

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

INSTITUTO DE CIÊNCIAS PURAS E APLICADAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS PROFÁGUA**

Josiano Josiel Rodrigues Silva

**Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no sistema de drenagem urbana do
município de João Monlevade/MG**

**Itabira – Minas Gerais
2021**

Josiano Josiel Rodrigues Silva

**Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no sistema de drenagem urbana do
município de João Monlevade/MG**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Ferramentas aplicadas aos instrumentos de gestão de recursos hídricos.

Aprovado em 27 de maio de 2021.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Carolina Vasques Freitas

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Neves Lima

Instituto de Engenharias Integradas- UNIFEI

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Cézar de Almeida Monte-Mor

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Prof. Dr. Carlos Eduardo Ferraz de Mello

Departamento de Engenharia Civil - UFOP

Itabira – Minas Gerais

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de vivenciar a experiência de fazer parte da primeira turma do programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) da Unifei Itabira.

Aos meus pais Aparecida e José Lopes pelo apoio e incentivo, a minha esposa Gisely, que esteve sempre comigo nos momentos mais difíceis desta caminhada. Aos meus orientadores, Ana Carolina e Fernando Neves. Aos professores Roberto, Fernanda, Eliane, Gláucio, James, Anderson, Bianca e José Augusto, a todo corpo docente e colaboradores da Unifei Itabira, às equipes da Secretaria de Obras de João Monlevade e do DAE de João Monlevade. Aos meus amigos Fernanda, Geraldo Madeira, Cleudson, Jucimar, Elisa Maria, José Monteiro e Alisson. A todos que contribuíram para que eu alcançasse essa vitória.

Pelo apoio técnico científico aportado até o momento da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015,

RESUMO

As inundações são eventos naturais típicos das estações chuvosas que ocorrem anualmente em várias cidades brasileiras. Porém, devido às alterações nos padrões climáticos, estes eventos estão ocorrendo com maior frequência nas áreas urbanas, pois seus efeitos podem ser ampliados de acordo com o uso e ocupação da bacia hidrográfica. Portanto, a remoção da cobertura vegetal nas Áreas de Preservação Permanente (APP), a ocupação das margens dos rios e a obsolescência dos sistemas de drenagem são alguns dos fatores que promovem o aumento do número de inundações. João Monlevade é um município mineiro que se enquadra neste cenário, pois concentra 99% de sua população na sua área urbana, sendo que 10% desse total encontra-se às margens de cursos d'água, como os córregos Carneirinhos, Areão, Loanda, Metalúrgico e Tietê. Em razão das mudanças climáticas estão previstos aumentos nos registros de volume e intensidade das precipitações na região Sudeste do Brasil, onde o município está inserido. Além disso, este apresenta um histórico frequente de inundações devido à ineficiência de seu sistema de drenagem urbana. Neste contexto, este estudo teve como objetivo geral avaliar a vulnerabilidade do sistema de drenagem urbana do município de João Monlevade-MG frente a um cenário futuro de mudança climática. Para isto, realizou-se a delimitação da sub-bacia de estudo e a caracterização morfométrica dela. Além disso, estabeleceram-se e mensuraram-se os usos e as formas de ocupação do solo de forma a elaborar um diagnóstico atual do sistema de drenagem urbana da região, além de obtenção de dados observados e simulados de precipitação (em um intervalo de 30 anos). Utilizou-se um cenário de mudança climática projetado para o futuro, o qual representa altas emissões de gases de efeito estufa, e, por meio de dados de precipitação simulados com a técnica de *downscaling* dinâmico, aplicada em um modelo climático global, analisou-se a vulnerabilidade do sistema de drenagem do município, a partir da realização de simulações com um modelo hidrológico. Desse modo, foi possível avaliar os volumes escoados na sub-bacia de estudo nos cenários atual e futuro utilizando o *software* HEC-HMS. Constatou-se que o sistema de drenagem do município encontra-se obsoleto e não consegue mais atender à solicitação de escoamento gerada pelas chuvas, desse modo, recomenda-se que ações não estruturais como a implantação de um sistema de alerta, a partir do monitoramento da duração das chuvas, sejam tomadas.

Palavras-chave: Eventos Extremos. Inundação. Bacia Hidrográfica. HEC-HMS. ETA/HADGEM2-ES.

ABSTRACT

Floods are natural events typical of rainy seasons, which occur annually in several Brazilian cities. However, due to climate change, these events are occurring more frequently in urban areas, as their effects can be amplified according to the soil use and occupation of the hydrographic basin. Therefore, the removal of vegetation cover in Permanent Preservation Areas (APP), the occupation of river banks and the obsolescence of drainage systems are some of the factors that promote the increase in the number of floods. João Monlevade is a municipality in Minas Gerais State that fits this scenario, as it concentrates 99% of its population in its urban area, with 10% of this total being on the banks of water courses, such as the streams Carneirinhos, Areão, Loanda, Metallurgical and Tietê. Due to climate change, increases in the volume and intensity of rainfall are projected in the southeast region of Brazil, where the municipality is located. In addition, João Monlevade has a frequent history of flooding due to the inefficiency of its urban drainage system. Given this scenario, this study aimed to assess the vulnerability of the urban drainage system in the municipality of João Monlevade-MG in the face of a future climate change scenario. For this, the sub-basin analyzed in this study was delimited and its morphometric characterization was performed. In addition, the soil use and occupation were established and measured in order to elaborate a current diagnosis of the region's urban drainage system; also, the observed and simulated rainfall data (over an interval of 30 years) were obtained. A climate change scenario projected for the future, which represents high emissions of greenhouse gases, was used and, through rainfall data simulated with the dynamic downscaling technique applied in a global climate model, the vulnerability of the drainage system in the municipality was assessed from simulations with a hydrological model. In this way, it was possible to evaluate the volumes drained in the study sub-basin in the current and future scenarios using the HEC-HMS software. It was found that the municipality's drainage system is obsolete and is no longer able to meet the drainage demand generated by the rains, therefore, it is recommended that non-structural actions, such as the implementation of an alert system, based on rain duration monitoring, be taken.

Keywords: Extreme Events. Flood. Hydrographic Basin. HEC-HMS. ETA/HADGEM2-ES.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da bacia do córrego Carneirinhos no município de João Monlevade	43
Figura 2: A - Córrego Carneirinhos antes de ser canalizado. B – Obras de canalização do córrego Carneirinhos no início dos anos 1970.	45
Figura 3: Domínios disponíveis na Plataforma Projeta para as simulações com o modelo global HADGEM2-ES na região sudeste	61
Figura 4: Tela inicial do <i>software</i> CMhyd.....	63
Figura 5: Tela de saída dos resultados no modelo ALEA.....	64
Figura 6: Gráfico da equação de desagregação das chuvas para TR05	65
Figura 7: Distribuição das precipitações conforme o método dos blocos alternados ...	66
Figura 8: Fluxograma do processo de modelagem hidrológica	67
Figura 9: Tela do modelo hidrológico gerado pelo <i>software</i> HEC-HMS	68
Figura 10: Evolução da população de João Monlevade desde 1991	69
Figura 11: Córrego Carneirinhos durante o evento de inundação de 1970	73
Figura 12: Formulário enviado ao SINDEC referente ao evento de inundação de 2003	75
Figura 13: Mapa do Balanço Hídrico para o Brasil durante o mês de novembro de 2006	76
Figura 14: Imagem do satélite EUMETSAT para o dia 29/12/2012.	78
Figura 15: Imagem do satélite EUMETSAT para o dia 05/02/2015	79
Figura 16: Imagem do satélite EUMETSAT para o dia 04/04/2018	80
Figura 17: MDE gerado a partir das curvas de nível do município de João Monlevade e da imagem SRTM.	83
Figura 18: Classificação dos cursos d’água segundo Horton-Strahler.....	84
Figura 19: Mapa de declividade da bacia.....	86
Figura 20: Uso e ocupação da bacia no ano de 2005	88
Figura 21: Uso e ocupação da bacia no ano de 2016	88
Figura 22: Mapa de uso e ocupação da bacia no ano de 2019	89
Figura 23: Mapa de solo da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos	90
Figura 24: Resultado da divisão da bacia do córrego Carneirinhos em sub-bacias	91
Figura 25: Dados hidrológicos observados de 1989 a 2018.....	92
Figura 26: Resultado dos comportamentos dos dados antes e após a correção de viés	98

Figura 27: Tela do <i>software</i> ALEA apresentando o resultado de saída do teste de aderência	99
Figura 28: Hietograma de desagregação da chuva para TR 05	101
Figura 29: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva (observada)	107
Figura 30: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05(observada)	108
Figura 31: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05(observada)	109
Figura 32: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A (observada)	110
Figura 33: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A (observada)	110
Figura 34: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A (observada)	111
Figura 35: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M (observada)	112
Figura 36: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M (observada)	112
Figura 37: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M (observada)	113
Figura 38: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B (observada)	114
Figura 39: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B (observada)	114
Figura 40: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B (observada)	115
Figura 41: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM (observada)	116
Figura 42: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM (observada)	116
Figura 43: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM (observada)	117

Figura 44: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB (observada)	118
Figura 45: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB (observada)	118
Figura 46: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB (observada)	119
Figura 47: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05MB (observada)	120
Figura 48: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB (observada)	120
Figura 49: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB (observada)	121
Figura 50: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada pelos modelos.....	122
Figura 51: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada pelos modelos.....	123
Figura 52: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada pelos modelos.....	123
Figura 53: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada pelos modelos	124
Figura 54: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada pelos modelos	125
Figura 55: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada pelos modelos	125
Figura 56: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada pelos modelos	126
Figura 57: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada pelos modelos	127
Figura 58: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada pelos modelos	127
Figura 59: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção baixa da bacia (exutório 1).	128

Figura 60: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada pelos modelos.....	129
Figura 61: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada pelos modelos.....	129
Figura 62: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM projetada pelos modelos	130
Figura 63: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM projetada pelos modelos	131
Figura 64: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM projetada pelos modelos	131
Figura 65: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB projetada pelos modelos	132
Figura 66: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB projetada pelos modelos	133
Figura 67: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB projetada pelos modelos	133
Figura 68: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05MB projetada pelos modelos	134
Figura 69: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05MB projetada pelos modelos	135
Figura 70: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05MB projetada pelos modelos	135
Figura 71: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a bacia. (exutório 1).....	136
Figura 72: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a bacia (exutório 2).....	137
Figura 73: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a bacia (exutório 3).....	138

Figura 74: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída na parte alta da bacia (exutório 1).....	139
Figura 75: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída na parte alta da bacia (exutório 2).....	139
Figura 76: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída na parte alta da bacia (exutório 3).....	140
Figura 77: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte intermediária da bacia (exutório 1).....	141
Figura 78: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte intermediária da bacia (exutório 2).....	141
Figura 79: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte intermediária da bacia (exutório 3).....	142
Figura 80: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte baixa da bacia (exutório 1).....	143
Figura 81: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte baixa da bacia (exutório 2).....	143
Figura 82: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte baixa da bacia (exutório 3).....	144
Figura 83: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 1).....	145
Figura 84: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 AM projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 2).....	145

- Figura 85:** Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 AM projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 3)..... 146
- Figura 86:** Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 AB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e baixa da bacia (exutório 1) 147
- Figura 87:** Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e baixa da bacia (exutório 2) 147
- Figura 88:** Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 AB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e baixa da bacia (exutório 3) 148
- Figura 89:** Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes intermediária e baixa da bacia (exutório 1) 149
- Figura 90:** Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes intermediária e baixa da bacia (exutório 2) 149
- Figura 91:** Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes intermediária e baixa da bacia (exutório 3) 150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados climatológicos de João Monlevade no período de 1961 a 1990	43
Tabela 2: Exemplo da ordenação dos resultados da desagregação das chuvas.....	66
Tabela 3: Características morfométricas da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos.....	82
Tabela 4: Uso e ocupação do solo em João Monlevade nos anos de 2005, 2016 e 2019	87
Tabela 5: Máximas precipitações mensais da série histórica de precipitação.....	94
Tabela 6: Resultados do CN para cada uma das sub-bacias do córrego Carneirinhos	96
Tabela 7: Tempo de concentração para cada sub-bacia a partir das equações de Kirpich e Ven te Chow.....	97
Tabela 8: Resultados da desagregação das chuvas com TR 05.....	100
Tabela 9 - Compilado dos resultados obtidos durante as simulações hidrológicas com o modelo HEC-HMS	102
Tabela 10 - Precipitação acumulada no intervalo de 6 horas para cada um dos cenários	152

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos resultados de densidade de drenagem	50
Quadro 2: Classificação dos resultados da relação de relevo	52
Quadro 3: Interpretação dos resultados para o fator de forma	52
Quadro 4: Interpretação dos resultados para o coeficiente de compacidade	53
Quadro 5: Grupos hidrológicos de solo	56
Quadro 6: Eventos extremos de inundação ocorridos na bacia de estudo e registrados nos órgãos públicos do município, portal S2id e em sites de notícias, e respectivos sistemas meteorológicos atuantes	71
Quadro 7: Combinações das variáveis de ocorrência de precipitação simuladas	102

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
2.	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo geral	19
2.2	Objetivos específicos	19
3.	JUSTIFICATIVA	20
4.	REVISÃO DE LITERATURA	21
4.1	Mudanças climáticas.....	21
4.1.1	Projeções para o Brasil	23
4.1.2	Eventos hidrológicos extremos	24
4.1.3	Precipitações extremas em um cenário de aquecimento global no Estado de Minas Gerais. 25	
4.1.4	Modelos climáticos	26
4.1.4.1	Modelo Global HADGEM2-ES.....	28
4.1.4.2	Modelo Regional ETA.....	29
4.1.4.3	Cenários climáticos	29
4.2	Drenagem urbana.....	31
4.2.1	Drenagem urbana no Brasil	32
4.2.2	Características de um sistema de drenagem.....	34
4.2.3	Série histórica pluviométrica	36
4.2.4	Desagregação de chuva.....	37
4.2.5	Modelos hidrológicos	39
4.2.5.1	Software HEC-HMS	40
5.	DADOS E METODOLOGIA	42
5.1	Área de estudo	42
5.2	Sistema de drenagem de João Monlevade	44
5.3	Dados dos eventos de inundação na bacia do córrego Carneirinhos	46

5.4	Dados pluviométricos e sistemas meteorológicos atuantes em João Monlevade	46
5.5	Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos	47
5.5.1	Área e perímetro	47
5.5.2	Amplitude altimétrica	48
5.5.3	Comprimento do canal principal.....	48
5.5.4	Hierarquia dos canais.....	48
5.5.5	Número total de cursos d'água na bacia	49
5.5.6	Comprimento vetorial do canal principal	49
5.5.7	Densidade de drenagem	49
5.5.8	Índice de sinuosidade.....	50
5.5.9	Índice de circularidade.....	50
5.5.10	Relação do relevo.....	51
5.5.11	Fator de forma.....	52
5.5.12	O coeficiente de compacidade	53
5.5.13	Declividade da bacia	53
5.5.14	Uso e ocupação do solo	54
5.6	Elaboração dos mapas.....	54
5.6.1	Divisão da bacia	56
5.7	Modelagem hidrológica no HEC-HMS	57
5.7.1	Curve Number (CN)	57
5.7.2	Tempo de concentração e tempo de retardo	58
5.7.3	Dados de precipitação observados e simulados	60
5.7.3.1	Dados observados	60
5.7.3.2	Dados simulados	60
5.7.3.3	Correção de viés.....	62
5.7.4	Tratamento dos dados hidrológicos	63

5.7.5 Desagregação das chuvas dispostas em curvas IDF	65
5.7.6 Simulações no HEC-HMS	67
5.7.7 Resumo das principais etapas metodológicas para a realização das simulações hidrológicas.....	67
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.1 Eventos de inundação na bacia do córrego Carneirinhos e sistemas meteorológicos atuantes	69
6.2 Principais eventos de inundação na bacia do córrego Carneirinhos e sistemas meteorológicos atuantes	72
6.2.1 As inundações de 1969, 1970 e 1979.....	73
6.2.2 As inundações de 2003, 2006 e 2009.....	74
6.2.3 As inundações de 2012 a 2020	77
6.3 Caracterização morfométrica da bacia.....	81
6.3.1 Declividade	85
6.3.2 Uso e ocupação do solo	86
6.3.3 Mapa de Solos.....	90
6.3.4 Mapa de divisão da bacia.....	91
6.4 Dados hidrológicos observados	92
6.4.1 Curve Number (CN)	95
6.4.2 Tempo de concentração	97
6.4.3 Correção de viés.....	98
6.4.4 Resultados das análises estatísticas e testes de aderência.....	99
6.4.4.1 Simulações no HEC-HMS	101
6.5 Resultados das simulações para os dados pluviométricos observados	107
6.5.1 Cenário TR 05.....	107
6.5.2 Cenário TR 05A.....	109
6.5.3 Cenário TR 05M	111
6.5.4 Cenário TR 05B	113

6.5.5	Cenário TR 05AM	115
6.5.6	Cenário TR 05AB	117
6.5.7	Cenário TR 05MB	119
6.6	Resultados das simulações hidrológicas para as precipitações geradas para o clima do presente a partir dos modelos HADGEM2-ES e ETA	121
6.6.1	Cenário TR05.....	122
6.6.2	Cenário TR 05A.....	124
6.6.3	Cenário TR 05M	126
6.6.4	Cenário TR 05B	128
6.6.5	Cenário TR 05AM	130
6.6.6	Cenário TR 05AB	132
6.6.7	Cenário TR 05MB	134
6.7	Resultados das simulações hidrológicas para as precipitações no clima do futuro	136
6.7.1	Cenário TR 05.....	136
6.7.2	Cenário TR 05A.....	138
6.7.3	Cenário TR 05M	140
6.7.4	Cenário TR 05B	142
6.7.5	Cenário TR 05AM	144
6.7.6	Cenário TR 05AB	146
6.7.7	Cenário TR 05MB	148
6.8	Análise das combinações de ocorrência de precipitações na bacia	150
6.8.1	Precipitação acumulada após 06 horas	152
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	153
	REFERÊNCIAS	155

1. INTRODUÇÃO

O número de pessoas que vivem nos centros urbanos do Brasil dobrou desde a década de 1940, de acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Atualmente, a população urbana do Brasil é de aproximadamente 84%, contra os 40% da década de 1940 (IBGE, 2017). Este fato se deve ao grande crescimento das cidades de médio porte e a um menor crescimento populacional das metrópoles (MOREIRA, 2014). De acordo com Parkinson et al. (2003), *apud* Moreira (2014), o processo de crescimento das cidades ocorreu de modo desordenado, provocando, assim, diversos problemas ambientais em virtude dos eventos hidrológicos extremos.

Este crescimento das áreas urbanas tem aumentado a impermeabilização do solo, dando velocidade ao escoamento superficial das águas de chuva, fazendo com que o sistema de drenagem das cidades não comporte todo o volume de água drenado, agravando os eventos de inundações e alagamentos nas vias urbanas (TUCCI, 2008).

Dois instrumentos de gestão, aplicados nas áreas urbanas para prevenir estes impactos, são as leis de uso e ocupação do solo e o Zoneamento Econômico Ecológico (ZEE) que definem a distribuição espacial das atividades socioeconômicas. Além destes, os planos diretores municipais destacam-se como instrumentos de planejamento e gestão territorial, mitigando as inundações em bacias urbanizadas (MOREIRA, 2014).

Nos casos em que a bacia já se encontra totalmente antropizada, a mitigação destes eventos parte do princípio da substituição do sistema de drenagem antigo por um novo e mais robusto (LOMBARDO, 2009). Para Tucci e Genz (1995), estes sistemas são obras de engenharia muito caras e devem ser realizados apenas quando medidas não estruturais não puderem ser utilizadas para promover a minimização de danos causados pela inundaçāo.

Para o dimensionamento das estruturas de substituição de um sistema de drenagem urbana, Bidone e Tucci (1995) afirmam que se deve conhecer as variáveis hidrológicas do local de sua implantação, tais como a precipitação, a vazão drenada pela bacia, o coeficiente de ocupação do solo, a geologia da bacia, entre outros. De acordo com Pereira et al. (2007), as principais variáveis utilizadas neste tipo de dimensionamento são a intensidade, a frequência, e a duração das chuvas.

De posse desses dados, é possível obter a equação de intensidade, duração e frequência (IDF), também conhecida como equação de chuvas intensas, que é a principal forma de se caracterizar a relação entre estas grandezas (PEREIRA, 2007).

Mudanças nas características da precipitação podem levar a mudanças nas curvas IDF. Por isso, são necessários estudos que realizem uma atualização destas curvas, considerando cenários de mudanças climáticas. No Canadá, assim como no Brasil, as curvas IDF são utilizadas como uma ferramenta muito importante no planejamento e na gestão dos recursos hídricos, porém, elas são desenvolvidas assumindo que os dados são estacionais e não levam em consideração as mudanças climáticas (WESCHENFELDER et al., 2019).

Dentro deste contexto, torna-se essencial a utilização de curvas IDFs, projetadas para diferentes cenários de mudanças climáticas, a fim de diagnosticar a resiliência dos sistemas de drenagem existentes.

O município de João Monlevade está localizado no estado de Minas Gerais, na região sudeste do Brasil, onde, segundo o IPCC (2014), estão previstos aumentos nas concentrações do volume de chuvas no futuro. Além disso, o município apresenta um histórico frequente de inundações durante a estação chuvosa, devido ao sistema de drenagem obsoleto e/ou subdimensionado.

Por isso, esta pesquisa tem por objetivo investigar os impactos das mudanças climáticas no atual sistema de drenagem deste município, permitindo que, ao final deste estudo, possam ser propostas recomendações para o monitoramento, prevenção e redução da ocorrência destes episódios de inundações. Estas recomendações poderão também ser aplicadas em outras cidades de pequeno a médio porte, considerando-se as especificidades de cada localidade.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a vulnerabilidade do sistema de drenagem urbana do município de João Monlevade-MG frente a um cenário futuro de mudança climática.

2.2 Objetivos específicos

- Delimitar a sub-bacia de estudo, caracterizá-la morfometricamente, estabelecer e mensurar os usos e as formas de ocupação do solo para elaborar um diagnóstico atual do sistema de drenagem urbana da região;

- Obter dados observados e simulados de precipitação (em um intervalo de 30 anos), considerando um cenário de mudança climática projetada para o futuro por meio da técnica de *downscaling* dinâmico aplicada em um modelo climático global;
- Analisar a vulnerabilidade do sistema de drenagem do município no cenário atual e futuro, a partir da realização de simulações com um modelo hidrológico.

3. JUSTIFICATIVA

O povoamento de áreas de risco, tais como topo de morros ou planícies de inundação dos cursos d’água, pode ser considerado um dos grandes problemas enfrentados pelos órgãos públicos, uma vez que estas ocupações ocorrem, na maioria das vezes, sem planejamento do espaço e de forma desordenada (SILVA, 2006).

A cidade de João Monlevade em Minas Gerais enquadra-se neste contexto, pois, aproximadamente, 99% de sua população total ocupa a área urbana do município. Deste total, cerca de 10% encontra-se às margens de cursos d’água de menores dimensões, como os córregos Carneirinhos, Areão, Loanda, Metalúrgico e Tietê (IBGE, 2018).

No período chuvoso, normalmente, o córrego Carneirinhos não comporta o volume de água recebido em sua bacia causando inundações em algumas áreas do centro de João Monlevade, gerando grandes transtornos e prejuízos a sua população (ENGECORPS, 2015).

Assim, o estudo dos efeitos das mudanças climáticas sobre o sistema de drenagem urbana do município de João Monlevade permitirá dimensionar, com uma maior precisão, os dispositivos de drenagem urbana, e, além disso, estimar quais serão as áreas mais vulneráveis aos eventos hidrológicos extremos.

Portanto, a proposta desta pesquisa é a realização de um estudo sobre as influências das variações hidrológicas, ocasionadas pelas mudanças climáticas, sobre o sistema de drenagem urbana no município de João Monlevade, a fim de verificar a vulnerabilidade deste a um cenário futuro de alterações nas condições de precipitação na região.

Os resultados poderão contribuir para a tomada de decisões frente a eventos hidrológicos extremos, além de auxiliar o poder público municipal na prevenção de perdas ocasionadas pelas inundações e na elaboração de um plano de emergência em caso de ocorrência desses eventos.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Mudanças climáticas

As mudanças climáticas são um tema que vem sendo, cada vez mais, debatido na sociedade e nas diversas reuniões realizadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) ao longo dos últimos anos (*United Nations*, 2018). O IPCC é um órgão internacional criado pela Organização das Nações Unidas (ONU), em 1988, para examinar e avaliar as mudanças climáticas, haja vista que estas podem gerar grandes impactos, especialmente ao meio ambiente e às atividades socioeconômicas de todas as partes do mundo (LEITE, 2015).

De acordo com o IPCC, o termo “mudança climática” é definido como:

[...] uma variação estatisticamente significativa nas condições médias do clima ou em sua variabilidade, que persiste por um longo período – geralmente décadas ou mais. Pode advir de processos naturais internos ou de forçantes naturais externas, ou ainda de mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso do solo (IPCC, 2001, p. 368).

Por outro lado, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), realizada no Rio de Janeiro, em 1992, definiu que as mudanças climáticas podem ser entendidas como:

[...] uma mudança de clima que possa ser direta ou indiretamente atribuída à atividade humana que altere a composição da atmosfera mundial e que se some àquela provocada pela variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis (BRASIL, 2004, p. 69).

Observa-se que o termo “mudanças climáticas” tem sido compreendido como um fenômeno causado em maior ou menor proporção pelas atividades humanas que se somam a fatores naturais. Assim, pode-se dizer que as mudanças climáticas são alterações anormais do clima, provocadas por atividades naturais e antrópicas. Fato este que pode ser justificado pelo aumento observado das emissões antropogênicas dos gases do efeito estufa - GEEs nos últimos 50 anos (TILIO NETO, 2010a).

De acordo com o IPCC (2018), as atividades antrópicas provocaram um aquecimento global de aproximadamente 1,0 °C acima dos níveis pré-industriais, e este aquecimento poderá atingir 1,5 °C entre 2030 e 2052, caso as emissões dos GEEs continuem a aumentar no ritmo atual.

