

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação de Mestrado

**Desempenho de modelos de hidrograma unitário em duas bacias
hidrográficas com comportamento hidrológico contrastante**

Cristian Larri Pires Veber

Pelotas, 2016

Cristian Larri Pires Veber

**Desempenho de modelos de hidrograma unitário em duas bacias
hidrográficas com comportamento hidrológico contrastante**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Beskow

Pelotas, 2016

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

V394d Veber, Cristian Larri Pires

Desempenho de modelos de hidrograma unitário em duas bacias hidrográficas com comportamento hidrológico contrastante / Cristian Larri Pires Veber ; Samuel Beskow, orientador. — Pelotas, 2016.

113 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Cheias. 2. Modelagem hidrológica. 3. Monitoramento hidrológico. 4. Manejo de bacias hidrográficas. 5. Gestão de recursos hídricos. I. Beskow, Samuel, orient. II. Título.

CDD : 627

Elaborada por Aline Herbstrith Batista CRB: 10/1737

Cristian Larri Pires Veber

DESEMPENHO DE MODELOS DE HIDROGRAMA UNITÁRIO EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS COM COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO CONTRASTANTE

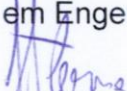
Dissertação de Mestrado aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico, da Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 12/08/2016

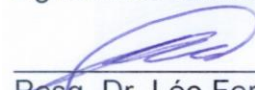
Banca examinadora:



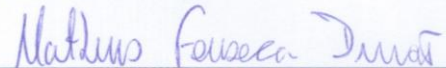
Prof. Dr. Samuel Beskow (Orientador)
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras



Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra
Doutor em Ciências (Solo e Nutrição de Plantas) pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo



Pesq. Dr. Léo Fernandes Ávila
Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras



Prof. Dr. Matheus Fonseca Durães
Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras



Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares
Doutor em Ciência e Tecnologia de Sementes pela Universidade Federal de Pelotas

Agradecimentos

A minha esposa Angélica e a minha filha Amanda pelo apoio e compreensão.

Ao orientador, Professor Dr. Samuel Beskow, pela paciência e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Professor Dr. Sérgio Leal Fernandes, do Departamento de Engenharia Rural/FAEM/UFPel, pela grande ajuda na realização do levantamento topográfico utilizado nas modelagens.

Ao Técnico em Hidrologia, Reginaldo Galski Bonczynski, pelo esforço nas saídas de campo, na ajuda na montagem e manutenção do sistema de medição.

Ao demais colegas de laboratório: Léo, Maíra, Tamara, Maurício, Marcelle, Eduardo, Daiana, Zandra, Laura e Gilvan.

“Existem três tipos de pessoas: as que se preocupam até a morte, as que trabalham até morrerem e as que se aborrecem até a morte.”

Winston Churchill

Resumo

VEBER, Cristian Larri Pires. **Desempenho de modelos de hidrograma unitário em duas bacias hidrográficas com comportamento hidrológico contrastante**. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

Alterações no meio ambiente e os efeitos naturais e antropogênicos resultantes têm chamado a atenção na comunidade científica em virtude do alto impacto sobre os ecossistemas, especialmente ligado a desastres naturais originados a partir de eventos extremos de precipitação. Uma das técnicas fundamentais, no que se refere ao gerenciamento dos recursos hídricos, do meio ambiente e, conseqüentemente, do manejo adequado de bacias hidrográficas, é a modelagem hidrológica. Contudo, uma das principais limitações de sua aplicação é a carência de dados hidrológicos, especialmente de vazões. Esta limitação tem estimulado o desenvolvimento e a calibração de modelos hidrológicos que possibilitam a estimativa do escoamento superficial direto (ESD). Neste sentido, as teorias do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI) têm se destacado no tocante à modelagem hidrológica de cheias. O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade de modelos conceituais (HUI de Clark – HUIC e HUI de Nash – HUIN), modelos sintéticos (HU Adimensional – HUA e HU Triangular - HUT) e modelos geomorfológicos (HUI Geomorfológico de Clark – HUIGC e HUI Geomorfológico de Nash – HUIGN) visando à estimativa de vazões de pico e de hidrogramas de ESD, tomando como base duas pequenas bacias hidrográficas experimentais (sanga Ellert – BHSE e ribeirão Lavrinha – BHRL), com características geomorfoclimáticas e comportamento hidrológico contrastantes. As informações básicas para este estudo foram obtidas a partir dos modelos digitais de elevação e de dados monitorados de chuva e vazão nas referidas bacias. As principais conclusões deste trabalho foram: a) Os modelos HUIC e HUIN foram os que tiveram melhor acurácia nas duas bacias hidrográficas; b) Os modelos HUA e HUT não foram adequados para a BHRL, mas estimaram de forma satisfatória a maioria dos eventos na BHSE; c) O HUIGC se sobressaiu em relação ao HUIGN para a BHSE, mas teve comportamento similar ao HUT e HUA; d) O HUIGN teve desempenho superior ao HUIGC, HUT e HUA para a BHRL.

Palavras-chave: cheias; modelagem hidrológica; monitoramento hidrológico; sistemas de informações geográficas; manejo de bacias hidrográficas; gestão de recursos hídricos.

Abstract

VEBER, Cristian Larri Pires. **Performance of unit hydrograph models in two watersheds with contrasting hydrological behavior. 2016.** 113 p. Dissertation (Master's Degree in Water Resources) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

Alterations in the environment and the resulting natural and anthropogenic effects have attracted attention in the scientific community due to the high impact on ecosystems, especially related to natural disasters originated from extreme precipitation events. Hydrological modeling is one of the main techniques used for the management of water resources, environment and watersheds. However, one of the major limitations of its application is the lack of hydrological data, primarily associated with stream flow. This limitation has stimulated the development and calibration of hydrological models intended for estimation of direct surface runoff (DSR). In this context, the theories of Unit Hydrograph (UH) and Instantaneous Unit Hydrograph (IUH) have stood out for the hydrological modeling of floods. The main objective of this study was to evaluate the applicability of conceptual models (Clark's IUH - CIUH and Nash's IUH - NIUH), synthetic models (Dimensionless UH - DUH and Triangular UH - TUH) and geomorphological models (Clark's Geomorphological IUH - CGIUH and Nash's Geomorphological IUH -NGIUH) for estimation of peak stream flows and DSR hydrographs, taking as reference two small experimental watersheds (Ellert Creek Watershed - ECW and Lavrinha Creek Watershed - LCW), which have contrasting geomorphoclimatic characteristics and hydrological behavior. The basic information for this study were obtained from digital elevation models and monitorated data (rainfall and stream flow) in these watersheds. The main conclusions of this study were: a) CIUH and NIUH models were those that resulted in the greatest accuracy for both watersheds; b) DUH and TUH models were not suitable for LCW, but estimated hydrographs satisfactorily for most of the events in ECW; c) CGIUH out performed NGIUH for ECW, but presented behavior similar to TUH and DUH; d) NGIUH had performance better than CGIUH, TUH and DUH for LCW.

Key-words: hydrological modeling; hydrological monitoring; geographic information systems; watershed management; management of water resources.

Lista de Figuras

Figura 1- Componentes principais do ciclo hidrológico	22
Figura 2– Localização da bacia hidrográfica da sanga do Ellert (BHSE), Rio Grande do Sul e do ribeirão Lavrinha (BHRL), Minas Gerais.....	30
Figura 3– Pontos cotados nas campanhas de campo na BHSE, para geração do MDEHC	32
Figura 4– Distribuição das classes de uso do solo da BHSE	34
Figura 5– Distribuição das classes de solo na BHRL. Fonte: Adaptado de Menezes (2009).....	36
Figura 6– Distribuição das classes de uso do solo na BHRL. Fonte: Adaptado de ÁVILA (2011).....	36
Figura 7- Estação pluviométrica, modelo RG ₃ -M, marca Onset, localizada próxima à seção de controle da BHSE, no município de Canguçu, Rio Grande do Sul	38
Figura 8- Ilustração da seção de controle da sanga do Ellert com o canal de seção conhecida, construído de alvenaria, onde foi inserido o sensor de medição do nível de água para monitoramento automático de nível d'água e também por réguas linimétricas	39
Figura 9 – Sensor de pressão instalado junto à estação pluviométrica, modelo RG ₃ -M, marca Onset, localizada próxima à seção de controle da BHSE, no município de Canguçu, Rio Grande do Sul, visando ao monitoramento da pressão atmosférica local.....	40
Figura 10 – Detalhes de instalação do sensor de pressão utilizado para o monitoramento da variação do nível d'água da BHSE	41
Figura 11 – Régua linimétrica instalada junto ao canal de seção conhecida construído na seção de controle da BHSE.....	42
Figura 12- Curva-chave para a seção de controle da BHSE.....	43
Figura 13- Estação meteorológica instalada no interior da BHRL, no município de Bocaina de Minas, Minas Gerais.....	44
Figura 14- Ilustração da seção de controle da BHRL, com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas da mesma seção.....	44
Figura 15- Curva-chave para a seção de controle da BHRL	45

Figura 16- Hidrogramas Unitários Triangular (cinza) e Adimensional (preto) a partir de dados hipotéticos	51
Figura 17 - Representação esquemática do processo de translação do Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark	55
Figura 18- Cascata de reservatórios utilizada no modelo de HUI de Nash	58
Figura 19- Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente, com resolução espacial de 1 metro, para a BHSE	63
Figura 20 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente, com resolução espacial de 30 metros, da BHRL	64
Figura 21- Distribuição das classes de valores de declividade do terreno da BHSE, de acordo com EMBRAPA (1979).....	65
Figura 22- Distribuição das classes de valores de declividade do terreno da BHRL, de acordo com EMBRAPA (1979).....	65
Figura 23- Isócronas para a BHSE considerando o tempo de concentração de 20 minutos.....	67
Figura 24- Isócronas para a BHRL considerando o tempo de concentração de 40 minutos.....	67
Figura 25 - Histograma tempo-área (HTA) empregado na modelagem do HUICG para BHSE	68
Figura 26 - Histograma tempo-área (HTA) empregado na modelagem do HUICG para BHRL.....	68
Figura 27–Ordem dos cursos d’água da rede de drenagem da BHSE segundo a classificação de Strahler (1952)	70
Figura 28 - Ordem dos cursos d’água da rede de drenagem da BHRL segundo a classificação de Strahler (1952)	70
Figura 29 – Áreas de drenagem considerando a ordem dos cursos d’água que compõem a rede de drenagem da BHSE.....	71
Figura 30 – Áreas de drenagem considerando a ordem dos cursos d’água que compõem a rede de drenagem da BHRL	71
Figura 31 - Curva ajustada, relacionando dados de velocidade e vazão obtidos em campanhas hidrológicas na BHSE (a) e na BHRL (b).....	90

Figura 32 - Hidrogramas de escoamento superficial direto estimados por diferentes modelos e o hidrograma de escoamento superficial direto observado na seção de controle da BHSE, considerando três eventos chuva <i>versus</i> vazão	93
Figura 33 - Hidrogramas de escoamento superficial direto estimados por diferentes modelos e o hidrograma de escoamento superficial direto observado na seção de controle da BHRL, considerando dez eventos chuva <i>versus</i> vazão	94

Lista de Tabelas

Tabela 1- Classes de declividade proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA, 1979).	33
Tabela 2 - Caracterização da rede de drenagem da BHSE e valores médios de razão de comprimento (R_L), razão de bifurcação (R_B) e razão entre áreas das bacias (R_A)	72
Tabela 3- Caracterização da rede de drenagem da BHRL e valores médios de razão de comprimento (R_L), razão de bifurcação (R_B) e razão entre áreas das bacias (R_A)	72
Tabela 4- Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheia, com destaque para a intensidade média (i_m), duração (D), precipitação total (P_{TOTAL}), vazão de escoamento superficial direto máxima (Q_{ESD_MAX}) para a BHSE.....	73
Tabela 5- Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheia, com destaque para a intensidade média (i_m), duração (D), precipitação total (P_{TOTAL}), vazão de escoamento superficial direto máxima(Q_{ESD_MAX}) para a BHRL	73
Tabela 6 - Características de cada hidrograma de ESD analisado na BHSE, com seus respectivos valores calibrados do Número da Curva (CN)	76
Tabela 7– Características de cada hidrograma de ESD analisado na BHRL, com seus respectivos valores calibrados do Número da Curva (CN)	76
Tabela 8- Parâmetros do modelo de HUA e HUT, considerando os eventos ocorridos na BHSE	81
Tabela 9- Parâmetros do modelo de HUA e HUT, considerando os eventos ocorridos na BHRL.....	81
Tabela 10- Parâmetros de ajuste para cada evento analisado na BHSE.....	84
Tabela 11- Parâmetros de ajuste para cada evento analisado na BHRL.....	85
Tabela 12- Parâmetros de ajuste do HUIN para a BHSE.....	87
Tabela 13- Parâmetros de ajuste do HUIN para a BHRL.....	88
Tabela 14 - Resultados encontrados para os parâmetros n e k do HUIN em estudos realizados em diferentes bacias hidrográficas.....	89
Tabela 15 - Velocidade empregada e valor determinado para o parâmetro k do modelo HUING considerando cada evento na BHSE	90

Tabela 16 - Velocidade empregada e valor determinado para o parâmetro k do modelo HUING considerando cada evento na BHRL.....	91
Tabela 17- Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento ocorrido na BHSE	96
Tabela 18- Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento ocorrido na BHRL	96
Tabela 19- Valores médios das estatísticas Nash-Stucliffe (C_{NS}) e erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo.....	98

Lista de Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AMC	AntecedentMoistureContent
BHRL	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavrinha
BHSE	Bacia Hidrográfica da Sanga Ellert
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CN	Número da Curva
ESD	Escoamento Superficial Direto
ESRI	Environmental Systems ResearchInstitute
HTA	Histograma Tempo-Área
HU	Hidrograma Unitário
HUA	Hidrograma Unitário Adimensional
HUI	Hidrograma Unitário Instantâneo
HUIC	Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark
HUIG	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorgológico
HUIGC	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark
HUIGN	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash
HUIN	Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash
HUT	Hidrograma Unitário Triangular
FDP	Função Densidade de Probabilidade
GD1	Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
SCS	SoilConservation Service
SIG	Sistema de Informações Geográficas
USDA	United States Departament of Agriculture
i_m	Intensidademédia
D	Duração
P_5	Precipitação antecedente dos 5 dias anteriores ao evento
P_{Total}	Precipitação total
Q_{ESD_MAX}	Vazão total

Lista de Símbolos

Q	Vazão
H	Nível da lâmina de água
K_{A-C}	Constante de depleção do método da reta A-C
P_e	Precipitação efetiva
P	Precipitação total
S	Capacidade de armazenamento de água no solo
I_a	Perdas por abstração inicial
CN	Número da Curva
λ	Coeficiente de abstração inicial
P_u	Precipitação efetiva unitária
Q_p	Vazão de pico unitária
t_a	Tempo de ascensão do hidrograma
t_b	Tempo de base do hidrograma
t_{lag}	Tempo de retardo da bacia hidrográfica
D	Duração da P_u
L	Comprimento do curso d'água principal
X	Declividade média da bacia hidrográfica
t_c	Tempo de concentração
S_0	Declividade média do talvegue
T_{lag1}	Metodologia T_{lag} com base em equação empírica
T_{lag2}	Metodologia T_{lag} com base no tempo de concentração
T_{lagobs}	T_{lag} observado
A	Área da bacia hidrográfica
T_e	Tempo de recessão
q	Vazão por unidade de precipitação efetiva unitária
t	Intervalo de tempo
X	Função de gama precisa do fator de pico
FP	Fator de pico
Q_{i+1}	Ordenada do HUIC
C_0	Coeficiente de ponderação do HUIC
C_1	Coeficiente de ponderação do HUIC

$R_{E(i)}$	Precipitação efetiva uniformemente distribuída
R	Coeficiente de armazenamento da bacia hidrográfica
t	Intervalo de simulação
$u(t)$	Ordenadas do HUI de Nash
k	Parâmetro do HUI de Nash
N	Parâmetro do HUI de Nash
Γ	Função gama
$m_{1(HUI)}$	Primeiro momento de HUI
m_{1S}	Primeiro momento do hidrograma de saída
m_{1E}	Primeiro momento do hidrograma de entrada
$m_{2(HUI)}$	Segundo momento de HUI
m_{2S}	Segundo momento do hidrograma de saída
m_{2E}	Segundo momento do hidrograma de entrada
Q_i	Vazão de escoamento superficial direto
P_i	Precipitação efetiva no intervalo de tempo i
R_A	Razão entre as áreas das bacias
R_B	Razão de bifurcação
R_L	Razão de comprimento
V	Velocidade dinâmica
C_{NS}	Coeficiente de Nash e Sutcliffe
ER_{Qp}	Erro relativo na estimativa de vazão de pico
$Q_{i_{obs}}$	Vazão observada do HESD no tempo $t=i$
$Q_{i_{est}}$	Vazão simulada do HESD no tempo $t=i$
$\overline{Q_{obs}}$	Vazão média observada
$\overline{Q_{est}}$	Vazão média simulada
Q_{pobs}	Vazão de pico observada

Sumário

1	Introdução.....	17
1.1	Objetivo geral	19
1.1.1	Objetivos específicos	20
1.2	Hipóteses.....	20
2	Revisão bibliográfica	21
2.1	Ciclo hidrológico e bacias hidrográficas	21
2.2	Eventos hidrológicos extremos.....	23
2.3	Sistemas de Informações Geográficas e recursos hídricos	23
2.4	Modelagem chuva-vazão	24
2.5	Teoria do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI) 26	
3	Material e métodos.....	29
3.1	Caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas.....	29
3.2	Monitoramento hidrológico.....	37
3.3	Determinação dos hietogramas de precipitação efetiva (P_e)	47
3.4	Modelagem do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI).....	49
3.4.1	Hidrogramas Unitários Triangular (HUT) e Adimensional (HUA)	50
3.4.2	Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC)	54
3.4.3	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIGC)	56
3.4.4	Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIN).....	57
3.4.5	Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUIGN)	60
3.5	Análise de desempenho	61
4	Resultados e discussão	63
4.1	Caracterização geomorfológica.....	63
4.2	Eventos hidrológicos empregados	73
4.3	Precipitação efetiva e hietograma	76

4.4 Modelagem do hidrograma unitário	80
4.4.1 Hidrogramas Unitário Adimensional (HUA) e Triangular (HUT)	81
4.4.2 Hidrogramas Unitário Instantâneo de Clark (HUIC)	84
4.4.3 Hidrogramas Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIGC)....	86
4.4.4 Hidrogramas Unitário Instantâneo de Nash (HUIN)	87
4.4.5 Hidrogramas Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUIGN)....	89
4.5 Desempenho dos modelos de Hidrograma Unitário (HU) e Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)	92
5 Conclusão.....	102
Referências	103

1 Introdução

Nos últimos anos, a alteração do meio ambiente mediante aos efeitos naturais e/ou antrópicos tem sido considerado um dos principais fatores responsáveis pelos diversos impactos ambientais ocorridos no mundo. Tais efeitos oriundos das condições naturais e, especialmente da ação antrópica, tem refletido diretamente na mudança do padrão climático do planeta, despertando extrema atenção da ciência e dos gestores ambientais, devido ao alto potencial do impacto ambiental dos ecossistemas e, conseqüentemente, à sociedade, à economia e principalmente ao meio ambiente (ÁVILA *et al.* 2014). Os referidos impactos decorrem da ocorrência de desastres naturais associados a eventos extremos de precipitação, tais como as inundações bruscas (enxurradas), inundações graduais (alagamentos), deslizamento de massas, dentre outros.

Os desastres naturais podem ocorrer em qualquer país devido aos fenômenos naturais que se desencadeiam, tais como tempestades, terremotos, vulcões ou, ainda, em função da vulnerabilidade do sistema social, sendo que, os maiores impactos oriundos dos desastres ocorrem em países em desenvolvimento, em que em sua maioria são motivados pelo elevado adensamento populacional e ocupação desordenada em áreas de risco (INPE, 2013).

Para Brunda e Shivakumar (2015), dentre os diversos tipos de desastres naturais, as inundações, de modo geral, são os de ocorrência mais frequentes, havendo grande tendência de aumento associado ao crescimento populacional e ocupação de áreas de risco, bem como aos efeitos decorrentes das mudanças climáticas que influenciam nos processos físicos associados ao ciclo hidrológico.

Uma das técnicas fundamentais no contexto do gerenciamento dos recursos hídricos, do meio ambiente e, conseqüentemente, dos desastres naturais, é a modelagem hidrológica. Sua aplicação é essencial no planejamento e na tomada de decisões referentes ao complexo processo das condições naturais e das ações antrópicas. Entretanto, um dos principais problemas para a sua aplicação é a carência ou a baixa precisão das séries históricas de variáveis hidrológicas, especialmente de vazões. Além disso, destaca-se o alto custo de aquisição dos respectivos dados, carência de informações sobre as bacias hidrográficas e a extensão de tempo requerida para obtenção das séries históricas.

Adicionalmente, sabe-se que a rede de monitoramento hidrológico no Brasil, especialmente em regiões críticas e vulneráveis, ainda é incipiente, isto é, constituída por uma pequena quantidade de postos hidrológicos com séries históricas, na maioria das vezes, de curta extensão. Outro aspecto relevante nesse contexto é que, na maioria das situações, somente médias e grandes bacias hidrográficas são contempladas com o monitoramento, visto que os principais aproveitamentos hidroenergéticos ocorrem nelas (BESKOW *et al.* 2016). Assim, existe uma limitação reconhecida de monitoramento de pequenas bacias hidrográficas, o qual é extremamente importante no dimensionamento de estruturas hidráulicas e na gestão de cheias.

Neste contexto, devido à carência e inexistência de séries históricas de dados fluviométricos, os quais são essenciais para a descrição e ao entendimento do comportamento hidrológico e o efeito de uma ocorrência de um evento de chuva intensa, tem estimulado o desenvolvimento de modelos hidrológicos com propósito da estimativa da vazão máxima e da sequência temporal de vazões oriundas de um evento de precipitação (BESKOW *et al.* 2015; CALDEIRA *et al.* 2015), servindo de subsídio para tal propósito.

Dentre esses modelos, comumente conhecidos como modelos determinísticos de chuva-vazão, o qual merece destaque pelo fato de ter sido empregado amplamente em hidrologia, é o hidrograma unitário (HU), proposto pelo engenheiro americano Le Roy K. Sherman em 1932. O HU, segundo Carvalho e Chaudhry (2001), apresenta alta versatilidade, partindo-se do pressuposto que a bacia hidrográfica é um sistema físico que apresenta comportamento linear e invariante no tempo, permitindo assim, a avaliação de uma resposta a um dado evento de precipitação. Logo, esse conceito foi aprimorado com a proposta de que a resposta da bacia seria independente da duração do evento, fazendo referência a uma precipitação efetiva unitária instantânea, definindo assim, o Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI).

O emprego dos modelos de HU e HUI tem sido difundido em muitos projetos nos últimos anos, principalmente aqueles com abordagem geomorfológica, para os quais os parâmetros necessários para o ajuste dos modelos, são obtidos por metodologias que não necessitam de séries históricas de vazões observadas, as quais apresentam carência, conforme supracitado, e são de difícil obtenção.

Contudo, devido ao fato de suas relações serem derivadas de dados observados em regiões com características específicas, é importante salientar uma maior atenção quanto à sua generalização, principalmente em relação às peculiaridades da região, aos processos hidrológicos contemplados e à qualidade dos resultados produzidos. Além do mais, é importante ressaltar que os respectivos modelos foram desenvolvidos em condições características de outros países, havendo, portanto, a premissa de calibração dos parâmetros de tais modelos para condições brasileiras.

Face ao exposto, o presente estudo assume ampla importância e aplicabilidade científica, uma vez que contempla duas importantes regiões do país, isto é, a região sul de Minas Gerais e extremo sul do Rio Grande do Sul, onde estão localizadas as duas bacias hidrográficas experimentais, com diferentes características fisiográficas. Além das diversidades específicas das bacias hidrográficas analisadas, é importante destacar o distinto padrão típico de ocorrência da precipitação em cada bacia, auxiliando na descrição e nas inferências dos complexos e diversos processos físicos associados na transformação da ocorrência da precipitação de forma concentrada numa bacia em vazão, isto é, a resposta da mesma de forma distribuída.

1.1 Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo geral avaliar a aplicabilidade de modelos conceituais, sintéticos e geomorfológicos, baseados nas teorias do hidrograma unitário e hidrograma unitário instantâneo, frente à estimativa de vazões de pico e hidrogramas de escoamento superficial direto, tomando como base duas pequenas bacias hidrográficas experimentais, dotadas de monitoramento hidrológico, e que são contrastantes no que concerne às características geomorfoclimáticas e ao comportamento hidrológico.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho do Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark e de Nash, nas versões ajustadas e geomorfológicas, e do Hidrograma Unitário Triangular e Adimensional, ambos sintéticos, baseado em hidrogramas e hietogramas observados nas bacias hidrográficas sanga Ellert (Rio Grande do Sul) e ribeirão Lavrinha (Minas Gerais), tendo estas bacias características geomorfoclimáticas discrepantes.
- Analisar se os modelos geomorfológicos expressam vantagens significativas na acurácia em relação aos modelos tradicionais sintéticos.
- Averiguar o impacto de duas metodologias para estimativa do tempo de retardo sobre a qualidade dos hidrogramas gerados com os modelos sintéticos.

1.2 Hipóteses

- O Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash e o Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark, ambos com base conceitual, apresentam desempenho superior aos demais modelos avaliados para a estimativa de hidrogramas.
- As versões geomorfológicas para os modelos de Clark e de Nash apresentam superioridade em relação aos modelos sintéticos tradicionalmente empregados;
- A equação proposta pelo Soil Conservation Service, baseada no Número da Curva, representa de forma mais adequada o tempo de retardo comparado à equação que considera somente o tempo de concentração.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Ciclo hidrológico e bacias hidrográficas

O ciclo hidrológico (Figura 1) corresponde ao movimento da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, nos seus diferentes estados (físico, líquido e gasoso) e nos diferentes ambientes do globo terrestre, isto é, atmosfera, oceano, solo, dentre outros. Tal ciclo possui importantes componentes que estão associados à dinâmica da água, dos quais destacam-se o escoamento superficial direto, a precipitação, a evapotranspiração, interceptação, os quais estão implicitamente relacionados aos complexos processos físicos responsáveis pelo ciclo.

No ciclo hidrológico, o ar da atmosfera é aquecido fundamentalmente pela radiação solar, que por sua vez causa a evaporação da água líquida e evapotranspiração das plantas, possibilitando a formação de nuvens na atmosfera por meio do processo físico denominado condensação. Assim, sob determinadas condições ideais de temperatura e pressão, a água pode retornar à superfície na forma de precipitação. A transpiração e a evaporação dos rios e lagos e oceanos, são os elementos responsáveis pelo fornecimento de vapor para atmosfera, que por sua vez, possibilita a formação de nuvens e a dinâmica do ciclo hidrológico.

Neste sentido, a precipitação que atinge a superfície do solo pode seguir diversos caminhos, isto é, pode infiltrar no solo, contribuindo assim para o abastecimento dos aquíferos ou, então, pode-se escoar sobre a superfície do solo, até atingir os oceanos e lagos, sendo um elemento responsável pelos grandes volumes de cheia nos diferentes cursos d'água.

