

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

VAZÃO MÁXIMA EM PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA PARCIALMENTE
URBANIZADA EM UBERLÂNDIA – MG

LORRAINE CAMPOS MARTINS

UBERLÂNDIA-MG

2017

LORRAINE CAMPOS MARTINS

VAZÃO MÁXIMA EM PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA PARCIALMENTE
URBANIZADA 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
MINAS GERAIS – BRASIL

2017

LORRAINE CAMPOS MARTINS

VAZÃO MÁXIMA EM PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA PARCIALMENTE
URBANIZADA 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”.

APROVADA em 27 de janeiro de 2017.

Prof. Dr. Reginaldo de Camargo

UFU

Prof. Dr. Júlio César Neves dos Santos

IFTM

Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho

(Orientador)

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

AGRADECIMENTOS

Ao Criador de todas as coisas, dono de todo o meu amor e confiança. Obrigada, Senhor, por ter guiado meus passos até aqui e por me mostrar que eu posso alcançar muito mais do que eu mesma sou capaz de imaginar.

Ao Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho pela orientação, por todos os conhecimentos que me transmitiu durante estes dois anos, e por sua disponibilidade e paciência.

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo diário, paciência, e por serem meu maior exemplo de honestidade, perseverança e amor.

Aos meus verdadeiros amigos, pela torcida sincera, por sua devota atenção e auxílio nos momentos difíceis e por se alegrarem comigo em todas as minhas conquistas, inclusive nesta.

Ao meu namorado e melhor amigo, pela compreensão em momentos de dúvida e insegurança, pelo apoio incondicional e companheirismo durante toda esta jornada.

Aos meus colegas de laboratório, especialmente à Márcia Batistela, pela parceria, pela descontração nos diários momentos de tensão e pelo amadurecimento pessoal e profissional que a sua companhia me proporcionou.

Ao ingressar no mestrado, eu desejei que fosse um bom caminho, e foi. Estou muito grata não só por ter concluído este trabalho, mas por todo o aprendizado que estes dois anos me trouxeram, pelo amadurecimento pessoal e profissional que eu levarei por toda minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Estudos Hidrológicos no Planejamento de Recursos Hídricos	3
2.2 Vazão Máxima	4
2.3 Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas	6
2.3.1 Modelos chuva-vazão	9
2.3.2 Método Racional.....	12
2.3.3 Método HUT-SCS	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Área de Estudo	21
3.1.1 Localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória	21
3.1.2 Relevo, geologia, geomorfologia e solos da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória	22
3.2 Material Cartográfico e Imagens de Satélite	22
3.3 Monitoramento hidrológico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória	23
3.3.1 Dados pluviométricos	23
3.3.2 Dados fluviométricos.....	23
3.4 Organização dos dados de vazão e precipitação observados na bacia do Córrego Glória	28
3.4.1 Estimativa do escoamento superficial.....	28

3.4.2	Determinação da precipitação efetiva.....	31
3.5	Vazão máxima a partir de métodos de estimativa.....	34
3.5.1	Método Racional.....	34
3.5.2	Método HUT-SCS	38
3.5.3	Equação para a estimativa da vazão máxima na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória	47
3.5.4	Análise estatística da equação para a estimativa da vazão máxima na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Valores observados de vazão e precipitação	50
4.2	Valores estimados de vazão máxima da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória	59
4.2.1	Resultados da vazão máxima pelo método Racional.....	59
4.2.2	Resultados da vazão máxima pelo método HUT-SCS	62
4.2.3	Modelo matemático para a estimativa da vazão máxima na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.....	72
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS.....	76

RESUMO

L.C., MARTINS. **Vazão Máxima em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia - MG.**81f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia¹, 2017.

A vazão máxima ou vazão de pico é definida como a maior vazão atingida em um evento no qual a precipitação gera de escoamento, que excede os valores habituais de vazão em determinado curso d'água. O conceito de vazão máxima é associado a algum risco a ser igualado ou superado. A vazão máxima é um parâmetro muito utilizado nos cálculos de obras hidráulicas. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo estimar a vazão máxima na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, localizada no município de Uberlândia – MG, através de métodos de estimativa citados na literatura, e gerar um modelo matemático capaz de estimar com relativa precisão a vazão máxima a partir de alguns parâmetros observados. Além disso, o trabalho objetivou a comparação dos resultados obtidos por meio destes métodos aos valores observados diretamente na bacia hidrográfica, a fim de verificar a efetividade de tais métodos. Todos os dados necessários à realização desta pesquisa, como as medidas de vazão, de chuva, de uso e tipo de solo foram monitorados na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, sub-bacia do Rio Araguari, em Uberlândia - Minas Gerais, Brasil. Para a estimativa da vazão máxima foram utilizados os métodos racional e da hidrógrafa unitária triangular. Neste trabalho, o cálculo do tempo de concentração foi feito a partir de três metodologias diferentes e consagradas na literatura técnica. Os resultados obtidos por meio destes métodos foram comparados com os valores de vazão máxima observados em 14 hidrogramas obtidos na seção de controle da bacia experimental. Os dados de precipitação foram igualmente obtidos diretamente na bacia, e basearam o cálculo de variáveis importantes nesta pesquisa, como a precipitação efetiva e o escoamento superficial direto. A partir dos dados de precipitação, foi gerada uma equação capaz de estimar a vazão máxima na bacia experimental. Os resultados obtidos indicam que os métodos citados na literatura tendem a superestimar a vazão máxima, principalmente o método Racional. Observou-se também, que os valores de vazão máxima obtidos pela aplicação do método da hidrógrafa unitária apresentaram-se mais coerentes com os valores observados. A equação obtida para estimar a vazão máxima na bacia experimental foi gerada a partir de escoamento superficial direto, obtido por meio da regra dos trapézios. Os valores de vazão máxima obtidos por esta equação aproximaram-se consideravelmente dos valores observados, obtendo 0,95 para o coeficiente de Nash-Sutcliffe, o que indica bom ajuste do modelo.

Palavras-chave: escoamento superficial, modelagem hidrológica, precipitação efetiva, hidrógrafa unitária, método Racional

¹Orientador: Hudson de Paula Carvalho – UFU

ABSTRACT

L.C., MARTINS. **Maximum flow in a partially urbanized watershed in Uberlândia - MG.**81f. Dissertation (Master in Environmental and Environmental Quality), Federal University of Uberlândia, Uberlândia¹, 2017.

The maximum flow is defined as the flow reached when the entire watershed contributes to the increase in flow, which exceeds the usual flow values in a certain watercourse. The concept of maximum flow is associated with some risk to be matched or exceeded. The maximum flow rate is a parameter widely used in hydraulic works calculations. Therefore, the objective of this work is to estimate the maximum flow rate in the Glória Stream Experimental Watershed located in the city of Uberlândia - MG, through estimation methods mentioned in the literature, and to generate a mathematical model capable of estimating with relative accuracy the flow Maximum from some observed parameters. In addition, the work aimed at comparing the results obtained through these methods to the values observed directly in the river watershed, in order to verify the effectiveness of such methods. All the data necessary to carry out this research, such as the flow, rainfall, use and soil type measurements were made in the Glória Stream Experimental Watershed, in the Araguari River sub-watershed, in Minas Gerais, Brazil. For the estimation of the maximum flow, the rational and triangular unit hydrograph were used. In this work, the calculation of the concentration time was made from three different methodology and consecrated in the technical literature. The results obtained by these methods were compared with the maximum flow values observed in 14 hydrograms obtained in the control section of the experimental watershed. Precipitation data were also obtained directly in the watershed, and based the calculation of important variables in this research, such as effective precipitation and direct surface runoff. From the precipitation data, an equation was generated able to estimate the maximum flow in the experimental watershed. The results obtained showed that the methods mentioned in the literature tend to overestimate the maximum flow, mainly the Rational method. It was also observed that the maximum flow values obtained by applying the unit hydrograph method were more consistent with the observed values. The equation obtained to estimate the maximum flow in the experimental basin was generated from direct surface flow, obtained by means of the trapezoid rule. The maximum flow values obtained by this equation approximated considerably the observed values, obtaining 0.95 for the Nash-Sutcliffe coefficient, which indicates a good fit of the model.

Keywords: surface runoff, hydrological modeling, effective precipitation, unit hydrograph, Rational method

¹Adviser: Hudson de Paula Carvalho – UFU

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Mapa ilustrando a localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, assim como das estações pluviométrica e fluviométrica.....	21
FIGURA 2: Estação meteorológica instalada dentro da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória	23
FIGURA 3: Calibração do sensor de nível de água no Laboratório de Hidrologia – HIDRO, da Universidade Federal de Uberlândia - UFU.....	24
FIGURA 4: Imagem da seção de controle do Córrego Glória, ilustrando o tubo de PVC onde o sensor de nível foi instalado (à direita) e a vigota de madeira onde a régua linimétrica será instalada futuramente (à esquerda)	25
FIGURA 5: Imagem da estação fluviométrica com a caixa metálica onde está localizado o dalogger	26
FIGURA 6: Detalhamento da divisão da calha do córrego adotada na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, para a obtenção da vazão	27
FIGURA 7: Curva chave do córrego Glória obtida na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória	27
FIGURA 8: Procedimento linear para separação do escoamento superficial direto (MELLO e SILVA, 2013)	29
FIGURA 9: Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, Uberlândia – MG	36
FIGURA 10: Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, Uberlândia – MG	42
FIGURA 11: Mapa de tipos de solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, Uberlândia – MG	43
FIGURA 12: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 31 de outubro de 2015	51
FIGURA 13: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 3 de novembro de 2015	52
FIGURA 14: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 7 de novembro de 2015	52
FIGURA 15: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 6 de dezembro de 2015	53

FIGURA 16: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 20 de dezembro de 2015	53
FIGURA 17: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 26 de dezembro de 2015	54
FIGURA 18: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 28 de dezembro de 2015	54
FIGURA 19: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 4 de janeiro de 2016.....	55
FIGURA 20: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 18 de janeiro de 2016.....	55
FIGURA 21: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 9 de fevereiro de 2016	56
FIGURA 22: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 16 de fevereiro de 2016	56
FIGURA 23: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 29 de fevereiro de 2016	57
FIGURA 24: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 10 de março de 2016.....	57
FIGURA 25: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 14 de março de 2016.....	58
FIGURA 26: Gráfico de vazão máxima observada e estimada pelo método SCS corrigida de acordo com a precipitação efetiva obtida pelo mesmo método.....	70
FIGURA 27: Equação para a estimativa da vazão máxima (Q_{max}) na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, a partir dos dados de escoamento superficial direto (ESD)	73
FIGURA 28: Gráfico de vazão observada e vazão estimada pela regressão linear.....	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Coeficiente de escoamento para diferentes tempos de retorno (GENOVEZ, 2001)	34
TABELA 2: Número CN para áreas urbanas (USDA, 1986).....	39
TABELA 3: Número CN áreas agrícolas (USDA, 1986).....	40
TABELA 4: Número CN para outras áreas em geral (USDA, 1986).....	41
TABELA 5: Dados de precipitação, escoamento superficial e vazão máxima obtidos na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em resposta às chuvas intensas, no período de 31/10/2015 a 14/03/2016	50
TABELA 6: Intensidade máxima média de precipitação (I) e vazão máxima (Qmax) calculados com tempos de concentração (Tc) de Kirpich e Giandotti, para um tempo de retorno de dois anos	59
TABELA 7: Erros absoluto e relativo da vazão máxima (Qmáx) estimada pelo método Racional, obtida a partir dos tempos de concentração (Tc) de Kirpich e Giandotti, em comparação com a vazão máxima observada	61
TABELA 8: Metodologia de obtenção do número CN para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.....	62
TABELA 9: Número CN corrigido de acordo com a condição hidrológica por evento	63
TABELA 10: Potencial de retenção de água no solo (S) e abstração inicial (Ia).....	64
TABELA 11: Tempos de pico (tp) obtidos diretamente por meio da equação proposta por HUT-SCS e por meio da relação ($tp = 0,6 \cdot Tc$), usando as equações de Kirpich e Giandotti para a estimativa do tempo de concentração (Tc)	65
TABELA 12: Tempos de ascensão (Tp) obtidos neste trabalho, a partir de diferentes metodologias para a estimativa do tempo de pico (tp)	65
TABELA 13: Vazões máximas obtidas a partir dos tempos de pico calculados neste trabalho	66
TABELA 14: Erros absoluto (EA) e relativo (ER) da vazão máxima estimada por diferentes metodologias preconizadas para a HUT-SCS para as diferentes formas de obtenção do tempo de pico considerados neste trabalho	67
TABELA 15: Precipitação efetiva calculada pela equação proposta pelo método SCS	68
TABELA 16: Vazão máxima calculada pelo método SCS corrigida de acordo com os valores de precipitação efetiva e vazão máxima observada.....	69

TABELA 17: Erros absoluto e relativo da vazão máxima estimada pelo método SCS corrigida de acordo com a precipitação efetiva de cada evento	71
TABELA 18: Parâmetros utilizados para produzir uma equação de estimativa de vazão máxima para a bacia do Córrego Glória	73

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda pelo uso da água, a necessidade de disponibilidade e de controle deste recurso, tanto em quantidade como em qualidade, e sua relevância econômica, ambiental e, sobretudo enquanto recurso vital aos seres humanos, alimenta uma grande demanda por conhecimentos capazes de aprimorar constantemente sua gestão.

Para tanto, tem sido cada vez mais necessário o esforço em realizar pesquisas nas bacias hidrográficas que considerem a pluralidade das questões que envolvem os recursos hídricos, bem como busquem produzir conhecimentos relevantes que procurem se aproximar ao máximo da realidade.

A bacia hidrográfica é consensualmente definida como principal área de estudos hidrológicos, além de ser considerada unidade principal para o planejamento dos recursos hídricos. Nela, ocorrem processos diversos como mudanças no uso e ocupação do solo, por exemplo, que influenciam a compreensão de parâmetros relacionados a este recurso, como a vazão, e afetam de maneira direta ou indireta sua disponibilidade quantitativa.

A estreita relação entre ações antrópicas e processos ambientais, sobretudo aqueles que ocorrem intrinsecamente nas bacias hidrográficas e nos recursos hídricos, reforçam a necessidade de aprofundar os conhecimentos relacionados aos processos que nela ocorrem, como as vazões máximas ou vazões de pico, por exemplo.

Desta forma, os estudos de vazão máxima são de fundamental importância para subsidiar o adequado planejamento das bacias hidrográficas, sobretudo no que se refere ao manejo do solo e de sua ocupação, evitando a geração excessiva de escoamento superficial e, conseqüentemente, a ocorrência de inundações em eventos hidrológicos extremos. Além disso, tais estudos subsidiam obras hidráulicas como obras de drenagem urbanas, barragens, entre outras.

Pesquisas ligadas às vazões máximas extremas, tendo como área de estudo a bacia hidrográfica, permeiam uma gama de questões relacionadas a esta temática, que devem ser consideradas, de acordo com o escopo da pesquisa a ser desenvolvida, a fim de que seja possível obter resultados que detalhem com maior precisão os processos hidrológicos envolvidos e que alcancem resultados mais precisos.

Para tanto, é de fundamental importância que as metodologias adotadas nesse tipo de pesquisa considerem as particularidades de cada bacia hidrográfica. Dessa

forma, possam ser capazes de oferecer um suporte adequado a órgãos responsáveis pelo planejamento e engenharia de recursos hídricos, minimizar conflitos em torno destes recursos e atentar-se aos pontos principais que geram potenciais impactos que interfiram de maneira negativa em sua disponibilidade e em seus processos.

A maior parte das pesquisas realizadas abordando esta temática é desenvolvida em grandes bacias hidrográficas. Estas, geralmente são bacias que apresentam uma base consistente de dados hidrológicos e um banco de dados relativamente extenso no que se refere a informações importantes nesta abordagem, como vazão, chuva, solo, geomorfologia, entre outros. Desta forma, grande quantidade de bacias de pequeno porte não dispõe destas informações ou de um sistema de monitoramento capaz de fornecer uma base de dados minimamente necessária, o que inibe ou dificulta o desenvolvimento de pesquisas relacionadas às vazões máximas nestas bacias.

Além disso, as equações matemáticas utilizadas no Brasil para a estimativa da vazão máxima tiveram sua origem em outros países, com clima, tipo e uso do solo muito distintos das condições brasileiras. Diante disso, tais equações e modelos matemáticos podem não refletir completamente a realidade de nossas bacias hidrográficas e, conseqüentemente de nossos rios.

Estas questões atentam à necessidade de desenvolver pesquisas que considerem fatores relevantes aos processos hidrológicos que se deseja estudar, que aproximem sua metodologia da realidade de sua área de estudo, além de ressaltar a necessidade do monitoramento de pequenas bacias, sobretudo aquelas onde atualmente ocorrem processos que possivelmente afetarão de maneira significativa os recursos hídricos.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo principal modelar os rebatimentos provocados pela chuva na vazão máxima do Córrego Glória, pertencente à bacia hidrográfica do rio Araguari, localizado no Município de Uberlândia-MG. Além disso, pretende-se, verificar o desempenho das metodologias propostas pelo Soil Conservation Service - SCS e do método Racional na estimativa da vazão de pico na citada bacia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estudos Hidrológicos no Planejamento de Recursos Hídricos

O conhecimento pleno dos diversos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, bem como seu monitoramento, são de grande importância, tanto para um adequado planejamento dos usos de recursos hídricos da bacia, quanto para a conservação ambiental de maneira geral.

A Lei Nº 9.433 de 1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e a Lei Nº 12.608 de 2012 que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil reforçam a importância da utilização da bacia hidrográfica como unidade de planejamento a nível ambiental, urbano, econômico, entre outros.

O Cerrado, domínio morfoclimático onde se localiza a área estudada neste trabalho, possui uma demanda hídrica relativamente grande, e desempenha um papel importante na rede hidrográfica brasileira, sendo um local de intenso uso agrícola, e onde nasce boa parte dos grandes rios brasileiros (SANTOS, 2012).

Sabe-se que o Brasil é um dos maiores detentores de recursos hídricos em todo o mundo e que também apresenta uma grande demanda do mesmo, sobretudo para a agricultura. Diante disso, é de extrema importância a ampliação da rede hidrológica brasileira, bem como a melhoria na qualidade dos dados hidrológicos medidos.

A disponibilidade desses dados obtidos diretamente nos mananciais, administrada por órgãos como a ANA e a CEMIG, ainda é incipiente, e abrange na maior parte das vezes, apenas rios de grande porte com usos específicos, sobretudo para a geração de energia hidrelétrica e a captação de recursos hídricos, principalmente para agricultura.

As recentes intervenções e modificações realizadas nas bacias das regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba - como é o caso da bacia aqui estudada - são significativas nas estimativas de parâmetros hidrológicos importantes para o planejamento dos recursos hídricos. Estes parâmetros podem ser tanto obtidos diretamente nas bacias hidrográficas, quanto estimadas da maneira mais eficiente possível, possibilitando oferecer maior suporte a este planejamento (SILVA, 2014).

A gestão de recursos hídricos perpassa o conhecimento destes parâmetros hidrológicos, amplamente estudados em áreas como Engenharia, Geologia, Geografia, entre outras. (CARVALHO; MAGALHÃES Jr, 2010). Entre estes parâmetros, podemos

destacar o escoamento superficial, o tempo de concentração e as vazões média, mínima e máxima.

2.2 Vazão Máxima

Ao conceituar a vazão como volume de água escoado em uma bacia hidrográfica por intervalo de tempo, Pinto et al. (1976), diferencia as vazões normais das vazões de inundação ou de cheia, termos também utilizados para se referir à vazão máxima. Ainda segundo esses autores, o primeiro caso se refere a vazões que escoam ordinariamente no curso d'água, e o segundo, às vazões que excedem a capacidade normal das seções de escoamento nos cursos d'água, ou seja, vazões que ultrapassam os valores normais para determinada bacia.

É comum a utilização do termo vazão de pico para referir-se à vazão máxima. Este termo se relaciona à definição dada por Tucci (2014), na qual a vazão máxima de um rio consiste em um valor associado a um risco que pode ser igualado ou ultrapassado, por isso sua associação a diferentes tempos de retorno ou de recorrência.

A distribuição da vazão em determinado intervalo de tempo é o resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico, como infiltração e escoamento, entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica. (TUCCI, 2014)

Entre os parâmetros hidrológicos diretamente relacionados à vazão máxima, podemos destacar o tempo de concentração, definido por Silveira (2010) como o tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais remoto da bacia se desloque até a seção de saída, ou seja, o curso principal, e assim contribua para o incremento da vazão.

A vazão máxima também se relaciona diretamente ao escoamento superficial resultante da precipitação incidente sobre a bacia. Mello e Silva (2013) dividem o escoamento superficial em três componentes: escoamento superficial direto, escoamento subsuperficial e escoamento de base ou subterrâneo.

O primeiro deles é gerado pelo excesso da precipitação que escoar diretamente em função das condições de infiltração e armazenamento de água no solo. Sendo assim, esta parcela que escoar superficialmente, descontando-se a vazão ordinariamente gerada pelo escoamento de base, é responsável pelo incremento da vazão, contribuindo para a ocorrência da vazão máxima.

Pinto et al. (1976) destacam alguns fatores que influenciam o afluxo de água à foz ou seção de controle de um curso d'água, como: declividade, conformação topográfica da bacia, condições de cobertura do solo como vegetação natural, vegetação

cultivada, capacidade de infiltração no solo, tipos de rochas, condições de escoamento, entre outras.

Além disso, obras de controle e utilização de água à montante também influenciam o fluxo de água, como irrigação, drenagem, barragens etc. Estas características influenciam, em menor ou maior escala, processos de escoamento e infiltração, a partir dos quais é possível avaliar o comportamento da vazão.

Além desses fatores, no que se refere a áreas urbanas, Tucci (2007) destaca que a impermeabilização das superfícies provoca aumento no volume e na velocidade do escoamento superficial, o que torna mais recorrentes problemas como inundações em áreas urbanas.

Entre os objetivos mais comuns dos estudos de vazão máxima está o dimensionamento de obras hidráulicas, realizados principalmente em estudos de engenharia civil, como os de Santos (2010), Ilha et al. (2010), Teixeira et al. (2011) entre outros autores, e órgãos públicos responsáveis por setores como de drenagem urbana.

A temática também está presente em trabalhos de regionalização de vazões, como o de Peralta (2003) e estimativa de vazão máxima a partir de métodos conhecidos como Tucci (2000) e Hoepfner (2007). Outros trabalhos comparam os valores de vazão máxima medidos diretamente, presentes na maioria das vezes em grandes séries temporais de vazão, com aqueles obtidos por meio de métodos conhecidos, como Cavalcanti (2014), ou ainda com valores obtidos em métodos desenvolvidos mais recentemente, como Silva (2014).

Medições diretas de vazão máxima são mais comuns em grandes bacias, influenciadas principalmente pela presença de usinas hidrelétricas e obras de grande porte. Por isso, os modelos hidrológicos são bastante utilizados para estimar a vazão máxima, principalmente em pequenas bacias, onde o monitoramento hidrológico ainda é incipiente. (MELLO; SILVA, 2013)

Os fatores que influenciam de maneira direta o comportamento hidrológico e consequentemente a vazão máxima, devem ser considerados nos modelos utilizados na sua estimativa, a fim de aproximar seus resultados daqueles encontrados na realidade. Esta aproximação é um dos objetivos da modelagem hidrológica.

2.3 Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas

Modelos matemáticos são representações ou abstrações da realidade. Tais representações tendem a ser mais simples do que a realidade. Neste processo, algumas características podem ser ignoradas ou simplificadas. (MENDES; CIRILO, 2001).

A modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita o melhor entendimento do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Modelos hidrológicos possuem grande potencial para caracterizar a disponibilidade hídrica em condições de mudanças no clima ou no uso do solo.

Os primeiros estudos hidrológicos, até o início do século XX, tinham um caráter mais descritivo. A partir da segunda guerra mundial e a construção de obras de aproveitamento dos recursos hídricos, drenagem de cidades e rodovias e controle de enchentes, aumentou a demanda por projetos que exigiam uma melhor quantificação de processos hidrológicos (ZANETTI, 2007).

A partir do final da década de 1950, com o aumento da disponibilidade de computadores e o desenvolvimento da informática, criaram-se condições que ajudaram a acelerar o desenvolvimento de modelos hidrológicos baseados em conceitos físicos (TUCCI, 1998).

Entre suas diversas aplicações, os modelos hidrológicos servem para estimar vazões máximas e hidrogramas de projeto em locais com limitações de disponibilidade de dados, ou seja, poucos dados ou inexistentes (GERMANO et al., 1998).

Para Moreira (2005), a importância dos modelos está ligada à possibilidade de obter relações de causa e efeito, sem que isso tenha necessariamente realizado alguma ação sobre o modelo real. No caso dos modelos hidrológicos, o objetivo principal deve ser a representação, no todo ou em partes, do comportamento de um processo hidrológico, em um dado instante ou intervalo de tempo.