Analisando-se o histórico das atividades humanas, verifica-se que, com a ocorrência da Revolução Industrial, em meados do século XVIII, os efeitos das mudanças climáticas começaram a ser ampliados, uma vez que foi iniciado o processo de substituição da mão de obra humana pelo maquinário movido a carvão mineral. Este processo irreversível contribuiu para que as máquinas ganhassem espaço no cotidiano da sociedade, ao mesmo tempo em que essa mudança no sistema de produção contribuiu para alterar as fontes de energia, intensificando-se o uso de combustíveis de origem fóssil, como os derivados do petróleo que promoveram maior liberação de poluentes na atmosfera (DUARTE, 2009).

As emissões de dióxido de carbono (CO₂), provenientes da queima de combustíveis fósseis, passaram de 9,28 bilhões de toneladas para 37,1 bilhões de toneladas entre os anos de 1959 a 2018 (ALVES, 2018), ou seja, um aumento de 400% em apenas seis décadas. No ano de 2007, a queima de combustíveis fósseis em todo o mundo representava cerca de 90% das emissões de dióxido de carbono produzidas por atividades antropogênicas (IPCC, 2007). No Brasil, a grande maioria das emissões dos GEEs é proveniente do desmatamento e da ocorrência de queimadas nas florestas (VITAL, 2018).

O aquecimento global do planeta Terra é gradativo, porém os seus efeitos no clima são imediatos, com a ocorrência de eventos climáticos extremos, maior incidência de tempestades, inundações e secas prolongadas, entre outros (MENEGUZZI, 2011).

Segundo as projeções climáticas realizadas pelo IPCC, um aquecimento médio da temperatura do ar de 2 °C poderia resultar no derretimento das geleiras, aumento médio do nível do mar, aumento na frequência da ocorrência de eventos extremos como ondas de calor, frio, secas, tempestades, ciclones tropicais, enchentes e inundações, entre outros; provocando assim, um aumento da vulnerabilidade da população a estes fenômenos, além de diversos prejuízos à economia de todos os países (PBMC, 2014).

Portanto, é necessário que medidas que visem manter o aquecimento global em no máximo 1,5 °C sejam tomadas, como a redução das taxas de emissões de GEEs em escala global, visando minimizar as consequências abruptas do aquecimento do planeta, caso sejam ultrapassados os 2 °C estimados pelas projeções do IPCC. Além disso, é preciso considerar medidas que visem minimizar os danos e impactos causados pelas mudanças climáticas de modo que os efeitos sejam menores do que os estimados para um aquecimento de 2 °C.

4.1.1 Projeções para o Brasil

De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2020), a temperatura média do Brasil poderá subir até 4 °C nos próximos 100 anos, caso o padrão de emissão de GEE se mantenha. Isso causaria um aumento da evaporação e alterações no balanço hídrico de todas as regiões do país (MARENGO, 2009).

Conforme projeções realizadas pelo IPCC (2014), a região Nordeste do Brasil sofrerá escassez de chuvas nos próximos anos, caso as emissões de GEEs continuem altas, fazendo com que o território semiárido destas áreas se torne ainda mais árido, tendendo à desertificação, afetando assim drasticamente a produção agrícola da região, uma vez que é caracterizada como de subsistência.

Para as regiões Sul e Sudeste do país, é previsto um aumento gradativo de até 25% nos padrões de precipitação, o que reduzirá o período de retorno das chuvas extremas, podendo causar assim uma acentuação no número de eventos de inundação nas áreas urbanas, além de impactos significativos na economia destas regiões (IPCC, 2014a).

Por fim, nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil são previstos aumentos dos períodos de seca em quase todos os estados, em especial na região Amazônica, com uma redução de até 50% nos volumes das precipitações em comparação às médias registradas, favorecendo assim a redução dos índices pluviométricos na região (IPCC, 2014).

Se a temperatura subir 1,5 °C neste século, conforme estimado pelo IPCC, os eventos climáticos extremos aumentarão sua frequência e intensidade de ocorrência, em todas as partes do mundo, porém, com efeitos mais acentuados nas áreas urbanas (IPCC, 2019).

Deste modo, os gestores dos grandes centros urbanos deverão buscar alternativas que visem mitigar e/ou adaptar os territórios a tais eventos, visto que estes são os principais emissores de GEEs, e ao fato de haver grandes contingentes populacionais concentrados e a enorme quantidade de indústrias. Além disso, na grande maioria dos casos, o poder público não consegue fornecer uma infraestrutura básica de prevenção aos riscos inerentes a estes tipos de desastres.

4.1.2 Eventos hidrológicos extremos

Os eventos climáticos extremos podem ser classificados quanto a sua natureza em hidrometeorológicos (inundações), geológicos (terremotos) e biológicos (epidemias), porém, tratar-se-á aqui apenas dos eventos hidrometeorológicos (DICKEL, 2016).

O campo da meteorologia avançou muito nas últimas décadas, possibilitando dessa forma um conhecimento mais amplo e preciso de alguns processos atmosféricos e da previsão do tempo. Porém, mesmo com todo este avanço, os centros urbanos encontram-se vulneráveis aos eventos climáticos extremos, pois, apesar do conhecimento das condições climáticas que contribuem para a ocorrência de tais eventos, estes não podem ser controlados (BRANDÃO et al., 2016).

Os eventos climáticos extremos são imprevisíveis ou pelo menos de difícil previsão e mensuração, apesar de todo avanço tecnológico desenvolvido, pois estes são de natureza climática, de ocorrência rara, quando comparado com seus respectivos padrões de distribuição estatística; além disso, eles são muito dinâmicos (MENEGUZZI, 2011).

Do ponto de vista estatístico, estes fenômenos são casos localizados nos extremos de uma curva de probabilidade de ocorrência, sendo que, quanto maior a distância destes eventos em relação à média, maior a magnitude deles (TILIO NETO, 2010b).

Os eventos naturais extremos que mais provocam prejuízos à economia brasileira são os relacionados aos eventos hidrológicos extremos (BRANDÃO; SANTOS; CARELLI, 2016). De acordo com Santos (2012), o aumento da temperatura, devido às ilhas de calor, provocadas pelo crescimento das grandes cidades brasileiras, favorece o movimento ascendente do ar que pode resultar em um aumento da precipitação. Esta precipitação, nos centros urbanos, geralmente, acontece de forma intensa e durante um curto intervalo de tempo, fazendo com que o sistema de drenagem não comporte a grande vazão gerada por elas, provocando assim inundações urbanas (SANTOS, 2012).

De acordo com o IPCC (2014a), há evidências claras de que a intensidade da precipitação extrema pode aumentar em diversas partes do mundo. De fato, como consequência das mudanças no ciclo da água, a frequência e a intensidade das inundações e secas estão se intensificando em diversas partes do mundo.

Desse modo, conhecer o comportamento dos eventos extremos de precipitação, em termos regionais, tanto em condições climáticas naturais, quanto sob influência das mudanças

climáticas futuras, é de suma importância para o gerenciamento eficaz dos riscos aos quais a população está exposta.

4.1.3 Precipitações extremas em um cenário de aquecimento global no Estado de Minas Gerais.

Conforme mencionado, o IPCC (2014) prevê um aumento no número dos eventos extremos de chuva para a região sudeste do Brasil, os quais podem aumentar consideravelmente a situação de vulnerabilidade da população, uma vez que as mudanças climáticas estão alterando a distribuição temporal da ocorrência dos eventos de precipitação (ZILLI et al., 2017).

O Estado de Minas Gerais encontra-se sob a influência do regime de Monção da América do Sul, o que proporciona a concentração das precipitações entre os meses da primavera ao outono do ano seguinte; assim, os eventos hidrológicos extremos ocorrem com mais frequência nesse período (REBOITA et al., 2016).

Nesse contexto, o estudo de Reis et al. (2018) apontou, por meio da análise dos dados de 48 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que, no Estado de Minas Gerais, entre os anos de 1975 a 2015, houve um aumento na frequência dos eventos hidrológicos extremos na estação chuvosa e redução na estação seca.

Um dos fatores que contribui para a intensificação dos eventos de inundação são as alterações nos padrões hidrológicos-climáticos de uma região. Franco et al. (2016) também relataram um aumento na frequência das inundações no córrego Carneirinhos, em João Monlevade-MG, após a finalização de sua canalização entre os anos de 1999 a 2001.

Assim, uma vez que existem evidências das alterações nos padrões climáticos na região de análise desta pesquisa, e considerando que as características locais favorecem os episódios de inundação (conforme os resultados aqui apresentados), e que, após a canalização do córrego, os problemas relacionados à drenagem da bacia estão mais comuns, torna-se, pois, primordiais as ações de gerenciamento de risco por parte do poder público local. Ações que visem à mitigação dos eventos hidrológicos extremos no município, por meio de medidas preventivas e corretivas urgentes, a fim de tornar eficiente o sistema de drenagem da bacia, de modo que novas fatalidades não ocorram e que os prejuízos materiais sejam minimizados.

4.1.4 Modelos climáticos

Entre os principais avanços científicos ocorridos no último século está a capacidade do cientista em simular as condições climáticas futuras utilizando modelos matemáticos. Esta habilidade foi alcançada após diversos avanços na compreensão dos processos que definem a evolução do estado da atmosfera, das variáveis do sistema climático e da evolução da capacidade de processamento dos computadores (SAMPAIO; SILVA, 2014).

Para projetar as condições climáticas futuras, são utilizados os modelos climáticos globais (*Global Climate Models* - GCMs) que apresentam uma cobertura global de dados, e os modelos climáticos regionais (*Regional Climate Models* - RCMs) que permitem a análise de uma região com mais detalhes. Os modelos climáticos são programas computacionais imprescindíveis no desenvolvimento de estudos referentes às mudanças ocorridas, ou que ocorrerão, nas condições atmosféricas (precipitação, temperatura, entre outras) (CASAGRANDE e ALVAREZ, 2013).

Os GCMs podem ser classificados em Modelos Globais Atmosféricos (GCMs), quando contemplam somente os processos que ocorrem na atmosfera, ou Modelos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera (AOGCMs), quando contemplam a interação entre os processos que ocorrem no oceano e na atmosfera. Estes podem gerar cenários futuros a partir da concepção do modo com que se desenvolverá a economia mundial (aumento da taxa de emissão GEEs e aerossóis, por exemplo) (DUARTE, 2009).

Os modelos climáticos podem ser compreendidos como modelos matemáticos construídos por equações e variáveis numéricas, que representam, de forma simplificada, os complexos fenômenos naturais que ocorrem na realidade (RIBEIRO; SANTOS, 2016). Além disso, conforme mencionado, por meio destes modelos, é possível realizar projeções sobre as condições do clima no futuro, possibilitando assim avaliar os possíveis impactos do modelo atual de desenvolvimento econômico.

Os primeiros modelos climáticos foram construídos na década de 1990 e empregavam um número bem limitado de variáveis meteorológicas em suas combinações. Porém, por meio deles, foram desenvolvidos os primeiros estudos que possibilitaram interpretar a variabilidade climática sofrida ao longo do último século, bem como mensurar a contribuição das fontes naturais (atividade vulcânica, explosões solares, entre outras) e antropogênicas (emissão de

GEEs, desmatamento e queimadas, entre outras) sobre estas variações (BARCELLOS et al., 2009).

Os GCMs, empregados para realizar as projeções climáticas, evoluíram muito nos últimos anos e passaram a utilizar um número maior de variáveis meteorológicas em suas simulações (SILVA, 2014). No século XIX, ocorreu um grande avanço no conhecimento dos princípios físicos fundamentais que governam o fluxo da atmosfera e melhor compreensão sobre os fundamentos básicos da dinâmica e da termodinâmica dos fluidos (BARCELLOS et al., 2009). Porém, apesar disso, devido ao poder computacional disponível atualmente, as projeções dos GCMs ainda apresentam uma resolução entre 100 e 300 km, ou seja, uma resolução muito baixa para a realização de estudos em escala regional (SILVA, 2016).

Para tornar os dados de saída dos GCMs mais refinados, ou seja, possíveis de serem utilizados em análises regionais, é necessário realizar uma redução na escala das projeções dos cenários simulados por meio de técnicas conhecidas como *downscaling* dinâmico ou estatístico. O *downscaling* dinâmico utiliza os RCMs aninhados aos GCMs, o que significa que os últimos fornecem as condições de contorno para os primeiros (SAMPAIO; SILVA, 2014). No caso do *downscaling* estatístico, uma relação estatística é estabelecida entre as variáveis locais e as de grande escala.

Os RCMs incorporam características regionais da área de estudo, como cobertura do solo, topografia, geologia, entre outras, que não são consideradas pela maioria dos GCMs, e, assim, são capazes de responder melhor às variações dos efeitos locais, e/ou de sub-escala dos GCMs (SILVA, 2014).

Os resultados dos cenários de mudanças nos regimes e distribuição das precipitações dos GCMs não devem ser considerados como absolutos, visto que existem algumas incertezas sobre a constância do crescimento da taxa de emissão de GEEs e da forma de desenvolvimento da economia mundial (matriz energética, por exemplo) (TONETO JÚNIOR; PINHO, 2015).

Além disso, estas projeções resultam de modelos de simulação que vêm sendo aperfeiçoados por diversas entidades no mundo (IPCC, por exemplo). No caso do Brasil, as principais organizações responsáveis por estes estudos são o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e, mais especificamente, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (ABES, 2013).

Os GCMs, conforme afirmam Barcellos et al. (2009), devem fornecer resultados pouco precisos quando empregados em escala regional. Isto porque grande parte destes modelos considera que há fluxos de energia entre solo, ar e oceano, mas subestimam o papel do uso e

ocupação do solo nesses fluxos. Além disso, ainda não foi possível desenvolver um modelo capaz de avaliar as interações entre todas as variáveis que podem influenciar o clima do planeta (relevo, cobertura vegetal, composição do solo, entre outras).

Contudo, apesar das limitações e incertezas dos modelos climáticos, diversas pesquisas ressaltam a importância de se considerar as projeções climáticas futuras em estudos, projetos e políticas governamentais que proponham as medidas necessárias para a adaptação aos novos cenários.

4.1.4.1 Modelo Global HADGEM2-ES

O HadGEM2-ES é um modelo climático global desenvolvido pelo *Met Office Hadley Centre* do Reino Unido. Este modelo é acoplado ao sistema terrestre e foi o primeiro modelo do *Hadley Centre* a incorporar os componentes padrões do sistema terrestre (“ES” representa *Earth System*). Além disso, este modelo é utilizado por diversas organizações no mundo, tanto para pesquisas climáticas quanto para previsão do tempo (BELLOUIN et al., 2011).

Este modelo é composto de um submodelo atmosférico com 96 níveis de resolução horizontal e 38 níveis de resolução vertical, e um submodelo oceânico com resolução horizontal entre 1° e 40 níveis verticais, aumentando até 0,33° na região da Linha do Equador (CHOU et al., 2014). Ainda sobre o modelo, Silva (2014, p. 34) explica que

[...] os principais componentes do sistema terrestre incluídos são os ciclos do carbono terrestre e oceânico, e a química troposférica. Um modelo dinâmico de vegetação terrestre está presente, simulando a cobertura e balanço do carbono para cinco tipos de vegetação (árvores folhosas, árvores pouco folhosas, ramos C3, gramas C4 e arbustos). A biologia e a química dos carbonatos oceânicos são representados (sic), incluindo a limitação do crescimento do plâncton por macro e micro nutrientes.

Além disso, a configuração básica de acoplamento atmosfera-oceano deste modelo contempla os processos do ciclo de carbono e a química da troposfera. A configuração da química troposférica simula a evolução da composição atmosférica, bem como suas interações com os aerossóis atmosféricos (carbono orgânico derivados de combustível fóssil, nitrato de amônia, aerossóis biogênicos orgânicos e poeira) (SANTOS et al., 2019a).

O ciclo de tempo deste GCM é de 30 minutos para os submodelos de atmosfera e terrestre e de 1 hora para o submodelo de oceano, com acoplamento entre a atmosfera e o oceano a cada 24 horas (BRITO et al., 2019).

4.1.4.2 *Modelo Regional ETA*

O modelo regional ETA foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado, em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, e foi instalado no CPTEC em 1996. A versão operacional do modelo possui resolução horizontal de 40 km e 38 níveis, sendo a resolução maior nos baixos níveis e diminuindo com a altura (CHOU et al., 2021).

Esse modelo tem sido utilizado em estudos de mudanças climáticas desde 2010 e possui uma versão não hidrostática ideal para estudos climáticos de alta resolução, estudos urbanos e nos pequenos estados insulares em desenvolvimento (CPTEC, 2021).

O nome do modelo deriva da letra grega η (êta) que denota a sua coordenada vertical, que é uma das principais características deste modelo, uma vez que ela previne os erros associados à força do gradiente de pressão devido à topografia íngreme. Tais erros são comuns no caso de coordenadas que acompanham o terreno (MESSINGER et al., 2012).

As variáveis prognósticas do modelo são pressão na superfície, componentes horizontais do vento, temperatura, umidade específica, energia cinética turbulenta, e hidrometeoros das nuvens; e as equações do modelo são discretizadas para a grade E de Arakawa (CPTEC, s.d.).

4.1.4.3 *Cenários climáticos*

As projeções das condições climáticas futuras não podem ser construídas considerando que os fatores forçantes de GEEs, tais como a sociedade, economia, tecnologia, mantenham-se como os atuais; por isso, é necessário recorrer a cenários, ou seja, histórias que descrevam coerentemente o futuro, e que, no seu conjunto, cubram as alternativas que (atualmente) consideramos mais plausíveis para o futuro.

O IPCC, ao longo das últimas décadas, criou diversos cenários de projeções futuras sobre as condições do clima. Para a confecção do último relatório de avaliação, o AR5, o IPCC desenvolveu novo grupo de cenários de concentração de GEEs que recebeu o nome de *Representative Concentration Pathways* (RCPs) e esses foram responsáveis por substituírem os cenários da família *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) empregado na produção do relatório AR4 (KIM et al., 2015; SALES et al., 2015).

De acordo com IPCC (2014), os RCPs ou caminhos de concentração representativa são definidos como:

cenários que incluem séries temporais de emissões e concentrações de todo o conjunto de gases de efeito estufa (GEEs) e aerossóis e gases quimicamente ativos, como bem como uso / cobertura do solo [...]. A palavra representante significa que cada RCP fornece apenas um dos muitos cenários possíveis que levariam a características específicas de forçante radiativa. O caminho enfatiza que o interesse não é apenas na concentração a longo prazo , mas também a trajetória percorrida ao longo do tempo para alcançar esse resultado (IPCC, 2014, p. 1288).

Os RCPs fazem parte da terceira geração de cenários elaborados pelo IPCC e consideram variações nas concentrações de GEEs emitidas até o ano de 2100 (SILVEIRA et al., 2016). A base teórica desses cenários fundamenta-se nas alterações provocadas pelas forçantes radiativas sobre o balanço de energia do planeta, representado pelo saldo do balanço de radiação resultante entre ondas curtas (de origem solar) e ondas longas (radiação terrestre). Assim, a palavra “forçante” é usada para indicar que o balanço radiativo da Terra é forçado a sair de seu estado normal e é expressa pela quantidade de energia incidente em uma área de um metro quadrado (W/m^2) (SANTOS et al., 2019b).

Portanto, os RCPs representam uma medida da influência que um ou mais fatores possuem de alterar o balanço de energia do sistema climático. Estas estimativas foram desenvolvidas a partir de algumas suposições, como o desenvolvimento das atividades econômicas, crescimento da população, fontes de energia utilizadas, além de outros fatores socioeconômicos mundiais (SOUZA et al., 2020).

Um cenário RCP-X indica que a forçante radiativa de estabilização de GEEs, ao final do século XXI, corresponderá a X W/m^2 (SILVEIRA et al., 2016). Desse modo, o IPCC criou 4 (quatro) RCPs com base nas taxas de emissão dos GEEs (MOTA; CRUZ, 2017). O primeiro é o RCP2.6 que indica uma forçante radiativa de pico estimado em 3 W/m^2 entre os anos de 2010 e 2020, e que depois decai para 2,6 W/m^2 até 2100 (SOUZA, 2017).

O segundo cenário é o RCP4.5, cuja máxima emissão de GEEs será atingida aproximadamente em 2040, e, em seguida se estabilizará em 4,5 W/m^2 antes do final do século XXI. O terceiro cenário é o RCP6 que possui uma estimativa de pico de emissão em meados de 2080, além de uma estabilização em 6 W/m^2 após o ano de 2100. E, por fim, o quarto cenário da família de RCPs é o RCP8.5 que considera a taxa crescente na emissão de GEEs, atingindo uma forçante radiativa de 8,5 W/m^2 em 2100 (SANTOS et al., 2019b).

Esses cenários, ao serem introduzidos nos modelos climáticos, possibilitam a geração das projeções do clima presente e futuro em diferentes contextos de emissão de GEEs. Dessa maneira, nesta pesquisa, optou-se pelo emprego do cenário 8.5.

O RCP8.5 é um cenário que considera uma alta taxa de emissão de GEEs, o que corresponderia a uma estabilização da forçante radiativa em 8,5 W/m² no ano de 2100. Este cenário considera que haverá uma elevação na taxa de crescimento populacional e uma redução na renda per capita das pessoas, além de menor taxa de desenvolvimento tecnológico nos países subdesenvolvidos (LI et al., 2015).

Este cenário é considerado o mais pessimista entre os RCPs em termos de emissões de GEEs, pois se baseia na suposição de que nenhuma medida política será adotada para reduzir as altas emissões, além da população manter uma grande dependência das fontes de combustíveis fósseis (RIAHI et al., 2011).

4.2 Drenagem urbana

Durante muitos anos, os sistemas de drenagem urbana não eram considerados como dispositivos essenciais para o desenvolvimento e ordenamento dos centros urbanos (LORDELO, 2019) apesar de os primeiros avanços nestes sistemas terem sido desenvolvidos pela civilização romana, como maneira de drenar suas estradas. Esta estratégia, portanto, perdurou até o século XVII, praticamente sem sofrer grandes avanços. No século XIX, surgiu na Europa a proposição de mudanças no modo de lidar com as águas pluviais; esse novo conceito recebeu o nome de modelo sanitário-higienista ou sistema clássico de drenagem urbana (FÁTIMA, 2013).

O conceito sanitário-higienista definia que todas as águas circulantes nos meios urbanos deveriam ser canalizadas e direcionadas rapidamente para o esgotamento, evitando assim insalubridades, proliferação de doenças de veiculação hídrica e desconfortos para a população das cidades (SILVA, 2010).

Este conceito permaneceu como sendo a maneira mais avançada em lidar com as águas pluviais urbanas, durante o século XX, no mundo inteiro. Foi na década de 1960 que surgiu a nova visão sobre os sistemas de drenagem, que ficou conhecida como “consciência ecológica”, e diversos países desenvolvidos da Europa passaram a elencar os principais conflitos ambientais, provocados pelo até então modelo de gestão das águas pluviais, avaliando assim os conflitos ambientais entre as cidades e o ciclo hidrológico (CHRISTOFIDIS et al., 2019).

A partir desse momento, houve uma necessidade por parte da sociedade de repensar os efeitos das ações humanas sobre o meio ambiente (como adensamentos urbanos, por exemplo),

mais precisamente considerando os aspectos volume e qualidade dos recursos hídricos (SILVA, 2010).

Esta nova visão ambiental empregada à drenagem urbana fez com que as soluções higienistas, até então tidas como modernas, passassem por nova estruturação, onde obras de drenagem tradicionais como galerias, condutos, bocas-de-lobo, sarjetas e cursos d'água retificados, precisassem ser ampliados de modo a permitir o emprego de soluções alternativas e complementares para a rápida remoção das águas acumuladas em áreas urbanas, pois fora constatada que esta situação transformou-se em um problema para as comunidades, a jusante, que recebiam toda a vazão acumulada na bacia, a montante (FURTADO, 2018; TUCCI, 2003).

É interessante salientar que as soluções alternativas recomendam que seja removido o excesso das águas pluviais por meio de obras de contenção e de amortecimento dos escoamentos superficiais, como valas de infiltração, reservatórios e bacias de retenção, além da preservação dos cursos d'água em seu estado natural (RADESCA (2018).

Deste modo, esta nova solução, empregada na resolução das inundações nos grandes centros urbanos, tem-se apresentado como boa alternativa no caso de inundações urbanas, uma vez que esta, além de solucionar os problemas gerados pelo sistema de drenagem convencional, pode gerar ampla harmonia devido à implantação de mais áreas verdes e o estabelecimento de algumas condições do sistema natural pré-existentes nestas áreas.

4.2.1 Drenagem urbana no Brasil

O sistema de drenagem é uma técnica empregada pelo homem há milhares de anos. A primeira obra de dimensão relevante data do século VI a.C., na Roma antiga. Tal obra foi concebida como uma maneira de se buscar melhor qualidade de vida para a população urbana da época. Esta obra teve como o seu principal objetivo, captar e canalizar esgotos domésticos e as águas pluviais da cidade de modo a conduzi-las para longe da população (FÁTIMA, 2013).

O sistema de drenagem urbana passou, ao longo dos últimos 5 séculos, por diversas evoluções (CHRISTOFIDIS; ASSUMPÇÃO; KLIGERMAN, 2019) que podem ser divididas em três fases: drenagem sanitário-higienista ou drenagem urbana tradicional, drenagem urbana sustentável e, por fim, drenagem utilizando Soluções baseadas na Natureza (SbN).

No Brasil, o conceito de sistema de drenagem urbana, disposto na maioria dos manuais, é “[...] conjunto de elementos destinados a recolher as águas pluviais precipitadas sobre uma

determinada região e que escorrem sobre sua superfície, conduzindo-as a um destino final” (LORDELO, 2019, p.25).

A Lei Federal Nº. 11445/07, no seu Art. 3º, considera drenagem e manejo das águas pluviais urbanas como sendo um

conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas (BRASIL, 2007).

A primeira fase do sistema de drenagem urbana ocorreu no Brasil entre 1850 até 1970, quando houve a predominância da implantação de sistema de drenagem urbana baseado nos conceitos de drenagem tradicional (CHRISTOFIDIS et al., 2019). Naquela época, os cursos d’água foram transformados em canais de concreto e/ou galerias e cederam espaços para a implantação das vias de tráfego ou avenidas sanitárias. Como resultado dessas transformações, as avenidas sanitárias passaram a se tornar rios durante a ocorrência dos eventos extremos de precipitação (FÁTIMA, 2013).

Além disso, a canalização e a retificação dos cursos d’água possibilitaram que a população pudesse ocupar áreas antes ocupadas pelas planícies de inundação dos rios. Isso fez, pois, com que as áreas urbanas crescessem muito, reduzindo assim as áreas permeáveis, o que só agravou os problemas de inundação nas cidades devido a incapacidade de escoamento do sistema de drenagem (SILVA, 2010).

