

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

JOÃO CARLOS PEREIRA MAIA

**TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM TRÊS BACIAS HIDROGRÁFICAS DE
UBERLÂNDIA, MINAS GERAIS**

Uberlândia - MG

2019

JOÃO CARLOS PEREIRA MAIA

**TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM TRÊS BACIAS HIDROGRÁFICAS DE
UBERLÂNDIA, MINAS GERAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Ambiental pelo Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho

Uberlândia - MG

2019

JOÃO CARLOS PEREIRA MAIA

**TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM TRÊS BACIAS HIDROGRÁFICAS DE
UBERLÂNDIA, MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Uberlândia, avaliado pela banca examinadora
formada por:

Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho (UFU)

Prof. Dr. Roberto Terumi Atarassi (UFU)

M.a. Márcia Regina Batistela Moraes (UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pelas oportunidades de realizações diárias, às quais não dou o devido valor, mas sei que a graça do Senhor se faz presente em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais Maria Pereira Caixeta e Carlos Antônio Pereira Maia por sempre estarem ao meu lado, por me apoiarem, e me ajudarem em todos os momentos que precisei. Obrigado por se sacrificarem tanto para que eu pudesse realizar meu sonho e pelos ensinamentos passados que me ajudaram a me tornar o homem que sou hoje.

A Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade do ingresso, e por me fornecer as bolsas de assistência estudantil que permitiram minha permanência na universidade, por meio da Diretoria de Assistência Estudantil (DIASE).

Ao Laboratório de Hidrologia (HIDRO) que cedeu suas instalações para que eu pudesse realizar minha pesquisa para o presente trabalho. Em especial à técnica de laboratório Márcia Regina Batistela Moraes, por compartilhar comigo os ensinamentos adquiridos durante toda sua carreira profissional, contribuindo de forma significativa para meu crescimento profissional e pessoal. Ademais agradeço aos alunos do Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental, Natália Gonçalves Mendes, Pedro Corsino Durant, dentre outros, por me auxiliarem no desenvolvimento da minha pesquisa e por compartilharem experiências da graduação e de trabalhos em campo. Ao meu orientador Dr. Hudson de Paula Carvalho, pelos ensinamentos compartilhados. Aos docentes do ICIAG-UFU por compartilharem de forma significativa seus conhecimentos e, assim, me capacitando a ser um profissional ético.

Aos meus grandes amigos e pessoas que eu vou levar para a vida, Joyce Maximiano, Patrícia Ferreira, Felipe Ferreira, Guilherme Costa, Michael Douglas, Arthur Dias, Lúcio Carlos, dentre tantos outros, que durante a graduação foram muito importantes para mim e com toda certeza sem eles eu não teria chegado aqui. Em especial à Ially Samilly Queiroz Entreportes que, além de amiga, foi uma companheira que, através da Universidade pude conhecer, e me ajudou a atingir o meu sonho de me graduar como bacharel em Engenharia Ambiental.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo quantificar o tempo de concentração em três bacias hidrográficas em Minas Gerais, comparando-o com dados empíricos resultantes do emprego de equações em estudos envolvendo hidrologia. Para obtenção dos resultados foi necessária a caracterização do uso e ocupação do solo na bacia, utilizando imagens multiespectrais com resolução mínima de 30 m. Concomitantemente, foram obtidas verdades de campo por meio de dispositivos GPS. Ademais, por meio desses dispositivos foram obtidos pontos cotados e a hidrografia que, juntamente com o modelo digital de elevação, possibilitaram traçar a malha hídrica das bacias hidrográficas estudadas. Para a obtenção dessas informações foi utilizado o software QGIS 2.18. Os estudos ocorreram nas Bacias Hidrográficas dos Córregos Glória, Água Vermelha e Fundo, sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari. As bacias já contavam com instrumentos para aferir o nível de água dos respectivos córregos e também pluviômetros. Como resultado desta pesquisa, verificou-se que a equação empírica de Simas-Hawkins apresentou o melhor desempenho para estimativa do tempo de concentração para a Bacia Hidrográfica do Córrego Glória, em relação aos dados obtidos com uso dos hidrogramas. Para a Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha a equação empírica de Izzard apresentou o melhor resultado, mesmo com um erro relativo de 37%, quando comparado aos valores obtidos pelos hidrogramas. Na Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo a equação empírica de Kirpich apresentou o resultado mais satisfatório.

Palavras-Chave: Bacia hidrográfica. Hidrograma. Tempo de concentração.

ABSTRACT

The present study aims to quantify the concentration time in three watersheds in Minas Gerais, comparing it with data empirical resulting using equations in studies involving hydrology. To attainment of results it was necessary the characterization of use and occupation of the ground in the basin, using multispectral images with a minimum resolution of 30 m. At the same time, were obtained truths of fields through GPS devices. Moreover, through these devices were obtained quoted points and the hydrography that, together with the digital elevation model, made enabled us to trace the water mesh of the studied watersheds. To attainment of these information, the QGIS 2.18 software was used. The studies occurred place in the Gloria, Água Vermelha and Fundo River Basins, sub-basins of the Araguari Watershed. The river basins already counted on instruments to assess the water level of the respective streams and also rain gauges. As a result of this research, it was found that the empirical Simas-Hawkins equation presented the best performance to estimate of the concentration time, for the Watershed of the Gloria Stream, in relation to the data obtained with the use of the hydrographs. For the Watershed of the Água Vermelha stream, the empirical Izzard equation presented the best result, even with a relative error of 37%, when compared to the values obtained by the hydrograms. In the Watershed of the Fundo stream the Kirpich empirical equation presented the most satisfactory result.

Keywords: River basin. Unit hydrograph. Concentration time.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos.....	16
3.	METODOLOGIA.....	16
3.1	Áreas de Estudo	16
3.1.1	Bacia Hidrográfica do Córrego Glória	16
3.1.2	Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha.....	18
3.1.3	Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo	19
3.2	Material Cartográfico e Imagem de Satélite.....	21
3.3	Monitoramento Hidrológico	22
3.3.1	Curva-chave	22
3.3.2	Hidrograma.....	22
3.4	Equações para Estimativa do Tempo de Concentração.....	23
3.4.1	Equação de Onda Cinemática	23
3.4.2	Equação de McCuen.....	24
3.4.3	Equação de Kirpich	24
3.4.4	Equação de Izzard.....	24
3.4.5	Equação do Soil Conservation Service Lag.....	24
3.4.6	Equação de Simas-Hawkins.....	24
3.4.7	Equação de Giandotti	24
3.5	Análise Estatística.....	25
3.6	Parâmetros	25

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Bacia Hidrográfica do Córrego Glória.....	28
4.2	Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha	35
4.3	Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo.....	41
5.	CONCLUSÃO.....	44
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bacia Hidrográfica do Córrego Glória.....	17
Figura 2: Uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória.....	17
Figura 3: Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha	18
Figura 4: Uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha.....	19
Figura 5: Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo.....	20
Figura 6: Uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo	20
Figura 7: Definição do tempo de concentração (tc) por meio do hidrograma.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de CN	25
Tabela 2: Valores do armazenamento de água no solo (Sscs).....	27
Tabela 3: Coeficiente de Rugosidade de Manning (n).....	27
Tabela 4: Valores do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Glória, obtidos através do hidrograma	28
Tabela 5: Tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória com base em quatro das equações empíricas estudadas	29
Tabela 6: Tempo de concentração da Bacia do Córrego Glória com base nas equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática.....	32
Tabela 7: Valores do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha, obtidos através do hidrograma.....	35
Tabela 8: Tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha com base nas equações empíricas estudadas	36
Tabela 9: Tempo de concentração da Bacia do Córrego Água Vermelha com base nas equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática	38
Tabela 10: Valores do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo, obtidos através do hidrograma	41
Tabela 11: Tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo com base nas equações empíricas estudadas	41
Tabela 12: Tempo de concentração da Bacia do Córrego Fundo com base nas equações de Izzard,	

McCuen e Onda Cinemática.....	43
-------------------------------	----

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica de um curso d'água é uma área de captação natural da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. É composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório. Bacia hidrográfica é, portanto, uma área definida topograficamente, drenada por um curso d'água ou por um sistema conectado de cursos d'água, de forma tal que toda a vazão efluente seja descarregada por uma simples saída (TUCCI, 2004).

As redes de drenagens fluviais ou rede hidrográfica são sistemas naturais capazes de drenar água superficial, em geral provenientes das chuvas. Estas redes de drenagem sempre tiveram um papel central nos estudos hidrológicos que procuram compreender a ocorrência, distribuição, movimentação da água e de suas propriedades. Designam-se os sistemas naturais ou artificiais aqueles capazes de drenar água superficial, atuando como importante registro das alterações ocorridas em seu interior, de forma a refletir, via de regra, as mudanças condicionadas por processos naturais ou atividades antrópicas, seja por meio das alterações na qualidade das águas, ou na própria configuração da rede de drenagem (DE SOUZA; SOBREIRA, 2017).

As bacias hidrográficas integram uma visão conjunta do comportamento das condições naturais, das atividades humanas e das mudanças nelas desenvolvidas (GUERRA e CUNHA, 2003). Conhecer o ambiente físico de uma bacia hidrográfica é essencial para subsidiar o processo de ocupação e manejo destas bacias, reconhecendo áreas de fragilidade natural e potencializadas pelo antropismo, sendo assim, conhecer as características morfométricas e físicas de uma unidade geoambiental permite o planejamento da ocupação do espaço de maneira mais sustentável (ALVES et al., 2014).

O conhecimento das características morfométricas de uma bacia hidrográfica é imprescindível para a conservação dos recursos hídricos, pois torna possível a compreensão do comportamento hidrológico e possibilita acompanhar as interferências nos processos do ciclo hidrológico e as respectivas respostas da natureza (FERREIRA et al., 2012). Desta forma, o

conhecimento das características morfométricas pode garantir maior eficiência das intervenções que venham a ser realizadas na bacia, facilitando o seu planejamento, conjuntamente com a possibilidade de poder conhecer e aderir a tecnologias adequadas ao manejo sustentável de áreas que compõem a bacia hidrográfica de modo a minimizar impactos ambientais e desastres naturais (CARELLI e LOPES, 2011).