Ainda segundo esse autor, os modelos são classificados, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas para modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre as variáveis utilizadas (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Modelos matemáticos de simulação, por exemplo, podem ser definidos como a representação de um sistema por meio de equações matemáticas, ou seja, a

representação do comportamento de uma estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado intervalo de tempo se relaciona com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação. (TUCCI, 1998)

Alguns modelos são gerados a partir de um conjunto de dados disponíveis, neste caso, seja de vazão ou de variáveis relacionadas a ela, para estimar ou prever a ocorrência de vazão máxima em eventos futuros.

Estes modelos propõem a geração de uma equação a partir da qual seja possível estimar os dados de vazão, geralmente utilizando os dados de precipitação disponíveis, utilizando métodos estatísticos como correlação e regressão ou geração de outros tipos de equação.

Este tipo de método é utilizado tanto no preenchimento de falhas em séries históricas, como proposto por Moraes (2016), como na avaliação do comportamento das vazões ao longo do tempo, sejam máximas ou médias, como Fragoso JR e Tucci (2005), ou na avaliação da sensibilidade de vazão às variáveis consideradas pelo modelo.

Entre as análises que permitem avaliar matematicamente o comportamento de uma variável em função de outra ou outras, estão a correlação e a regressão. Para Nighetinni e Pinto (2007) a correlação representa o comportamento de uma variável em relação à outra, isto é, de que maneira uma se comporta em relação às variações da outra. O comportamento das variáveis pode ser diverso, dependendo das variáveis e da relação existente entre elas. O nível de correlação entre as variáveis estudadas, na maior parte das vezes, é determinada pelo coeficiente de correlação, também simbolizado pela letra “r”.

Nos estudos hidrológicos, é comum a análise de determinadas variáveis como intensidade, duração e frequência de precipitações e as vazões médias ou máximas. A análise de regressão é uma técnica estatística cujo objetivo é obter e modelar a relação entre duas ou mais variáveis.

De acordo com Nighetinni e Pinto (2007), no caso de duas variáveis, por exemplo, admite-se a existência de uma função que explica, em termos médios, a variação de uma delas com a variação da outra. Nos estudos hidrológicos, é comum a análise de determinadas variáveis como intensidade, duração e frequência de chuvas com as vazões máximas. Diversas questões devem ser observadas na aplicação ou na criação de modelos de regressão, como a linearidade ou comportamento linear dos

dados, geralmente avaliado pelo teste t de Student, o erro padrão da estimativa, e o coeficiente de determinação.

O erro padrão da estimativa consiste na variabilidade ou a dispersão dos pontos acima e abaixo da reta de regressão, considerando o fato de que a regressão apresenta um modelo aproximado entre variáveis x e y. Caso a equação de regressão se ajuste bem aos dados amostrais, o erro padrão da estimativa se aproxima de zero. O erro padrão da estimativa deve ser inferior ao desvio padrão da variável independente (NIGHETTINI; PINTO, 2007).

Segundo os autores, o coeficiente de determinação varia entre 0 e 1, e serve para determinar a parcela da variabilidade amostral que foi, de fato, explicada pela reta de regressão. O coeficiente de determinação deve se aproximar de 1, pois quanto maior o valor desse coeficiente, maior será a proporção da variância explicada pelo modelo.

Estes parâmetros são avaliados quando se pretende criar um método de estimativa de vazão a partir de modelos de regressão, utilizando variáveis conhecidas, e quando se pretende avaliar a relação entre variáveis estudadas em um determinado modelo.

Quanto à representação da variabilidade espacial, os modelos podem ser classificados como concentrados e distribuídos. Os modelos concentrados representam a bacia de forma homogênea, como um único elemento, enquanto que os modelos distribuídos procuram representar a variabilidade espacial das características hidrológicas a partir da subdivisão da bacia hidrográfica em diversas unidades menores, o que também é chamado de discretização (PAZ et al., 2011).

De acordo com Tucci (1998), a estrutura dos modelos hidrológicos é baseada em: discretização da bacia hidrográfica (no caso dos modelos distribuídos), variáveis de entrada (chuva, evapotranspiração), estrutura básica da integração dos processos (bacia, canal, encosta), aquisição de dados físicos das bacias e determinação dos parâmetros.

Segundo Marinho Filho et al. (2012), os modelos podem ser usados para prever condições futuras por meio de simulação - seja a partir da criação de cenários, ou do acompanhamento de mudanças de fatores considerados de grande influência - eles são ferramentas bastante úteis para lidar com problemas ambientais e possíveis alternativas para atenuar impactos negativos.

Ao tratar dos aspectos práticos da aplicação de modelos hidrológicos, Tucci (2005) destaca alguns critérios a serem considerados na escolha do modelo hidrológico

a ser utilizado em determinado estudo. Entre estes fatores, estão o objetivo do estudo ou o nível de detalhamento que este objetivo demanda, as características físicas da bacia, bem como sua variabilidade e a importância de algumas características em particular, a disponibilidade de dados, uma vez que os modelos variam também de acordo com as variáveis de entrada necessárias e a familiaridade do pesquisador com o modelo.

De acordo com o referido autor, é importante destacar a variabilidade das características físicas da bacia, por um motivo específico. Grande parte de equações utilizadas na determinação de parâmetros hidrológicos e dos modelos hidrológicos utilizados hoje foram desenvolvidos para bacias de condições específicas e particulares. Neste caso, para o autor, é importante observar estas especificidades do modelo a fim de escolher modelos que tenham sido desenvolvidos para bacias hidrográficas com características mais próximas àquela que será estudada.

As variáveis consideradas em cada modelo também devem ser observadas, pois dependendo das características da bacia estudada, algumas variáveis podem ser bastante relevantes ou irrelevantes. É importante, portanto, verificar o detalhamento do modelo na representação dos processos mais relevantes. Além disso, é recomendado utilizar modelos cujas variáveis possam ser obtidas com base em dados disponíveis ou possíveis de se obter em campo, por exemplo.

É importante verificar a eficiência dos modelos hidrológicos a partir da comparação dos valores obtidos com o auxílio dos mesmos aos dados observados diretamente na bacia hidrográfica experimental, conceituada por Hewlett et al. (1969) como a parte da bacia hidrográfica onde são realizados experimentos planejados e onde os dados de vazão, precipitação e outras variáveis hidrológicas são constantemente medidos e analisados.

Algumas características podem apresentar maior variabilidade em bacias maiores, como a chuva (sobretudo sua distribuição) e a ocupação do solo, o que deve ser considerado nestes casos.

2.3.1 Modelos chuva-vazão

A vazão máxima de uma bacia hidrográfica pode ser estimada de três diferentes maneiras: pelo ajuste de uma distribuição estatística de dados de vazões existentes, pela regionalização de dados de vazões de bacias vizinhas e pela transformação de chuvas em vazões. Os modelos hidrológicos chuva-vazão representam a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, descrevendo a distribuição da precipitação,

as perdas por interceptação, infiltração, percolação subterrânea, escoamento superficial e subsuperficial (TUCCI 2014).

Segundo Tucci (2014), estes modelos se desenvolveram a partir do início do século XX. Inicialmente, seu caráter era mais descritivo e tinham como objetivo estimar parâmetros específicos. Além do desenvolvimento da informática e a disponibilidade de computadores, já citados, a evolução do controle de novos impactos ambientais que surgiram com as diversas formas de ocupação do espaço e uso dos recursos naturais trouxeram à tona a necessidade de modelos capazes de representar diversos processos que influenciam parâmetros específicos.

O referido autor destaca ainda que a estrutura desses modelos é baseada em elementos como a discretização de bacias hidrográficas, as variáveis temporais de entrada, a estrutura de integração de processos e a aquisição de dados físicos das bacias. Entre as variáveis de entrada, a precipitação é a principal, dada a disponibilidade maior destes dados vista a quantidade de estações existentes. A vazão é geralmente utilizada como dado de entrada para o ajuste de parâmetros do modelo.

No que se refere à aquisição de dados físicos da bacia, mais precisamente atributos que influenciam as variáveis estudadas, vale destacar a importância dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto. Estes sistemas permitem estimar características físicas da bacia, bem como parâmetros morfométricos como área, comprimento do rio, declividade, entre outros, por meio da utilização de modelos digitais de elevação que ajustam pontos altimétricos do terreno (TUCCI, 2005).

Como destaca Moreira (2005), a nova base de dados possível de ser adquirida e trabalhada em SIG é essencial no desenvolvimento de novos modelos hidrológicos, sobretudo os distribuídos.

A evolução dos modelos hidrológicos tende a acompanhar as necessidades de novos estudos para o aprimoramento do planejamento de recursos hídricos, cujos cenários se alteram constantemente. Isto é reforçado pelo desenvolvimento de novos modelos e pelos objetivos, conclusões e recomendações de trabalhos recentes realizados utilizando modelos de chuva-vazão.

Entre os modelos desenvolvidos recentemente, podemos destacar os modelos distribuídos, como o IPH (I, II, III e IV), o MGB-IPH, desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o SWAT (Soil

and Water Assentment Tool) desenvolvido pelo USDA-ARS no estado americano do Texas.

Novas propostas de metodologia estão sendo propostas por autores como Liu et al. (2014) que propuseram um modelo sócio-hidrológico conceitual da co-evolução dos seres humanos e água, reforçando a necessidade de considerar a influência de ações antrópicas e mudanças no uso da água nos últimos anos.

Krauskopf Neto (2005) utilizou estimadores de estado para verificar a efetividade do modelo precipitação-vazão-propagação 3R, desenvolvido com base no modelo Sacramento modificado, aplicando-o na bacia do Rio Ivaí, obtendo resultados satisfatórios e propondo algumas modificações necessárias.

Francisco (2013) comparou os resultados obtidos por métodos chuva-vazão e por modelos probabilísticos para verificar sua efetividade na estimativa da vazão máxima no Rio Benevente, no estado do Espírito Santo. A autora obteve resultados superestimados na aplicação de modelos chuva-vazão em detrimento dos modelos probabilísticos, que estimam a vazão máxima a partir de séries históricas de dados.

Andreolli e Tucci (2004) aplicaram o modelo Soil Conservation Service - SCS distribuído por sub-bacia para a transformação de chuva-vazão, com propagação em canal pelo modelo Muskingum Cunge, na bacia do rio Uruguai. Os autores também compararam os resultados obtidos a outros métodos. Neste caso, também foram consideradas vazão calculada e observada.

Apesar dos pequenos erros encontrados pelos autores, os mesmos destacam a sensibilidade do modelo SCS ao parâmetro CN, sendo que dependendo da formulação utilizada para determinar o tempo de concentração, pode-se cometer grandes erros.

Apesar de muito utilizados no Brasil, deve-se observar que grande parte dos modelos precipitação-vazão foi desenvolvida com base em estudos de bacias de condições fisiográficas, hidrológicas e climáticas dos EUA. No entanto, a simplicidade e praticidade destes modelos faz com que sejam largamente utilizados nas estimativas de vazão máxima, principalmente para bacias pequenas (MELLO; SILVA, 2013).

Entre os modelos precipitação-vazão mais utilizados estão o método Racional e o método CN, ou método SCS, os quais serão detalhados a seguir.

2.3.2 Método Racional

A primeira apresentação da equação principal do método Racional é datada de 1851 e atribuída a Mulvaney, engenheiro irlandês, sendo mais amplamente utilizadas alguns anos depois, a partir da aplicação de Emil Kuichling. O método estabelece uma relação entre a chuva e o escoamento superficial e é utilizado para calcular a vazão de pico de determinada bacia, considerando uma seção de estudo (TOMAZ, 2002).

Para Mello e Silva (2013), o método é conhecido como “racional” pela coerência na análise dimensional de suas variáveis. Os autores consideram o método como o mais simples e usual, sobretudo para pequenas áreas de drenagem.

Segundo Tomaz (2002) não há um consenso quanto à área limite de bacias onde é possível aplicar o método Racional. Por isso, este método é comumente aplicado em bacias com áreas maiores do que o normalmente recomendado. Akan (1993), por exemplo, recomenda a aplicação do método em bacias de até 13 km².

Tomaz (2002) destaca algumas hipóteses consideradas pelo método Racional:

- a) toda a bacia contribui com o escoamento superficial e é por isso que o tempo de duração da tormenta deve ser igual ou exceder ao tempo de concentração da bacia;
- b) a chuva é distribuída uniformemente sobre toda a área da bacia;
- c) todas as perdas estão incorporadas ao coeficiente de escoamento superficial.

Para Franco (2004), a grande aceitação do método deve-se à sua simplicidade e aos seus resultados, que costumam ser satisfatórios, desde que respeitadas as condições de validade.

Sua equação de estimativa de vazão considera três variáveis: a intensidade máxima média da precipitação, o coeficiente de escoamento e a área de drenagem da bacia. O coeficiente de escoamento ou coeficiente C é o fator responsável por transformar a precipitação total em precipitação efetiva, descontando possíveis perdas. Essas perdas são influenciadas pela cobertura vegetal ou ocupação do solo na bacia, declividade e tempo de retorno da precipitação (tratando-se de vazão máxima). Os valores obtidos neste coeficiente variam entre 0 e 1, onde valores próximos de 1 representam maior escoamento e valores mais próximos de 0, menor escoamento (MELLO; SILVA, 2013).

O coeficiente de escoamento de uma bacia representa a quantidade de água de escoamento gerada pela bacia em eventos chuvosos. Geralmente, este coeficiente é estimado com base em tabelas de manuais (TUCCI, 2000).

Pinto et al (1976) afirmam que coeficiente de escoamento superficial proposto pelo método Racional deve ser entendido como coeficiente de deflúvio, cuja função é tornar proporcionais os parâmetros de entrada (área e intensidade de precipitação) com a vazão da bacia.

Desta forma, como reforçam Mello e Silva (2013), o método Racional considera que todo o deflúvio gerado é convertido em vazão de pico, desconsiderando a distribuição das vazões ao longo do tempo, promovendo uma superestimativa da vazão de pico.

Outro fator considerado no método Racional é a intensidade de precipitação. Esta intensidade é estimada pelas chamadas equações de chuvas intensas, definidas por Pruski et al. (2006) como o conjunto de chuvas originadas de uma mesma perturbação meteorológica, cuja intensidade ultrapassa certo valor (chuva mínima).

As chuvas intensas são fundamentais para estimar o escoamento superficial, em bacias onde não há dados medidos de vazão, ou quando a bacia hidrográfica está sofrendo processos de mudanças (OLIVEIRA et al., 2008).

É importante lembrar que o tipo de chuva, a área da bacia hidrográfica em questão e os impactos gerados podem variar em cada caso. De acordo com Barbosa Jr (2007), em bacias hidrográficas pequenas, precipitações convectivas (concentradas, de alta intensidade e de curta duração) são capazes de provocar grandes enchentes. Por outro lado, em bacias hidrográficas maiores, as precipitações frontais são mais relevantes, pois atingem grandes áreas com intensidade moderada.

Os valores de intensidade de chuva estão diretamente ligados às características climáticas de cada região, que devem ser consideradas em sua estimativa. Uma das formas de estimar esta intensidade é a partir do uso de fatores climáticos, disponíveis em diversas estações meteorológicas.

Uma alternativa que vem facilitando bastante os dimensionamentos, é o Software PLUVIO 2.1, elaborado pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Os valores determinados para os parâmetros de todas estas equações estão disponíveis no banco de dados do PLÚVIO 2.1 (FIORIO et al., 2012).

Esse software também permite a interpolação de dados para a geração de equação de chuvas intensas para os estados do Espírito Santo, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo (CECILIO; PRUSKI, 2003). No Pluvio 2.1 são disponibilizados os parâmetros K, a, b e c, utilizados para estimar a intensidade de precipitação. O software

foi desenvolvido com base no trabalho de Freitas et al. (2001), onde os parâmetros foram regionalizados para as estações pluviométricas de Minas Gerais.

Segundo Pinto et al. (1976), além de considerar os parâmetros que representam as características climáticas próprias de cada localidade, a intensidade considerada na aplicação do método Racional é um valor médio no tempo e espaço. A intensidade instantânea de chuva consiste na relação entre o acréscimo de precipitação em um intervalo de tempo.

A intensidade utilizada para o cálculo da vazão por meio do método Racional é a chamada intensidade máxima média, observada em determinado intervalo de tempo, mais especificamente o tempo de concentração, num período de recorrência ou período de retorno (SHARIFI; HOSSEINI, 2011).

O tempo de concentração é definido como o tempo necessário para que o escoamento proveniente do ponto mais remoto de uma bacia hidrográfica atinja o exutório ou seção de controle (MCCUEN et al., 1984).

A relevância científica do tempo de concentração está ligada à representação da interação entre diversas características físicas da bacia hidrográfica, do evento de chuva em questão, das condições climáticas da região, dentre outros fatores que o influenciam (MOTA, 2012).

Para Silveira (2010) o tempo de concentração sugere que a bacia hidrográfica responda como sistema linear para o escoamento superficial direto, sendo então o tempo de equilíbrio quando se estabelece um regime permanente entre uma chuva efetiva de intensidade constante, isto é, a chuva que de fato contribui para o escoamento na bacia, e o escoamento superficial direto decorrente dela. Esse autor destaca ainda a existência de uma incerteza na definição do tempo de concentração, o que muitas vezes influencia os métodos de cálculo deste parâmetro e consequentemente os seus resultados.

A aplicabilidade de métodos comuns de estimativa do tempo de concentração está ligada à pouca diversidade dos dados utilizados para o seu desenvolvimento. Estes métodos são simples e extremamente populares por causa de seu número limitado de parâmetros de entrada. Boa parte destes são antigos e de simples aplicação, porém encontrados em muitos trabalhos também ligados a estimativa de vazão. Entre eles, podemos tomar como exemplo os métodos de Kirpich e Giandotti.

A equação de Kirpich foi desenvolvida com base nos estudos de Ramser (1927) e foi inicialmente publicada, mais precisamente em formato de gráficos e curvas de

regressão, em 1940. Este estudo foi realizado a partir do monitoramento de pequenas bacias agrícolas dos Estados Unidos. (MOTA; KOBİYAMA, 2015)

A interação entre os dados nos quais a fórmula foi baseada e dados de outros estudos fez com que a equação de Kirpich fosse modificada e adaptada para bacias de características diferentes daquelas para as quais foi desenvolvida, o que faz com que os resultados encontrados sejam diferentes (MOTA; KOBİYAMA, 2015).

Segundo Mello e Silva (2013), a equação de Kirpich é recomendada para bacias relativamente homogêneas de área inferior a 10 km². Para os autores, esta equação tende a subestimar o tempo de concentração, superestimando, portanto, as chuvas intensas. Esta subestimativa também foi notada em trabalhos onde a equação foi aplicada, como os trabalhos de Mota (2012), Silva et al. (2006) e Loukas e Quick (1996).

Em alguns trabalhos, como o de Loukas e Quick (1996) pode-se observar que a subestimativa resultante da aplicação da equação de Kirpich está ligada à diferença entre as bacias estudadas pelos autores e as bacias a partir das quais o método foi desenvolvido. Esta observação é importante, não só na aplicação de equações que estimam o tempo de concentração, como na aplicação de modelos hidrológicos de maneira geral.

Outra equação bastante utilizada para estimar este parâmetro é a equação de Giandotti. Esta equação foi desenvolvida com uma base de dados de bacias da região da Itália setentrional e central, com área entre 170 a 70.000 km² (GREPPI, 2005).

A equação de Giandotti é aplicada em bacias hidrográficas de diferentes áreas e características físicas. Porém, ela resulta em notáveis exageros em pequenas bacias com declive suave (MOPU, 1987).

Alguns trabalhos como o de Almeida et al. (2013), que compararam os valores de tempo de concentração obtidos em equações de estimativa aos obtidos diretamente na bacia do córrego Guariroba, em Campo Grande-MS, e o de Ferreira (2010) ao avaliar a precisão de equações de estimativa de tempo de concentração para análise de áreas inundáveis no município de Pombal, em Portugal, obtiveram resultados satisfatórios ao utilizar a equação de Giandotti.

Ferreira (2010) e o Motta (2012) encontraram grande variabilidade nos valores de tempo de concentração estimados diferentes equações. Portanto, é importante compreender que quando se atribui um único valor a este parâmetro em determinada bacia hidrográfica, está se considerando este como um valor médio.

Considerando a relação indireta entre o tempo de concentração e a intensidade máxima média da chuva, como citado anteriormente, diferentes valores de tempo de concentração resultam em diferentes valores de intensidade máxima média.

Por abstrair e simplificar alguns processos hidrológicos importantes, o método Racional tende a superestimar a vazão máxima ou de pico. Esta afirmação foi constatada em diversos trabalhos.

Zanetti (2007) comparou os resultados de vazão máxima obtidos em diversos métodos, inclusive o método Racional, ao modelo HidroBacia para uma microbacia experimental localizada na bacia do rio Paraíba do Sul, em Varre-Sai, RJ. O autor concluiu que os valores de vazão máxima obtidos pelo método Racional foram superiores àqueles estimados pelos demais métodos avaliados.

Hoepfner (2007) também obteve resultados superestimados ao comparar o método Racional e aquele desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS), para todos os tempos de retorno considerados.

Silva et al. (2006) compararam os resultados de vazão máxima obtidos por meio dos métodos Racional e Hidrógrafa Unitária Triangular (HUT-SCS) com aqueles verificados nos hidrogramas da bacia hidrográfica estudada. Eles concluíram que o método Racional superestimou em 13,5 vezes o valor da vazão máxima observada na bacia e 4,6 vezes o valor obtido na aplicação do método HUT-SCS.

Ainda com a superestimativa dos valores de vazão máxima, e por vezes, o resultante superdimensionamento de obras hidráulicas, o método Racional ainda é bastante utilizado, o que chama atenção para a necessidade de aperfeiçoamento contínuo desse método ressaltada por Pinto et al. (1976).

2.3.3 Método HUT-SCS

O método para a estimativa da vazão máxima desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS), denominado de Hidrógrafa Unitária Triangular (HUT) ou método da curva número (método CN), foi originalmente desenvolvido para uso interno daquele órgão e não teve, portanto, seus procedimentos de cálculo submetidos à revisão em periódicos científicos (Ponce e Hawkins, 1996). No dias atuais, a denominação e a sigla da agência SCS foi substituída por Natural Resources Conservation Service (NRCS).

Atualmente, a fonte de documentação oficial relacionado à hidrologia do NRCS é o National Engineering Handbook Hydrology (NEH, 2016). A fonte original passou por várias revisões desde a primeira publicação em 1954 (FENNESSEY; HAWKINS, 2001). Segundo Zanetti (2007), este método foi desenvolvido com base em estudos de bacias hidrográficas de uso predominantemente rural dos Estados Unidos.

Em junho de 1986 o Departamento da Agricultura dos Estados Unidos lançou o *Technical Release 55 (TR-55)* denominado “*Urban Hydrology for Small Watersheds*”. Este documento apresentou os procedimentos para estimativa do escoamento e da vazão de pico em pequenas bacias urbanas (até 250 km²) (TOMAZ, 2002).

Apesar de ter sido desenvolvido a partir de dados de bacias rurais, por conta da facilidade de uso, uma vez que não demanda grande quantidade de dados medidos diretamente na bacia, o método SCS-HUT ou CN também é usado para estimar a vazão máxima em bacias urbanas (NAKAYAMA et al., 2011).

No Brasil, o método HUT-SCS é indicado pelo Departamento de Água e Energia Elétrica de São Paulo para a geração de hidrogramas utilizados no dimensionamento de obras hidráulicas e para o cálculo de vazões máximas em bacias de contribuição com área superior a 2 km² (PAULINO, 2014).

O método HUT-SCS, considera uma gama maior de parâmetros em relação ao método Racional, como a abstração inicial do solo, a condição hidrológica do solo nos dias antecedentes ao evento em questão, a precipitação efetiva e o tipo de solo da bacia.

Andreolli e Tucci (2004) consideram que, ainda assim, a aplicação do modelo pode acarretar em diferenças significativas do real comportamento do sistema natural, mas que na necessidade de respostas mais rápidas ou ausência de dados, o modelo pode ser bastante útil.

O principal destaque do método é a estimativa do número CN ou número da curva. O número CN é o parâmetro do método que reflete as condições de ocupação e tipos de solo na bacia. Trata-se de um valor adimensional que varia de 0 a 100, sendo que quanto mais próximo de 100, maior o escoamento e quanto mais próximo de 0, maior a infiltração. A partir deste parâmetro, é possível estimar o potencial máximo de retenção ou armazenamento de água no solo da bacia (PAULINO, 2014).

Os principais fatores que determinam o valor do CN são o grupo hidrológico do solo, tipo de cobertura, o manejo do solo, a condição hidrológica e a condição de escoamento antecedente (United States Department of Agriculture – USDA, 1986).

Os valores de CN podem ser consultados pelas tabelas publicadas pelo United States Department of Agriculture (USDA), que apresentam três grupos principais de ocupação do solo: áreas urbanas, áreas agrícolas e outras áreas em geral, incluindo áreas com vegetação original de diferentes estratos. Para o reconhecimento das classes de uso do solo nas áreas a serem estudadas no método HUT-SCS, os métodos mais comuns são o reconhecimento de campo, fotografias aéreas e mapas de uso do solo (USDA, 1986).