A segunda fase iniciou-se a partir de 1970 com as primeiras implementações dos sistemas de drenagem urbana sustentável. Este conceito apresentava o controle das águas das chuvas na fonte por meio da contenção das águas por infiltração, como uma maneira de recompor as condições naturais do ciclo hídrico, reduzindo assim os picos de vazão (CHRISTOFIDIS et al., 2019).

Um sistema de drenagem urbana sustentável deve, segundo Parkinson et al. (2003), citado por Lordelo (2019, p.24):

[...] envolver tanto as medidas estruturais, que se constituem de elementos físicos (obras) integrantes da infraestrutura, quanto as ações não estruturais, que incluem as práticas de gerenciamento, educação ambiental e mudanças de comportamento da sociedade. Este novo paradigma introduz técnicas inovadoras da engenharia como a construção de estacionamentos permeáveis e de canais abertos com vegetação a fim de minimizar a velocidade de fluxo, vazões de pico e volumes do escoamento superficial direto. Obras de retenção e amortecimento de escoamentos, como pavimentos permeáveis, superfícies e valas de infiltração, reservatórios e lagos de detenção e a preservação dos arroios naturais passaram a fazer parte do vocabulário da drenagem urbana moderna.

Por fim, a terceira fase iniciou-se a partir de 2018, quando a sociedade passou a se conscientizar sobre o conhecer e o cuidar das águas. Esta fase também é conhecida como “renaturalização”, ou seja, voltar o ambiente ao seu estado natural (CHRISTOFIDIS et al. (2019).

Apesar de todo este avanço nos modelos de projeção dos sistemas de drenagem pluvial, os sistemas de drenagem brasileiros ainda são dimensionados com base no conceito sanitário-higienista. Isto, porque ele se baseia apenas em calcular a máxima vazão que será drenada por meio dos condutos e galerias (TUCCI, 2003). Em suma, os sistemas de micro e macrodrenagem são dimensionados para conduzir a água da chuva para fora da cidade, sendo este dimensionamento desenvolvido a partir das séries históricas de precipitação observadas na região de sua implantação (RADESCA, 2018).

O escoamento superficial das águas de chuva sempre ocorrerá independentemente da existência de um sistema de drenagem dimensionado corretamente ou não, porém, o grau de capacidade de escoamento deste é que determinará se os impactos para a população serão positivos ou negativos (RAMOS et al., 1999)

Nas cidades brasileiras, a infraestrutura pública, em relação aos sistemas de drenagem urbana, é caracterizada, na maioria das vezes, como ineficiente, o que faz com que a vulnerabilidade da população dos grandes centros urbanos aumente devido à ocorrência mais frequente de grandes volumes de precipitação no contexto das mudanças climáticas (BRANDÃO et al., 2016).

Claramente é possível constatar que mesmo que o sistema de drenagem seja dimensionado corretamente, este não é capaz de absorver os efeitos de um evento extremo de precipitação, mas, se tais efeitos são dimensionados empregando técnicas adequadas de engenharia (tempo de retorno das chuvas maiores, tempo de concentração da bacia, emprego de medidas não estruturais, entre outras), os impactos desses eventos seriam de menores proporções.

4.2.2 Características de um sistema de drenagem

O sistema de drenagem urbana pode ser dividido em duas categorias distintas, os sistemas de microdrenagem e macrodrenagem (FÁTIMA, 2013). A microdrenagem refere-se às ações tomadas em escala local, enquanto que a macrodrenagem é referente às ações em escala no âmbito da bacia hidrográfica (TUCCI, 2003).

Os sistemas de microdrenagem são estruturas de captação e canalização das águas pluviais provenientes das vias públicas, construções, lotes, praças; estes são constituídos por guias, sarjetas, meio-fio, bocas de lobo, galerias de águas pluviais, entre outros (RADESCA, 2018). A função desses sistemas é coletar e conduzir as águas pluviais até o sistema de macrodrenagem, evitando alagamentos das vias públicas, de modo a proporcionar segurança aos pedestres e motoristas (RAMOS et al., 1999).

Segundo disposto no manual de drenagem de rodovias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (DNIT, 2006), os principais componentes de um sistema de microdrenagem são:

- Sarjetas ou valas: Dispositivos de concreto localizados paralelamente aos meios-fios que têm função de receber e conduzir as águas pluviais coletadas pelas vias públicas;
- Sarjetão: estruturas de concreto de seção retangular ou triangular empregadas no desvio das águas pluviais de um lado para o outro das vias públicas;
- Bocas de lobo: estruturas de concreto que recebem os escoamentos das águas pluviais coletadas pelas sarjetas e as conduzem para as galerias;
- Grelhas: estruturas, geralmente construídas em aço, que são capazes de conter os resíduos sólidos arrastados pelas águas pluviais, até atingir a máxima capacidade de retenção, sem impedir a passagem do fluxo.
- Poço de Visita: dispositivos normalmente urbanos posicionados nos pontos onde ocorre desvio no sentido do fluxo, variação de declividade e da seção das galerias, e/ou junção de mais de uma galeria. Estas estruturas são projetadas com a finalidade de possibilitar o acesso às redes subterrâneas para a realização de inspeção e limpeza das canalizações.

Os sistemas de macrodrenagem, por sua vez, são estruturas constituídas de uma rede de canais naturais ou artificiais construídos para conduzir as águas pluviais coletadas pelos sistemas de microdrenagem para fora da bacia hidrográfica (FURTADO, 2018). De acordo com o manual de drenagem urbana da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná, os principais componentes de um sistema de macrodrenagem são (SUDERHSA, 2017):

- Canais naturais ou artificiais: são cursos d'água responsáveis por conduzir as águas pluviais e subterrâneas produzidas na bacia hidrográfica;

- Bacias de contenção: estruturas dimensionadas para realizar o armazenamento temporário das águas pluviais durante e após a ocorrência das chuvas.
- Reservatórios de retenção: estruturas que possuem um nível de água constante, onde as águas pluviais podem ser armazenadas acima de um nível normal de armazenamento.
- Galerias: dispositivos confeccionados em concreto empregados para direcionar a água pluvial coletada pelas bocas de lobo das vias públicas para locais de descarga mais favoráveis.

Apesar de todo o avanço alcançado no dimensionamento dos dispositivos de drenagem urbana, ainda não existe uma regulamentação por meio das normas da ABNT que estabeleça critérios mínimos para a confecção e dimensionamento dos sistemas de drenagem (RADESCA, 2018). Desse modo, alguns órgãos públicos (municipais, estaduais e federais) optam por confeccionar suas próprias normas de dimensionamento em forma de manuais de drenagem.

Logo, é possível constatar que ambientes, em uma mesma localidade geográfica, podem apresentar sistemas de drenagens distintos, devido a concepções diferentes. Além disso, a falta de padronização deste sistema faz com que medidas de melhorias e correções de suas falhas sejam de difícil execução.

4.2.3 Série histórica pluviométrica

Uma série histórica de precipitação é uma coleção de dados coletados e registrados de modo sequencial ao longo de sua ocorrência e/ou tempo, podendo estas serem compostas por registros horários ou diários de precipitação (SILVA, 2014). Além disso, as séries históricas devem ser representativas e homogêneas. Uma série histórica de precipitação é considerada como representativa quando os dados existentes possibilitam calcular corretamente a probabilidade de ocorrência de determinados eventos. Por outro lado, as séries homogêneas ocorrem quando as alterações na bacia hidrográfica não produziram mudanças significativas no comportamento desta (TUCCI, 2017).

As séries históricas pluviométricas podem ser classificadas em séries anuais, parciais ou totais. As séries parciais são aquelas sobre as quais o estudo pretende avaliar apenas valores superiores a um limite, ou seja, todos os valores superiores ao pré-estabelecido; isso independe da ocorrência de mais de um valor dentro do mesmo ano de observação (CARLA et al., 2018; PINHEIRO; GRACIANO, SEVERO, 2013). Assim, se é tomado como base um valor de

precipitação intensa, logo, todos os valores superiores a este são ordenados em uma série denominada parcial (LOPES, 2017).

As séries anuais de precipitação utilizam as alturas pluviométricas máximas observadas em cada ano (MOREIRA, 2014), sendo, desse modo, ignorados os demais valores obtidos dentro de cada ano, mesmo sabendo que, em muitos dos casos, estes valores podem ser superiores aos máximos de outros anos da série. Por fim, nas séries totais é empregado todo o universo amostral de alturas pluviométricas disponível na série histórica (SILVA, 2009).

As séries parciais produzem resultados mais precisos que as séries anuais em estudos com tempo de retorno menores do que 10 anos, visto que ambas as séries contemplam praticamente os mesmos valores para períodos de retorno iguais ou superiores a 10 anos (TUCCI, 2004).

Assim, a aplicação de séries hidrológicas longas em modelos probabilísticos resultam em menores incertezas nos resultados, pois representaram melhor os fenômenos de precipitação ao longo do tempo; além disso, é possível que elas contemplem a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, uma vez que estes estão diretamente relacionados a longos períodos de retorno (CETESB, 2012; SANTOS, 2010). Logo a escolha do tipo de série a ser empregada pode variar de acordo com o tamanho da série disponível e o objetivo do estudo (TUCCI, 2012).

O tamanho adequado de uma série histórica para qualquer simulação ou método utilizado deve ser, no mínimo, de 25 anos de registros de dados (WARD; BUTLER; MEMON, 2010). Por outro lado, a Organização Mundial Meteorológica (OMM) e o INMET recomendam o emprego de, no mínimo, 30 anos de dados de observações para compor uma série histórica de dados com informações climáticas de forma representativa para uma determinada região. Assim, um banco de dados com, no mínimo, 30 anos de registros de eventos de precipitação é denominado série histórica de precipitação (INMET, 2014; OMM, 1989).

Porém, muitas cidades brasileiras não possuem um acervo de dados climáticos com esta escala temporal. Segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no Brasil, existem cerca de 19.870 estações pluviométricas distribuídas em todo o território nacional. Deste total, apenas 6.527 estações apresentam séries de registros de precipitação com mais de 30 anos de dados (ANA, 2020).

4.2.4 Desagregação de chuva

Para o dimensionamento de projetos de drenagem urbana, geralmente, são empregadas algumas ferramentas hidrológicas (equações, *software* de manipulação, índices, tabelas, equações intensidade-duração-frequência – IDF, entre outras, por exemplo) para a produção do hietograma. Porém, para que isso ocorra, é necessário realizar a desagregação e/ou transformação das chuvas de projeto que, geralmente são diárias, em horárias, ou seja, com durações menores (ABREU et al., 2017).

Alguns dos métodos empregados para a estimativa do hietograma de projeto são baseados nas relações IDF. Entre os mais aplicados estão os métodos de Chicago, Hietograma Triangular, Blocos Alternados e *Pilgrim & Cordery* (SILVEIRA et al., 2000). No entanto, esta pesquisa empregou apenas o método dos Blocos Alternados.

O método de Blocos Alternados é um procedimento matemático de desagregação de chuvas, empregado para desenvolver hietogramas sintéticos de projeto a partir de uma curva IDF (BACK et al., 2012). A desagregação da chuva para a produção do hietograma de um projeto é uma das partes cruciais no dimensionamento hidrológico, visto que cada arranjo na distribuição temporal das chuvas resultará em um hietograma diferente. Logo, esta etapa consiste em um dos grandes gargalos ainda enfrentados durante um dimensionamento hidrológico (CHIMENE, 2019).

De acordo com a metodologia descrita por Chow, Maidment e Mays (1988), citada por Girnus (2016), o método dos Blocos Alternados é descrito como sendo o mais simples e que apresenta uma condição crítica do escoamento superficial das águas da chuva. Isto ocorre, porque este método preconiza a desagregação total da chuva obtida a partir da IDF em intervalos de tempo discretizados por sua duração total.

Logo, por meio dos incrementos totais acumulados de precipitação, convertidos em coluna e/ou altura de chuva, os blocos obtidos são reordenados de modo que, no centro da duração da chuva, situe-se o bloco de máxima intensidade e, em seguida, os demais blocos são dispostos, em ordem decrescente, um, à esquerda e o outro, à direita do bloco central, de maneira alternada (DAMÉ et al., 2010; FERREIRA, 2015).

A disposição dos blocos no hietograma é arbitrária, logo, a desagregação da chuva pode resultar em diversas combinações. Entretanto, existem algumas convenções que podem direcionar para a produção de picos de vazão mais elevados. Entre estas condições, encontram-se a introdução da maior parcela da precipitação entre o primeiro terço e metade da duração total da chuva. Desse modo, quanto menor o intervalo de tempo adotado na desagregação da chuva, maior será a intensidade do pico de vazão (BEMFICA, 1999).

O método dos blocos não objetiva representar os fenômenos naturais físicos da chuva, mas apenas indica a distribuição total dos volumes precipitados em intervalos de tempo cobertos pela duração total da precipitação; desse modo, o método estima uma condição crítica ao qual o projeto se encontra submetido; logo este método pode ser aplicado a qualquer localidade do país (FONTOURA, 2019).

Como este método não representa o comportamento real da precipitação local, ele pode resultar em projetos superdimensionados, provocando custos elevados para sua implementação. Vale ressaltar, porém, que o método se caracteriza por apresentar a condição mais crítica a que o projeto será submetido, possibilitando que ele seja capaz de suportar grandes precipitações durante um período maior de tempo.

4.2.5 Modelos hidrológicos

Um modelo hidrológico é um *software* de simulação da realidade, dos processos e dos eventos hidrológicos que ocorrem em um sistema real. Estes possuem, como dados de entrada e saída, variáveis hidrológicas que podem ser quantificadas. Seu processamento ocorre por meio da resolução de um conjunto de equações que realiza a combinação destas variáveis (SAAVEDRA, 2018; SOUZA et al., 2012).

No sítio eletrônico da *Hydrologic Engineering Center* (HEC), desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*), estão disponíveis diversos modelos hidráulicos e hidrológicos para simulação de acesso livre (USACEUS, 2020). Dentre os diversos modelos disponíveis, vale destacar o modelo *Hydrologic Modeling System* (HMS) que simula os diversos processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas urbanas e rurais (DECINA, 2012).

Os modelos hidrológicos foram desenvolvidos com o objetivo de simular os complexos processos hidrológicos ocorridos em uma bacia hidrográfica. Além disso, eles podem ser empregados na resolução de diversos problemas, como análise da disponibilidade hídrica de um manancial, drenagem urbana, previsão de deflúvio, impactos da urbanização, projetos de estações de tratamento de água, vertedores de reservatórios e barragens, previsão do alerta de riscos de enchentes e inundações, mitigação de danos causados pelas inundações, regulação de vazão, estudos de impacto das mudanças climáticas, entre outros (MACEDO, 2010; SOUZA, 2017).

Porém, tais modelos matemáticos apresentam algumas limitações para introduzir, em suas equações, informações referentes a uma realidade, visto que esta é composta por diversos fatores que podem influenciar os processos hidrológicos como o relevo, classe de solo, uso e ocupação do solo, entre outros (SOUZA; DAL FARRA, 2017).

Geralmente, a representação destas variáveis é realizada por meio de seus valores médios, resultando, assim, em maior complexidade para calibrar estes modelos, bem como maior dificuldade na análise dos resultados produzidos pelas simulações, além de algumas incertezas nos valores, demandando-se, assim, cautela e uma análise mais aprofundada dos resultados para o seu emprego.

4.2.5.1 Software HEC-HMS

O modelo HEC-HMS é um *software* de conversão de precipitação-vazão discreto, concentrado, empírico/conceitual e determinístico. Ele pressupõe que uma bacia hidrográfica pode ser representada por um grupo interligado de áreas, e que os processos hidrológicos ocorridos nela podem ser representados pelas variáveis hidrológicas que refletem as condições médias desta área. Desse modo, quando esta média não é adequada para representar corretamente a bacia, é sugerida a subdivisão da bacia em sub-bacias menores, de modo que os dados médios possam ser representativos delas e sejam aplicáveis (LEITE, 2015; MACEDO, 2010).

O HEC-HMS apresenta uma estrutura formada por três componentes principais, o modelo de bacia, o modelo meteorológico e as especificações de controle. Esta composição é realizada de maneira modular, porém, estes conjuntos de dados podem ser simulados independentemente, seguindo uma sequência lógica de atuação para a realização das simulações (CRUZ, 2019).

No modelo de bacia, são introduzidos e manipulados os dados referentes à geometria da bacia, bem como, são realizadas a representação esquemática dos componentes hidrológicos da área de estudo como sub-bacias, cursos d'água, reservatórios, junções e divisões dos canais, por exemplo; além disso, neste modelo, é realizada a definição dos métodos e parâmetros relativos às perdas ocorridas pelos processos de infiltração, evaporação e interceptação; também são realizados a transformação da precipitação em vazão (método chuva-vazão), o cálculo do escoamento de base e a propagação de ondas de cheias nos cursos d'água (CRUZ, 2019; LEITE, 2015; MACEDO, 2010).

O modelo meteorológico é utilizado para introduzir os dados de precipitação no *software* e selecionar o método de distribuição temporal destes. As simulações, realizadas neste modelo, permitem calcular a resposta do tipo chuva-vazão (MOREIRA, 2013; SOUZA, 2017). E, por fim, as especificações de controle servem para definir o período e o intervalo de tempo das simulações, ou seja, o tempo para os quais serão realizados os cálculos, introduzindo-se data e horário de início e fim das simulações (ABATTI et al.,2017).

As simulações desenvolvidas com o HEC-HMS são realizadas com base na representação gráfica de uma bacia hidrográfica, isso ocorre por meio do emprego dos elementos hidrológicos presentes em uma bacia como: sub-bacias, junções, reservatórios, fontes e sumidouros (SOUZA et al., 2012).

Os hietogramas e as informações referentes ao volume de deflúvio, vazão de pico e tempo de escoamentos produzidos por estas simulações podem ser empregados diretamente ou indiretamente em outros programas para diversos estudos, permitindo assim uma rápida visualização dos efeitos das variações dos parâmetros empregados sobre as respostas de saída do programa (PADILHA et al.,2017).

Logo, o HEC-HMS apresenta-se como um modelo de simulação muito eficiente e de simples manipulação e processamento de cálculos hidrológicos, porém, ele exige do profissional operador um prévio conhecimento dos processos hidrológicos que governam o ciclo da água, bem como experiência e sensibilidade quanto aos métodos a serem empregados.

5. DADOS E METODOLOGIA

Esta pesquisa se caracteriza, quanto a seus objetivos, como uma pesquisa exploratória, pois tem como busca proporcionar maior familiaridade com a situação-problema (GIL, 2008). O método de estudo de caso é empregado na cidade de João Monlevade, escolhida por estar localizada no Estado de Minas Gerais, região onde as previsões climáticas apontam para um aumento na ocorrência de eventos hidrológicos extremos de precipitação (REIS et al., 2016).

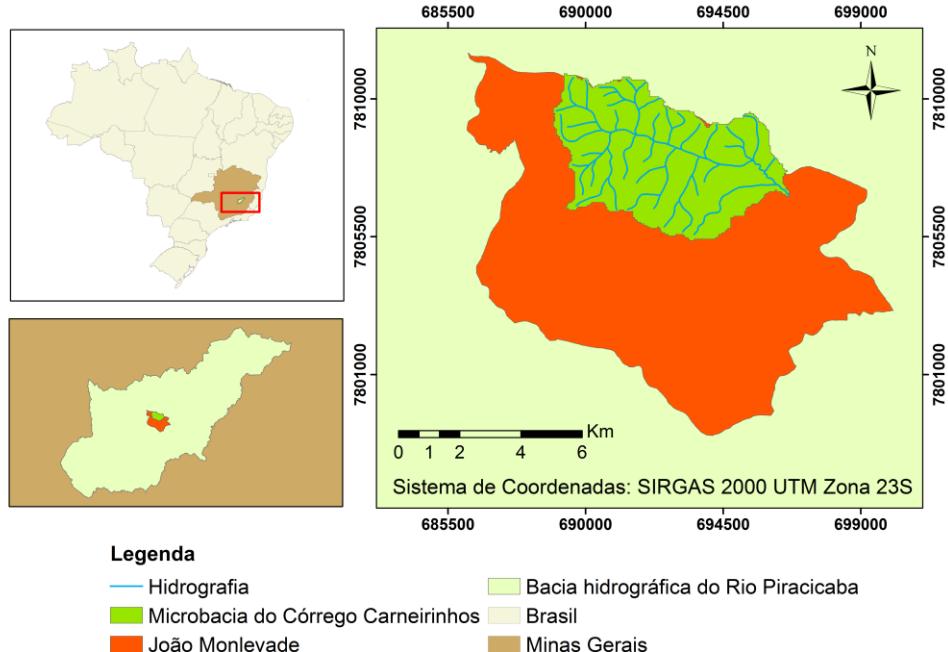
Esta seção apresenta, primeiramente, uma descrição das características da área de estudo, o procedimento para a obtenção dos dados relacionados à série histórica dos eventos extremos de inundações ocorridos na bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos, durante o período de 1969 a 2020, bem como a caracterização dos sistemas meteorológicos atuantes na região no período destes eventos históricos de inundaçāo. Posteriormente, apresentam-se as metodologias referentes à caracterização morfométrica da bacia e a delimitação das sub-bacias; as simulações hidrológicas para os cenários denominados clima do presente e do futuro e as análises estatísticas para o tratamento dos dados. Finalmente, apresenta-se um resumo das principais etapas metodológicas consideradas nas simulações hidrológicas realizadas nesta pesquisa.

5.1 Área de estudo

O município de João Monlevade localiza-se no Centro Leste de Minas Gerais, sob as coordenadas geográficas $19^{\circ} 50' 10''$ S de latitude e $43^{\circ} 07' 39''$ W de longitude, distante cerca de 110 km da capital Belo Horizonte (Figura 1). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (2019), seu território é de $99,16 \text{ km}^2$ e sua população estimada é de 79.910 habitantes, sendo 99% considerada urbana.

A Figura 1 apresenta a localização da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos, em João Monlevade. O município encontra-se totalmente inserido na bacia hidrográfica do rio Piracicaba, afluente da bacia hidrográfica do rio Doce (FRANCO et al., 2016).

Figura 1: Localização da bacia do córrego Carneirinhos no município de João Monlevade



Fonte: Silva et al (2020a).

Segundo o sistema de classificação de Köppen-Geiger, o clima predominante na região é subtropical úmido (Cwa), apresentando duas estações bem definidas, com verões quentes e invernos secos, classificado como tropical de altitude, devido a sua altitude média acima de 900m (SILVA et al., 2020). A temperatura média do município varia entre 15,9°C e 29°C e a média anual de precipitação é de aproximadamente 1.442,80 mm, distribuída entre os meses mais chuvosos que vão de outubro a março, conforme apresenta a Tabela 1, Departamento de Água e Esgoto João Monlevade (2019).

Tabela 1: Dados climatológicos de João Monlevade no período de 1961 a 1990

Parâmetros	Médias climatológicas entre os anos de 1961 a 1990												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima (°C)	34,8	36	33,6	33	32,6	31,7	31,5	34,6	35,8	37	35,5	34,8	37
Temperatura mínima (°C)	14,8	12	11,7	7,8	8	6,9	6	6,4	9	9,6	10	11,4	6
Precipitação (mm)	245,2	191	163	81,4	26,7	13,2	8,1	10,9	46,7	115,6	212,7	328,3	1442,8

Fonte: Adaptado de Departamento Municipal de Água e Esgotos [DAE] (2019)

Pode-se notar, por meio da Tabela 1, que João Monlevade é caracterizada por verão chuvoso e inverno seco, de acordo com o período-base de 1961 a 1990. O mês de fevereiro concentra a maior temperatura média máxima (36°C) e o mês de julho a menor temperatura média mínima (6°C), sendo dezembro o mês com a maior média de precipitação (328,3 mm).

O município de João Monlevade possui 64 bairros que estão distribuídos nas bacias dos córregos Carneirinhos, Jacuí e Santa Bárbara. A área objeto desta pesquisa é a bacia do córrego Carneirinhos, onde está localizado o centro comercial de João Monlevade.

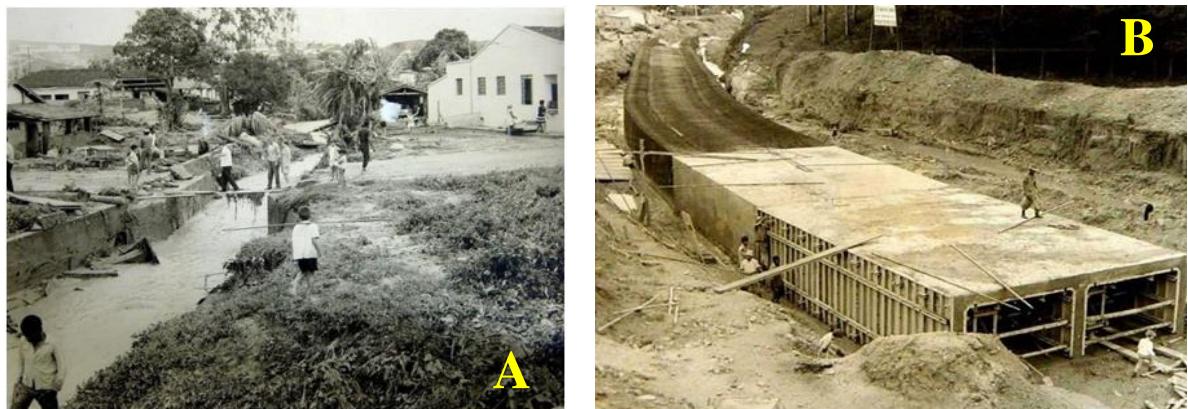
5.2 Sistema de drenagem de João Monlevade

O córrego Carneirinhos possui aproximadamente 8,95 km de extensão, sendo cerca de 4 km canalizados por duas galerias de concreto, conforme apresentado na Figura 2. Sua nascente situa-se no bairro Encosta das Vertentes e deságua no rio Piracicaba no bairro Capela Branca.

A obra de canalização do córrego Carneirinhos foi executada por meio de uma galeria bicelular confeccionada em concreto armado, com dimensões de 230 cm de largura por 205 cm de altura. A estrutura recebe a contribuição do sistema de microdrenagem de vários bairros do município¹.

¹ Comunicação pessoal – Secretaria de Obras do Município, 2019.

Figura 2: A - Córrego Carneirinhos antes de ser canalizado. B – Obras de canalização do córrego Carneirinhos no início dos anos 1970.