Para GeorGIN, Oliveira e da Rosa (2015) além de conhecer as características morfométricas, a análise das características fisiográficas da bacia também são importantes fatores a serem observados, pois esses parâmetros podem revelar indicadores físicos específicos para determinado local, de forma a qualificarem as alterações ambientais. Consideram-se características fisiográficas aquelas que podem ser obtidas a partir de cartas, fotografias aéreas ou imagens de satélite. Hidrológicamente interessa caracterizar a bacia relativamente à geometria, sistema de drenagem, relevo, geologia, uso do solo e cobertura vegetal. Estas características físicas de uma bacia hidrográfica constituem elementos de grande importância para avaliação de seu comportamento hidrológico, pois, ao se estabelecerem relações e comparações entre eles e dados hidrológicos conhecidos, podem-se determinar indiretamente os valores hidrológicos em locais nos quais faltem dados.

Para determinar as particularidades de uma bacia hidrográfica é necessário conhecer o comportamento de uma variável no decorrer do tempo e do espaço, e suas transformações e agregações de fenômenos. Por consequência, pode-se prever o comportamento de uma variável em estudo e os seus efeitos em uma escala espaço-temporal. Entre os fenômenos ocorrentes, cita-se a transformação de precipitação em vazão. Esta transformação é um dos mais complexos fenômenos envolvidos em uma bacia hidrográfica, em virtude de diversas variáveis determinantes, como por exemplo, tipo de solo, uso e ocupação do solo, umidade do solo, declividade dos canais, forma da bacia, entre outros (PEREIRA et al., 2016). Cabe ressaltar que nenhum desses índices, isoladamente, deve ser entendido como capaz de simplificar a complexa dinâmica da bacia, a qual inclusive tem magnitude temporal (GEORGIN; OLIVEIRA; DA ROSA, 2015)

Quando a precipitação chega à bacia hidrográfica uma parte da água ficará retida no

terreno, outra parte infiltrará e o restante escoará pela superfície do solo, ocorrendo o escoamento superficial. O escoamento superficial é uma das parcelas do ciclo hidrológico mais importante, sendo utilizado como indicativo da adequabilidade do sistema de manejo de uma bacia hidrográfica. Ele ocorre após o início de um evento de chuva, e se efetiva quando a camada superior do solo, a vegetação e as depressões não têm mais capacidade de interceptar a água da mesma, resultando o seu escoamento. Sendo assim, o escoamento refletirá as características da precipitação e principalmente de sua intensidade (TUCCI, 1993). Portanto, o escoamento superficial é definido como o processo que ocorre após a intensidade da precipitação superar a capacidade de infiltração da água no solo e de serem preenchidos os orifícios da superfície pela água da chuva (LINSLEY et al., 1975).

O comportamento do ciclo hidrológico nessas unidades fisiográficas em função de diferentes usos e manejos do solo é um dos grandes desafios da hidrologia, sobretudo em microbacias hidrográficas que possuem comportamento hidrológico efêmero, ou seja, a presença do escoamento somente é verificada durante ou logo após a ocorrência da precipitação (MELLO; LIMA; SILVA, 2007).

A obtenção da rede de drenagem é um dos principais objetivos do processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE), os quais são usados em aplicações do sistema de Informações Geográficas (SIG), e estão inteiramente relacionados com a caracterização física de bacias hidrográficas e do sistema de drenagem. A partir da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica é possível definir várias informações, como as direções de fluxo, calcular as áreas de contribuição, a delimitação da bacia hidrográfica, a determinação da área de drenagem, as distâncias ao longo de caminhos de fluxo e redes de drenagem e a declividade do rio (PAZ e COLLISCHONN, 2007).

Uma dessas informações pode ser a determinação do tempo de deslocamento da água na superfície, posteriormente usado para estimar o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica. O tempo de concentração (t_c) refere-se ao tempo necessário para que a área de toda a bacia hidrográfica contribua com o fluxo no ponto de saída, ou seja, o tempo necessário em que a parcela que se precipita em um ponto remoto da bacia chegue até o exutório ou seção de

controle.

O t_c é uma grandeza fundamental para análises hidrológicas e compreensão do escoamento produzido em uma bacia hidrográfica. Sua magnitude influencia o pico e a forma do hidrograma de escoamento. Trata-se da variável de tempo mais conhecida e utilizada pelos engenheiros que atuam nas áreas de hidrologia e hidráulica e uma das mais importantes entradas de projetos hidrológicos de bacias hidrográficas. Sua importância destaca-se ainda pela utilização crescente em grande variedade de modelos hidrológicos modernos (GRIMALDI et al., 2012).

A obtenção das informações relacionadas à determinação do tempo de concentração, tem como pressuposto avaliar o padrão de comportamento das chuvas intensas no interior da bacia e a determinação do tempo necessário, a partir do início de uma determinada chuva, para que toda a área da bacia hidrográfica passe a contribuir com água para a vazão que se estabelece em seu exutório (McCUEN, WONG & RAWLS, 1984).

O t_c é uma variável muito importante no estudo do comportamento hidrológico de uma bacia, pois o seu valor é utilizado em diversas equações e metodologias para estimativa de vazões máximas ou de pico em um corpo hídrico, podendo ser utilizado em estudos de modelagem hidrológica e de engenharia para estimar transformação chuva-vazão e estudar cenários de mudança de uso e ocupação do solo, desmatamento, projetos de drenagem de águas pluviais, entre outros (DE CASTRO et al., 2015).

Diferentes formulações existem na literatura para estimar o t_c de uma bacia hidrográfica, levando-se em conta características como área, topografia, percentual de impermeabilização da bacia, uso do solo, coeficientes de rugosidade da superfície e dos rios, distâncias e declividades de caminhos de fluxo ao longo da superfície e ao longo dos rios, etc (SILVEIRA, 2005).

A maioria destas equações para estimativa do tempo de concentração em uma bacia hidrográfica são empíricas, o que exige que o desempenho das equações seja avaliado *in situ*. Diante da pluralidade de definições com simultaneidade de uso, estabelecer um único e confiável método de estimativa para o tempo de concentração torna-se um desafio. A falta de efetividade de medições diretas de t_c contribui para esse quadro de múltiplos caminhos de escolha e sem

referencial único. Ben-Zvi e Sheva (2013) chegam ao ponto de afirmar que a variável t_c é imensurável. Este posicionamento mais radical pode relacionar-se com as dificuldades de se realizarem medições práticas e precisas que considerem integralmente as várias definições e todos os seus pressupostos.

Mota (2012) avaliou diversas equações para a estimativa do tempo de concentração em uma bacia hidrográfica rural no Estado de Santa Catarina e verificou que as fórmulas existentes subestimaram os valores de tempo de concentração, apresentando erros maiores que 90% em relação ao tempo de concentração medido na bacia hidrográfica. No citado trabalho, a equação que mais se aproximou do tempo de concentração (t_c) medido foi a de Izzard.

Silveira (2005) avaliou o desempenho de vinte e três equações para estimativa do tempo de concentração em bacias urbanas e rurais, recomendando as equações de Ven Te Chow e Kirpich para as bacias rurais e a metodologia de Schaake, no caso de bacias urbanas com áreas abaixo de 70 hectares.

Em Silveira (2016) foram avaliadas dezenove equações para estimativa do tempo de concentração em uma bacia hidrográfica parcialmente urbanizada do município de Uberlândia/MG, verificando-se que a equação SCS Lag apresentou o melhor desempenho quando comparado aos tempos de concentração obtidos diretamente nos hidrogramas da bacia hidrográfica.

O tempo de concentração (t_c) é fundamental para a gestão de recursos hídricos, do manejo e uso do solo, obras hidráulicas e outros processos de engenharia. Deste modo, o presente estudo tem a finalidade de determinar o tempo de concentração, avaliando e comparando o desempenho de outros resultados obtidos com o emprego de equações normalmente usadas para a estimativa de tempo de concentração, em sub-bacias pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, no estado de Minas Gerais. Este estudo poderá contribuir para que os órgãos gestores dos recursos hídricos e comitês de bacia hidrográfica tenham maior segurança na concessão de outorgas de uso de recursos hídricos, racionalizando o consumo desse bem vital para a humanidade.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Quantificar o tempo de concentração em três bacias hidrográficas pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, em Minas Gerais.

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar o tempo de concentração, por meio do hidrograma, em três bacias hidrográficas pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, em Minas Gerais;
- Estimar o tempo de concentração nas citadas bacias, por meio de sete equações empíricas;
- Comparar os tempos de concentração obtidos nessas bacias com aqueles estimados por meio das equações empíricas, visando identificar aquela com melhor desempenho.

3. METODOLOGIA

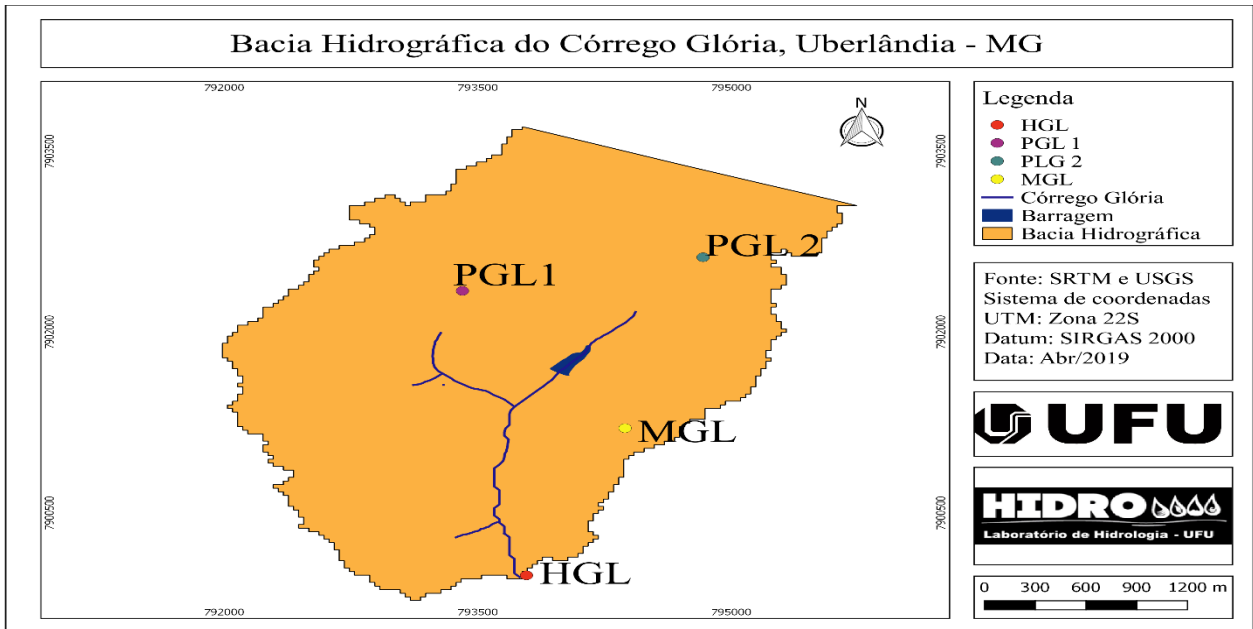
3.1 Áreas de Estudo

3.1.1 Bacia Hidrográfica do Córrego Glória

A Bacia Hidrográfica do Córrego Glória possui uma área total de 8,66 km² (Figura 1), localizada no setor nordeste da cidade de Uberlândia composta pelo Córrego Glória, afluente do Rio Uberabinha. O córrego Glória possui comprimento igual a 2,65 km de extensão e declividade de 0,03 m.m⁻¹. A bacia apresenta nove classes de uso predominante do solo (Figura 2), sendo área urbana sem pavimentação, área urbana pavimentada, cultivo anual, cultivo perene, pastagem pobre, pastagem boa, mata de galeria e represa, com áreas de 0,73; 1,04; 2,66; 0,51; 2,43; 0,41; 0,86 e 0,02 km², respectivamente.