É importante destacar a ausência de valores de CN definidos para condições brasileiras, uma vez que o valor é estimado com base em tabelas desenvolvidas com base em estudos de bacias americanas. Por isso, ao estimar o número CN para bacias brasileiras, nota-se uma necessidade de adaptações a fim de aproximar os resultados obtidos pelo método com os valores reais (NAKAYAMA et al., 2011).

Em alguns trabalhos, o número CN para a bacia pode ser obtido por meio de métodos de cálculo, na maior parte das vezes, quando já se tem as demais variáveis utilizadas no método, como no trabalho de Mello et al. (2007), em que a umidade do solo foi medida diretamente na área de estudo em diferentes cenários.

O número CN pode ainda ser obtido de forma concentrada, isto é, como um número médio para toda a bacia, ou de maneira distribuída, ou seja, quando as bacias são discretizadas e é obtido um número CN para cada sub-bacia, como fizeram Andreolli e Tucci (2004).

Os valores de vazão obtidos pelo método SCS são geralmente superestimados, mas que se aproximam mais dos valores reais em relação a outros métodos, como o método Racional. Nakayama et al. (2011) ao comparar os valores de CN obtidos pelas tabelas sugeridas pelo USDA e valores obtidos por meio da calibração do método, concluindo que o método SCS tende a apresentar resultados superestimados de vazão máxima. Este e outros estudos reforçam a necessidade da tentativa de aproximação destes métodos com a realidade encontrada nas bacias brasileiras.

O número CN é corrigido de acordo com a umidade antecedente do solo, que interfere diretamente na aptidão do solo à infiltração ou ao escoamento, interferindo em sua capacidade de armazenamento de água. As tabelas consultadas para obtenção do número CN, como a divulgada pelo USDA em 1986, consideram que estes valores estão associados a uma condição média, sendo necessária sua adaptação de acordo com cada caso.

Os tipos de solo encontrados na bacia também interferem no número CN. As taxas de infiltração de água nos solos variam muito e são afetados pela permeabilidade

do mesmo. No método CN os solos são classificados em quatro grupos hidrológicos (A, B, C, e D), de acordo com a sua taxa mínima de infiltração (USDA, 1986).

Algumas adaptações foram realizadas a fim de aproximar as classes definidas pelo SCS à realidade dos solos brasileiros. Ao rever a evolução destas pesquisas, Sartori (2005) cita alguns trabalhos com este objetivo, como o de Kutner et al. (2001). O trabalho de Sartori consiste na adaptação de algumas classes de solo encontradas no estado de São Paulo às classes ou grupos hidrológicos propostas pelo SCS. Em seu trabalho, o autor classificou os solos considerando características de textura, drenagem e profundidade. Pesquisas recentes de aplicação do método SCS utilizam estas adaptações para basear sua classificação hidrológica de solo, como Paulino (2014).

O potencial máximo de retenção de água no solo, também considerado pelo método HUT-SCS nas estimativas de vazão máxima, é obtido com base no número CN, uma vez que o número é determinado com base em características que o influenciam diretamente. Por isso, o potencial máximo de retenção é afetado pelas variações de CN, como mostrou o trabalho de Soares et al (2014).

O potencial máximo de retenção de água no solo determina a precipitação efetiva, isto é, a parcela da precipitação convertida em escoamento superficial direto. Em alguns trabalhos, o conceito aparece como precipitação efetiva, porém o USDA a considera o próprio escoamento superficial direto.

O escoamento superficial é obtido descontando-se da chuva as perdas iniciais no seu processo de formação, como a retenção pelas depressões do terreno e a própria cobertura vegetal. Essas perdas são denominadas abstrações iniciais (TUCCI, 2001).

Os estudos realizados em bacias americanas nos quais foi baseado o método HUT-SCS levaram a concluir que a abstração inicial pode ser considerada aproximadamente 20% do potencial máximo de retenção de água no solo. (USDA, 1986). Assim, como o tempo de concentração é considerado na estimativa da vazão máxima pelo método Racional, o Soil Conservation Service também incorpora a variável em suas estimativas. Porém, diferentemente do método Racional, o SCS não considera apenas o tempo de concentração, mas também os tempos de ascensão e de pico do hidrograma.

Estas variáveis, assim como a própria vazão de pico e a precipitação efetiva ou escoamento superficial direto, são melhor representadas pelo Hidrograma Unitário Triangular (HUT). A ideia do HUT consiste em considerar a hidrógrafa com formato

triangular, o que facilita o entendimento e o cálculo da vazão máxima. Ao calcular a área deste triângulo, obtém-se o deflúvio (MELLO; SILVA, 2013).

A vazão máxima é obtida por meio do método HUT-SCS com base nestes tempos, apresentados pelo hidrograma unitário, que por sua vez variam de acordo com os parâmetros considerados pelo modelo, como o número CN e o potencial de retenção de água no solo.

Assim como no método Racional, ainda que seja um método mais detalhado, a aplicação do HUT-SCS às bacias brasileiras apresenta resultados diversos, uma vez que trata-se de bacias com características diferentes daquelas com base nas quais o modelo foi desenvolvido.

Zanetti (2007) observou grandes discrepâncias entre os resultados encontrados na aplicação do método HUT-SCS à bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul com aqueles observados diretamente na bacia, relacionando esta diferença às condições para as quais o modelo HUT-SCS foi desenvolvido.

Santos (2010) concluiu que o método HUT-SCS apresentou resultados que subestimaram a vazão máxima quando comparada com modelos probabilísticos como Gumbell, Log Normal e Pearson II e III parâmetros, em seis bacias hidrográficas do estado do Espírito Santo.

Algumas suposições condicionais do método HUT-SCS devem ser observadas, como a abstração inicial do solo. Ling e Yusop (2014) observaram uma variabilidade nos valores de abstração, nem sempre correspondendo ao fixado pelo método (20%) – apesar da maior tendência a valores de abstração inferiores a 20% – superestimando a vazão máxima ou de pico.

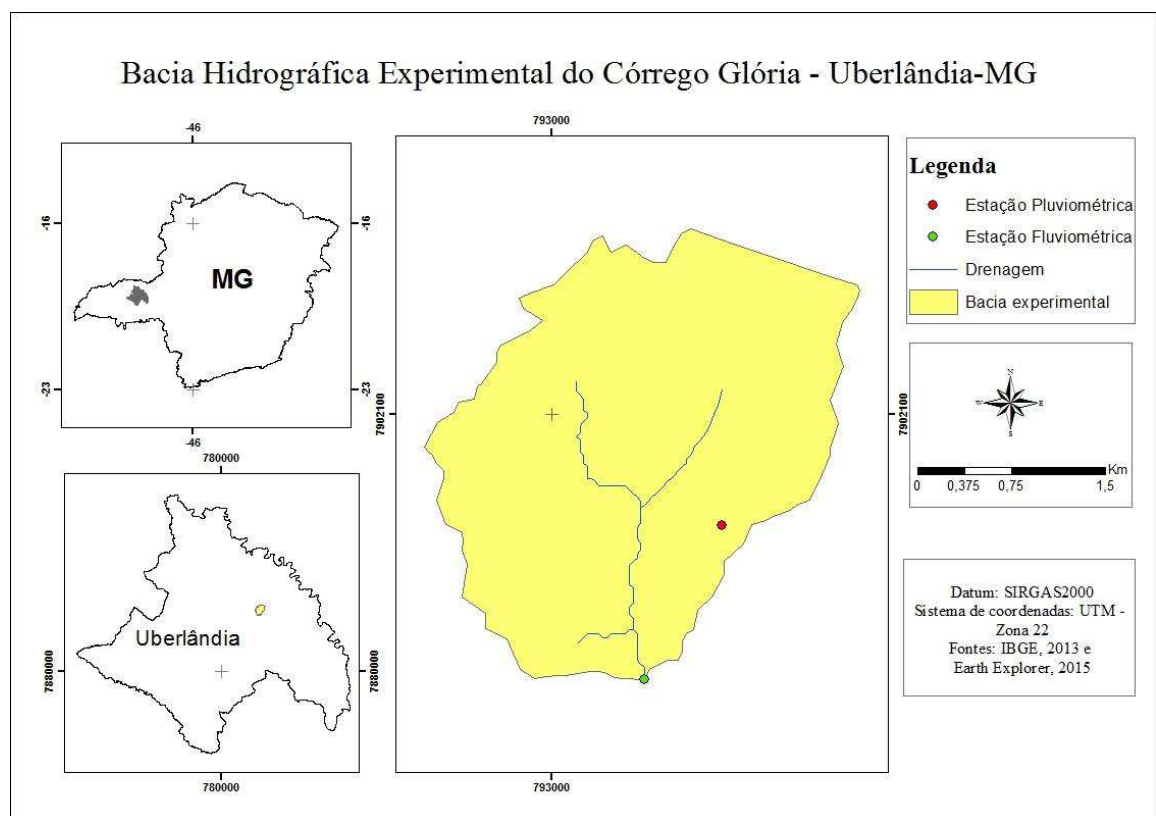
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

3.1.1 Localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEG) (Figura 1) é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari e se localiza na porção leste da cidade de Uberlândia – MG. O córrego Glória é afluente da margem direita do Rio Uberabinha, principal rio da cidade, que por sua vez é afluente do Rio Araguari (OLIVEIRA, 2006). Nela está localizado o Campus Glória da Universidade Federal de Uberlândia, que abrange além de área construída, áreas de cultura e pastagem com a finalidade de dar suporte a estudos realizados por alunos e pesquisadores da universidade.

FIGURA 1: Mapa ilustrando a localização da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, assim como das estações pluviométrica e fluviométrica



A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória possui área total de 8,27 km². A estação fluviométrica dessa bacia está localizada à latitude 18° 58' 18"S e longitude 48° 12' 36" W. A Figura 1 detalha a localização da bacia experimental, bem como das estações pluviométrica e fluviométrica.

3.1.2 Relevo, geologia, geomorfologia e solos da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

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

A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória situa-se no nível da cobertura detrítico-laterítica da Formação Marília, representada no município pelo membro Serra da Galga, caracterizada por camadas espessas de arenitos conglomeráticos de estratificação cruzada (MINEO, 2004).

Neste trabalho as classes de solo foram obtidas do trabalho de (SANTOS et al., 2011). Segundo esses autores, a nova classificação de solos da Embrapa indica que a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória possui somente duas classes de solo. São elas: LVd6 - Latossolos Vermelhos Distróficos + Nitossolos Háplicos Distróficos e; LVAd14 - Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos + Neossolos Litólicos Distróficos + Gleissolos Melânicos Tb Eutróficos. Os Gleissolos Melânicos estão presentes nas áreas marginais do córrego Glória, assim como de seus afluentes.

3.2 Material Cartográfico e Imagens de Satélite

A delimitação da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, a extração de sua rede de drenagem, bem como a obtenção de dados morfométricos utilizados em alguns cálculos de parâmetros avaliados neste trabalho foram obtidas a partir de modelos digitais de elevação em imagens Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução espacial de 30 metros, disponível na plataforma Earth Explorer. Além disso, por meio dessas imagens foram obtidas, também, outras informações relevantes para esta pesquisa, como declividade, hipsometria e curvas de nível.

O uso do solo foi obtido a partir de imagens do Google Satellite. Concomitantemente, foram obtidas verdades de campo por meio de dispositivos GPS do modelo eTrex Vista HCX, o que possibilitou reforçar e corrigir as informações obtidas com a classificação de uso do solo realizada em ambiente computacional. Todas estas informações foram obtidas por meio do processamento destes dados, realizado por meio do Sistema de Informação Geográfica Quantum GIS 2.8.

3.3 Monitoramento hidrológico da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

3.3.1 Dados pluviométricos

Os dados de chuva necessários à condução deste trabalho foram obtidos na estação meteorológica instalada dentro da bacia experimental (Figura 2). Os dados foram coletados entre outubro de 2015 e março de 2016.

FIGURA 2: Estação meteorológica instalada dentro da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória



3.3.2 Dados fluviométricos

Para a obtenção dos dados de vazão observados diretamente na bacia experimental do Córrego Glória, foi instalada uma estação fluviométrica, composta por sensor de nível de água e *datalogger*. O instrumento utilizado para o monitoramento automático do nível da água na seção de controle da bacia experimental foi um transdutor de pressão, marca Keller AG®, modelo DCX-22 AA, do tipo absoluto, com transdutor de pressão e coletor de dados (*datalogger*) integrados.

Antes da instalação do sensor no córrego Glória, os equipamentos foram calibrados no Laboratório de Hidrologia – HIDRO, da Universidade Federal de

Uberlândia - UFU. Neste processo, o sensor de nível foi colocado em um tubo PVC em posição vertical, ao qual estava acoplada uma mangueira plástica transparente graduada com fita métrica, que permitia acompanhar o nível de água dentro do tubo. Desta forma, foi possível comparar os valores registrados pelo sensor com aqueles observados na fita métrica, a fim de garantir a precisão das medidas do equipamento.

Este sensor faz leituras do nível de água a cada segundo. Nesta etapa, o *datalogger* foi programado para armazenar a média das leituras de nível de água no tubo em um intervalo de 5 em 5 minutos. Os níveis de água foram controlados com uma torneira, onde era regulada a entrada e saída de água.

FIGURA 3: Calibração do sensor de nível de água no Laboratório de Hidrologia – HIDRO, da Universidade Federal de Uberlândia - UFU



O procedimento de instalação do equipamento foi precedido por uma análise do curso d'água, no intuito de encontrar um local de margens estáveis que possibilitasse maior segurança para a instalação do equipamento.

Encontrado o local adequado (Figura 4), o sensor de nível foi colocado em um tubo PVC fixado em uma das margens, acoplado a outro tubo imerso no córrego, o que possibilitou que o nível de água no mesmo fosse equivalente ao nível medido pelo sensor no tubo fixado na margem do manancial. O tubo imerso no córrego foi perfurado, e nele foi inserida uma manta geotêxtil própria para drenagem, no intuito de dar maior proteção e evitar a entrada no tubo de sedimentos ou folhas.

O *datalogger*, instrumento onde são armazenados os dados medidos pelo sensor de nível, foi colocado em uma caixa metálica presa a um tubo de ferro, permanecendo protegido de intempéries (Figura 5). Neste trabalho, o intervalo de leitura do nível da água do córrego foi de um segundo, com gravação da média das leituras a cada cinco minutos. A instalação do sensor foi realizada no dia 22 de outubro de 2015, data a partir da qual a bacia hidrográfica passou a ser monitorada. Aos valores de altura de água medidos pelo sensor foram acrescidos 7,1 cm, os quais correspondem a altura do sensor em relação ao talvegue do córrego.

FIGURA 4: Imagem da seção de controle do Córrego Glória, ilustrando o tubo de PVC onde o sensor de nível foi instalado (à direita) e a vigota de madeira onde a régua linimétrica será instalada futuramente (à esquerda)



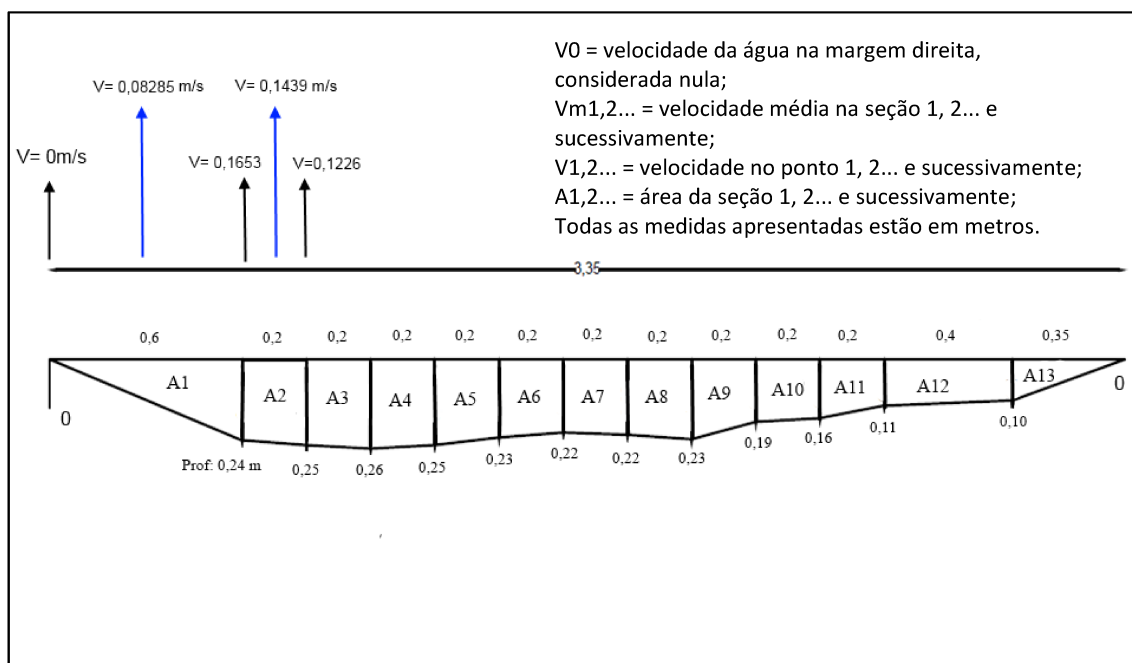
FIGURA 5: Imagem da estação fluviométrica com a caixa metálica onde está localizado o dalogger



Após a completa instalação do sensor foram feitas seis medições de velocidade da água com micromolinete fluviométrico MCN-1 da JCTM. As campanhas/mensurações foram feitas em datas distintas, para a determinação da vazão no córrego Glória. Para isso, foram obtidas as profundidades em intervalos de 0,2 metros a partir da margem direita do córrego (Figura 6).

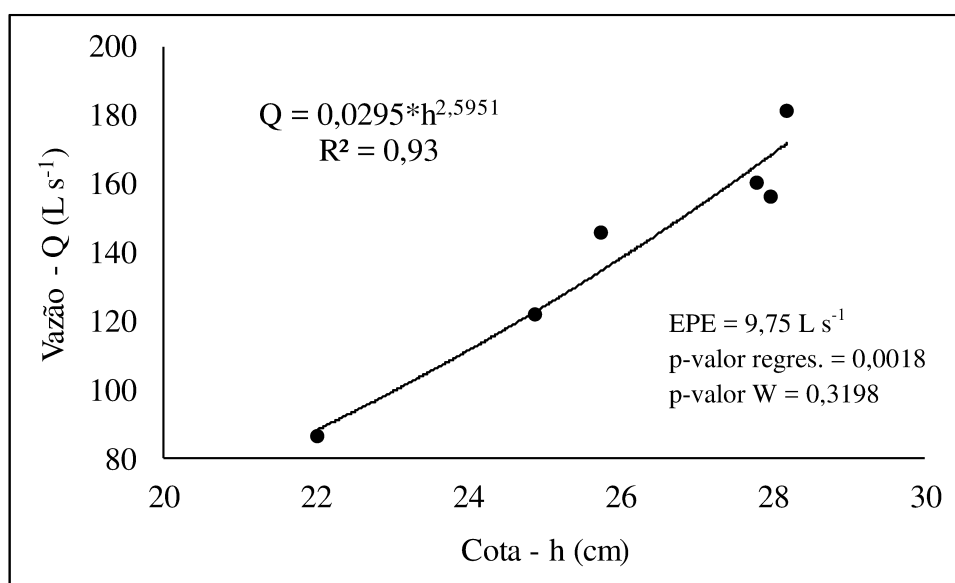
Nas extremidades da calha, devido à baixa velocidade da água, esta regra não pôde ser seguida, motivo pelo qual se observam na Figura 6 valores como 0,60 m (margem direita) e 0,35 m (margem esquerda). Para cada intervalo de 0,2 metros foram feitas duas medidas de velocidade, sendo uma a 80% e outra a 20% de profundidade, medida a partir da superfície da água. Após a obtenção dos valores de profundidade e velocidade da água em cada trecho do córrego, foi possível calcular a vazão conforme Tucci et al. (1993).

FIGURA 6: Detalhamento da divisão da calha do córrego adotada na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, para a obtenção da vazão



Os seis valores de vazão encontrados, um para cada campanha de medição, foram dispostos em um gráfico que correlaciona a vazão com a altura de água do córrego em cada medição. Esta correlação deu origem à curva chave, explicitada na Figura 7.

FIGURA 7: Curva chave do córrego Glória obtida na seção de controle da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória



A partir da gerada por meio da curva chave, os valores de altura de água captados pelo sensor de nível instalados na bacia foram convertidos em valores de vazão, em $L\ s^{-1}$, valores que junto aos dados de precipitação obtidos na estação pluviométrica, compuseram a matriz da base de dados utilizados nesta pesquisa.

3.4 Organização dos dados de vazão e precipitação observados na bacia do Córrego Glória

O hidrograma representa a distribuição temporal do comportamento da vazão no tempo. Por meio dele, é possível observar os momentos em que os valores de vazão passam a aumentar e voltam à estabilidade.

A partir de cada hidrograma, foram obtidas variáveis utilizadas nesta pesquisa, desde os pontos de ascensão e declínio, até o escoamento superficial direto, a precipitação efetiva e a vazão de pico, a ser comparada com os valores de vazão obtidos por meio dos métodos de estimativa considerados.

3.4.1 Estimativa do escoamento superficial

A separação do escoamento superficial do escoamento subterrâneo foi feita a partir da determinação dos pontos A, ou ponto de ascensão, e do ponto C, ou ponto de declínio em cada hidrograma selecionado. A determinação do ponto A é mais simples, por tratar-se de uma mudança brusca na inclinação da curva de escoamento, quando os valores de vazão começam a se elevar. Por outro lado, o ponto C é mais difícil de ser determinado, pois o retorno da vazão do rio à estabilidade não é um processo tão imediato quanto o verificado na ascensão.

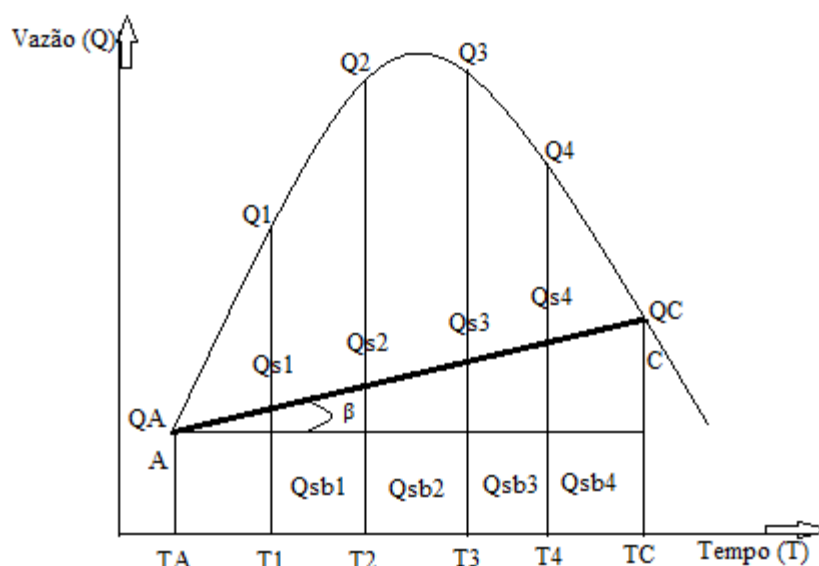
Neste trabalho, a obtenção do ponto C foi determinada na planilha de dados de vazão, por meio da divisão da vazão seguinte pela anterior, a fim de encontrar um valor fixo resultante dessa divisão. Quando esse valor era encontrado, adotava-se a vazão e o tempo imediatamente anterior como sendo o ponto C.

No que diz respeito ao escoamento superficial direto, o mesmo foi obtido por meio da regra dos trapézios. Esta metodologia consiste em multiplicar a vazão em cada instante pelo intervalo de tempo entre as medições (neste trabalho, o intervalo foi de 5 minutos).

A área do hidrograma foi dividida em retângulos, nesse caso específico, retângulos de altura igual à vazão e largura igual ao intervalo de tempo entre as

medições (Figura 8). Essa metodologia está descrita no trabalho de Mello e Silva (2013).

FIGURA 8: Procedimento linear para separação do escoamento superficial direto (MELLO e SILVA, 2013)



Para a separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo foi realizada uma aproximação linear entre os pontos A e C, dada pela reta AC, representada na Figura 8. Após isso, foi calculada a inclinação da reta AC por meio da Equação 1.

$$m = \text{tg}(\beta) = \frac{(Q_C - Q_A)}{(T_C - T_A)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

m = inclinação da reta AC, em $L s^{-2}$;

Q_C = vazão no ponto C, em $L s^{-1}$;

Q_A = vazão no ponto A, em $L s^{-1}$;

T_C = tempo no ponto C, em segundos;

T_A = tempo no ponto A, em segundos.