A dinâmica da água após contato com o solo é influenciado por diferentes fatores, tais como, área da bacia, tipo de solo, relevo, tipo de precipitação predominante, dentre outros. Além disso, existem outros fatores, como o tipo de clima, vegetação existente, rocha (HORTON, 1932). Outro aspecto a ser destacado é a influência ou intervenção humana, a qual, sob determinadas circunstâncias, possuem impactos relevantes sobre o ciclo hidrológico. Deste modo, alterações naturais ou antrópicas das características naturais de uma bacia hidrográfica podem alterar significativamente sobre a magnitude dos valores de cada componente do ciclo.

Para Dufek e Ambrizzi (2008), o ciclo hidrológico é afetado, principalmente, por mudanças no regime de precipitação. Embora exista séries históricas relativamente longas, principalmente de precipitações, além do avanço do sensoriamento remoto para mapeamento de diferentes variáveis, destaca-se que a maioria de informações apresentam falhas e/ou são pouco representativas para uma dada região de interesse.

Portanto, o entendimento ou descrição do ciclo assume relevante importância no conhecimento da dinâmica da água, permitindo prever a geração ou resposta de uma dada bacia à ocorrência de eventos de precipitação.

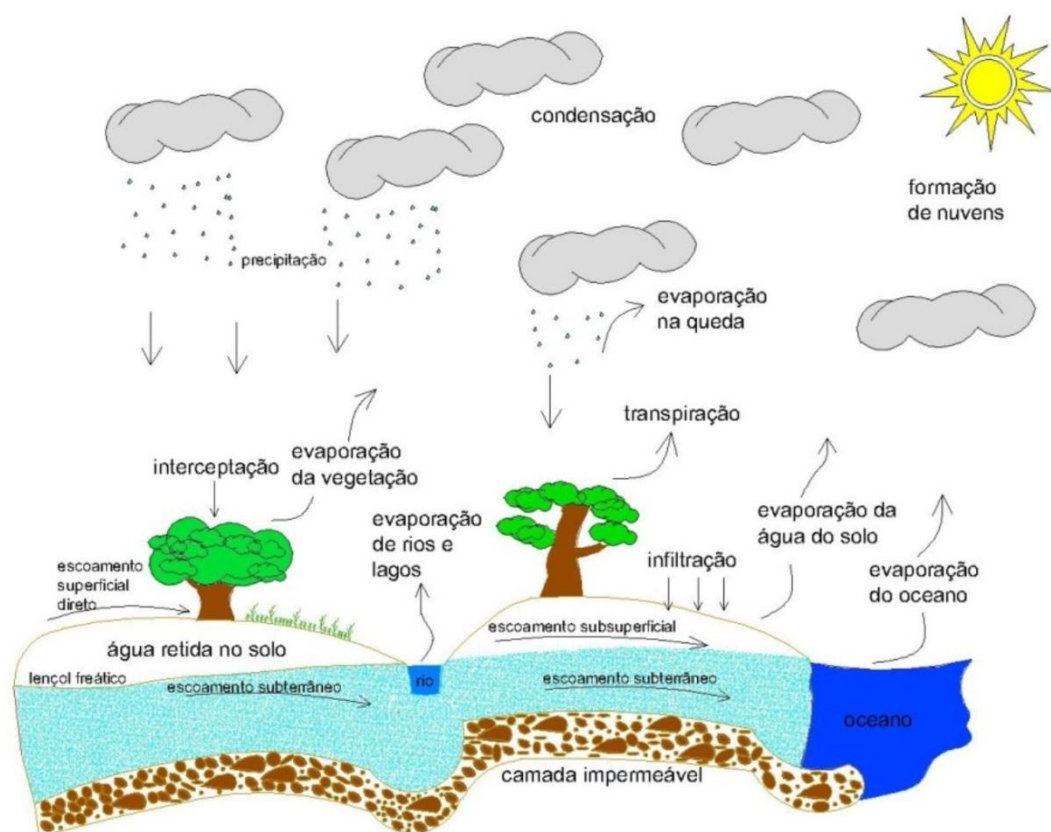


Figura 1- Componentes principais do ciclo hidrológico
Fonte: Beskow *et al.* (2015).

2.2 Eventos hidrológicos extremos

Os eventos extremos, de modo geral, são de baixa frequência e de ocorrência concentrada para uma determinada época do ano (BERNSTEIN *et al.* 2007). As mudanças climáticas naturais, em sua grande maioria, ocorreram no passado, com ausência da ação antrópica. No entanto, nos últimos anos, tem-se verificado que a ação antrópica vem agravando cada vez mais a intensificação do efeito estufa, provocando o aquecimento da superfície da Terra e acarretando uma mudança climática global que pode resultar em precipitações de grande intensidades (HARTMAN, 1994).

De acordo com Marengo *et al.* (2007), os eventos hidrológicos extremos e de curta duração têm sido considerados como os de maior importância pelos climatologistas, uma vez que, alguns modelos climáticos sinalizam maiores frequências e intensidades destes eventos de curta duração (chuvas intensas, ondas de calor e frio, períodos secos), temporais e furacões, em cenários de aquecimento global.

Bernstein *et al.* (2007) afirmam que alguns eventos extremos têm alterado as suas frequências e/ou intensidade nos últimos 50 anos, principalmente eventos extremos de precipitação, que incluem precipitações com valores extremos e longos períodos de estiagem consecutivos, os quais, segundo Zinet *al.*(2010), são os fenômenos atmosféricos de maior influência no contexto de alteração climática.

2.3 Sistemas de Informações Geográficas e recursos hídricos

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) podem ser definido como ferramentas de armazenamento, manipulação e análise de fenômenos geográficos (CYSNE, 2004). As ferramentas computacionais de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) vem auxiliando e assumindo maior importância em estudos hidrológicos, possibilitando a representação e manipulação de dados espaciais, tal como entidades geográficas da paisagem por meio de informações georreferenciadas que descrevem as suas características e formas específicas (FERRAZ *et al.* 1999).

Ultimamente o SIG tem sido utilizado para diversas finalidades em modelagem hidrológica, seja na representação do modelo digital de elevação, na caracterização do uso e ocupação do solo da bacia, ou na aplicação direta do acoplamento entre modelos hidrológicos num SIG. Nesse sentido, sua utilização permite integrar a um único pacote, a possibilidade de mapear diferentes características e associá-las a determinados banco de dados, o que facilita análises espaciais em um curto espaço de tempo (SILVA *et al.* 2005).

O acoplamento entre modelos hidrológicos e o SIG se constitui em uma ferramenta que permite a integração entre componentes espaciais, sociais, bióticos e físicos, permitindo simulações do comportamento hidrológico, a partir da manipulação das características físicas da bacia, para se avaliar as possíveis alterações do uso do solo de em bacias hidrográficas (SANTOS; SILVA, 2007). De acordo com Johnson (2009), os SIGs fornecem um amplo conjunto de funções que executam análises usando atributos de dados espaciais que, em muitos casos, utilizam funções que fornecem recursos sem precedentes que são de difícil e demorada mensuração se realizadas manualmente.

2.4 Modelagem chuva-vazão

A modelagem de chuva-vazão é de grande importância no que se refere à contenção de cheias, monitoramento de qualidade de água, erosão e gerenciamento de bacias hidrográficas, servindo de subsídio na análise dos possíveis impactos da urbanização e poluição (CRISS; WINSTON, 2008).

Para Machado (2005), a transformação de chuva em vazão é um dos processos de maior complexidade de serem entendidos devido ao grande número de variáveis envolvidas, além da grande variabilidade espacial e temporal entre elas.

A modelagem chuva-vazão em bacias hidrográficas urbanas também têm sido objetivo de inúmeros estudos, possibilitando diversos avanços no tocante à gestão de recursos hídricos. Contudo, destaca-se que existem dois grandes desafios no processo da modelagem chuva-vazão, isto é, o método pelo qual é descrito a transformação chuva-vazão e os processos envolvidos na mesma.

O resultado da modelagem ou o produto gerado, correspondem a um gráfico que expressa a resposta da bacia hidrográfica a um evento de precipitação denominado hidrograma de longo termo. Neste sentido, a modelagem de vazões máximas e de hidrogramas de cheias também é de grande importância no planejamento e na gestão de bacias hidrográficas no que condiz à contenção e controle de cheias.

Uma das principais limitações da modelagem hidrológica, segundo Khaleghi *et al.* (2011), incluem a carência ou a baixa precisão de dados de precipitação, elevado custo de aquisição de informações, carência de informações sobre as bacias hidrográficas e a extensão de tempo requerida para obter os resultados. Além disso, segundo Ghumman *et al.* (2011), o processo chuva-vazão é complexo, sendo difícil estimar a magnitude da cheia especialmente quando os dados hidrológicos são limitados ou escassamente disponíveis (GHUMMAN *et al.* 2011).

Assim, é oportuno lembrar que infelizmente a realidade brasileira é de uma pequena quantidade de postos hidrológicos de monitoramento, e ainda, na maioria das vezes de curta extensão (MELLO e SILVA, 2013). Além disso, existem postos de monitoramento que possuem falhas e/ou inconsistências nos dados aumentando ainda as limitações da modelagem hidrológica.

Dentro deste contexto, os modelos hidrológicos de chuva-vazão são considerados ferramentas essenciais na análise da disponibilidade de água ou da capacidade de geração de água numa bacia hidrográfica (PAIVA; COLLISCHONN; TUCCI, 2011). Todavia, um fator que interfere na aplicação deste tipo de modelo é a necessidade de definição dos valores dos parâmetros referentes ao modelo com base em séries observadas de chuva e de vazão, processo esse, que segundo Tucci *et al.* (2005), é denominado de calibração do modelo hidrológico, a qual pode ser realizada forma manual ou automática.

Neste aspecto, é válido ressaltar que antes de tais modelos serem empregados, é necessário que o mesmo seja calibrado e validado, o que, obrigatoriamente exige a existência de monitoramento hidrológico e a avaliação de cada modelo que se pretende utilizar.

Atualmente existem inúmeros estudos com a finalidade da calibração de diversos modelos de chuva-vazão apresentando bons resultados. No entanto, é relevante destacar que a calibração é feita, de maneira geral, para condições

específicas de uma dada bacia hidrográfica, para um padrão típico de ocorrência de precipitação. Além disso, é de se considerar que a maioria dos modelos hidrológicos foram desenvolvidos em outros países, em condições distintas das reinantes no Brasil.

Assim sendo, nota-se que existe um grande desafio no que condiz com a modelagem hidrológica, especialmente no tocante à calibração e validação dos modelos hidrológicos, a fim de proporcionar melhoria da eficácia da estimativa ou da previsão dos mesmos.

2.5 Teoria do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)

O conceito de hidrograma unitário (HU) foi proposto inicialmente por Sherman (1932), com base no princípio de superposição, onde a bacia hidrográfica comporta-se como um sistema linear e invariante no tempo, permitindo uma função de resposta constante (GENOVEZ, 2001). Entretanto, a aplicação desta teoria exige um grande número de parâmetros de calibração, restringindo-o apenas para bacias monitoradas, o que fomentou a busca por modelagens que suprissem esta carência de dados e, dando origem aos hidrogramas unitários sintéticos. Deste modo, Gottschalk e Wingartner (1998) definem o hidrograma unitário como sendo a resposta da bacia a uma precipitação como dado de entrada e resultando numa função determinística. Tais autores destacam que as diferenças entre os hidrogramas gerados são em decorrência principalmente do tempo de duração da chuva. Assim, os mesmos demonstraram através dos dados que, com o aumento do tempo de duração do evento de chuva, existe uma tendência da diminuição da vazão de pico do hidrograma.

Para Crisset *al.* (2008), os métodos de predição da transformação chuva-vazão são definidos como simplificações da representação da realidade que envolvem, de certo modo, um grau de subjetividade. Os autores enfatizam em seu estudo a dificuldade da obtenção de dados para aplicação nos modelos. No trabalho, compararam os resultados obtidos através de um modelo por eles

propostos com outros modelos e concluíram que, sob algumas condições, a modelagem apresenta resultados melhores.

Com base em equações empíricas, os hidrogramas sintéticos objetivam ampliar a aplicação teórica do hidrograma unitário para bacias hidrográficas não monitoradas, relacionando a forma do hidrograma unitário com as características fisiográficas da bacia (JENA; TIWARI, 2006).

O hidrograma unitário convencional foi substituído por Clark, em 1945, ao definir a resposta da bacia como independente da duração, se referindo a uma chuva unitária instantânea conhecida em termos matemáticos como um pulso unitário instantâneo ou função delta de Dirac, formulando assim, o Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI). Mello e Silva (2013) afirmam que mesmo sendo uma definição teórica, é útil e importante para análise do escoamento em bacias hidrográficas, uma vez que seu desenvolvimento depende de características básicas do balanço hídrico, satisfazendo a denominação “modelo conceitual”.

Diversos modelos conceituais têm sido propostos para representar o hidrograma unitário instantâneo (HUI). Tais modelos podem ser de analogia física ou através de simulação matemática, sendo que, os modelos de Clark e de Nash são exemplos de modelos tradicionalmente conhecidos.

Uma nova concepção geomorfológica para o HUI foi proposta por Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979), com base em conceitos probabilísticos, onde o mesmo é interpretado como função densidade de probabilidade (FDP) do tempo de viagem de uma gota de água que cai em um determinado ponto da bacia. O HUI resultante é chamado Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG), estabelecendo, por meio das razões geomorfológicas de Horton (1945), relação direta entre a geomorfologia da bacia e sua resposta hidrológica através de teorias de mecânica estatística.

Gupta, Waymire e Wang (1980) também realizaram algumas modificações, os quais deduziram uma representação matemática geral para o HUIG de uma bacia em termos de sua geomorfologia. Segundo os mesmos, o HUIG representa com maior precisão os processos ocorridos em pequenas bacias, levando-se em consideração que o efeito da não linearidade seja bem maior nas mesmas.

De acordo com Kumar e Kumar (2008), o HUIG pode ser utilizado com boa precisão em bacias hidrográficas sem utilizar series históricas da vazão. Jain e Sinha

(2003) corroboram, afirmando que, além de se obter uma boa estimativa da resposta hidrológica da bacia hidrográfica, o HUIG proporciona uma compreensão de sua variabilidade espaço-temporal.

3 Material e métodos

3.1 Caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas

Este trabalho foi realizado nas bacias hidrográficas da sanga do Ellert (BHSE) e na do ribeirão Lavrinha (BHRL), localizadas nos estados do Rio Grande do Sul e de Minas Gerais, respectivamente (Figura 2). As respectivas bacias foram empregadas com o intuito de averiguar o comportamento dos modelos em relação às diferentes características fisiográficas, bem como em relação aos distintos padrões de precipitação nas referidas regiões.

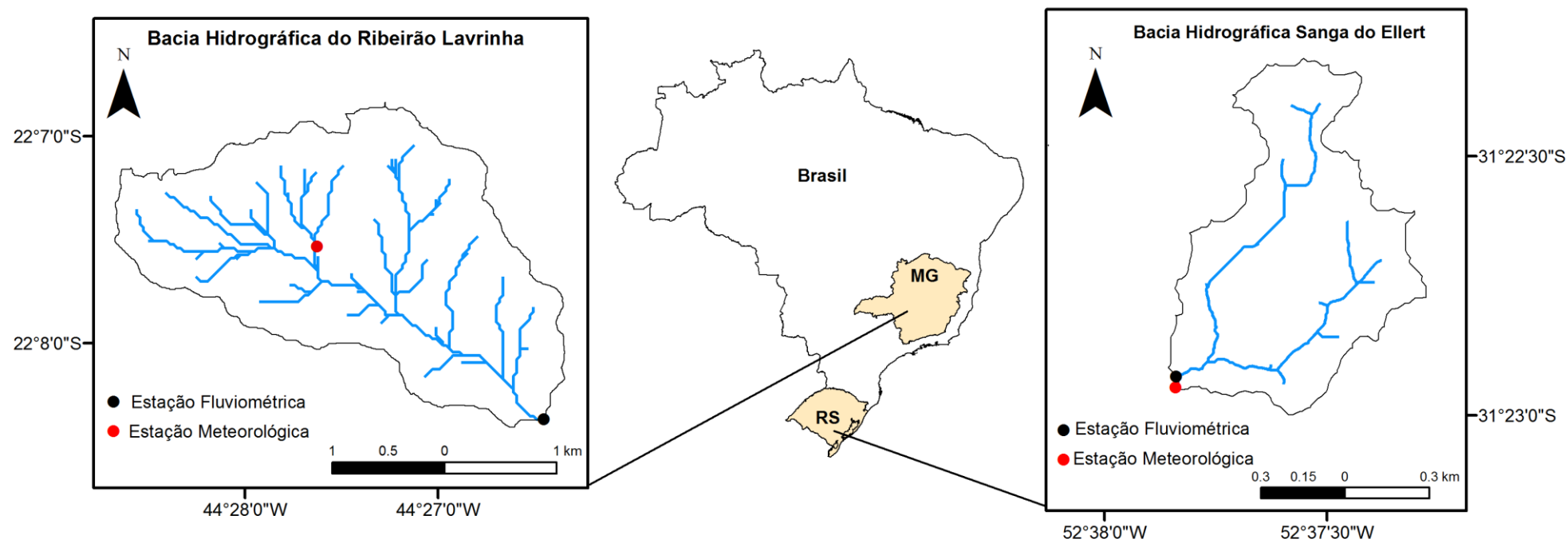


Figura 2– Localização da bacia hidrográfica da sanga do Ellert (BHSE), Rio Grande do Sul e do ribeirão Lavrinha (BHRL), Minas Gerais

A BHSE possui uma área de drenagem de aproximadamente 0,66 km², a qual deságua diretamente no arroio Pelotas, cuja bacia hidrográfica está localizada no sul do estado do Rio Grande do Sul, com uma área total de aproximadamente 940 km², contemplando os municípios de Pelotas, Morro Redondo, arroio do Padre e Canguçu.

De acordo com a Lei nº 10.350 de 1994, que regulamentou o artigo 171 da Constituição Estadual, o estado do Rio Grande do Sul possui três regiões hidrográficas, isto é, rio Uruguai, Guaíba e Litoral, as quais foram divididas em 25 bacias hidrográficas. Assim sendo, a bacia hidrográfica do arroio Pelotas se encontra na região do Litoral, especificamente na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo.

A bacia hidrográfica do arroio Pelotas é de fundamental importância no que se refere ao desenvolvimento econômico do município de Pelotas, a qual possui uma população em torno de 328.000 habitantes (IBGE, 2010), sendo responsável por parte significativa do abastecimento do respectivo município, através da Estação de Tratamento de Água.

Além disso, o arroio Pelotas possui um valor de extrema importância no contexto histórico e cultural da região, considerado importante afluente do canal São Gonçalo, o qual, por sua vez, abastece o município de Rio Grande, Rio Grande do Sul, além de ser uma importante via de navegação, interconectando a laguna dos Patos à lagoa Mirim.

Segundo a classificação climática de Koppen para o Brasil, o clima na região sul do país é do tipo Cf, caracterizado por ser temperado úmido e sem estação seca, de acordo com estudo realizado por Spavovek, Van Lier e Dourado Neto (2007). Para o estado do Rio Grande do Sul, de acordo com Kuinchtner e Buriol (2001), adotando a classificação de Koppen e Thornthwaite, o clima é do tipo Cfa e Cfb. Portanto, a BHSE se enquadra na segunda classe (Cfb), onde possui clima subtropical chuvoso, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C.

É de grande valia destacar que a caracterização do relevo é uma informação essencial no que concerne à modelagem do hidrograma de ESD, uma vez que possibilita a caracterização e a derivação de outros diferentes dados fundamentais no entendimento e na respectiva análise.

Desde modo, com o objetivo de elaborar o modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) para a referida bacia, foi feito um levantamento plani-altimétrico, por meio de um taqueômetro ou estação total, marca Sokkia, modelo SET630RK, e com os receptores GNSS, da marca Topocon, modelo Hiper Life+.

Para isso, fez-se o levantamento de 1.000 pontos cotados (Figura 3), por meio do equipamento supracitado, distribuídos ao longo da bacia, de modo a representar todo o relevo, e garantir uma boa precisão no processo de interpolação para geração do MDEHC. É importante destacar que foi feito um levantamento da rede de drenagem a fim de representar categoricamente a hidrografia.

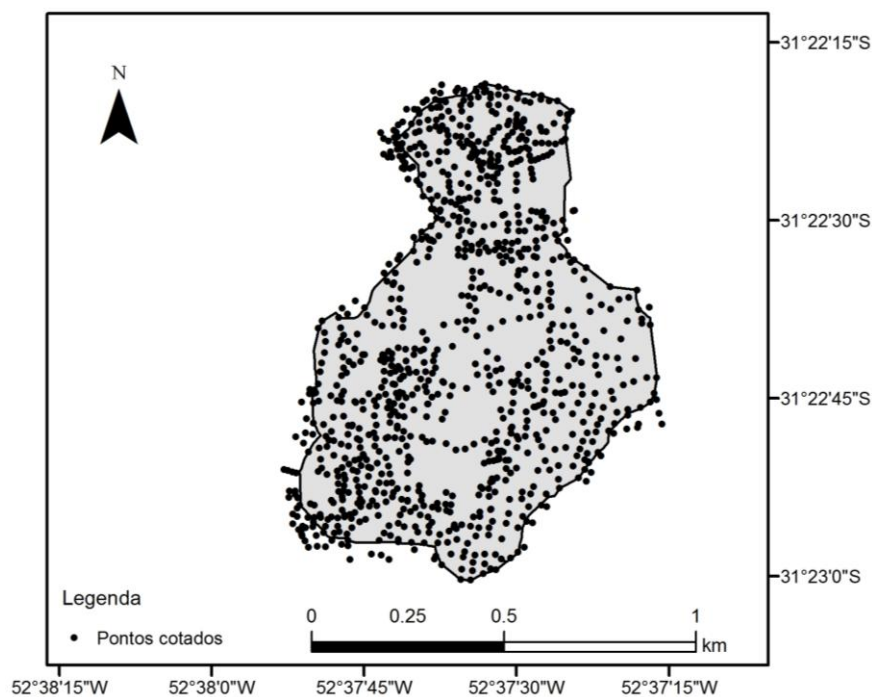


Figura 3– Pontos cotados nas campanhas de campo na BHSE, para geração do MDEHC

Salienta-se que durante a definição dos pontos cotados, foram contempladas áreas no interior e exterior do divisor de águas, definindo-o, portanto, visualmente. O motivo pelo qual se utilizou uma área maior que a delimitação do perímetro da bacia foi evitar o efeito borda, impedindo tal influência na interpolação dos dados.

Concomitantemente ao levantamento dos pontos cotados, bem como da rede de drenagem, foi definido visualmente o divisor d'água da bacia

hidrográfica em questão a fim de futura conferência do divisor gerado e processado pelo software ArcGIS.

Na sequência, foi gerado o MDEHC, utilizando-se também os pontos cotados, unindo-se as informações levantadas da rede de drenagem local, com o emprego do algoritmo “Topo to Raster”, do software ArcGIS Desktop 9.1 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2004).

Posteriormente, foi confeccionado definitivamente o divisor d’água por meio da ferramenta “Watershed”, também do software ArcGIS Desktop 9.1 e sequencialmente, procedeu-se a sua checagem comparando-se por meio do divisor d’água definido visualmente no momento do levantamento topográfico.

A partir do processamento do MDEHC, no ambiente SIG ArcGIS, foi gerado o mapa de declividade do terreno ao longo da BHSE, agrupando-o em classes os valores da respectiva declividade, adotando os padrões de declividade propostos por EMBRAPA (1979), conforme a seguinte Tabela:

Tabela 1- Classes de declividade proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA, 1979).

Declividade (%)	Relevo
0-3	Plano
3-8	Suave-Plano
8-20	Ondulado
20-45	Forte - ondulado
45-75	Montanhoso
>75	Forte - montanhoso

As informações de uso e ocupação do solo da BHSE (Figura 4) foram extraídas do mapa gerado por Aquino (2014) para a bacia hidrográfica do arroio Pelotas com seção de controle na Ponte Cordeiro de Farias, haja vista que a BHSE é uma de suas sub-bacias. Com base na Figura 4, foi possível constatar que a BHSE é ocupada predominantemente por pastagem, com um percentual em torno de 70%, seguida de mata nativa, responsável por 20% e por cultura anual, 10%.

A partir do levantamento de solos do estado do Rio Grande do Sul, a BHSE possui uma associação entre as classes NEOSSOLOS LITÓLICOS

Eutróficos - RLe e CAMBISSOLOS HÁPLICO Eutróficos - CXbe (STRECK et al, 2008).

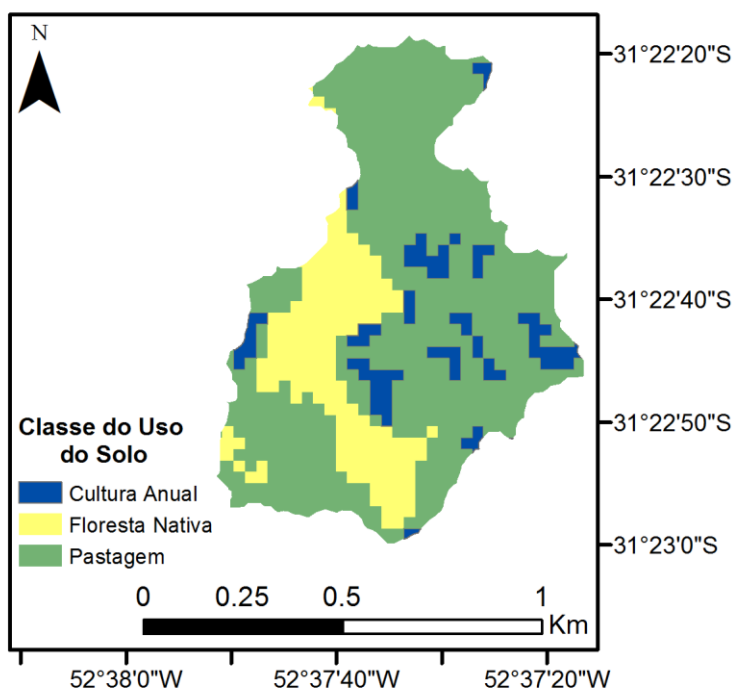


Figura 4– Distribuição das classes de uso do solo da BHSE

Já a bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (BHRL) está localizada no município de Bocaina de Minas, Minas Gerais, na região Montanhas Altas da Mantiqueira, sudeste de Minas Gerais (Figura 2). Se situa em uma das unidades da bacia hidrográfica do Rio Grande, denominada Alto Rio Grande, a qual está incorporada na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (GD1). Esta bacia corresponde a uma área experimental que se encontra sob monitoramento hidrológico e climático desde o ano de 2006, situada aproximadamente entre as coordenadas 22°07'S e 22°09'S de Latitude e 44°26'W e 44°29'W de Longitude, com área de drenagem de aproximadamente 6,7km².

De acordo com Yanagi e Mello (2011), seu clima com base em duas metodologias (Köppen e Thorntwaite) são, respectivamente, Cwb e Superúmido A. A temperatura média anual é de 16,0°C, com a média das mínimas de 10°C e a média das máximas de 23°C. Os totais médios anuais verificados variaram de 1.841 a 2.756 mm, com concentração média de 88,3%

do total precipitado entre setembro e março. Há um período seco característico, cujo início ocorre em abril e é finalizado em agosto, em condições normais.