O uso do solo é fator importante para se determinar o valor do número da curva média da bacia, que leva em consideração as diferentes características de ocupação da bacia.

Figura 1: Bacia Hidrográfica do Córrego Glória



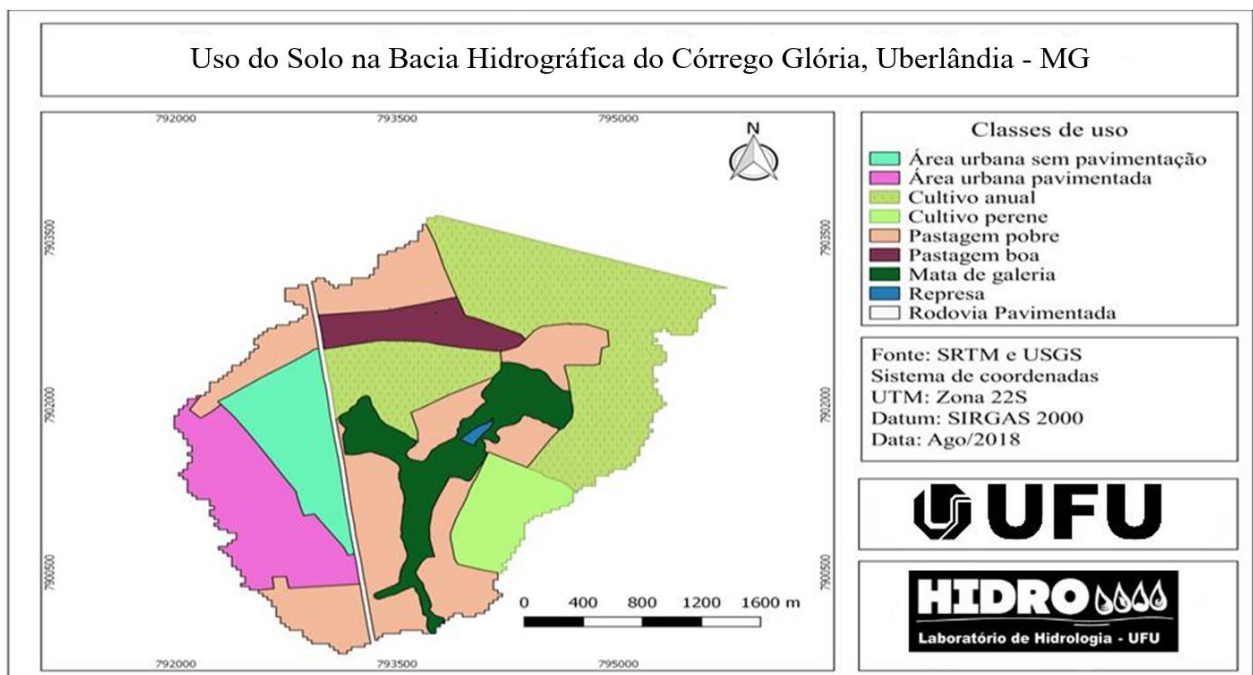
Fonte: O autor

¹ Nota: A sigla “HGL” indica a localização da estação hidrométrica na Bacia Hidrográfica do Córrego Glória.

² Nota: A sigla “MGL” indica a localização da estação meteorológica.

³ Nota: As siglas “PGL1 e PGL2” indicam respectivamente os pluviômetros 1 e 2 localizados na mesma bacia.

Figura 2: Uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória

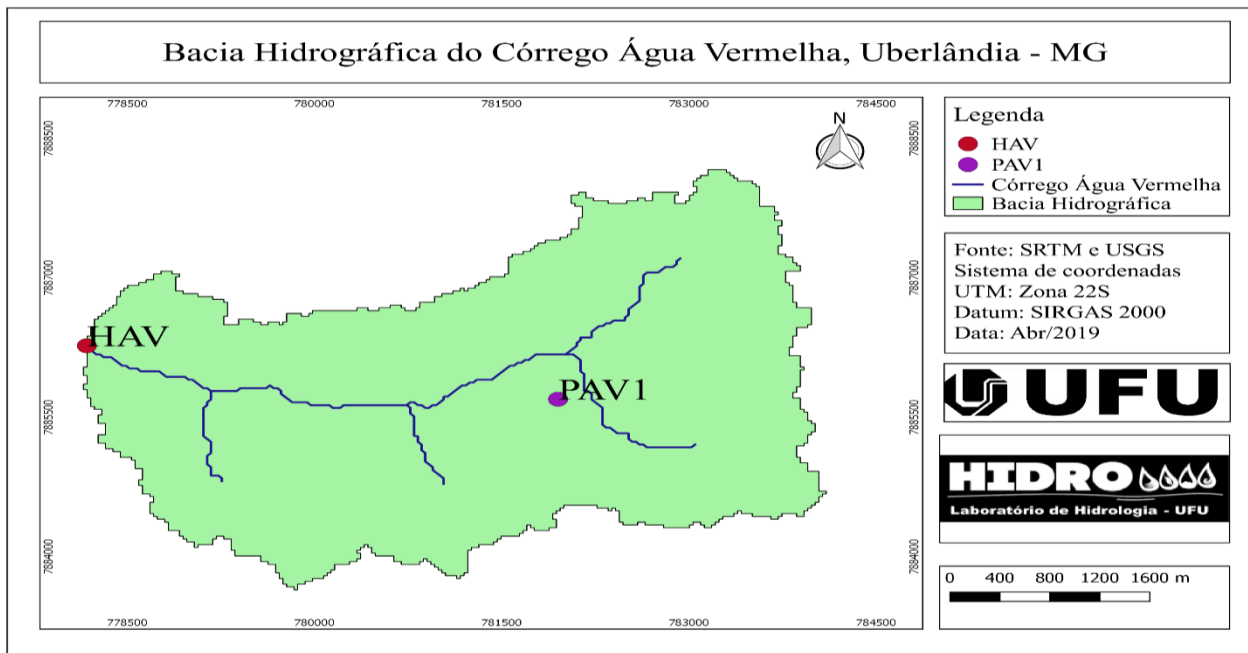


Fonte: O autor

3.1.2 Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha

A Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha possui uma área total de 16,35 km² (Figura 3), localizada no setor rural da cidade de Uberlândia, composta pelo Córrego Água Vermelha, afluente do Rio Paranaíba. O Córrego Água Vermelha possui extensão igual a 6,33 km e declividade de 0,01 m.m⁻¹. A bacia apresenta seis classes de uso predominante do solo (Figura 4), sendo área úmida, vegetação, agricultura anual, represa, pastagem boa e pastagem pobre, com áreas de 2,28; 3,45; 1,78; 0,02; 7,04 e 1,77 km², respectivamente.

Figura 3: Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha

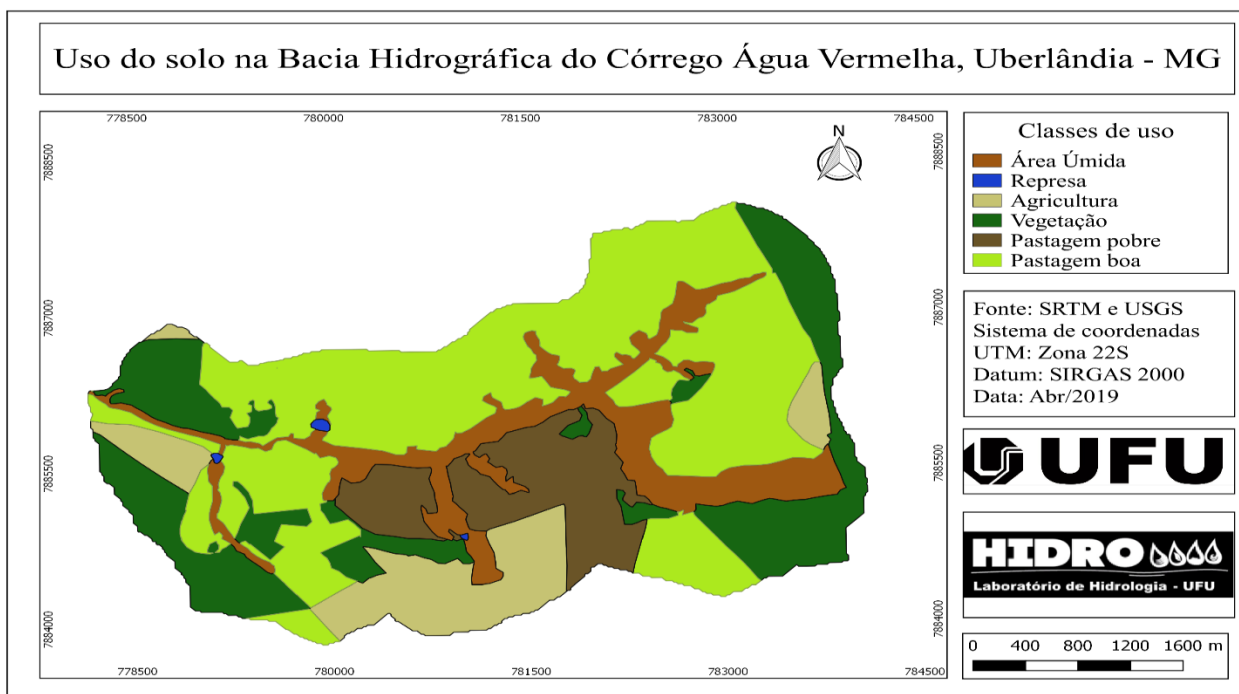


Fonte: O autor

¹ Nota: A sigla “HAV” indica a estação hidrométrica da bacia do córrego Água Vermelha.