Após isso, foi calculado o valor a ser adicionado como incremento da vazão em cada intervalo de tempo das vazões (neste trabalho foi considerado 5 min. = 300 segundos), conforme explicitado na Equação 2.

$$J = m \cdot \Delta T \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

J = valor a ser adicionado às vazões do escoamento base a partir de Q_A , em $L\ s^{-1}$;

ΔT = intervalo de tempo entre as vazões coletadas, 300 segundos.

O valor de J foi acrescentado ao escoamento base a partir de Q_A . As vazões subterrâneas foram calculadas a partir de J conforme detalhado na Equação 3.

$$Q_{SB1} = Q_A + J; Q_{SB2} = Q_{SB1} + J; Q_{SB3} = Q_{SB2} + J \dots \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$Q_{SB1,2,\dots}$ = vazão subterrânea nos tempos 1, 2 e sucessivamente, $L\ s^{-1}$.

As vazões equivalentes ao escoamento superficial direto foram calculadas pela diferença entre a vazão total e a respectiva vazão subterrânea, restando, desta forma, apenas o escoamento superficial. Este processo é explicitado na Equação 4.

$$Q_{S1} = Q_1 - Q_{SB1}; Q_{S2} = Q_2 - Q_{SB2}; Q_{S3} = Q_3 - Q_{SB3} \dots \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$Q_{S1,2,\dots}$ = vazão superficial direta nos tempos 1, 2 e sucessivamente, em $L\ s^{-1}$;

$Q_{1,2,\dots}$ = vazão medida pelo linígrafo nos tempos 1, 2 e sucessivamente, em $L\ s^{-1}$.

Por fim, somando-se as vazões superficiais e multiplicando-se pelo intervalo de tempo, foi possível obter o volume de escoamento superficial direto, conforme explicitado na Equação 5.

$$ESD = \sum_{i=1}^N (Q_{Si} \cdot \Delta T) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

ESD = volume do escoamento superficial direto, em litros;

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, em segundos.

3.4.2 Determinação da precipitação efetiva

Neste trabalho, a precipitação efetiva foi estimada por meio do índice ϕ (TUCCI et al., 2014) e também, seguindo a metodologia proposta pelo Soil Conservation Service – SCS (NEH, 2016). Essas duas formas de obtenção podem afetar os valores da precipitação efetiva, a qual poderá influenciar no melhor ajuste do modelo de regressão que este trabalho objetiva obter.

3.4.2.1 Estimativa da precipitação efetiva pelo índice ϕ

A precipitação total representa toda a chuva que caiu na bacia em determinado evento. Porém, nem toda esta chuva contribui para a vazão do rio, uma parte dela é perdida por infiltração e depressões no solo, interceptação vegetal, evapotranspiração etc.

Já a precipitação efetiva é a fração da precipitação total que contribuiu para o aumento da vazão de um rio, isto é, descontando-se a parcela da precipitação que infiltrou no solo ou foi interceptada pela vegetação, a parcela desta precipitação que de fato chegou até a seção de controle. Assim, no cálculo da precipitação efetiva foi necessário subtrair a parcela que foi perdida, a qual não influenciou a vazão do rio.

Neste trabalho, não foram consideradas as parcelas da precipitação evapotranspirada e interceptada pela vegetação, durante e após a chuva. Portanto, foi considerado relevante somente a parcela da chuva que foi infiltrada ou retida nas depressões do solo. Sendo assim, esse volume de água foi estimado pelo método do índice ϕ (Equação 6), conforme detalhado por Tucci (2014).

$$\phi = \frac{Pt - ESD}{No} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

ϕ = taxa de retenção média no solo da bacia hidrográfica, em mm;

ESD = escoamento superficial direto na bacia hidrográfica, em mm;

Pt = precipitação total na bacia hidrográfica, em mm;

No = número de ocorrências.

Considerou-se neste caso, que a taxa de absorção máxima de água pelo solo como sendo igual ao valor de ϕ . Considerou-se que se em determinado intervalo de tempo a precipitação total fosse maior que o valor de ϕ , essa quantidade de água contribuiu para o escoamento superficial na bacia. Porém, se no intervalo de tempo subsequente a precipitação fosse menor que ϕ , essa quantidade de água não absorvida anteriormente, poderia ser absorvida nesse intervalo de tempo posterior.

Para determinar o tempo em que a precipitação efetiva ocorreu, foi desenvolvida a seguinte metodologia:

Etapa 1

Calcular a diferença entre a precipitação total e o índice ϕ , usando: $P_t - \phi$. Após isso, definiu-se que os tempos que possuem excessos, ocorrem onde $P_t - \phi > 0$, ou seja, neste intervalo de tempo ocorreu escoamento, pois a precipitação é maior que a capacidade de absorção de água do solo. Essa etapa está representada na Equação 7.

$$E_p = P_{t_i} - \phi \quad \text{se } P_{t_i} - \phi > 0 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

E_p = excesso da precipitação, em mm;

P_{t_i} = precipitação total no intervalo de tempo i , em mm.

Por outro lado, foram considerados como um bônus de absorção de água pelo solo, os intervalos de tempo onde não havia escoamento, pois, a precipitação naquele intervalo de tempo foi menor que a capacidade de infiltração. Considerou-se, nestes casos, que a água infiltraria no solo. A Equação 8 representa matematicamente este processo.

$$B_o = P_{t_i} - \phi \quad \text{se } P_{t_i} - \phi < 0 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

B_o = bônus de absorção de água pelo solo, em mm;

Etapa 2

Nesta etapa, calculou-se o bônus médio em relação ao número de excessos da precipitação, isto é, os intervalos onde houve infiltração e onde houve escoamento. Para tanto, os bônus foram somados e em seguida, divididos pelo número de eventos de

precipitação onde ocorreram excessos, ou seja, escoamento. A Equação 9 explica matematicamente esta etapa.

$$Bo_m = \frac{\sum Bo}{N_{Ep}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

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

N_{Ep} = número de excessos da precipitação.

Etapa 3

Nesta etapa, os bônus de absorção de água pelo solo médio foram distribuídos nos eventos que apresentaram excessos.

Etapa 4

Nesta última etapa, foram repetidas as etapas 2 e 3 sucessivamente, até acabarem os bônus, ou seja, até restar somente valores de escoamento. Ao final, a somatória dos excessos foi considerada como a precipitação efetiva.

3.4.2.2 Estimativa da precipitação efetiva pelo modelo do Soil Conservation Service

A precipitação efetiva também foi obtida de acordo com as recomendações do Soil Conservation Service. O cálculo foi realizado por meio da Equação 10.

$$P_{ef} = \frac{(P-0,2.S)^2}{(P+0,8.S)} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

P_{ef} = precipitação efetiva, em mm;

P = precipitação total do evento, em mm;

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

Como explicita a Equação 10, o SCS sugere que a precipitação efetiva seja obtida a partir da precipitação total do evento em questão e do potencial de armazenamento de água no solo. Esta última variável depende do número CN, que reflete as condições hidrológicas da bacia a partir das suas características de ocupação e tipos de solo.

Recomenda-se que esta equação seja utilizada quando a precipitação total for menor ou igual a 20% do potencial de armazenamento de água no solo, o que nem sempre acontece.

3.5 Vazão máxima a partir de métodos de estimativa

3.5.1 Método Racional

O método Racional é um dos métodos mais utilizados para estimar a vazão, por ser mais antigo e mais prático, pois demanda uma quantidade pequena de informações. Entre elas, estão a área da bacia, intensidade máxima média de chuva e o coeficiente de escoamento.

O coeficiente de escoamento da bacia foi determinado a partir da classificação da ocupação do solo na e por sua declividade. A classificação foi realizada de acordo a proposta de Genovez (2001) apud Mello e Silva (2013), detalhada na Tabela 1. O autor atribui um valor de C para cada tipo de ocupação e declividade da área em questão.

TABELA 1: Coeficiente de escoamento para diferentes tempos de retorno (GENOVEZ, 2001)

Superfície	Tempos de retorno						
	2	5	10	20	50	100	500
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
Gramados (cobrimento de 50%)							
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
Gramados (cobrimento de 50 a 70%)							
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

(continua)

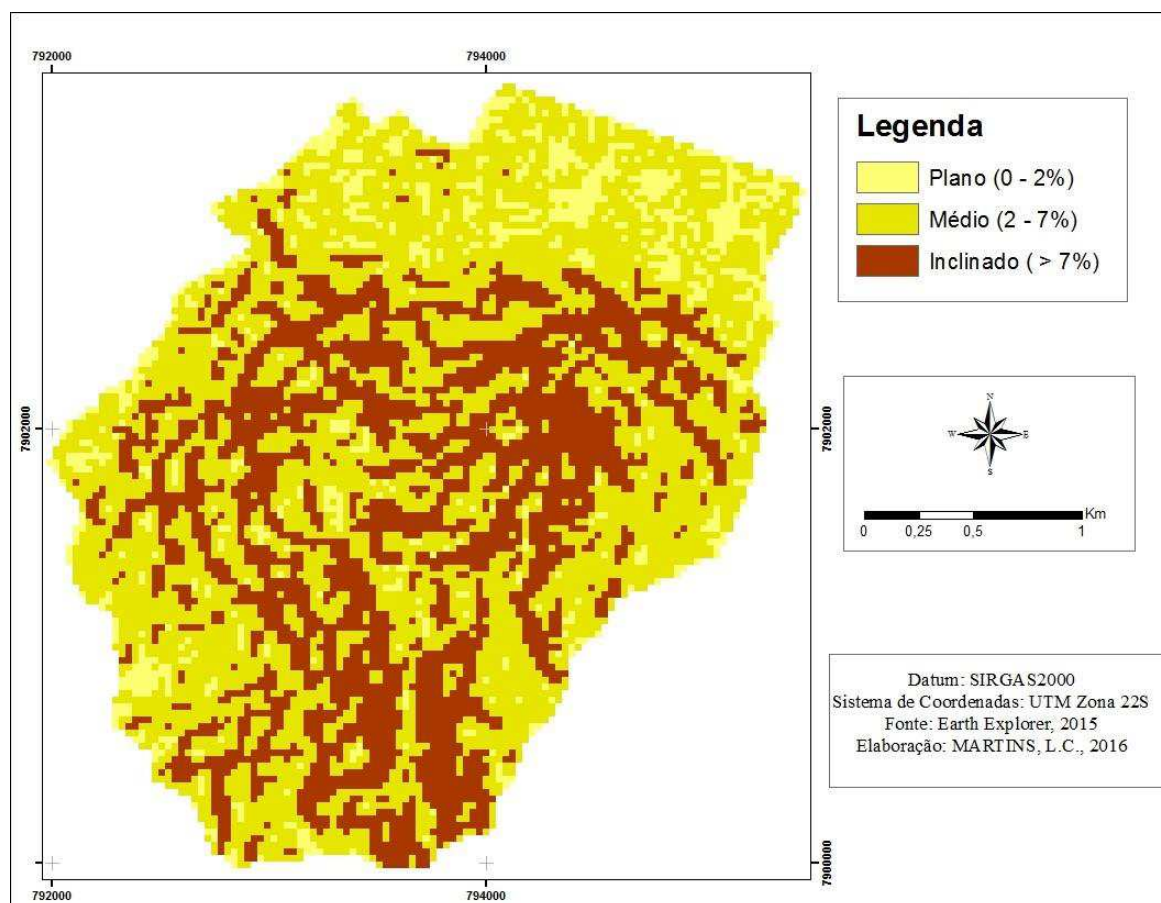
TABELA 1: CONT.

Gramados (cobrimento > 75%)							
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
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/Reflorestamentos							
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

As características fisiográficas da bacia, como área, comprimento de cursos d'água, entre outros, foram obtidas por meio do software Quantum GIS 2.8.3 a partir do processamento de modelo digital de elevação com resolução de 30m, obtido na plataforma digital Earth Explorer.

O uso do solo também foi obtido com auxílio do mesmo software, a partir da vetorização das áreas identificadas sobre imagem do Google Satellite. A declividade predominante em cada classe de uso foi obtida a partir de dados SRTM, classificada de acordo com a proposta do autor (Figura 9). Desta maneira, os valores de C para cada tipo de uso foram determinados e multiplicados pela porcentagem de área ocupada pelo uso em questão, e a soma dos resultados de cada área resultou no coeficiente C da bacia.

FIGURA 9: Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, Uberlândia – MG



A soma dos valores de C em cada classe de uso resultou em um coeficiente C para o tempo de retorno de 2 anos. A intensidade máxima média de chuva varia de acordo com a localidade, uma vez que o regime de chuvas é diferente de uma região para a outra. Seu cálculo depende dos tempos de concentração e retorno, e de variáveis climáticas, específicas para cada localidade onde os dados de chuva são monitorados. A intensidade máxima média de chuva foi obtida pela Equação 11.

$$I = \frac{K \cdot T^a}{(t+a)^b} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

I = intensidade da precipitação, em mm;

t = tempo de concentração, em min;

T = tempo de retorno, em anos;

K, a, b e c = parâmetros climáticos variáveis de acordo com cada região

Os parâmetros necessários para a intensidade máxima média de chuva na bacia do Córrego Glória foram obtidos com auxílio do software Pluvio 2.1, desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa a partir dos estudos de Freitas et al. (2001). Estes valores foram: $K = 6050$; $a = 0,19$; $b = 54,12$ e $c = 0,999$.

Como explicitado na Equação 11, o cálculo da intensidade máxima média também utiliza o tempo de concentração da bacia. Existem inúmeras equações que estimam o tempo de concentração em bacias onde este dado não é obtido diretamente.

Neste trabalho, optou-se por utilizar duas equações para estimar o tempo de concentração, a fim de ampliar a gama de resultados e comparar qual das duas equações foi capaz de aproximar os valores de vazão máxima calculada com os valores observados. Uma destas equações foi a de Kirpich, também utilizada por Silveira (2010) (Equação 12).

$$T_c = (0,0663 \cdot 2,69^{0,77}) \cdot (S^{-0,385}) \cdot 60 \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

T_c = tempo de concentração, em min;

S = declividade média do canal principal, em m/m.

Outra equação utilizada na estimativa do tempo de concentração na bacia é a equação de Giandotti (Equação 13).

$$T_c = 0,0559 \cdot (4 \cdot A^{0,5} + 1,5 \cdot L) L^{-0,5} \cdot S^{-0,5} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

T_c = tempo de concentração, em h;

A = área da bacia hidrográfica, em km^2 ;

L = comprimento do curso principal, em km;

S = declividade média da bacia, em m m^{-1} .

Com ambos os tempos de concentração, foram calculados valores de intensidade máxima média para os tempos de retorno propostos por Genovez (2001).

A partir dos valores de coeficiente de escoamento e intensidade máxima média obtidos conforme os procedimentos descritos acima, foi calculada a vazão máxima para um tempo de retorno de dois anos, por meio da Equação 14.

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{360}$$

Equação 14

Onde:

Q = vazão, em m³ s⁻¹;

C = coeficiente de escoamento, adimensional;

I = intensidade máxima média de precipitação, em mm h⁻¹;

A = área da bacia, em há;

Neste caso, utilizou-se 360 para fins de ajuste de unidades.

A vazão foi calculada a partir dos valores de intensidade máxima média calculados a utilizando os dois métodos de obtenção de tempo de concentração. Portanto, foram encontrados valores de vazão com base na intensidade máxima média calculada com o tempo de concentração obtido pela equação de Kirpich, e outros valores de vazão com base na intensidade máxima média calculada com o tempo de concentração obtido pela equação de Giandotti.

3.5.2 Método HUT-SCS

O método HUT-SCS ou CN ou Curva Número, desenvolvido pelo Soil Conservation Service, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (NEH, 2016), é, assim como o método Racional, um método de estimativa de vazão amplamente utilizado. Porém, este se diferencia por demandar uma gama mais detalhada de informações e considerar outros fatores, como a precipitação efetiva, a condição hidrológica do solo, entre outros.

Uma das principais características do método é o número CN, que reflete as condições de infiltração e escoamento da bacia trabalhada com base no tipo de solo, ocupação da área e condição hidrológica.

As Tabelas 2, 3 e 4 representam os valores de CN para cada tipo de ocupação e grupos de solo diferentes. Esta tabela foi utilizada na determinação das classes de uso do solo dos valores de CN para cada caso.

TABELA 2: Número CN para áreas urbanas (USDA, 1986)

Tipo de cobertura do solo e condição hidrológica	Número da curva por grupo hidrológico de solo			
	A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desenvolvidas (vegetação estabelecida)				
Espaço aberto (gramados , parques, campos de golfe , cemitérios, etc.)				
Más condições (cobertura de grama 50%)	68	79	86	89
Condições razoáveis (cobertura de grama entre 50 e 75%)	49	69	79	84
Boas condições (cobertura de grama superior a 75%)	39	61	74	80
Áreas Impermeáveis				
Lotes pavimentadas de estacionamento , telhados , calçadas , etc.	98	98	98	98
Ruas e estradas				
Pavimentadas; calçadas e galerias pluviais	98	98	98	98
Pavimentadas, com valas abertas	83	89	92	93
Cascalho	76	85	89	91
Barro	72	82	87	89
Áreas Urbanas				
Áreas paisagísticas naturais (permeáveis)	63	77	85	88
Áreas paisagísticas artificiais (Barreira de plantas daninhas impermeável, arbusto do deserto com areia de 1 a 2 polegadas ou cascalho e as fronteiras da bacia)	96	96	96	96
Distritos Urbanos				
Área comercial	89	92	94	95
Área Industrial	81	88	91	93
Área residencial por tamanho do lote				
1/8 acre	77	85	90	92
1/4 acre	61	75	83	87
1/3 acre	57	72	81	86
1/2 acre	54	70	80	85
1 acre	51	68	79	84
2 acre	46	65	77	82
Áreas urbanas em desenvolvimento				
Áreas recentemente gradeadas	77	86	91	94

TABELA 3: Número CN áreas agrícolas (USDA, 1986)

Descrição da cobertura			Número da curva por grupo hidrológico de solo			
Cobertura	Tratamento	Condição Hidrológica	A	B	C	D
Alqueive	Solo descoberto	-	77	86	91	94
	Cobertura Vegetal	Pobre	76	85	90	93
		Boa	74	83	88	90
Culturas em fileiras	Linha reta	Pobre	72	81	91	98
		Boa	67	78	85	89
	Linha reta e cobertura vegetal	Pobre	71	80	87	90
		Boa	64	75	82	85
	Com curvas de nível	Pobre	70	79	84	88
		Boa	65	75	82	86
	Curvas de nível e cobertura vegetal	Pobre	69	78	83	87
		Boa	64	74	81	85
	Curvas de nível e terraços	Pobre	66	74	80	82
		Boa	62	71	78	81
	Curvas de nível, terraço e cobertura vegetal	Pobre	65	73	79	81
		Boa	61	70	77	80
Pequenos grãos	Linha reta	Pobre	65	76	84	88
		Boa	63	75	83	87
	Linha reta e cobertura vegetal	Pobre	64	75	83	86
		Boa	60	72	80	84
	Com curvas de nível	Pobre	63	74	82	85
		Boa	61	73	81	84
	Curvas de nível e cobertura vegetal	Pobre	62	73	81	84
		Boa	60	72	80	83
	Curvas de nível e terraços	Pobre	61	72	79	82
		Boa	59	70	78	81
	Curvas de nível, terraço e cobertura vegetal	Pobre	60	71	78	81
		Boa	58	69	77	80

(continua)

TABELA 3: CONT.

Rotação, legumes ou recém-semeados	Linha reta	Pobr	6	7	8	8
		e	6	7	5	9
			5	7	8	8
	Curvas de nível	Boa	8	2	1	5
		Pobr	6	7	8	8
		e	4	5	3	5
	Curvas de nível e terraços		5	6	7	8
		Boa	5	9	8	3
		Pobr	6	7	8	8
		e	3	3	0	3
			5	6	7	8
		Boa	1	7	6	0

TABELA 4: Número CN para outras áreas em geral (USDA, 1986)

Descrição da cobertura		Número da curva por grupo hidrológico de solo			
Cobertura	Condição Hidrológica	A	B	C	D
Pasto, pastagem, ou gama - contínuo forragem para pastagem	Pobre	68	79	86	89
	Razoável	49	69	79	84
	Boa	39	61	74	80
Gramma de prado - contínua , protegido da pastagem e geralmente cortada para feno	-	30	58	71	78
Mistura de ervas daninhas, grama e vegetação rasteira	Pobre	48	67	77	83
	Razoável	35	56	70	77
	Boa	30	48	65	73
Matas com grama combinada (pomar ou fazenda com árvores)	Pobre	57	73	82	86
	Razoável	43	65	76	82
	Boa	32	58	72	79
Matas	Pobre	45	66	77	83
	Razoável	36	60	73	79

(continua)

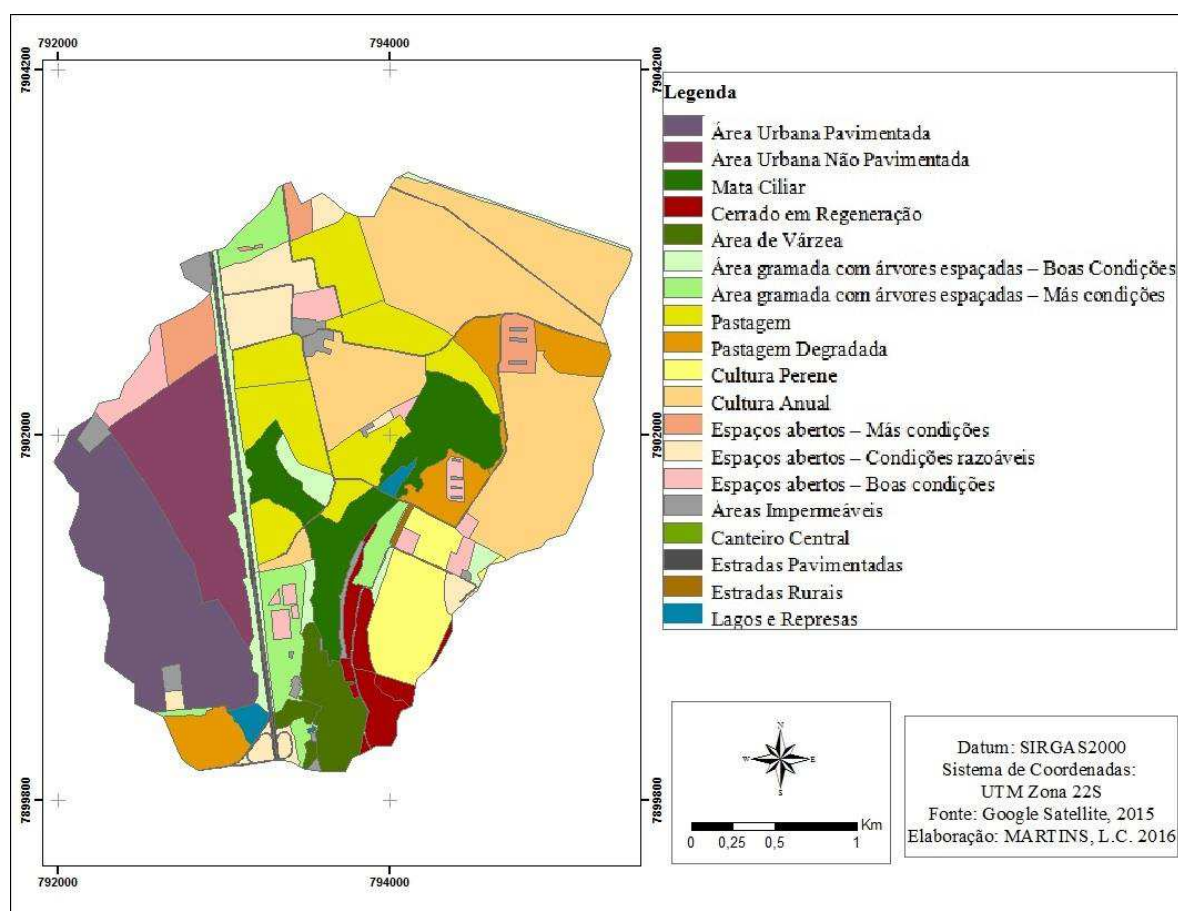
TABELA 4: CONT.

	Boa	30	55	70	77
Quintas, pistas, calçadas em torno de lotes	-	59	74	82	86

Considerando que se trata de um método desenvolvido com base em bacias de condições diferentes das que são encontradas em nossa região, foi necessário aproximar os fatores considerados pelo método à realidade da bacia estudada.

Primeiramente, as classes de uso do solo foram determinadas com base nos tipos de uso considerados pelo método, detalhadas nas Tabelas 2, 3 e 4. Assim como na determinação de classes de uso para o método Racional, foram coletadas verdades de campo que reforçassem o enquadramento de determinadas áreas nas classes a elas atribuídas. Foram elencadas, ao todo, 19 classes de uso do solo, vetorizadas sobre imagem de satélite, representadas no mapa da Figura 10.