Fonte: DAE (2019)

A Figura 2A apresenta um trecho do córrego Carneirinhos antes de sua canalização, onde é possível visualizar a proximidade das residências do curso d’água. A Figura 2B, ilustra o processo de canalização do mesmo córrego, após as tempestades ocorridas no final de 1969 e início de 1970.

O sistema de drenagem de João Monlevade caracteriza-se como o modelo de drenagem sanitário-higienista ou drenagem tradicional, fato este que pode ser comprovado pelo período de sua implantação, pois os sistemas de drenagem, naquele período, tinham como princípio a transformação dos cursos d’água naturais em avenida sanitária (SILVA, 2010). Além disso, os dispositivos empregados neste sistema, como galerias, condutos, bocas-de-lobo, sarjetas, cursos d’água retificados, por exemplo, caracterizam-no como sendo um modelo de drenagem tradicional.

O sistema de macrodrenagem do córrego Carneirinhos é composto por bocas de lobo, canais naturais e artificiais e galerias de concreto armado. No caso específico do córrego Carneirinhos, foram implantadas duas galerias retangulares de concreto armado para a sua canalização.

O sistema de drenagem do município é definido como sendo um sistema misto, isto porque os esgotos domésticos, coletados nas residências, são drenados com as águas pluviais (FRANCO et al., 2016).

5.3 Dados dos eventos de inundação na bacia do córrego Carneirinhos

Na falta de dados históricos de inundações, Bayliss e Reed (2001) recomendaram o uso de periódicos, jornais, crônicas, relatórios de especialistas, bancos de dados do governo, fotos, rede mundial de computadores e outras fontes diversas como base de informações para um melhor entendimento sobre o problema.

Desse modo, com o intuito de conhecer o histórico de eventos extremos de inundação na bacia do córrego Carneirinhos, realizou-se um levantamento do número de eventos de inundação registrados em João Monlevade e suas datas de ocorrência. Foram consultados os profissionais e documentos da Secretaria de Obras, Defesa Civil e Departamento Municipal de Água e Esgotos [DAE].

Além disso, realizaram-se pesquisas junto ao Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres [S2iD] Brasil (2020), em que foram obtidos dados econômicos referentes às perdas de cada evento extremo, registrado no sistema pelo município, além do número de pessoas atingidas.

No portal do S2iD inseriu-se o período de 01/01/1930 a 26/03/2020 e selecionaram-se apenas os eventos ocorridos dentro da área da bacia do córrego Carneirinhos. Por fim, foram consultados *sites* de notícias a fim de averiguar as reportagens relacionadas aos eventos de inundação no local.

5.4 Dados pluviométricos e sistemas meteorológicos atuantes em João Monlevade

Obtiveram-se os dados de precipitação da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos, para o período de 1989 a 2018, junto aos registros da estação pluviométrica Centro Industrial, número 31362070A, de João Monlevade-MG, por meio do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Agruparam-se os dados coletados em anos hidrológicos avaliando a consistência destes a partir do somatório dos volumes de chuva precipitados anualmente e da comparação desses valores obtidos com a média anual de precipitação no município (1.442,80 mm/ano). Avaliou-se também a representatividade dos dados segundo o número de anos hidrológicos observados. Após esta avaliação, obtiveram-se os valores máximos de precipitação para cada um dos 28 anos hidrológicos considerados.

Além disso, realizou-se um levantamento dos sistemas meteorológicos atuantes nas datas dos eventos extremos selecionados, com base nos boletins Climanálise e Infoclima do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais (INPE) e no Boletim Agroclimatológico do INMET, que são os órgãos de referência na divulgação dessas informações.

5.5 Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos

A caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos foi realizada a partir do levantamento e/ou cálculo das variáveis: área e perímetro da bacia, amplitude altimétrica, comprimento do canal principal, hierarquia dos canais, número total de cursos d’água na bacia, comprimento vetorial do canal principal, densidade de drenagem, índice de sinuosidade, índice de circularidade, relação do relevo, fator de forma, coeficiente de compacidade, declividade da bacia. Assim, executou-se a análise morfométrica a partir das características geométricas, de relevo e da rede de drenagem (SANTOS et al., 2012).

A seguir são descritos o procedimento para a obtenção de cada uma das variáveis citadas anteriormente.

5.5.1 Área e perímetro

A área (A) pode ser compreendida como uma unidade que quantifica uma superfície e é uma das variáveis mais importantes nos estudos morfométricos, pois o tamanho da área é diretamente proporcional ao volume de água produzido por uma bacia, ou seja, quanto maior a área da bacia, maior será o volume de água produzido por ela. Além disso, é uma variável muito importante para a obtenção dos índices que medem o grau de vulnerabilidade às inundações na bacia. Geralmente esta variável é expressa por quilômetros quadrados (km^2).

O perímetro (P) é uma unidade linear que representa o comprimento de uma linha de contorno de uma superfície plana. No caso dos estudos morfométricos, ele representa o comprimento ao longo do divisor de água de uma bacia. Sua unidade é expressa em quilômetros (km) (SANTOS; CARVALHO; ANTONELI, 2016).

5.5.2 Amplitude altimétrica

A amplitude altimétrica (H_m) é a variação entre a cota de maior altitude (H_{max}) e a menor cota altimétrica da bacia (H_{min}), ou seja, a foz e/ou exutório. Este parâmetro representa o desnível médio da bacia e tem relação direta com a velocidade de escoamento da água na bacia e com a taxa de infiltração da chuva no solo, sua unidade de medida é expressa em metros (m), conforme a Equação 1 a seguir (FINKLER, 2019):

$$H_m = H_{max} - H_{min} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

H_m : amplitude altimétrica (m)

H_{max} : Altitude máxima (m)

H_{min} : Altitude mínima (m)

5.5.3 Comprimento do canal principal

O comprimento do canal principal (L_c) corresponde a distância entre a nascente do curso d'água principal até sua foz. Quanto maior o comprimento do curso d'água principal, maior será o tempo em que a água demora para sair da bacia. Sua unidade de medida é expressa em quilômetros (km) e/ou em metros (m) (BRUBACHER, OLIVIERA e GUASSELLI, 2011).

5.5.4 Hierarquia dos canais

De acordo com o sistema proposto por Horton-Strahler (1964), são considerados cursos d'água de 1^a ordem aqueles que não possuem nenhum tributário. Quando ocorre a confluência de dois cursos d'água de 1^a ordem é formado um curso d'água de 2^a ordem. Por outro lado, os cursos d'água de 3^a ordem originam-se a partir da confluência de dois cursos d'água de 2^a ordem. Assim, ao receber contribuições da mesma ordem que a sua, a confluência dos dois cursos d'água sobe uma ordem; no entanto, quando recebe a contribuição de ordens inferiores, a sua ordem não se altera (TRAJANO et al., 2012).

5.5.5 Número total de cursos d'água na bacia

Este parâmetro corresponde à quantidade total de cursos d'água existente em uma bacia hidrográfica (FRANCO, 2016).

5.5.6 Comprimento vetorial do canal principal

O comprimento vetorial do canal principal (Dv) refere-se ao comprimento em linha reta entre dois pontos extremos da bacia, geralmente entre a nascente e o exutório do curso d'água principal, e representa o comprimento real que o rio teria caso não houvesse desvios ao longo de sua trajetória até sua foz (FRANCO, 2016).

5.5.7 Densidade de drenagem

A densidade de drenagem é a relação entre o somatório dos comprimentos dos cursos d'água dividido pela área da bacia hidrográfica, sendo expresso em km/km². Quanto maior a densidade de drenagem (Dd) de uma bacia, menor é o tempo para que a água alcance o curso d'água, como consequência, tem-se uma ampliação dos efeitos de enchentes em áreas a jusante da bacia. Bacias com substratos rochosos muito permeáveis apresentam menor capacidade de formação de canais e apresenta uma reduzida densidade de drenagem (BRUBACHER; OLIVEIRA; GUASSELLI, 2011). A densidade de drenagem é dada pela Equação 2:

$$Dd = \frac{L}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Dd: densidade de drenagem (km/km²);

L: comprimento total dos rios ou canais (km);

A: Área da bacia (km²)

Há uma classificação, a partir de faixas de densidade de drenagem, apresentada por Ferreira et al. (2010), conforme disposto no Quadro 1, que facilita a interpretação dos resultados.

Quadro 1: Classificação dos resultados de densidade de drenagem

Dd	Interpretação
$Dd < 0,5 \text{ km/km}^2$	Bacias com drenagem pobre
$0,5 \leq Dd < 1,5 \text{ km/km}^2$	Bacias com drenagem regular
$1,5 \leq Dd < 2,5 \text{ km/km}^2$	Bacias com drenagem boa
$2,5 \leq Dd < 3,5 \text{ km/km}^2$	Bacias com drenagem muito boa
$Dd \geq 3,5 \text{ km/km}^2$	Bacias excepcionalmente bem drenadas

Fonte: Ferreira et al. (2010)

5.5.8 Índice de sinuosidade

O Índice de Sinuosidade (Is) representa a relação entre o comprimento do curso d'água principal e seu o comprimento vetorial (distância linear da nascente até a foz). Bacias hidrográficas, com altos índices de sinuosidade, apresentam baixas velocidades de escoamento das águas, e, consequentemente, menor propensão a sofrer inundações, pois retêm a água por maior tempo dentro da bacia, evitando o acúmulo à sua jusante (SANTOS; CARVALHO; ANTONELI, 2016).

O Índice de Sinuosidade é dado pela Equação 3:

$$Is = \frac{L}{Dv} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Is: Índice de sinuosidade (adimensional);

L: comprimento do canal principal (km);

Dv: comprimento vetorial do canal principal (km).

5.5.9 Índice de circularidade

O Índice de circularidade (Ic) é um índice que associa a área da bacia com a área de um círculo de perímetro idêntico ao da área da bacia hidrográfica (SANTOS et al., 2012). Este índice pode variar entre 0 e 1, sendo que valores próximos de 1 indicam que a bacia apresenta

forma semelhante a um círculo, tornando-se assim mais suscetível a ocorrência de inundações, devido à maior retenção de água na bacia em razão do seu formato circular. Valores inferiores a 0,51 correspondem a bacias de forma alongada, ou seja, menos suscetíveis a inundações devido ao favorecimento do escoamento das águas (CARDOSO et al., 2006; FERREIRA et al., 2010). Este índice é adimensional obtido conforme a Equação 4:

$$Ic = \frac{12,57 \times A}{p^2} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

Ic: Índice de Circularidade (adimensional);

P: Perímetro (km);

A: Área da bacia (km²).

5.5.10 Relação do relevo

A relação do relevo (Rr) é um índice que foi proposto por Schumm em 1956 e relaciona a amplitude altimétrica da bacia com o comprimento do curso d'água principal. Quando o valor de Rr é elevado, significa que há grande desnível entre a cabeceira e o exutório e, como consequência, a declividade média da bacia será elevada, propiciando um ambiente favorável à ocorrência de inundações à jusante (SANTOS et al., 2012). Este índice é obtido por meio da Equação 5:

$$Rr = \frac{Hm}{L} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

Rr: é a relação de relevo (m/km);

Hm: é a amplitude altimétrica da bacia (m);

L: é o comprimento do canal principal da bacia (km).

O Quadro 2 apresenta valores de referência para a interpretação dos resultados da relação de relevo, de acordo com Rossi e Pfeifer (1999).

Quadro 2: Classificação dos resultados da relação de relevo

Rr	Classificação
Rr < 10 m/km	Baixos
11 ≤ Rr < 30 m/km	Intermediários
31 ≤ Rr	Altos

Fonte: Rossi e Pfeifer (1999)

5.5.11 Fator de forma

O fator de forma (K_f) é um índice que relaciona a largura média da bacia com o comprimento do ponto mais distante do exutório da bacia (SANTOS et al., 2012). Quanto mais próximos seus valores estiverem de 1, maior suscetibilidade a bacia possui de sofrer inundações, conforme pode-se notar por meio do Quadro 3.

Quadro 3: Interpretação dos resultados para o fator de forma

K_f	Interpretação
1,00 – 0,75	Bacia com tendência a grandes inundações
0,75 – 0,50	Bacia com tendência mediana a inundações
<0,50	Bacia com tendência a conservação, não sujeita a grandes inundações

Fonte: Palaretti (2019)

Uma bacia com um fator de forma pequeno indica que ela possui uma baixa propensão a sofrer inundações. Bacias de mesma área podem apresentar fatores de forma diferentes, e consequentemente, respostas diferentes às inundações. O fator de forma é calculado conforme a Equação 6:

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

K_f : é o fator de forma (adimensional);

A: área da bacia.

L: é o comprimento da bacia (m);

5.5.12 O coeficiente de compacidade

O coeficiente de compacidade (K_c) é um parâmetro obtido por meio da razão entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de área igual ao da bacia. A área da bacia não possui uma influência direta sobre esse parâmetro, porém, a sua geometria pode determinar diferentes valores para este coeficiente. Desse modo, resultados próximos de 1 referem-se à bacia com formas circulares e com maior propensão a enchentes. No entanto, valores superiores a 1 apontam formas irregulares da bacia (ex.: alongada) e menor suscetibilidade a sofrer inundações, conforme apresentado no Quadro 4 (PALARETTI, 2019).

Quadro 4: Interpretação dos resultados para o coeficiente de compacidade

K_c	Interpretação
1,00 – 1,25	Bacia com alta propensão a grandes inundações
1,25 – 1,50	Bacia com tendência mediana a grandes inundações
>1,50	Bacia com tendência a conservação, não sujeita a inundações

Fonte: Palaretti (2019)

Bacias que apresentam geometria de um círculo exibem uma convergência do escoamento superficial ao mesmo tempo para um pequeno trecho do rio principal, contribuindo assim para a produção de grandes vazões nestes cursos d’água (FRAGA et al., 2014).

Desta forma, o coeficiente de compacidade foi calculado utilizando-se a Equação 8:

$$K_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

K_c : é o coeficiente de compacidade (adimensional);

P : é o perímetro (m);

A : é a área de drenagem (m^2).

5.5.13 Declividade da bacia

A declividade média da bacia é um parâmetro que leva em consideração a variação média da altitude dentro da área da bacia. Este parâmetro pode ser obtido aplicando-se uma malha quadrada e/ou triangular (TIN) sobre a planta planialtimétrica da bacia, em *softwares*

como o ArcGis. Em seguida, são determinadas as declividades em cada um dos pontos de intersecção das malhas projetadas, e, por fim, realiza-se o cálculo da média destes valores.

O valor da declividade média da bacia é uma informação muito importante, pois está diretamente ligado aos picos de vazão (enchentes) sofridos pelo curso d'água, bem como influencia na taxa de infiltração da água na bacia (recarga do aquífero), na suscetibilidade à erosão do solo, na velocidade do escoamento superficial da água da chuva e no tempo de concentração da chuva (FERREIRA et al., 2010).

5.5.14 Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo consiste na classificação e quantificação das diversas formas de ocupação das áreas de uma bacia hidrográfica. Ele também pode ser entendido como a maneira pela qual uma edificação ocupa um terreno, de acordo com os valores estabelecidos pelo Plano Diretor Municipal (PALARETTI, 2019).

A identificação dos usos pode ser realizada por meio de imagens de satélites ou fotografias aéreas empregando-se um Sistema de Informação Geográfica (SIG), assim, é possível obter os usos em uma escala temporal pré-definida, de acordo com os objetivos dos estudos.

5.6 Elaboração dos mapas

Elaboraram-se os mapas de hidrografia, Modelo Digital de Elevação (MDE), declividade, uso e ocupação do solo, e de solos utilizando as ferramentas do SIG ArcGIS, versão 10.3; bem como o mapa de hidrografia a partir da base de dados obtida junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2019).

Realizou-se a confecção do mapa do Modelo Digital de Elevação (MDE) a partir da extração das curvas de nível do município em formato vetorial, com arquivo fornecido pela Prefeitura Municipal de João Monlevade. A partir das curvas, empregaram-se as ferramentas do *3D Analyst Tools* do ArcMAP, e gerou-se o MDE no formato TIN convertendo-o para o formato *raster*.

Para gerar o MDE das áreas não cobertas pelas curvas de nível, utilizou-se a imagem SRTM do satélite Alos Palsar, de 09/04/2011, disponível no endereço eletrônico do Alaska Satélite Facilities (ASF) *Data SearchVertex* (ASF, 2019). Em seguida, uniram-se as imagens,

aplicando-se as correções e ajustes necessários para a geração do modelo final. A partir do arquivo, contendo o MDE em formato raster, foram aplicadas as ferramentas do *Spatial Analyst Tools* do ArcMAP para a elaboração do mapa de declividade.

Em relação aos mapas de uso e ocupação do solo, obteve-se, junto ao Portal Metadados da ANA, o arquivo vetorial de João Monlevade contendo a classificação dos usos do solo de sua área urbana no ano de 2016 (ANA, 2019). A partir da classificação disponibilizada, realizou-se uma adequação para os usos do solo dos anos de 2005 e 2019, empregando-se a digitalização em tela para imagens do *software Google Earth Pro*, realizou-se, pois, a delimitação dos polígonos das áreas que apresentaram diferenças. As imagens dos anos de 2005 e 2019 foram selecionadas por representarem as imagens mais antiga e mais recente, além de estarem com boa qualidade de visualização.

Obteve-se o mapa de solos a partir da sobreposição do limite da bacia do córrego Carneirinhos sobre o mapa de solos elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (SANTOS et al., 2011) com base no sistema brasileiro de classificação dos solos.

É importante ressaltar que a escala do mapa de solos da EMBRAPA (1:100.000) é muito grande para o nível de detalhamento necessário para o estudo hidrológico da bacia, desse modo, realizou-se o cruzamento do mapa de declividade com o mapa de geologia, obtendo-se a classificação dos solos predominantes na área.

A partir da geração do mapa de solos, realizou-se a associação das principais características do solo com a declividade da bacia para a determinação de uma das variáveis de entrada, o grupo hidrológico de solo, necessária para o cálculo do *Curve Number* (CN).

O Quadro 5 apresenta uma síntese das características dos grupos hidrológicos de solos que são consideradas para a classificação dos solos de uma bacia hidrográfica durante a determinação do CN.

Quadro 5: Grupos hidrológicos de solo

Tipo de SCS	Características	Textura
A	Solos com baixo potencial de geração de escoamento superficial: solos arenosos ou siltosos, profundos e de alta capacidade de infiltração	Arenosa, Areia Franca, Franco Arenosa
B	Solos com pouco teor de argila, menos profundos e com mais argila do que os solos do tipo A e de média capacidade de infiltração	Franco Siltosa, Franca
C	Solos com mais teor de argila do que os solos tipo C, com uma camada mais impermeável abaixo da superfície ou pouco profundos	Franco Argilo Arenosas
D	Solos com alto potencial de geração de escoamento superficial: solos argilosos, solos rasos sobre rochas impermeáveis, solos com lençol freático próximo à superfície, solos com capacidade de infiltração muito baixa	Franco argilosa, Franco Argilo Arenosa, Argilo Arenosa, Argilo Siltosa, Argilosa

Fonte: Adaptado de COLLISCHONN e DORNELLES (2013)

A classificação dos solos por meio dos grupos hidrológicos tem fundamentação no método do *Soil Conservation Service* (USDA, 1986) para a determinação do CN na transformação chuva-vazão do modelo HEC-HMS. Posto isso, essa etapa é fundamental na determinação de um parâmetro de entrada para a simulação hidrológica que será detalhada posteriormente.

5.6.1 Divisão da bacia

Após as visitas em campo para o reconhecimento do trajeto do córrego Carneirinhos dentro do município de João Monlevade, foram escolhidos 3 exutórios. Em seguida, levantadas as coordenadas geográficas de cada um deles que foram inseridas no ArcMAP, com o MDE para a delimitação das sub-bacias (ferramenta ArcSWAT). Ao final, definiu-se a divisão da bacia em 3 sub-bacias: alto, médio e baixo Carneirinhos.

Realizou-se esta distribuição em sub-bacias visando aumentar a precisão dos dados simulados, uma vez que, quanto menor a área de estudo mais próximos da realidade encontram-se os resultados obtidos nas simulações.

Além disso, pretendeu-se avaliar a contribuição da vazão de pico proporcionada pela ocorrência de precipitações localizadas na região do alto Carneirinhos, pois, segundo informações obtidas junto à Secretaria de Obras Municipal, chuvas concentradas nesta região provocaram eventos de inundação no médio Carneirinhos.

5.7 Modelagem hidrológica no HEC-HMS

Para a conversão dos dados de precipitação em vazão, empregou-se o *software* HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System do Hydrologic Engineering Center*, dos Estados Unidos). O HEC-HMS pode ser utilizado para o cálculo de vazão em bacias hidrográficas rurais e urbanas que não dispõem de registros fluviométricos (SOUZA, 2017). Portanto, como a área da bacia do córrego Carneirinhos não possui registros fluviométricos, realizou-se sua modelagem hidrológica utilizando os dados de precipitação para o período de 1989 a 2018.

Para a realização das simulações, é necessário fornecer os dados de entrada que consistem em: área da bacia; CN; porcentagem de área impermeável; tempo de retardo; dados de precipitação, além da data e horário da medição da precipitação. A seguir serão detalhados alguns destes parâmetros.

5.7.1 Curve Number (CN)

Desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA), o método do *Soil Conservation Service* (SCS) é baseado em um procedimento que busca relacionar o tipo de uso do solo e a condição da superfície do terreno em relação ao potencial de produzir escoamento superficial. Este índice é representado pela sigla CN (*curve number* ou *complex number*), ou simplesmente “número de escoamento” Usda (1986).

O valor do CN, segundo Mota et al. (2018), varia entre 0 e 100, sendo o valor 0 referente a uma bacia com condutividade hidráulica ilimitada e o valor 100 correspondente a uma bacia totalmente impermeável. Logo, quanto mais próximo o valor encontrado estiver de 100, maior será o potencial do solo na geração de escoamento superficial.

Assim, de posse dos dados referentes às classes de uso do solo na bacia e do tipo de solo, atribuiu-se um valor de CN para cada classe. Em seguida, realizou-se a média ponderada do CN de cada sub-bacia, conforme apresenta a Equação 9:

$$CN = \frac{(X_1 * P_1) + (X_2 * P_2) + (X_3 * P_3) + \dots + (X_n * P_n)}{(P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n)} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

CN: número de escoamento;

X_n : valor de CN para cada classe de solo;

P_n : porcentagem de ocupação de cada classe de uso do solo dentro do tipo de solo com relação a área total da bacia.

5.7.2 Tempo de concentração e tempo de retardo

O tempo de concentração (t_c) indica o tempo no qual uma gota de água translada desde o ponto mais distante da bacia até o exutório. Para estimar o seu valor, podem ser utilizadas diversas equações apresentadas em estudos de diferentes bacias hidrográficas. Silveira et al. (2000) testou 23 equações para o cálculo do t_c em bacias hidrográficas urbanas e rurais, apresentando resultados variáveis conforme a aplicação.

Após visitar a bacia e realizar cálculos de tempo de concentração, observou-se que para esta pesquisa, a equação de Kirpich, foi a que melhor se adequou à bacia de estudo em comparação com a realidade física.

Portanto, neste estudo, adotou-se o método de Kirpich (SILVEIRA et al., 2000), onde o t_c pode ser estimado a partir da Equação 10:

$$t_c = 0,0663 * (L^{0,77}) * (S^{-0,385}) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

t_c = tempo de concentração (minutos);

L = comprimento do rio principal desde o exutório ao divisor (km);

S = declividade, dada pela razão entre o desnível máximo e o comprimento L do percurso do rio principal da bacia, em m/m

No caso deste estudo, o cálculo do tempo de concentração faz-se necessário para que este seja relacionado ao tempo de retardo (*lag time*), que, por sua vez, é um parâmetro necessário para a realização da modelagem hidrológica. Portanto, realizou-se o cálculo do t_c a partir da fórmula do método Kirpich e utilizou-se a equação de *Ven te chow* (Equação 11), recomendada por Silveira et al. (2000) para comparação dos resultados.

$$t_c = 0,160L^{0,64}S^{-0,32} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

t_c = tempo de concentração (minutos);

L = comprimento do rio principal desde o exutório ao divisor (km);

S = declividade

A declividade média do curso d'água principal de uma bacia pode ser calculada com base na relação entre a diferença de altitude entre o ponto de maior altitude da bacia e o seu respectivo exutório e o comprimento do curso d'água principal, conforme apresentado na Equação 12:

$$S = \frac{Z_{Max} - Z_{Min}}{L} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

Z_{100} = altitude no início da rede de drenagem principal (ponto mais distante do exutório) (m).

Z_0 = altitude no exutório (m).

L = comprimento da drenagem principal (m).

O tempo de atraso ou retardamento (*lag time*) é um parâmetro fundamental para a modelagem hidrológica. Ele representa o intervalo entre os centros de gravidade da precipitação e do hietograma, sendo definido em função do tempo de concentração, que é o tempo total para que toda a bacia contribua para o deflúvio na saída do exutório (TUCCI, 2004). Assim, para o cálculo do tempo de retardo, tem-se as equações 13 e 14:

$$S = \frac{Z_{Max} - Z_{Min}}{L} \quad \text{Equação 12}$$

$$t_r = \frac{t_c}{1,417} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

t_r = tempo de retardo ou *lag time* (h).

t_c = tempo de concentração (h).

Tendo em vista as equações apresentadas, utilizaram-se os cálculos necessários para estimativa do tempo de retardo nas três sub-bacias (alto, médio e baixo Carneirinhos).

5.7.3 Dados de precipitação observados e simulados

Neste tópico, serão apresentados os métodos utilizados para a aquisição e tratamento dos dados hidrológicos utilizados neste estudo.

5.7.3.1 *Dados observados*

Conforme dito, a partir dos dados de precipitação da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos, obtidos junto aos registros da estação pluviométrica número 31362070A de João Monlevade/MG, elaborou-se uma série histórica com as máximas precipitações anuais, de acordo com o ano hidrológico (outubro a setembro), compreendendo o período de 1989 a 2018.

