 | 10,00 | 0,000001 | 0,0000001 |

Nota: a simbologia “-” indica valores não calculados devido ao fato da $PT < I_a$

Tabela 13 - Estimativa do C pelo método CN – SCS na BHEAV

| Evento chuvoso | PT (mm) | PE_{scs} (mm) | C_{scs} |
|-----------------------|----------------|------------------------------|------------------------|
| 26/12/2016 | 35,50 | - | - |
| 09/01/2017 | 9,00 | - | - |
| 12/01/2017 | 28,50 | 4,72 | 0,165 |
| 15/01/2017 | 14,00 | 0,24 | 0,017 |
| 22/01/2017 | 13,25 | 0,15 | 0,012 |
| 31/01/2017 | 20,25 | - | - |
| 02/02/2017 | 30,25 | 0,33 | 0,011 |
| 03/02/2017 | 28,75 | 4,83 | 0,168 |
| 04/02/2017 | 50,25 | 17,38 | 0,346 |
| 27/02/2017 | 25,75 | 0,03 | 0,001 |
| 01/03/2017 | 10,75 | - | - |
| 05/03/2017 | 40,25 | 2,00 | 0,050 |
| 10/03/2017 | 4,75 | - | - |
| 06/04/2017 | 21,25 | - | - |
| 08/04/2017 | 39,75 | 1,89 | 0,047 |
| 13/04/2017 | 15,00 | 0,38 | 0,026 |
| 22/04/2017 | 12,00 | - | - |
| 20/05/2017 | 24,25 | 0,002 | 0,0001 |
| 22/05/2017 | 32,00 | 0,53 | 0,017 |

| | | | |
|------------|-------|------|-------|
| 02/10/2017 | 31,57 | 0,48 | 0,015 |
| 16/10/2017 | 12,81 | - | - |

Nota: a simbologia “-” indica valores não calculados devido ao fato da $PT < I_a$

Analisando os resultados contidos nas Tabelas 12 e 13, percebe-se que os valores de C_{SCS} calculados para todos os eventos em cada uma das bacias variaram, ao longo do monitoramento, de um evento chuvoso para outro, sendo a variação na BHEGL entre 0,000001 e 0,328; ao passo que na BHEAV variou de 0,0001 e 0,35. Esse comportamento está atrelado aos tipos de solo e cobertura presentes em cada bacia e aos diferentes estágios de umidade antecedente do solo. Infere-se que apesar de no interior da BHEGL haver mais áreas impermeáveis que implicaria em um aumento do (C), o escoamento teve limites um pouco mais superiores na BHEAL devido à presença da área úmida. De acordo com o estudo conduzido por Sriwongsitanon e Taesombat (2011) na Tailândia, as áreas ocupadas por florestas contribuem positivamente para o aumento do coeficiente de escoamento à medida que aumenta a intensidade da precipitação. Sendo assim, em áreas úmidas, o solo necessita de pouca água para atingir o estágio de saturação e iniciar-se o escoamento. Analogamente, Merz et al. (2006) ao estudar 337 bacias verificaram que bacias hidrográficas mais úmidas apresentam um maior coeficiente de escoamento, ao passo que em bacias mais secas, o contrário.

4.3 Estimativa do coeficiente C pelo método racional

Os resultados obtidos com a aplicação do método racional na BHEGL e na BHEAV encontram-se apresentados, respectivamente, nas Tabela 14 e Tabela 15.

Tabela 14 - Estimativa do C pelo método racional na BHEGL

| Evento chuvoso | $Q_{max} (L s^{-1})$ | $I (mmh^{-1})$ | C_{rac} |
|----------------|----------------------|----------------|-----------|
| 31/10/15 | 439,59 | 3,72 | 0,049 |
| 03/11/15 | 424,91 | 2,68 | 0,066 |
| 07/11/15 | 465,74 | 2,24 | 0,086 |
| 29/11/15 | 2433,61 | 4,61 | 0,219 |
| 30/11/15 | 297,31 | 3,33 | 0,037 |
| 06/12/15 | 380,45 | 2,22 | 0,071 |
| 18/12/15 | 647,11 | 1,03 | 0,262 |
| 20/12/15 | 1102,92 | 3,53 | 0,130 |
| 26/12/15 | 559,26 | 2,37 | 0,098 |
| 28/12/15 | 360,42 | 3,36 | 0,045 |

| | | | |
|----------|--------|------|-------|
| 04/01/16 | 516,94 | 3,51 | 0,061 |
| 19/01/16 | 843,84 | 2,70 | 0,130 |
| 04/02/16 | 80,78 | 1,96 | 0,017 |
| 09/02/16 | 542,49 | 3,55 | 0,063 |
| 16/02/16 | 575,56 | 1,60 | 0,150 |
| 29/02/16 | 484,05 | 4,74 | 0,042 |
| 10/03/16 | 492,17 | 7,29 | 0,028 |
| 14/03/16 | 356,44 | 3,08 | 0,048 |