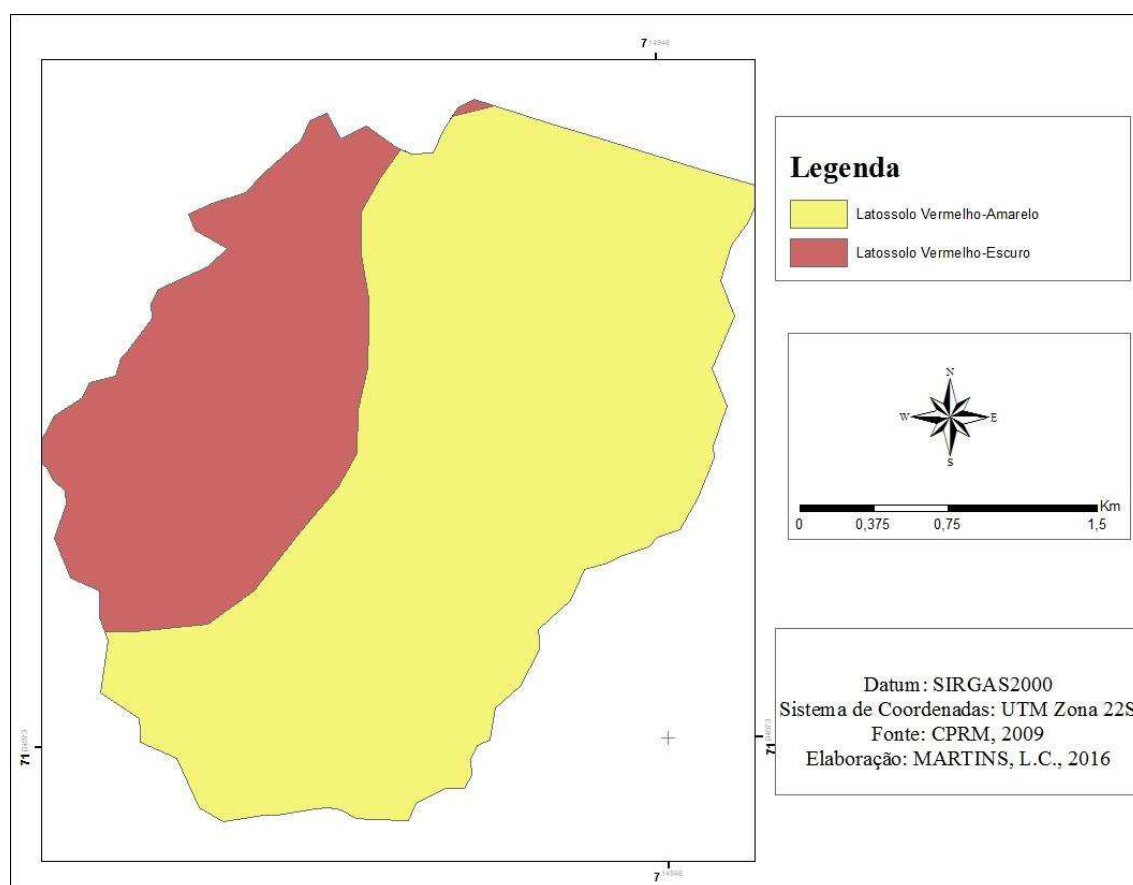
FIGURA 10: Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, Uberlândia – MG



Com base no mapeamento de tipos de solo de Minas Gerais, realizado pela CPRM (2009), foram encontrados dois tipos de solo na bacia do Córrego Glória: Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho Amarelo. Durante os trabalhos de campo realizados na bacia, foram encontrados solos diferentes dessas duas classes, principalmente nas áreas de várzea, o que mostra que foi necessário realizar um mapeamento mais detalhado dos tipos de solo existentes na bacia.

Com base na adaptação realizada por Sartori (2005), o Latossolo Vermelho Escuro foi enquadrado no grupo A e o Latossolo Vermelho-Amarelo, no grupo B.

FIGURA 11: Mapa de tipos de solo da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, Uberlândia – MG



O número CN atribuído a cada classe de ocupação do solo encontrada na bacia, de acordo com as Tabelas 2, 3 e 4, foi relacionado à porcentagem de área ocupada por cada uma das classes. Assim como foi feito para a obtenção do coeficiente C, detalhado no item anterior, o valor de CN encontrado para cada classe de uso foi multiplicado por sua área, e a soma destes valores resultou no número CN médio da bacia.

Os valores de CN foram corrigidos de acordo com a condição de umidade antecedente do solo, determinada com base nos valores de chuva dos cinco dias antecedentes ao evento estudado. A correção foi feita da seguinte maneira:

Condição I: chuvas nos últimos 5 dias < 13 mm;

Condição II: chuvas nos últimos 5 dias entre 13 e 53 mm;

Condição III: chuvas nos últimos 5 dias > 53 mm.

Os eventos classificados na condição II foram mantidos de acordo com o obtido a partir das Tabelas 2, 3 e 4. Eventos classificados nas condições I e III foram obtidos por meio das Equações 15 e 16.

$$CN (I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058 \cdot CN (II)} \quad \text{Equação 15}$$

$$CN (III) = \frac{23 \cdot CN (II)}{10 + 0,13 \cdot CN (II)} \quad \text{Equação 16}$$

Com os valores de CN definidos para cada evento, foi possível calcular o potencial de retenção ou armazenamento de água no solo. Esse potencial varia de acordo com as características físicas e ocupação de cada tipo de solo, consideradas no número CN e da condição de umidade deste solo, corrigida com base nas chuvas anteriores. Este potencial foi calculado por meio da Equação 17.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

S = potencial de armazenamento de água em mm;

CN = número da curva, adimensional.

Diferente do cálculo realizado no método Racional, a obtenção da vazão no método CN demanda não apenas o tempo de concentração, mas os tempos de ascensão e de pico, componentes do hidrograma unitário triangular (HUT).

O tempo de pico foi calculado a partir de características fisiográficas da bacia, e considera o valor de aproximadamente 60% do valor do tempo de concentração (NEH,

2016). O tempo de pico da bacia em questão foi obtido por meio da Equação 18.

$$tp = \frac{2,6 \cdot L^{0,80} \cdot \left(\frac{S}{25,4} + 1\right)^{0,70}}{1900 \cdot X^{0,50}} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

tp = tempo de pico do hidrograma unitário, em h;

S = potencial de armazenamento de água, em mm;

L = comprimento do talvegue principal, em m;

X = a declividade do curso d'água, em %.

Neste trabalho, foram calculados o tempo de pico a partir de duas equações para a estimativa do tempo de concentração, Kirpich e Giandotti. Nos dois casos, foi a obedecida a regra de que o tempo de pico corresponde a aproximadamente 60% do tempo de concentração (NEH, 2016).

Estes diferentes valores foram calculados para observar o comportamento dos resultados de vazão máxima com a utilização de outros valores ou outros métodos na estimativa o tempo de pico. O tempo de ascensão do hidrograma, ou seja, tempo em que a vazão do córrego Glória começou a elevar o seu nível e atingiu o máximo, foi calculado por meio da Equação 19 (NEH, 2016).

$$Tp = tp + \frac{D}{2} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

Tp = tempo de ascensão, em h;

tp = tempo de pico, em h;

D = duração da precipitação, em h.

Considerando que os valores de precipitação efetiva foram obtidos a partir dos dados observados, optou-se por utilizar estes dados no cálculo de vazão pelo método HUT-SCS. Desta forma, tanto a precipitação como a duração da precipitação referem-se aos valores de precipitação efetiva obtidos nos eventos estudados.

Com todos os parâmetros necessários já calculados, finalmente a vazão de pico foi obtida a partir do tempo de ascensão – o tempo gasto até a vazão máxima ser atingida – da precipitação efetiva e da área da bacia (Equação 20).

$$Q_p = \frac{0,208 \cdot P \cdot A}{T_p}$$

Equação 20

Onde:

Q_p = vazão de pico do hidrograma, em m^3s^{-1} ;

P = precipitação efetiva, em mm;

T_p = tempo de ascensão do hidrograma, em h;

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

A precipitação efetiva utilizada na Equação 20 foi obtida por meio da metodologia proposta pelo Soil Conservation Service (NEH, 2016) e também pela metodologia do índice ϕ .

A vazão de pico, bem como as demais variáveis descritas na Equação 20, foram obtidas para cada um dos hidrogramas considerados. Os dados de precipitação utilizados no cálculo da precipitação efetiva foram os mesmos delimitados para cada evento, retirados da base de dados coletados na estação pluviométrica, e representados nos hidrogramas.

Sabendo que existem diversas adaptações do método HUT-SCS, este foi aplicado utilizando apenas as recomendações próprias do Soil Conservation Service. Nesta, o tempo de concentração foi obtido por meio da Equação 21, sugerida pelo SCS e detalhada em NEH (2016).

$$t_c = \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} \cdot L^{0,8} \cdot y^{-0,5} \cdot \frac{1}{1140}$$

Equação 21

Onde:

t_c = tempo de concentração, em h;

C = número CN, adimensional;

L = comprimento do talvegue, da nascente à seção de controle, em pés;

y = declividade da bacia, da nascente à seção de controle, em pés.

O tempo de pico do hidrograma, seguindo a recomendação da metodologia SCS (NHE, 2016) foi considerado como 60% do tempo de concentração. O valor de T_p , porém, utilizado no cálculo de vazão máxima, foi obtido por meio da Equação 22.

$$T_p = (t_c \cdot 0,6) + \left(\frac{D}{2}\right) \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

T_p = tempo de pico, em h;

t_c = tempo de concentração, em h;

D = duração da precipitação, em h.

A duração da precipitação no método SCS pode ser considerada de 1/5 a 1/10 do tempo de concentração. Neste trabalho, este valor foi considerado como 1/7 do tempo de concentração.

A vazão máxima foi obtida em função da área da bacia hidrográfica e do tempo de pico, considerando a precipitação unitária como 1.

$$Q_{\text{máx}} = \frac{0,208 \cdot P_u \cdot A}{T_p} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

$Q_{\text{máx}}$ = vazão máxima, em m^3s^{-1} ;

P_u = precipitação unitária, considerada como 1 mm;

A = área da bacia, em km^2 ;

T_p = tempo de pico, em h.

Para obter os valores específicos de cada evento, a vazão máxima foi multiplicada pela precipitação efetiva obtida de acordo com o método SCS.

As formas de aplicação do método HUT-SCS apresentam resultados diferentes, que serão discutidos e comparados observando fatores que podem influenciar nas diferenças encontradas.

3.5.3 Equação para a estimativa da vazão máxima na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

Alguns dados obtidos diretamente na bacia, como a precipitação, ou dados obtidos por meio de cálculos realizados a partir dos dados de vazão, como a precipitação efetiva, serviram de base para a geração de uma equação para a estimativa da vazão máxima na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória.

Foram selecionados como variáveis dependentes, ou seja, as variáveis a partir das quais é possível obter a vazão máxima, a precipitação total do evento, a intensidade desta precipitação total, a precipitação efetiva, a intensidade da precipitação efetiva e o escoamento superficial direto.

Os eventos estudados selecionados foram divididos em dois conjuntos, um para a calibração e outro para validação do modelo gerado. O primeiro conjunto foi composto por 8 eventos, de 31/10/2015 a 04/01/2016. O segundo conjunto foi composto pelos 6 eventos restantes.

Os dados dos eventos selecionados para calibração do modelo foram inseridos no software SigmaPlot[®] 12.0. A partir dele, foram geradas equações de diversos modelos (linear simples, linear múltipla, quadrática, polinomial, entre outras). Entre as equações geradas, foi selecionada aquela aprovada nos testes estatísticos necessários para validar a equação. Neste trabalho, as equações geradas foram submetidas aos testes estatísticos que avaliam o coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão de estimativa (EPE), o teste t dos coeficientes da regressão, o teste F da regressão e o teste de normalidade dos resíduos da regressão de Shapiro-Wilk. Com exceção dos dois primeiros, em todos os demais foi considerado o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Os resultados obtidos a partir da equação gerada foram comparados com os valores observados de vazão máxima, extraídos de cada hidrograma.

3.5.4 Análise estatística da equação para a estimativa da vazão máxima na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

A qualidade da equação gerada para a estimativa da vazão máxima na bacia experimental, foi testada a partir do coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}). Este coeficiente avalia o ajustamento entre os dados estimados e os observados. Os valores do coeficiente variam entre $-\infty$ a 1, onde quanto mais próximo de 1, melhor é o modelo.

A escala de avaliação do coeficiente de Nash-Sutcliffe (Equação 24) utilizada neste trabalho foi proposta por Gotschalk e Motovilov (2000) *apud* Viola (2008). Segundo esses autores, o $C_{NS} = 1$ significa um ajuste perfeito, $C_{NS} > 0,75$ significa que o modelo é considerado adequado e bom, e $0,36 < C_{NS} < 0,75$ o modelo é considerado aceitável. Abaixo de 0,36 o modelo deve ser rejeitado.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{máx obs}_i} - Q_{\text{máx est}_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{\text{máx obs}_i} - \overline{Q_{\text{máx obs}_i}})^2} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

$Q_{\text{máx obs}}$ = vazão máxima observada, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

$Q_{\text{máx est}}$ = vazão máxima observada, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

$\overline{Q_{\text{máx obs}}}$ = média da vazão máxima observada, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Os resultados obtidos na aplicação dos métodos SCS e Racional foram comparados aos valores de vazão obtidos diretamente nos hidrogramas por meio do cálculo dos erros absoluto e relativo.

Estes valores de erro têm como objetivo relatar qual a eficiência daquele determinado modelo em estimar a vazão máxima para a bacia estudada, isto é, em que proporção os valores se aproximam da realidade. O erro absoluto, ou seja, a diferença absoluta entre os valores estimados pelos métodos em questão e os valores reais, foi obtido por meio da Equação 25.

$$EA = Q_{\text{est}} - Q_{\text{obs}} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

EA = erro absoluto, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

Q_{est} = vazão estimada, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

Q_{obs} = vazão observada, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

O erro relativo consiste na relação entre o erro absoluto e os valores observados, neste caso, os valores observados de cada evento, uma vez que neste caso estão sendo estudados evento por evento. Expresso em porcentagem, o erro relativo foi obtido a partir da Equação 26.

$$ER = \left(\frac{EA}{Q_{\text{obs}}} \right) * 100 \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

ER = erro relativo, em %.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Valores observados de vazão e precipitação

Neste trabalho foram selecionados somente quatorze eventos de vazão máxima, dado o pequeno espaço de tempo em que a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória estava sendo monitorada.

Para cada um destes eventos, foram construídos hidrogramas que possibilitaram uma análise do comportamento das vazões ao longo do tempo, observando e determinando os pontos de ascensão e declínio da vazão.

Delimitados estes intervalos entre ascensão e declínio da vazão no hidrogramas unitários da bacia, foram calculados parâmetros fundamentais, como a precipitação efetiva e o escoamento superficial direto, representados na Tabela 5.

TABELA 5: Dados de precipitação, escoamento superficial e vazão máxima obtidos na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em resposta às chuvas intensas, no período de 31/10/2015 a 14/03/2016

Data	Precipitação total (mm)	Precipitação efetiva pelo índice ϕ (mm)	Escoamento Superficial Direto (mm)	Vazão máxima observada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
31/10/2015	12,4	0,06	0,06	0,71
03/11/2015	17	0,41	0,32	0,68
07/11/2015	5,6	0,10	0,07	0,76
06/12/2015	17,4	0,36	0,36	0,6
20/12/2015	29,8	0,45	0,97	2,01
26/12/2015	13,6	0,11	0,11	0,94
28/12/2015	15,4	0,23	0,17	0,56
04/01/2016	19,6	0,26	0,35	0,86
18/01/2016	20	0,56	0,81	1,53
09/02/2016	15,2	0,08	0,08	0,91
16/02/2016	3,8	0,92	0,10	0,97
29/02/2016	15,6	0,24	0,24	0,79
10/03/2016	16,8	0,34	0,34	0,81
14/03/2016	10	0,16	0,16	0,54
Média	0,91

Nota: a simbologia “...” indica que o dado numérico não está disponível

Analisando a Tabela 5, verifica-se que os valores de precipitação efetiva são baixos se comparados aos valores de precipitação total, o que aponta para uma grande quantidade de perdas por infiltração na bacia, isto é, grande parte da chuva não contribuiu diretamente para o aumento da vazão.

Os hidrogramas e hietogramas obtidos na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória foram organizados considerando a variação da vazão e a precipitação responsável por este comportamento, neste caso, a precipitação efetiva calculada pelo método do índice ϕ . Os hidrogramas de cada evento considerado neste trabalho estão representados nas Figuras de 12 a 25.

FIGURA 12: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 31 de outubro de 2015

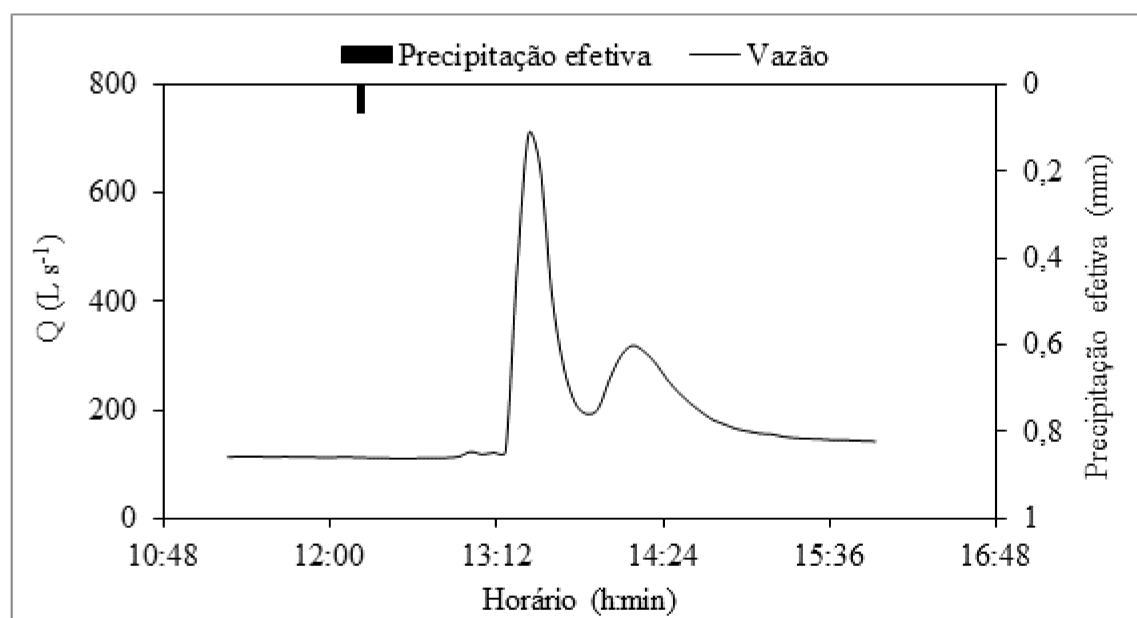


FIGURA 13: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 3 de novembro de 2015

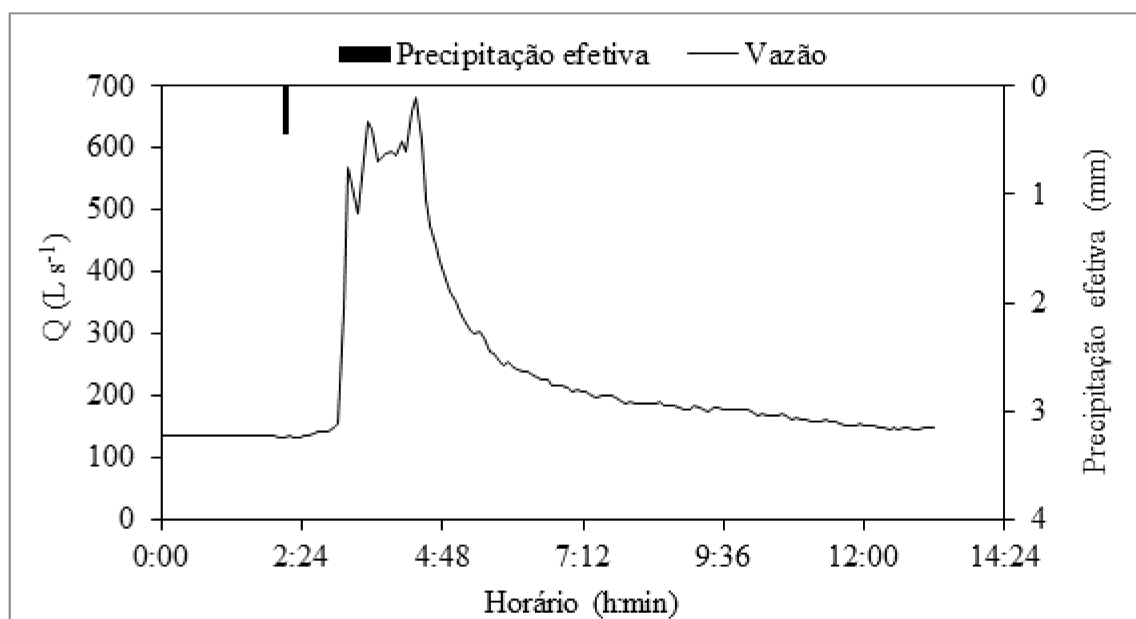


FIGURA 14: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 7 de novembro de 2015

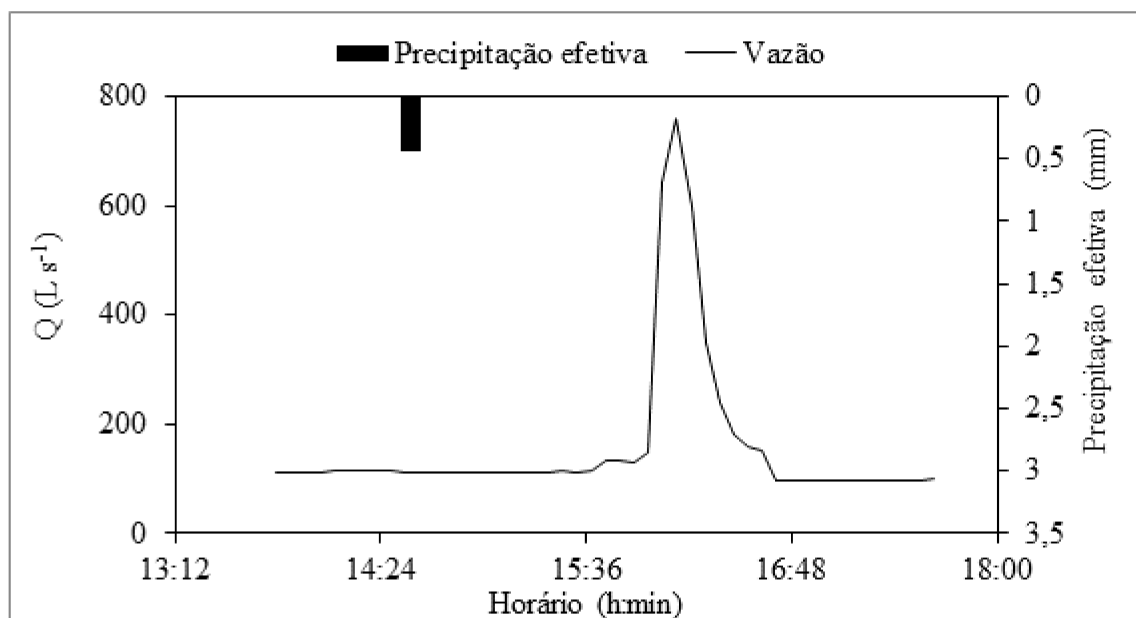


FIGURA 15: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 6 de dezembro de 2015

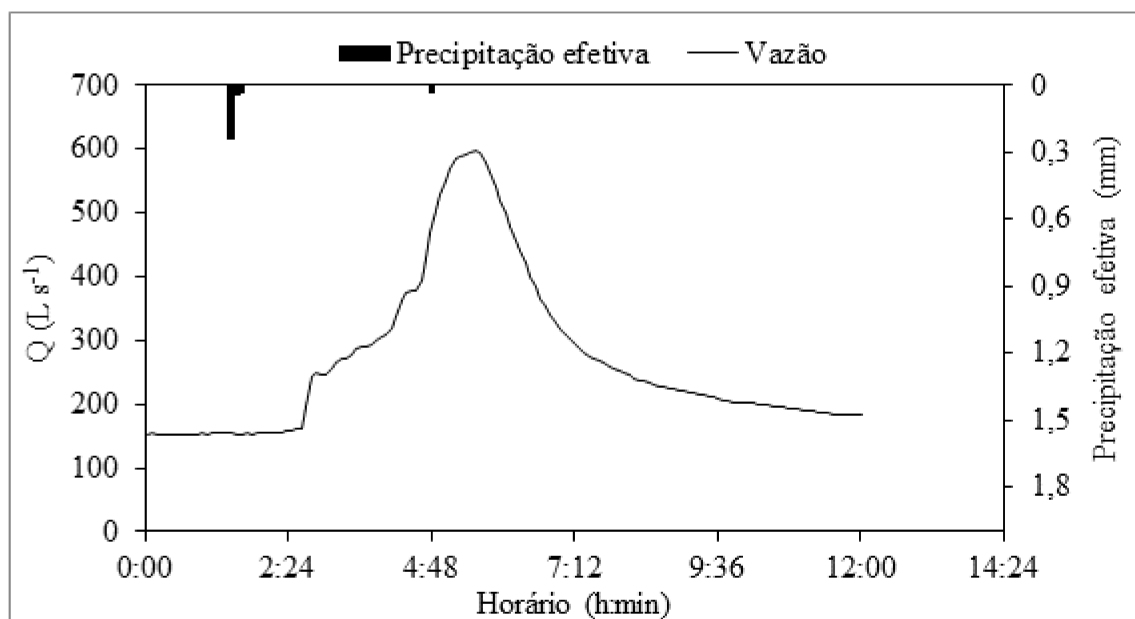


FIGURA 16: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 20 de dezembro de 2015