A BHRL está inserida no Bioma de Mata Atlântica, na Serra da Mantiqueira, correspondendo à uma região que apresenta grandes variações de altitudes e relevo irregular, apresentando diferentes classes de declividade (ÁVILA, 2011).

No caso da BHRL, o MDEHC foi gerado a partir das cartas topográficas fornecidas pelo IBGE, na escala 1:50.000, as quais foram processadas também pelo software ArGIS Desktop 9.1. Assim, digitalizaram-se as curvas de nível e os pontos cotados, unindo-se tais informações do local e, finalmente, com o algoritmo “Topo to Raster”, gerou-se o MDEHC.

Do mesmo modo à BHSE, a partir do processamento do MDEHC, no ambiente SIG ArcGIS, foi gerado o mapa de declividade do terreno ao longo da BHSE, seguindo as classes de declividade proposta pela EMBRAPA (1979), mostrados na Tabela 1.

As unidades pedológicas dessa bacia hidrográfica, conforme Menezes *et al.* (2009), são: NEOSSOLO FLÚVICO e GLEISSOLO HÁPLICO, ambos localizados na porção inferior da bacia e ocupando, respectivamente, 7,1 e 0,9 % da área; e CAMBISSOLO HÁPLICO, localizado principalmente nas regiões de maior altitude e declive mais acentuado, ocorrendo em 92 % da área (Figura 5).

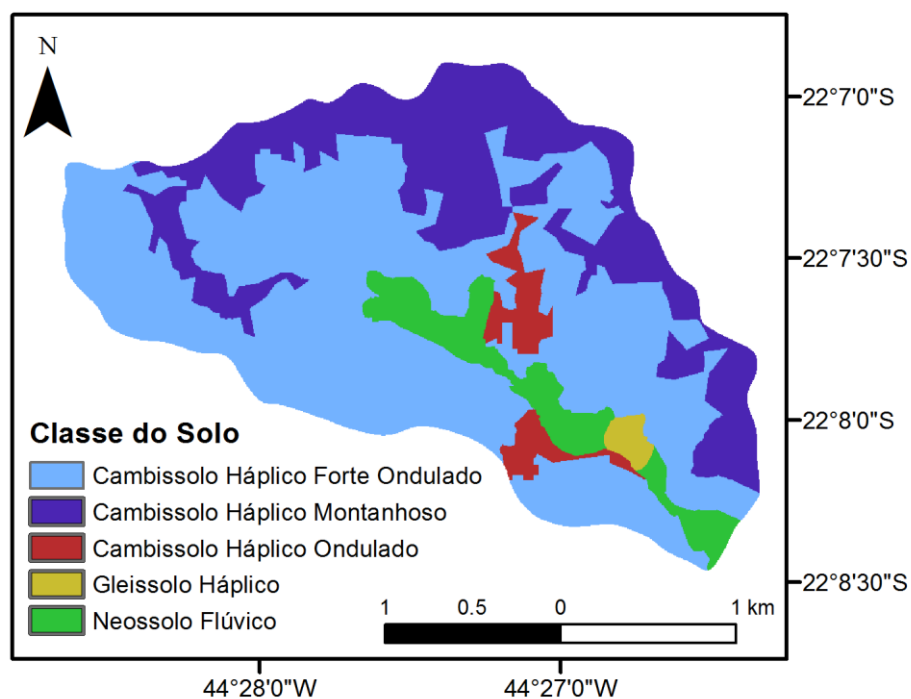


Figura 5– Distribuição das classes de solo na BHRL. Fonte: Adaptado de Menezes (2009)

Na Figura 6 é apresentado o mapa das classes de uso atual do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, o qual é constituído por aproximadamente 41% de Mata Atlântica, 14% de regeneração natural em fase de desenvolvimento médio e avançado, 40% de pastagem e 5% de vegetação típica de várzea (ÁVILA, 2011).

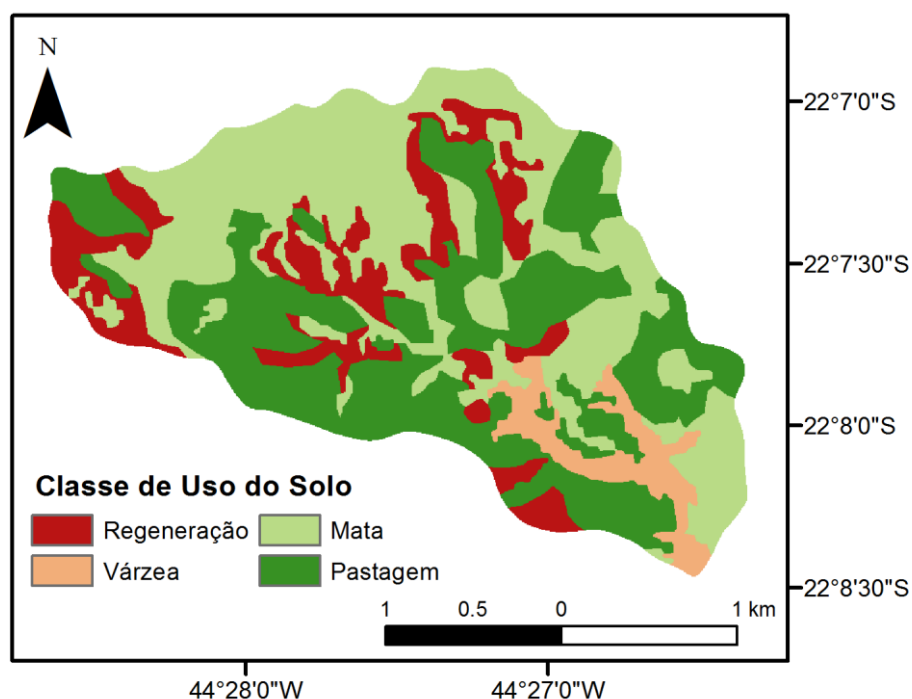


Figura 6– Distribuição das classes de uso do solo na BHRL. Fonte: Adaptado de ÁVILA (2011).

A caracterização geomorfológica das duas bacias hidrográficas foi realizada tendo em vista a obtenção dos parâmetros de entrada dos modelos de HU e HUI empregados neste estudo.

Foi feita também uma caracterização fisiográfica das bacias estudadas onde foram determinadas diferentes variáveis, tais como: área de drenagem, comprimento de cursos d'água, declividade média da bacia e de cursos d'água, ordem de cursos d'água, razão de bifurcação, perímetro, densidade de drenagem, altitude máxima e mínima, dentre outras.

Toda a caracterização foi feita com base nos conceitos apresentados por Christofletti (1980), empregando-se os aplicativos SIG do software ArcGIS Desktop 9.1 (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2004).

3.2 Monitoramento hidrológico

Para a realização deste estudo na BHSE, foram empregadas informações provenientes do monitoramento a partir de instrumentos de medição que o Grupo de Pesquisa em “Hidrologia e Modelagem Hidrológica de Bacias Hidrográficas” vem utilizando nos seus projetos de pesquisa. Tais instrumentos referem-se à uma estação pluviométrica (Figura 7) e outra pluviométrica (Figura 8).

A estação pluviométrica é constituída por um pluviômetro automático de cubas basculantes associado a um sistema de aquisição de dados (datalogger), modelo HOB0 Pluviômetro Digital – RG₃-M, marca Onset, localizada nas proximidades da seção de controle da mesma (Figura 7). Esse modelo de pluviômetro dispõe de cubas basculantes, sendo que seu datalogger permite registrar automaticamente até 3.200 milímetros de precipitação; desta forma, possibilita, com precisão a determinação das taxas de precipitação, duração e horário dos eventos. O respectivo datalogger foi programado para adquirir/armazenar leituras a cada 5 minutos.



Figura 7- Estação pluviométrica, modelo RG₃-M, marca Onset, localizada próxima à seção de controle da BHSE, no município de Canguçu, Rio Grande do Sul

Para possibilitar o monitoramento fluviométrico, inicialmente foi construído um canal de seção conhecida (Figura 8), a fim de permitir o monitoramento eficaz da variação do nível d'água do referido curso, devido ao baixo fluxo de água escoado no canal, especialmente em períodos de estiagem.



Figura 8- Ilustração da seção de controle da sanga do Ellert com o canal de seção conhecida, construído de alvenaria, onde foi inserido o sensor de medição do nível de água para monitoramento automático de nível d'água e também por réguas linimétricas

O monitoramento da variação do nível d'água foi feito por meio de um sistema constituído por dois sensores de pressão (linígrafo automático), em que o seu princípio de funcionamento se baseia na diferença de pressão entre eles. Portanto, um dos sensores foi instalado junto à estação pluviométrica (Figura 9), com a finalidade de monitorar a pressão atmosférica e o outro foi inserido na parte anterior da estrutura de concreto (voltado para a jusante do canal), localizado à uma cota inferior (13 cm) à cota 0 ou ao nível mínimo do curso d'água (Figura 10), seguindo recomendações do fabricante, a fim de monitorar continuamente a pressão exercida pela coluna de água somada à pressão atmosférica, ambos com intervalos de leituras de 5 minutos.



Figura 9 – Sensor de pressão instalado junto à estação pluviométrica, modelo RG₃-M, marca Onset, localizada próxima à seção de controle da BHSE, no município de Canguçu, Rio Grande do Sul, visando ao monitoramento da pressão atmosférica local



Figura 10 – Detalhes de instalação do sensor de pressão utilizado para o monitoramento da variação do nível d'água da BHSE

Deste modo, por meio da diferença de pressão entre os sensores, é possível monitorar a variação do nível' água, com intervalo de leituras de 5 minutos, construindo assim uma série histórica dos referidos dados.

Também foi instalado junto ao canal de alvenaria, conforme se verifica na Figura 11, um conjunto de réguas linimétricas com a finalidade de garantir a consistência dos dados monitorados do nível d'água, permitindo em alguns casos a sua aferição, a partir da comparação dos registros da variação do nível de água com a régua linimétrica correspondente.

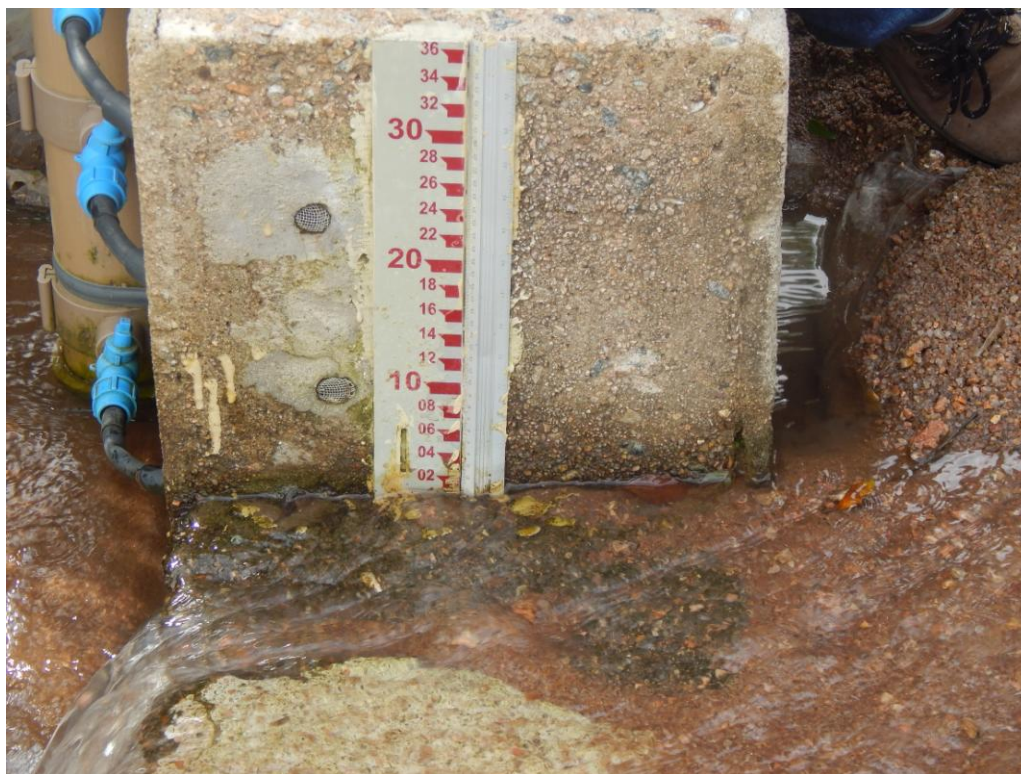


Figura 11 – Régua linimétrica instalada junto ao canal de seção conhecida construído na seção de controle da BHSE

Na sequência, para determinação das vazões, a série histórica de níveis de água da seção de controle foi convertida em série de vazões por meio do emprego da curva-chave da seção de controle da BHSE (Figura 12). A referida curva-chave foi ajustada para a seção de controle empregando dados de medições de descarga líquida (vazão) e os respectivos níveis do curso d'água, através da realização de diversas campanhas hidrológicas, em diferentes situações de nível d'água, utilizando-se molinetes hidrométricos e os procedimentos recomendados por Santos *et al.* 2001. Deste modo, fez-se a correlação entre os dados de nível d'água, obtidos pela diferença de pressão entre os dois sensores mencionados, e as medições de descarga líquida, e a curva-chave ajustada para a referida bacia, a qual apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,95. A Equação 1, bem como a Figura 12, apresentam a curva-chave ajustada para a seção de controle da BHSE.

$$Q = 0,018 \cdot e^{0,091.H} \quad (1)$$

em que Q é a vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) e H é o nível d'água (m) monitorado pelo sensor de pressão.

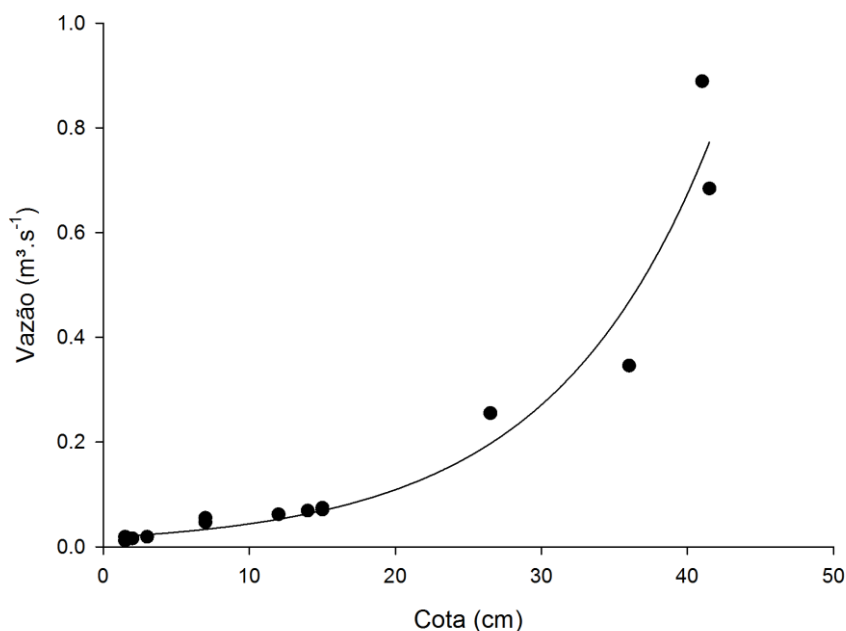


Figura 12- Curva-chave para a seção de controle da BHSE

No caso da BHRL, os dados empregados foram fornecidos pelo grupo de pesquisa “Engenharia de Água e Solo”, do departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, em virtude da parceria formada com o grupo de pesquisa “Hidrologia e Modelagem Hidrológica de Bacias Hidrográficas”, da Universidade Federal de Pelotas.

Tal bacia está sob monitoramento hidrológico e climático desde o ano de 2006, com apoio da CEMIG/ANEEL (SILVA; MELLO, 2011), o qual contempla as características climáticas e hidrológicas (ÁVILA, 2011), servindo de subsídio na realização de diversos estudos.

Assim, utilizaram-se dados pluviométricos de uma estação meteorológica automática (Figura 13), programada para coletar dados num intervalo de 30 minutos. Os dados de nível d'água foram obtidos também por meio de um linígrafo automático (Figura 14) instalado na seção de controle, programado para registrar as leituras num intervalo de 30 minutos, constituindo-se assim as séries históricas de níveis de água.



Figura 13- Estação meteorológica instalada no interior da BHRL, no município de Bocaina de Minas, Minas Gerais



Figura 14- Ilustração da seção de controle da BHRL, com a estrutura para monitoramento automático de nível d'água e da unidade de aquisição e armazenamento de informações hidrológicas da mesma seção

Do mesmo modo à BHSE, a série histórica de nível d' água da seção de controle foi convertida em série de vazão, utilizando-se a respectiva curva-chave da bacia e, sequencialmente, ajustando-se a mesma aos dados de descarga líquida (vazão) com os níveis dos cursos d'água. A curva-chave

(Equação 2 e Figura 15) foi ajustada para a BHRL em função da correlação dos dados de níveis d'água, monitorados pelo sensor de pressão, com as medições de descarga líquida, obtendo-se um coeficiente de determinação (R^2) de 0,76.

$$Q = 0,000572 \cdot (H - 3,57427)^{1,47} \quad (2)$$

Em que Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e H é o nível d'água (m) monitorado pelo sensor de pressão.

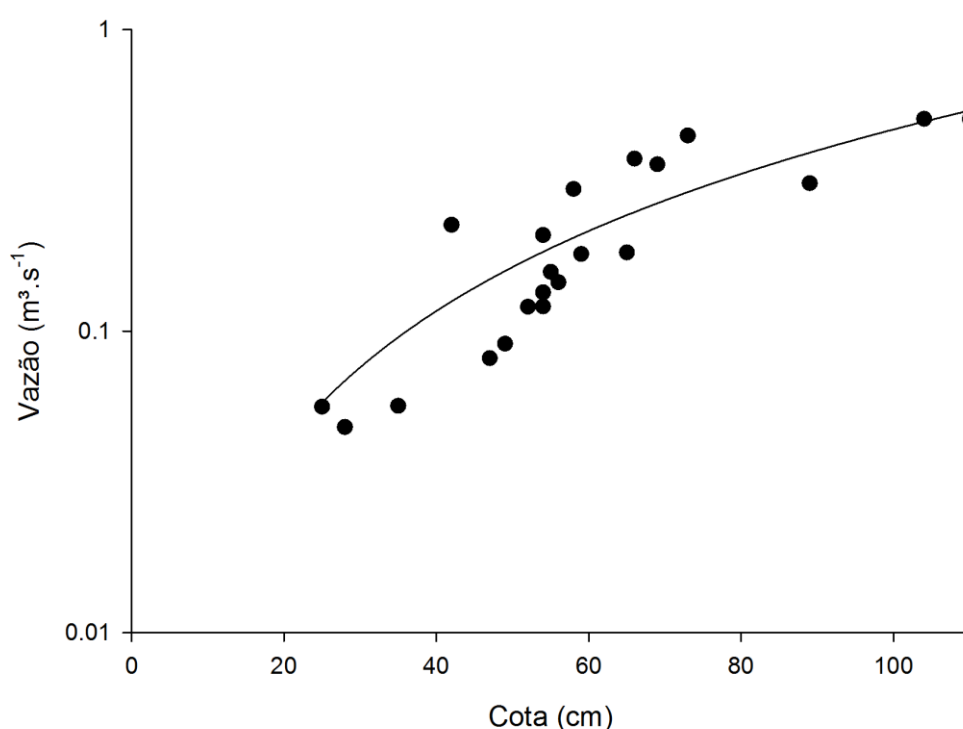


Figura 15- Curva-chave para a seção de controle da BHRL

Para geração dos hietogramas e hidrogramas observados para modelagem, foram selecionados diversos eventos de precipitação, com diferentes durações, totais precipitados e intensidades médias, com o propósito de realizar a modelagem hidrológica de cheias, com o emprego da teoria do Hidrograma Unitário (HU) e Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI).

Devido ao fato de se objetivar a modelagem hidrológica de cheias nas respectivas bacias, foi dado ênfase aos eventos de precipitação de maiores

magnitudes, isto é, causadores de cheias mais pronunciadas, conforme recomendado por Raghunath (2006).

Assim, as séries históricas de precipitação empregadas neste trabalho foram processadas, originando-se os hietogramas. O intervalo de tempo dos hietogramas gerados foi de 5 e 30 minutos para a BHSE e BHRL, respectivamente, sendo esse intervalo fundamental para a aplicação da teoria do HU e HUI.

Desta forma, para cada evento de precipitação analisado, tanto na BHRL quanto na BHSE, representaram-se as respectivas respostas em termos de variação de vazões ao longo do tempo. Os dados de vazão, obtidos a partir da combinação do monitoramento linimétrico e da curva-chave, possibilitaram a geração do hidrograma referente a cada evento de precipitação, considerando também o intervalo de tempo de 5 e de 30 minutos para BHSE e BHRL, conforme descrito anteriormente.

Para a determinação do hidrograma de escoamento superficial direto (ESD), escoamento sub-superficial e escoamento base, utilizou-se a metodologia de separação de escoamento que une, através de uma reta, o ponto sobre o hidrograma após o qual a contribuição do ESD se inicia ao ponto a partir do qual se encerra este escoamento, conhecidos como inflexões A e C, seguindo as recomendações de Mello e Silva (2013).

Tal metodologia consiste da determinação do ponto A visualmente, face aos valores de vazão, e o ponto C analiticamente, determinando-se a constante de depleção (K_{A-C}) baseada nos últimos valores de vazão, os quais pertencem apenas ao escoamento base (MELLO; SILVA, 2013). Esse procedimento é adotado até que se encontre um valor para K_{A-C} sensivelmente inferior aos obtidos inicialmente, o que significa que uma vazão mais alta foi atingida, ou seja, indicando a contribuição do ESD no valor total da vazão. Esta metodologia tem sido amplamente empregada atualmente em estudos dessa natureza, tais como, Agirre *et al.* (2005) e Jena e Tiwari (2006).

Posteriormente a separação do escoamento para cada evento selecionado em cada bacia hidrográfica, foi extraído do hidrograma de escoamento total apenas hidrograma parcial de ESD, possibilitando a modelagem dos HU e HUI.

3.3 Determinação dos hietogramas de precipitação efetiva (P_e)

Para a obtenção do volume de ESD gerado para cada evento de precipitação analisado, empregou-se integração numérica seguindo o recomendado por Tucci *et al.* (2005) e, na sequência, determinou-se a P_e para os respectivos eventos, por meio da razão entre o volume e a área da bacia.

É importante salientar que a determinação da P_e total é essencial para a estimativa da distribuição temporal de chuvas efetivas, por vezes denominada hietograma de precipitações efetivas.

Assim, a distribuição temporal da P_e (hietograma de P_e) foi realizada para cada evento de precipitação, em cada bacia hidrográfica, adotando-se o método do Número da curva (CN), desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS) em 1971. Segundo Beskow *et al.* (2009), este método é muito conhecido e utilizado para estimativa do ESD, tanto em eventos isolados de precipitação, quanto em modelos de simulação hidrossedimentológica. Apesar de existirem outros métodos para estimativa do hietograma de P_e , o método CN tem sido amplamente empregado para o este propósito (ŠRAJ *et al.* 2010). Ainda, Mello e Silva (2013) destacam que este método tem sido amplamente empregado para estimativas das P_e 's com vistas à estimativa da vazão de projeto e também do hidrograma de projeto.

O embasamento conceitual desse método pode ser representado pela expressão abaixo (MELLO; SILVA, 2013):

$$\frac{\text{volume infiltrado}}{\text{capacidade máxima de absorção}} = \frac{\text{precipitação efetiva}}{\text{precipitação total}} \quad (3)$$

Sendo, portanto, a Equação 3 reescrita como:

$$\frac{P - P_e}{S} = \frac{P_e}{P} \quad (4)$$

Em que P é a precipitação total, P_e é o deflúvio ou precipitação efetiva e S é o potencial de armazenamento de água no solo.

Este método considera também as abstrações iniciais referentes às possíveis perdas de água que ocorrem antes do início da geração do ESD, as

quais podem estar associadas, segundo Mishra *et al.* (2006), à interceptação, armazenamento na superfície do terreno e infiltração de água no solo.

Desta forma, introduzindo as perdas por abstração inicial (I_a) na Equação 4, tem-se:

$$\frac{P - P_e - I_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (5)$$

Reestruturando a equação acima, obtém-se a equação geral do respectivo método:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (6)$$

Segundo o SCS (1971), o método do CN, no seu formato padrão, considera I_a como igual a 20% de S . Contudo, nesse estudo, foram consideradas as abstrações iniciais (I_a) para cada evento de precipitação para ambas as bacias com base na análise conjunta do hietograma e hidrograma.

É importante salientar que esse método preconiza que somente existirá escoamento quando P for superior a I_a . Deste modo, o potencial de armazenamento de água no solo S , em mm, é obtido com base no Número da Curva (CN), de acordo com a equação abaixo:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

Os valores de Número da Curva (CN) são tabelados para diferentes tipos de solo e cobertura vegetal, os quais variam entre 1 a 100, representando desta forma, as condições de cobertura vegetal e tipo de solo. Deste modo, quanto maior o valor de CN, mais impermeável é o solo e, por consequência, maior é o escoamento superficial direto.

Outra informação de grande relevância neste método é a umidade antecedente (AMC – Antecedent Moisture Content) ao evento de precipitação na definição dos valores de CN. Assim, os valores de CN são subdivididos em três classes, com base na precipitação acumulada nos cinco dias anteriores (P_5), isto é: AMC I, 0 a 35 mm; AMC II, 35 a 52,5 mm; e AMC III, superior a

52,5 mm. Os valores de CN associados a diferentes situações de uso do solo, grupos hidrológicos e classes de umidade antecedente podem ser encontrados em Mello e Silva (2013).

Portanto, o CN foi utilizado para estimar o hietograma de P_e 's a partir dos hietogramas observados, considerando cada hidrograma resultante após a separação do escoamento.

É importante destacar que o método do CN está fundamentado em dois parâmetros: CN e λ . O segundo parâmetro apresenta estrita relação com as perdas de água que ocorrem anteriormente ao início do ESD, definidas como abstrações iniciais (I_a). No entanto, neste estudo, em razão da existência de dados observados, discretizados no tempo, de precipitação (hietograma) e vazão (hidrograma), conforme previamente mencionado, o valor de I_a foi determinado por meio dos dados observados para cada evento de precipitação.

Desta forma, os valores de CN foram calibrados para cada evento de precipitação de modo que a soma de todas as P_e 's resultasse no ESD observado, considerando-se, portanto, o valor observado da I_a para cada evento.

3.4 Modelagem do Hidrograma Unitário (HU) e do Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)

Conceitualmente, o HU é um modelo que representa o ESD gerado por uma precipitação efetiva unitária (P_u), de ocorrência uniforme sobre a bacia hidrográfica, com dada duração, enquanto que o HUI considera uma duração infinitesimal de P_u (SHERMAN, 1932).

Assim, o HU e o HUI podem ser derivados do monitoramento hidrológico ou de características geomorfológicas da bacia hidrográfica. Portanto, no primeiro caso, são determinadas as vazões unitárias com base em dados pluviométricos e fluviométricos de um dado evento. Já no segundo, as informações oriundas do relevo da área de estudo subsidiam a estimativa dos parâmetros necessários à obtenção do HU e do HUI.