² Nota: A sigla “PAV1” indica o pluviômetro localizado na mesma bacia.

Figura 4: Uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha

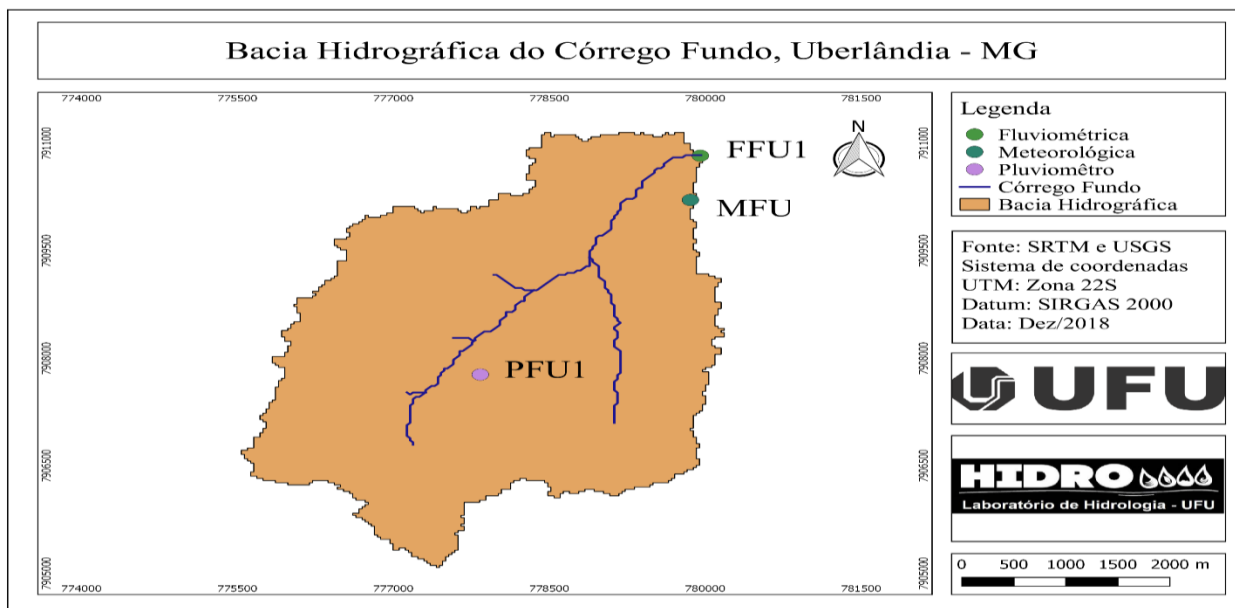


Fonte: O autor

3.1.3 Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo

A Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo possui uma área total de 17,80 km² (Figura 5), localizada no setor oeste da cidade de Uberlândia, tendo como principal formador o Córrego Fundo, afluente do Rio Uberabinha. O Córrego Fundo possui comprimento igual a 5,73 km e declividade de 0,02 m.m⁻¹. A bacia apresenta oito classes de uso predominante do solo (Figura 6), sendo área edificada, represa, vereda, pastagem boa, vegetação densa, cultura perene, cultura anual e rodovia pavimentada, com áreas de 3,42; 0,12; 1,70; 9,44; 2,20; 0,34; 0,40 e 0,19 km², respectivamente.

Figura 5: Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo



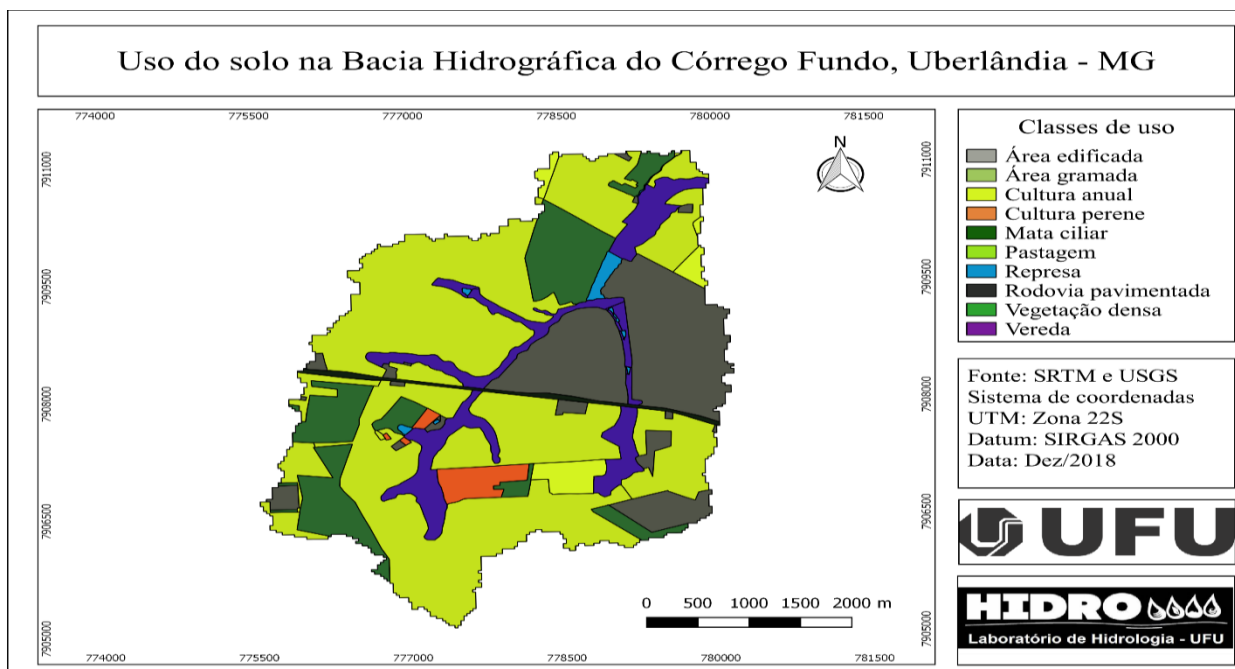
Fonte: O autor

¹ Nota: A sigla “FFU1” indica a localização da estação fluviométrica na Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo.

² Nota: A sigla “MFU” indica a localização da estação meteorológica na Fazenda Experimental Capim Branco.

³ Nota: A sigla “PFU1” indica a localização do pluviômetro na mesma bacia.

Figura 6: Uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo



Fonte: O autor

Os termos pastagem boa e pastagem pobre (utilizados na classificação do uso do solo), referem-se à classificação adotada pela Escola Americana de Manejo e Pastagem Nativa, em utilização de quatro classes de condição da pastagem, na qual a produtividade da planta forrageira em cada situação pode estar:

- Excelente: quando produz 75% a 100% de toda a forragem, sob um manejo prático e adequado;
- Boa: quando produz 50% a 75% de toda a forragem;
- Razoável: quando produz 25% a 50% de toda a forragem; e
- Pobre: quando produz menos que 25% de toda a forragem.

Ademais, a classificação de estações hidrométricas, fluviométricas e pluviométricas é definida como:

- Estações pluviométricas: são estações onde são realizadas as medições de precipitações diárias através de pluviômetros;
- Estações fluviométricas: são estações onde são observados os níveis d'água através de réguas linimétricas ou linígrafos. Sendo que a relação entre o nível d'água e a vazão na seção do curso d'água é obtida experimentalmente, através do levantamento da curva-chave; e
- Estações hidrométricas: são estações que contam do conjunto de sensores de chuva (pluviômetros) e sensores do nível d'água.

3.2 Material Cartográfico e Imagem de Satélite

Para a caracterização do uso do solo, declividade e cálculo de área das bacias hidrográficas, foi utilizada carta de relevo disponibilizada pelo site U.S. Geological Survey, em formato GEOTIFF, resolução espacial de 30 metros e em Sistemas de Coordenadas geográficas e Datum SIRGAS2000.

As cartas foram trabalhadas no software de Sistema de Informação Geográfica, denominado QGIS, obtendo-se a interpolação e informações complementares. Verdades de campo foram obtidas por meio de visitas em campo, para aferição da malha hídrica e

levantamento dos tipos de uso e ocupação do solo.

3.3 Monitoramento Hidrológico

Os parâmetros utilizados neste trabalho foram vazão e chuva, monitorados por meio das estações fluviométricas e pluviométricas instaladas nas bacias hidrográficas. As estações já se encontravam devidamente instaladas e em operação, não necessitando de aquisição de equipamentos ou instrumentos adicionais.

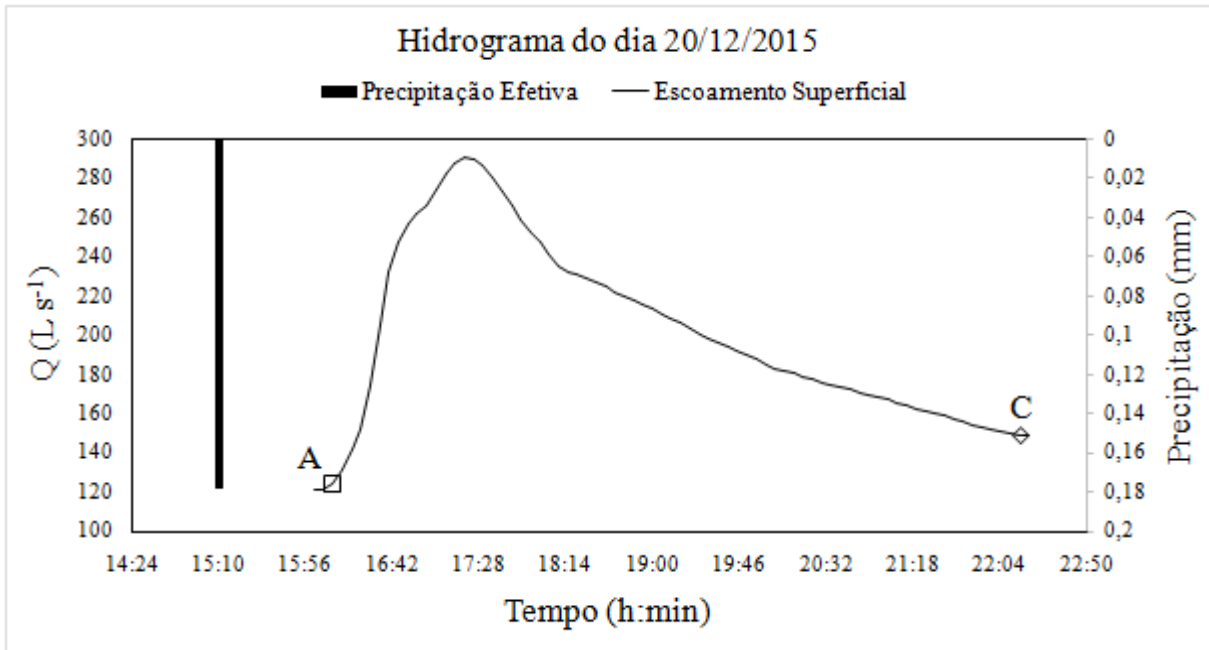
3.3.1 Curva-chave

Para obtenção da curva-chave utilizou-se do instrumento molinete o qual é comumente usado para medir a vazão de forma indireta. Por meio deste instrumento mede-se a velocidade da água em uma determinada seção do rio. O produto da velocidade *versus* a área da seção fornece a vazão do rio no ponto onde foram tomadas essas medidas. Após definidas as vazões e as cotas correspondentes, é possível construir a curva-chave.