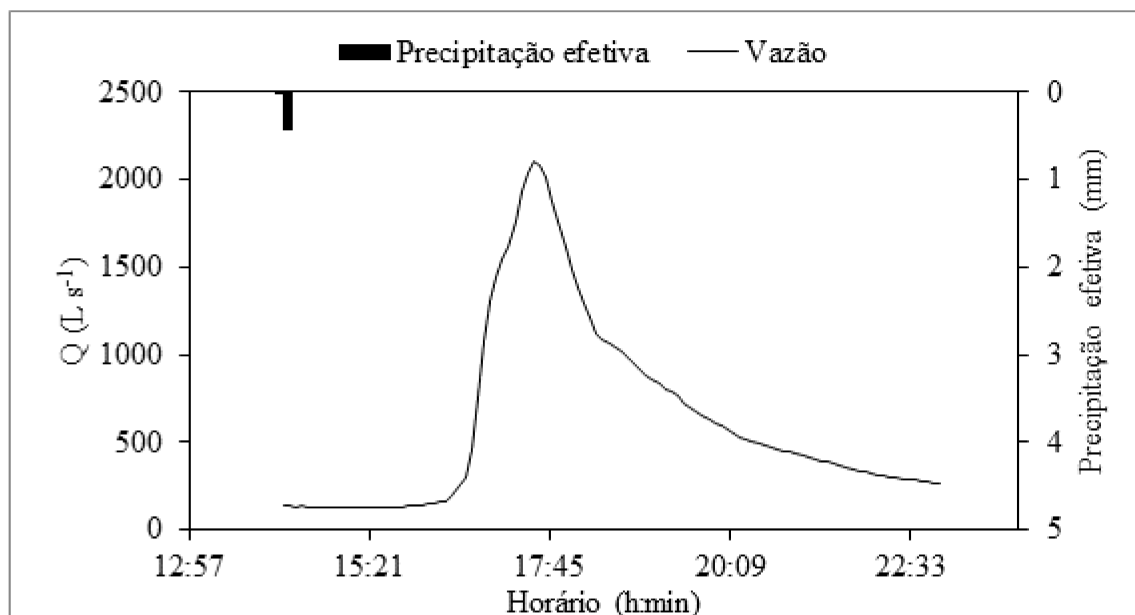


FIGURA 17: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 26 de dezembro de 2015

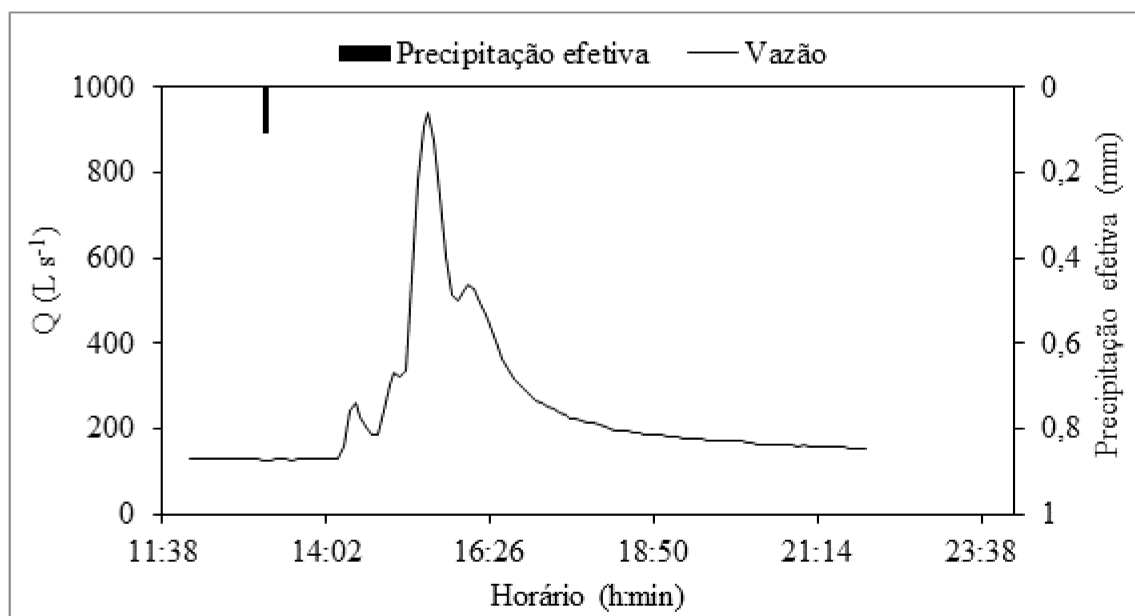


FIGURA 18: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 28 de dezembro de 2015

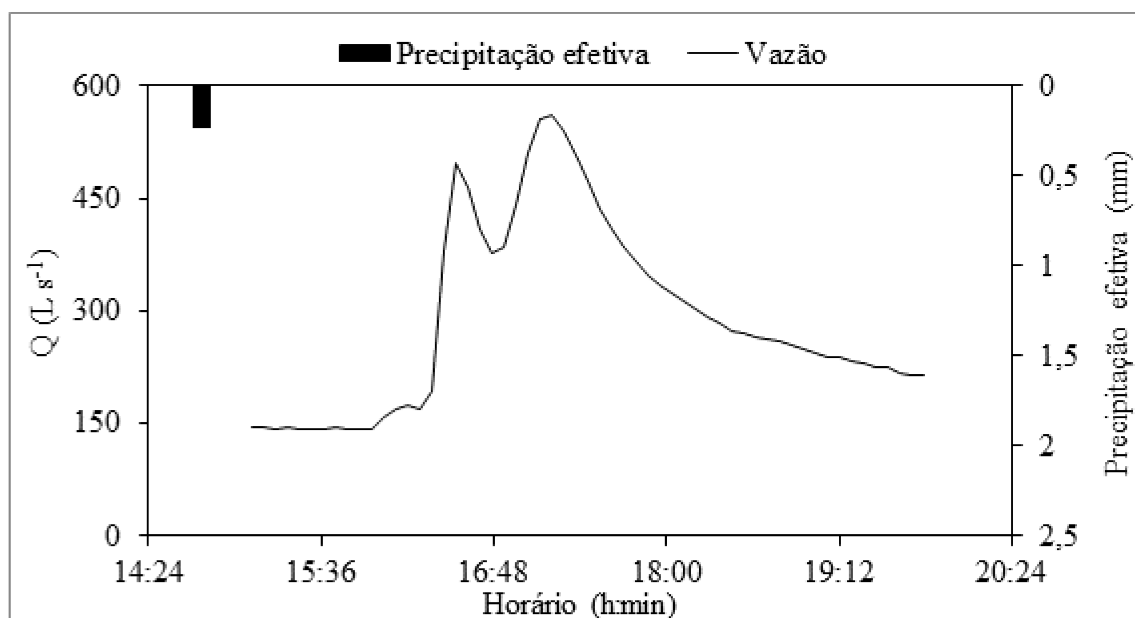


FIGURA 19: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 4 de janeiro de 2016

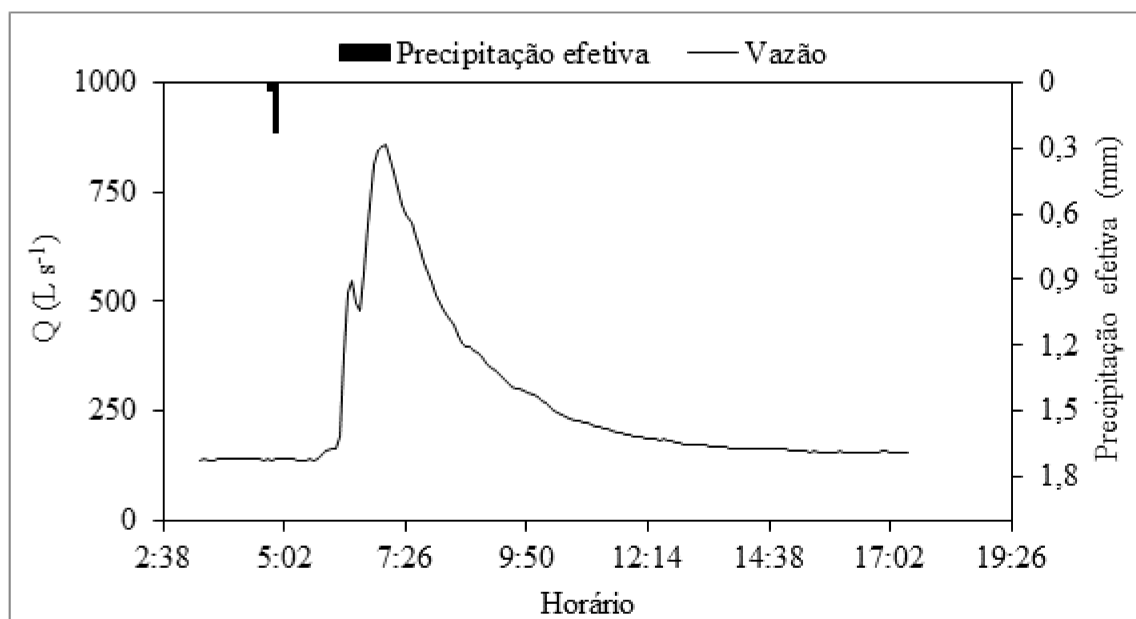


FIGURA 20: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 18 de janeiro de 2016

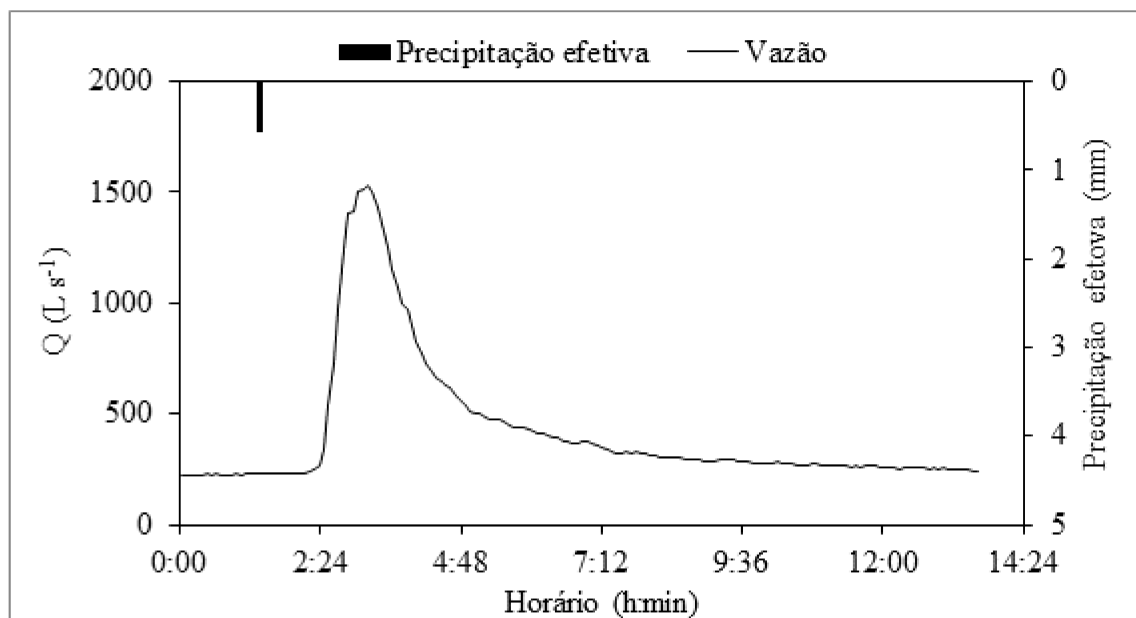


FIGURA 21: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 9 de fevereiro de 2016

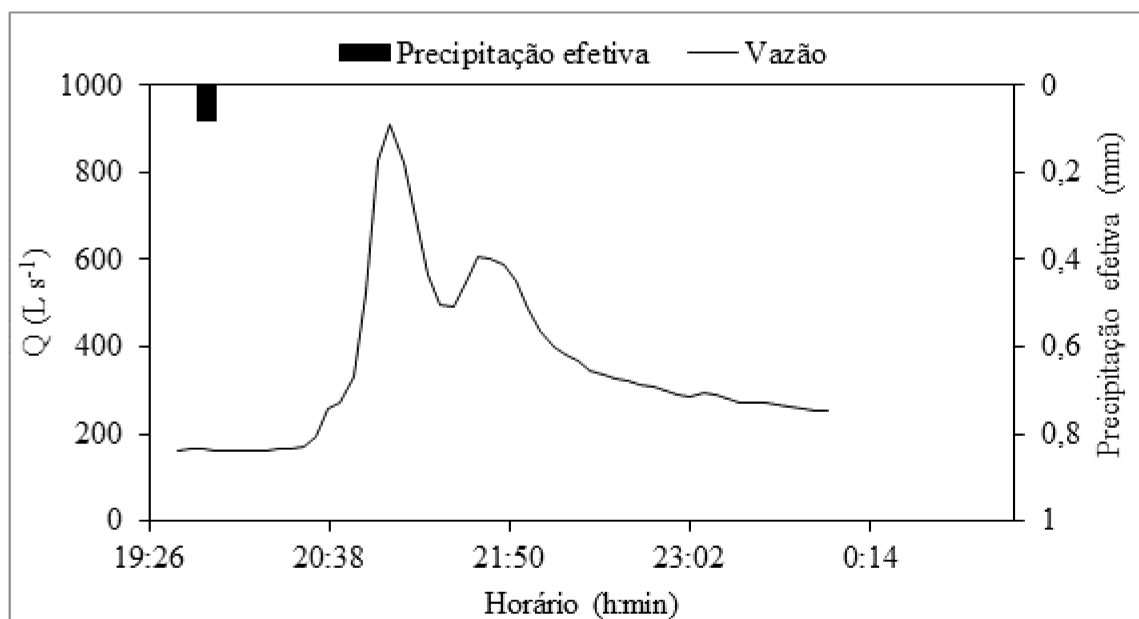


FIGURA 22: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 16 de fevereiro de 2016

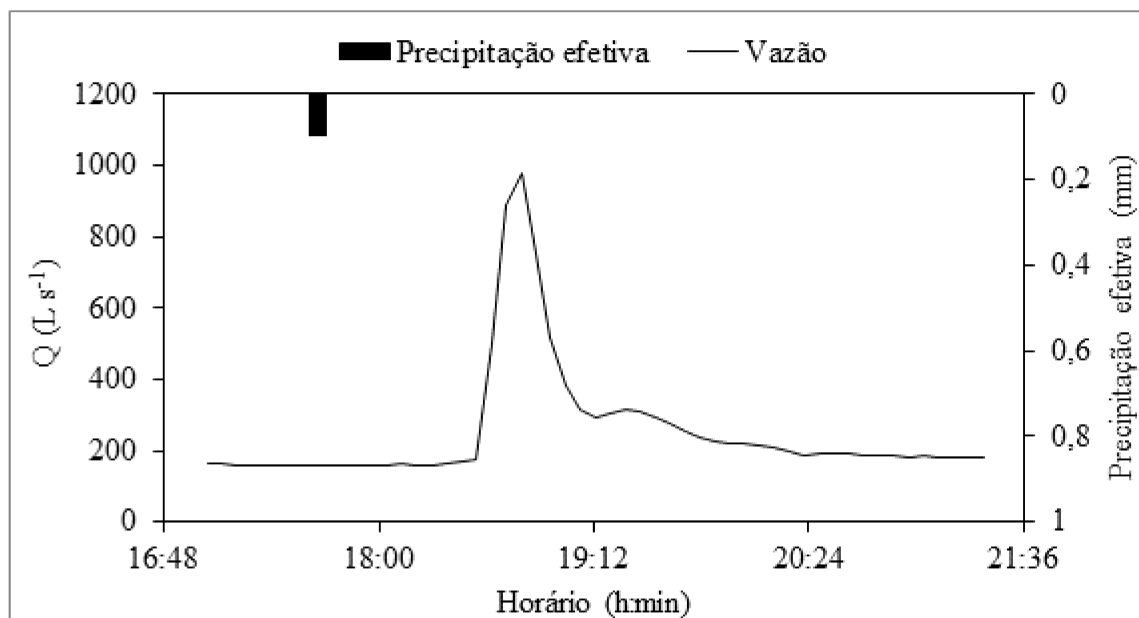


FIGURA 23: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 29 de fevereiro de 2016

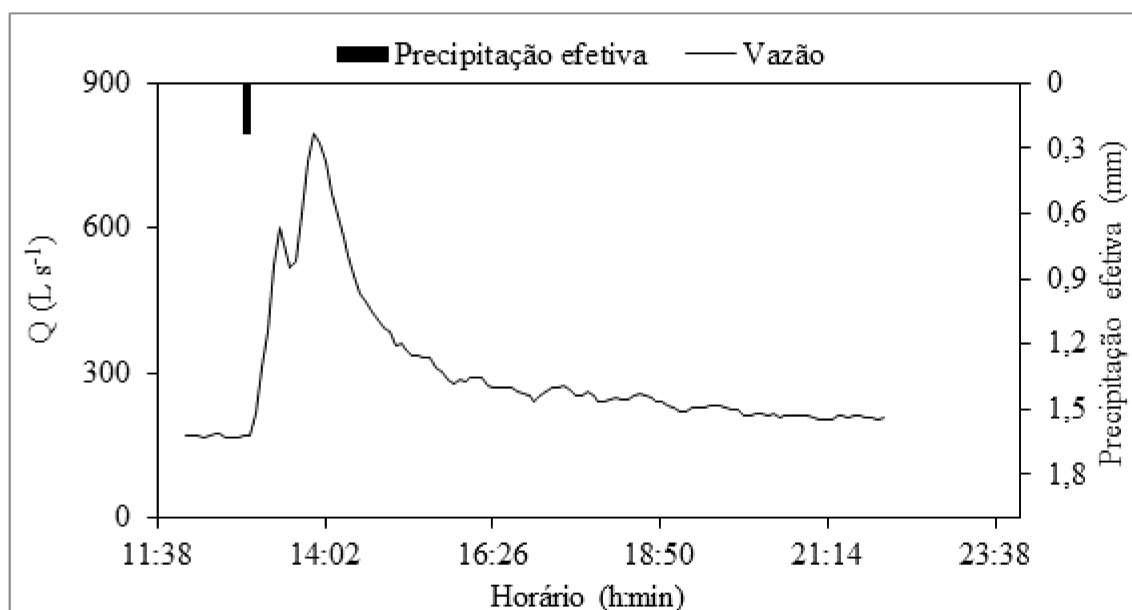


FIGURA 24: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 10 de março de 2016

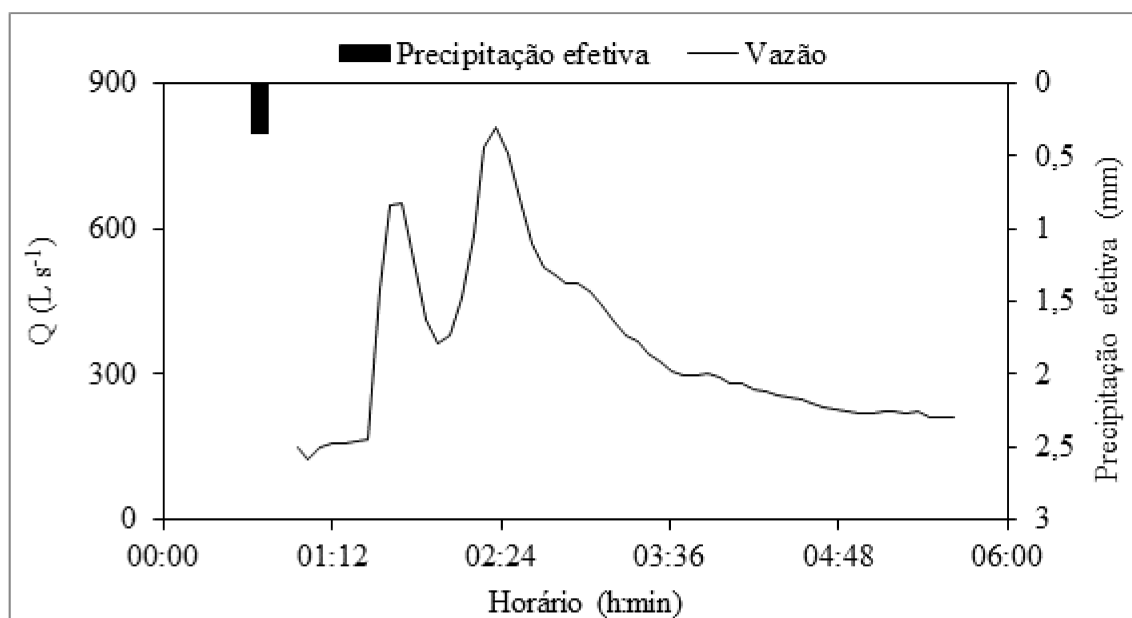
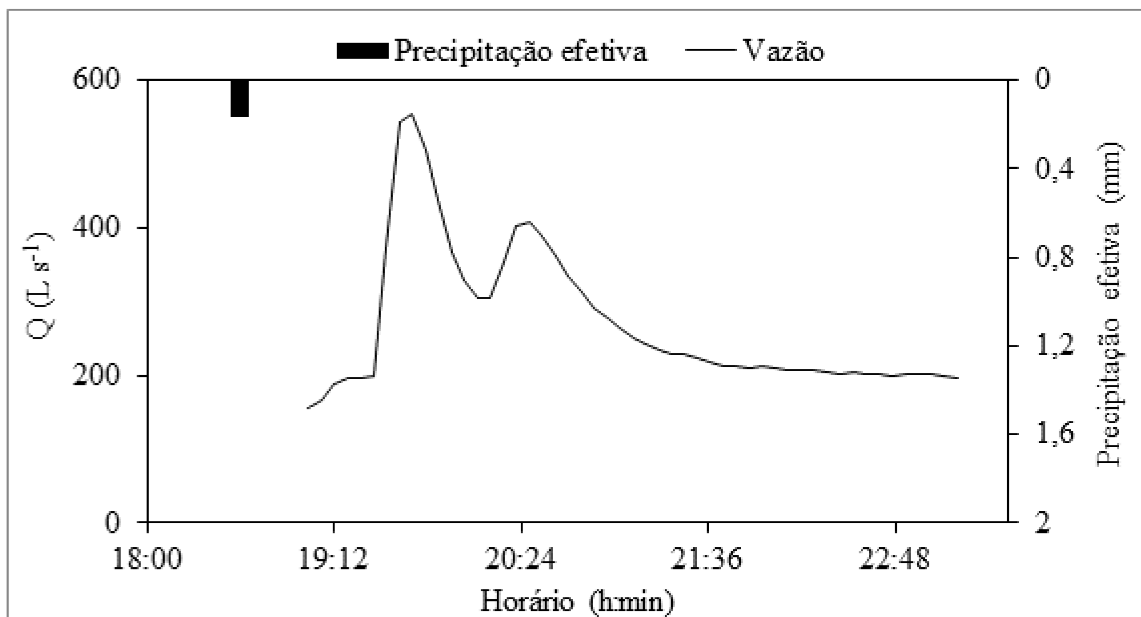


FIGURA 25: Hidrograma e hietograma referentes ao evento de chuva do dia 14 de março de 2016



Os hidrogramas foram feitos para que fosse possível não só a identificação do valor máximo de vazão atingido em determinado evento, mas também para auxiliar na determinação da precipitação efetiva e do escoamento superficial direto.

Verifica-se que o comportamento da vazão nem sempre é estável (Figuras 12 a 25), havendo casos em que a ascensão do hidrograma acontece em dois momentos, sendo em um deles vazão apresenta-se maior do que aquela verificada no outro (Figuras 12, 13, 18, 19, 23, 24 e 25). Esse comportamento pode ser explicado pela distribuição espacial da precipitação na bacia que, apesar de ser pequena (8,27 km²), pode não ser atingida de forma uniforme pela chuva que gerou o hidrograma.