Tabela 15 - Estimativa do C pelo método racional na BHEAV

| Evento chuvoso | Q_{\max} (L s⁻¹) | I (mmh⁻¹) | C_{rac} |
|-----------------------|---|-----------------------------|------------------------|
| 26/12/16 | 179,07 | 3,70 | 0,011 |
| 09/01/17 | 156,58 | 0,76 | 0,046 |
| 12/01/17 | 191,37 | 1,59 | 0,026 |
| 15/01/17 | 179,31 | 1,15 | 0,034 |
| 22/01/17 | 154,83 | 0,61 | 0,056 |
| 31/01/17 | 202,89 | 1,13 | 0,040 |
| 02/02/17 | 203,11 | 1,86 | 0,024 |
| 03/02/17 | 201,89 | 3,19 | 0,014 |
| 04/02/17 | 299,26 | 5,11 | 0,013 |
| 27/02/17 | 165,87 | 2,73 | 0,013 |
| 01/03/17 | 159,89 | 1,03 | 0,034 |
| 05/03/17 | 219,96 | 2,86 | 0,017 |
| 10/03/17 | 170,56 | 0,24 | 0,158 |
| 06/04/17 | 194,35 | 1,81 | 0,024 |
| 08/04/17 | 249,52 | 3,82 | 0,014 |
| 13/04/17 | 168,16 | 1,23 | 0,030 |
| 22/04/17 | 148,68 | 0,91 | 0,036 |
| 20/05/17 | 190,56 | 2,37 | 0,018 |
| 22/05/17 | 223,80 | 3,40 | 0,015 |
| 02/10/17 | 156,45 | 3,24 | 0,011 |
| 16/10/17 | 136,38 | 0,60 | 0,050 |

Percebe-se que os valores de C calculados para todos os eventos, em cada uma das bacias, pelo método racional também apresentaram, ao longo do monitoramento, uma variação entre os eventos chuvosos. Fato esse explicado pela prévia condição de umidade que o solo já se encontrava a cada início de um novo evento de chuva.

Na BHEGL o coeficiente (C) alternou entre 0,017 a 0,262 e na BHEAV o (C) variou de 0,01 a 0,16. Variações semelhantes foram encontradas por Hotchkiss e McCallum (1995) que também estimaram o coeficiente (C) pelo método racional, ao estudarem a vazão de pico em pequenas bacias de Nebraska. Esses autores verificaram que o (C) variou de bacia por

bacia sendo o limite mínimo e máximo de todas as sete bacias estudadas, respectivamente, $<0,01$ e $0,81$.

Ainda segundo esses autores, o coeficiente C aumentou com a vazão de pico. No entanto, isso não pôde ser completamente observado nos dados da Tabela 14 e nem da Tabela 15, que apresentaram apenas alguns eventos isolados seguindo esse comportamento. Na maioria dos casos, houve uma redução do C com o aumento da vazão em dias próximos entre si, fato que pode ser explicado pela grande variabilidade espacial e temporal das chuvas, conforme salientado por Ponce (1995).

4.4 Estimativa do coeficiente C da literatura

As Tabelas 16 e 17 apresentam os valores de C selecionados da literatura para os tipos de superfícies existentes nas áreas de estudo e a respectiva área ocupada por cada superfície. Como não há na literatura um maior detalhamento das áreas, houve uma sobreposição de valores para as duas áreas urbanas, os dois cultivos e as duas pastagens. Nessas tabelas também foi incluída as fontes de referências para os valores C selecionados.

Tabela 16 - Valores de C selecionados de acordo com os tipos de superfícies existentes na BHEGL.

| Uso do solo | A (km ²) | C | Fonte |
|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------|
| Área urbana sem pavimentação | 0,729 | 0,325 | ASCE (1992) |
| Área urbana pavimentada | 1,038 | 0,325 | ASCE (1992) |
| Cultivo anual | 2,659 | 0,35 | Chow (1988) |
| Cultivo perene | 0,509 | 0,35 | Chow (1988) |
| Pastagem degradada | 2,435 | 0,33 | Chow (1988) |
| Pastagem em boas condições | 0,407 | 0,33 | Chow (1988) |
| Mata de Galeria | 0,863 | 0,31 | Chow (1988) |
| Represa | 0,019 | 1 | Dhakai et al. (2012) |
| C_{lit} | | 0,34 | |

Tabela 17 - Valores de C selecionados de acordo com os tipos de superfícies existentes na BHEAV.

| Uso do solo | A (km ²) | C | Fonte |
|-------------|----------------------|------|-------------|
| Vegetação | 3,45 | 0,29 | Chow (1988) |

| | | | |
|----------------------------|------|-------------|----------------------|
| Cultivo anual | 1,78 | 0,35 | Chow (1988) |
| Pastagem degradada | 0,02 | 0,33 | Chow (1988) |
| Pastagem em boas condições | 7,04 | 0,33 | Chow (1988) |
| Área úmida | 2,28 | 1 | Dhakal et al. (2012) |
| Represa | 1,77 | 1 | Dhakal et al. (2012) |
| C_{lit} | | 0,42 | |

Os valores dos diversos C da literatura para cada uso da BHEGL variaram de 0,325 a 1 resultando em um C médio ponderado pela área de 0,34. Na BHEAV, os valores oriundos das tabelas foram de 0,29 a 1 implicando em um C médio ponderado pela área de 0,42.