3.3.2 Hidrograma

Segundo Silveira (2016), para determinar o tempo de concentração por meio do estudo de hidrogramas é necessário entender a sua configuração. Ele é caracterizado por três partes principais: região de ascensão, de pico e recessão. A região de ascensão (ponto A) está diretamente relacionada com a intensidade da precipitação. A região de pico abrange a área do valor máximo de vazão, marcada pelo final da fase de ascensão e início da fase de recessão. A região de recessão é decorrente da redução da precipitação que é marcada por um ponto de inflexão, tal ponto caracteriza o fim do escoamento superficial e início do escoamento subterrâneo. O tempo de concentração é definido como o tempo decorrente entre o fim da chuva efetiva (parte da precipitação que efetivamente participa do escoamento superficial) e o fim do escoamento superficial (ponto C), sendo possível observar de forma eficaz em um dos hidrogramas levantados neste estudo (figura 7).

Figura 7: Definição do tempo de concentração (tc) por meio do hidrograma



3.4 Equações para Estimativa do Tempo de Concentração

Neste estudo foram avaliadas sete equações empíricas, utilizadas para a estimativa do tempo de concentração (Equações 1 a 7), conforme parametrização citada em Silveira (2016).

3.4.1 Equação de Onda Cinemática

$$t_c = \frac{7,35 * n^{0,6} * L^{0,6}}{i^{0,4} * S^{0,3}} \quad (1)$$

Em que: t_c = tempo de concentração em min; n = n° Maning, representa a rugosidade do curso d'água principal em $m^{-1/3}$; i = intensidade da chuva na bacia hidrográfica em $mm\ h^{-1}$; L = comprimento do curso d'água principal, em km; S = declividade, dada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento L do percurso do rio principal da bacia, em mm^{-1} .

3.4.2 Equação de McCuen

$$tc = \frac{2,25 * L^{0,5552}}{i^{0,7164} * S^{0,2070}} \quad (2)$$

3.4.3 Equação de Kirpich

$$tc = \frac{0,0663 * L^{0,77}}{S^{-0,385}} \quad (3)$$

3.4.4 Equação de Izzard

$$tc = 85,5 * \left(\frac{i}{36286} + Cr \right) * L^{0,33} * i^{-0,667} * S^{-0,333} \quad (4)$$

Em que: Cr = coeficiente que considera a superfície da bacia, adimensional (tabelado);
L = comprimento do curso d'água principal, em km.

3.4.5 Equação do Soil Conservation Service Lag

$$tc = \frac{0,057 * \left(\frac{1000}{CN_m - 9} \right)^{0,7} * L^{0,8}}{S^{0,5}} \quad (5)$$

Em que: CN_m = curva número médio da bacia hidrográfica, adimensional.

3.4.6 Equação de Simas-Hawkins

$$tc = \frac{0,322 * A^{0,594} * S_{scs}^{0,313}}{L^{0,594} * S^{0,150}} \quad (6)$$

Em que: S_{scs} = armazenamento de água no solo pelo método do Soil Conservation Service (SCS, 1986), em mm; A = área da bacia, em km².

3.4.7 Equação de Giandotti

$$tc = \frac{0,0559 * (4 * A^{0,5} + 1,5 * L)}{L^{0,5} * S^{0,5}} \quad (7)$$

3.5 Análise Estatística

A análise estatística das sete equações empregadas neste estudo seguiu a metodologia dos erros absolutos e relativos, conforme explicitado nas equações 8 e 9. O erro absoluto é a diferença entre o valor medido e o valor real, enquanto que o erro relativo é dado pela razão do erro absoluto pelo valor mais verdadeiro ou provável, expresso em porcentagem.

$$EA = T_{C_{calc}} - T_{C_{obs}} \quad (8)$$

$$ER = \frac{EA}{T_{C_{obs}}} * 100 \quad (9)$$

Em que: EA = erro absoluto, em min.; ER = erro relativo, em %; $T_{C_{obs}}$ = tempo de concentração observado, obtido no hidrograma de cada bacia, em min.; $T_{C_{calc}}$ = tempo de concentração calculado em cada equação empírica, em min.

3.6 Parâmetros

Os parâmetros relacionados a cada bacia hidrográfica em estudo foram obtidos por métodos variados. Os valores de área (A), declividade (S) e comprimento do curso d'água principal (L), foram obtidos por meio do software livre de informação geográfica QGIS 2.18.16. A variável C_r da equação de Izzard foi adotada neste estudo como sendo 0,053, o que representa um valor médio entre aqueles indicados para gramado aparado e leivas de grama densa.

Segundo MELLO e SILVA (2013) os valores da curva número médio de cada bacia hidrográfica (\overline{CN}), podem ser obtidos levando-se em consideração as diferentes situações de uso do solo e grupos hidrológicos, conforme equação 10. Na Tabela 1 é possível observar os valores de CN que variam de 1 a 100.

Tabela 1: Valores de CN

Bacia Hidrográfica	Uso do Solo	Grupo Hidrológico do Solo	Área	CN
Água Vermelha	Área úmida	B	2,28	98

	Vegetação	B	3,45	55
	Agricultura anual	B	1,78	72
	Represa	B	0,02	98
	Pastagem boa	B	7,04	(Continua)
	Pastagem pobre	B	1,77	79
	\overline{CN}	-	-	68
	Área urbana	C	0,73	87
	s/pavimentação			
	Área urbana pavimentada	C	1,04	98
Glória	Cultivo anual	C	2,66	81
	Cultivo perene	C	0,51	81
	Pastagem degradada	C	2,43	86
	Pastagem boa	C	0,41	74
	Mata de galeria	C	0,86	70
	Represa	C	0,02	98
	\overline{CN}	-	-	84
	Área edificada	C	3,42	90
Fundo	Represa	C	0,12	98
	Vereda	C	1,70	74
	Pastagem boa	C	9,44	74
	Vegetação densa	C	2,20	70
	Cultura perene	C	0,34	83
	Cultura anual	C	0,40	82
	Estrada pavimentada	C	0,19	89
	\overline{CN}	-	-	77

Fonte: O autor

¹ Nota: Grupo hidrológico do solo B indica solos de textura arenosa ao longo do perfil e com moderada taxa de infiltração.

² Nota: Grupo hidrológico do solo C indica solos mais argilosos que aqueles do grupo B, com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância a erosões.

$$\overline{CN} = \frac{(A_1 * CN) + (A_2 * CN) + \dots + (A_n * CN)}{A_{bh}} \quad (10)$$

Em que: \overline{CN} = curva número médio da bacia hidrográfica, adimensional; A_{bh} = Área total da bacia hidrográfica, em km²; A_1 = área corresponde a determinado uso do solo, em km².

Outro parâmetro analisado foi o armazenamento de água no solo (S_{scs}), calculado através da equação 11, descrita pelo Soil Conservation Service (SCS, 1986). Os valores de (S_{scs}) em milímetros foram colocados na Tabela 2.

$$S_{scs} = \frac{25400}{\overline{Cn}} - 254 \quad (11)$$

Tabela 2: Valores do armazenamento de água no solo (S_{scs})

Bacia Hidrográfica	\overline{CN}	S_{scs} (mm)
Água Vermelha	68	119,53
Glória	84	48,38
Fundo	77	75,87

Fonte: O autor

Segundo PORTO (1998) o coeficiente de Manning representa a rugosidade do curso d'água, podendo ser determinado através da análise da natureza do local, conjuntamente com as condições. A Tabela 3 dispõe os valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n) para os respectivos córregos em estudo.

Tabela 3: Coeficiente de Rugosidade de Manning (n)

Córrego	Descrição	Coeficiente de rugosidade
Água Vermelha	Córrego com meandros, bancos e poços, limpos em condição regular	0,045
	Córrego com pedra e vegetação em condição regular	0,035
Fundo	Córrego com pedra e vegetação em condição regular	0,035

Fonte: O autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Bacia Hidrográfica do Córrego Glória

Para estimativa do tempo de concentração e da intensidade da chuva das bacias hidrográficas em estudo, foi realizada análise dos hidrogramas mais característicos, ou seja, aqueles onde é possível perceber a ascensão, o pico e a recessão de forma clara e bem pronunciada. Na Tabela 4 observam-se os valores obtidos por meio da análise dos hidrogramas para a Bacia Hidrográfica do Córrego Glória.

Tabela 4: Valores do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Glória, obtidos através do hidrograma

Data	Tc (min)	Data	Tc (min)
31/10/2015	90	12/03/2016	305
03/11/2015	240	25/03/2016	320
07/11/2015	100	16/05/2016	170
06/12/2015	460	03/06/2016	215
18/12/2015	240	20/01/2017	170
20/12/2015	425	17/10/2017	95
26/12/2015	300	01/11/2017	130
28/12/2015	260	06/11/2017	140
04/01/2016	255	13/01/2018	180
19/01/2016	305	31/01/2018	95
09/02/2016	180	04/02/2018	130
29/02/2016	165	02/03/2018	180
01/03/2016	225	Média	215
		Desvio padrão	98

Fonte: O autor

Na Tabela 5, estão dispostos os valores estimados do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória, obtidos por meio de quatro equações empíricas em estudo.