Neste estudo, empregaram-se dois modelos de HU geomorfológicos, denominados de Triangular e Adimensional, sendo que foram utilizadas duas

metodologias para o cálculo do tempo de retardo de cada modelo. Além disso, empregaram-se dois modelos de HUI conceituais, denominados Clark e Nash. Estes últimos foram trabalhados tanto a partir de eventos monitorados de chuva-vazão quanto a partir das características geomorfológicas das bacias hidrográficas cujas metodologias para obtenção de seus parâmetros serão descritas posteriormente.

É importante destacar que para a geração do hidrograma referente a cada evento de precipitação, considerou-se um intervalo de tempo de 5 e de 30 minutos, respectivamente, para BHSE e BHRL, conforme descrito anteriormente. No entanto, na BHRL, o intervalo de simulação foi de 10 minutos. A utilização de um intervalo menor de simulação para a BHRL se deve a recomendação de Sherman (1932), o qual sugere a proporcionalidade entre a tempo de duração da P_u e o tempo de concentração para bacias com áreas menores do que 50 km² entre 1/3 e 1/4 do tempo de concentração.

3.4.1 Hidrogramas Unitários Triangular (HUT) e Adimensional (HUA)

Os modelos de Hidrograma Unitário Triangular (HUT) e Adimensional (HUA) foram elaborados para bacias hidrográficas norte-americanas de diferentes áreas de drenagem, a partir da análise de um grande número de HU's, sendo desenvolvidos pelo Soil Conservation Service (1971).

Segundo Mello e Silva (2013), o HUT se fundamenta considerando a aproximação dos trechos de duas retas correspondentes à ascensão e recessão do hidrograma, constituindo assim um triângulo, ao passo que o HUA, segundo Ramos *et al.* (1989), sintetiza o HU para um determinado tempo de duração da precipitação, utilizando-se um hidrograma adimensional, assumindo uma única forma para representação do ESD, independentemente da bacia hidrográfica.

Neste sentido, o HUT apresenta uma formulação matemática com base em relações geométricas associadas a três parâmetros – vazão de pico (Q_p), tempo de ascensão (T_a) e tempo de base (T_b).

Assim, os principais parâmetros de ajuste do HUA são obtidos por meio do HUT, conforme ilustrado na Figura 16 (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995):

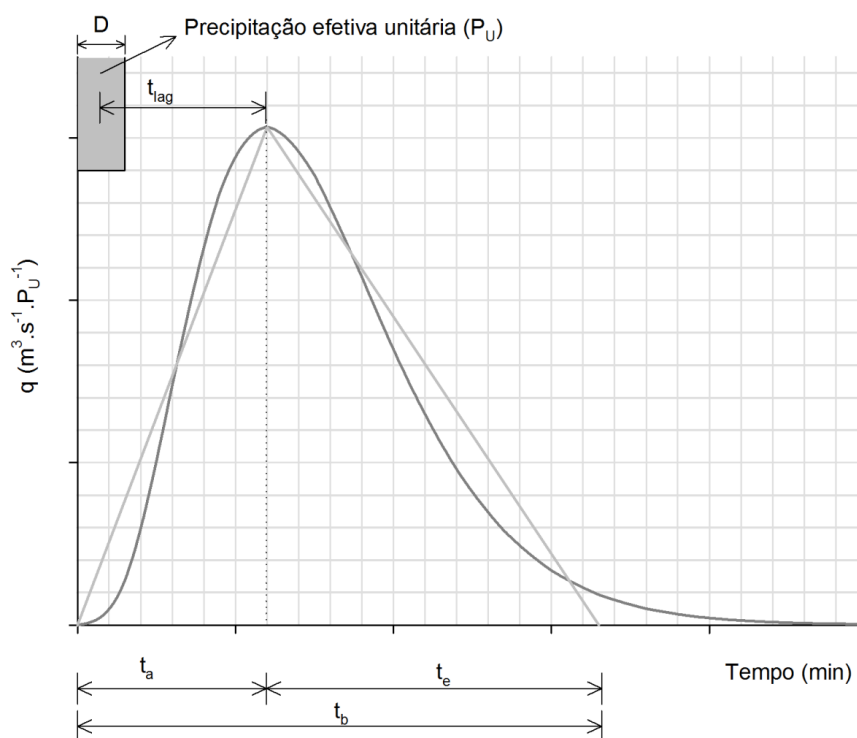


Figura 16- Hidrogramas Unitários Triangular (cinza) e Adimensional (preto) a partir de dados hipotéticos

O tempo de ascensão (t_a) do HUT e do HUA é obtido pelo somatório da metade do tempo de duração (D) da P_u com o tempo de retardo da bacia hidrográfica (t_{lag}). Destaca-se que o t_{lag} apresentado na Figura 16 é tradicionalmente empregado na área de hidrologia, necessitando de uma análise conjunta do hietograma e hidrograma de um dado evento de chuva. Viessman e Lewis (2014) relatam que existem diferentes concepções para a determinação do t_{lag} . Neste estudo, dada a necessidade de obtenção de valores observados de t_{lag} visando à análise dos modelos HUT e HUA, o mesmo foi considerado como o tempo entre o centroide do hietograma de chuvas efetivas e a vazão de pico do hidrograma.

Neste estudo, considerou-se uma P_u de 1 mm distribuída uniformemente sobre a bacia hidrográfica, num dado intervalo de tempo, o qual variou entre as bacias, sendo 5 minutos para BHSE e 10 para a BHRL.

Com relação ao t_{lag} , o mesmo foi determinado por duas metodologias com intuito de analisar seu desempenho no ajuste dos modelos, ambas conforme recomendação do Soil Conservation Service(1971).

A primeira metodologia foi com base na equação empírica, conforme a Equação 8.

$$t_{lag} = \frac{2,6 \cdot L^{0,80} \cdot \left(\frac{S}{25,4} + 1\right)^{0,70}}{1900 \cdot X^{0,50}} \quad (8)$$

onde t_{lag} é obtido em horas, L é o comprimento do curso d'água principal (m), S é o potencial de armazenamento de água no solo de acordo com o método CN (Equação 7) e X é a declividade média da bacia (%).

Já a segunda metodologia seguiu a expressão abaixo, tomando como base o cálculo do tempo de concentração para cada bacia hidrográfica.

$$t_{lag} = 0,6 \cdot t_c \quad (9)$$

O tempo de concentração foi determinado empregando-se a Equação 10, desenvolvida por Ven Te Chow, a qual é recomendada para bacias hidrográficas com áreas inferiores à 25 km².

$$t_c = 52,64 \cdot \left(\frac{L^2}{\sqrt{S_0}}\right)^{0,64} \quad (10)$$

Em que t_c é o tempo de concentração, em minutos, L é o comprimento do talvegue principal, em km e S_0 é a declividade média do talvegue, em m.km⁻¹.

As duas metodologias para determinação de t_{lag} empregadas nesse estudo foram denominadas como T_{lag1} e T_{lag2} , se referindo, portanto, ao primeiro método por meio da equação empírica (Equação 8) e ao segundo com base no cálculo do tempo de concentração (Equação 9), respectivamente.

A fim de verificar as estimativas de t_{lag} por meio das duas metodologias empregadas (Equação 8 e 9) para todos os eventos em análise, o t_{lag} também foi determinado com base no hietograma de P_e e no hidrograma de escoamento superficial direto, denominado T_{lag} observado (T_{lagobs}). Para tanto, considerou-se o tempo transcorrido entre o centroide do hietograma de chuvas efetivas e a vazão de pico, oriunda do hidrograma de escoamento superficial direto observado para cada evento.

Uma questão de grande relevância é a definição de t_{lag} , visto que diferentes abordagens são encontradas na literatura. Por exemplo, Kent (1973) e Viessmanet *al.* (1989) definiram t_{lag} como sendo o tempo transcorrido entre o centroide do hietograma de P_e até a ocorrência de vazão de pico do hidrograma. Já outros autores, como Melchinget *al.* (1997) relataram que o t_{lag} tem sido amplamente considerado como o tempo transcorrido entre o centroide do hietograma de P_e e o centroide do hidrograma de escoamento superficial direto.

Neste contexto, a vazão de pico (q_p) do HUT e do HUA foi estimada pela relação:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot P_u \cdot A}{t_a} \quad (11)$$

onde q_p é obtida em m^3s^{-1} , P_u deve ser dada em mm, A é a área da bacia hidrográfica, em km^2 , e t_a deve ser dado em horas.

Já o tempo de base (t_b) para o HUT, é dado pela soma dos tempos de ascensão t_a e de recessão (t_e) do HU, sendo t_b definido como 8/3 de t_a , ou seja, t_e é 67% superior ao t_a .

Para o HUA, as ordenadas foram obtidas pela relação entre a vazão e a vazão de pico (q/q_p), para uma série de razões entre tempo e tempo de ascensão (t/t_a), a partir da seguinte equação:

$$\frac{q}{q_p} = \left[\frac{t}{t_a} \cdot \exp\left(1 - \frac{t}{t_a}\right) \right]^X \quad (12)$$

em que X é a função gama do fator de pico (FP), que é comumente adotado como 484, dada por Tomaz (2013):

$$X = 0,8679 \cdot \exp(0,00353 \cdot FP) - 1 \quad (13)$$

3.4.2 Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC)

O respectivo modelo, segundo Clark (1945), considera dois processos importantes na transformação da precipitação efetiva em vazões de ESD, isto é, a atenuação, a qual contempla a redução das vazões geradas pela P_e em decorrência do armazenamento na bacia hidrográfica e, a translação, que considera a defasagem de tempo entre a ocorrência de P_e na bacia hidrográfica e sua contribuição com a vazão na seção de controle.

Este modelo considera tanto o amortecimento devido ao armazenamento em um reservatório linear, quanto a translação de volumes de água oriundos do impulso unitário (RAMOS *et al.* 1989). Portanto, essa translação é proporcional à área superficial contribuinte para diversos subtrechos do rio, ocorrendo sequencialmente na passagem pelo reservatório.

Para Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009), sua aplicação requer a estimativa do tempo de concentração da bacia hidrográfica (t_c) e do coeficiente de armazenamento (R). Assim, a sua formulação matemática é dada por:

$$Q_{i+1} = 2 \cdot C_0 \cdot R_{E(i)} + C_1 \cdot Q_i \quad (14)$$

onde Q é a ordenada do HUIC, i refere-se ao tempo, R_E é a precipitação efetiva uniformemente distribuída, dependente do Histograma Tempo-área (HTA) e de uma constante de conversão de unidades, e C_0 e C_1 são coeficientes de ponderação.

Os respectivos coeficientes de ponderação C_0 e C_1 propostos podem ser calculados pelas Equações 15 e 16, respectivamente.

$$C_0 = \frac{0,5 \cdot t}{R + 0,5 \cdot t} \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{R - 0,5 \cdot t}{R + 0,5 \cdot t} \quad (16)$$

onde t é o intervalo de simulação, em horas.

Deste modo, o efeito da atenuação contemplado no HUIC está implicitamente representado por R . Tal coeficiente pode ser determinado por meio da derivação da curva de recessão do hidrograma no ponto de inflexão, o qual indica que a entrada de ESD no curso d'água é cessada, restando apenas o fluxo contido na calha (RAGHUNATH, 2006).

Nesta mesma linha, o processo de translação, além de ser empregado no modelo de HUIC, é amplamente utilizado em modelos conceituais chuva-vazão. Neste caso, o efeito de translação em bacias hidrográficas é comumente dada pelo HTA, o qual relaciona o tempo de viagem do ESD e o percentual de área da bacia que está contribuindo com a vazão na seção de controle.

Segundo Tucci *et al.* (2005), o HTA (Figura 17) depende das isócronas da bacia hidrográfica, que são linhas sobre pontos da bacia que têm o mesmo tempo de viagem até a seção de controle.

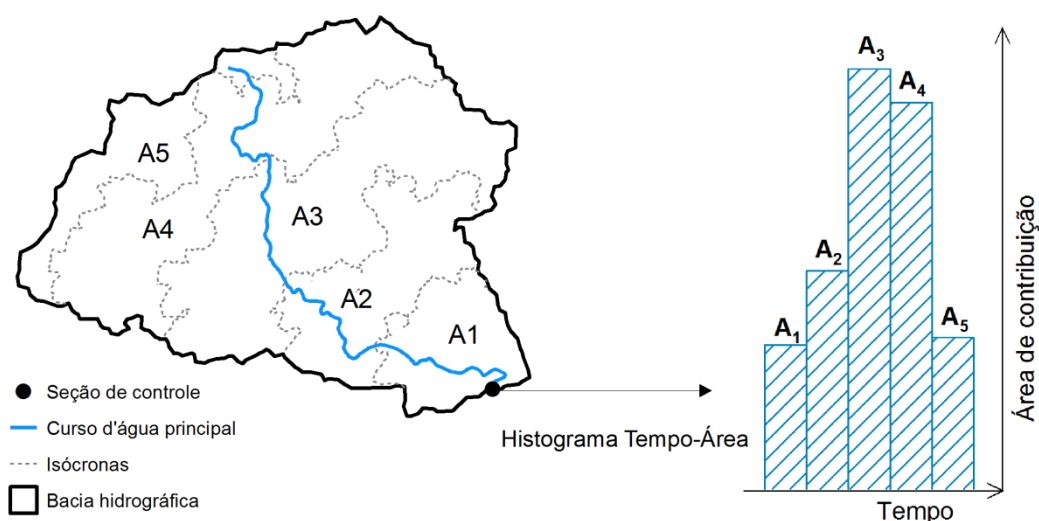


Figura 17 - Representação esquemática do processo de translação do Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark

Segundo o mesmo autor, o traçado das isócronas em uma bacia, bem como do HTA correspondente, consistem em processos laboriosos, fazendo com que comumente modelos dependentes destas ferramentas não sejam utilizados ou que o HTA seja substituído, com limitações, por um hidrograma sintético.

É importante destacar que os HTA's para as bacias hidrográficas analisadas foram obtidos através da ferramenta "Watershed Isochrones", desenvolvida no Laboratório de Hidrologia e Modelagem Hidrológica, vinculado ao curso de graduação em Engenharia Hídrica e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Pelotas. Maiores detalhes sobre a respectiva ferramenta "Watershed Isochrones" podem ser obtidos em Mahl *et al.* (2014) e em Luz *et al.* (2014).

Com intuito de facilitar a modelagem, as ordenadas do HTA foram processadas no mesmo intervalo de tempo que os dados hidrológicos. Deste modo, a fim de permitir a calibração do parâmetro t_c , por evento e por bacia, foram gerados HTA's para o tempo de simulação de 5 minutos, considerando tempos de concentração variando de 10 a 60 minutos, para a BHSE. Para a BHRL, o tempo de simulação foi de 10 minutos, considerando o tempo de concentração de 20 a 230 minutos.

Portanto, para cada evento analisado, consideraram-se HTA's, que representavam de forma satisfatória o tempo da vazão de pico do hidrograma de ESD, sendo, portanto, o parâmetro R , estimado por meio da minimização de uma função objetivo, a qual expressava o erro entre a vazão de ESD observada durante o evento e a vazão de ESD simulada pelo HUIIC.

Assim, os valores de t_c (derivado do HTA) e de R , para cada evento, foram aqueles correspondentes ao menor erro na simulação das vazões, em relação aos dados observados.

3.4.3 Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIIC)

O HUI de Clark (1945) também pode ser empregado em situações em que não possuem monitoramento de precipitação e vazão da bacia hidrográfica de interesse, utilizando, nesse caso, algumas características fisiográficas da bacia, sendo denominado de HUI Geomorfológico de Clark (HUIIC).

Tal modelo está condicionado a dois parâmetros, isto é, o t_c e R , bem como na determinação do HTA da bacia. Portanto, para aplicação do HUIIC neste estudo, o t_c foi estimado também com base na equação empírica de Ven Te Chow (Equação 10), para as duas bacias estudadas, considerando os

limitares de aplicabilidade de cada equação, de acordo com recomendações de Mello e Silva (2013):

O coeficiente de armazenamento R (horas) foi estimado pela equação abaixo sugerida por County (2009):

$$R = \frac{0,435 \cdot t_c^{1,11} \cdot L^{0,8}}{A^{0,57}} \quad (17)$$

em que t_c é o tempo de concentração (horas), L é o comprimento máximo percorrido pelo escoamento na bacia hidrográfica (km) e A é a área da bacia (km²).

Desta forma, para ambas as bacias hidrográficas, se determinou o HTA referente aos respectivos t_c , com base nas equações acima apresentadas, utilizando-se também a ferramenta, “Watershed Isochrones”, conforme já destacado.

Os coeficientes de ponderação C_0 e C_1 também foram calculados da mesma forma que para o modelo de HUIC. Entretanto, neste caso, os valores de R e t_c foram considerados invariáveis com o evento analisado, correspondendo a um valor único para cada bacia hidrográfica.

3.4.4 Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIN)

Conceitualmente, o HUI é definido como a resposta de uma dada bacia hidrográfica a um evento de precipitação instantâneo, com duração infinitamente pequena, tendendo à zero.

Em 1957, Nash desenvolveu tal modelo, considerando uma precipitação uniforme ao longo da bacia e ainda, a sua propagação até a seção de controle, representando assim o ESD, por n reservatórios lineares em cascata (Figura 18).

Essa consideração de reservatórios em cascata simula uma situação de amortecimento da vazão de pico e outra de translação, isto é, de um movimento de ondas do escoamento cujo efeito é mais pronunciado em canais ao longo da bacia.

Deste modo, o comportamento da drenagem do escoamento é representado pelo parâmetro k , o qual reflete a resposta da bacia hidrográfica ao ser estimulada por um ou mais eventos de precipitação efetiva (TUCCI, 2009; FRENDRICH, 1984).

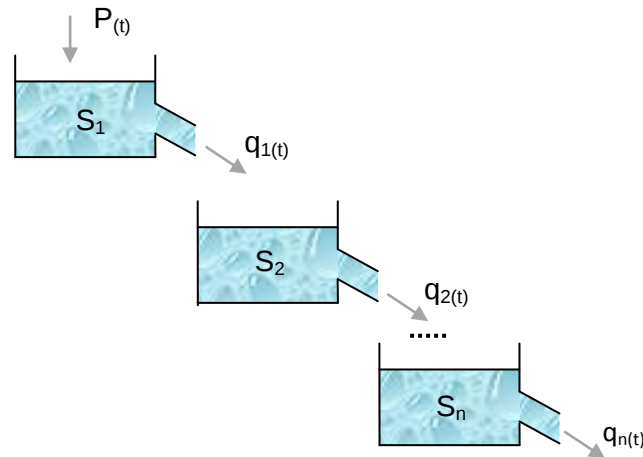


Figura 18- Cascata de reservatórios utilizada no modelo de HUI de Nash

Assim, o modelo conceitual de Nash para o HUI, considerando 2 parâmetros e reservatórios lineares, pode ser representado pela seguinte equação:

$$u(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (18)$$

onde $u(t)$ denota as ordenadas do HUI do modelo de Nash, t é o intervalo de tempo, n e k são os parâmetros do modelo Nash e Γ a função gama. O parâmetro k (parâmetro de escala), igual para todos os reservatórios lineares, é a constante de armazenamento e tem a dimensão de tempo, enquanto o parâmetro n (parâmetro de forma) diz respeito ao número de reservatórios lineares atenuando o pico do HUI.

Segundo Nash (1957), para estimar os parâmetros k e n , para um sistema linear invariante no tempo, as seguintes relações apresentadas abaixo são válidas:

$$m_{1(HUI)} = m_{1S} - m_{1E} \quad (19)$$

$$m_{2(HUI)} = m_{2S} - m_{2E} \quad (20)$$

em que $m_{1(HUI)}$ e $m_{2(HUI)}$ são os dois primeiros momentos do HUI; m_{1S} e m_{2S} são os dois primeiros momentos do hidrograma de saída; m_{1E} e m_{2E} são os dois primeiros momentos do hidrograma de entrada, ou seja:

$$m_{1S} = \frac{\sum Q_i \cdot t_i}{\sum Q_i} \quad (21)$$

$$m_{2S} = \frac{\sum Q_i \cdot t_i^2}{\sum Q_i} - m_{1S}^2 \quad (22)$$

$$m_{1E} = \frac{\sum P_i \cdot t_i}{\sum P_i} \quad (23)$$

$$m_{2E} = \frac{\sum P_i \cdot t_i^2}{\sum P_i} - m_{1E}^2 \quad (24)$$

onde, Q_i é a vazão de ESD ($m^3.s^{-1}$), t_i é o intervalo de tempo (min) e P_i são as precipitações efetivas (mm).

Inserindo-se os referidos parâmetros nas Equações 25 e 26 manipulando as expressões, tem-se:

$$k = \frac{m_{2S} - m_{2E}}{m_{1S} - m_{1E}} \quad (25)$$

$$n = \frac{(m_{1S} - m_{1E})^2}{m_{2S} - m_{2E}} \quad (26)$$

Desta forma, as ordenadas q do HU final, para um valor de P_u de 1 mm, incidindo de forma uniforme sobre a bacia hidrográfica, durante um tempo de duração D de 10 minutos, foram obtidas por meio da integração do HUI, de acordo com a Equação abaixo.

$$q(t) = \int_0^t u(t - \tau) d\tau \quad (27)$$

Para geração do HU final na BHSE, foi empregado o método dos momentos, segundo recomendações de Silva *et al.* (2008), conforme as equações 19 a 26. Já na BHRL, para geração do HU final, criou-se uma função objetivo a fim de otimizar os parâmetros k e n , em conformidade com as equações 25 e 26, respectivamente, considerando-se como variável independente, a $q(t)$ da equação 27.

3.4.5 Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUIGN)

Inicialmente, Rodriguez- Iturbe e Valdez (1979) derivaram as características de q_p e tempo para o pico (t_a) de um dado HUI, como função das razões de Horton. Sequencialmente, Bhagwat, Shetty e Hegde (2011), em face aos resultados do estudo de Rodriguez- Iturbe e Valdez (1979), propuseram relações entre os parâmetros de escala (k) e de forma (n) do Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIIN) com as leis de Horton.

Desta forma, considerou-se neste estudo como Hidrograma Unitário Geomorfológico de Nash (HUIGN) o emprego do HUIIN através das relações de n e k propostas por Bhagwat, Shetty e Hegde (2011), conforme equacionamento apresentado abaixo:

$$q_p \cdot t_a = \frac{n-1}{\Gamma(n)} e^{-(n-1)} \cdot n - 1^{n-1} = 0,5764 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0,55} \cdot R_L^{0,05} \quad (28)$$

em que R_B e R_L integram as leis de Horton (1945), descritas em Christofolletti (1980) como razão de bifurcação (R_B), que expressa a relação entre o número total de segmentos de uma certa ordem e o número total de segmentos de ordem imediatamente superior, e a razão de comprimento (R_L), que correlaciona o comprimento dos cursos d'água de uma dada ordem como o comprimento dos cursos d'água de uma ordem imediatamente inferior, e a R_A , proposta por Schumm (1956) e descrita em Christofolletti (1980) como razão

entre as áreas das bacias, a qual é dada pela razão entre a área de drenagem média dos cursos d'água de uma determinada ordem e a área de drenagem média dos cursos d'água de uma ordem imediatamente inferior.

Insta destacar que, em todos os termos do lado direito extremo podem ser determinados, uma vez que são derivados das características geomorfológicas da bacia hidrográfica.

Portanto, os parâmetros que por sua vez, sobraram para determinação são n e k do modelo de HUI de Nash. Assim, o parâmetro n foi determinado iterativamente de acordo com a Equação 29, enquanto k foi computado empregando-se os índices adimensionais, acima descritos, seguindo recomendação de Bhagwat, Shetty e Hegde (2011):

$$k = \frac{0,44 \cdot L}{v} \cdot \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0,55} \cdot R_L^{-0,38} \cdot (n - 1)^{-1} \quad (29)$$

onde v é a velocidade dinâmica (m.s^{-1}).

Com o propósito de estimar v , realizou-se uma análise de regressão, tomando como base cada bacia hidrográfica, considerando este parâmetro como variável resposta e a vazão como variável explicativa, sendo os dados empregados nessa análise originários das campanhas hidrológicas.

Posteriormente, o HUI obtido pelo modelo descrito nessa seção, foi convertido em HU, conforme realizado para o HUIN.

3.5 Análise de desempenho

Para analisar a acurácia dos modelos nas duas bacias hidrográficas, fez-se a comparação do hidrograma estimado de ESD com o observado, para cada evento. Destaca-se que a adequabilidade ou não dos modelos para cada evento é umas das premissas fundamentais e indispensáveis para o propósito deste trabalho.

Portanto, foram analisadas duas características em relação ao hidrograma estimado pelo modelo, comparativamente ao observado, tais como

sendo elas: o formato geral do hidrograma, e a qualidade da estimativa das vazões de pico.

Assim sendo, o desempenho dos referidos modelos foi avaliado empregando-se o coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) e o erro relativo na estimativa da vazão de pico (ER_{Qp}).

Segundo Guilhon e Rocha (2007), o C_{NS} (NASH; SUTCLIFFE, 1970) reflete a eficiência da aplicação do modelo para estimativas, especialmente das vazões de cheias, isto é, quando observam-se vazões bastante elevadas. Moriasi *et al.* (2007) sugerem a seguinte classificação para esse coeficiente: $C_{NS} > 0,65$, muito bom; $0,54 < C_{NS} < 0,65$, bom; $0,50 < C_{NS} < 0,54$, satisfatório. Valores de C_{NS} inferiores a 0,54, são considerados como ajustes insatisfatórios.

Já o ER_{Qp} está relacionado ao viés das vazões estimadas em relação às observadas (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013). Assim, quanto mais próximo de zero o valor deste coeficiente, melhor será a acurácia do modelo, ou seja, sem tendências nas estimativas e, além disso, serve também como indicativo se o modelo apresenta baixa representatividade (MORIASI *et al.*, 2007). Van Liew *et al.* (2007) apresentaram a seguinte classificação: $|ER_{Qp}| < 10\%$; muito bom; $10\% < |ER_{Qp}| < 15\%$; bom; $15\% < |ER_{Qp}| < 25\%$; satisfatório e $|ER_{Qp}| > 25\%$; inadequado.

O C_{NS} e o ER_{Qp} podem ser definidos, respectivamente, como:

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - Q_{i_{est}})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{i_{obs}} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (30)$$

$$ER_{Qp} = \frac{|Q_{p_{obs}} - Q_{p_{est}}|}{Q_{p_{obs}}} \cdot 100 \quad (31)$$

onde $Q_{i_{obs}}$ é a vazão observada do HESD no tempo $t=i$, $Q_{i_{est}}$ é a vazão estimado do HESD no tempo $t=i$, $\bar{Q}_{obs}$ é a vazão média observada, $\bar{Q}_{est}$ é a vazão média estimada, N é o número de ordenadas do HESD, $Q_{p_{obs}}$ é a vazão de pico observada e $Q_{p_{est}}$ é a vazão de pico estimada.

4 Resultados e discussão

4.1 Caracterização geomorfológica

Nas Figuras 19 e 20 podem ser analisados os Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) para as bacias hidrográficas da sanga do Ellert (BHSE) e do ribeirão Lavrinha (BHRL), respectivamente, com intuito de visualizar a variação do relevo ao longo das áreas em estudo.