Essa variação ocorre devido aos diferentes tipos de superfícies presentes em cada bacia. Considerando os estudos e constatações de Tucci (1997) e Tucci (2000), as áreas impermeáveis são positivamente correlacionadas ao aumento do volume de escoamento superficial. No entanto, apesar de no interior da BHEGL haver mais áreas impermeáveis, as quais implicaria em um aumento do C, o escoamento teve limites um pouco mais superiores na BHEAV. Isso ocorreu devido à presença da área úmida na BHEAV. De acordo com o estudo conduzido por Sriwongsitanon e Taesombat (2011) na Tailândia, as áreas ocupadas por florestas contribuem positivamente para o aumento do coeficiente de escoamento à medida que aumenta a intensidade da precipitação. Ou seja, em áreas úmidas, o solo necessita de pouca água para atingir o estágio de saturação e iniciar o escoamento.

Vale ressaltar que a atribuição de valores de C para qualquer bacia hidrográfica pode diferir, a depender da literatura utilizada como fonte, bem como da experiência e do julgamento da correlação dos usos existentes com os tabelados, como relato por Dhakal et al. (2012) que obteve o coeficiente C tabelado para 90 bacias no Texas – com C variando de 0,29 a 0,63 – e ao comparar esses resultados com o estudo desenvolvido por Harle (2002) que obteve o C para bacias no Texas, encontrou uma diferença absoluta média de 0,06 e diferença máxima de 0,13.

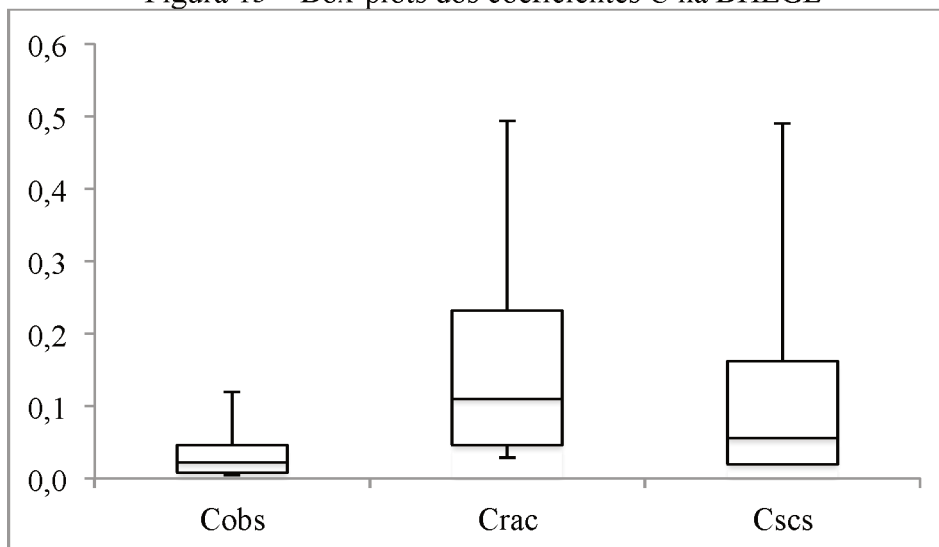
4.5 Comparação dos coeficientes de escoamento de enchente (C)

O coeficiente de escoamento de enchente variou muito em cada bacia hidrográfica. Na Tabela 18 estão compilados todos os valores de C obtidos nesse estudo para a BHEGL, bem como as estatísticas.

Tabela 18 - Resumo dos valores de C obtidos na BHEGL

| Evento chuvoso | PT (mm) | C_{obs} | C_{rac} | C_{scs} | C_{tab} |
|-----------------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 31/10/15 | 12,40 | 0,006 | 0,049 | 0,009 | |
| 03/11/15 | 17,20 | 0,013 | 0,066 | 0,278 | |
| 07/11/15 | 5,60 | 0,008 | 0,086 | - | |
| 29/11/15 | 33,80 | 0,044 | 0,219 | 0,023 | |
| 30/11/15 | 12,20 | 0,004 | 0,037 | 0,008 | |
| 06/12/15 | 17,40 | 0,015 | 0,071 | 0,055 | |
| 18/12/15 | 4,20 | 0,055 | 0,262 | - | |
| 20/12/15 | 30,00 | 0,030 | 0,130 | 0,191 | |
| 26/12/15 | 13,60 | 0,016 | 0,098 | - | |
| 28/12/15 | 15,40 | 0,009 | 0,045 | 0,034 | 0,34 |
| 04/01/16 | 19,60 | 0,016 | 0,061 | 0,079 | |
| 19/01/16 | 20,00 | 0,025 | 0,130 | 0,328 | |
| 04/02/16 | 6,20 | 0,074 | 0,017 | - | |
| 09/02/16 | 15,40 | 0,011 | 0,063 | 0,034 | |
| 16/02/16 | 3,60 | 0,020 | 0,150 | - | |
| 29/02/16 | 15,80 | 0,011 | 0,042 | 0,038 | |
| 10/03/16 | 17,00 | 0,008 | 0,028 | - | |
| 14/03/16 | 10,00 | 0,007 | 0,048 | 0,0000001 | |
| Mínimo | | 0,004 | 0,017 | 0,0000001 | |
| Média | | 0,021 | 0,089 | 0,090 | |
| Máximo | | 0,074 | 0,262 | 0,328 | |
| Desvio Padrão | | 0,019 | 0,066 | 0,112 | 0,34 |
| Mediana | | 0,014 | 0,065 | 0,036 | |
| Quartil 25% | | 0,008 | 0,046 | 0,020 | |
| Quartil 75% | | 0,024 | 0,122 | 0,107 | |