Tabela 5: Tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória com base em quatro das equações empíricas estudadas

Equação Empírica	Tc (min)	Erros	
		Absoluto (min)	Relativo (%)
Giandotti	195	- 20	- 9
Kirpich	34	- 181	- 84
SCS Lag	275	60	28
Simas-Hawkins	225	10	5

Fonte: O autor

Com base nos dados estudados, a partir dos 25 hidrogramas levantados na Bacia Hidrográfica do Córrego Glória, foi possível estimar o valor médio do tempo de concentração na respectiva bacia, o qual obteve o valor de 215 minutos, ou seja, são necessários em média 215 minutos para que toda a precipitação da bacia contribua com a vazão no curso d'água principal, respectivo Córrego Glória.

Com base nos resultados obtidos através das equações empíricas, nota-se que aquela que apresenta pior desempenho refere-se à equação de Kirpich, com erro absoluto de 181 minutos e erro relativo de 84%. Um dos fatores que possibilita explicar o desempenho da equação para a bacia em estudo é que a equação de Kirpich utiliza como parâmetros apenas o comprimento e a declividade do curso d'água principal. Segundo Kibler (1982) a equação de Kirpich foi desenvolvida com base em sete bacias hidrográficas rurais para o Estado de Tennessee (EUA), as quais representavam bacias significativamente pequenas, com tamanho de até 0,45 km² e declividades elevadas que variam entre 3 a 10%, ou seja, áreas dezoito vezes menores que a área da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória. Desta forma, quando se extrapola o uso da equação de Kirpich para bacias maiores são esperados valores do tempo de concentração inferiores àqueles

que se estima em campo.

Um dos problemas mais recorrentes quando se estuda o tempo de concentração de bacias hidrográficas por meio de equações empíricas está relacionado ao fato de que as equações foram desenvolvidas para bacias com características morfométricas bem distintas. A equação de SCS Lag apresentou erro absoluto de 60 minutos e um erro relativo de 28%, que conforme supracitado pode relacionar-se com o fato de que esta equação não utiliza como parâmetro a área da bacia hidrográfica, sendo que o uso de parâmetros como área da bacia, declividade e comprimento do curso d'água, ou seja, parâmetros reais da bacia hidrográfica estudada amenizam possíveis erros na extrapolação de dados.

As equações de Simas-Hawkins e Giandotti apresentam os melhores resultados para o tempo de concentração estimado pelos hidrogramas (215 minutos), com erros absolutos de 10 e 20 minutos e erros relativos de 5 e 9%, respectivamente. Fica evidenciado que estas duas equações apresentam parâmetros concomitantes, sendo eles a área da bacia, comprimento e declividade do curso d'água, tendo como único parâmetro distinto o armazenamento de água no solo (equação de Simas-Hawkins), o que aproxima mais o valor do tempo de concentração ao estimado pelos hidrogramas.

É importante ressaltar que o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica leva em consideração diversos aspectos e características, ou seja, conforme a equação apresenta um maior número de parâmetros a serem considerados nos cálculos, tende-se a obter um valor mais próximo do tempo de concentração dos hidrogramas da bacia. Tendo conhecimento sobre os diversos fatores que contribuem para a variação do (tc) na bacia, este se torna um parâmetro hidrológico difícil de ser estabelecido. Para a Bacia Hidrográfica do Córrego Glória, recomenda-se a utilização das equações de Simas-Hawkins e Giandotti, as quais apresentaram os melhores resultados dentre as quatro equações descritas na tabela 5. Apesar da equação de Kirpich ser utilizada em larga escala em estudos hidrológicos no Brasil, para a presente bacia em estudo, a citada metodologia não apresentou desempenho satisfatório.

Na Tabela 6 estão dispostos os valores estimados do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória, obtidos por meio das equações de Izzard, McCuen e Onda

Cinemática que apresentam como parâmetro concordante a intensidade de chuva, a qual é obtida através de cada evento de chuva registrado na bacia. Desta forma, torna-se possível observar que valores de intensidade de chuva próximos devem apresentar tempos de concentração relativamente próximos.

Tabela 6: Tempo de concentração da Bacia do Córrego Glória com base nas equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática

Data	³ Tc (min)	Intensidade (mm h ⁻¹)	Izzard Tc (min)	Erros		McCuen Tc (min)	Erros		Onda Cinemática Tc (min)	Erros	
				¹ Abs(min)	² Rel(%)		¹ Abs(min)	² Rel(%)		¹ Abs(min)	² Rel(%)
31/10/2015	90	31,2	127	- 37	- 41	41	49	54	79	11	13
03/11/2015	240	7,56	323	- 83	- 35	115	125	52	138	102	42
07/11/2015	100	22,4	158	- 58	- 58	53	47	47	90	10	10
06/12/2015	460	4,75	440	20	4	160	300	65	167	293	64
18/12/2015	240	5,6	394	- 154	- 64	142	98	41	156	84	35
20/12/2015	425	11,18	249	176	41	87	338	80	118	307	72
26/12/2015	300	7,77	317	- 17	- 6	112	188	63	137	163	54
28/12/2015	260	26,4	142	118	46	47	213	82	84	176	68
04/01/2016	255	12,25	235	20	8	81	174	68	114	141	55
19/01/2016	305	6,42	360	- 55	- 18	129	176	58	148	157	52
09/02/2016	180	20,27	168	12	6	56	124	69	93	87	48
29/02/2016	165	12,48	232	- 67	- 40	80	85	52	113	52	31
01/03/2016	225	4,8	437	- 212	- 94	159	66	30	166	59	26
12/03/2016	305	4,65	446	- 141	- 46	162	143	47	168	137	45

(Continua)

Data	³ Tc (min)	Intensidade (mm h ⁻¹)	Izzard Tc (min)	Erros		McCuen Tc (min)	Erros		Onda Cinemática Tc (min)	Erros	
				¹ Abs(min)	² Rel(%)		¹ Abs(min)	² Rel(%)		¹ Abs(min)	² Rel(%)
25/03/2016	320	11,22	249	71	22	86	234	73	118	202	63
16/05/2016	170	3,86	505	- 335	- 197	185	- 15	- 9	181	- 11	- 7
03/06/2016	215	15,06	205	10	5	70	145	67	105	110	51
20/01/2017	170	3,86	398	- 228	- 134	143	27	16	157	13	8
17/10/2017	95	3,07	588	- 493	- 519	218	- 123	130	199	- 104	109
01/11/2017	130	6,76	348	- 218	- 168	124	6	5	145	- 15	- 11
06/11/2017	140	1	1241	- 1101	- 786	488	- 348	- 248	311	- 171	- 122
13/01/2018	180	4,56	452	- 272	- 151	164	16	9	170	10	6
31/01/2018	95	4,44	460	- 365	- 384	168	- 73	- 76	171	- 76	- 80
04/02/2018	130	2,46	681	- 551	- 424	256	- 126	- 97	217	- 87	- 67
02/03/2018	180	1,1	1165	- 985	- 547	456	- 276	- 153	299	- 119	- 66
Média	215	9,40	413	- 198	-92	151	64	30	154	61	28

Fonte: O autor

Nota: ¹Abs = Absoluto; ² Rel = Relativo; ³ Tempo de concentração (tc) da bacia com base nos hidrogramas (min)

Ao observa-se os valores de t_c obtidos por meio das equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática em relação ao tempo de concentração médio de 215 minutos da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória, estes apresentam erros absolutos de -198, 64 e 61 minutos, e erros relativos de -92, 30 e 28%, respectivamente. Os fatores que acarretam na justificativa de erros relativamente grandes podem ser decorrentes do fato destas equações terem sido desenvolvidas para bacias com características distintas. Silveira (2005) relata que a equação de Izzard é uma equação de pequena escala, assim como a equação Onda Cinemática, devido à dimensão dos seus experimentos, onde a equação de Izzard foi desenvolvida para comprimento do curso d'água (L) de até 0,02 km e a de Onda Cinemática para até 0,03 km, ou seja, comprimentos inferiores ao da bacia em estudo que é de 2,65 km.

Segundo McCuen et al (1984), a equação denominada com seu próprio nome, foi desenvolvida com dados de 48 bacias, com áreas entre 0,4 e 16 km², declividade menor que 4% e comprimento do curso d'água menor que 10 km², ou seja, características que se enquadram com a bacia em estudo, porém com a ressalva de que as bacias utilizadas para desenvolver a equação eram urbanas, diferente da Bacia Hidrográfica do Córrego Glória que possui apenas 20% do uso do solo com urbanização.

Diversos são os fatores que influenciam o t_c obtido pelas equações. Por exemplo, quando observamos a intensidade de chuva do dia 31/10/2015 que corresponde a 31,2 mm h⁻¹, nota-se que o t_c obtido pelo hidrograma da bacia corresponde a 90 minutos. Por outro lado, se observamos a intensidade de chuva do dia 06/11/2017, que corresponde a 1 mm h⁻¹, nota-se que o t_c obtido pelo hidrograma corresponde a 140 minutos, ou seja, um valor superior ao do dia 31/10/2015, sendo que esta data corresponde ao início do período chuvoso na bacia. Sabendo-se que no início do período chuvoso a intensidade de chuva tende a ter valores elevados, por consequência o t_c tende a apresentar valores menores. Consequentemente, quando ocorre chuva com intensidade baixa, o t_c apresenta valores maiores, pois é necessário um maior período de tempo para que a precipitação contribua para o aumento da vazão do córrego. Esse dado é claramente observado na tabela 6, onde o t_c obtido para o dia de maior intensidade (31,2 mm h⁻¹), de acordo com as equações, correspondem a 127, 41 e 79 minutos, respectivamente. E, ao

analisar o dia de menor intensidade (1 mm h^{-1}), de acordo com as equações, correspondem respectivamente a 1241, 488 e 211 minutos, corroborando com a relação matemática em que, quanto maior a intensidade menor o t_c , e vice-versa.

4.2 Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha

Na Tabela 7 observam-se os valores obtidos por meio da análise dos hidrogramas para a Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha.

Tabela 7: Valores do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha, obtidos através do hidrograma

Data	Tc (min)	Data	Tc (min)
26/12/2016	505	08/04/2017	545
29/12/2016	685	13/04/2017	570
09/01/2017	660	16/05/2017	690
11/01/2017	475	22/05/2017	665
12/01/2017	680	16/10/2017	745
15/01/2017	615	30/12/2017	620
19/01/2017	560	13/01/2018	585
31/01/2017	595	12/02/2018	535
04/02/2017	595	17/03/2018	640
22/02/2017	590	03/04/2018	620
27/02/2017	685	19/05/2018	610
01/03/2017	595	15/06/2018	670
05/03/2017	625	Média	618
06/04/2017	695	Desvio padrão	64

Fonte: O autor

Na Tabela 8 estão dispostos os valores estimados do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha, obtidos por meio de quatro equações empíricas em

estudo.