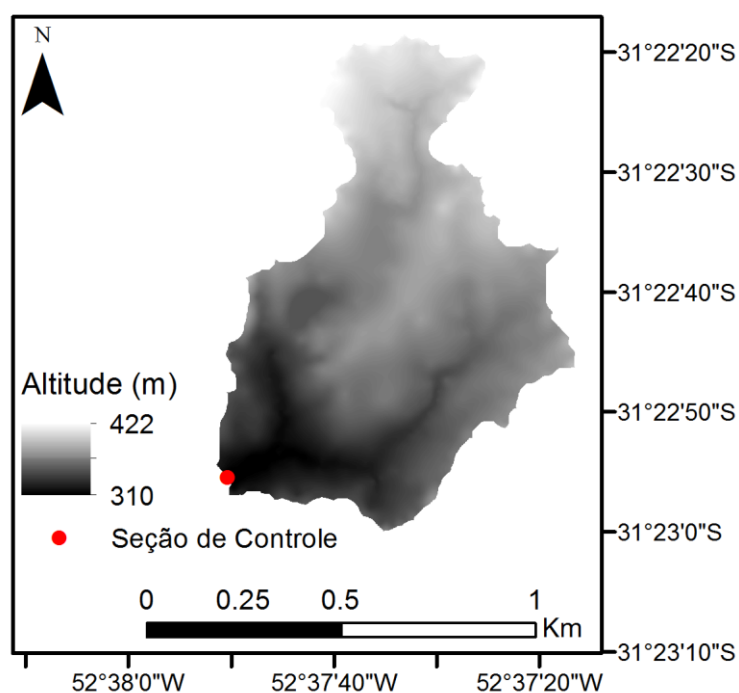


Figura 19- Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente, com resolução espacial de 1 metro, para a BHSE

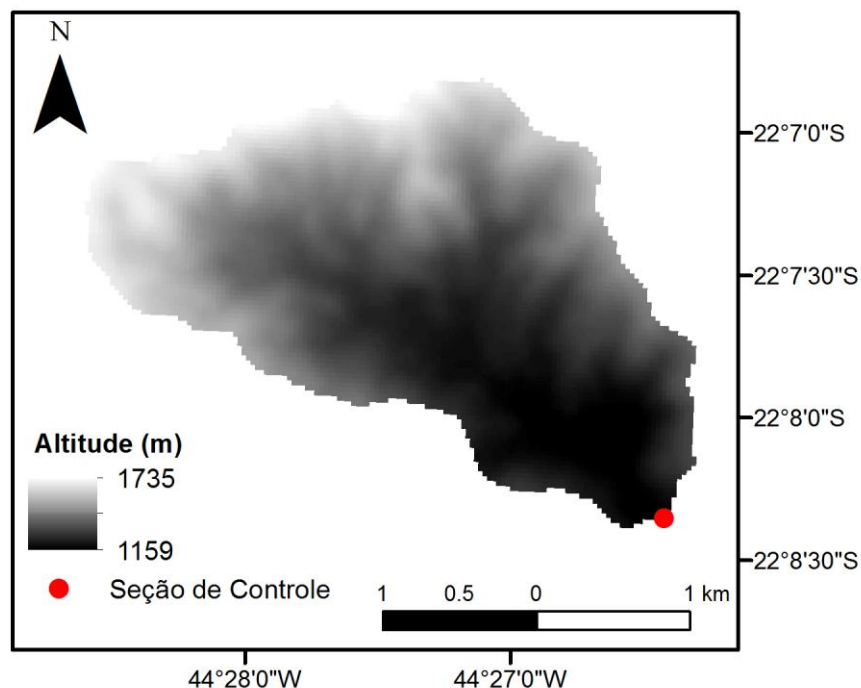


Figura 20 - Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente, com resolução espacial de 30 metros, da BHRL

Comparando-se as Figuras 19 e 20, nota-se relevantes diferenças dos desníveis das referidas bacias, com variação de 112 (310 a 422 m) e 576 m (1159 a 1735 m), para a BHSE e BHRL, respectivamente, ambas com predominância dos maiores valores na porção norte da área.

Tal comportamento é de grande importância uma vez que influencia diretamente no comportamento do escoamento superficial direto (ESD), sendo portanto, essencial a consideração da diferença do desnível entre as bacias, com a finalidade de entender o comportamento no ajuste dos modelos.

Outra informação de grande relevância no que tange à modelagem hidrológica é o mapa de declividade, uma vez que também está implicitamente relacionado à transformação de precipitação em vazão e, por sua vez, influenciando diretamente no ajuste dos modelos.

As Figuras 21 e 22 mostram os mapas de declividade subdivididos em classes propostas pela EMBRAPA (1979), obtidos por meio do processamento dos MDEHC's gerados para as bacias em estudo.

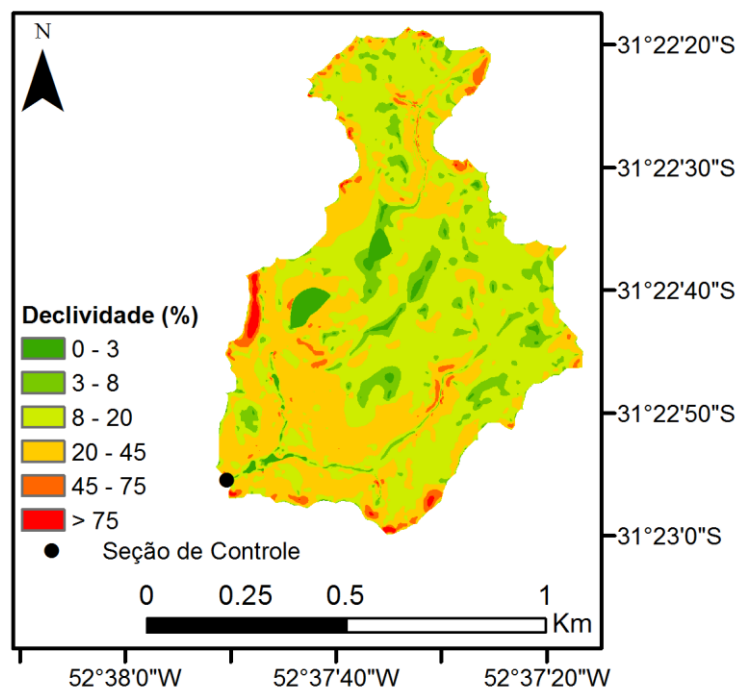


Figura 21- Distribuição das classes de valores de declividade do terreno da BHSE, de acordo com EMBRAPA (1979)

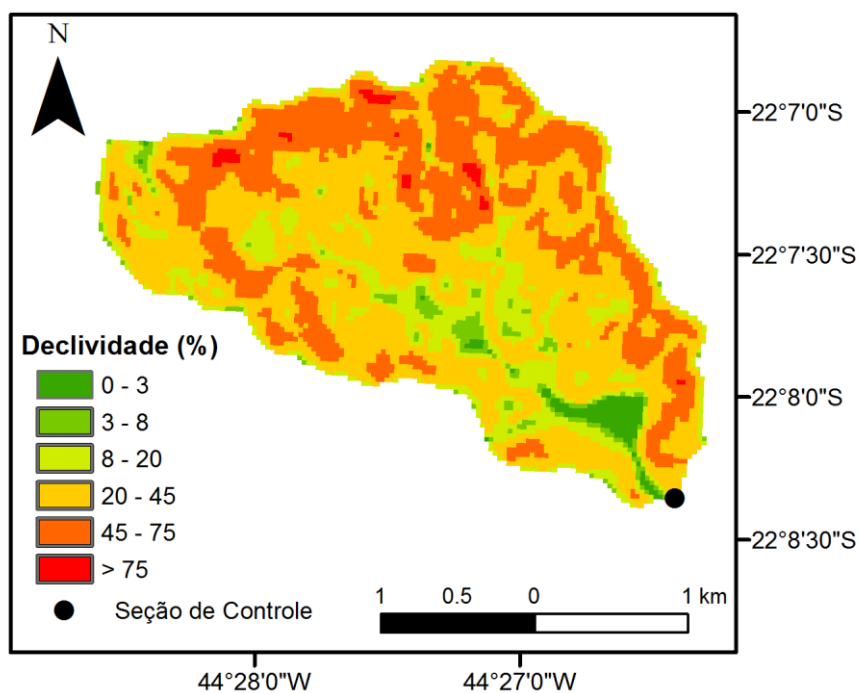


Figura 22- Distribuição das classes de valores de declividade do terreno da BHRL, de acordo com EMBRAPA (1979)

É possível observar grande distinção da variação de declividade do terreno para as duas bacias, onde se nota que para a BHSE, houve uma

predominância das classes de valores compreendidos entre 8 a 20%, em grande parte da bacia, com relevo variando entre ondulado à forte ondulado.

Já a BHRL observa-se que na maior parte da área houve predominância de classes de valores acima de 20%, variando-se, portanto, desde forte ondulado (20-45%) a forte montanhoso (acima de 45%), com pequenos aglomerados da área com valores superiores a 75%, sinalizando relevantes depressões da BHRL, comparativamente à BHSE.

Na sequência, foi determinado o tempo de concentração (t_c), o qual é necessário para modelagem do Hidrograma Unitário Geomorfológico de Clark (HUIGC), empregando-se a equação de Ven Te Chow (Equação 10), obtendo-se portanto t_c de 18,4 e 32,9 min para a BHSE e BHRL, respectivamente.

No entanto, devido ao fato da necessidade de se trabalhar com intervalos múltiplos de simulação, isto é, 5 minutos para a BHSE e 10 para a BHRL, considerou-se portanto t_c de 20 e 40 minutos, respectivamente. É importante ressaltar que este intervalo de simulação empregado de 5 (BHSE) e 10 minutos (BHRL), foi definido de acordo com Sherman (1932), o qual recomenda se trabalhar, no caso de bacias hidrográficas com áreas de drenagem inferiores a 50 km², com uma duração da P_u entre 1/3 e 1/4 do tempo de concentração da bacia em análise.

Nas Figuras 23 e 24 podem ser observadas as isócronas das bacias hidrográficas, as quais correspondem às linhas que representam os locais que possuem o mesmo tempo de viagem de ESD até a seção de controle, com um intervalo de simulação empregado neste estudo de 5 minutos para BHSE e 10 para a BHRL, conforme supracitado. Além disso, pode ser verificada a variação do tempo de viagem do ESD de cada célula que compõe as bacias até a respectiva seção de controle.

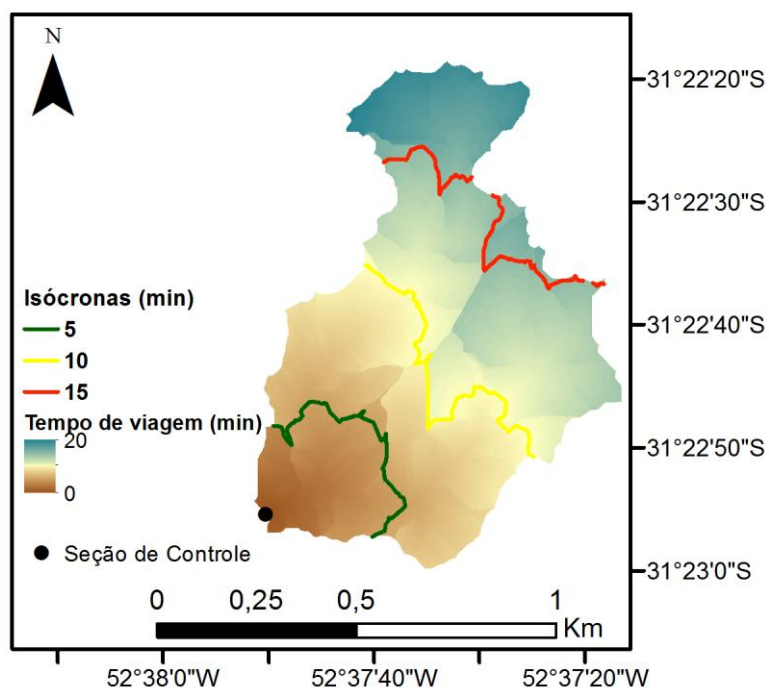


Figura 23- Isócronas para a BHSE considerando o tempo de concentração de 20 minutos

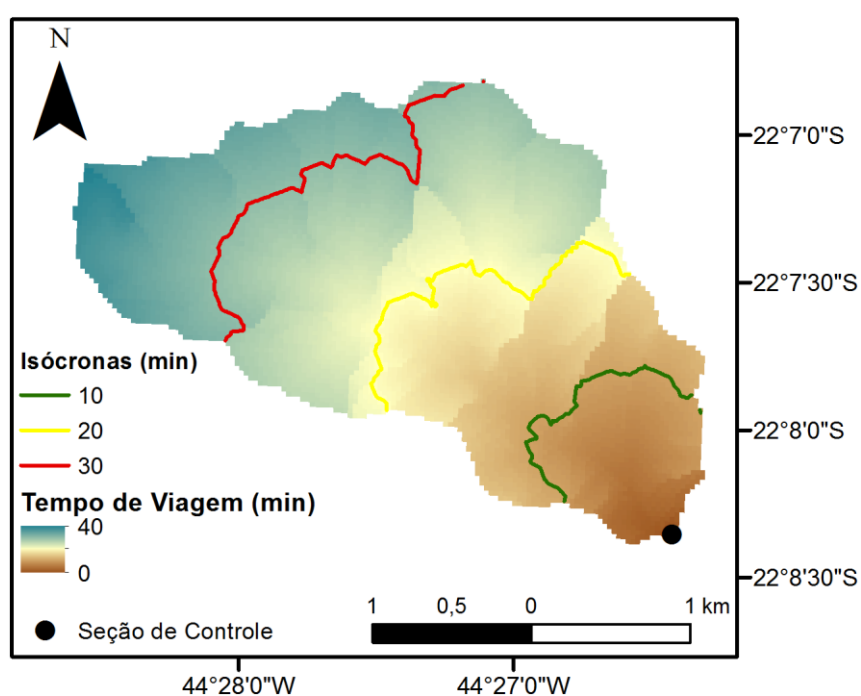


Figura 24- Isócronas para a BHRL considerando o tempo de concentração de 40 minutos

Nas Figuras 25 e 26 é possível avaliar, de forma sintetizada, as informações apresentadas anteriormente (Figuras 23 e 24), correspondendo por sua vez, aos histogramas tempo-área (HTA's) das BHSE e BHRL, respectivamente.

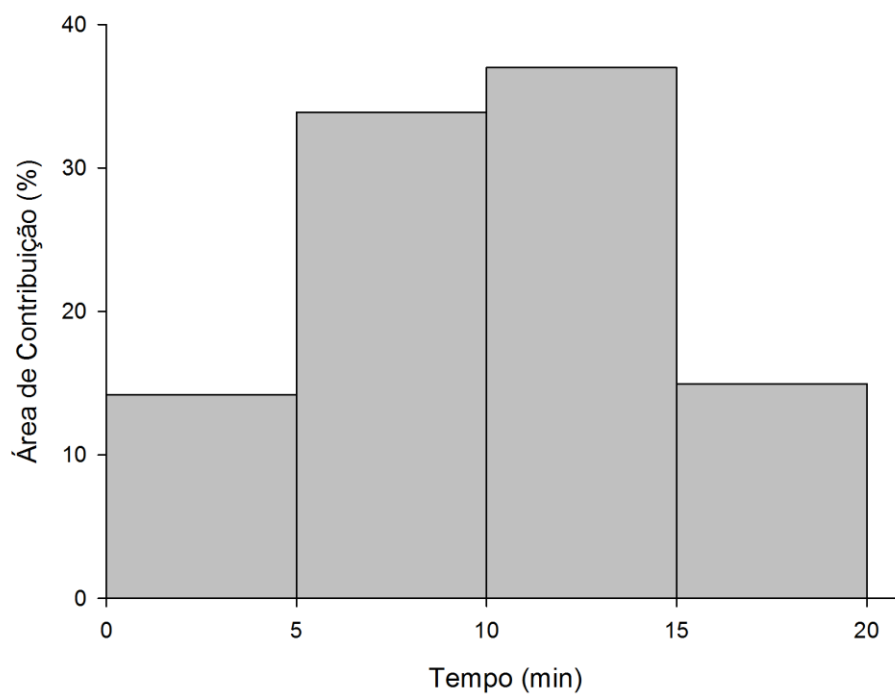


Figura 25 - Histograma tempo-área (HTA) empregado na modelagem do HUICG para BHSE

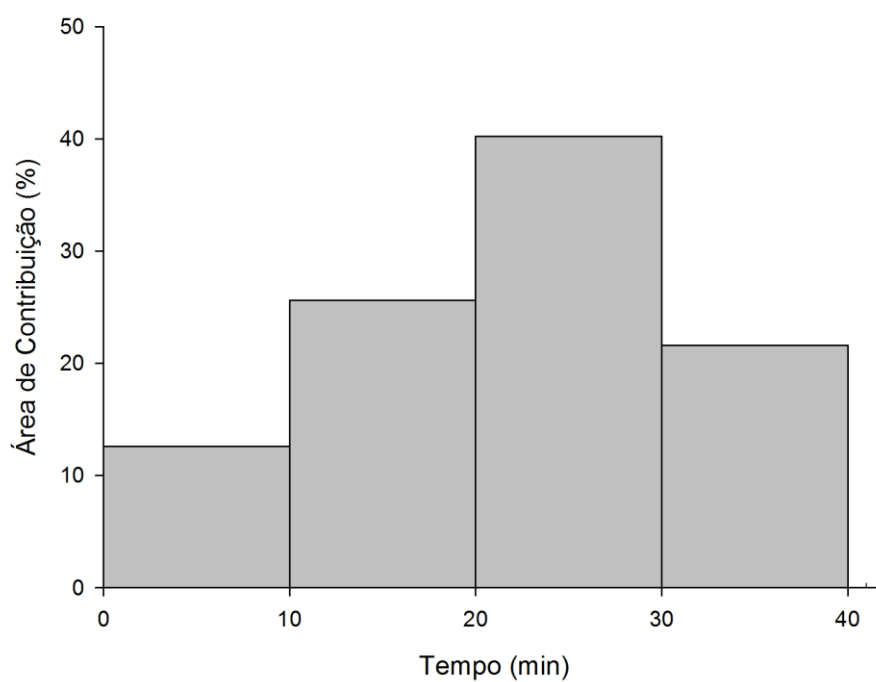


Figura 26 - Histograma tempo-área (HTA) empregado na modelagem do HUICG para BHRL

Dada a diferença no comportamento hidrológico no tocante a cheias observado a partir dos dados de monitoramento, empregaram-se para a BHSE

HTA's entre os tempos de concentração de 10 a 60 minutos, enquanto que para a BHRL, estes variaram de 20 a 230 minutos.

O tempo de concentração (t_c), juntamente com a distância máxima percorrida pelo escoamento superficial direto (1,61 km para a BHSE e 4,95 km para a BHRL), serviram de subsídio para a estimativa do coeficiente de armazenamento (R), seguindo a metodologia especificada na seção 3.4.3.

Portanto, o valor do parâmetro R foi de 0,240 e 0,337 horas, para a BHSE e BHRL respectivamente, o que possibilitou a estimativa dos coeficientes de ponderação C_0 e C_1 em 0,148 e 0,704 (BHSE) e 0,198 e 0,604 (BHRL) respectivamente. Os valores dos respectivos parâmetros foram empregados para a modelagem do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIGC), descrito na seção 4.4.3, assumindo valores constantes para todos os eventos em análise.

No caso do Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC), seção 4.4.2, foi determinado um valor R e de C_0 e C_1 para cada evento, conforme pode ser visualizado nas Tabelas 10 e 11.

As informações referentes à rede de drenagem (Figuras 27, 28, 29 e 30) foram derivadas numericamente a partir dos MDEHC's (Figuras 19 e 20) e, posteriormente, as relações geomorfológicas necessárias foram determinadas, sendo essa uma das premissas essenciais para modelagem do HUI Geomorfológico de Nash, conforme descrito na seção 3.4.4.

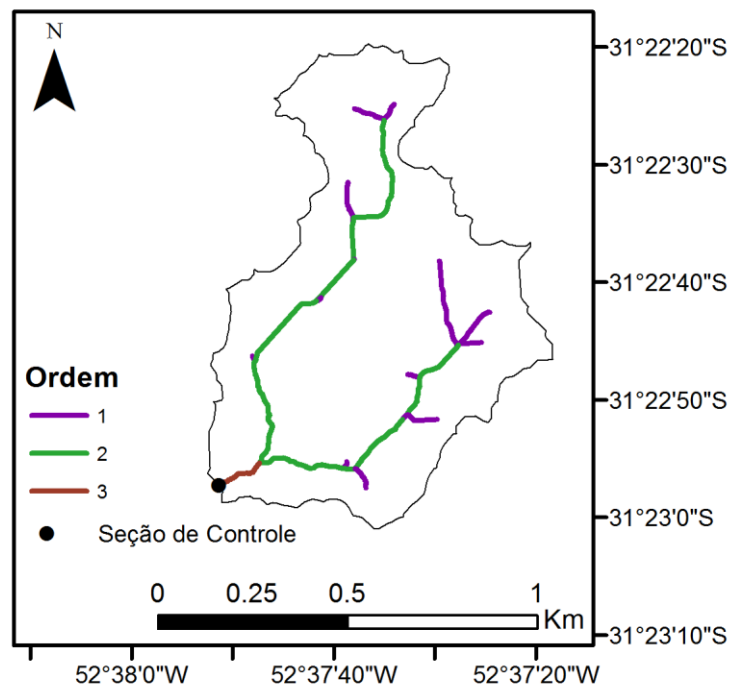


Figura 27—Ordem dos cursos d'água da rede de drenagem da BHSE segundo a classificação de Strahler (1952)

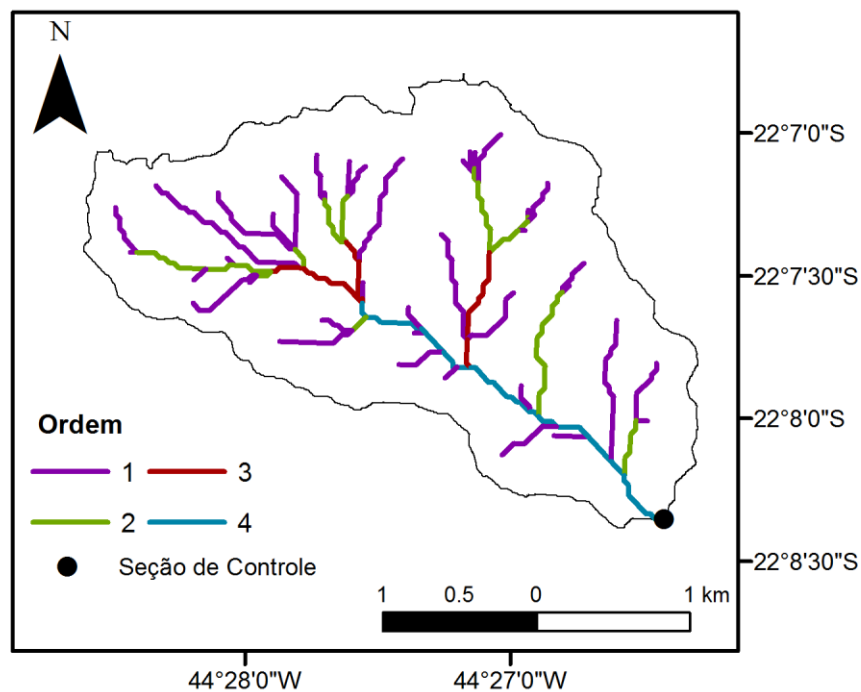


Figura 28 - Ordem dos cursos d'água da rede de drenagem da BHRL segundo a classificação de Strahler (1952)

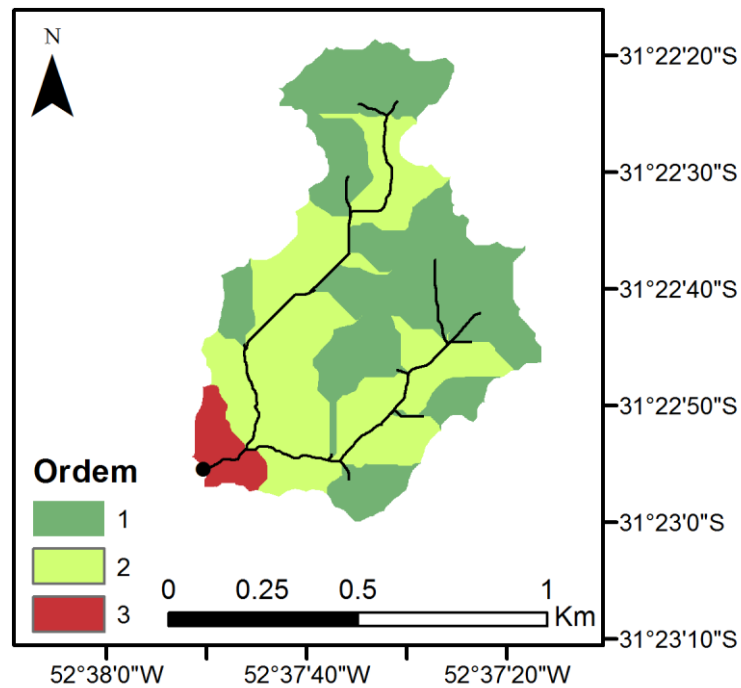


Figura 29 – Áreas de drenagem considerando a ordem dos cursos d'água que compõem a rede de drenagem da BHSE

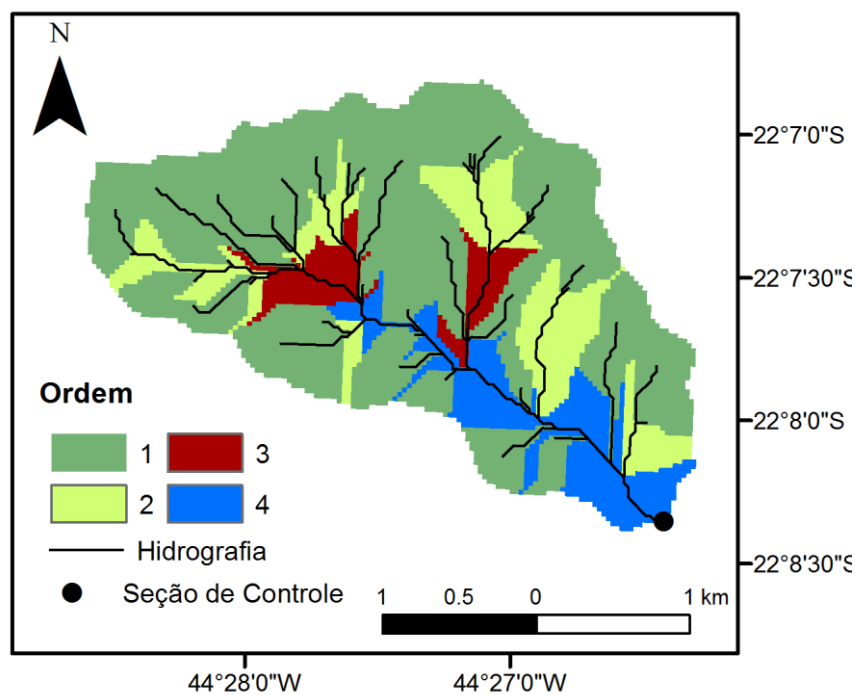


Figura 30 – Áreas de drenagem considerando a ordem dos cursos d'água que compõem a rede de drenagem da BHRL

De acordo com classificação de Strahler (1952), os cursos d'água de ordem 1 são aqueles que não possuem afluentes, enquanto que os cursos d'água de ordem n são formados a partir da confluência de 2 cursos d'água de ordem $n-1$.