Em cada um dos quatorze eventos selecionados foi atingido um pico de vazão, sendo denominados neste trabalho de vazão máxima (Tabela 5). Estes valores foram selecionados e comparados com aqueles estimados por meio dos métodos Racional e da hidrógrafa unitária triangular (HUT-SCS)

Estes hidrogramas e dados calculados de precipitação efetiva e escoamento superficial direto compõem a base de dados inicial desta bacia experimental. Esta base inicial é importante por permitir a realização das primeiras avaliações do comportamento hidrológico da bacia. A base de dados da qual foram extraídos os dados desta pesquisa será aprimorada à medida que forem coletados novos dados e desenvolvidos novos estudos.

4.2 Valores estimados de vazão máxima da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

4.2.1 Resultados da vazão máxima pelo método Racional

Seguindo a metodologia descrita para a estimativa do coeficiente de escoamento, detalhada anteriormente, foi determinado o coeficiente de escoamento da bacia experimental para um tempo de retorno de dois anos, como propõe a metodologia utilizada por Genovez (2001). A partir da combinação dos dados de ocupação e tipo de solo, foi obtido o valor de C, a partir das indicações de Genovez (2001), de 0,44.

Considerando o coeficiente de escoamento como um coeficiente de deflúvio, como aponta Pinto et al. (1976), e sabendo que este coeficiente aumenta à medida que o solo da bacia é submetido a um tipo de uso que o torna menos permeável, é importante considerar as mudanças no uso do solo na bacia. Isto leva a concluir que estes valores são referentes à condição atual de ocupação do solo na bacia, e necessitam ser revistos à medida que os usos do solo se alterarem.

A intensidade máxima média de precipitação foi calculada utilizando dois diferentes valores de tempo de concentração (T_c), sendo um calculado a partir da equação de Kirpich e outro a partir da equação de Giandotti. Os valores de tempo de concentração obtidos nesta pesquisa foram de 34,17 minutos e 154,68 minutos, respectivamente para Kirpich e Giandotti. Utilizando esses valores e os parâmetros k, a, b e c para a localização geográfica da bacia experimental, determinados segundo Freitas et al. (2001), foram obtidos os valores de intensidade máxima média de precipitação, considerando um tempo de retorno de dois anos (Tabela 6).

TABELA 6: Intensidade máxima média de precipitação (I) e vazão máxima (Q_{max}) calculados com tempos de concentração (T_c) de Kirpich e Giandotti, para um tempo de retorno de dois anos

Variável	T_c	
	Kirpich	Giandotti
I (mm min^{-1})	78,52	28,04
Q_{max} ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	80,09	28,60

Analisando a Tabela 6, verifica-se que a intensidade máxima média de precipitação calculada com o tempo de concentração de Kirpich foi muito maior do que aquela estimada pela equação de Giandotti. Essa resposta já era esperada, dado a relação direta do tempo de concentração com a intensidade de chuva, como explicitado na Equação 11.

No que diz respeito a vazão máxima, analisando a Tabela 6, verifica-se que os valores obtidos neste trabalho estão divididos de acordo com o método de cálculo de T_c da bacia experimental. A utilização do tempo de concentração de Giandotti aproximou mais os valores de vazão máxima dos valores obtidos diretamente na bacia (Tabela 5), quando comparado ao tempo de concentração obtido pela equação de Kirpich.

Contudo, o método Racional com o coeficiente de escoamento superficial proposto por Genovez (2001) não pode ser considerado adequado para a estimativa da vazão máxima na bacia ora estudada, visto que os valores calculados foram muito superiores aqueles obtidos na bacia hidrográfica.

Esta diferença de valores reforça a ideia defendida por autores como Zanetti (2007), Hoepfner (2007) e Silva et al. (2006), que utilizaram o método Racional para estimar a vazão máxima em outras bacias hidrográficas e verificaram resultados muito superiores aos obtidos diretamente nas bacias estudadas.

Como os valores de vazão calculada pelo método Racional são valores únicos, não associados a um evento específico de chuva, o cálculo dos erros absoluto e relativo (Tabela 7) foi feito considerando três valores de vazão observada: a média geral, o maior valor de vazão máxima e o menor valor de vazão máxima. Neste trabalho, tais valores foram, respectivamente, de 0,91, 2,01 e 0,54 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

TABELA 7: Erros absoluto e relativo da vazão máxima ($Q_{\text{máx}}$) estimada pelo método Racional, obtida a partir dos tempos de concentração (T_c) de Kirpich e Giandotti, em comparação com a vazão máxima observada

Vazão máxima observada	T_c	
	Kirpich	Giandotti
Erro absoluto ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		
Média	79,18	27,70
Maior valor	78,08	26,59
Menor valor	79,55	28,06
Erro relativo (%)		
Média	8.749,40	3.060,22
Maior valor	3.884,43	1.322,89
Menor valor	14.730,93	5.196,30

Analisando a Tabela 7, verifica-se que os erros foram muito elevados, independentemente da equação usada para a estimativa do tempo de concentração. Contudo, nota-se pela referida tabela que o cálculo da vazão máxima pelo método Racional usando a equação de Giandotti apresentou resultados sensivelmente melhores do que ao se usar a equação de Kirpich. Sendo assim, é possível inferir que um melhor ajuste poderá ser alcançado ao se considerar outros valores para o coeficiente de escoamento.

Mota (2012) estimou o tempo de concentração da bacia do Rio Araponga, no município de Rio Negrinho, estado de Santa Catarina, a partir de 15 equações empíricas. Entre as equações utilizadas pela autora, a de Kirpich foi a que apresentou resultados mais baixos. Esse resultado corrobora com aquele obtido nesta pesquisa.

A relação inversamente proporcional entre o tempo de concentração e a intensidade de precipitação, explicitada por Mello e Silva (2013), ajuda a compreender os resultados superestimados de vazão, que também foram encontrados por Silva et al. (2006), ao estimarem a vazão máxima por meio do método Racional em encostas e canais.

Os valores de vazão calculada utilizando o tempo de concentração de Giandotti superestimaram menos a vazão observada, uma vez que o tempo de concentração obtido a partir desta equação (193,37 minutos) apresentou maior aproximação aos valores reais de tempo de concentração nos eventos observados, assim como nos trabalhos de Almeida et al. (2013) e Ferreira (2010).

4.2.2 Resultados da vazão máxima pelo método HUT-SCS

A partir dos mapeamentos de solo e ocupação realizados para esta bacia experimental, relacionados às respectivas áreas ocupadas por cada classe, foram determinados os valores que compuseram a Curva Número (CN) da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória. O valor médio de CN encontrado foi de 69,28.

TABELA 8: Metodologia de obtenção do número CN para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

Classe de uso	Solo	CN	Área (km ²)	Área (%)	CN por área
Área Urbana pavimentada	A	77	0,92	0,11	8,61
Área Urbana não pavimentada	A	61	0,62	0,07	4,54
Mata ciliar	B	55	0,57	0,07	3,82
Cultura anual	B	71	1,83	0,22	15,73
Espaços abertos – más condições	B	79	0,21	0,02	1,96
Espaços abertos – condições razoáveis	B	69	0,74	0,09	6,19
Espaços abertos – boas condições	B	61	0,24	0,03	1,81
Rodovia	B	98	0,2	0,02	2,4
Canteiro	B	79	0,01	0	0,11
Áreas impermeáveis	B	98	0,23	0,03	2,67
Culturas perenes	B	71	0,34	0,04	2,94
Pastagens	B	61	0,8	0,1	5,92
Cerrado em regeneração	B	73	0,2	0,02	1,73
Áreas de várzea	D	50	0,23	0,03	1,37
Área gramada com árvores espaçadas – más condições	B	67	0,3	0,04	2,45
Área gramada com árvores espaçadas – boas condições	B	48	0,28	0,03	1,62
Pastagens degradadas	B	79	0,39	0,05	3,7
Estradas rurais	B	85	0,11	0,01	1,15
Lagos e represas	B	100	0,05	0,01	0,58
CN médio da Bacia					69,28

É importante lembrar que o mapeamento de uso e ocupação do solo da bacia deve ser realizado constantemente, a fim de identificar as mudanças no comportamento hidrológico da mesma resultante destas alterações. O mapa, portanto, representa a

configuração do uso do solo na bacia para os anos estudados nesta pesquisa, assim como os valores do coeficiente de escoamento de escoamento e do número CN, variáveis de acordo com estes tipos de uso.

O valor de CN médio encontrado para a Bacia Experimental do Córrego Glória foi corrigido de acordo com a condição hidrológica de cada evento, como recomendado pela metodologia adotada, resultando nos valores da Tabela 8. A correção dos valores de CN para cada condição hidrológica corrigiu estes valores às condições de escoamento de acordo com a umidade antecedente no solo.

Esta adaptação influenciou nos valores de potencial de retenção de água no solo (S), e da abstração inicial (Ia), apresentados na Tabela 9. De acordo com o método HUT-SCS, a abstração inicial, ou seja, valor que inicialmente infiltra no solo antes do escoamento corresponde a 20% do valor do potencial de retenção.

Observando os valores de abstração inicial e comparando-os com os valores de precipitação de cada evento, ambos contidos na Tabela 9, nota-se que por vezes a abstração inicial proposta no método HUT-SCS supera o valor da precipitação, levando a crer que no evento observado, de acordo com esse método, não haveria escoamento, o que de não aconteceu nos casos estudados neste trabalho.

TABELA 9: Número CN corrigido de acordo com a condição hidrológica por evento

Data dos hidrogramas	Precipitação nos últimos 5 dias (mm)	Condição hidrológica	CN
31/10/2015	32,2	2	69,28
03/11/2015	87,2	3	83,84
07/11/2015	23,2	2	69,28
06/12/2015	68	3	83,84
20/12/2015	59,6	3	83,84
26/12/2015	15,6	2	69,28
28/12/2015	33,5	2	69,28
04/01/2016	31,8	2	69,28
19/01/2016	145,6	3	83,84
09/02/2016	41,6	2	69,28
16/02/2016	33	2	69,28
29/02/2016	37,4	2	69,28
10/03/2016	10	1	48,64
14/03/2016	46	2	69,28

TABELA 10: Potencial de retenção de água no solo (S) e abstração inicial (Ia)

Data dos hidrogramas	S (mm)	Ia (mm)
31/10/2015	112,63	22,53
03/11/2015	48,97	9,79
07/11/2015	112,63	22,53
06/12/2015	48,97	9,79
20/12/2015	48,97	9,79
26/12/2015	112,63	22,53
28/12/2015	112,63	22,53
04/01/2016	112,63	22,53
19/01/2016	48,97	9,79
09/02/2016	112,63	22,53
16/02/2016	112,63	22,53
29/02/2016	112,63	22,53
10/03/2016	268,16	53,63
14/03/2016	112,63	22,53

A relação entre os valores de abstração inicial (Ia) adotados nesta pesquisa por meio do método HUT-SCS, com a precipitação e a resposta da vazão da bacia hidrográfica, reforça a observação feita por Ling e Yusop (2014) de que os valores de abstração inicial estimados por esse método nem sempre consistem nos valores reais.

A partir dos valores de potencial de retenção de água no solo (S), além do comprimento do talvegue principal e sua declividade, foi obtido o valor do tempo de pico (tp) de acordo com a equação proposta por NEH (2016), para o método HUT-SCS. Além disso, neste trabalho, o tempo de pico também foi obtido com base nos resultados de tempo de concentração (Tc) estimados pelas equações de Kirpich e Giandotti.

Após a obtenção dos tempos de concentração por essas duas metodologias, o tempo de pico foi obtido com base na aproximação proposta no método HUT-SCS (NEH, 2016), na qual o tempo de pico pode ser estimado a partir do tc, considerando-se que tp equivale a aproximadamente 60% do tempo de concentração. Os resultados de tempo de pico usando a equação proposta por HUT-SCS, bem como aqueles usando as metodologias de tempo de concentração (Tc) de Kirpich e Giandotti e considerando $[tp = 0,6 \cdot Tc]$, estão compilados na Tabela 11.

TABELA 11: Tempos de pico (tp) obtidos diretamente por meio da equação proposta por HUT-SCS e por meio da relação ($tp = 0,6 \cdot T_c$), usando as equações de Kirpich e Giandotti para a estimativa do tempo de concentração (T_c)

Data dos hidrogramas	tp - SCS (h)	tp - Kirpich (h)	tp - Giandotti (h)
31/10/2015	1,51	0,34	1,93
03/11/2015	0,98	0,34	1,93
07/11/2015	1,51	0,34	1,93
06/12/2015	0,98	0,34	1,93
20/12/2015	0,98	0,34	1,93
26/12/2015	1,51	0,34	1,93
28/12/2015	1,51	0,34	1,93
04/01/2016	1,51	0,34	1,93
19/01/2016	0,98	0,34	1,93
09/02/2016	1,51	0,34	1,93
16/02/2016	1,51	0,34	1,93
29/02/2016	1,51	0,34	1,93
10/03/2016	2,56	0,34	1,93
14/03/2016	1,51	0,34	1,93

Uma vez considerados três diferentes valores de tempo de pico, foram obtidas três diferentes classes de valores para o tempo de ascensão do hidrograma (T_p), os quais estão representados na Tabela 12. O T_p é um parâmetro importante na metodologia HUT-SCS pois o seu valor é diretamente usado na estimativa da vazão máxima.

TABELA 12: Tempos de ascensão (T_p) obtidos neste trabalho, a partir de diferentes metodologias para a estimativa do tempo de pico (tp)

Data	T_p - SCS (h)	T_p - Kirpich (h)	T_p - Giandotti (h)
31/10/2015	1,55	0,38	1,98
03/11/2015	1,02	0,38	1,98
07/11/2015	1,55	0,38	1,98
06/12/2015	0,98	0,34	1,93
20/12/2015	1,60	0,97	2,56
26/12/2015	1,67	0,51	2,10
28/12/2015	1,55	0,38	1,98
04/01/2016	1,59	0,43	2,02

(continua)

TABELA 12: CONT.

18/01/2016	1,10	0,47	2,06
09/02/2016	1,59	0,43	2,02
16/02/2016	1,55	0,38	1,98
29/02/2016	1,59	0,43	2,02
10/03/2016	2,64	0,43	2,02
14/03/2016	1,55	0,38	1,98

Seguindo o mesmo modelo, os valores de vazão máxima (Q_{max}), obtidos a partir destes diferentes valores de tempo de ascensão (T_p), também foram classificados em três grupos, de acordo com o tempo de pico utilizado em seu cálculo. Os resultados de vazão máxima por essas metodologias estão compilados na Tabela 13. A precipitação utilizada para este cálculo foi a precipitação efetiva, anteriormente calculada para cada evento específico pelo método do índice ϕ .

TABELA 13: Vazões máximas obtidas a partir dos tempos de pico calculados neste trabalho

Data dos Hidrogramas	Q_{max} tp – SCS ($m^3 s^{-1}$) ¹	Q_{max} tp – Kirpich ($m^3 s^{-1}$) ²	Q_{max} tp – Giandotti ($m^3 s^{-1}$) ³	Q_{max} Observada ($m^3 s^{-1}$) ⁴
31/10/2015	0,07	0,29	0,06	0,71
03/11/2015	0,69	1,82	0,35	0,68
07/11/2015	0,11	0,45	0,09	0,76
06/12/2015	0,63	1,81	0,32	0,6
20/12/2015	0,49	0,81	0,31	2,01
26/12/2015	0,11	0,37	0,09	0,94
28/12/2015	0,25	1,02	0,2	0,56
04/01/2016	0,29	1,07	0,23	0,86
19/01/2016	0,87	2,05	0,46	1,53
09/02/2016	0,09	0,33	0,07	0,91
16/02/2016	1,02	4,11	0,8	0,97
29/02/2016	0,25	0,95	0,2	0,79
10/03/2016	0,22	1,39	0,29	0,81
14/03/2016	0,18	0,74	0,14	0,54

Nota: ¹ Vazão máxima obtida com tempo de pico (tp) usando a equação proposta por NEH (2016); ² Vazão máxima obtida com tempo de pico (tp) estimado como sendo $[0,6 \cdot T_c]$, usando T_c calculado por Kirpich; ³ Vazão máxima obtida com tempo de pico (tp) estimado como sendo $[0,6 \cdot T_c]$, usando T_c calculado por Giandotti; ⁴ Vazão máxima observada na bacia experimental, obtida nos hidrogramas

Neste trabalho, verificou-se que a equação de Kirpich subestimou o tempo de concentração, o que também foi observado por Mota (2012) e Silva et al. (2006), resultando assim em maiores picos de vazão.

Neste caso, as vazões calculadas a partir do tempo de concentração e tempo de pico, obtidos pela equação de Giandotti se aproximaram mais da vazão da observada, em relação aos valores obtidos a partir dos outros tempos de pico.

Nesse sentido, observa-se pelos dados contidos na Tabela 13, que o tempo de pico oriundo da metodologia SCS, é funcional e permitiu a obtenção de valores de vazão, por meio da metodologia HUT-SCS, mais próximos daqueles medidos na bacia ora estudada. Essa resposta pôde ser facilmente visualizada quando se calculou os erros absolutos e relativos das respostas de vazão máxima segundo as recomendações para a HUT-SCS (Tabela 14).

TABELA 14: Erros absoluto (EA) e relativo (ER) da vazão máxima estimada por diferentes metodologias preconizadas para a HUT-SCS para as diferentes formas de obtenção do tempo de pico considerados neste trabalho

Data dos hidrogramas	tp – SCS		tp – Kirpich		tp – Giandotti	
	Erro Absoluto (m ³ s ⁻¹)	Erro Relativo (%)	Erro Absoluto (m ³ s ⁻¹)	Erro Relativo (%)	Erro Absoluto (m ³ s ⁻¹)	Erro Relativo (%)
31/10/2015	0,64	89,9	0,42	59,21	0,65	92,08
03/11/2015	0,01	0,74	1,14	167,83	0,33	48,01
07/11/2015	0,65	85,43	0,31	41,15	0,67	88,58
06/12/2015	0,03	5,38	1,21	201,22	0,28	46,71
20/12/2105	1,52	75,73	1,2	59,77	1,7	84,8
26/12/2015	0,83	88,11	0,57	60,84	0,85	90,52
28/12/2015	0,31	54,74	0,46	82,86	0,36	64,51
04/01/2016	0,57	66,68	0,21	24,69	0,63	73,72
19/01/2016	0,66	43,31	0,52	33,91	1,07	69,64
09/02/2016	0,82	90,26	0,58	63,57	0,84	92,32
16/02/2106	0,05	4,96	3,14	324,03	0,17	17,69
29/02/2016	0,54	67,82	0,16	20,41	0,59	74,62
10/03/2016	0,59	72,44	0,58	71,11	0,52	63,94
14/03/2016	0,36	66,29	0,2	36,2	0,4	73,56
Média E _{Ai} ¹	0,55	...	0,83	...	0,68	...
Média E _{Ri} ²	...	56,09	...	94,96	...	70,27

Nota: ¹ Se refere a média dos resultados de erro absoluto, calculado a partir dos valores individuais de EA em módulo; ² Se refere a média dos resultados de erro relativo, calculado a partir dos valores individuais de ER em módulo; A simbologia “...” significa que o valor numérico não foi calculado

Analisando a Tabela 14, verifica-se que os valores para cada evento variaram, ora subestimando a vazão máxima e ora superestimando. A vazão estimada com base nos tempos de pico obtidos pelas metodologias tp – SCS e tp – Giandotti apresentam mais casos de subestimativa, do que aqueles verificados na metodologia tp – Kirpich.

Em relação aos erros médios absoluto e relativo contidos na Tabela 14, é possível concluir que a vazão máxima estimada com o tempo de pico obtido a partir da equação proposta por NEH (2016), (na Tabela 14 indicado como “tp – SCS”), se aproximou mais daquela verificada na bacia experimental. Por essa metodologia, o erro relativo médio foi de 56,09%, contra 70,27% seguindo a metodologia de estimativa de tc de Giandotti e 94,96% usando Tc por Kirpich, considerando a relação $[0,6 \cdot T_c]$.

Diante disso, verifica-se que a equação de Kirpich não deve ser utilizada para a estimativa do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica Experimental do Glória, quando o objetivo for o cálculo da vazão máxima.

O método SCS também foi aplicado a partir dos cálculos de precipitação efetiva por meio da Equação 10 e tempos de concentração e de pico por meio das Equações 21 e 22, corrigindo-se os valores de vazão máxima a partir das precipitações efetivas de cada evento. Os valores de precipitação efetiva, obtida com base nos valores potenciais de armazenamento e na precipitação total de cada evento estão dispostos na Tabela 15.

TABELA 15: Precipitação efetiva calculada pela equação proposta pelo método SCS

Data	Precipitação efetiva pelo método SCS (mm)
31/10/2015	1
03/11/2015	0,924
07/11/2015	2,993
06/12/2015	1,023
20/12/2015	5,803
26/12/2015	0,768
28/12/2015	0,481
04/01/2016	0,078
19/01/2016	1,76
09/02/2016	0,51
16/02/2016	3,734
29/02/2016	0,454
10/03/2016	5,864
14/03/2016	1,567

A recomendação de considerar o tempo de pico como 60% do tempo de concentração (NEH, 2016) foi aplicada na obtenção de t_p , e o tempo de pico utilizado no cálculo de vazão máxima levou em consideração a duração da precipitação efetiva, seguindo a metodologia sugerida pelo SCS e considerando a importância da duração e intensidade da precipitação na vazão máxima.

Desta forma, o tempo de concentração encontrado foi de 3,34 horas e o tempo de pico, obtido a partir da duração da precipitação efetiva, foi de 2,24 horas. No cálculo da vazão máxima o valor de precipitação unitária considerado foi 1, resultando, a partir da aplicação da Equação 23 em um valor único de $0,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Este valor foi utilizado para obter a vazão máxima corrigida, a partir da sua multiplicação pelos valores de precipitação efetiva.

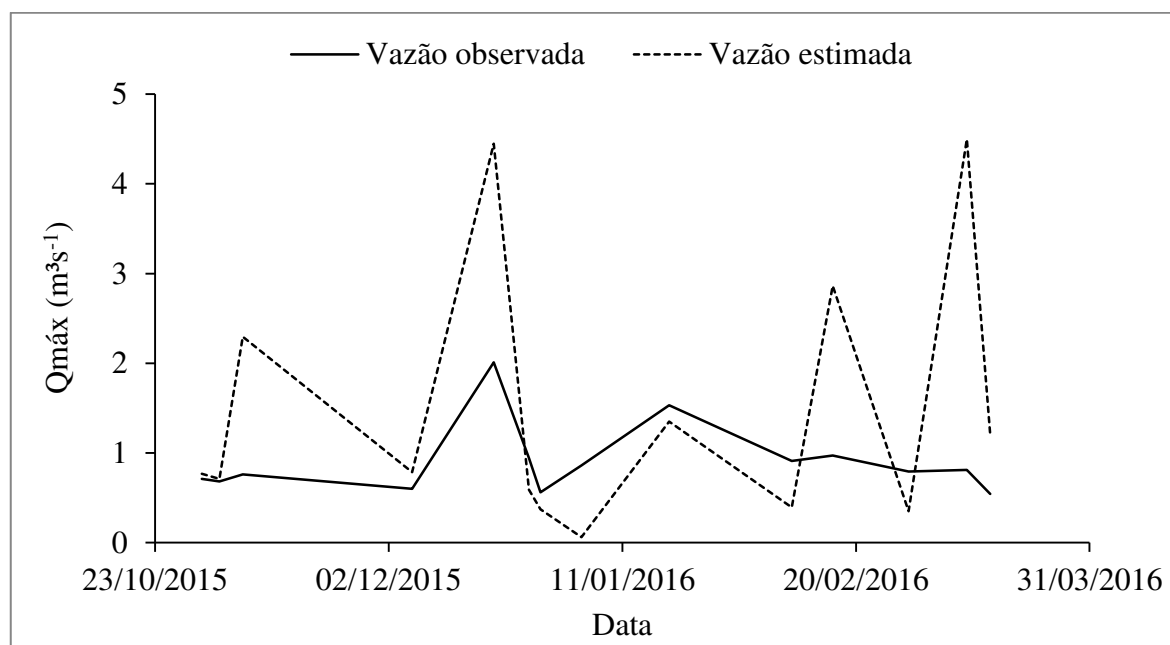
TABELA 16: Vazão máxima calculada pelo método SCS corrigida de acordo com os valores de precipitação efetiva e vazão máxima observada

Data	Vazão máxima corrigida ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Vazão máxima observada ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
31/10/2015	0,77	0,71
03/11/2015	0,71	0,68
07/11/2015	2,3	0,76
06/12/2015	0,78	0,60
20/12/2015	4,45	2,01
26/12/2015	0,59	0,94
28/12/2015	0,37	0,56
04/01/2016	0,06	0,86
19/01/2016	1,35	1,53
09/02/2016	0,39	0,91
16/02/2016	2,86	0,97
29/02/2016	0,35	0,79
10/03/2016	4,5	0,81
14/03/2016	1,2	0,54

O método SCS é aplicado de diferentes formas, e adaptado de acordo com diferentes realidades, como destacou Zanetti (2007), o que torna necessária a observação e análise criteriosa dos seus resultados.

As diferenças entre os valores de vazão máxima corrigida de acordo com a precipitação efetiva e os valores observados em cada evento também foram analisados e estão representados na Figura 26.