Tabela 8: Tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha com base nas equações empíricas estudadas

Equação Empírica	Tc (min)	Erros	
		Absoluto (min)	Relativo (%)
Giandotti	335	- 283	- 46
Kirpich	96	- 522	- 85
SCS Lag	1064	446	72
Simas-Hawkins	301	- 317	- 51

Fonte: O autor

Para a Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha, estimou-se o tempo de concentração através de 26 hidrogramas construídos a partir de dados da bacia, estimando-se o valor médio do tempo de concentração igual a 618 minutos. Apesar de a equação de Kirpich estar entre as mais utilizadas para estimativa do tempo de concentração no Brasil, esta apresentou baixo desempenho na estimativa do tc na Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha. Segundo Kobiyama et al (2006), a equação de Kirpich quando extrapolada para áreas maiores do que as áreas originais do estudo tende a apresentar valores de tc menores, quando comparado ao valor estimado pelo hidrograma.

Para a Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha, as equações empíricas aplicadas neste estudo não apresentaram desempenhos satisfatórios, próximos aos valores estimados com dados de campo. As equações de Giandotti e Simas-Hawkins apresentam valores discrepantes da realidade, com erros absolutos de 283 e 317 minutos, e erros relativos de 46 e 51% respectivamente, tornando o uso destas equações inviáveis para a Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha, pois apresentam valores abaixo do determinado pelo hidrograma. A equação de Giandotti foi desenvolvida na Itália, e pouco se sabe sobre o estudo que levou ao desenvolvimento desta equação, dificultando a análise de possíveis erros na aplicação desta equação para a bacia. Dentre as equações empíricas, a equação de SCS Lag foi à única que apresentou valor superior (1064 minutos) ao médio estimado de 618 minutos pelos hidrogramas.

Uma das explicações possíveis é que esta apresenta como parâmetro a curva número, que considera o tipo de cobertura do solo e o grupo hidrológico ao qual o solo pertence, o que influencia diretamente no escoamento da água e, conseqüentemente no tempo de concentração da bacia. Outro ponto importante, que possa contribuir com o erro relativo de -72% no uso desta equação têm relação com o fato de esta não apresentar como parâmetro a área da bacia, visto que a bacia apresenta área igual a 16,35 km², superior a área das bacias estudadas no desenvolvimento da equação de SCS Lag.

Dentre as bacias hidrográficas em estudo, a Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha, apresenta o maior tempo de concentração estimado, devido a esta ser uma bacia 100% rural, ou seja, há diversos caminhos para a água, o que ocasiona um maior tempo para que a precipitação da bacia contribua com a vazão do curso d'água principal na seção de controle.

Na Tabela 9 estão dispostos os valores estimados do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha, obtidos por meio das equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática que apresenta como parâmetro a intensidade de chuva, a qual pode ser analisada de acordo com cada evento de chuva registrado na bacia.

Tabela 9: Tempo de concentração da Bacia do Córrego Água Vermelha com base nas equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática

Data	³ Tc (min)	Intensidade (mm h ⁻¹)	Izzard Tc (min)	Erros		McCuen Tc (min)	Erros		Onda Cinemática Tc (min)	Erros	
				¹ Abs(min)	² Rel(%)		¹ Abs(min)	² Rel(%)		¹ Abs(min)	² Rel(%)
26/12/2016	505	30,43	238	267	53	84	421	83	208	297	59
29/12/2016	685	8,91	534	151	22	202	483	71	340	345	50
09/01/2017	660	3,72	953	- 293	- 44	378	282	43	483	177	27
11/01/2017	475	39,8	200	275	58	69	406	85	187	288	61
12/01/2017	680	9,5	512	168	25	193	487	72	332	348	51
15/01/2017	615	4,1	894	- 279	- 45	352	263	43	464	151	25
19/01/2017	560	43,5	189	371	66	65	495	88	181	379	68
31/01/2017	595	27	257	338	57	91	504	85	218	377	63
04/02/2017	595	14,36	389	206	35	143	452	76	281	314	53
22/02/2017	590	21,5	299	291	49	107	483	82	239	351	59
27/02/2017	685	9,56	510	175	26	192	493	72	331	354	52
01/03/2017	595	6	694	- 99	- 17	268	327	55	399	196	33
05/03/2017	625	11,5	451	174	28	168	457	73	307	318	51
06/04/2017	695	14,82	381	314	45	140	555	80	278	417	60

(Continua)

Data	³ Tc (min)	Intensidade (mm h ⁻¹)	Izzard Tc (min)	Erros		McCuen Tc (min)	Erros		Onda Cinemática Tc (min)	Erros	
				¹ Abs(min)	² Rel(%)		¹ Abs(min)	² Rel(%)		¹ Abs(min)	² Rel(%)
08/04/2017	545	28,06	251	294	54	89	456	84	215	330	61
13/04/2017	570	22,5	290	280	49	104	466	82	235	335	59
16/05/2017	690	8,25	562	128	19	213	477	69	351	339	49
22/05/2017	665	6,68	646	19	3	248	417	63	382	283	43
16/10/2017	745	19,02	324	421	57	117	628	84	251	494	66
30/12/2017	620	5,42	742	- 122	- 20	288	332	54	415	205	33
13/01/2018	585	4,07	898	- 313	- 54	354	231	39	466	119	20
12/02/2018	535	10,03	494	41	8	186	349	65	325	210	39
17/03/2018	640	9,31	519	121	19	196	444	69	335	305	48
03/04/2018	620	4,02	905	- 285	- 46	357	263	42	468	152	25
19/05/2018	610	9,22	522	88	14	197	413	68	336	274	45
15/06/2018	670	5,04	779	- 109	- 16	304	366	55	428	242	36
Média	618	14,47	517	100	16	196	421	68	325	292	47

Fonte: O autor

Nota: ¹Abs = Absoluto; ² Rel = Relativo; ³ Tempo de concentração (tc) da bacia com base nos hidrogramas (min)

Ao observa-se os valores de t_c obtidos por meio das equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática em relação ao tempo de concentração médio de 618 minutos da bacia do córrego Água Vermelha, estes apresentam erros absolutos de 100, 421 e 292 minutos, e erros relativos de 16, 68 e 47%, respectivamente, ou seja, se observamos os valores de t_c em relação somente aos valores médios da bacia, nenhuma das equações acima apresenta desempenho satisfatório. Porém ao observamos a intensidade de chuva de dias em específico e possível fazer algumas correlações, por exemplo: no dia 11/01/2017 ocorreu uma precipitação na bacia com uma intensidade de $39,8 \text{ mm h}^{-1}$, a qual gerou um t_c de 200 minutos na bacia. Por outro lado, se observamos a intensidade de chuva do dia 09/01/2017, que corresponde a $3,72 \text{ mm h}^{-1}$, nota-se que o t_c obtido pelo hidrograma corresponde a 953 minutos, ou seja, ao compararmos o dia de maior intensidade de chuva registrado nesta bacia, com aquele de menor de intensidade é perceptível notar uma diferença no tempo de concentração de 753 minutos. Apesar do evento de chuva ter ocorrido com uma diferença de apenas um dia, nota-se que quando ocorre uma chuva de baixa intensidade na localidade, o tempo que a precipitação demora a ocasionar um aumento na vazão no córrego da bacia é elevado, pois durante o percurso da água na bacia esta tende a ter perdas por infiltração, evaporação, e percolação da água no solo auxiliado pelo fato desta bacia ser 100% rural.

Se analisarmos os eventos de chuva que apresentam similaridade na intensidade nota-se que os valores de tempo de concentração irão apresentar valores aproximados. Ao observarmos o dia 13/01/2018 e 03/04/2018 estes apresentam intensidade de chuva de $4,07$ e $4,02 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente. Apresentam um tempo de concentração estimado pelo hidrograma da bacia de 585 e 620 minutos, corroborando com o fato de que eventos de chuva de intensidade similar apresentam t_c próximos, sendo o mesmo fator observado para os valores de t_c estimado pelas equações empíricas, onde para o evento de intensidade de $4,07 \text{ mm h}^{-1}$ os valores de t_c estimados pela equação de Izzard, McCuen e Onda Cinemática foram de 898, 354 e 466 minutos, respectivamente, enquanto que para o evento de chuva de intensidade de $4,02 \text{ mm h}^{-1}$ os valores encontrados foram de 905, 357 e 468 minutos.

4.3 Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo

Na Tabela 10 observam-se os valores obtidos por meio da análise dos hidrogramas para a Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo.

Tabela 10: Valores do tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo, obtidos através do hidrograma

Data	Tc (min)	Data	Tc (min)
24/10/2017	55	24/01/2018	35
28/10/2017	35	13/02/2018	50
04/11/2017	60	19/02/2018	110
17/11/2017	20	29/03/2018	35
04/12/2017	70	12/04/2018	40
22/12/2017	110	Média	56
25/12/2017	50	Desvio padrão	29

Fonte: O autor

Na Tabela 11, estão dispostos os valores estimados do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo, obtidos por meio das equações empíricas em estudo.

Tabela 11: Tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo com base nas equações empíricas estudadas

Equação Empírica	Tc (min)	Erros	
		Absoluto (min)	Relativo (%)
Giandotti	252	196	351
Kirpich	69	13	23
SCS Lag	639	583	1042
Simas-Hawkins	263	207	369

Fonte: O autor

Com base nos dados estudados, a partir de 12 hidrogramas estimou-se o valor do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo, que apresentou valor igual a 56 minutos. Confrontando com o que foi discutido anteriormente, a bacia do Córrego Fundo apresentou resultados diferentes das bacias anteriores, isto porque a equação de Kirpich apresentou o resultado com melhor desempenho para a bacia em estudo, conflitando com o fato de a equação de Kirpich ter apresentado um desempenho insatisfatório nas anteriores. A equação de Kirpich apresentou erro absoluto de -13 minutos e erro relativo de -23%, chegando ao valor de 69 minutos de tempo de concentração, ou seja, o mais próximo do valor estimado pelos hidrogramas.