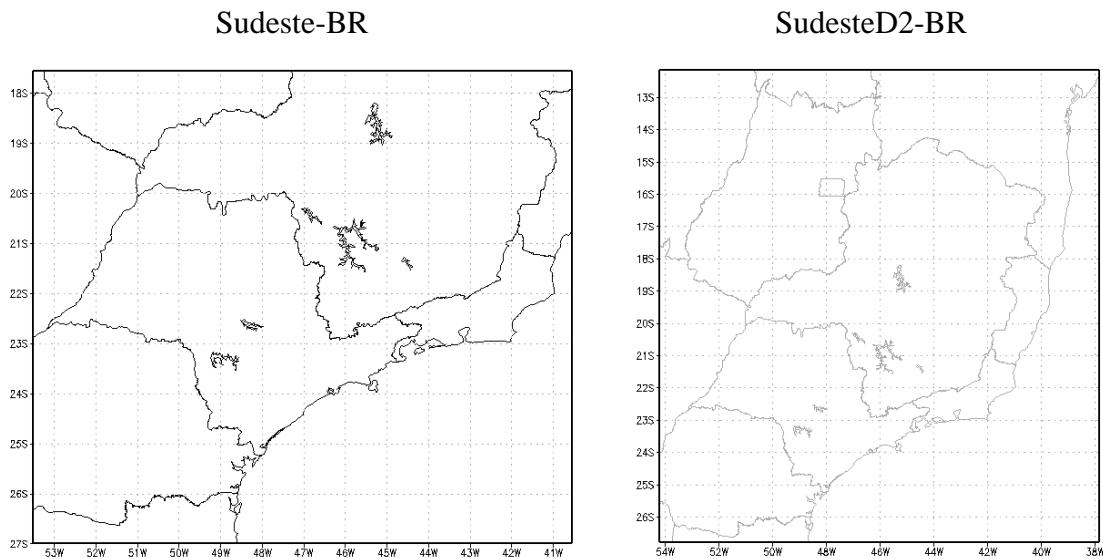
5.7.3.2 *Dados simulados*

Dados de simulações regionalizadas das projeções climáticas para o Brasil, gerados pelo CPTEC/INPE, estão atualmente disponíveis na Plataforma Projeta (2017). Uma projeção climática é geralmente derivada de um modelo de clima e consiste na resposta simulada do sistema climático a um cenário de emissão ou de concentração futura de gases de efeito estufa (GEEs) e aerossóis (PClima, 2019).

Assim, o conjunto de dados atualmente disponível na Plataforma Projeta é proveniente das simulações com o modelo climático regional atmosférico Eta (MESINGER et al., 2012). Estes dados já foram regionalizados por meio do processo de *downscaling*, utilizando modelos climáticos globais acoplados que atuam como modelos forçantes, provendo as condições de contorno para o modelo regional. As simulações com o modelo HADGEM2-ES (COLLINS et al., 2011) são as únicas disponíveis na plataforma com resolução espacial de 5 km para a região sudeste, enquanto que as simulações regionalizadas com os outros modelos globais têm resolução de 20 km. Portanto, as simulações regionalizadas com o modelo HADGEM2-ES foram escolhidas para utilização neste trabalho.

Existem dois domínios para a região sudeste disponíveis na Plataforma Projeta: sudeste-BR e sudesteD2-BR. A Figura 3 apresenta as áreas da região sudeste cobertas por cada um destes domínios. Como o domínio sudesteD2-BR abrange todo o Estado de Minas Gerais, este foi o domínio escolhido para este estudo.

Figura 3: Domínios disponíveis na Plataforma Projeta para as simulações com o modelo global HADGEM2-ES na região sudeste



Fonte: Plataforma Projeta CPTEC (2017)

Além disso, na Plataforma Projeta estão disponíveis simulações para os três seguintes cenários:

1. Histórico – também chamado de período base ou de referência, que corresponde ao período no qual são considerados os valores atuais para as concentrações de gases de efeito estufa (GEEs). O período disponível neste cenário é de 1961 a 2005.
2. RCP4.5 – cenário em que o dióxido de carbono atinge cerca de 650 ppm até o final do século XXI, sendo que, devido às estratégias para reduzir as emissões de GEEs, as forçantes radiativas estabilizam-se em 4,5 W/m² antes do ano 2100. O período disponível neste cenário é de 2006 a 2100.
3. RCP8.5 – cenário de alta emissão de concentrações de GEEs, em que o dióxido de carbono equivalente excede a 1000 ppm até o final do século XXI, o que faz com que as forçantes radiativas atinjam 8,5 W/m² até o ano 2100. O período disponível neste cenário é de 2006 a 2100. Cabe também ressaltar que este cenário é o mais próximo das tendências observadas nas medições atuais das concentrações de GEEs na atmosfera (PClima, 2019). Devido a isto, este cenário e o cenário histórico foram os escolhidos para este estudo.

É importante mencionar que os dados de precipitação total, provenientes das simulações regionalizadas com o modelo HADGEM2-ES, disponíveis na plataforma, não passaram por correção de viés. Isso significa que elas são propensas a apresentar erros sistemáticos ou vieses

que podem levar a interpretações incorretas acerca dos cenários climáticos futuros. Portanto, após a obtenção dos dados para os cenários histórico e RCP 8.5, para o município de João Monlevade, foi necessário fazer a correção de viés, a qual será descrita a seguir.

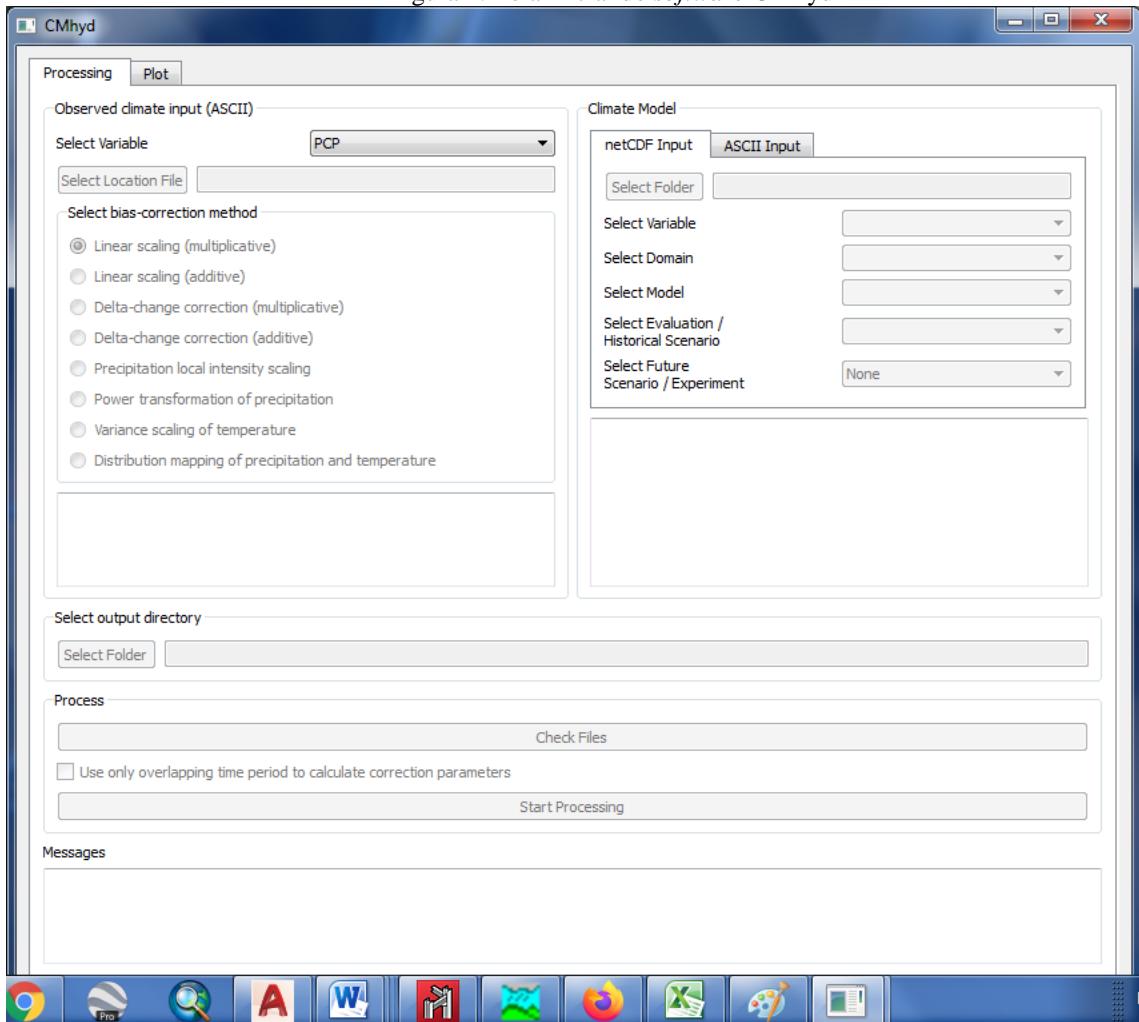
5.7.3.3 *Correção de viés*

Existem vários métodos para a correção de viés dos dados de precipitação. Neste estudo, será utilizado o método *Linear Scaling*, que usa um fator multiplicativo para ajustar os valores médio mensais simulados para os valores médio mensais observados, sendo que é assumido que estes fatores de correção permaneçam invariáveis mesmo sob condições futuras (SANTOS et al., 2019). Ele foi escolhido pois apresentou melhor ajuste aos dados quando comparado com o método *Distribution Mapping* (DM).

O *software Climate Model for Hydrologic Modeling* (CMhyd) foi desenvolvido por Rathjens et al. (2016) para executar a correção de viés dos dados de precipitação e temperatura de vários modelos climáticos, de forma a preparar os dados para estudos de impacto hidrológico. Este *software* permite, assim, extrair e corrigir os dados de precipitação de forma semiautomática, fornecendo oito opções de métodos de correção de viés: *Linear Scaling*, *Delta Change*, *Local Intensity Scaling*, *Power Transformation*, *Variance Scale* e *Distribution Mapping*.

Para proceder à correção de viés no CMhyd (Figura 4), as séries históricas devem apresentar o mesmo tamanho amostral ou comprimento. Assim, tomou-se por base o tamanho amostral da série histórica dos dados observados de João Monlevade, ou seja, 28 anos. A partir disso, definiu-se o período de 1989 a 2018 para análise do cenário histórico (aqui denominado de clima do presente) e de 2019 a 2048 para análise do cenário RCP8.5 (aqui denominado de clima do futuro).

Figura 4: Tela inicial do *software* CMhyd



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

5.7.4 Tratamento dos dados hidrológicos

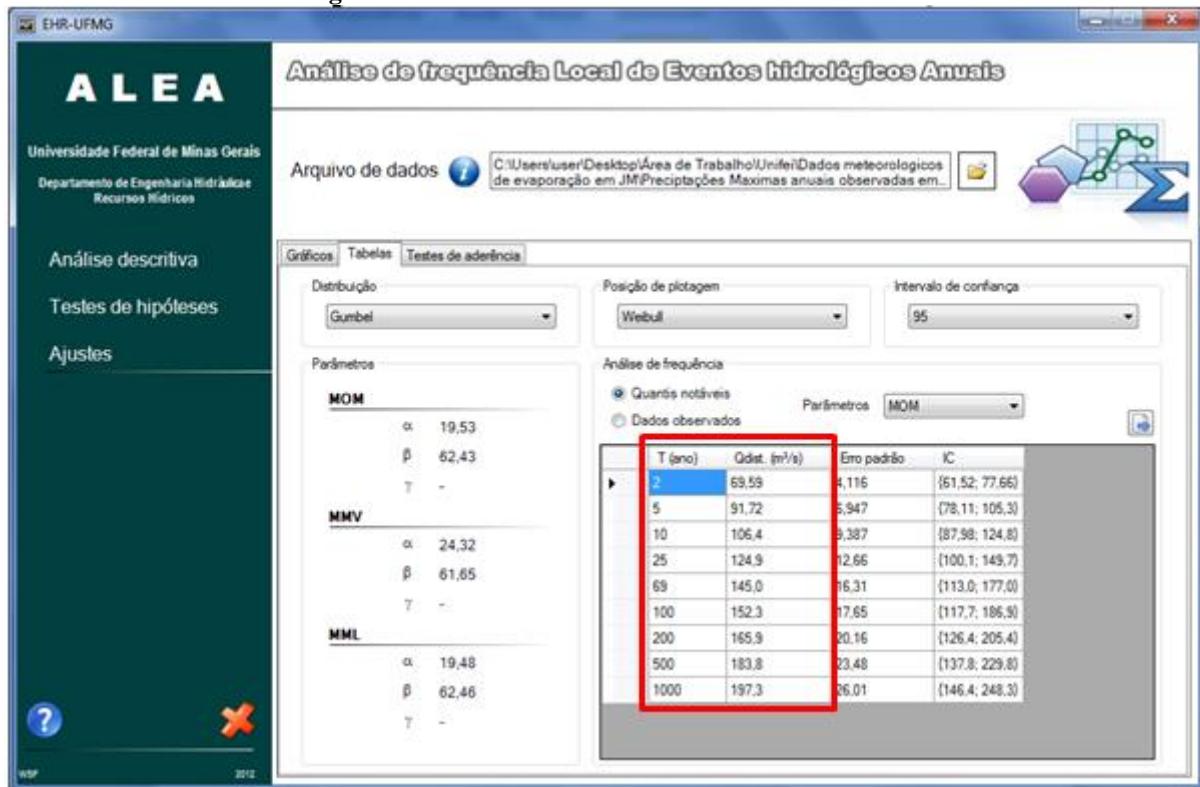
Após proceder a correção de viés, realizaram-se análises estatísticas das séries temporais de precipitação observada e simulada por meio do *software* ALEA - Análise de Frequência Local de Eventos Hidrológicos Anuais (UFMG, 2012).

Dessa forma, a série de máximas diárias anuais de precipitação foram submetidas à análise de frequência e análises estatísticas para ajuste dos modelos probabilísticos e determinação de parâmetros e comportamentos, sendo adotado um intervalo de confiança (IC) de 95%. Para isso, os dados observados e simulados para o clima do presente e do futuro foram separados em anos hidrológicos.

Em seguida, realizou-se o levantamento das máximas precipitações anuais de cada uma das séries históricas (dados observados na estação meteorológica e dados obtidos nas

simulações para o presente e futuro) e estes dados foram inseridos no *software* ALEA (Figura 5), em que foram analisados os parâmetros: aleatoriedade, homogeneidade, independência e estacionariedade. O destaque aponta os tempos de retorno e respectivas precipitações.

Figura 5: Tela de saída dos resultados no modelo ALEA



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A Figura 5 apresenta a tela de saída dos resultados do ALEA após o ajuste dos dados. Os dados da coluna T (ano), isto é, os tempos de retorno, foram interpolados com os dados da coluna Qdist (m³/s) no *software* Excel, aplicando-se a regressão linear da distribuição, a fim de encontrar os períodos que não foram compreendidos pelo ALEA (TR15, TR20, TR30, TR50). Em alguns casos, foi necessário encontrar a distribuição que melhor representa os dados simulados e os coeficientes da equação de reta para cada tempo de retorno (α , β e γ).

Com as equações de reta ajustadas nas planilhas de cálculo, realizou-se o procedimento de desagregação dos volumes totais acumulados de precipitação em intervalos de 6h para cada um dos tempos de retorno de cada série. Com os resultados em mãos, aplicou-se o método de blocos alternados para representar o comportamento das precipitações.

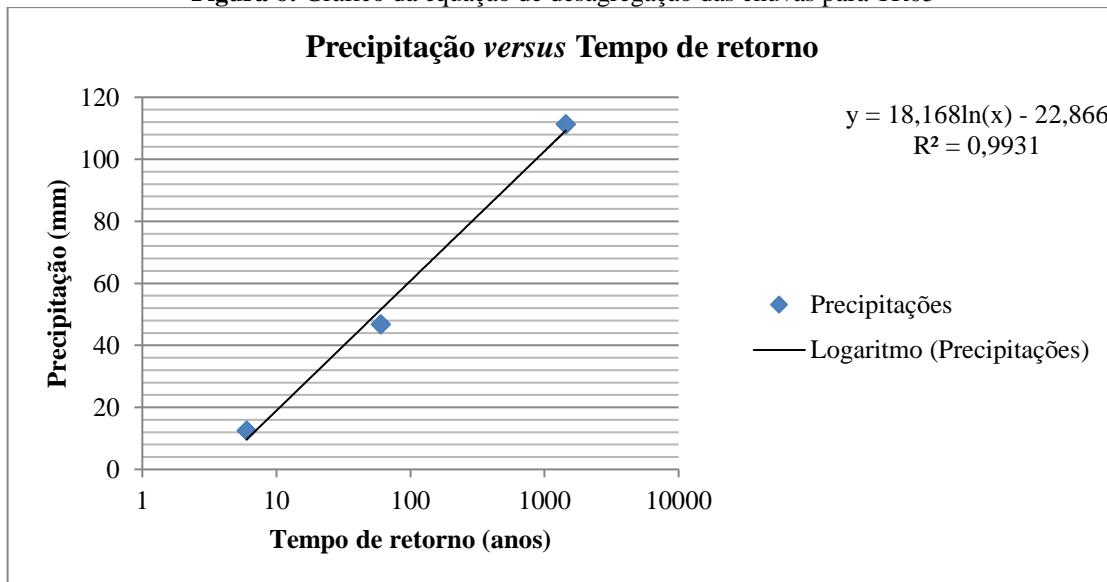
5.7.5 Desagregação das chuvas dispostas em curvas IDF

Para a determinação das chuvas intensas, é primordial que sejam empregados dados pluviográficos da área de estudo, ou seja, durações parciais das precipitações, sendo as mais usuais de 10, 20, 30, 40, 60, 120, 360, 720 e 1.440 minutos. No entanto, para contrariar as expectativas, em muitos casos não é possível a aplicação desses dados devido à baixa densidade de rede pluviográfica no país (TUCCI, 2009). As redes pluviométricas são mais numerosas e mais acessíveis, entretanto, os pluviômetros registram as precipitações ocorridas em um período de 24 horas, sendo, assim, primordial a aplicação de um procedimento metodológico para a desagregação das chuvas diárias, de modo a obter as durações parciais.

Desse modo, por meio dos dados de precipitação observados no período de 1989 a 2018, realizou-se a desagregação dos valores por meio da técnica de regressão linear das equações IDF da região do médio Piracicaba elaboradas por Silveira et al. (2016).

Neste contexto, considerou-se que a chuva ocorreu de forma distribuída em toda a bacia e que o tempo de duração das precipitações seria fixado em 360 minutos (06 horas) para possibilitar a comparação com os dados de precipitação simulados. Assim, variou-se apenas o tempo de retorno das chuvas: 05, 10, 15, 20, 25, 30, 50, e 100 anos (TR05, TR10, TR15, TR20, TR25, TR30, TR 50 e TR100, respectivamente). Em seguida, os dados foram ordenados seguindo a metodologia dos blocos alternados, conforme apresentado na Figura 6, obtida a partir do estudo de Lima et al. (2016).

Figura 6: Gráfico da equação de desagregação das chuvas para TR05



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A Figura 6 apresenta a equação de reta da desagregação da chuva para o TR05, em que se empregou a regressão linear para encontrar o valor da precipitação acumulada de 10 em 10 minutos. A partir das equações de retas geradas para cada tempo de retorno, os resultados foram tabulados e organizados de acordo com o método dos blocos ordenados, conforme exemplo apresentado na Tabela 2.

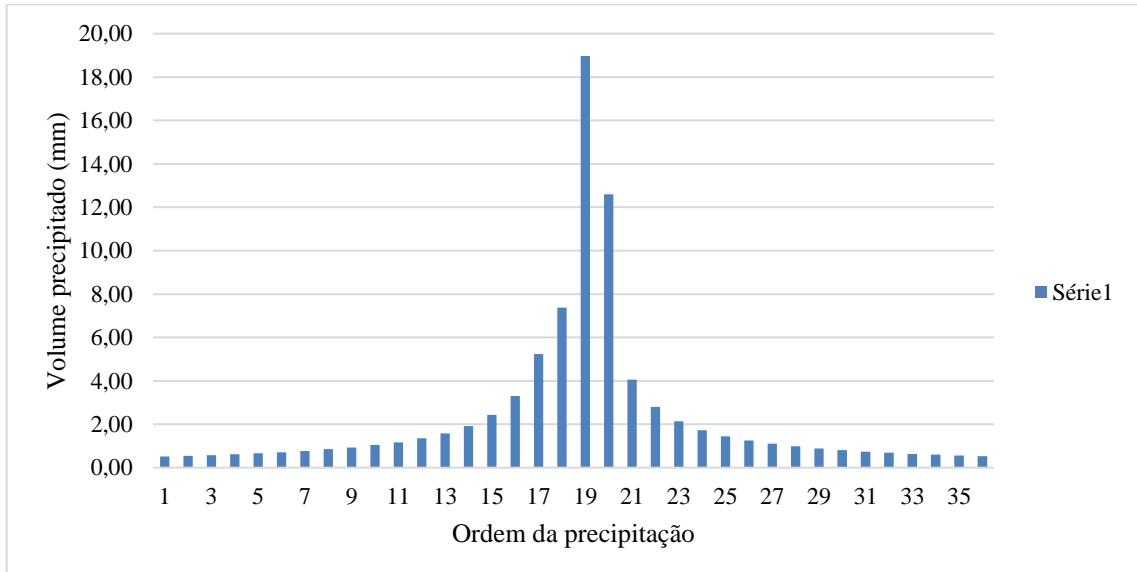
Tabela 2: Exemplo da ordenação dos resultados da desagregação das chuvas

ORDEM	T (min)	P ACUM (mm)	P INCREMENTAL (mm)	P REARRANJO (mm)
1	10	18,97	18,97	1,04
2	20	31,56	12,59	1,25
...
36	360	84,07	0,51	0,00

Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Após a ordenação dos dados no *software* Excel, produziram-se gráficos representando a distribuição das chuvas ao longo das 06 horas. A Figura 7 apresenta esta distribuição.

Figura 7: Distribuição das precipitações conforme o método dos blocos alternados



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Os procedimentos de desagregação, ordenamento das precipitações e geração dos gráficos de distribuição das chuvas foram repetidos para cada tempo de retorno analisado em cada uma das séries de dados (observados e simulados para o presente e futuro).

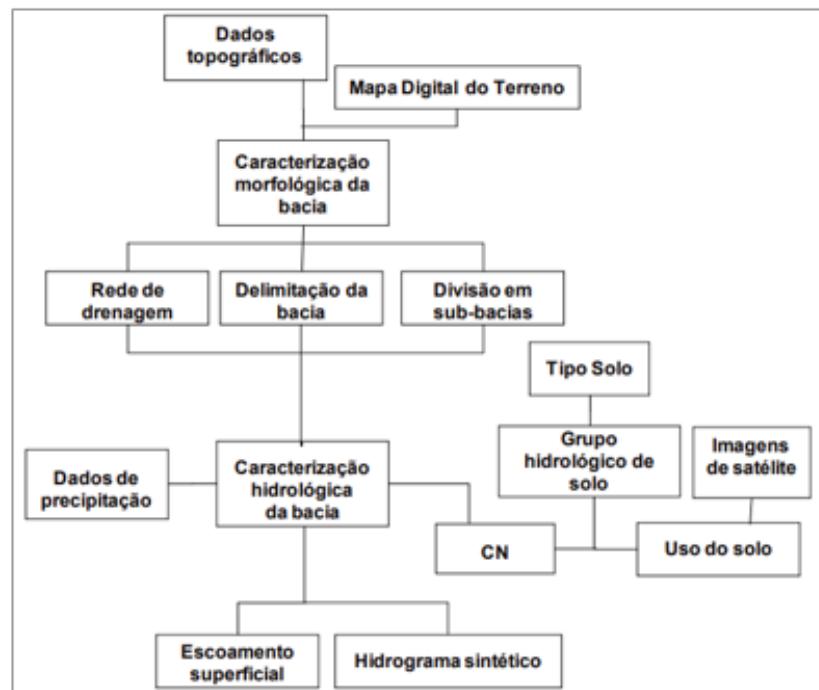
5.7.6 Simulações no HEC-HMS

Simularam-se diversas combinações de ocorrência de precipitação na bacia. Consideraram-se 9 tempos de retorno (TR 01, TR 05, [...], TR 50 e TR 100), sendo que, para cada um destes, foram introduzidos, no modelo HEC-HMS, os dados das chuvas desagregadas e ordenadas pelo método dos blocos alternados. Repetiu-se este procedimento para todos os tempos de retorno e para as três séries temporais analisadas neste estudo (observada, presente e futuro).

5.7.7 Resumo das principais etapas metodológicas para a realização das simulações hidrológicas

De posse dos dados de entrada (área da bacia; CN; porcentagem de área impermeável; tempo de retardo; dados de precipitação, data e horário da medição de precipitação) e das séries históricas de precipitação, iniciou-se o processo de modelagem hidrológica da bacia do córrego Carneirinhos no *software* HEC-HMS, conforme sintetizado na Figura 8:

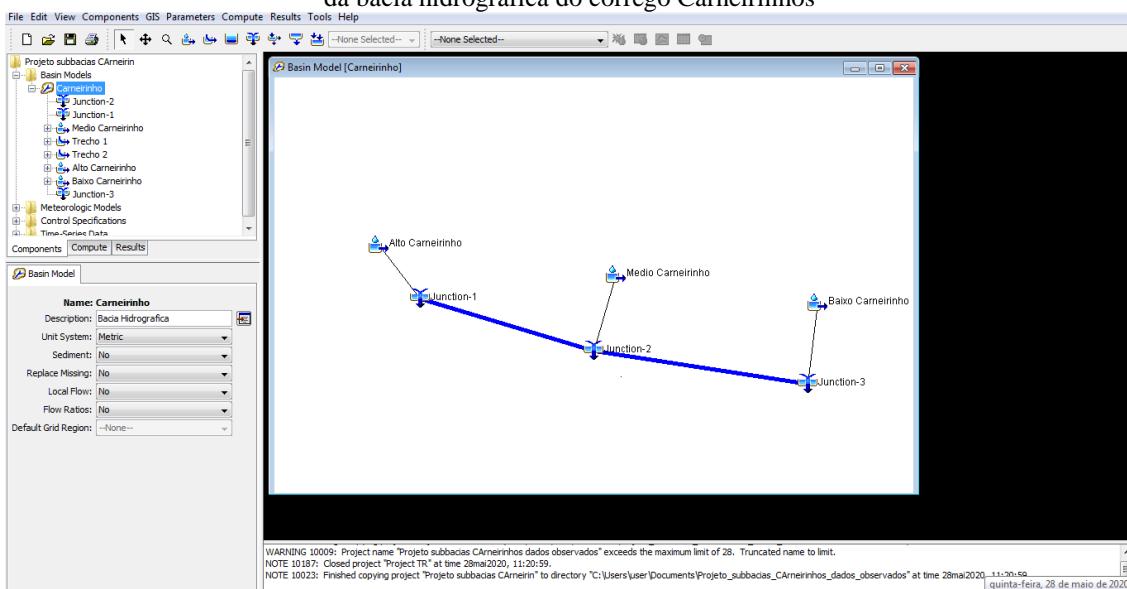
Figura 8: Fluxograma do processo de modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS



Fonte: Macedo (2010)

Após a finalização dos processos ilustrados na Figura 8, o modelo HEC-HMS gerou um modelo hidrológico (Figura 9) que serviu de base para as demais simulações realizadas nesta pesquisa (variando a precipitação, mas mantendo-se constante as outras características da bacia), com o intuito de verificar se o sistema de drenagem urbana atual é capaz de suportar as alterações previstas na precipitação, tendo em vista as mudanças climáticas projetadas para o período de 2019 a 2048.