Os parâmetros relacionados à rede de drenagem, visando à estimativa das razões de comprimento (R_L) e de bifurcação (R_B) de Horton (1945) e da razão entre áreas das bacias (R_A), proposta por Schumm (1956), bem como o valor médio dessas variáveis para a BHSE e para a BHRL, podem ser visualizados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Caracterização da rede de drenagem da BHSE e valores médios de razão de comprimento (R_L), razão de bifurcação (R_B) e razão entre áreas das bacias (R_A)

Ordem	Número de segmentos	Comprimento total (km)	Área (km ²)	R_L	R_B	R_A
1	13	0,95	0,33	6,57	4,25	7,24
2	2	1,89	0,62			
3	1	0,14	0,65			

Tabela 3- Caracterização da rede de drenagem da BHRL e valores médios de razão de comprimento (R_L), razão de bifurcação (R_B) e razão entre áreas das bacias (R_A)

Ordem	Número de segmentos	Comprimento total (km)	Área (km ²)	R_L	R_B	R_A
1	40	11,88	4,36	2,36	3,44	4,00
2	10	4,22	5,47			
3	3	1,95	5,87			
4	1	2,68	6,70			

Conforme pode ser observado, as referidas bacias hidrográficas são caracterizadas por sistemas complexos e distintos, impulsionados fundamentalmente por diferentes padrões de entrada, ou seja, de precipitação, por meio de vários processos relacionados ao ciclo hidrológico. Tais bacias hidrográficas possuem comportamentos distintos, regidos essencialmente pelo padrão individual do fenômeno (precipitação, evaporação e infiltração), da variável de interesse (vazão) e de diversos parâmetros (rugosidade, área da bacia, etc), característicos de cada bacia hidrográfica.

Sendo assim, pode-se inferir que, dada a complexidade e distinção dos sistemas caracterizados pelas duas bacias, existem fatores que facilitam ou não a geração do escoamento superficial direto, os quais, por sua vez, atuam individualmente com diferentes magnitudes.

4.2 Eventos hidrológicos empregados

Visando à descrição dos diferentes cenários das respostas hidrológicas nas bacias hidrográficas foram selecionados 3 eventos para a BHSE e 10 para a BHRL. Assim, as Tabelas 4 e 5 permitem analisar características específicas de interesse para cada evento de chuva *versus* vazão empregado neste trabalho.

Tabela 4- Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheia, com destaque para a intensidade média (i_m), duração (D), precipitação total (P_{TOTAL}), vazão de escoamento superficial direto máxima (Q_{ESD_MAX}) para a BHSE

Evento	Início		Fim		i_m (mm.h ⁻¹)	D (min)	P_5 (mm)	P_{TOTAL} (mm)	Q_{ESD_MAX} (m ³ s ⁻¹)
	Data	Hora	Data	Hora					
1	22/09/15	2:55	22/09/15	6:00	10,3	120	45,6	20,6	0,67
2	17/12/15	7:35	17/12/15	9:10	10,6	95	0	16,8	0,12
3	02/03/16	4:25	02/03/16	6:05	30,8	80	14,0	41	0,73

Tabela 5- Caracterização dos eventos empregados na modelagem de cheia, com destaque para a intensidade média (i_m), duração (D), precipitação total (P_{TOTAL}), vazão de escoamento superficial direto máxima (Q_{ESD_MAX}) para a BHRL

Evento	Início		Fim		i_m (mm.h ⁻¹)	D (min)	P_5 (mm)	P_{TOTAL} (mm)	Q_{ESD_MAX} (m ³ s ⁻¹)
	Data	Hora	Data	Hora					
1	31/10/06	18:43	31/10/06	23:13	20	60	0	20	0,31
2	25/01/07	21:46	26/01/07	5:16	27,5	120	72	55	0,45
3	02/02/07	14:16	02/02/07	19:16	26	60	85	26	0,29
4	09/04/07	14:04	09/04/07	20:04	7,3	90	32	11	0,08
5	24/07/07	19:57	25/07/07	06:27	3,3	510	8	28	0,15
6	21/09/09	16:31	22/09/09	03:01	6,1	540	11	55	0,36
7	17/02/10	15:26	18/02/10	01:26	5,8	390	5	38	0,46
8	25/10/10	22:36	26/10/10	2:36	56	30	3	28	0,24
9	26/10/10	2:36	26/10/10	10:36	15,3	180	34	46	0,47
10	08/01/13	17:42	09/01/13	02:42	16,4	300	26	82	0,65

Analizando as Tabelas 4 e 5, observa-se diferenças das grandezas associadas à precipitação entre as bacias. De modo geral, pode-se notar menor amplitude de precipitação na BHSE ($P_{TOTAL} = 16,8$ a 41 mm) e $Q_{ESD_MAX} = 0,12$ a $0,73$ m³/s) comparativamente à BHRL ($P_{TOTAL} = 11$ a 82 mm e $Q_{ESD_MAX} = 0,08$ a $0,65$ m³/s), enquanto a amplitude de vazões máximas foi semelhante entre as duas bacias.

Em relação às intensidades médias, observaram-se valores relativamente superiores dos eventos ocorridos na BHRL, embora os eventos tenham resultado em uma duração média substancialmente superior àquela da BHSE.

É sabido que o padrão de precipitação da região que está localizada a BHSE é do tipo de chuva frontal, o qual apresenta normalmente maiores durações, menores intensidades, abrangendo grandes áreas e distribuídas ao longo do ano. Em contrapartida, o padrão na BHRL é do tipo convectivo, com menores durações, maiores intensidades, de forma mais concentrada, apresentando duas estações bem definidas, isto é, período seco (inverno) e chuvoso (verão).

A boa distribuição pluviométrica no estado do Rio Grande do Sul, para Collischonn e Dornelles (2013), está associada à ocorrência de frentes frias praticamente o ano todo (em torno de 40 frentes por ano), sendo, portanto, responsáveis pela geração de precipitações de forma bem distribuída ao longo de todo o ano.

Já na Serra da Mantiqueira, segundo Reboita *et al.* (2010), assim como no Sudeste do Brasil, durante o verão ocorrem chuvas provenientes de sistemas frontais (frentes frias), os quais, associados a sistemas convectivos característicos e comuns no verão, promovem grande concentração de chuvas. Esta concentração ocorre especialmente no período chuvoso característico da região, o qual ocorre normalmente entre os meses de dezembro a março. Tal comportamento pode ser associado ao padrão de chuva convectiva da BHRL.

Por outro lado, a BHSE está inserida numa região que possui um padrão de precipitação que apresenta normalmente grandes durações, especialmente quando se compara ao padrão de precipitação típico da região da BHRL. A diferença no comportamento pluviométrico citado para as duas bacias não foi

verificado nos eventos selecionados para modelagem hidrológica (Tabelas 4 e 5).

Assim, é válido lembrar que neste estudo estão sendo analisados eventos isolados, isto é, predefinidos a partir do início e encerramento da resposta de cada ocorrência de precipitação, de modo a extrair as informações individuais referentes à contribuição de cada evento. Além disso, a estação pluviométrica de monitoramento da BHSE apresenta série histórica com curta duração (< 12 meses), limitando, portanto, contemplar eventos característicos da região que venham a representar tipicamente o padrão da precipitação.

Analizando unicamente as intensidades médias (i_m) ocorridas nas bacias (Tabelas 4 e 5), verifica-se que, não existe uma relação perfeita com a Q_{ESD_MAX} . No entanto, analisando conjuntamente com a variável P_{TOTAL} , observa-se que existe uma ligeira tendência, para ambas as bacias, da Q_{ESD_MAX} aumentar com o crescimento de i_m e P_{TOTAL} . Esta análise inicial demonstra a complexidade dos fatores envolvidos na análise de eventos para modelagem de cheias, tais como a umidade antecedente do solo, concentração da precipitação em um dado intervalo de tempo, características fisiográficas da bacia, dentre outros.

Embora exista uma discrepância entre a área de drenagem das bacias (BHRL = 6,7 km²; BHSE = 0,66 km²), observa-se nas Tabelas 4 e 5 uma desproporcionalidade de resposta das bacias, em termos de Q_{ESD_MAX} , em relação a um evento de chuva. Esta desproporcionalidade de resposta das bacias pode estar associada à umidade antecedente do solo e do padrão da ocorrência de cada evento de precipitação, e ao uso e cobertura do solo uma vez que tais características influenciam na geração do escoamento superficial direto. Porém, outros fatores relacionados às características fisiográficas das bacias podem acarretar em diferenças, as quais serão discutidas na seção de Resultados e Discussão.

4.3 Precipitação efetiva e hietograma

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentadas as grandezas associadas à separação de escoamento, bem como à precipitação efetiva para cada evento de precipitação para as bacias estudadas.

Tabela 6 - Características de cada hidrograma de ESD analisado na BHSE, com seus respectivos valores calibrados do Número da Curva (CN)

Evento	P _{TOTAL} (mm)	P _e (mm)	P ₅ (mm)	Coefficiente de ESD (%)	Q _{ESD_MAX} (m ³ s ⁻¹)	CN
1	20,6	1,22	45,6	5,9	0,67	73,6
2	16,8	0,22	0	1,31	0,12	53,0
3	41,0	1,6	14,0	3,9	0,73	36,8

Tabela 7– Características de cada hidrograma de ESD analisado na BHRL, com seus respectivos valores calibrados do Número da Curva (CN)

Evento	P _{TOTAL} (mm)	P _e (mm)	P ₅ (mm)	Coefficiente de ESD (%)	Q _{ESD_MAX} (m ³ s ⁻¹)	CN
1	20	0,29	0	1,45	0,31	15,9
2	55	0,89	72	1,62	0,45	7,09
3	26	0,31	85	1,19	0,29	10,6
4	11	0,11	32	1,00	0,08	19,5
5	28	0,25	8	0,89	0,15	8,7
6	55	0,64	11	1,16	0,36	6,6
7	38	0,58	5	1,53	0,46	10,3
8	28	0,22	3	0,79	0,24	6,6
9	46	0,79	34	1,72	0,47	8,7
10	82	1,33	26	1,62	0,65	4,85

Com base nas Tabelas 6 e 7, pode-se observar que a amplitude de variação dos valores de P_e foi semelhante entre as bacias, isto é, na BHSE variou de 0,22 a 1,6 mm e na BHRL entre 0,11 a 1,33 mm. No entanto, nota-se forte discrepância das amplitudes dos valores de P_{TOTAL} que correspondeu a 20,4 mm (16,8-41) e 71 mm (11-82) para a BHSE e BHRL, respectivamente.

Analisando os valores do coeficiente de ESD, os quais representam efetivamente a porção de precipitação total que é convertida em escoamento superficial direto, nota-se significativa distinção entre as bacias. Para a BHSE, o mesmo variou de 1,31 a 5,9%, enquanto que na BHRL variou entre 0,79 a

1,72%, sinalizando a tendência de maior conversão de chuva em escoamento superficial direto na BHSE. Além disso, observa-se que a BHRL apresenta maior regularidade na transformação precipitação em escoamento superficial direto, haja vista uma pequena variabilidade nos seus valores de coeficiente de ESD ($CV = 25,8\%$) comparada à da BHSE ($CV = 62,1\%$).

Os resultados referentes ao coeficiente de ESD possibilitam concluir que a BHRL tem forte tendência em permitir a infiltração de água no solo. Apesar da análise de apenas três eventos, no caso da BHSE, e de pequena magnitude dos valores totais de precipitação, dificultando a análise e comparação entre as bacias, é possível observar a diferença do comportamento entre elas no que concerne à geração do escoamento superficial direto. Ainda com base nas Tabelas 6 e 7, pôde-se verificar que existe uma relação significativa entre o coeficiente de ESD tanto com a P_{TOTAL} como com a P_e no caso da BHRL.

Neste mesmo contexto, outro parâmetro de grande relevância a ser destacado nas Tabelas 6 e 7 é o Número da Curva (CN), o qual reflete a capacidade de geração de escoamento superficial direto da bacia, em relação as suas características fisiográficas associadas ao uso e ocupação e grupo hidrológico do solo.

Os valores de CN variam de 1 a 100, sendo os maiores valores correspondendo a solos mais impermeáveis, os quais, por sua vez, possuem maior capacidade de geração de escoamento superficial direto. Deste modo, para um mesmo evento de precipitação, quanto maior o valor de CN, mais impermeável será o solo da bacia e, conseqüentemente, maior será o potencial de geração de escoamento superficial direto.

Cabe salientar que o SCS (1971) recomenda que sejam empregados valores tabelados de CN em função, basicamente, das características do uso e tipo de solo, além da umidade antecedente. Tais valores tabelados foram determinados para condições fisiográficas específicas norte-americanas a partir de avaliações experimentais. Assim, estes valores podem sofrer variações quando aplicado em outras regiões.

Além disso, é importante destacar que os valores de CN podem variar em função das grandezas das precipitações, ou seja, em função da magnitude, duração e distribuição temporal do evento de precipitação. Vários estudos

científicos discutem sobre aplicações de valores de CN para modelagem de cheias, tais como os de Ahmad, Ghumman e Ahmad (2009), Nguyen, Maathuis e Rientjes (2009), Šraj, Dirnbek e Brilly (2010) e Nunes (2015).

Assim, analisando os valores de CN para as duas bacias (Tabelas 6 e 7), observa-se valores expressivamente maiores para a BHSE (36,8 a 73,6). Na BHRL, o CN variou de 4,9 a 19,5, sendo o maior valor obtido para a BHRL significativamente menor quando comparado ao mínimo obtido para a BHSE, desta forma, indicando uma tendência perceptível de maior geração de ESD na BHSE. Além disso, observa-se grande variabilidade de CN entre os eventos de precipitação, comparado isoladamente para cada bacia.

Analisando isoladamente os eventos de precipitação ocorridos nas duas bacias, nota-se que os valores de CN foram variáveis, comportamento esse similar ao encontrado por outros autores. Agirre *et al.* (2005), determinando os valores de CN de forma semelhante, em 18 eventos diversos de precipitação, numa bacia hidrográfica da Espanha, observaram variações dos valores de CN (19,3 a 72,9). Do mesmo modo, Nunes (2015), avaliando-se os valores de CN em duas bacias hidrográficas distintas, sendo uma localizada no Sudeste de Minas Gerais (61,5 e 99,1) e outra no Sul do Rio Grande do Sul (58,6 e 83,4), observaram também variações dos valores de CN para ambas bacias.

Considerando a variabilidade dos valores de CN para a mesma bacia, pode-se atribuir esse comportamento à condição inicial da umidade antecedente do solo antes da ocorrência da precipitação, bem como às características de cada evento de precipitação (intensidade, duração), uma vez que ambos refletem diretamente na resposta da bacia no que concerne à geração do escoamento superficial direto. Neste sentido, pode-se inferir que, para uma mesma bacia hidrográfica, um maior teor de umidade antecedente do solo tende a apresentar uma resposta mais rápida e de maior magnitude, considerando um evento de precipitação de mesma grandeza.

No entanto, dado o pequeno número de eventos analisados para a BHSE comparado à BHRL, deve-se ter cautela ao concluir sobre a tendência de maior geração de escoamento superficial direto na BHSE e, considera-se que existe a necessidade de um estudo mais acurado, contemplando um maior número de eventos, para se fazer inferências mais precisas sobre o comportamento entre elas.

Sendo assim, conforme supracitado, o comportamento do ESD é reflexo da interação de diversos processos atuantes na bacia, favorecendo ou dificultando o ESD, não permitindo, portanto, inferir-se com base apenas em um único parâmetro, isto é, deve ser considerado o sistema como um todo.

Em suma, pode-se inferir que o tipo de solo (NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos - RLe e CAMBISSOLOS HÁPLICO Eutróficos - CXbe) presente na BHSE apresenta característica similar à BHRL, a qual é constituída por 92% de Cambissolos, não influenciando significativamente na geração de escoamento superficial direto.

O uso e ocupação do solo (Figura 4) da BHSE também contribui para a maior capacidade de geração de escoamento superficial quando comparado à BHRL (Figura 6), uma vez que a mesma é constituída predominantemente por pastagem, com um percentual em torno de 70%, seguido de mata nativa, com 20% e 10% de cultura anual. Já a BHRL é ocupada por 55% de floresta, sendo 41% de mata nativa e 14% de regeneração natural em fase de desenvolvimento médio e avançado, 40% de pastagem e 5% de vegetação típica de várzea. Portanto, comparando o uso de solo entre as duas bacias, pode-se inferir que a BHSE apresenta maior potencial para geração de escoamento superficial direto em relação à BHRL, uma vez que é constituída em grande parte por pastagem (70%), comparando com a BHRL que é ocupada por floresta em 55% da sua área. Desta forma, considerando que a pastagem possui menor capacidade de interceptação de água pela chuva que a floresta, essa por sua vez atuará de forma menos expressiva na redução do escoamento, quando comparado com a floresta, resultando numa maior geração de escoamento. Outro aspecto relevante a ser destacado é que a BHRL possui grande quantidade de serapilheira, conforme constatado por Junqueira Júnior (2008), o que poderá proporcionar melhor qualidade hidrológica do solo, resultando-se numa maior quantidade de macroporos e de fluxos preferenciais, favorecendo portanto o processo de infiltração de água no solo. Roa-Garcia et al. (2011), analisando o comportamento da infiltração de água no solo em diferentes situações de uso do solo em bacias de cabeceira na região dos Andes colombianos, verificaram situação semelhante, ou seja, de que no ambiente sob mata de montanha a qualidade hidrológica do solo é

muito superior, desenvolvendo-se grande quantidade de macroporos e fluxos preferenciais devido ao grande acúmulo de matéria orgânica no solo.

Essa característica de melhor qualidade hidrológica de áreas ocupadas por matas e florestas, quando comparada por outros uso e ocupação do solo, foi constatada por diferentes autores, dos quais destacam-se Alvarenga *et al.* (2011); Roa-Garcia *et al.* (2011); Zimmermann, Elsenbeer e Moraes (2006).

Outra característica extremamente importante no que se refere à geração de escoamento superficial direto é a declividade da bacia hidrográfica. Portanto, quando se compara a declividade de ambas as bacias (Figuras 21 e 22), pode-se perceber relevantes irregularidades da BHRL, isto é, com tendência de maiores valores de declividade, com predominância de classes de valores acima de 20%, com uma porção significativa da área com valores superiores a 75%. No caso da BHSE, há predominância de menores valores de declividades, sendo a maioria entre as classes de valores entre 8 a 45%. Logo, considerando isoladamente a declividade, pode-se dizer que BHRL apresentaria maior potencial de geração de escoamento superficial direto, comparado à BHSE.

Diante desses aspectos, nota-se que o processo de conversão de precipitação em vazão de ESD das respectivas bacias é resultado da interação de diversos fenômenos, os quais, atuam de modo favorável ou não para a geração do escoamento superficial direto propriamente dito, dependendo, portanto, das características fisiográficas, bem como do padrão de precipitação de cada bacia.

4.4 Modelagem do hidrograma unitário

Nas seguintes seções serão apresentados os parâmetros necessários para o ajuste individual de cada modelo, bem como algumas considerações gerais implícitas na respectiva modelagem.

Posteriormente, serão mostrados também os resultados das análises de desempenho dos modelos, de acordo com as estatísticas descritas no item 3.5.

4.4.1 Hidrogramas Unitário Adimensional (HUA) e Triangular (HUT)

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os parâmetros necessários para a modelagem do HUA e do HUT para a BHSE e para a BHRL, respectivamente. Tais parâmetros foram obtidos de forma semelhante, para cada evento de precipitação, utilizando-se duas metodologias distintas, com objetivo de analisar o desempenho no ajuste dos modelos, sendo ambas conforme recomendação do Soil Conservation Service (1971), descritas na seção 3.4.1.

Além dos parâmetros necessários para a modelagem dos hidrogramas mencionados anteriormente, apresenta-se também nas referidas Tabelas 8 e 9 o T_{lagobs} , com intuito de averiguar o desempenhadas duas metodologias empregadas para estimativas de t_{lag} .

Tabela 8- Parâmetros do modelo de HUA e HUT, considerando os eventos ocorridos na BHSE

Evento	T_{lag1} (h)	q_p ($m^3 s^{-1}$)	T_{lag2} (h)	q_p ($m^3 s^{-1}$)	T_{lagobs} (h)
1	0,38	0,33	0,21	0,55	0,40
2	0,63	0,20	0,21	0,55	0,11
3	0,88	0,15	0,21	0,55	0,51

Tabela 9- Parâmetros do modelo de HUA e HUT, considerando os eventos ocorridos na BHRL

Evento	T_{lag1} (h)	q_p ($m^3 s^{-1}$)	T_{lag2} (h)	q_p ($m^3 s^{-1}$)	T_{lagobs} (h)
1	3,42	0,40	0,42	2,79	0,57
2	6,42	0,21	0,42	2,79	1,33
3	4,75	0,29	0,42	2,79	1,58
4	2,92	0,46	0,42	2,79	1,20
5	5,42	0,25	0,42	2,79	0,04
6	6,75	0,20	0,42	2,79	1,37
7	4,75	0,29	0,42	2,79	1,30
8	6,75	0,20	0,42	2,79	0,75
9	5,42	0,25	0,42	2,79	1,18
10	8,42	0,16	0,42	2,79	1,17

Destaca-se que, na primeira metodologia para a estimativa de t_{lag} , considerou-se como variável o potencial de água no solo (S), sendo este parâmetro variável naturalmente em função das características de solo, uso do solo e umidade antecedente da bacia hidrográfica, variando-se, portanto, para cada evento, de acordo com a Equação 8. Na segunda metodologia, por sua

vez, considerou-se como variável o tempo de concentração (Equação 9) das respectivas bacias hidrográficas, sendo tal parâmetro fixo e constante para todos os eventos em análise, determinado por Ven Te Chow (Equação 10), obtendo-se t_c de 18,41 e 32,94 min para a BHSE e BHRL, respectivamente.

Os modelos HUT e HUA têm sido comumente utilizados para estimativas de vazões de pico e para determinação de hidrogramas resultantes de eventos extremos de precipitação, como pode ser observado nos estudos de Khaleghi *et al.* (2011), Luxon, Christopher e Pius (2013), Majidi *et al.* (2012), Sule e Alabi (2013) e Nunes (2015).

Entretanto, é importante ressaltar que os estudos acima mencionados consideraram abordagens distintas do HUT e HUA no que concerne à estimativa dos parâmetros, especialmente do t_{lag} , como é o caso desse estudo, o qual considerou duas metodologias para a sua determinação.

Assim, pode-se observar na Tabela 8 que os valores de t_{lag} obtidos para a BHSE variaram de 0,38 a 0,88 horas, enquanto que a BHRL apresentou valores de t_{lag} (Tabela 9) variando entre 2,92 e 8,42 horas, para o HUA e HUT, utilizando-se a primeira metodologia para determinação de t_{lag} . No entanto, considerando o segundo método, o qual considera o tempo de concentração de cada bacia, observou valor de t_{lag} da BHSE igual à metade de t_{lag} da BHRL, ou seja, 0,21 horas para BHSE e 0,42 horas para a BHRL. Na sequência, verificando-se os valores de T_{lagobs} , os quais foram determinados com o intuito de avaliar o emprego das duas metodologias para estimativa de t_{lag} , foi possível constatar que variaram entre 0,11 e 0,51 horas e de 0,04 e 1,58 horas para a BHSE e BHRL, respectivamente. Assim, analisando tais valores, em termos médios, observaram-se valores mais próximos de T_{lagobs} quando t_{lag} foi estimado pela primeira metodologia empregada (Equação 8) para a BHSE. Já para a BHRL, notou-se valores mais próximos aos observados para a segunda metodologia empregada (Equação 9). A superestimativa de t_{lag} pela primeira metodologia para a BHRL pode ser atribuída ao fato dos valores de CN obtidos serem extremamente baixos, desta forma resultando em valores altos de t_{lag} . Isso indica que deve-se ter cautela ao usar a primeira metodologia (Equação 8) para bacias hidrográficas com baixos valores de CN, porém, existe a necessidade de analisar criteriosamente outras bacias hidrográficas com características similares de potencial de infiltração de água no solo.

Face aos valores de t_{lag} apresentados nas Tabelas anteriores, pode-se entender que a BHRL possui uma resposta mais lenta, quando comparada à BHSE, no que se refere à chegada, na seção de controle, do ESD gerado na bacia. Este comportamento está associado à maior distância a ser percorrida pelo escoamento superficial direto ($L = 4,95$ km) e também pela maior capacidade de armazenamento de água no solo (S) da mesma, comparativamente à BHSE ($L = 1,61$ km), visto que o valor de t_{lag} é diretamente proporcional ao comprimento a ser percorrido pelo escoamento (L) e à capacidade de armazenamento de água do solo (S), conforme se verifica na Equação 8. Neste mesmo sentido, apesar da BHRL apresentar maior declividade comparada à BHSE, sendo este fator inversamente proporcional ao valor de t_{lag} , ou seja, favorecendo a um menor tempo de t_{lag} , não influenciou significativamente.

Com relação à vazão de pico (q_p), nota-se que as mesmas variaram de 0,15 a 0,33 $m^3.s^{-1}$ para BHSE e de 0,16 a 0,46 $m^3.s^{-1}$ para a BHRL, por meio da primeira metodologia para estimativa de t_{lag} . Já para a segunda, tais valores foram respectivamente de 0,55 e 2,79 $m^3.s^{-1}$ para BHSE e BHRL.

De modo geral, os valores de q_p apresentam consideráveis variações quando analisados por evento de precipitação *versus* vazão, uma vez que, no caso da primeira metodologia, depender essencialmente de S e CN , os quais, por sua vez, variam naturalmente por cada evento. Em contrapartida, os valores de q_p empregados pela segunda metodologia apresentam valores constantes em todos os eventos devido ao fato de depender unicamente de t_c . Comparando-se os valores de CN (Tabelas 6 e 7) com as q_p para modelagem de HUA e HUT (Tabela 8 e 9) é possível visualizar este efeito.

Por exemplo, o maior valor de q_p para a BHSE (evento 1) se relaciona com o maior valor de CN . Do mesmo modo, o evento 4 da BHRL, que apresentou maior q_p , para HUA e HUT, apresentou também o maior valor de CN . Por outro lado, o evento 10, correspondente ao menor q_p para HUA e HUT, por sua vez, também apresentou menor valor de CN .

É importante lembrar que o parâmetro q_p corresponde à máxima vazão unitária do HU e, neste estudo, foi determinada para um valor de P_u de 1 mm, variando-se consideravelmente entre as duas bacias, possivelmente devido à

diferença entre as áreas de drenagem das bacias (BHSE – 0,66 km² e BHRL – 6,7 km²), conforme previamente mencionado.