Um dos motivos que justifica o bom desempenho desta equação para a bacia, esta relacionada ao fato de que uma parte significativa da bacia está urbanizada, o que contribui para que haja um aumento no escoamento superficial e, conseqüentemente, um menor tempo para que a precipitação na bacia ocasione um aumento na vazão do curso d'água. Além, de que, no estudo do desenvolvimento da equação de Kirpich, as bacias analisadas apresentavam pouco efeito de armazenamento, refletindo significativamente o tempo de escoamento laminar sobre a superfície. As demais equações de Simas-Hawkins, Giandotti e SCS Lag apresentaram valores elevados de t_c , justificado pelo fato de que ambas foram desenvolvidas para bacias rurais, onde há uma maior perda de água pela infiltração e menor escoamento superficial, ocasionando um maior tempo para elevação do nível d'água no córrego.

Na Tabela 12 estão dispostos os valores estimados do tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo, obtidos por meio das equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática que apresenta como parâmetro a intensidade de chuva, a qual pode ser analisada de acordo com cada evento de chuva registrado na bacia.

Tabela 12: Tempo de concentração da Bacia do Córrego Fundo com base nas equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática

Data	³ Tc (min)	Intensidade (mm h ⁻¹)	Izzard Tc (min)	Erros		McCuen Tc (min)	Erros		Onda Cinemática Tc (min)	Erros	
				Abs(min)	Rel(%)		Abs(min)	Rel(%)		Abs(min)	Rel(%)
24/10/2017	55	11,82	345	- 290	- 527	136	- 81	- 147	202	- 147	- 267
28/10/2017	35	15,76	285	- 250	- 714	111	- 76	- 217	180	- 145	- 414
04/11/2017	60	6,85	495	- 435	- 725	201	- 141	- 235	252	- 192	- 320
17/11/2017	20	13,54	315	- 295	- 1475	124	- 104	- 520	192	- 172	- 860
04/12/2017	70	7,42	469	- 399	- 570	190	- 120	- 171	244	- 174	- 249
22/12/2017	110	3,01	855	- 745	- 677	363	- 253	- 230	350	- 240	- 218
25/12/2017	50	2,59	944	- 894	- 1788	404	- 354	- 708	372	- 322	- 644
24/01/2018	35	2,81	895	- 860	- 2457	381	- 346	- 989	360	- 325	- 929
13/02/2018	50	11,64	348	- 298	- 596	138	- 88	- 176	204	- 154	- 308
19/02/2018	110	2,68	923	- 813	- 739	395	- 285	- 259	366	- 256	- 233
29/03/2018	35	2,61	940	- 905	- 2586	402	- 367	- 1049	370	- 335	- 957
12/04/2018	40	13,63	314	- 274	- 685	123	- 83	- 208	191	- 151	- 378
Média	56	7,86	594	- 538	- 961	247	- 192	- 343	274	- 218	- 389

Fonte: O autor

Nota: ¹Abs = Absoluto; ² Rel = Relativo; ³ Tempo de concentração (tc) da bacia com base nos hidrogramas (min)

Os valores de t_c obtidos por meio das equações de Izzard, McCuen e Onda Cinemática em relação ao tempo de concentração médio de 56 minutos da bacia do córrego Fundo, apresentaram erros absolutos de -538, -192 e -218 minutos, e erros relativos de -961, -343 e -389%, respectivamente, ou seja, não apresentam desempenho satisfatório para a bacia. Um fato importante a ser enfatizado no uso destas três equações empíricas para a bacia em estudo é o fato que todos os valores de t_c estimados por meio das equações superestimaram o valor de t_c real da bacia, sendo valores extremamente superiores, diferente do que foi observado nas bacias anteriores, onde houve valores superiores e valores abaixo do t_c estimado pelos hidrogramas da bacia.

A análise dos eventos de chuva que apresentam similaridade na intensidade leva a crer que os valores de tempo de concentração se apresentem próximos. Ao observarmos o dia 19/02/2018 e 29/03/2018 estes apresentam intensidade de chuva de 2,68 e 2,61 mm h⁻¹, respectivamente. Estes apresentam um tempo de concentração estimado pelo hidrograma da bacia de 110 e 35 minutos, contradizendo a ideia de que intensidades de chuva com valores próximos apresentam valores de t_c aproximados.

A Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo apresenta uma ressalva em relação às demais bacias em estudo, observado que a bacia conta com um maior número de represas no decorrer do curso d'água, onde estas retêm parte do escoamento superficial. Outro fator refere-se à quantidade de dados utilizados na média do t_c pelo hidrograma (doze eventos de chuva), sendo aproximadamente ½ do observado nas outras duas bacias estudadas, sendo necessário um maior tempo de estudo para ter-se uma conclusão mais assertiva.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o desempenho de sete equações empíricas para o estudo do tempo de concentração de três bacias hidrográficas experimentais pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, localizadas no triângulo mineiro. Para a Bacia Hidrográfica do Córrego Glória a equação empírica de Simas-Hawkins, apresentou o melhor desempenho (225 minutos) perante os valores obtidos pelos hidrogramas a partir de dados reais (média de 215 minutos). Na Bacia Hidrográfica do Córrego Água Vermelha a equação empírica de Izzard, apresentou o

desempenho mais satisfatório (387 minutos) diante do valor médio do tempo de concentração da bacia, obtidos através de dados coletados em campo (média de 618 minutos) e estudados através do hidrograma. Por fim, na Bacia Hidrográfica do Córrego Fundo a equação empírica de Kirpich, apresentou o melhor desempenho (73 minutos), quando comparado ao valor real médio (56 minutos).

É importante observar que os eventos de chuva analisados no decorrer deste estudo levou em consideração o período chuvoso e seco da região do Triângulo Mineiro/MG, gerando um valor médio do tc. Consequentemente se uma chuva ocorre num período de seca, o solo tende a absorver uma maior quantidade de água, ocasionando um tempo maior para que a precipitação influa no nível d'água do córrego. Ao mesmo tempo, em que uma chuva que ocorre sucessivamente a outra, tende a apresentar um maior escoamento superficial, visto que o solo encontra-se úmido, tendo pouca infiltração.

Conclui-se que para cada bacia hidrográfica existe uma determinada equação empírica que irá se ajustar melhor aos valores reais e reduzir extrapolações, observados que diversos são os fatores que afetam o tempo de concentração, dentre eles: forma da bacia, tipo de cobertura vegetal, declividade da bacia, comprimento do talvegue principal e o uso do solo. Desta forma, aconselham-se mais estudos relacionados ao desenvolvimento de equações empíricas específicas para cada bacia hidrográfica que for estudada, pois quando se trabalha com eventos da natureza é sempre difícil estabelecer exatidão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, M. T. **Análise morfométrica da bacia hidrográfica riacho Namorado, São João do Cariri-PB: uma ferramenta ao diagnóstico físico.** Revista de Geografia (UFPE), v. 31, n. 3, 2014.

BEN-ZVI, A.; SHEVA, B. **Bypassing determination of the time of concentration.** Journal of Hydrologic Engineering. Reston, p. 1674-1683. 7 dez. 2013.

CARELLI, L.; LOPES, P. P. **Caracterização fisiográfica da bacia Olhos D'água em Feira de Santana/BA: Geoprocessamento aplicado à análise ambiental.** Boletim Goiano de Geografia, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 43-54, 2011.

DE CASTRO, Victoria Lina Silva; LIMA, Dario Macedo; COSTA, Antônio Henrique Araújo; DA PAZ, Adriano Rolim. **Processamento de modelo digital de elevação para estimativa do tempo de percurso do escoamento superficial.** XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa-PB, p. 6305-6312, 27 abr. 2015. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1360.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2019.

DE SOUZA, Leonardo Andrade; SOBREIRA, Frederico Garcia. **Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Carmo: atributos morfométricos, equação de chuva intensa e tempo de concentração, e análise da suscetibilidade a inundação.** Revista Brasileira de Cartografica, Rio de Janeiro, ano 69, p. 1355-1370, 7 jul. 2017.

FERREIRA, R. G.; MOURA, M. C. O.; CASTRO, F. S. **Caracterização morfométrica da subbacia do Ribeirão Panquinhas, ES.** Enciclopédia Biosfera, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 2247-2256, 2012.

GEORGIN, Jordana; OLIVEIRA, Gislayne Alves; DA ROSA, Ana Lúcia Denardin. **Estudo comparativo de índices morfométricos relacionado com cheias nas bacias hidrográficas do alto Jacuí e Vacacaí - Vacacaí Mirim – RS.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1357-1364, 1 maio 2015. DOI 105902/2236117016834. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/e108/28d51d54ffe025034d86a09d0452c694f93f.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2019.

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; TAURO, F.; PORFIRI, M. **Time of concentration: a paradox in modern hydrology.** Hydrological Sciences Journal, v.57, n.2, p. 217-228, 2012.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente.** 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 394 p.

KIBLER, D. F. **Desk-top Methods for Urban Stormwater Calculation.** In : KIBLER, D. F.

(ed.), 1982, Urban Stormwater Hydrology, American Geophysical Union, Washington DC, pp 87-135, U.S.A.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; LINO, J.F.; SILVA, R.V. Time of concentration in the UFSC Campus catchment, Florianópolis-SC (Brazil), calculated with morphometric and hydrological methods. In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA E REGIONAL CONFERNECE ON GEOMORPHOLOGY. Goiânia: UFG, Anais, 2006, p. 1-11.

LINSLEY Jr., R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for engineers**. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1975.

McCUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. **Estimating urban time of concentration**. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 110, n.7, p. 887-904, 1984.

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

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. DA. **Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 4, p. 410–419, 2007.

MOTA, A.A. **Tempo de Concentração em Pequena Bacia Experimental**. f.131. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

PAZ, A.R.; Collischonn, W. **River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model**. Journal of Hydrology, v. 343, n. 3-4, p. 127-139, 2007.

PEREIRA, Marco et al. **Regionalização com geometria hidráulica e fractal: estudo de caso com hidrograma unitário instantâneo geomorfológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s.l.], v. 21, n. 2, p.347-359, 1 abr. 2016. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p347-359>.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 1.ed. São Carlos: EESC/USP, 1998. 540 p.

SILVEIRA, A. L. L. **Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em Bacias Urbanas e Rurais**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [S.l.], v. 10, n. 1, p. 5-23, Jan/Mar 2005.

SILVEIRA, L. B. P. **Tempo de concentração em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia-MG**. f.75. 2016. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2016.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Hydrology for small watersheds**. Technical Release 55. Springfield: United States Department of Agriculture, 1986.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 943 p.