Figura 9: Tela do modelo hidrológico gerado pelo *software* HEC-HMS da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

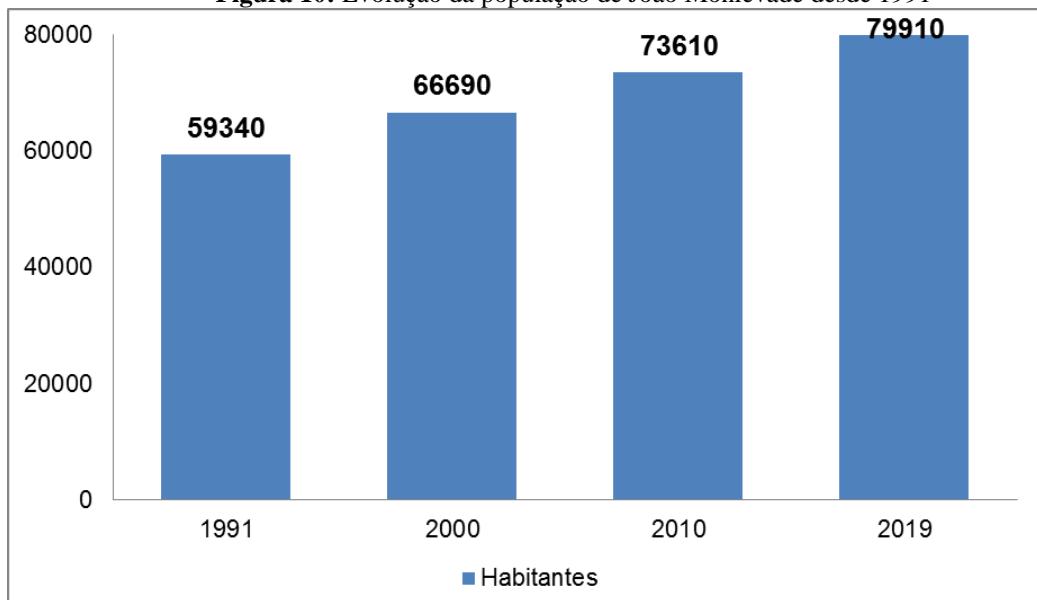
Por meio do modelo hidrológico gerado, cada sub-bacia apresentará uma vazão de pico que poderá ser acumulada no exutório seguinte, sendo que o acumulado total representa a vazão de pico máxima que passará no exutório 3. Desse modo, realizaram-se diversas combinações de precipitação distribuídas ao longo da bacia, as quais serão apresentadas no próximo capítulo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Eventos de inundação na bacia do córrego Carneirinhos e sistemas meteorológicos atuantes

A Figura 10 apresenta a evolução da população a partir dos censos demográficos de 1991, 2000, 2010 - Sidra: Sistema IBGE de Recuperação (2020), e 2019 (população estimada - IBGE, 2019). De acordo com as informações obtidas junto ao IBGE, João Monlevade apresentou um crescimento populacional médio de 10% a cada década, desde o censo de 1991.

Figura 10: Evolução da população de João Monlevade desde 1991



Fonte: Adaptado de IBGE (2019, 2020)

A partir da análise da Figura 10, pode-se verificar que houve um considerável aumento da taxa de crescimento da população entre os anos analisados, pois, em cerca de 30 anos, houve um acréscimo populacional de aproximadamente 35%, tomado como base o ano de 1991. Entre os anos de 1991 e 2000 houve uma elevação populacional de 8,6%; entre 2000 e 2010, 10,4% e 12,4% entre os anos de 2010 e 2019. Além disso, o censo de 2010 apresentou que a densidade demográfica do município foi de 742,35 hab/km², sendo a 10^a maior de Minas Gerais (IBGE, 2019).

Essas informações são relevantes para a compreensão da dinâmica do município, pois, quanto maior o número de pessoas vivendo em uma área urbana, maior a transformação no uso e ocupação do solo de sua bacia hidrográfica. A concentração da população, em uma área

relativamente pequena, possibilita o acesso fácil a serviços e transporte. Contudo, segundo o modelo atual de planejamento urbano, a consequência disso é a impermeabilização de extensas áreas em regiões urbanas. A expansão das áreas impermeabilizadas, por sua vez, altera o ciclo hidrológico da bacia, ocasionando um aumento na velocidade do escoamento superficial das águas da chuva e redução na taxa de infiltração de água no solo.

Neste contexto, o estudo, realizado por Silva et al. (2020), apresentou uma análise sobre o uso e ocupação do solo na bacia do córrego Carneirinhos em João Monlevade, nos anos de 2005, 2016 e 2019. O trabalho apontou que os usos antrópicos do solo prevaleceram sobre o uso natural, que houve um aumento da expansão urbana, e que esse crescimento ocorreu nas bordas das áreas ocupadas, não ocorrendo abertura de clareiras ou supressão vegetal em áreas de mata.

Segundo os autores, em 2005, o somatório das classes equivalentes aos usos antrópicos (industrial, edificada e de pastagem) foi de 57,6%; em 2016 e 2019 foi próximo a 58,1%. Isso significa que a maior parte da bacia possui usos que interferem negativamente na permeabilidade da água no solo, dificultando sua infiltração e favorecendo o escoamento superficial e a evaporação, contribuindo para a ampliação do número de eventos de inundações na bacia.

O Quadro 6 foi elaborado após o levantamento de dados e informações sobre os eventos extremos de inundações ocorridos na bacia do córrego Carneirinhos, registrados nos órgãos públicos dos municípios (Secretaria de Obras, Defesa Civil e DAE), bem como aqueles apresentados pelo S2id e em sites de notícias. Neste quadro foram compiladas as datas dos principais eventos, o tipo de perda e os principais sistemas meteorológicos atuantes na região no período de ocorrência dos eventos.

Quadro 6: Eventos extremos de inundações ocorridos na bacia de estudo e registrados nos órgãos públicos do município, portal S2id e em sites de notícias, e respectivos sistemas meteorológicos atuantes

DATA DO EVENTO	TIPO DA PERDA	SISTEMAS METEOROLÓGICOS ATUANTES	FONTE
01/12/1969	Perdas materiais	Informação não encontrada	Franco et al. (2016); comunicação pessoal (2019)
01/01/1970	Perda de vida humana		Franco et al. (2016); comunicação pessoal (2019)
03/02/1979	Perdas materiais		Serviço Geológico do Brasil (2009); Santos (2019)
06/12/2003	Perdas materiais		Brasil (2020); comunicação pessoal (2019)
22/11/2006	Perdas materiais	Sistemas frontais	Brasil (2020); comunicação pessoal (2019); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2006)
09/11/2009	Perdas de vidas humanas	Convergência de umidade	Brasil (2020); comunicação pessoal (2019); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2009)
29/12/2012	Perdas materiais	Convergência de umidade	Mota (2012); comunicação pessoal (2019); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2012)
05/02/2015	Perdas materiais	Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)	DeFato Online (2015); comunicação pessoal (2019); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2015)
18/01/2016	Perdas materiais	ZCAS	Comunicação pessoal (2019); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2016)
09/12/2017	Perdas materiais	ZCAS	Diário do Aço (2017); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2017)
04/04/2018	Perdas materiais	Zona de Convergência de Umidade (ZCOU)	Comunicação pessoal (2019); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2018)
18/02/2019	Perdas materiais	ZCAS	Comunicação pessoal (2019); Instituto Nacional de Meteorologia (2019)
08/04/2019	Perdas materiais	ZCOU	Comunicação pessoal (2019); Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, (2019)
13/01/2020	Perdas materiais	ZCAS	Via Comercial (2020); Instituto Nacional de Meteorologia (2020)

Fonte: Silva et al (2020b)

Pode-se notar, a partir do Quadro 6, que o bairro Carneirinhos sofreu 14 eventos de média a grande proporção de inundações e/ou alagamentos durante o período de 1969 a 2020 (Comunicação pessoal, 2019; BRASIL, 2020). Ressalta-se, entretanto, que nem todos os eventos de inundações são registrados junto aos órgãos competentes do município e no S2ID, desse modo, alguns foram informados por comunicação pessoal ou obtidos junto aos sites de notícia.

As inundações mais graves ocorreram nas seguintes datas: 01 de dezembro de 1969, 01 de janeiro de 1970 e 10 de novembro de 2009 (FRANCO et al., 2016). Nessas datas, registraram-se vítimas que vieram à óbito devido a um aumento no nível de água escoado pelo córrego Carneirinhos. A última inundação registrada nesta região ocorreu em 08 de abril de 2019, após um elevado volume de precipitação (G1 MG Globo Notícias, 2017).

Dez dos catorze eventos listados ocorreram no período de verão. Os sistemas meteorológicos atuantes puderam ser identificados em nove eventos, sendo que 55% deles estão associados a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e 20% estão associados a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU).

6.2 Principais eventos de inundações na bacia do córrego Carneirinhos e sistemas meteorológicos atuantes

João Monlevade enfrenta, com bastante frequência, situações de inundações e alagamentos (FRANCO et al., 2016), sendo que esta situação é considerada corriqueira pelos órgãos competentes (Comunicação pessoal, 2019), pois, desde sua emancipação em 1964, foram registrados 14 eventos críticos de inundações na sua área central, sendo o bairro Carneirinhos o mais atingido por essas eventualidades.

Assim, neste tópico, serão detalhados os principais eventos de inundações ocorridos na bacia do córrego Carneirinhos, cujo critério de seleção, a partir do Quadro 6, foi a proporção das perdas materiais e de vidas humanas.

6.2.1 As inundações de 1969, 1970 e 1979

As inundações ocorridas entre o final das décadas de 1960 e 1970 foram classificadas pelos gestores públicos municipais como de grande impacto, causando prejuízos financeiros aos cofres públicos e mortes.

O evento de inundaçāo registrado no dia 01 de dezembro de 1969 ocorreu devido a um grande volume de chuva precipitado em um curto intervalo de tempo, sendo que o córrego Carneirinhos não era canalizado na época. Este evento repercutiu de tal forma no município que as verbas destinadas para a construção do Paço Municipal e do Colégio Municipal foram utilizadas para a construção do canal e da avenida sanitária Wilson Alvarenga nos anos seguintes (FRANCO et al., 2016).

No ano seguinte, em 01 de janeiro de 1970, houve outra severa inundaçāo, e o córrego Carneirinhos, que iniciava seu processo de canalizaçāo, teve um elevado aumento de sua vazão (Figura 11) provocando um aumento no seu nível d'água que, segundo relatos, ultrapassou 1,80 m acima de seu nível normal.

Figura 11: Córrego Carneirinhos durante o evento de inundaçāo de 1970



Fonte: Araújo (2011)

A Figura 11 apresenta um trecho do córrego Carneirinhos após a inundaçāo de janeiro de 1970. Nesse incidente fatal, houve o registro de uma morte, além do carreamento de

materiais, destroços e sedimentos para as áreas localizadas no entorno do curso d'água (FRANCO et al., 2016).

A inundação de 03 de fevereiro de 1979 foi resultante de um longo período chuvoso que se estendeu por mais de 30 dias na região da bacia hidrográfica do Rio Doce. Na época, todos os municípios situados na calha do rio Doce sofreram inundações nas áreas de planície (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2009).

No caso desses três eventos analisados, não foram encontrados registros na literatura nem nos boletins do CPTEC/INPE e do INMET dos sistemas meteorológicos atuantes nessas datas. No entanto, sabe-se que os sistemas atmosféricos que atuam na formação da precipitação em Minas Gerais são as frentes frias, a ZCAS, a ZCOU e as chuvas convectivas.

6.2.2 As inundações de 2003, 2006 e 2009

As inundações registradas entre 2003 e 2009 também foram marcadas por prejuízos materiais e perdas de vidas humanas. De acordo com a Avaliação de Danos (AVADAN) do Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC), disponibilizada pelo S2id (Figura 12), no incidente registrado em 06 de dezembro de 2003, ocorreu a precipitação de um elevado volume de chuva, provocando o assoreamento e a elevação dos cursos d'água, deslizamentos parciais de residências, além de vários problemas de rompimento de redes pluviais e de esgoto sanitário.

Figura 12: Formulário enviado ao SINDEC referente ao evento de inundações de 2003

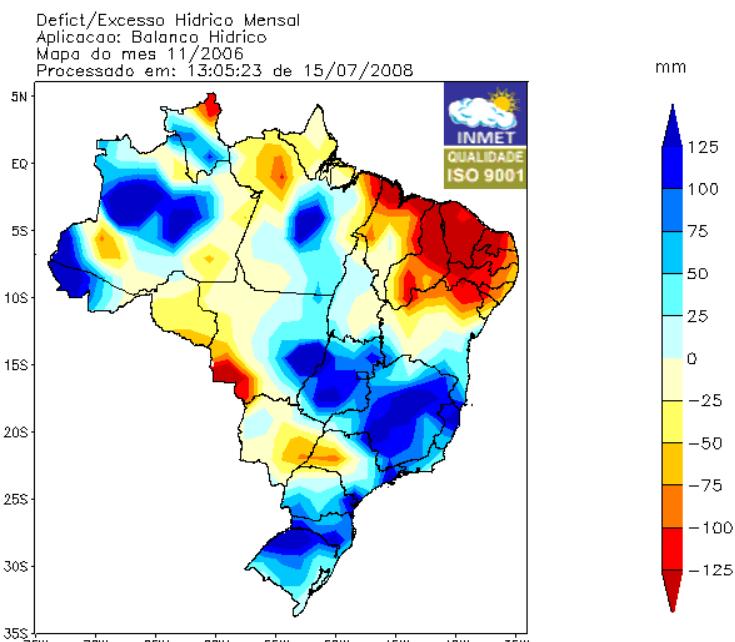
SISTEMA NACIONAL DE DEFESA CIVIL - SINDEC																																																											
AVALIAÇÃO DE DANOS - AVADAN																																																											
																																																											
1 - Tipificação Código		Denominação		2- Data de Ocorrência Dia 06 Mês 12 Ano 2003 Horário 22:00																																																							
3- Localização UF MG Município JOÃO MONTEVIDEO																																																											
4 - Área Afetada <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de Ocupação</th> <th>Não existe/ Não afetada</th> <th>Urbana</th> <th>Rural</th> <th>Urbana e Rural</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Residencial</td> <td>μ</td> <td>X</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td>Comercial</td> <td>μ</td> <td>X</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td>Industrial</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td>Agrícola</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td>Pecuária</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td>Extrativismo Vegetal</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td>Reserva Florestal ou APA</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td>Mineração</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td>Turismo e outras</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> <td>μ</td> </tr> </tbody> </table>					Tipo de Ocupação	Não existe/ Não afetada	Urbana	Rural	Urbana e Rural	Residencial	μ	X	μ	μ	Comercial	μ	X	μ	μ	Industrial	μ	μ	μ	μ	Agrícola	μ	μ	μ	μ	Pecuária	μ	μ	μ	μ	Extrativismo Vegetal	μ	μ	μ	μ	Reserva Florestal ou APA	μ	μ	μ	μ	Mineração	μ	μ	μ	μ	Turismo e outras	μ	μ	μ	μ		μ	μ	μ	μ
Tipo de Ocupação	Não existe/ Não afetada	Urbana	Rural	Urbana e Rural																																																							
Residencial	μ	X	μ	μ																																																							
Comercial	μ	X	μ	μ																																																							
Industrial	μ	μ	μ	μ																																																							
Agrícola	μ	μ	μ	μ																																																							
Pecuária	μ	μ	μ	μ																																																							
Extrativismo Vegetal	μ	μ	μ	μ																																																							
Reserva Florestal ou APA	μ	μ	μ	μ																																																							
Mineração	μ	μ	μ	μ																																																							
Turismo e outras	μ	μ	μ	μ																																																							
	μ	μ	μ	μ																																																							
Descrição da Área Afetada: Bairros: Carneirinhos, Cruzeiro Celeste, Boa Vista, Vila Cruz, Nova Esperança, Cidade Nova, Baú, Belo Monte, Santa Cecília, Petrópolis, República, Laranjeiras, Metalúrgico, Novo Horizonte, Nova Cachoeirinha, ABM, Paineiras, Campos Elísios, São Geraldo/Sion, José Elói, Castelo e área do Lixão/ Andrade e Monte Sagrado -(Residencial e Comercial)																																																											
5 - Causas do Desastre - Descrição do Evento e suas Características Elevada precipitação pluviométrica, provocando assoreamento e elevação dos cursos d'água (enchentes), deslizamentos parciais de residências, deslizamentos, destruição de obras de contenção e pavimentos, rompimento de redes pluviais e esgoto sanitário.																																																											

Fonte: Brasil (2020)

A Figura 12 exibe um trecho do formulário AVADAN, enviado pela Defesa Civil do município ao SINDEC referente ao evento de inundações de 2003, que atingiu 23 bairros do município. Em Carneirinhos, houve a perda de utensílios, ferramentas, móveis de escritório, computadores e documentos dos comerciantes do bairro. Além disso, este evento causou um prejuízo de mais de 430 mil de reais aos cofres públicos e afetou aproximadamente 10.000 pessoas. De acordo com o documento, o evento foi classificado com nível de intensidade médio Brasil (2020).

Não foram encontrados registros dos sistemas meteorológicos atuantes nesta data, contudo, segundo o Boletim Agroclimatológico do INMET, o mês de novembro foi marcado pela ocorrência de chuvas intensas em diversas áreas do Brasil. No Sudeste, o Estado de Minas Gerais apresentou elevados totais de precipitação (Figura 13).

Figura 13: Mapa do Balanço Hídrico para o Brasil durante o mês de novembro de 2006



Fonte: Boletim Agroclimatológico do INMET para 11/2006

A Figura 13 apresenta o mapa do balanço hídrico para o Brasil, em novembro de 2006, em que fica evidenciado que este mês foi especialmente chuvoso em Minas Gerais, dado que o excesso hídrico foi superior a 50 mm em praticamente todo o Estado, porém, grande parte ultrapassou 75 mm.

Particularmente, no dia 22 de novembro, ocorreram chuvas torrenciais que foram responsáveis por deslizamentos de encostas e inundações que invadiram residências e casas comerciais. De acordo com a Notificação Preliminar de Desastre (NOPRED), enviada ao SINDEC, toda a extensão das avenidas Getúlio Vargas e Wilson Alvarenga, na área central e comercial do município foram atingidas, além de outros 5 bairros. Também foram contabilizadas 5 residências prejudicadas neste incidente (BRASIL, 2020).

De acordo com o Boletim de Monitoramento e Análise Climática (Climanálise) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), nessa data, sistemas frontais atuavam sobre a região, ou seja, houve o encontro de massas de ar com propriedades diferentes provocando a ocorrência de chuvas fortes no local Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2006). Rodrigues et al. (2004) mostraram que as frentes frias se deslocam em média do sudoeste para nordeste, ao longo da região sul e sudeste do Brasil, com uma frequência mensal de 3-4 frentes/mês.

A inundação de 09 de novembro de 2009 trouxe consequências trágicas ao município, pois três estudantes foram vítimas fatais da inundação do córrego Carneirinhos. Nessa data, após um elevado volume precipitado em um curto intervalo de tempo, em torno de 2 horas, houve a destruição de vários trechos de vias públicas, e ocorreram danos no sistema de esgotamento sanitário, que ocasionaram retorno dos efluentes em vias públicas e residências. Duas instituições de saúde tiveram o atendimento prejudicado devido à invasão de águas e lama. Além disso, algumas operadoras de telefonia móvel ficaram sem sinal.

Este acontecimento provocou um prejuízo financeiro de mais de 1,3 milhão de reais aos cofres públicos e, até a data de realização desta pesquisa, foi o último evento registrado que provocou mortes em João Monlevade. A partir do Boletim Climanálise, verificou-se que havia uma convergência de umidade sobre a região central do Brasil que foi a responsável pelo grande volume de chuva precipitado (CPTEC, 2009).

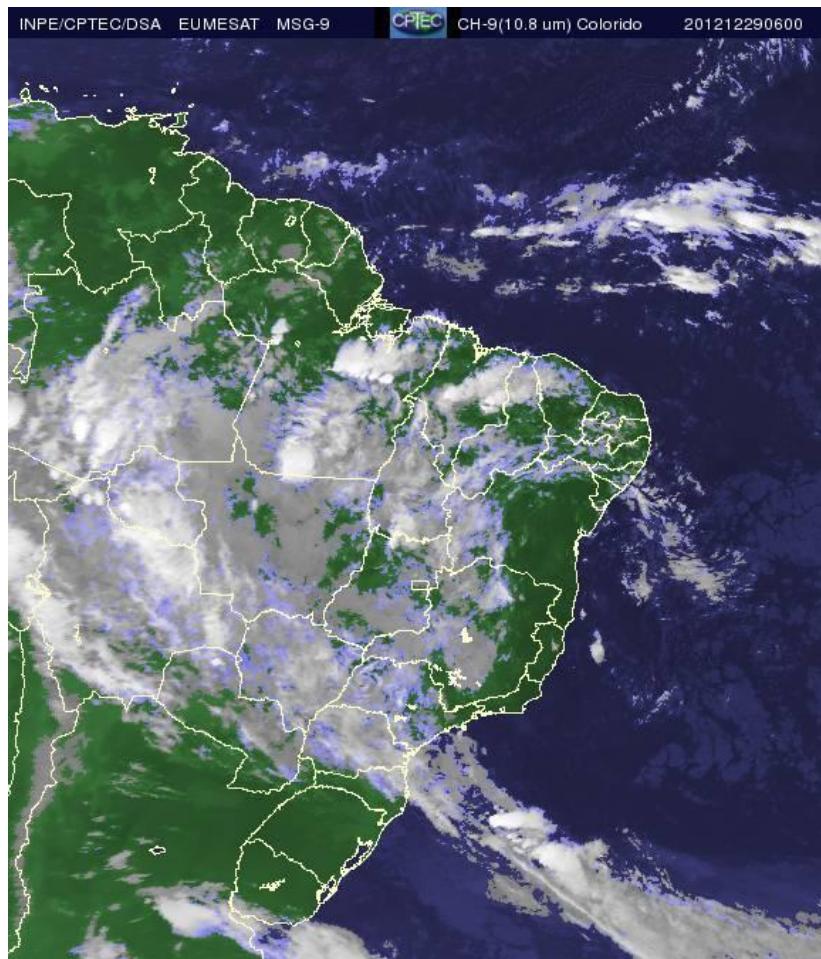
A possibilidade deste cenário ser agravado em um contexto de mudanças climáticas deve ser um elemento motivador para que os gestores públicos promovam uma readequação do sistema de drenagem do município de João Monlevade e invistam no monitoramento, prevenção e redução da ocorrência de desastres associados a eventos extremos de precipitação.

6.2.3 As inundações de 2012 a 2020

As inundações ocorridas nos anos de 2012 e 2015 a 2020 apresentaram prejuízos materiais e financeiros ao município, inclusive na região da bacia do córrego Carneirinhos. Vale salientar que os fatos aqui descritos não foram registrados no SINDEC ou órgãos de defesa civil. Dessa forma, eles foram obtidos junto aos veículos de comunicação regionais.

Nas datas destes eventos, sistemas meteorológicos distintos atuaram sobre a região. No dia 29 de dezembro de 2012, uma convergência de umidade sobre as regiões centro-oeste e sudeste do Brasil (Figura 14) e a atuação de um cavado na média e alta troposfera, associado à maior intensidade do jato subtropical, ocasionaram fortes precipitações no município (CPTEC, 2012).

Figura 14: Imagem do satélite EUMETSAT para o dia 29/12/2012.

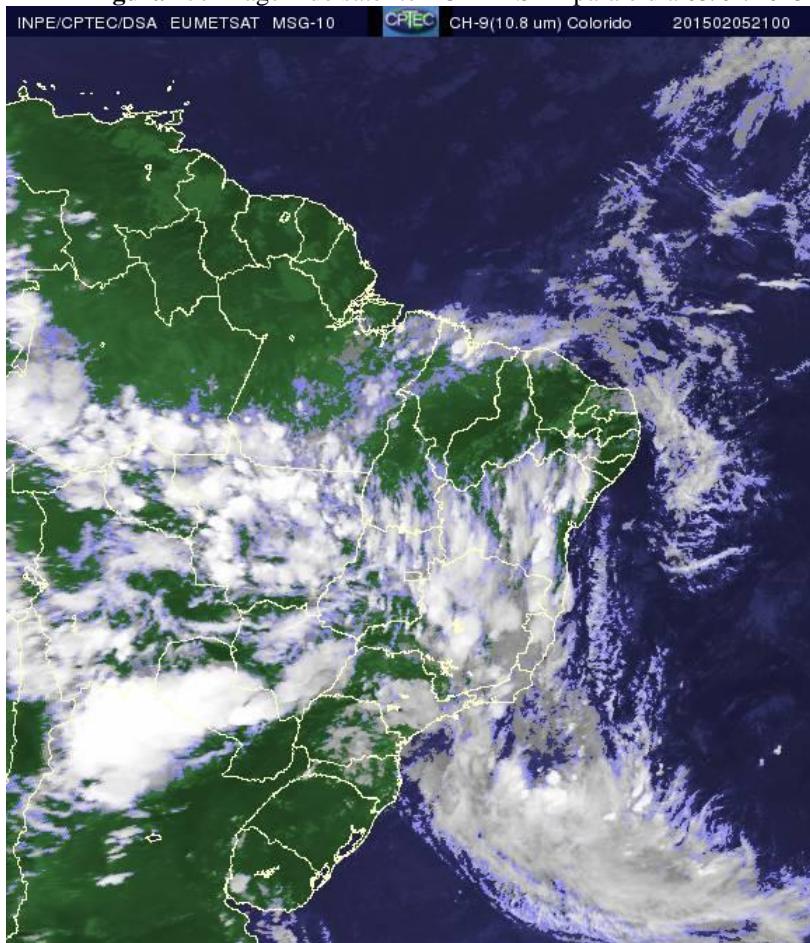


Fonte: Acervo de imagens de satélite do CPTEC/INPE (copyright 2010-2012 EUMETSAT).