4.4.2 Hidrogramas Unitário Instantâneo de Clark (HUIC)

As Figuras 23 e 24 (Seção 4.1) permitem visualizar as isócronas geradas através da ferramenta *Watershed Isochrones* para a BHSE e BHRL, respectivamente, enquanto os histogramas tempo-área (HTA's) são ilustrados nas Figuras 25 e 26, respectivamente, considerando apenas o tempo de concentração de cada bacia hidrográfica (BHSE = 20 min e BHRL = 40 min). No entanto, como se faz necessário a calibração do t_c por evento no caso do HUIC, outros mapas de isócronas e HTAs foram gerados para cada bacia.

Os valores de tempo de concentração da bacia (t_c) ajustados para cada evento analisado podem ser visualizados nas Tabelas 10 e 11, para a BHSE e BHRL, respectivamente, os quais têm isócronas e HTA's correspondentes que foram empregados para o ajuste do modelo de HUIC. Do mesmo modo, os valores ajustados para o coeficiente de armazenamento R, o qual reflete o efeito de atenuação da onda de cheia na bacia hidrográfica, também podem ser visualizados nas referidas tabelas, assim como os coeficientes de ponderação C_0 e C_1 calculados com base nas Equações 15 e 16 .

Tabela 10- Parâmetros de ajuste para cada evento analisado na BHSE

Evento	t_c (h)	R (h)	C_0	C_1
1	0,42	0,17	0,19	0,61
2	0,33	0,11	0,28	0,44
3	0,33	0,05	0,45	0,09

Tabela 11- Parâmetros de ajuste para cada evento analisado na BHRL

Evento	t_c (h)	R (h)	C_0	C_1
1	0,33	0,17	0,07	0,86
2	1,17	2,32	0,03	0,93
3	2,17	0,80	0,09	0,81
4	0,67	1,80	0,04	0,91
5	0,83	1,80	0,04	0,91
6	2,83	1,50	0,05	0,89
7	0,83	1,45	0,05	0,89
8	0,50	1,10	0,07	0,86
9	1,50	1,80	0,04	0,91
10	1,83	2,04	0,04	0,92

Observa-se considerável variabilidade dos parâmetros do HUIC para as duas bacias hidrográficas como, por exemplo, o t_c que variou entre 0,33 a 0,42h para a BHSE e entre 0,33 e 2,83h para a BHRL. Com relação ao parâmetro R, foram observados valores de 0,05 a 0,17h para a BHSE e de 0,17 a 2,32h para a BHRL. Esta variação nos valores dos parâmetros t_c e R tem sido observada em outros estudos científicos na temática de modelagem de cheias com o HUIC (ADIB *et al.* 2010; KUMAR *et al.* 2002; SAHOO *et al.* 2006; AHMAD, GHUMMAN e AHMAD 2009).

De acordo com Sabol (1988), o parâmetro R representa uma medida do armazenamento temporário da P_e na bacia hidrográfica antes de ocorrer o processo de drenagem para a seção de controle, sendo que, quanto maior o seu valor em relação à t_c , maior é o efeito do armazenamento temporário (retenção) dentro da bacia.

Portanto, com base nos parâmetros de ajuste (R e t_c) e nas definições de Sabol (1988), pode-se deduzir que a BHSE apresenta um efeito de armazenamento temporário de P_e na bacia consideravelmente menor que a BHRL, sendo basicamente explicado pelas diferenças de características fisiográficas e de resposta hidrológica.

Este efeito de menor armazenamento temporário de P_e na BHSE reflete em um menor tempo entre o início da formação da precipitação efetiva até a chegada do escoamento superficial direto na rede de drenagem da mesma, e consequentemente, menor efeito atenuador da BHSE, comparada à BHRL.

Sabol (1988) relata que, em função de dificuldades de determinação do R a partir de dados observados, o modelo HUIC não tem sido largamente empregado. De acordo com Nunes (2015), a necessidade de determinação de HTA's tem limitado a aplicação do HUIC, haja vista a complexidade de sua obtenção. Contudo, a utilização, neste estudo, da ferramenta "Watershed Isochrones" facilitou a aplicação do HUIC.

4.4.3 Hidrogramas Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIGC)

Conforme previamente descrito, para modelagem deste modelo, inicialmente foi calculado o tempo de concentração das bacias hidrográficas, utilizando-se a equação de Ven Te Chow (Equação 10), obtendo-se 18,41 minutos para a BHSE e 32,94 minutos para a BHRL. Contudo, como o HTA para a bacia deve estar no mesmo intervalo de tempo da simulação, empregaram-se os tempos de concentração de 20 e 40 minutos para a BHSE e BHRL, respectivamente.

Para isso, considerou-se a variação do tempo de viagem do escoamento superficial direto de cada célula que compõe a BHSE (Figura 23) e a BHRL (Figura 24), até a seção de controle das respectivas bacias. Além disso, considerou-se também as isócronas das bacias hidrográficas, que são linhas que representam locais da bacia hidrográfica que possui o mesmo tempo de viagem de escoamento superficial direto até a seção de controle, num intervalo correspondente ao intervalo de simulação empregado neste trabalho, ou seja, 5 minutos para BHSE (Figura 25) e 10 minutos para a BHRL (Figura 26).

Salienta-se que o coeficiente de armazenamento (R) foi estimado com base no parâmetro tempo de concentração (t_c), juntamente com a distância máxima percorrida pelo escoamento superficial direto (1,61 km para a BHSE e 4,95 km para a BHRL) e com a área de drenagem, de acordo com a metodologia descrita na seção 3.4.3. Desta forma, o parâmetro R assumiu 0,24h para BHSE e 0,337h para a BHRL, possibilitando a estimativa dos parâmetros C_0 e C_1 em 0,148 e 0,704 (BHSE) e 0,198 e 0,604 (BHRL), respectivamente. Seguindo a definição e interpretação de Sabol (1988) acerca

de R , pode-se deduzir que a BHSE tem um efeito de armazenamento temporário de P_e na bacia ligeiramente menor que a BHRL, sendo este resultado e as explicações para este fato equivalentes às considerações feitas HUIC.

No entanto, destaca-se que no caso de HUICG, os valores de R e t_c foram considerados constantes para representar cada bacia para todos os eventos analisados, diferentemente ao HUIC, onde foi determinado um valor de R (Tabela 10) e t_c (Tabela 11) para cada evento em análise.

Deve-se ressaltar que o equacionamento empregado para estimativa de R e t_c na modelagem do HUICG assume grande importância no contexto de modelagem hidrológica, corroborando com Nunes (2015). Diferentes metodologias e fontes de informações têm sido empregadas para a análise do HUICG, conforme pode ser verificados os estudos de Adib et al. (2010), Sahoo et al. (2006) e Nunes (2015).

4.4.4 Hidrogramas Unitário Instantâneo de Nash (HUIN)

Nas Tabelas 12 e 13 podem ser visualizados os valores dos parâmetros k e n , determinados conforme metodologia descrita na Seção 3.4.4.

Tabela 12- Parâmetros de ajuste do HUIN para a BHSE

Evento	k (min)	n
1	6,02	4,30
2	5,98	2,96
3	5,19	1,65

Tabela 13- Parâmetros de ajuste do HUIN para a BHRL

Evento	k (min)	n
1	39,22	1,75
2	71,52	2,18
3	18,39	6,61
4	55,02	2,00
5	59,51	2,04
6	38,35	4,68
7	46,10	2,07
8	31,43	2,17
9	46,36	2,95
10	54,93	3,05

De acordo com os resultados do parâmetro k (Tabelas 12 e 13), nota-se considerável variação entre eventos e entre bacias, com tendência expressiva de maior tempo para atingir a vazão de pico na BHRL. É de grande relevância ressaltar que o parâmetro k , considerado como tempo de retardo, corresponde à dinâmica do processo precipitação-vazão da bacia. Assim sendo, menores valores de k resultam em um menor tempo para atingir a vazão de pico do hidrograma. Do mesmo modo, valores elevados de k refletem num maior período para atingir o pico do hidrograma. Os maiores valores de k para a BHRL podem ser explicados pela diferença entre as bacias no que se refere às áreas de drenagem e comportamento hidrológico.

Segundo Bhaskar, Parida e Nayak (1997), o parâmetro n pode ser interpretado como uma medida do armazenamento da bacia, de modo que quanto menor o seu valor, maior é o pico de vazão, visto que há menos armazenamento para atenuar a vazão de pico. Os valores de n (Tabelas 12 e 13) também tiveram variações relevantes entre eventos e entre bacias, com valores mais elevados na BHRL, tendendo a uma maior redução na vazão de pico na respectiva bacia. Com base nos valores de n , constata-se que tais resultados de acordo com Ghumman *et al.* (2011) e Nunes (2015), os quais relatam que n é diretamente proporcional à área da bacia hidrográfica.

É de levar em conta que os parâmetros k e n do HUIN sofrem variações em relação às características das bacias hidrográficas para os quais o modelo é empregado. A título de ilustração, na Tabela 14 são apresentados os resultados encontrados para os parâmetros n e k do HUIN em estudos realizados em diferentes bacias hidrográficas.

Tabela 14 - Resultados encontrados para os parâmetros n e k do HUIN em estudos realizados em diferentes bacias hidrográficas.

Área da bacia (km ²)	Local	Número de eventos analisados	Variação de n	Variação de k (h)	Fonte
824,7	Índia	7	1,34-7,62	0,70-3,48	Kumar <i>et al.</i> (2002)
67,5	Irã	13	1,76-4,66	1,34-3,17	Adib <i>et al.</i> (2010)
615	Índia	12	2,82-7,49	2,12-4,58	Bhaskar; Parida; Nayak (1997)
4,7	Espanha	18	0,97-4,74	0,28-2,36	Agirre <i>et al.</i> (2005)
37,2	Irã	6	1,78-4,79	0,83-1,42	Nourani; Singh; Delafrouz (2009)
2881,7	Índia	15	1,75-5,46	1,37-4,72	Sahoo <i>et al.</i> (2006)
121,3	Brasil	12	1,10- 8,30	0,89 - 4,67	Nunes (2015)
29,5	Brasil	20	1,40 - 9,20	0,26 - 2,35	Nunes (2015)

4.4.5 Hidrogramas Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUIGN)

Diversas informações do relevo foram usadas para determinar os parâmetros geomorfológicos necessários para o HUI Geomorfológico de Nash, conforme mencionado na seção 3.4.4. Para tanto, foi derivada numericamente a partir do MDEHC a rede hidrográfica (Figuras 27 e 28) e as áreas de drenagem (Figuras 29 e 30) para as duas bacias hidrográficas estudadas.

Os valores que caracterizam a rede de drenagem, bem como os parâmetros médios associados à ela (R_L , R_B e R_A), estão sumarizados para a BHSE e BHRL, respectivamente, nas Tabelas 2 e 3.

As funções relacionando vazão e velocidade média (v) para BHSE e BHRL, obtidas em função de campanhas hidrológicas realizadas em cada seção de controle, seguindo as recomendações de Zelazinski (1986), são apresentadas na Figura 31.

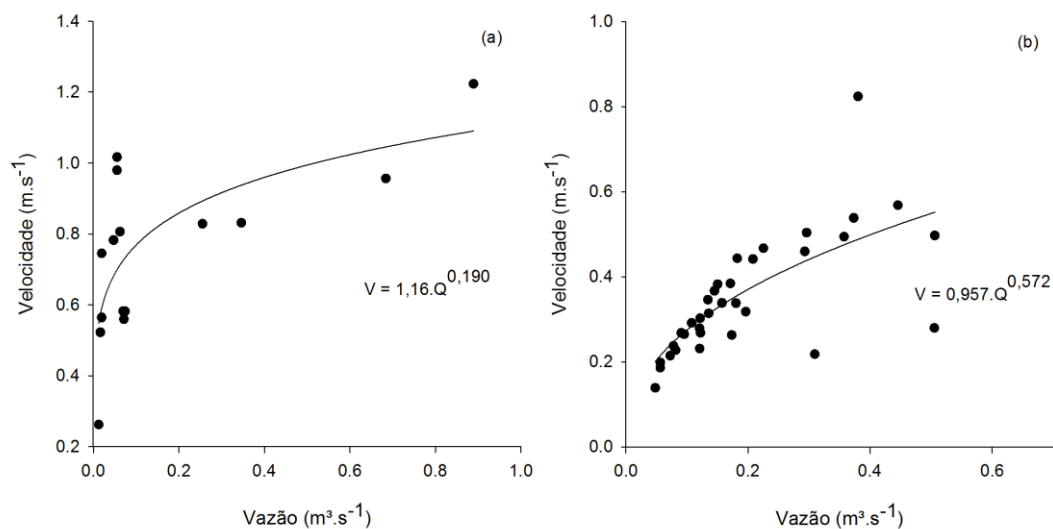


Figura 31 - Curva ajustada, relacionando dados de velocidade e vazão obtidos em campanhas hidrológicas na BHSE (a) e na BHRL (b)

A seguir, para cada evento, as funções correspondentes às Figuras 31(a) e 31(b) permitiram estimar, com base na vazão máxima de ESD observada, o parâmetro v e, conseqüentemente, o parâmetro k , que podem ser visualizados, para ambas as bacias, nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Velocidade empregada e valor determinado para o parâmetro k do modelo HUING considerando cada evento na BHSE

Evento	v (m.s^{-1})	k (min)
1	0,956	0,88
2	0,581	1,45
3	1,223	0,69

Tabela 16 - Velocidade empregada e valor determinado para o parâmetro k do modelo HUING considerando cada evento na BHRL

Evento	v (m.s ⁻¹)	k (min)
1	0,49	46,2
2	0,61	37,2
3	0,47	47,8
4	0,22	102,0
5	0,32	70,5
6	0,53	42,5
7	0,62	36,6
8	0,42	53,2
9	0,62	36,2
10	0,75	30,1

O procedimento utilizado neste trabalho para estimativa do parâmetro v foi recomendado por Zelazinski (1986) e tem sido empregado em diversos estudos científicos (GHUMMAN *et al.* 2011; GHUMMAN *et al.* 2014). Ainda, cabe salientar que este procedimento, combinado com os resultados obtidos, concordam com a sugestão de Kumar *et al.* (2002) que enfatizam a necessidade de se avaliar tal parâmetro por evento.

Considerando as funções potenciais relacionando vazão e velocidade média (Figura 31), pôde-se constatar que o expoente da respectiva função para a BHRL foi substancialmente superior ao obtido para a BHSE. De acordo com as conclusões de Ghumman *et al.* (2011), este comportamento sugere que a BHRL tem tendência de maior velocidade média correspondente à vazão. No entanto, deve-se ter cautela nessa análise, haja vista que o ajuste da função potencial para BHSE não foi tão satisfatório quanto para a BHRL.

No caso do parâmetro k , sua média foi de 1,01 min para BHSE e de 50,2 min para BHRL. De acordo com esses valores, pode-se inferir que a BHRL possui tendência de apresentar maior tempo de pico comparado à BHSE. Tal diferença entre as bacias pode estar associada à área de drenagem e ao tempo de concentração distinto entre elas.

O parâmetro n , por sua vez, foi assumido como constante para todos os eventos em análise, correspondendo a 2,55 reservatórios lineares para a BHSE

e 3,09 para a BHRL. A diferença dos valores de n entre as duas bacias condiz com as conclusões de Ghumman *et al.* (2011), no sentido de que o parâmetro n aumenta em relação com o aumento da área da bacia hidrográfica. A interpretação de k e n é idêntica ao já discutido anteriormente para o HUIN.

Esta metodologia tem sido empregada por diversos autores, em diferentes regiões, tais como nos estudos de Bhaskar, Parida e Nayak (1997), Adib *et al.* (2010), Sahoo *et al.* (2006) e Nunes (2015).

4.5 Desempenho dos modelos de Hidrograma Unitário (HU) e Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI)

Nas Figuras 32 e 33 podem ser visualizados os hidrogramas estimados pelos diferentes modelos de HU e HUI avaliados para a BHSE e BHRL, respectivamente, bem como o respectivo hidrograma observado, considerando cada evento analisado.

Vale ressaltar que os modelos analisados foram o Hidrograma Unitário Adimensional (HUA) e o Hidrograma Unitário Triangular (HUT), considerando duas metodologias de determinação de t_{lag} , o Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark (HUIC), o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark (HUIGC), o Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash (HUIN) e o Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash (HUIGN).

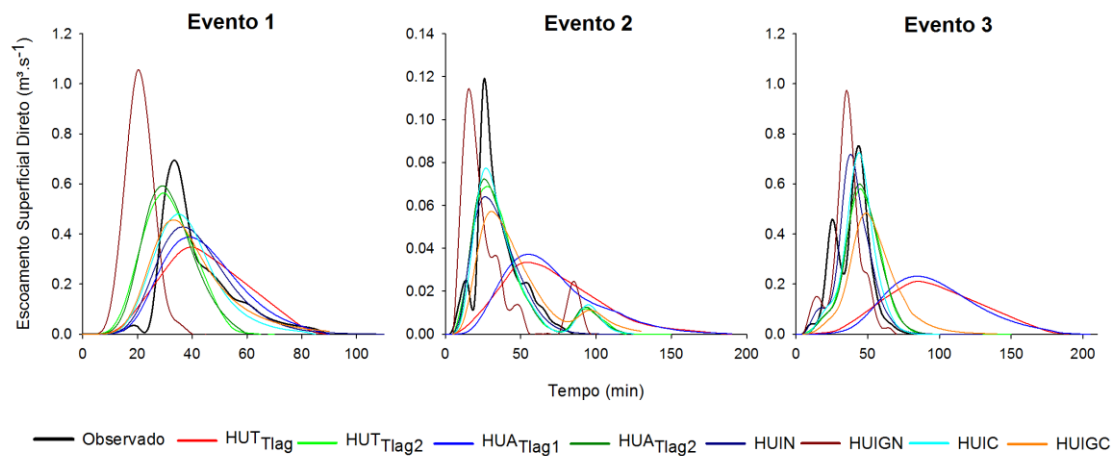


Figura 32 - Hidrogramas de escoamento superficial direto estimados por diferentes modelos e o hidrograma de escoamento superficial direto observado na seção de controle da BHSE, considerando três eventos chuva *versus* vazão

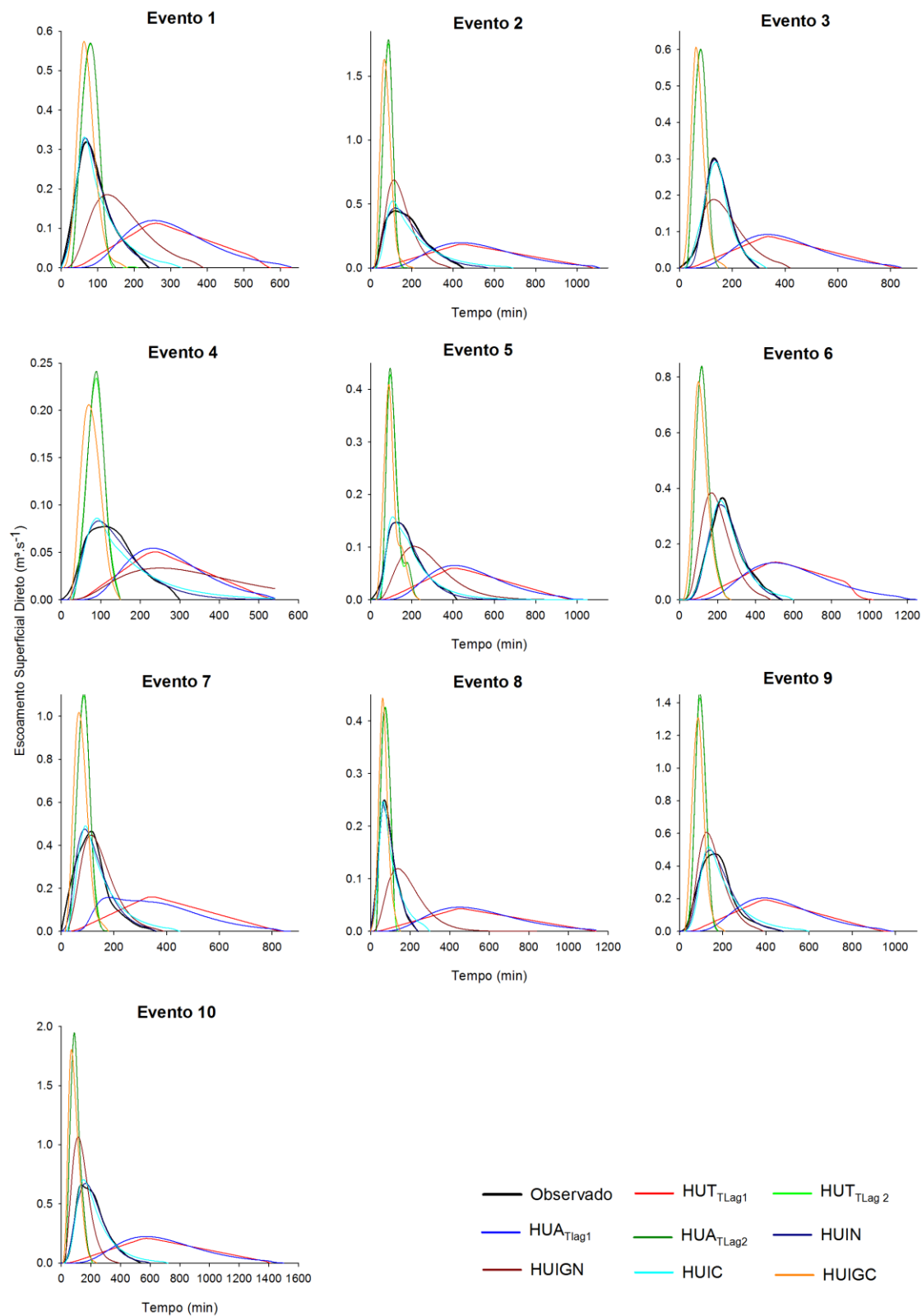


Figura 33 - Hidrogramas de escoamento superficial direto estimados por diferentes modelos e o hidrograma de escoamento superficial direto observado na seção de controle da BHRL, considerando dez eventos chuva *versus* vazão

As Figuras 32 e 33 possibilitam verificar que os modelos HUIN e HUIC foram superiores aos demais quando da estimativa de hidrogramas para a maioria dos eventos, especialmente no caso da BHRL. No entanto, a fim de facilitar a compreensão e permitir a comparação entre os modelos, as Tabelas 17 e 18 sintetizam os resultados acerca do desempenho dos modelos quantificado pelo coeficiente de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) e erro relativo na estimativa da vazão de pico (ER_{Qp}).

Vale lembrar que, segundo Moriasi *et al.* (2007), o C_{NS} possui a seguinte classificação: $C_{NS} > 0,65$, muito bom; $0,54 < C_{NS} < 0,65$, bom; $0,50 < C_{NS} < 0,54$, satisfatório. Valores de C_{NS} inferiores a 0,54 foram considerados como ajustes insatisfatórios.

Já o ER_{Qp} , para Van Liew *et al.* (2007), são assim classificados: $|ER_{Qp}| < 10\%$, muito bom; $10\% < |ER_{Qp}| < 15\%$, bom; $15\% < |ER_{Qp}| < 25\%$, satisfatório e $|ER_{Qp}| > 25\%$, inadequado.

Tabela 17- Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}) e erro relativo da vazão de pico (ER_{QP}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento ocorrido na BHSE

Evento	HUA_{Tlag1}		HUA_{Tlag2}		HUT_{Tlag1}		HUT_{Tlag2}		HUIC		HUIGC		HUIN		HUIGN	
	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}
1	0,68	42,11	0,39	11,80	0,57	47,97	0,41	15,65	0,80	28,15	0,78	32,69	0,77	36,46	-3,25	57,46
2	-0,65	67,79	0,68	37,69	-0,62	70,99	0,66	41,04	0,74	34,53	0,55	50,55	0,68	44,97	-0,79	1,83
3	-1,77	68,46	0,53	18,35	-1,56	71,22	0,50	20,92	0,71	1,97	0,06	34,39	0,53	4,75	-0,33	32,41

HUA_{Tlag1} = Hidrograma Unitário Adimensional usando a primeira metodologia para estimativa de t_{lag} ; HUA_{Tlag2} = Hidrograma Unitário Adimensional usando a segunda metodologia para estimativa de t_{lag} ; HUT_{Tlag1} = Hidrograma Unitário Triangular usando a primeira metodologia para estimativa de t_{lag} ; HUT_{Tlag2} = Hidrograma Unitário Triangular usando a segunda metodologia para estimativa de t_{lag} ; HUIC= Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark; HUIGC = Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark; HUIN= Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash; HUIGN; Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash

Tabela 18- Valores das estatísticas de Nash-Stucliffe (C_{NS}) e erro relativo da vazão de pico (ER_{QP}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada evento ocorrido na BHRL

Evento	HUA_{Tlag1}		HUA_{Tlag2}		HUT_{Tlag1}		HUT_{Tlag2}		HUIC		HUIGC		HUIN		HUIGN	
	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}
1	-1,43	61,25	0,03	73,37	-1,23	63,60	0,06	73,43	0,96	6,68	0,21	85,30	0,99	4,45	-0,02	39,80
2	-1,93	55,82	-6,10	294,74	-1,65	58,49	-5,98	287,30	0,89	13,72	-5,70	250,54	0,98	4,96	0,61	52,68
3	-1,21	68,18	-3,27	93,27	-1,02	70,30	-3,24	93,48	0,98	3,91	-3,41	107,62	0,99	1,71	0,75	35,60
4	-1,06	29,58	-2,60	212,86	-0,84	34,12	-2,44	203,42	0,91	11,97	-2,13	147,80	0,98	7,52	-0,82	56,64
5	-1,43	55,71	-1,91	193,37	-1,19	59,42	-1,81	183,07	0,97	3,68	-1,78	178,24	0,99	0,37	0,23	30,92
6	-1,13	62,78	-3,81	134,21	-0,97	62,07	-3,80	133,06	0,99	0,09	-3,83	110,52	0,99	4,65	0,57	6,75
7	-1,01	65,83	-1,36	137,64	-1,42	65,68	-1,30	134,52	0,86	5,93	-1,24	110,69	0,93	2,84	0,77	3,65
8	-1,47	80,89	0,11	58,96	-1,33	81,98	0,13	53,71	0,95	0,88	0,16	84,64	1,00	2,43	-0,29	50,87
9	-1,18	56,58	-3,19	205,92	-0,96	59,26	-3,12	198,44	0,93	4,65	-3,01	174,19	0,98	4,53	0,85	27,97
10	-1,32	65,52	-3,45	199,39	-1,11	67,98	-3,43	198,26	0,98	8,46	-3,61	161,49	0,99	2,25	0,00	63,19

HUA_{Tlag1} = Hidrograma Unitário Adimensional usando a primeira metodologia para estimativa de t_{lag} ; HUA_{Tlag2} = Hidrograma Unitário Adimensional usando a segunda metodologia para estimativa de t_{lag} ; HUT_{Tlag1} = Hidrograma Unitário Triangular usando a primeira metodologia para estimativa de t_{lag} ; HUT_{Tlag2} = Hidrograma Unitário Triangular usando a segunda metodologia para estimativa de t_{lag} ; HUIC= Hidrograma Unitário Instantâneo de Clark; HUIGC = Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Clark; HUIN= Hidrograma Unitário Instantâneo de Nash; HUIGN; Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Nash

Com base na Tabela 17, a qual corresponde ao desempenho dos modelos para a BHSE, constata-se por meio do parâmetro C_{NS} que o modelo HUIC apresentou ajuste enquadrado como “muito bom”, segundo Moriasi *et al.* (2007), para todos os eventos ($C_{NS} > 0,65$), enquanto o HUIN teve ajuste “muito bom” para os eventos 1 e 2 e satisfatório para o evento 3. Empregando a segunda metodologia para determinação de t_{lag} , foi possível observar melhorias na estimativa dos hidrogramas pelos modelos HUA e HUT. Comparando as versões geomorfológicas do HUIN e HUIC, verificou-se que o HUIGC teve um maior potencial de estimativa dos hidrogramas para a BHSE. Com relação ao erro relativo da vazão de pico (ER_{Qp}), os modelos apresentaram a mesma tendência ao discutido anteriormente.