Figura 13 – Box-plots dos coeficientes C na BHEGL



Nota-se na Tabela 18 e na Figura 13 que os coeficientes de escoamento observado foram aqueles que apresentaram menor variação, com valores de 0,004 a 0,074, com um dado médio de 0,021. Observa-se também que a metade dos valores foram inferiores 0,014 e desses 25% dos valores foram inferiores a 0,008 e 75% inferiores a 0,024.

Os valores de C estimados pelo método racional tiveram a maior variação dos dados, entre 0,017 e 0,262 com um valor médio de 0,089. A metade dos dados estimados por esse método apresentaram valores inferiores a 0,065, sendo que 25% foram inferiores a 0,046 e 75% inferiores a 0,122.

Os resultados oriundos do método SCS cobriram todos os valores possíveis de C entre 0,0000001 a 0,328 com valor médio de 0,09. Metade dos dados foram inferiores 0,036 sendo 25% dos valores inferiores a 0,02 e 75% inferiores a 0,107.

Nota-se, o valor médio de C observado foi menor que o valor de C obtido pelo método racional, e este por sua vez, foi menor que o valor de C encontrado por meio do método SCS. Os valores de C da literatura e, consequentemente, a composição final média do C tabelado (C_{tab}) definiu um coeficiente C bem superior ao valores efetivamente observados e estimados. Por isso, o coeficiente de escoamento tabelado não refletiu com precisão os valores de C, tendo em vista que seu valor foi bem superior aos observados (C_{obs}) e estimados (C_{rac} e C_{scs}).

Por meio do cálculo do erro quadrático (Tabela 19) verificou-se qual dos métodos apresentou uma maior aproximação do real valor de C medido diretamente na BHEGL.

Tabela 19 - Erro quadrático provenientes da comparação dos valores de C observados com os estimados na BHEGL

| Evento Chuvoso | Comparação $C_{\text{obs}} - C_{\text{rac}}$ | Comparação $C_{\text{obs}} - C_{\text{scs}}$ |
|----------------|--|--|
| | Erro quadrático | Erro quadrático |
| 31/10/15 | 0,0019 | 0,00001 |
| 03/11/15 | 0,0028 | 0,0700 |
| 07/11/15 | 0,0061 | - |
| 29/11/15 | 0,0307 | 0,0004 |
| 30/11/15 | 0,0011 | 0,0000 |
| 06/12/15 | 0,0032 | 0,0016 |
| 18/12/15 | 0,0428 | - |
| 20/12/15 | 0,0099 | 0,0257 |
| 26/12/15 | 0,0068 | - |
| 28/12/15 | 0,0013 | 0,0006 |
| 04/01/16 | 0,0021 | 0,0040 |
| 19/01/16 | 0,0111 | 0,0918 |
| 04/02/16 | 0,0033 | - |
| 09/02/16 | 0,0028 | 0,0005 |

| Evento Chuvoso | Comparação $C_{obs} - C_{rac}$ | Comparação $C_{obs} - C_{scs}$ |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | Erro quadrático | Erro quadrático |
| 16/02/16 | 0,0167 | - |
| 29/02/16 | 0,0010 | 0,0008 |
| 10/03/16 | 0,0004 | - |
| 14/03/16 | 0,0017 | 0,0001 |
| Erro quadrático médio | 0,0081 | 0,0897 |

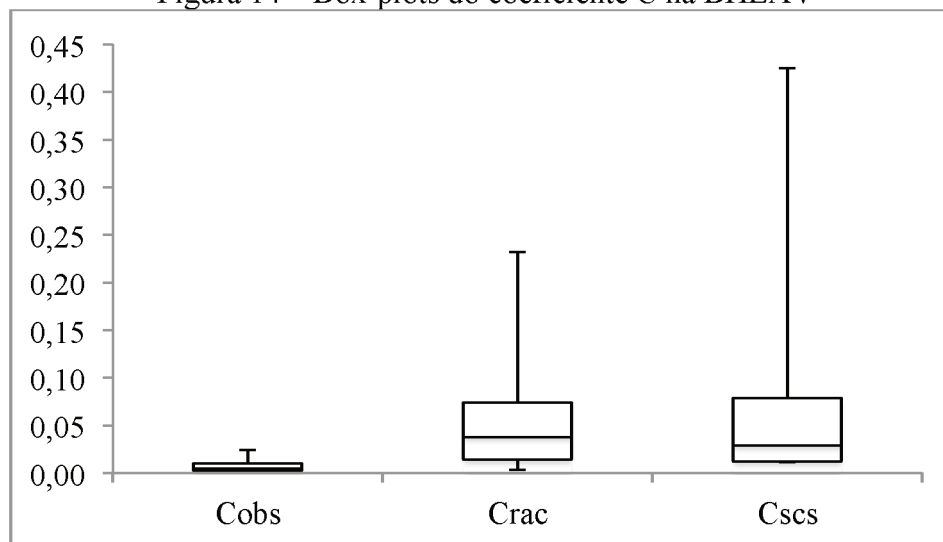
Conforme a Tabela 19, verifica-se que o método Racional se aproxima mais dos valores efetivamente observados quando comparado ao método CN-SCS na BHEGL.