A Figura 14 apresenta a imagem do satélite EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*) no infravermelho (Color IR 9), em que é possível visualizar a grande cobertura de nuvens acinzentadas (característica de nuvens mais baixas) sobre a região sudeste do Brasil que resultou em elevada precipitação em João Monlevade.

No evento do dia 05 de fevereiro de 2015, a Depressão Subtropical Bapo contribuiu para a formação da ZCAS (Figura 15) que atuou durante os dias 05 a 09/02/2015 na região do município, provocando chuvas torrenciais no município Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2015). A ZCAS é caracterizada pela permanência semi-estacionária (pelo menos quatro dias) de uma banda de nebulosidade no sentido Noroeste-Sudeste, ligada a uma acentuada região de convergência em baixos níveis (QUADRO, 1999). Este sistema ainda não é totalmente compreendido, o que dificulta a sua previsibilidade.

Figura 15: Imagem do satélite EUMETSAT para o dia 05/02/2015



Fonte: Acervo de imagens de satélite do CPTEC/INPE (copyright EUMETSAT)

A Figura 15 mostra a imagem do satélite EUMETSAT no infravermelho, ilustrando a atuação da ZCAS durante o evento do dia 05 de janeiro de 2015. Pode-se notar a presença de nuvens acinzentadas e outras mais claras, indicando a alta cobertura de nuvens baixas e altas sobre o Estado de Minas Gerais.

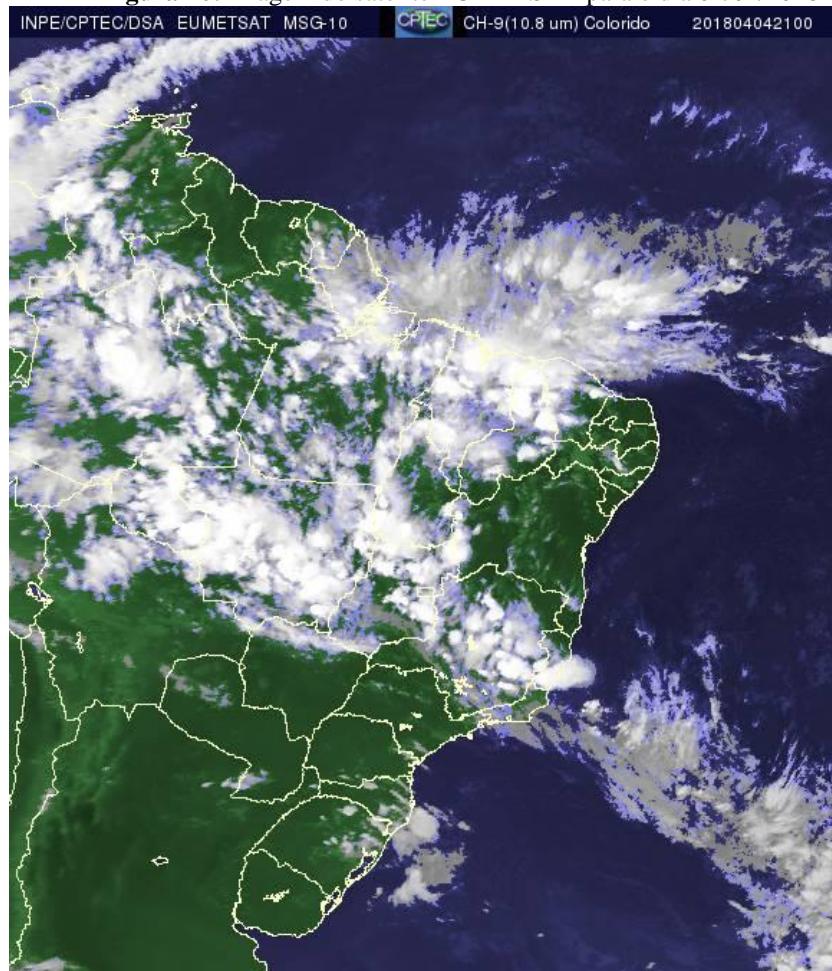
Em 18 de janeiro de 2016, houve a atuação de um sistema de baixa pressão próximo a região sudeste do país que favoreceu a formação da ZCAS, propiciando condições para a ocorrência de elevadas precipitações na região Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2016).

A Tempestade Subtropical Guará e um canal de umidade na região sudeste promoveram a atuação da ZCAS que foi responsável pela inundação de 09 de dezembro de 2017.

Entre os dias 04 a 07 de abril de 2018, um canal de umidade configurou a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) que resultou no episódio de inundação de 04 de abril de 2018 (Figura 9). A ZCOU é um sistema similar a ZCAS, uma vez que ambas são zonas de convergência de umidade marcadas por nebulosidade e precipitação intensas, mas com

diferenças em termos de escoamento nos baixos e médios níveis da atmosfera (SACRAMENTO, ESCOBAR e SILVA, 2010).

Figura 16: Imagem do satélite EUMETSAT para o dia 04/04/2018



Fonte: Acervo de imagens de satélite do CPTEC/INPE (copyright EUMETSAT)

A Figura 16 ilustra, através da imagem do satélite EUMETSAT no infravermelho, a atuação da ZCOU no episódio de inundação do dia 04 de abril de 2018. A banda de nebulosidade com orientação noroeste-sudeste, característica tanto da ZCAS, quanto da ZCOU, é facilmente visualizada através desta imagem.

Os eventos de inundação, ocorridos em 2019, foram favorecidos por um episódio de ZCAS no dia 18 de fevereiro (INMET, 2019); e em 08 de abril, houve a configuração da ZCOU (CPTEC, 2019).

Por fim, o evento de inundação ocorrido na bacia do córrego Carneirinhos em 13 de janeiro de 2020 foi resultado de um longo período chuvoso que atingiu o Brasil no primeiro mês do ano. A região Sudeste e parcelas das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste

registraram elevados volumes de precipitação no período, graças à permanência do sistema meteorológico ZCAS, típico do verão. Chuvas torrenciais aconteceram em diversos locais das regiões Sudeste e Centro-Oeste, particularmente nos Estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, Goiás e Minas Gerais, onde a estação convencional do INMET, localizada na região metropolitana da capital Belo Horizonte, registrou um acumulado de chuva de 935,2 mm, sendo que a média do período gira em torno de 330 mm (INMET, 2020).

6.3 Caracterização morfométrica da bacia

Os resultados obtidos com a análise morfométrica da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos foram compilados na Tabela 3, conforme segue:

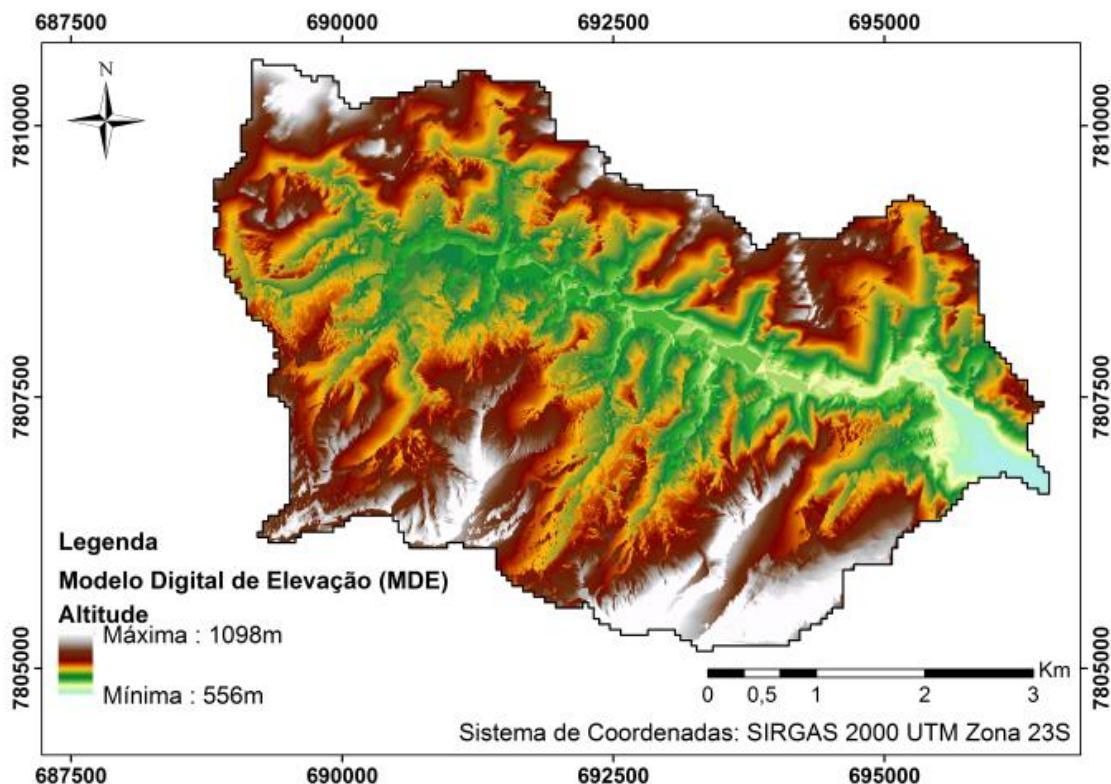
Tabela 3: Características morfométricas da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos.

GRUPO	VARIÁVEL	RESULTADO	UNIDADE	GRAU DE SUSCETIBILIDADE
Características geométricas	Área	26,54	km ²	-
	Perímetro da bacia	31,11	km	-
	Padrão de drenagem	Dendrítica	-	-
	Nº de canais de 1 ^a ordem	37	Unid	-
	Nº de canais de 2 ^a ordem	17	Unid	-
	Nº de canais de 3 ^a ordem	6	Unid	-
	Nº de canais de 4 ^a ordem	13	Unid	-
	Comprimento vetorial do canal principal	6.760,71	m	-
	Coeficiente de compacidade (Kc)	1,69	-	Baixo
	Fator de forma (Kf)	0,33	-	Baixo
Características do relevo	Índice de circularidade (IC)	0,34	-	Baixo
	Altitude máxima	1098	m	-
	Altitude mínima	556	m	-
	Amplitude altimétrica (Hm)	542	m	Alto
	Índice de sinuosidade (Is)	1,33	m/km	Alto
Características da rede de drenagem	Relação do Relevo	60,49	m/km	Alto
	Comprimento do canal principal	8,96	km	-
	Comprimento total dos canais	53,69	km	-
	Comprimento vetorial do canal principal	6,76	km	-
	Densidade de drenagem (Dd)	2,02	km/km ²	Médio
Hierarquia dos canais		4 ^a ordem	-	-

Fonte: Silva et al (2020a)

Bacias com elevadas amplitudes altimétricas apresentam menores taxas de infiltração no solo e maior velocidade de escoamento superficial da água. Como consequência desta alta velocidade do escoamento, tem-se o potencial de aumento na ocorrência de inundações nas áreas mais baixas a jusante da bacia. A amplitude altimétrica da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos é de 596 m (Figura 17).

Figura 17: MDE gerado a partir das curvas de nível do município de João Monlevade e da imagem SRTM.

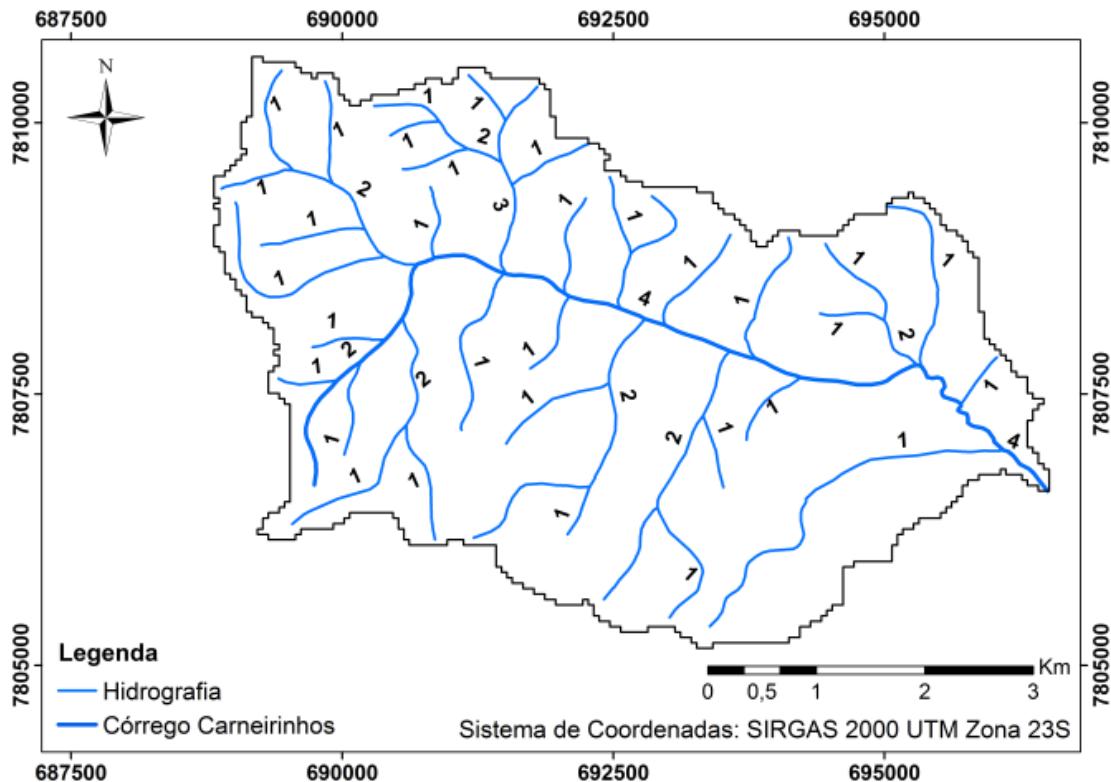


Fonte: Silva et al. (2020a)

Na bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos existem 73 cursos d’água, sendo que o comprimento do canal principal é de 8,96 km e a hierarquia dos canais é de 4^a ordem. A microbacia apresenta-se bem ramificada, contendo 37 canais de 1^a ordem, 17 canais de 2^a ordem, 6 canais de 3^a ordem e 13 canais de 4^a ordem, conforme apresentado na Figura 18.

A bacia apresenta um padrão de drenagem do tipo dendrítico (SANTOS et al., 2012). O canal principal possui muitos tributários e isso influencia diretamente em sua recarga hídrica, bem como no grau de desenvolvimento da rede de drenagem da bacia. Para Tonello et al. (2006), quanto mais ramificada a rede de drenagem de uma bacia hidrográfica, mais eficiente será seu sistema de drenagem. Além disso, os autores ressaltam que ramificações de ordem igual ou inferior a 4 são comuns em pequenas bacias hidrográficas e podem refletir os impactos diretos do uso e ocupação do solo.

Figura 18: Classificação dos cursos d'água segundo Horton-Strahler



Fonte: Silva et al. (2020a)

O comprimento vetorial do canal principal da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos é de 6.760,71 m, valor muito inferior ao do comprimento do canal principal. Em relação à densidade de drenagem, aplicando-se a Equação 2, obteve-se o valor de 2,02 km/km². Isso significa que, de acordo com a classificação proposta por Ferreira et al. (2010), apresentada Quadro 1, a bacia possui boa drenagem.

Empregando-se a Equação 3, verificou-se que o índice de sinuosidade foi igual a 1,33, ou seja, o curso d'água principal apresenta mais características de retilíneo do que sinuoso, podendo ser enquadrado como divagante (Quadro 2). Lana et al. (2001) mencionam que valores próximos a 1,0 indicam que o curso d'água tende a ser mais retilíneo, enquanto valores superiores a 2,0 indicam que o canal se apresenta mais sinuoso. A sinuosidade do curso d'água pode ser influenciada por diversos fatores, entre eles tem-se: a deposição dos sedimentos no leito do curso d'água, a estrutura geológica, e a declividade da bacia (SANTOS et al., 2016).

Por meio da Equação 4, verificou-se que a bacia, em estudo, apresenta índice de circularidade igual a 0,34. Este resultado significa que o formato da bacia não se assemelha a

um círculo, apresentando baixa suscetibilidade natural para sofrer inundações, considerando-se apenas este índice.

A relação de relevo da bacia foi obtida por meio da Equação 5 e seu resultado foi 60,49 m/km. Este valor pode ser considerado alto, de acordo com a classificação proposta por Rossi e Pfeifer (1999) apresentada no Quadro 3. Quanto maior o valor da relação de relevo, maior é a declividade do relevo e, consequentemente, menor será a taxa de infiltração e maior será o volume escoado. Ainda de acordo com Rossi e Pfeifer (1999), bacias com predomínio de rochas do grupo granito-gnáissicas e que apresentam relevo montanhoso com elevada declividade possuem índices de relação de relevo maiores.

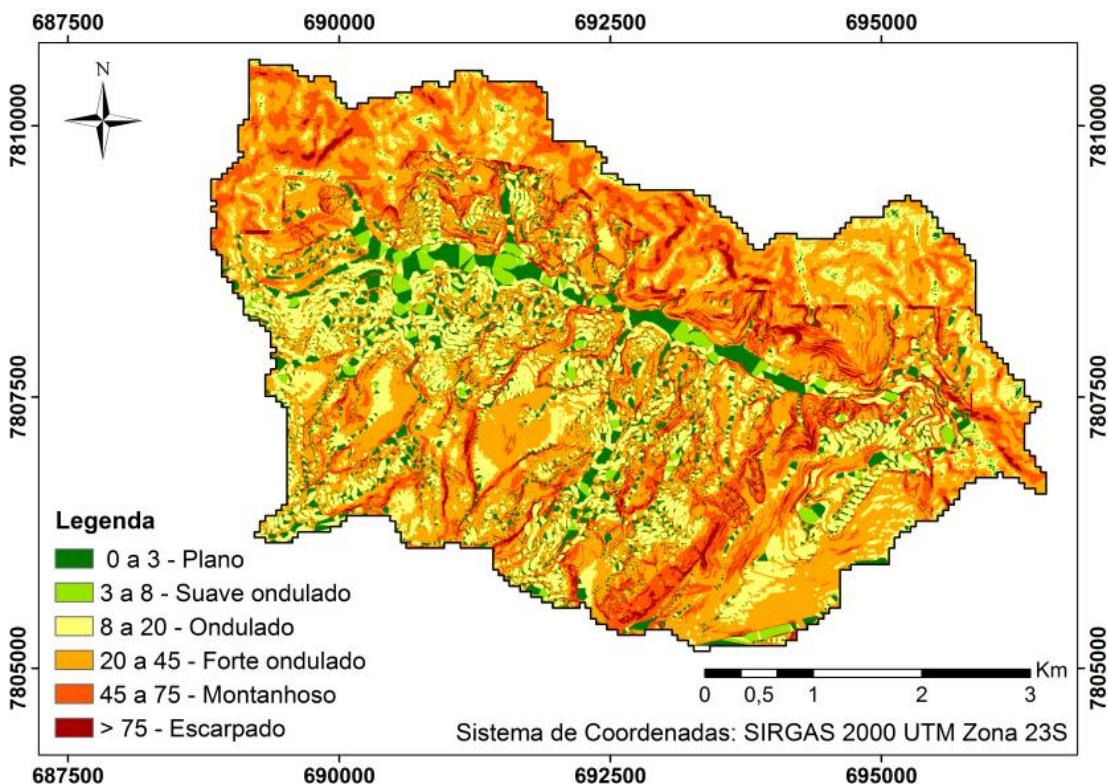
Em relação ao fator de forma (Equação 6), o resultado obtido foi igual a 0,5, que, ao ser comparado com o Quadro 4, indica que a bacia apresenta uma tendência mediana a sofrer inundações.

De acordo o valor do coeficiente de compacidade ($K_c=1,69$) obtido com a aplicação da equação 7, infere-se que a bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos apresenta baixa propensão a sofrer grandes inundações, considerando apenas este índice, conforme apresentado no Quadro 5.

6.3.1 Declividade

A partir da análise das informações geradas pelo mapa de declividade (Figura 19), verifica-se que 9,6% do terreno da bacia é considerado plano; 2,78% suave-ondulado; 21,68% como ondulado; 42,41% forte ondulado; 18,92% montanhoso e 4,61% terreno escarpado. A declividade média aproximada é de 32%, havendo predominância de terrenos enquadrados como forte ondulados, pois mais de 40% da área encontra-se nessa categoria, e praticamente 82% da bacia possui declividade entre 8 e 75% (ondulado a montanhoso).

Figura 19: Mapa de declividade da bacia



Fonte: Silva et al. (2020a)

Pode-se verificar ainda que menos de 10% da área pode ser considerada como plana, e estas áreas localizam-se próximas aos cursos d'água. Isso significa que a declividade da bacia favorece o aumento da velocidade do escoamento superficial, dificultando o processo de infiltração da água no solo e potencializando o acúmulo de água nas regiões mais baixas o que, consequentemente, propicia a ocorrência de eventos de inundações nestes locais.

6.3.2 Uso e ocupação do solo

Para a classificação do uso e ocupação do solo, por meio de uma análise visual das imagens disponíveis no *software Google Earth Pro* da área dos anos de 2005, 2016 e 2019 e prévio conhecimento da região, foram estabelecidas 6 classes principais, conforme apresentado na Tabela 4 e nas Figuras 20, 21 e 22. Na classe Água, foram consideradas todas as áreas ocupadas por água (ex.: lagos, represas, entre outros). A Área Industrial abrangeu as instalações de empresas, por exemplo, atividades de siderurgia e mineração. A classe Edificação foi composta por vias públicas, edificações, equipamentos urbanos, entre outros.

A classe Pastagem abrigou áreas cobertas por gramíneas e vegetação rasteira, onde é comum o desenvolvimento da atividade de pecuária extensiva. Foram considerados os locais sem nenhum tipo de cobertura vegetal como áreas de Solo Exposto e, por fim, a categoria Vegetação incluiu vegetação de pequeno, médio e grande porte.

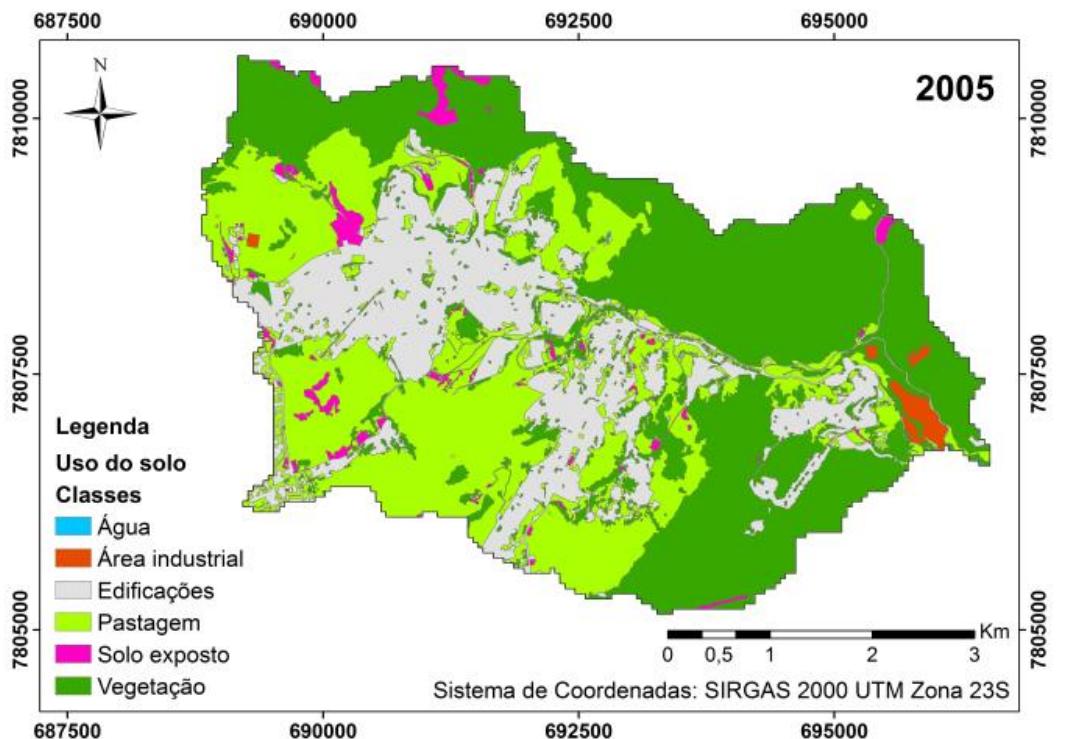
Tabela 4: Uso e ocupação do solo em João Monlevade nos anos de 2005, 2016 e 2019

Classe	2005		2016		2019	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Água	0,01	0,04%	0,01	0,04%	0,01	0,04%
Área industrial	0,21	0,80%	0,25	0,93%	0,25	0,93%
Edificações	6,06	22,83%	6,12	23,06%	6,12	23,06%
Pastagem	8,47	31,92%	8,55	32,22%	7,83	29,49%
Solo exposto	0,54	2,04%	0,51	1,91%	1,23	4,64%
Vegetação	11,25	42,38%	11,10	41,84%	11,10	41,84%
Total	26,54	100,00%	26,54	100,00%	26,54	100,00%

Fonte: Silva et al. (2020a)

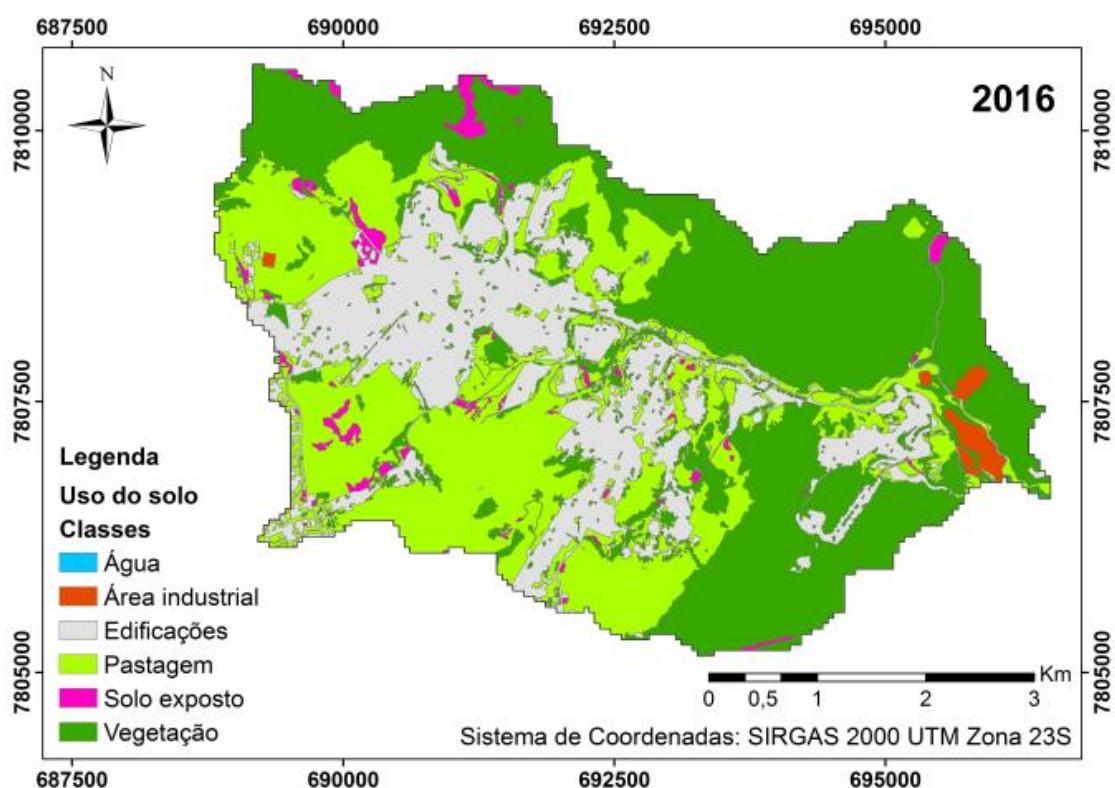
A classe Água manteve sua participação em 0,04% durante os 3 (três) anos analisados. A área industrial apresentou um aumento de 17% de 2005 para 2016 e permaneceu inalterada de 2016 a 2019. A classe Edificações apresentou comportamento similar, pois cresceu 1% de 2005 a 2016 e não sofreu alterações entre 2016 e 2019. A categoria Pastagem apresentou um crescimento de aproximadamente 1% entre 2005 e 2016 e redução de aproximadamente 8% de 2016 a 2019. A área de solo exposto apresentou uma redução de 6% no primeiro período e um aumento de mais de 140% de 2016 a 2019. A classe vegetação foi a que mais perdeu área útil, visto que sofreu uma redução de 1,3% de 2005 a 2016, contudo no período seguinte manteve-se constante.