FIGURA 26: Gráfico de vazão máxima observada e estimada pelo método SCS corrigida de acordo com a precipitação efetiva obtida pelo mesmo método



Os erros absoluto e relativo também foram obtidos para os resultados de vazão máxima calculados com base em T_p e corrigidos de acordo com a precipitação efetiva. Os valores de erro estão dispostos na Tabela 17.

Esta última metodologia de aplicação sugerida pelo SCS apresentou menos ocorrência de subestimativas, além de valores de erro que mostram subestimativas pequenas e superestimativas também menores em relação aos resultados anteriores, o que pode tornar esta metodologia mais coerente, no caso da bacia estudada nesta pesquisa.

Observa-se que, a aplicação do método SCS para a bacia do Córrego Glória resulta em alguns valores subestimados de vazão máxima em eventos onde os valores, apesar de corresponder a vazões máximas, se mantêm em um patamar mais baixo. No entanto, a superestimativa ainda é predominante, o que pode ser observado mais detalhadamente na Tabela 17. A subestimativa de resultados de vazão máxima obtidos por meio do método SCS também ocorreu no trabalho de Santos (2010), ao comparar estes resultados aos encontrados por modelos probabilísticos.

TABELA 17: Erros absoluto e relativo da vazão máxima estimada pelo método SCS corrigida de acordo com a precipitação efetiva de cada evento

Data	Erro absoluto ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Erro relativo (%)
31/10/2015	0,06	8,01
03/11/2015	0,03	4,23
07/11/2015	1,54	201,98
06/12/2015	0,18	30,67
20/12/2015	2,44	121,34
26/12/2015	-0,35	-37,34
28/12/2015	-0,19	-34,11
04/01/2016	-0,8	-93,04
19/01/2016	-0,18	-11,79
09/02/2016	-0,52	-57,06
16/02/2016	1,89	195,16
29/02/2016	-0,44	-55,96
10/03/2016	3,69	455,1
14/03/2016	0,66	122,53
Média $ EA_i $ ¹	0,93	...
Média $ ER_i $ ²	...	102,02

Nota: ¹ Se refere a média dos resultados de erro absoluto, calculado a partir dos valores individuais de EA em módulo; ² Se refere a média dos resultados de erro relativo, calculado a partir dos valores individuais de ER em módulo; A simbologia “...” significa que o valor numérico não foi calculado

Já em casos onde a vazão máxima apresenta valores mais altos, como para os dias 20/12/2015 e 19/01/2016 (Tabela 17), por exemplo, os valores de vazão máxima são superestimados. A superestimativa da vazão máxima ocorreu de maneira predominante nos resultados da aplicação do método SCS utilizando equações empíricas de tempo de concentração. Estes casos de superestimativa poderiam, segundo Nakayama et al. (2011), explicar a aplicação deste método por muitos projetistas.

É importante ressaltar que, se tratando de vazão máxima, é arriscado utilizar métodos que subestimem a vazão, pois estes eventos podem não ser eficientes na previsão de ocorrências geradas por precipitações intensas, ou mesmo quando ocorre mudanças, temporárias ou permanentes, nas condições de permeabilidade da bacia. Por esta razão, métodos que apresentam recorrente tendência a superestimar a vazão máxima, como o método Racional, ainda são constantemente utilizados.

Há diversas outras questões a serem consideradas na aplicação dos métodos de estimativa de vazão máxima. Primeiramente, é importante destacar a imprecisão na determinação do número CN e do coeficiente de escoamento C, uma vez que os modelos foram desenvolvidos para bacias com características diferentes desta estudada.

Algumas variáveis importantes são consideradas em cada um dos modelos, como a intensidade máxima média da precipitação, no método Racional, e o potencial de armazenamento de água no solo, no método SCS, e diferentes resultados de aplicação destes métodos em diversas bacias, citados na bibliografia desta pesquisa. Isto mostra que os resultados esperados podem ter ou não determinado comportamento, o que varia de bacia para bacia.

Esta imprecisão na obtenção de informações mais confiáveis também ocorre nos dados observados. A ausência de mais de um pluviômetro para determinar com mais precisão a chuva incidente sobre a bacia e a ausência de um levantamento topográfico mais preciso e um mapeamento de tipos de solo mais detalhado.

4.2.3 Modelo matemático para a estimativa da vazão máxima na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória

Além dos métodos de estimativa citados na literatura, a vazão máxima também foi estimada utilizando uma equação modelada no software SigmaPlot 12. Foram utilizados dados de precipitação observados na bacia para essa estimativa, além da precipitação efetiva, dados estes que compõem a base de dados produzidos durante esta pesquisa. As variáveis testadas durante a geração do modelo estão na Tabela 18.

Entre as variáveis utilizadas, a que obteve melhor ajuste, ou seja, aquela a partir da qual foi possível gerar um modelo de estimativa da vazão máxima, foi o escoamento superficial direto, o que pode ser explicado pelo fato de este contribuir de maneira mais direta para o aumento da vazão, em relação à precipitação total. A partir desta variável foi feita uma regressão linear utilizando as duas variáveis (vazão máxima e escoamento superficial direto).

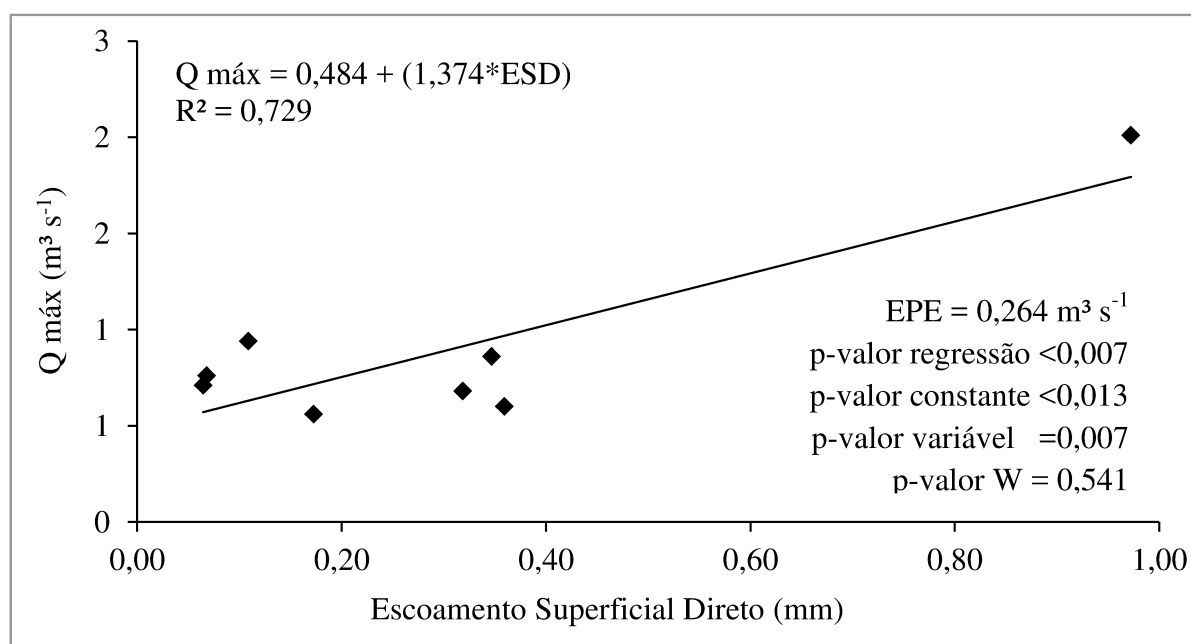
Realizados os testes estatísticos necessários para avaliar a equação mais adequada gerada a partir do conjunto de dados de calibração (de 31/10/2015 a 04/01/2016), foi selecionada a equação adequada, resultante de regressão linear. A equação foi aprovada no teste Shapiro – Wilk de normalidade dos resíduos.

TABELA 18: Parâmetros utilizados para produzir uma equação de estimativa de vazão máxima para a bacia do Córrego Glória

Data	P efetiva (mm)	P Total (mm)	Intensidade - P efetiva (mm/min)	Intensidade - P total (mm/min)	Intensidade máxima P total (mm/min)	Escoamento Superficial Direto
31/10/2015	0,06	12,4	0,014	0,5	0,8	0,06
03/11/2015	0,41	17	0,091	0,13	0,84	0,32
07/11/2015	0,1	5,6	0,02	0,37	0,64	0,07
06/12/2015	0,36	17,4	0,002	0,08	0,2	0,36
20/12/2015	0,45	29,8	0,045	0,19	0,84	0,97
26/12/2015	0,11	13,6	0,022	0,13	0,48	0,11
28/12/2015	0,23	15,4	0,046	0,44	1,08	0,17
04/01/2016	0,26	19,6	0,026	0,18	0,84	0,35
18/01/2016	0,56	20	0,111	0,1	0,76	0,81
09/02/2016	0,08	15,2	0,016	0,34	0,84	0,08
16/02/2016	0,92	3,8	0,02	0,1	0,32	0,1
29/02/2016	0,24	15,6	0,047	0,21	0,56	0,24
10/03/2016	0,34	16,8	0,068	0,19	0,8	0,34
14/03/2016	0,16	10	0,033	0,33	1	0,16

Nota: P = Precipitação

FIGURA 27: Equação para a estimativa da vazão máxima (Qmax) na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, a partir dos dados de escoamento superficial direto (ESD)

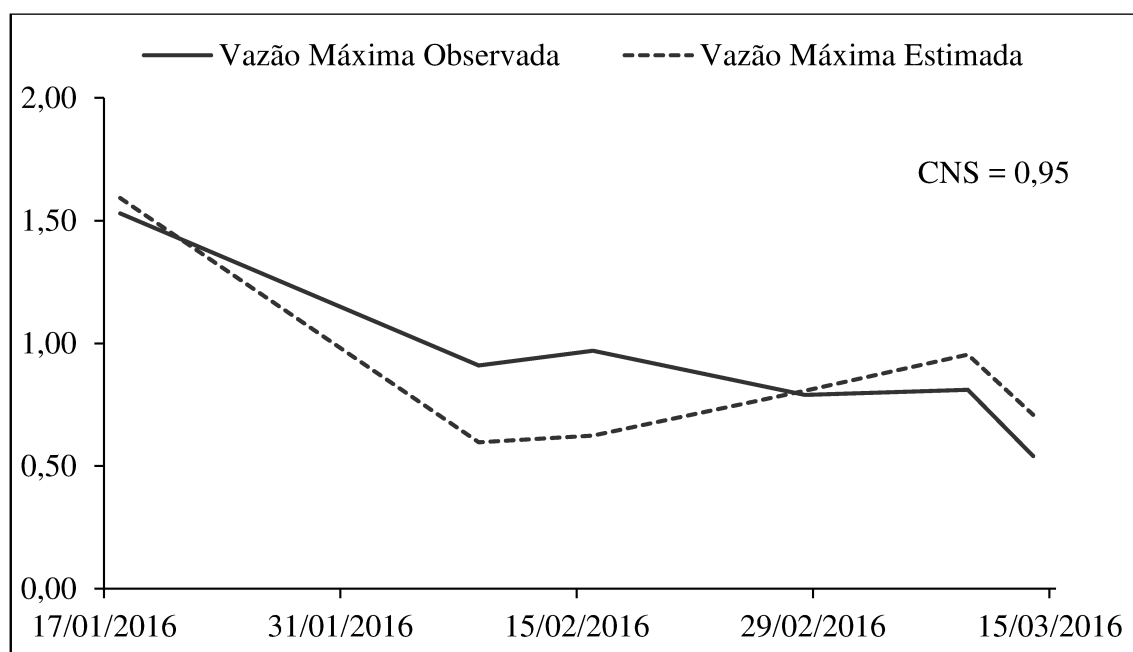


A equação, conforme explicitado na Figura 27 foi aprovada, apresentando valores abaixo de 0,05 no teste t dos coeficientes de regressão, coeficiente de determinação alto, erro padrão de estimativa relativamente baixa e normalidade nos resíduos da regressão (p valor $W > 0,05$).

Por meio da equação contida na Figura 27, foram estimadas as vazões máximas para os eventos do bloco de validação do modelo, a partir dos dados escoamento superficial direto de cada um destes eventos.

O cálculo de vazão por meio da equação selecionada foi realizado para os eventos selecionados para a validação do modelo (18/01/2016 a 14/03/2016). Para avaliar a adequação do modelo para estimativas de vazão, foi calculado o Coeficiente de Nash. De acordo com a classificação sugerida por Gotschalk e Motovilov (2000) citados por Viola (2008), o modelo é considerado de ajuste bom. A comparação entre os valores observados e estimados por meio da equação representada na Figura 28.

FIGURA 28: Gráfico de vazão observada e vazão estimada pela regressão linear



Analisando a Figura 28, verifica-se que os valores estimados por meio da equação gerada foram, na maior parte das vezes, muito próximos dos valores observados, o que permite constatar a eficiência da aplicação deste modelo.

5 CONCLUSÕES

Entre os modelos hidrológicos utilizados nas estimativas de vazão máxima, o método Racional apresentou resultados que superestimaram os valores de vazão máxima, para os dois tempos de concentração testados neste trabalho, Kirpich e Giandotti, sendo que a vazão máxima obtida com o tempo de concentração de Kirpich superestimou mais a vazão máxima em relação à obtida com tempo de concentração de Giandotti.

A aplicação do método HUT-SCS resultou em valores de vazão máxima superestimados, na maior parte dos eventos estudados. A vazão máxima obtida a partir do tempo de concentração de Giandotti e do tempo de pico SCS apresentaram menores valores de erro relativo (70,27% e 56,09%, respectivamente), o que não ocorreu quando utilizou-se o tempo de concentração de Kirpich (erro relativo de 94,96%,). A vazão máxima corrigida de acordo com a precipitação efetiva calculada pelo método HUT – SCS apresentou grande discrepância em relação aos valores observados (102,02%).

A equação produzida com base em um conjunto de dados preliminares por meio de regressão linear apresentou resultados satisfatórios, com um coeficiente de Nash que permite classificar bem o modelo. No entanto, verificou-se que ocorre uma subestimativa dos resultados para eventos que apresentam valores mais elevados de vazão máxima, o que deve ser considerado na aplicação desta equação para predição de eventos futuros.

Os resultados apresentados nesta pesquisa e as conclusões alcançadas são parte de um esforço preliminar e gradativo de aprimorar os conhecimentos hidrológicos para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória e acompanhar as alterações no comportamento de variáveis hidrológicas importantes, como a vazão máxima.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, I. K. Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.
- ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. E. M. Simulação chuva-vazão pelo método SCS com propagação em canal por Muskingum Cunge linear na bacia do Alto Uruguai. SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CENTRO-OESTE, 3., 2004, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2004, p. 1-21.
- BARBOSA JR, A. R. **Elementos de Hidrologia Aplicada**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.
- BONTA, J.V.; RAO, A.R. Estimating peak flows small agricultural watersheds. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.118, n.1, p.122-37, 1992.
- BRASIL. Câmara dos Deputados. Lei n. 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC. Autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm> Acesso em 20 de julho de 2016.
- BRASIL. Lei Federal n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política e Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm> Acesso em 20 de julho de 2016.
- CARVALHO, A. ; MAGALHÃES Jr, A. P . Revista Brasileira de Recursos Hídricos: Análise dos estudos recentes sobre recursos hídricos e suas conexões com a geografia física. São Paulo, **Geografias Online**, v. 11, p. 118-133, 2010.
- CAVALCANTI, D.L.O. **Estudo comparativo de métodos de estimativa de vazões máximas de projeto para grandes bacias hidrográficas**. 2014. 226f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.
- CECILIO, R.A.; PRUSKI, F.F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.3, p.501-504, 2003.
- FENNESSEY, L. A., HAWKINS, R. H. **The NRCS Curve Number, a New Look at an Old Tool**. Preceedings of the 2001 Pennsylvania Stormwater Management Symposium. Department of Civil and Environmental Engineering, Villanova University, Villanova, 2001.

- FERREIRA, A.L.M. **Caracterização Morfométrica das bacias hidrográficas e áreas inundáveis no Concelho de Pombal**. 2010. 156f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2010.
- FIDALGO, E. C. C. et al. Diagnóstico do meio físico das bacias hidrográficas do entorno da Mata do Carvão (BHMC), Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2005. 80 p.
- FIORIO, P. R. et al. Comparação de equações de chuvas intensas para localidades do Estado de São Paulo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.32, n.6, p.1080-1088, nov./dez. 2012.
- FRAGOSO Jr, C.R.; TUCCI, C.E.M. Estimativa da vazão máxima instantânea de projeto através de um modelo matemático. **Rhama**, Porto Alegre. p. 1- 18, 2005.
- FRANCISCO, S.A. **Estimativa de vazões máximas no Rio Benevente (ES) com auxílio de modelo chuva-vazão**. Centro Tecnológico – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2013.
- FRANCO, E.J. **Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no Método Racional**. 2004. 155f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.
- FREITAS, A. J et al. **Equações chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais; Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 65p.
- GENOVEZ, A.M. **Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.
- GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. da. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 103-120, 1998.
- GREPPI, M. **Idrologia**. Milano: Ed. Ulrico Hoepli, 2005. 371p.
- HEWLETT, J.D.; LULL, H.W.; REINHART, K.G. In defense of experimental watersheds. **Water Resources Research**, Washington DC, v.5, n.1, p. 306-316, 1969.
- HOEPFNER, A.C. **Estudo comparativo entre vazões de pico estimadas pelo método racional e pelo método do SCS para a bacia hidrográfica do Rio Bom Retiro em Joinville-SC**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- ILHA, M. S. O.; OLIVEIRA, L. H.; GONÇALVES, O. M. Sistemas de medição individualizada de água: como determinar as vazões de projeto para a especificação dos hidrômetros? **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.15 n.2, pág 177-186, abr/jun 2010.
- KRAUSKOPF NETO, R. **Atualização de modelos chuva-vazão- propagação com estimadores de estado**. 2005. 286f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.
- KUTNER, A. S.; CONTE, A. E.; NITTA, T. Análise Geológica e Caracterização dos Solos para avaliação do coeficiente de escoamento superficial na bacia do Alto Tietê.

In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14, 2001, Aracajú.
Anais... Aracajú: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

LING, L. YUSOP, Z. A micro focus with macro impact: Exploration of initial abstraction coefficient ratio (λ) in Soil Conservation Curve Number (CN) methodology. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE DIGITAL EARTH, 8, 2014, Sarawak.
Anais... Sarawak, Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2014.

LOUKAS, A. QUICK, M.C. Physically-based estimation of lag time for forested mountainous watersheds. **Hydrological Science Journal**, v.41, n.1, p.1- 19, 1996

MARINHO Filho, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI Junior, J. C.; MAGALHÃES Filho, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v.6, n.2, p. 35 a 47. 2012.

McCUEN, R. H., WONG, S. L., RAWLS, W.J., 1984, Estimating urban time of concentration, **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 110, n.7, ASCE, pp 887-904, 1984.

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

MELLO, C.R. et al. Silumação de deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 410-419, 2007.

MENDES, C. A. B. CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 536 p., 2001.

MINEO, M.M.P. et. al. Mapeamento Temático da Bacia do Córrego Gloria em Uberlândia, MG, utilizando o software IDRISI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEÓGRAFOS – SETENTA ANOS DA AGB: as transformações do espaço e a Geografia no século XXI, 6, 2004, Goiânia,. **Anais...** Goiânia, 2004, p 1-8.

MOPU Tecnologia Carreteras, 1987. **Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos em pequenas cuencas naturales**. Textos de la Direccion General de Carreteras, n 12, Espanha, 124 p.

MOREIRA, I.A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

MOTA, A.A., **Tempo de concentração em pequena bacia experimental**. 2012, 131f. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

MOTA, A.A.; KOBIYAM, M. Reconsiderações sobre a Fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, vol. 20 no.1, p. 55 – 59, jan./mar. 2015.

MOTA, J. L. O. Modelos Matemáticos y su Aplicación al Manejo de Cuencas Hidrográficas. In: CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACION, Culiacán, Sinaloa, México, 1999. Anais... Culiacán, 1999.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Superintendência Regional de Belo Horizonte, 2007.

NAKAYAMA, P. T. et al. Avaliação do parâmetro *cn* do método de Soil Conservation Service (SCS) nas bacias do Ribeirão dos Marins e Córrego Bussocaba – Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19, 2011, Maceió **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

NEH, National Engineering Handbook Hydrology. Natural Resources Conservation Service. Washington D.C. **United States Department of Agriculture**, 2016. Disponível em: <<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1043063>> Acesso em: 16 jan. 2017.

NISHIYAMA, L. Geologia do Município de Uberlândia e Áreas Adjacentes. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, n. 1, vl.1 p 9-16, junho. 1989.

OLIVEIRA, L.F.C. et al. Estimativas de chuvas intensas para o Estado de Goiás. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.22-33, jan./mar. 2008.

OLIVEIRA, P.C.A.; TIRADENTES, L.; Análise espacial da bacia hidrográfica do Córrego do Glória, Uberlândia – MG; **Revista Ponto de Vista**, Viçosa, v. 3, 2006.

PAULINO, P.F. **Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS para determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas**. 2014, 126f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

PAZ, A. R.; BUARQUE, D. C. ; COLLISCHONN, W. ; VICTORIA, D. C. ; ANDRADE, R. G. . Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x minibacias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 2011, Maceió. **Anais...** XIX SBRH, 2011.

PERALTA, A. S. **Análise de regionalização de vazão máxima para pequenas bacias hidrográficas**. 2003. 142f, Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2003.

PINTO, N. S. et al. **Hidrologia Básica**, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo - SP, 1976.

PONCE, V.M., and R.H. HAWKINS. Runoff Curve Number: Has it Reached Maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1 n.1 p.11-18, 1996.

PRUSKI, F.F.; et al. **Dimensionamento de sistemas hidroagrícolas**. Viçosa: Editora UFV. 2006. 259 p.

ROCHA, M.R et al. Mapeamento Geomorfológico do Triângulo Mineiro – Brasil. In: ENCONTRO DE GEOGRAFIA DA AMÉRICA LATINA, 8, 2001, Santiago. **Anais...** Santiago, 2001.

RODRIGUES, S. C. Mudanças ambientais na região do Cerrado. Análise das causas e efeitos da ocupação e uso do solo sobre o relevo. o caso da bacia hidrográfica do rio Araguari, MG. GEOUSP – **Espaço e Tempo**, São Paulo, n 12, p. 1-20, 2002.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n.6, p. 17-30,1992.

SANTOS, H. G, et al. **O Novo Mapa de Solos do Brasil Legenda Atualizada. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Solos.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, J. R. **Recursos Hídricos no Cerrado Brasileiro:** importância e contribuições da Educação Ambiental na preservação e no manejo sustentável. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SANTOS, L. C. C dos. **Estimativa de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos.** 2010. 172 f. Dissertação (Mestrado). Centro Tecnológico – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

SARTORI, A; GENOVEZ, A. M; LOMBARDI NETO, F. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos parte II: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n.4, p. 5-18. dez., 2005.

SHARIFI, S. AND HOSSEINI, S. Methodology for Identifying the Best Equations for Estimating the Time of Concentration of Watersheds in a Particular Region. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, n. 11, p. 712-719, nov. 2011.

SILVA, M. K. A da, **Modelagem hidrológica aplicada ao estudo de vazão da bacia hidrográfica do Rio Araguari – MG a partir das mudanças no uso da terra e cobertura vegetal nativa.** 2014, 195f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia

SILVA, R.V.; GRISON, F.; KOBAYAMA, M. Conceptual investigation of time of concentration: Case study of the Pequeno River watershed, São José dos Pinhais, PR, Brazil. In: TANIGUCHI, M.; BURNETT, W.C.; FUKUSHIMA, Y. HAIGH, M.; UMEZAWA, Y. (S.I) From headwaters to the ocean: hydrological changes and watershed management, **Taylor & Francis Group**, London, p. 271-275, 2009.

SILVEIRA, G. M., **Análise de sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição indireta.** 2010. 243 f. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

SOARES, M. R. G. J. et al. Potencial de Retenção de Águas Pluviais pelo Método “Curve Number”. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v, 7, n. 3, p. 476-485, 2014.

TEIXEIRA, C.F.A. et al. Vazão máxima de projeto: metodologia para dimensionamento de bueiros em áreas agrícolas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, n.17, p.49-56, Maio, 2011.

TOMAZ. P. **Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos para Obras Municipais, Comercial**. São Paulo: Hermano & Bugelli, 2002. 475p.

Tucci C.E.M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porgo Alegre: Ed. Universidade. UFRGS/ABRH, 1998. 669p.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima das bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.5, n.1, p.61-68, jan/mar, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2014.

USDA, United States Departament of Agriculture. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington D.C.: USDA, 1986.

VIOLA, M.R. **Simulação Hidrológica na Região Alto Rio Grande à Montante de Reservatório de Camargos/CEMIG**. 2008. 120f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

ZANETTI, S.S., **Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica da bacia do Rio Paraíba do Sul**. 2007, 135f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, 2007.