Considerando agora o desempenho dos modelos na BHRL (Tabela 18), tomando como base o C_{NS} , observou-se superioridade no ajuste dos modelos HUIC e HUIN para todos os eventos avaliados, sendo todos os ajustes enquadrados como “muito bom”, de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007). Diferentemente da BHSE, no caso da BHRL, o desempenho dos modelos HUA e HUT foi insatisfatório, independente da metodologia de determinação do t_{lag} . Com relação às versões geomorfológicas de HUIN e HUIC, constatou-se superioridade do HUIGN em relação ao HUIGC, diferentemente do encontrado por Sahoo *et al.* (2006), os quais verificaram desempenho levemente superior do HUIGC comparável ao HUING.

Analisando o desempenho por meio do ER_{Qp} , o HUIN resultou em ajustes classificados como “muito bom” (VAN LIEW *et al.* 2007) em todos os eventos, enquanto o HUIC teve o ajuste “muito bom” em 8 dos 10 eventos e o HUIGN apresentou esse ajuste em apenas 2 eventos.

Para facilitar a comparação do desempenho entre os diferentes modelos de HU e HUI analisados neste estudo, para cada bacia hidrográfica, foram calculados os valores médios das estatísticas de desempenho apresentadas na Tabela 19 à seguir:

Tabela 19- Valores médios das estatísticas Nash-Stucliffe (C_{NS}) e erro relativo da vazão de pico (ER_{QP}) para os modelos de HU e HUI analisados neste estudo

Método	BHSE		BHRL	
	C_{NS}	ER_{QP}	C_{NS}	ER_{QP}
HUA _{Tlag1}	-0,58	59,45	-1,32	60,21
HUA _{Tlag2}	0,53	22,61	-2,56	160,37
HUT _{Tlag1}	-0,54	63,39	-1,17	62,29
HUT _{Tlag2}	0,53	25,87	-2,49	155,87
HUIC	0,75	21,55	0,94	6,00
HUIGC	0,47	39,21	-2,43	141,10
HUIN	0,66	28,73	0,98	3,57
HUIGN	-1,46	30,57	0,27	36,81

Face aos resultados das estatísticas para análise de desempenho dos modelos, em termos médios (Tabela 19), nota-se, de modo geral, que os modelos HUIC e HUIN foram os que melhor se ajustaram para ambas bacias, seguido do HUA_{Tlag2} e HUT_{Tlag2} para BHSE e HUIGN para a BHRL, considerando como análise o parâmetro C_{NS} . Em relação à estatística ER_{QP} , a tendência foi similar.

Diante desses aspectos, pode-se inferir que o melhor desempenho dos modelos HUIC e HUIN possivelmente está associado ao emprego de dados observados de precipitação e vazão no processo de ajuste. O melhor desempenho dos modelos de HUIC e/ou HUIN em relação às suas versões geomorfológicas tem sido relatado em alguns estudos científicos (ADIB *et al.*, 2010; BHASKAR, PARIDA E NAYAK, 1997; KUMAR *et al.*, 2002; GHUMMAN *et al.*, 2014).

De modo geral, o HUIC foi superior ao HUIN para a BHSE, enquanto o comportamento oposto foi observado para a BHRL, sendo possível observar na literatura que a diferença de desempenho entre os modelos é variável. Kumar *et al.* (2002) comparou estes dois modelos para uma bacia na Índia para 7 eventos e constatou que o HUIN teve desempenho superior ao HUIC. Sarangi *et al.* (2007) avaliou diversos modelos, dentre eles o HUIC, e relatou que nenhum dos modelos estimou de forma satisfatória o hidrograma de ESD de um evento caracterizado por longa duração e baixa intensidade. Apesar dos modelos HUIN e HUIC serem baseados em dados observados de chuva e vazão, Adib *et al.* (2010) afirmam que estes modelos podem não ter capacidade de estimar hidrogramas de forma satisfatória para determinados eventos de precipitação. Em estudo realizado na Índia, Bhaskar, Parida e

Nayak (1997) obtiveram desempenho superior do HUIN em relação ao HUIGN, similar ao encontrado neste trabalho, e estes autores relataram que este comportamento é esperado em virtude dos parâmetros do HUIN serem obtidos a partir de dados observados. Nunes (2015) analisando duas bacias no Brasil, e Ghummanet *al.* (2014), verificando o desempenho em uma bacia no Paquistão, encontraram superioridade do HUIC em relação ao HUIN. Ghummanet *al.* (2014) enfatizou que o HTA é uma importante ferramenta de análise do HUIC, visto que contempla a variação temporal do ESD na bacia, enquanto este componente não é considerado no HUIN. Estes pesquisadores relatam ainda que, devido à consideração de um maior número de atenuações do que o HUIC, o HUIN estimou mais adequadamente as vazões de pico.

Comparando os resultados dos modelos que utilizam diretamente parâmetros geomorfológicos para a modelagem (HUA_{Tlag1} , HUT_{Tlag1} , HUIGC e HUIGN) para BHSE (Tabela 17) e BHRL (Tabela 18), pode-se notar que os desempenhos destes modelos são inferiores quando comparados com HUIC e HUIN. Cabe ressaltar que a utilização dos modelos HUA e HUT é consideravelmente menos complexa, uma vez que é necessário um número menor de parâmetros e de mais fácil aquisição, comparativamente ao HUIGC e HUIGN. Em virtude da facilidade de utilização, o emprego dos modelos HUA e HUT tem sido bastante corriqueiro na dia-a-dia prático da engenharia hidrológica para estimativa de vazões de pico e de hidrogramas de projeto e, alguns estudos científicos vêm avaliando a sua aplicabilidade para diferentes regiões, tais como os de Khaleghiet *al.* (2011), Luxon, Christofer e Pius (2013), Majidi *et al.* (2012), Nunes (2015) e Sule e Alabi (2013).

Deve ser destacado que, para modelagem de HUA e HUT, foram empregadas duas metodologias distintas para determinação do t_{lag} . A segunda metodologia propiciou um melhor desempenho nos respectivos modelos para BHSE. Por outro lado, no caso da BHRL, não houve melhoria no desempenho destes dois modelos em função da metodologia de determinação do t_{lag} . Ao avaliar duas bacias hidrográficas no Brasil, Nunes (2015) destacou que os modelos HUA e HUT não foram adequados para modelagem nas bacias hidrográficas analisadas, salientando que tais modelos foram desenvolvidos para condições de bacias hidrográficas norte-americanas, sendo a estimativa de t_{lag} a principal abstração, atribuindo assim a não adequabilidade dos

mesmos a esses fatores. Khaleghiet *al.* (2011) constataram desempenho inferior do HUT e HUA em relação a outros modelos geomorfológicos para estimar hidrogramas em uma bacia situada no Irã.

É importante enfatizar a superestimativa dos valores de t_{lag} quando da utilização da metodologia 1 para a BHRL. Tal comportamento pode estar associado à metodologia de estimativa, a qual considera a capacidade de armazenamento de água do solo (S), que por sua vez é determinado a partir dos valores de CN, obtidos para cada evento. Assim, os valores de CN foram expressivamente baixos para todos os eventos na BHRL, dado à maior capacidade de armazenamento de água na mesma, comparada à BHSE, resultaram em tempos de retardo elevados, transladando os hidrogramas estimados e subestimando as vazões. Estes resultados sugerem cautela ao utilizar a equação da metodologia 1 para estimativa de t_{lag} em bacias com baixos valores de CN e que outras bacias com este comportamento sejam analisadas, de modo que se possa concluir de forma mais contundente.

Comparando os resultados originados das versões geomorfológicas de Clark e de Nash empregadas neste trabalho, o HUIGC foi mais adequado para BHSE, enquanto para a BHRL o HUIGN estimou de forma mais satisfatória. Essa diferenciação na adequação entre os dois modelos tem sido observada na literatura, conforme discutido na sequência.

Kumar *et al.* (2002), analisando eventos em uma bacia na Índia, constataram que o HUIGC foi capaz de estimar hidrogramas razoavelmente comparados aos observados, principalmente levando em conta que o modelo faz uso apenas de características geomorfológicas da bacia. A não necessidade de dados de monitoramento hidrológico também foi destacada por Sahoo *et al.* (2006) como uma vantagem dos modelos HUIGC e HUIGN. Kumar *et al.* (2004) constataram similaridade entre os hidrogramas estimados pelo HUIGC e HUIGN para uma bacia na Índia. No entanto, neste estudo, o desempenho do HUIGC, de forma geral, não foi adequado para ambas as bacias analisadas, corroborando com os resultados obtidos por Nunes (2015) para duas bacias hidrográficas brasileiras, sendo possível justificar em função da: a) equação empregada para cálculo do parâmetro R recomendada por County (2009) e da dificuldade na estimativa de t_c , indicando que é necessário

rigor quando da estimativa destes parâmetros; b) constância de R e t_c para todos eventos, independente das grandezas características de cada evento.

Khaleghi *et al.* (2011) destacaram que o HUI derivado de maneira geomorfológica tem potencial para ser utilizado como ferramenta padrão para estimativa de hidrogramas em bacias com carência de dados. Adib *et al.* (2010) relataram que o HUIGN foi capaz de estimar adequadamente os hidrogramas em uma bacia no Irã e que o modelo tem sido bastante empregado na área de hidrologia. Sahoo *et al.* (2006) também avaliando o HUIGN para uma bacia hidrográfica de 2881,65 km² na Índia, com emprego de mapas topográficos nas escalas de 1:50000 e 1:250000, observaram razoável desempenho do mesmo para modelagem de cheias e similar entre as diferentes escalas empregadas de mapas topográficos. Neste estudo, apesar do HUIGN ter tido desempenho superior para a BHRL comparado à BHSE, de forma geral, os hidrogramas estimados para as duas bacias hidrográficas não tiveram aderência satisfatória aos observados, culminando em superestimativas e subestimativas de vazões de pico, concordando com os resultados obtidos por Nunes (2015) para duas bacias hidrográficas brasileiras. Um aspecto que pode justificar o desempenho insatisfatório do HUIGN é que as equações usadas para estimar n e k para este modelo estão sujeitas a erros de regressão e os expoentes das variáveis geomorfológicas não são universais, mas sim dependentes do local, conforme relatam Bhaskar, Parida e Nayak (1997). Além disso, a determinação de n e k é dependente de informações originadas do relevo e rede de drenagem, bem como de características do escomanto nos cursos d'água (e.g. velocidade cinemática); assim, a fonte de informações, especialmente do relevo, pode exercer influência sobre o desempenho do HUIGC.

5 Conclusão

Com fundamentação nos resultados obtidos é possível concluir que:

- As metodologias para determinação do parâmetro t_{lag} exerceram grande influência sobre os valores estimados e sobre o desempenho dos modelos HUA e HUT, especialmente para a BHRL, sugerindo-se cautela na (o) escolha/emprego da metodologia de cálculo de t_{lag} ;
- A fonte e escala de informação do relevo, bem como a subjetividade inerente a algumas etapas de processamento, podem exercer influência sobre a modelagem, especialmente no caso do HUIGN, indicando que existe a necessidade de estudos específicos nesta linha;
- Os modelos HUIC e HUIN foram os que tiveram melhor acurácia para estimativa de vazões de pico e dos hidrogramas nas duas bacias hidrográficas experimentais em relação aos demais modelos avaliados, demonstrando que tais modelos conceituais foram capazes de capturar o comportamento hidrológico substancialmente distinto entre as bacias;
- Os modelos de HU sintéticos (HUA e HUT) não foram adequados para a BHRL, mas estimaram de forma satisfatória os hidrogramas para dois dos três eventos na BHSE, considerando a segunda metodologia de determinação de t_{lag} ;
- O modelo HUIGC se sobressaiu em relação ao HUIGN para a BHSE, mas com comportamento similar aos modelos tradicionais sintéticos (HUT e HUA);
- O HUIGN teve desempenho superior aos modelos HUIGC, HUT e HUA para a BHRL;
- As equações geomorfológicas usadas neste estudo, referentes ao parâmetro R de Clark e aos parâmetros n e k de Nash, não devem ser consideradas como soluções universais para a modelagem de cheias nas bacias hidrográficas analisadas.

Referências

- ADIB, A. et al. Comparison between GclUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH and Nash-IUH models. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v. 34, p. 91-103, 2010. doi: 10.3906/muh-0908-1.
- AGIRRE, U. et al. Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. **Catena**, v. 64, p. 321-332, 2005. ISSN 10.1016/j.catena.2005.08.013.
- AHMAD, M. M.; GHUMMAN, A. R.; AHMAD, S. Estimation of Clark's Instantaneous Unit Hydrograph parameters and development of direct surface runoff hydrograph. **Water Resources Management**, v. 23, n. 12, p. 2417-2435, 2009. doi:10.1007/s11269-008-9388-8.
- ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1745-1757, 2011.
- ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. D.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013. ISSN 10.1590/S1415-43662013000100010.
- AQUINO, L. S. **Modelagem hidrológica na região sul do Rio Grande do Sul utilizando os modelos SWAT e LASH**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, p. 101. 2014.
- ÁVILA, L. F. **Balanço Hídrico em um Remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2011.
- ÁVILA, L. F. et al. Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 247-256, 2014.

BERNSTEIN, L. et al. Climate change 2007: synthesis report. Summary for policymakers. In: **Climate change 2007: synthesis report. Summary for policymakers**. IPCC, 2007.

BESKOW, S. **LASH Model: a hydrological simulation tool in GIS framework**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 118. 2009.

BESKOW, S. et al. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 169-178, 2009. doi:10.1590/S0100-06832009000100018.

BESKOW, S.; SOUZA, M. R.; LUZ, E. P. D. "Ciclo hidrológico". In: Rodrigues, C. "Programa Gestor de Recursos Hídricos." Santa Cruz do Sul: EssereNel Mondo, cap. 1, p. 6-12, 2015. ISBN 978-85-67722-49-8.

BESKOW, S. et al. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, 2016. Doi: 10.1080/02626667.2015.1133912

BHAGWAT, T. N.; SHETTY, A.; HEGDE, V. S. Spatial variation in drainage characteristics and geomorphic instantaneous unit hydrograph (GIUH); implications for watershed management - A case study of the Varada River basin, Northern Karnataka. **Catena**, v. 87, p. 52-59, 2011. doi:10.1016/j.catena.2011.05.007.

BHASKAR, N. R.; PARIDA, B. P.; NAYAK, A. K. Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v.123, p. 228-238, 1997. ISSN 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:4(228).

BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Departamento Nacional Depesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica**. Recife: Ministério da Agricultura., 1973. 431 p.

BRUNDA, G. S.; SHIVAKUMAR, N. J. Derivation and Analysis of Dimensionless Hydrograph and S Curve for Cumulative Watershed Area. **Aquatic Procedia**, v. 4, 964-971, 2015.

CALDEIRA, T. L. et al. Modelagem probabilística de eventos de precipitação extrema no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n.3, 197-203, 2015.

CARVALHO, M. E.; CHAUDRHY, F. H. Aplicação de hidrograma unitário geomorfológico na previsão de respostas hidrológicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 5-17, 2001.

CHOW, V. T. **Handbook of Applied hydrology - a compendium of water resources technology**. New York: McGraw-Hill, 1964. 1495 p. ISBN 978-0070107748.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2^a. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 200 p. ISBN 9788521201304.

CLARK, C. O. Storage and the Unit Hydrograph. **Transactions American Society Civil Engineers**, v. 110, p. 1419-1488, 1945.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013. 336 p. ISBN 9788588686342.

COUNTY. **Drainage Design Manual for Mohave County**. 1^a. ed. Star Valley: Arid Hydrology & Hydraulics, 2009.

CRISS, R.E.; WINSTON, W.E. Discharge predictions of a rainfall-driven theoretical hydrograph compared to common models and observed data. **WaterResourcesResearch**, v. 44, 2008. Doi: 10.1029/2007WR006415.

CYSNE, J. R. **Modelo conceitual para gerenciamento de recursos hídricos em ambiente SIG**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Departamento de Computação do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 94p. 2004.

DUFEEK, A. S.; AMBRIZZI, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, n. 3-4, p. 167-178, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 839, 1979.

ESRI. **Environmental Systems Research Institute**, 2004.

STRECK, E. V., KÄMPF, N., DALMOLIN, R. S. D., KLAMT, E., NASCIMENTO, P. D., SCHNEIDER, P., GIASSEN, E., e PINTO, L. F. S. (2008) **Solos do Rio Grande do Sul**. UFRGS: EMATER/RS-ASCAR.

FERRAZ, M. I. F.; SÁFADI, T.; LAGE, G. Uso de modelos de séries temporais na previsão de séries de precipitação pluviais mensais no município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.2, p.259-267, 1999.

FRENDRICH, R. **Modelação de hidrogramas multi-modais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.. São Carlos, 1984, 174p.

GENOVEZ, A. M. Vazões máximas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 3, p. 33-112. ISBN 9788588686052.

GHUMMAN, A. R. et al. Developmente of geomorphologic instantaneous unit hydrograph for a large watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 4, p. 3153-3163, 2011. doi: 10.1007/s10661-011-2179-3.

GHUMMAN, A. R. et al. Comparison of Clark, Nash Geographical Instantaneous Unit Hydrograph Models for Semi Arid Regions. **Water Resources**, v. 41, n. 4, p. 364-371, 2014. doi: 10.1134/S0097807814040071.

GOTTSCHALK, L.; WEINGARTNER, R. Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph. **Journal of Hydrology**, v. 208, p. 148-162, 1998.

GUPTA, V.K.; WAYMIRE, E.; WANG, C.T. A representation of an Instantaneous Unit Hydrograph from Geomorphologic. **WaterResourcesResearch**, v. 16, n. 5, p. 855-862, 1980.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Comparação dos métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidrelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.

HARTMAN, D. **Global Physical Climatology**. San Diego: Academic Press, 1994. 411 p.

HORTON, R. E. Drainage basin characteristics. **Transactions American Geophysical Union**, v. 13, p. 350-361, 1932. doi: 10.1029/TR013i001p00350.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins, a hydro-physical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

HÜMANN, M. et al. Identification of runoff processes – the impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 409, p. 637-649, 2011.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**, 2010. Disponível em:
<<http://ibge.gov.br/cidadesat/painel/populacao.php?lang=&codmun=431440&search=rio-grande-do-sul|pelotas|infograficos:-evolucao-populacional-e-piramide-etaria>>.

INPE, 2013. Núcleo de Pesquisa e Aplicação de Geotecnologias em Desastres Naturais e Eventos Extremos para a Região Sul do Brasil. Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE. <<http://www.inpe.br/crs/geodesastres/nomundo>>

JAIN, V.; SINHA, R. Derivation of unit hydrograph from GIUH analysis for a Himalayan river. **Water Resources Management**, v. 17, n. 5, p. 355-376, 2003. doi: 10.1023/A:1025884903120.

JENA, S. K.; TIWARI, K. N. Modeling synthetic unit hydrograph parameters with morphologic parameters of watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 319, p. 1-14, 2006. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.025.

JOHNSON, L.E. **Geographic information systems in water resources engineering**. Nova Iorque: IWA Pub, 2009. 298 p.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 914-922, 2008.

KHALEGHI, M. R. et al. Efficiency of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph method in flood hydrograph simulation. **Catena**, v. 87, n. 2, p. 163-171, 2011. doi: 10.1016/j.catena.2011.04.005.

KENT, K. M. A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds. **U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service**. SCS-TP-149, 1973.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

KUMAR, A. KUMAR, D. Predicting Direct Runoff from Hilly Watershed Using Geomorphology and Stream-Order- Law Ratios: Case Study. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 7, p. 570-576, 2008.

KUMAR, R. et al. Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. **Water Resources Management**, v. 16, n. 4, p. 263-278, 2002. doi: 10.1023/A:1021920717410.

LUXON, N.; CHRISTOPHER, M.; PIUS, C. Validating the Soil Conservation Service triangular unit hydrograph (SCS-TUH) model in estimating runoff peak discharge of a catchment in Masvingo, Zimbabwe. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 5, n. 3, p. 157-162, 2013. doi: 10.5897/ijwree12.085.

LUZ, E. P. D. et al. **Ferramenta computacional "Isochrones"**: Análise na bacia hidrográfica do arroio Pelotas visando modelagem de cheias. Anais do XXIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: UFPel. p. 1-4, 2014.

MACHADO, F. W. **Modelagem chuva-vazão mensal utilizando redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 174 p, 2005.

MAHL, M. et al. Desenvolvimento da ferramenta computacional "Isochrones" em ambiente SIG para aplicação em modelagem hidrológica. Anais do XXIII Congresso

de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: UFPel. p. 1-4, 2014.

MAJIDI, A. et al. Evaluation of Sythetic Unit Hydrograph (SCS) and rational methods in peak flow estimation (case study: Khoshehay Zarrin watershed, Iran).

International Journal of Hydraulic Engineering, v. 1, n. 5, p. 43-47, 2012. doi: 10.5923/j.ijhe.20120105.03.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: MMA, 2007.

MELCHING, C., S. et al., Equations for Estimating Synthetic Unit-Hydrograph Parameter Values for Small Watersheds in Lake County, Illinois, **U.S. Geological Survey**, Open-File Report , p. 96-474, 1997.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1ª. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p. ISBN 9788581280296.

MENEZES, M. D. et al. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha – Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 82, v. 37, p. 175-184, 2009.

MISHRA, S. K. et al. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. **Water Resources Management**, v. 20, n. 5, p. 646-660, 2006. doi: 10.1007/s11269-005-9000-4.

MORIASI, D, N, et al, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation, **Transactions of the ASABE**, v, 50, p, 885-900, 2007, ISSN 10,13031/2013,23153.

NASH, J. E. The form of the instantaneous unit hydrograph. **International Association of Scientific Hydrology**, v. 45, n. 3, p. 114-121, 1957.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-298, 1970. ISSN 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

NGUYEN, H. Q.; MAATHUIS, B. H. P.; RIENTJES, T. H. M. Catchment storm runoff modelling using the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. **Geocarto International**, v. 24, n. 5, p. 357-375, 2009. doi: 10.1080/10106040802677011.

NOURANI, V.; SINGH, V. P.; DELAFROUZ, H. Three geomorphological rainfall-runoff models based on the linear reservoir concept. **Catena**, v. 76, n. 3, p. 206-214, 2009. doi: 10.1016/j.catena.2008.11.008.

NUNES, G. S. **Aplicabilidade de modelos de hidrograma unitário em bacias hidrográficas hidrologicamente distintas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 187 p, 2015.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3-4, p. 170-181, 2011. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.06.007.

RAGHUNATH, H. M. **Hydrology: Principles, Analyses and Design**. New Delhi: New Age International, 2006. 476 p. doi: 9788122418255.

RAMOS, F. et al. **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH/UFRJ, 1989. 404 p. ISBN 8571080534.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 25, p. 185-204, 2010.

ROA-GARCIA, M. C. et al. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. **Water Resources Research**, Washington, v. 47, p. 12, 2011.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; VALDEZ, J. B. The geomorphologic structure of hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 15, n. 6, p. 1409-1420, 1979. ISSN 10.1029/WR015i006p01409.

SABOL, G. V. Clark Unit Hydrograph and R-parameter estimation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 1, p. 103-111, 1988. ISSN 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(103).

SAHOO, B, et al, Flood estimation by GIUH-Based Clark and Nash Models, **Journal of Hydrologic Engineering**, v, 11, n, 6, 2006, ISSN 10,1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(515).

SANTOS, I. et al. Hidrometria aplicada. **Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento**, 2001.

SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M. Aplicação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em SIG para a gestão de recursos hídricos do rio Pirapama, Pernambuco, Brasil. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 07-20, 2007. (DOI: 10.4136/ambi-agua.23).

SCHUMM, S. Evolution of drainage systems and slopes in badland at Perth Amboy, New Jersey. **Bulletin of Geological Society of America**, v. 67, p. 597-646, 1956.

SCS. **National Engineering Handbook**. Washington: Soil Conservation Service/USDA, 1971.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. **Engineering News Record**, v.108, p.501-505, 1932.

SILVA, D.D. et al. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 409-419, 2005.

SILVA, P. M. D. O. et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 258-265, 2008. Doi:10.1590/S1415-43662008000300006.

SILVA, A. M.; MELLO, C. R. **Pesquisa sobre as interações entre o regime pluvial e o regime de escoamento das sub-bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG**. 2011. 350 p. Relatório Final de Atividades do Projeto de P&D 176. Não publicado.

SPAROVEK, G; VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, Durval. Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 2, p. 257-266, 2007.

ŠRAJ, M.; DIRNBEK, L.; BRILLY, M. The influence of effective rainfall on modeled runoff hydrograph. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 58, n. 1, p. 3-14, 2010. ISSN 10.2478/v10098-010-0001 -5.

STRAHLER, A. N. Dynamic basis of Geomorphology. **Geological Society America Bulletin**, v. 63, n. 9, p. 923-938, 1952. ISSN 10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957. ISSN 10.1029/TR038i006p00913.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2008.

SULE, B. F.; ALABI, S. A. Application of synthetic unit hydrograph methods to construct storm hydrographs. **International Journal of Water Resources and Environmental Engineering**, v. 5, n. 11, p. 639-647, 2013. doi: 10.5897/ijwree2013.0437.

TOMAZ, P. Método do SCS. In: TOMAZ, P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. [S.l.]: [s.n.]. Cap. 38, p. 1-26, 2013.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. **Drenagem Urbana**. [S.l.]: UFRGS/ABRH, 1995, 428p. ISBN 8570253658.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p. ISBN 8570258232.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p. ISBN 9788570259240.

VAN LIEW, M. W. et al. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VISSMAN JR, W. Technology, Society, and Water Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 115, n. 1, p. 48-51, 1989.

VISSMAN JR, W. LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology**. 5^a ed. Thomas Y. Crowell Company Inc., 2014. 612p.

YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R. **Aplicação de séries temporais para identificação de tendências climáticas em regiões do sul de Minas Gerais**. 2011. 51p. Relatório Final de Pesquisa - FAPEMIG. Não publicado.

ZELAZINSKI, J. Application of the geomorphological instantaneous unit hydrograph theory to development of forecasting models in Poland. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 2, p. 263-270, 1986. ISSN 10.1080/02626668609491043.

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEEER, H.; MORAES, J.M. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: implications for runoff generation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 222, p. 29-38, 2006.

ZIN, W. Z. W., JAMALUDIN, S., DENI, S. M., JEMAIN, A. A. Recent changes in extreme rainfall events in Peninsular Malaysia: 1971 – 2005. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, p. 303-314, 2010.