A Tabela 20 reúne as estatísticas e os valores de C obtidos nesse estudo para a BHEAV.

Tabela 20 - Resumo dos valores de C obtidos na BHEAV

| Evento chuvoso | PT (mm) | C_{obs} | C_{rac} | C_{scs} | C_{lit} |
|----------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 26/12/16 | 35,50 | 0,002 | 0,011 | - | |
| 09/01/17 | 9,00 | 0,006 | 0,046 | - | |
| 12/01/17 | 28,50 | 0,005 | 0,026 | 0,165 | |
| 15/01/17 | 14,00 | 0,005 | 0,034 | 0,017 | |
| 22/01/17 | 13,25 | 0,005 | 0,056 | 0,012 | |
| 31/01/17 | 20,25 | 0,007 | 0,040 | - | |
| 02/02/17 | 30,25 | 0,004 | 0,024 | 0,011 | |
| 03/02/17 | 28,75 | 0,002 | 0,014 | 0,168 | |
| 04/02/17 | 50,25 | 0,003 | 0,013 | 0,346 | |
| 27/02/17 | 25,75 | 0,001 | 0,013 | 0,001 | |
| 01/03/17 | 10,75 | 0,002 | 0,034 | - | 0,42 |
| 05/03/17 | 40,25 | 0,003 | 0,017 | 0,050 | |
| 10/03/17 | 4,75 | 0,014 | 0,158 | - | |
| 06/04/17 | 21,25 | 0,003 | 0,024 | - | |
| 08/04/17 | 39,75 | 0,003 | 0,014 | 0,047 | |
| 13/04/17 | 15,00 | 0,003 | 0,030 | 0,026 | |
| 22/04/17 | 12,00 | 0,003 | 0,036 | - | |
| 20/05/17 | 24,25 | 0,001 | 0,018 | 0,000 | |
| 22/05/17 | 32,00 | 0,004 | 0,015 | 0,017 | |
| 02/10/17 | 31,57 | 0,0003 | 0,011 | 0,015 | |
| 16/10/17 | 12,81 | 0,004 | 0,050 | - | |
| Min | | 0,0003 | 0,01 | 0,0001 | |
| Média | | 0,004 | 0,03 | 0,07 | |
| Máx | | 0,014 | 0,16 | 0,35 | |
| Desvio Padrão | | 0,003 | 0,03 | 0,11 | 0,42 |
| Mediana | | 0,003 | 0,02 | 0,02 | |
| Quartil 25% | | 0,002 | 0,01 | 0,01 | |
| Quartil 75% | | 0,005 | 0,04 | 0,05 | |

Figura 14 – Box-plots do coeficiente C na BHEAV



Nota-se na Tabela 20 e Figura 14 que os coeficientes de escoamento observados foram aqueles que apresentaram menor variação, com valores de 0,003 a 0,014 e um dado médio de 0,004. Observa-se também que a metade dos valores foram inferiores 0,003 e desses 25% dos valores foram inferiores a 0,002.

Os valores de C estimados pelo método racional implicaram numa variação entre 0,01 a 0,16, com um valor médio de 0,03. A metade dos dados estimados por esse método apresentaram valores superiores a 0,02 sendo que 25% foram inferiores a 0,01.

A maior variação dos dados foi encontrada nos resultados de C oriundos do método SCS, entre 0,0001 a 0,35 com valor médio de 0,07. Os C_{scs} apresentaram a mesma mediana e mesmo limite do quartil 25% do C_{rac} .

Nota-se, assim como ocorreu na BHEGL, que o valor de C da literatura destoou dos demais valores de C obtidos (C_{ϕ} , C_{scs} e C_{rac}), sendo os valores desses bem inferiores ao valor tabelado. Por isso, o coeficiente de escoamento tabelado não refletiu com precisão os valores de C observados e estimados pelo método racional e CN-SCS na BHEAV.

Conforme a Tabela 21, verifica-se que o método Racional se aproxima mais dos valores efetivamente observados quando comparado ao método CN-SCS.

Tabela 20 - Erro quadrático provenientes da comparação dos valores de C observados com os estimados

| Evento Chuvoso | Comparação C_{obs} com o C_{rac} | Comparação C_{obs} com o C_{scs} |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Erro quadrático | Erro quadrático |
| 26/12/16 | 0,0001 | - |
| 09/01/17 | 0,0016 | - |
| 12/01/17 | 0,0005 | 0,0259 |
| 15/01/17 | 0,0009 | 0,0002 |
| 22/01/17 | 0,0025 | 0,0000 |
| 31/01/17 | 0,0011 | - |
| 02/02/17 | 0,0004 | 0,0001 |
| 03/02/17 | 0,0002 | 0,0277 |
| 04/02/17 | 0,0001 | 0,1178 |
| 27/02/17 | 0,0001 | 0,0000 |
| 01/03/17 | 0,0010 | - |
| 05/03/17 | 0,0002 | 0,0022 |
| 10/03/17 | 0,0207 | - |
| 06/04/17 | 0,0004 | - |
| 08/04/17 | 0,0001 | 0,0020 |
| 13/04/17 | 0,0007 | 0,0005 |
| 22/04/17 | 0,0011 | - |
| 20/05/17 | 0,0003 | 0,0000 |
| 22/05/17 | 0,0001 | 0,0001 |
| 02/10/17 | 0,0001 | 0,0002 |
| 16/10/17 | 0,0021 | - |
| Erro quadrático médio | 0,0016 | 0,0136 |

Em ambas as bacias, nenhum dos valores de C obtidos pelos diferentes métodos concordaram bem entre si. A menor diferença, tanto na BHEGL quanto na BHEAV, foi percebida entre o valor médio do C_{obs} e o C_{rac} , conforme os valores das Tabelas 19 e 21.

Resultados com diferenças entre métodos de estimativa também foram verificados por Hotchkiss e McCallum (1995) que obtiveram o C proveniente de tabelas e o C estimado pelo método Racional. A maior diferença encontrada por eles foi mensurado em 0,47, sendo o valor médio de C estimado pelo método racional igual 0,03 e o respectivo valor tabelado para a mesma bacia de 0,5.

Na BHEGL, a diferença entre o C_{rac} com valor médio de 0,089 e o C_{tab} com valor médio de 0,34, resultou em uma diferença de 0,251. Na BHEAV, a diferença entre o C_{rac} com valor médio de 0,03 e o C_{tab} com valor médio de 0,42 implicou em uma diferença de 0,39.

5 CONCLUSÃO

Os valores de C calculados a partir da precipitação efetiva observada apresentaram variação na BHEGL de 0,004 a 0,074; já na BHEAV a variação se deteve entre 0,0003 a 0,014. Coeficientes de escoamento de enchente calculados a partir da precipitação efetiva estimada pelo método CN-SCS, na BHEGL, variaram entre 0,000001 e 0,328, ao passo que na BHEAV entre 0,0001 e 0,35. Quando esse cálculo foi realizado pelo método Racional, na BHEGL o C alternou entre 0,017 a 0,262 enquanto na BHEAV variou de 0,01 a 0,16. Por outro lado, quando o coeficiente C foi estimado a partir de tabelas contidas na literatura técnica, o mesmo variou, na BHEGL de 0,325 a 1 (com valor médio de 0,34) e na BHEAV, de 0,29 a 1 (com média de 0,42). Entre os métodos utilizados para a estimativa do C, em ambas as bacias, o método Racional se apresentou mais adequado por ter se aproximado mais ao valor do C observado. Enquanto a maior diferença, tanto na BHEGL quanto na BHEAV, foi percebida entre o valor médio do C observado e o C da literatura técnica.

É importante destacar que o desvio padrão apresentou valores altos para as duas bacias estudadas, e em todos os métodos de determinação de (C), com exceção daquele oriundo da literatura. Essa condição é resultado da variabilidade dos valores de (C) encontrados neste trabalho, o que por sua vez, reflete a complexidade relacionada a esse parâmetro.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE. **Design and construction of urban storm water management systems**. New York: ASCE, 1992. p. 63–97. Disponível em: <https://www.waterboards.ca.gov/rwqcb4/water_issues/programs/stormwater/municipal/AdminRecordOrderNoR4_2012_0175/2001LAMS4_AR/Items%20532%20to%20553_reduced.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2017.
- _____. **Curve number hydrology: state of the practice**. Reston: Environmental and Water Resources Institute of ASCE, 2009. 106 p.
- _____. **Design and construction of sanitary and storm sewers**, local: ASCE 1960. (ASCE Man. Eng. Practice, n. 37 and WPCF Man. Practice, n. 9).
- AKAN, A. O.; HOUGHTALEN, R. J. **Urban hydrology, hydraulics and storm water quality**. Wilmington: Wiley, 2003. 392 p.
- ASSUNÇÃO, W. L. **Climatologia irrigada no município de Araguari-MG**. 2002. 266 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2002.
- BACCARO, C.A. D. Unidades geomorfológicas do triângulo mineiro: estudo preliminar. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 3, n. 5/6, p.37-42, jan./dez. 1991.
- BAGARELLO, V.; STEFANO, C.; VITO, F.; VICENZO, P. Comparing theoretically supported rainfall-runoff erosivity factors at the Sparacia (South Italy) experimental site. **Hydrological Processes** (Online), Chichester, v. 32, n. 4, p. 507-515, Feb 15 2018. Disponível: <<https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/2005153559?accountid=26633>>. Acesso: 28 de fev. 2018.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em: 07 set. 2016.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p. Disponível em: <https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2017.
- CHOW, V. T. **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1964.
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Mapas de geodiversidade estaduais**. 2017. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html>>. Acesso em: 10 fev. de 2017.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharias e ciências ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015. 336 p.

CRUZ, L. M.; PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S.C. Abordagem cartográfica da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do glória – MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62/03, 2010.

DHAKAL, N.; FANG, P. E. X; CLEVELAND, T. G.; THOMPSON, D. B.; ASQUITH, W. H.; MARZEN, L. J. Estimation of volumetric runoff coefficients for Texas watersheds using land-use and rainfall-runoff data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 1, p. 43-54, Jan. 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 1999. 412p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa SPI, 2006. 306 p. Disponível em: <<https://www.agrolink.com.br/downloads/sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2017

INSTITUTO DO AÇÚCAR E DO ALCOOL- IAIA. **Levantamento Detalhado dos solos da Estação Experimental Regional do Triângulo Mineiro**. Uberlândia: IAIA, 1982. 48p.

HARLE, H. K. **Identification of appropriate size limitations for hydrologic modeling for the state of Texas**. M.S. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Texas Tech Univ., Lubbock, TX. 2002.

HÉBRARD, O.; VOLTZ, M.; ANDRIEUX, P. M. Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 329, p. 110-121, 2006. Disponível em : <https://www.researchgate.net/publication/222831605_Spatio-temporal_distribution_of_soil_surface_moisture_in_a_heterogeneously_farmed_Mediterranean_catchment>. Acesso em: 27 Dec. 2017.

HOTCHKISS, R.H.; MCCALLUM, B.E. Peak discharge for small Agricultural watersheds. **Journal of hydraulic engineering**. ASCE, .v. 121, n. 1, p. 36-48, Jan. 1995.

GENOVEZ, A.M. Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias rurais do estado de São Paulo. 1991. 245f. Tese (Doutorado em Hidrologia), UNICAMP, Campinas, 1991. Disponível em:<http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258778/1/Genovez_AbelMaia_LD.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2018.

GENOVEZ, A.M. **Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

JABUR, A. S.; RIZZI, N. E. Estimativas da vazão máxima e capacidade de saturação hídrica da bacia hidrográfica do alto do rio ligeiro em Pato Branco, PR. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 4, p. 833-846, out./dez. 2011.

LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.;

LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J. B. Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA. 20., 1989, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1989. p. 99-124.

JOÃO, L.M.P.D.L. et al. Longitudinal Hillslope Shape Effects on Runoff and Sediment Loss: Laboratory Flume Experiments. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 144, n. 2 02 2018. Disponível em: <<https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/1970371698?accountid=26633>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

MARTINS, L. C. **Vazão Máxima em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia - MG**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MACRAE et al. Influence of antecedent hydrologic conditions on patterns of hydrochemical export from a first-order agricultural watershed in Southern Ontario, Canada. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 389, p. 101-110. 2010. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2010JHyd..389..101M>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

MAHE, G. et al. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 300, p. 33-43, 2005. Disponível em: <http://www.academia.edu/5951749/The_impact_of_land_use_change_on_soil_water_holding_capacity_and_river_flow_modelling_in_the_Nakambe_River_Burkina-Faso> Acesso em: 20 fev. 2018.

MAIDMENT, D. R. **Handbook of Hidrology**. New York: McGraw-Hill, 1992.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: Princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

MERZ, R.; BLOSCHL, G.; PARAJKA, J. Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 331, p. 591- 604, 2006. Disponível em: <http://www.hydro.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-hydro/Publikationen/bloeschl/2006_Merz_JH.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.

MOHAMOUD, Y. M.; EWING, L. K.; BOAST, C. W. Small plot hydrology: I. Rainfall infiltration and depression storage determination. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 4, p. 1121-1131, 1990.

NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK HYDROLOGY - NEH. **Hydrologic soil-cover complexes**. Natural Resources Conservation Service. Washington D.C. United States Department of Agriculture, 2004. cap. 9, p. 1-14. Disponível em: <<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1043063>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

_____. **Hydrologic soil groups**. Natural Resources Conservation Service. Washington D.C. United States Department of Agriculture 2009. cap. 7, p. 1-5. Disponível em:

<<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1043063>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

NISHIYAMA, Luiz. Geologia do Município de Uberlândia e Áreas Adjacentes. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v.1, n. 1, p. 9-16, jun. 1989.

NUNES FILHO, G.; FIORI, A. P. A utilização do método de Ven Te Chow – Soil Conservation Service (SCS) na estimativa da vazão máxima da bacia hidrográfica do rio Atuba. **Geografar**, Curitiba, v. 2, n. 2, p. 139-155, jul./dez. 2007. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/geografar/article/viewFile/12104/8463>>. Acesso em: 05 jan. 2018

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2016. 628 p.

PARK, D. G; SANDOVAL, N.; LIN, W.; KIM, H.; CHO, Y. H. A case study: Evaluation of water storage capacity in permeable block pavement. **KSCE Journal of Civil Engineering**, Seoul, v. 18, n. 2, p. 514-520, 03 2014.

Disponível em:

<<https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/1503408259?accountid=26633>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

PINTO, N. S. et al. **Hidrologia Básica**, São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 304 p.

PONCE, V.M. Management of droughts and flood in the semiarid Brazilian northeast. The case for conservation. **Journal of Soil and Water Conservation**, [S.l], v. 50, n. 5, p. 422-431, 1995. Disponível em:

< <https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/220967881?accountid=26633>>.

Acesso em: 19 fev. 2018.

PORTO, R. L. **Escoamento Superficial Direto**. In: Drenagem Urbana. Porto Alegre:UFRGS/ABRH, p. 127, 1995.

RADECKI-PAWLIK, A.; WALEGA, A.; WOJKOWSKI, J.; PIJANOWSKI, J. Runoff formation in terms of changes in land use - Msciwojow water reservoir area/ Odpływ powierzchniowy w rejonie zbiornika wodnego Msciwojow w swietle planowanych zmian urbanistycznych. **Journal of Water and Land Development**, Raszyn, v. 23, n. 1, p. 3-10, 2014. Disponível em: <https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/1697998572?accountid=26633> Acesso em: 28 fev. 2018

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; MARTINS, E. S. Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In SANO, S. M.; SEMÍRAMIS, P.; RIBEIRO, J. F. (Ed). **Cerrado ecologia e flora**. Brasília, Embrapa Cerrados. 2008. Cap. 5. p. 107-149.

RICHARDSON, C.P.; AMANKWATIA, K. GIS-Based Analytic Hierarchy Process Approach to Watershed Vulnerability in Bernalillo County, New Mexico. **Journal of Hydrologic Engineering**, New York, v. 23, n. 5 05 2018. Disponível em: < <https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/1697998572?accountid=26633>>.

proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/2002405334?accountid=26633>. Acesso em: 28 fev. 2018.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. 2004. 161f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Disponível em <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/257875/1/Sartori_Aderson_M.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2017.

SARTORI, A.; LOMBARDI-NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005. Disponível em: <<http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2005/vol10/no4/1.pdf>>. Acesso em 7 abr. 2017.

SILVEIRA, L.B.P. **Tempo de concentração em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia - MG**. 2016. 86f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia1, 2016.

SCHNEIDER, Marilena de Oliveira. Transformações na organização espacial da cobertura vegetal no município de Uberlândia, MG : 1964 a 1979. 1982. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 1982

SOEN, Z. Instantaneous Runoff Coefficient Variation and Peak Discharge Estimation Model. **Journal of Hydrologic Engineering**, n. 4, p. 270-277, 2008. Disponível em: < <https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/33068878?accountid=26633>>. Acesso em: 14 jan. 2018

SRIWONGSITANON, N.; TAESOMBAT, W. Effects of land cover on runoff coefficient. **Journal of Hydrology (Amsterdam)**, v. 410, n. 3-4, p. 226-238, 2011. Disponível em: < <https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/1671481373?accountid=26633>>. Acesso em: 1 jan. 2018.

STRAUB, T. D.; , MELCHING, C. S.; KOCHER, K. E. **Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois**. U.S. Geological Survey, 2000. 30p.

TEXAS DEPT. OF TRANSPORTATION -TxDOT. **Hydraulic design manual**. Bridge Division of TxDOT, Austin, TX. Disponível em <<http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/hyd.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2018.

TROMMER, J. T.; LOPER, J. E.; HAMMETT, K. M.; BOWMAN, G. Comparison of estimated and observed storm water runoff for fifteen watersheds in west-central Florida, using five common design techniques. **U.S.GEOL.SURVEY, EARTH SCIENCE INFORMATION CENTER, OPEN FILE REPORTS SECTION, BOX 25286, MS 517, DENVER, CO 80225 (USA).**[20--]. Disponível em: <<https://search->

proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/29616957?accountid=26633>. Acesso em 02 de jan. 2018.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1993. 952 p.

TUCCI, C. E. M.; Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, jan./mar., 2000. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=46&SUMARIO=661>>. Acesso em: 27 dez. 2017

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 2015. 943 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.2, n.1, p. 135-152, jan/jun, 1997.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington, D.C.:USDA,1986.

WANG, D. C.; WANG, L. C.; CHENG, K. Y.; LIN, J. D. Benefit Analysis of Permeable Pavement on Sidewalks. **International Journal of Pavement Research and Technology**, Jhongli City, v. 3, n. 4, p. 207-215, 07 2010. Disponível em: <<https://search-proquest.ez34.periodicos.capes.gov.br/docview/738864500?accountid=26633>>. Acesso em 28 fev. 2018.

WATTS, L. F.; HAWKE, R. M. The effects of urbanization on hydrologic response: a study of two coastal catchments. **Journal of Hydrology (NZ)**, New Zealand: Hydrological Society, v. 42, n. 2, p. 125 - 143, 2003. Disponível em <http://www.hydrologynz.co.nz/downloads/20080529-090055-JoHNZ_2003_v42_2_Watts.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2017.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1978.478 p.

YOUNG, C. B.; MCENROE, B. M.; ROME, A. C. Empirical determination of rational method runoff coefficients. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 12, p. 1283, 2009. Disponível em <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000114>>. Acesso em: 27 dez. 2017.