Figura 20: Uso e ocupação da bacia no ano de 2005



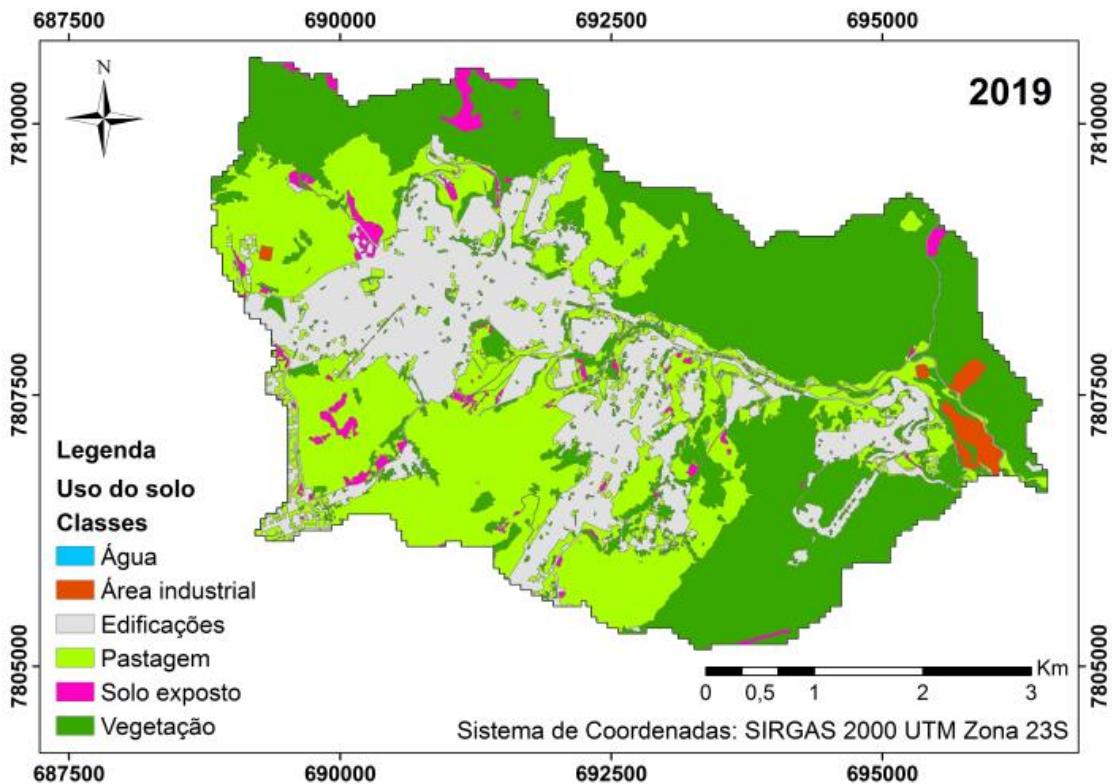
Fonte: Silva et al. (2020a)

Figura 21: Uso e ocupação da bacia no ano de 2016



Fonte: Silva et al. (2020a)

Figura 22: Mapa de uso e ocupação da bacia no ano de 2019



Fonte: Silva et al. (2020a)

Conforme apresentado na Tabela 4 e nas Figuras 20, 21 e 22, as áreas antropizadas (classes Industrial, Edificações e Pastagem) indicaram crescimento. Um dos principais fatores que contribuiu para isso foi a expansão dessas áreas dentro do perímetro urbano, fato constatado pela visualização de novos loteamentos na bacia que ainda não foram completamente ocupados, contribuindo para a ampliação da área de solos expostos.

As enchentes podem ter seus efeitos ampliados de acordo com o uso e ocupação da bacia hidrográfica, pois a retirada das vegetações nos topo de morros, a ocupação desordenada das margens dos rios, o não planejamento do crescimento das cidades e a impermeabilização do solo são alguns dos fatores que influenciam no aumento do número de casos destes eventos.

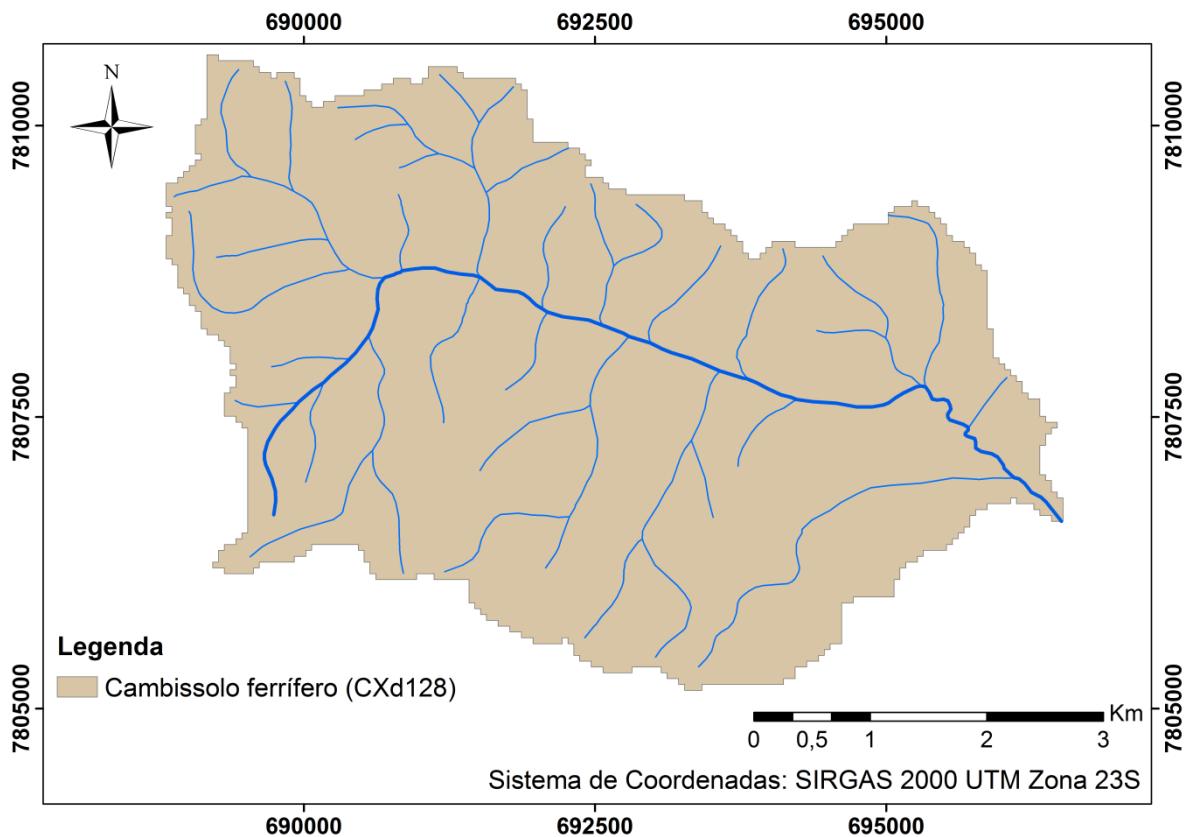
Conforme esclarecido, por meio da análise do uso e ocupação do solo foi constatado que, nos três anos analisados, os usos antrópicos prevaleceram e houve um aumento da expansão urbana. Verifica-se que esse crescimento ocorreu nas bordas das áreas ocupadas, não ocorrendo abertura de clareiras ou supressão vegetal em áreas de mata. Em 2005, o somatório das classes equivalentes aos usos antrópicos foi de 57,6%, em 2016 e 2019 foi próximo 58,1%. Isso significa que a maior parte da bacia possui usos que interferem negativamente na permeabilidade da água no solo, dificultando sua infiltração e favorecendo o escoamento

superficial e a evaporação. Esta situação contribui para a ampliação para o número de eventos de inundações na bacia.

6.3.3 Mapa de Solos

De acordo com a EMBRAPA, os solos podem ser classificados a partir de suas características físicas (SANTOS et. al., 2018). Assim, de acordo com as informações encontradas na base de dados da EMBRAPA, que resultou na elaboração da Figura 23, foi possível inferir que a classe de solo predominante dentro da área da bacia do córrego Carneirinhos é de Cambissolo ferrífero.

Figura 23: Mapa de solo da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

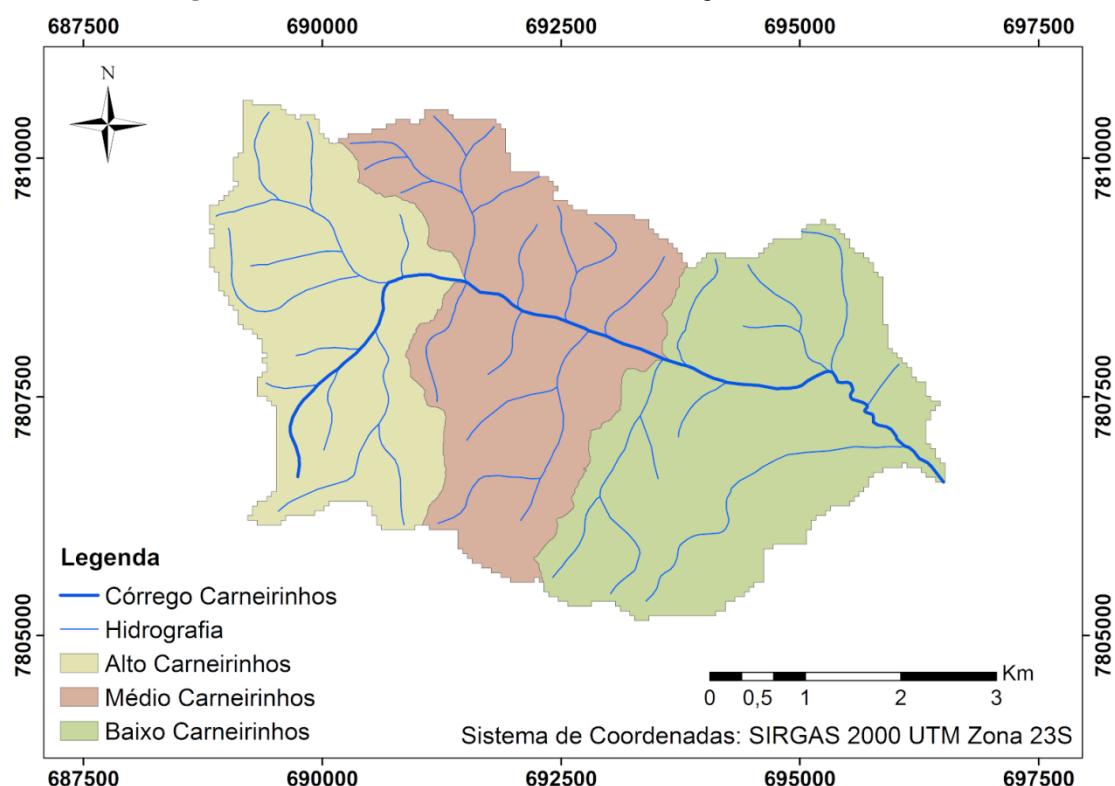
Os Cambissolos se caracterizam por apresentar baixa condutividade hidráulica e alta erodibilidade, coesão e plasticidade devido ao teor de argila. São solos jovens que estão associados a relevos accidentados (IBGE, 2007). Desse modo, os solos de toda a bacia foram

classificados como do tipo B, que são solos com pouco teor de argila, menos profundos e com mais argila do que os solos do tipo A e de média capacidade de infiltração.

6.3.4 Mapa de divisão da bacia

O resultado da divisão da bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos em três sub-bacias é apresentado na Figura 24

Figura 24: Resultado da divisão da bacia do córrego Carneirinhos em sub-bacias



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

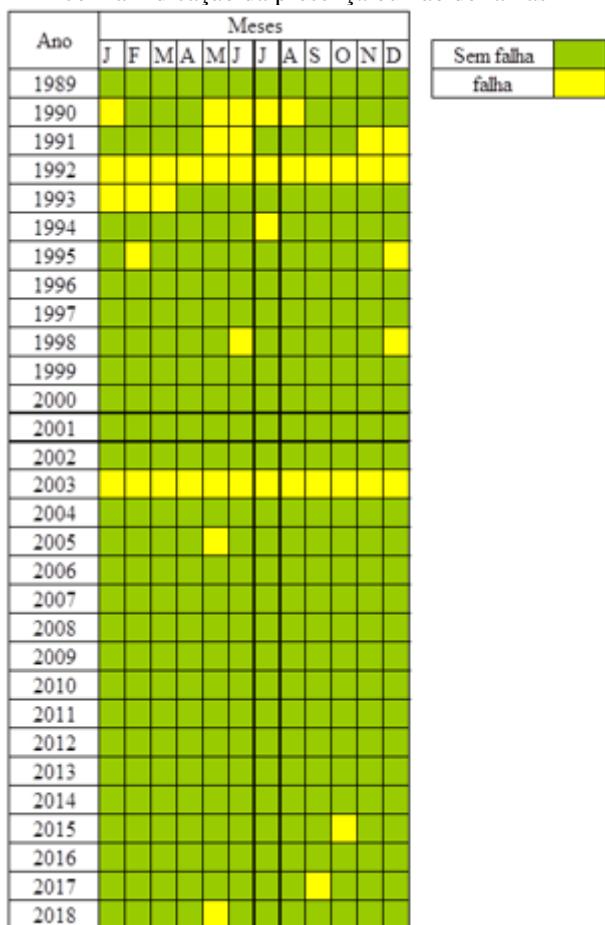
A sub-bacia do alto Carneirinhos apresenta uma área de 7,82 km² e seu exutório encontra-se no início das galerias de canalização do córrego, sob as coordenadas: E=691.451,72 e N=7.808.641.06. A sub-bacia do médio Carneirinhos possui uma área de 9,10 km² e estipulou-se seu exutório a 2 km de distância do exutório do alto Carneirinhos, com as seguintes coordenadas: E=692.766.00 e N=7.808.192.00. Por fim, a sub-bacia do baixo Carneirinhos apresenta uma área de 10,23 km², tendo seu exutório no rio Piracicaba, com coordenadas: E=696.497.55 e N=7.806.597.02.

A região do alto Carneirinhos compreende a área da bacia à montante do início da canalização do córrego. O médio Carneirinhos compreende a primeira metade do trajeto entre o início da canalização até o exutório da bacia no rio Piracicaba. Esta região é a única em que o curso d'água é totalmente canalizado e abriga a maior parte do centro comercial. O trecho final compreende o baixo Carneirinhos.

6.4 Dados hidrológicos observados

Os dados hidrológicos observados foram ordenados em anos, desde 1989 a 2018, de modo que fosse possível avaliar a distribuição da série histórica observada e identificar a presença de falhas ou dados ausentes, conforme apresentado na Figura 25:

Figura 25: Dados hidrológicos observados de 1989 a 2018 com a indicação da presença ou não de falhas



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Por meio da Figura 25, é possível notar que os dados observados atendem aos critérios de homogeneidade e continuidade, visto que menos de 10% do total da série histórica apresenta

algum tipo de falha. Além disso, há uma grande dificuldade em se obter, no Brasil, séries históricas muito longas sem a presença de falhas.

Desse modo, esta série foi considerada como sendo capaz de satisfazer as exigências mínimas para sua utilização. Assim, do total de 30 anos de dados, apenas em 2 anos completos não puderam ser obtidos os totais precipitados, além de alguns meses em que não foram realizadas medições, porém, estes, em sua grande maioria, ocorreram em períodos de estiagem na região.

A partir do ordenamento dos dados em ano hidrológicos, foi possível quantificar as máximas precipitações ocorridas em cada um dos meses e as máximas precipitações anuais, que são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Máximas precipitações mensais da série histórica de precipitação

Ano Hidrológico		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	P média máx anual
		Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	
1988	1989	0	0	0	34,8	37,4	44	15,9	3,9	56	35,1	15,2	57	57,00
1989	1990	29,9	74,8	63,4	0	27,5	17	31	0	0	0	0	43,1	74,80
1990	1991	30,2	45,8	31,2	44,7	37,5	86,5	31,7	4,9	0	0	6,1	40	86,50
1991	1992	21,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,80
1992	1993	0	0	0	0	0	0	18	2,1	6,9	0	13,8	9,6	18,00
1993	1994	31,1	24,5	83,5	41,1	0,7	83,5	19,1	23,6	10	0	0	0	83,50
1994	1995	73,5	46,8	51,5	43,5	0	42,8	22,1	3	3	0	0	13,8	73,50
1995	1996	40,6	36	0	48,3	45,9	44,6	23,1	13,8	0	0	3,2	12,9	48,30
1996	1997	30,8	66,5	55,2	145,2	9,7	91,2	29,2	9	12	0	5,8	31,9	145,20
1997	1998	55,5	52,3	74,7	63,4	111	72,5	12	36,2	0	0,8	31,9	1,5	111,00
1998	1999	34,7	24,5	0	38,6	29	50,5	17	2,4	0,6	6,2	0,3	5,3	50,50
1999	2000	31,2	64,2	47,8	50,9	49,8	37,5	19,7	1,6	0	3,9	20,6	12,4	64,20
2000	2001	31,6	50,4	73,6	33,2	21,6	38,7	8,2	7,2	12	1,4	7,4	32,5	73,60
2001	2002	38,4	77,2	33,6	63,2	46,8	19,8	7,4	16,8	0	2,8	3,2	24	77,20
2002	2003	37,6	49	79,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79,60
2003	2004	0	0	0	61,2	34,8	59,2	28,6	26,6	2,2	11	31,2	0,2	61,20
2004	2005	12,8	32,8	44	53,2	32,8	73,8	5,2	0	11,4	0,8	2,2	44,2	73,80
2005	2006	40,8	49,8	40,6	36,4	38,6	82,6	62,8	10,2	8,6	5,6	9,2	25,2	82,60
2006	2007	37	65	47	54,4	32,4	24,6	20	3,2	6	2,8	0,2	1,2	65,00
2007	2008	37	49,2	21,2	41	33,2	26,8	42,4	5	0,6	0	55,8	30,6	55,80
2008	2009	44,8	36,2	68,8	71,4	63,8	76	59,6	4,2	21	1,2	1,6	39,8	76,00
2009	2010	49,2	103	79	29,6	23,2	82,8	36,8	21,8	1,2	2,8	0	5,2	103,00
2010	2011	23,2	68,8	53,8	52,2	17	60,2	19,6	10,2	9,2	1,6	0,6	10,2	68,80
2011	2012	43,8	75,2	115,2	60,2	4,2	68,2	4,8	24,4	2,2	1	6,4	3,2	115,20
2012	2013	14,8	99	21	46,2	44,6	20,6	16,6	26	28	31,2	1,8	31,2	99,00
2013	2014	17,8	32,4	73,4	68,8	33	39	50,2	0,6	2,8	11,6	18,2	0,8	73,40
2014	2015	46,2	65	48	2,8	31,6	38,2	58,4	31,2	13,8	14,8	12,2	14,4	65,00
2015	2016	0	61,2	23	64,2	32,6	23,2	64,3	2,4	8,8	0,7	0,4	30,4	64,30
2016	2017	22,4	60,6	35,6	39,8	16,4	72,4	56,2	11,2	2,2	1,8	0	0	72,40
2017	2018	25,4	29,2	42,8	69,4	89,8	73,2	60,2	5,6	0,8	14	14,8	14,8	89,80
2018	2019	29,2	42,6	54,8										54,80

Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

A partir da Tabela 5 é possível inferir que o menor volume de precipitação registrado entre as máximas precipitações anuais foi de 18 mm e o maior de 145,20 mm, e que mais de 57% dos valores de precipitação registrados encontram-se acima de 70mm. A média dos 30 anos das precipitações máximas é de aproximadamente 73,85 mm.

6.4.1 Curve Number (CN)

Após a combinação das informações dos mapas de declividade e de solos e das características dos grupos hidrológicos de solos (Quadro 1) presumiu-se que o grupo hidrológico de solo predominante na bacia é o tipo B. Em seguida, realizaram-se os cálculos do CN a partir das características e valores deste grupo para cada variável.

Os valores de CN obtidos para cada sub-bacia são apresentados na Tabela 6. A sub-bacia alto Carneirinhos apresentou um CN de 73, devido a predominância dos usos antrópicos nesta área da bacia, com mais de 84% da ocupação do solo, o que favorece o escoamento superficial. A parte ocupada pelo médio Carneirinhos apresentou um valor de CN igual a 70, o qual é condizente com os usos preponderantes para esta área, onde se localiza o centro comercial do município de João Monlevade; além disso, cerca de 68% dos usos do solo nesta região são antrópicos, ou seja, favorecem o escoamento superficial.

Por fim, a região do baixo Carneirinhos foi a que apresentou o menor valor de CN entre as três áreas analisadas, sendo o valor de CN igual a 65 para esta região, o que se deve, em partes, pelo fato de que, nesta área, há um baixo índice de ocupação por atividades antrópicas, menos de 50% do total da área. Além disso, esta parte da bacia é a que apresenta a maior concentração de vegetação, em comparação com o restante da bacia, uma vez que ela faz parte das áreas de preservação de uma grande empresa privada do município, o que significa que a ocupação desta área foi limitada e controlada.

Tabela 6: Resultados do CN para cada uma das sub-bacias do córrego Carneirinhos.

Sub-bacia	Classe	Área (km ²)	Solo	Classe de uso	CN médio da classe	CN da classe	CN médio
Alto Carneirinhos	Água	0	B	Água	100	0,00	
	Área industrial	0,013831	B	Zonas industriais	88	1,22	
	Edificações	2,26517	B	Zonas residenciais maiores que 4.000 m ²	68	154,03	
	Pastagem	3,7371	B	Pastagem ou terrenos com vegetação de pequeno porte	79	295,23	73
	Solo exposto	0,540949	B	Terrenos em más condições	79	42,73	
	Vegetação	1,25953	B	Floresta normal	60	75,57	
Total					Soma	568,79	
Médio Carneirinhos	Água	0,004581	B	Água	100	0,46	
	Área industrial	0	B	Zonas industriais	88	0,00	
	Edificações	2,71437	B	Zonas residenciais maiores que 4.000 m ²	68	184,58	
	Pastagem	2,98889	B	Pastagem ou terrenos com vegetação de pequeno porte	79	236,12	70
	Solo exposto	0,463203	B	Terrenos em más condições	79	36,59	
	Vegetação	2,9323	B	Floresta normal	60	175,94	
Total					Soma	633,69	
Baixo Carneirinhos	Água	0,005375	B	Água	100	0,54	
	Área industrial	0,232727	B	Zonas industriais	88	20,48	
	Edificações	1,14029	B	Zonas residenciais maiores que 4.000 m ²	68	77,54	
	Pastagem	1,82243	B	Pastagem ou terrenos com vegetação de pequeno porte	79	143,97	65
	Solo exposto	0,118544	B	Terrenos em más condições	79	9,36	
	Vegetação	6,90962	B	Floresta normal	60	414,58	
Total					Soma	666,47	

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

Portanto, pode-se constatar que todas as sub-bacias possuem uma capacidade entre moderada e grande de produzir escoamento superficial. Isso se justifica porque, quanto mais próximo o valor de CN estiver de 100, maior será o potencial do solo em gerar escoamento superficial.

6.4.2 Tempo de concentração

Os tempos de concentração, encontrados na bacia do córrego Carneirinhos, foram relativamente pequenos, o que se deve à grande amplitude altimétrica da bacia, ou seja, a bacia apresenta muitas encostas com grandes desníveis, fazendo com que a declividade média do curso d'água principal seja elevada.

Os valores encontrados para os tempos de concentração, por meio da fórmula de *Ven te chow* foram todos superiores aos encontrados por meio da fórmula de Kirpich. Em média, estes valores foram próximos a 9% acima dos valores obtidos pelo método de Kirpich, porém, devido à pequena dimensão da área da bacia, os valores encontrados podem ser considerados representativos. Os tempos de concentração para cada sub-bacia são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Tempo de concentração para cada sub-bacia a partir das equações de Kirpich e Ven te Chow

Sub-bacia	<i>Kirpich (min)</i>	<i>Ven te chow (min)</i>
Alto	19,84	21,90
Médio	15,53	17,86
Baixo	24,49	26,08

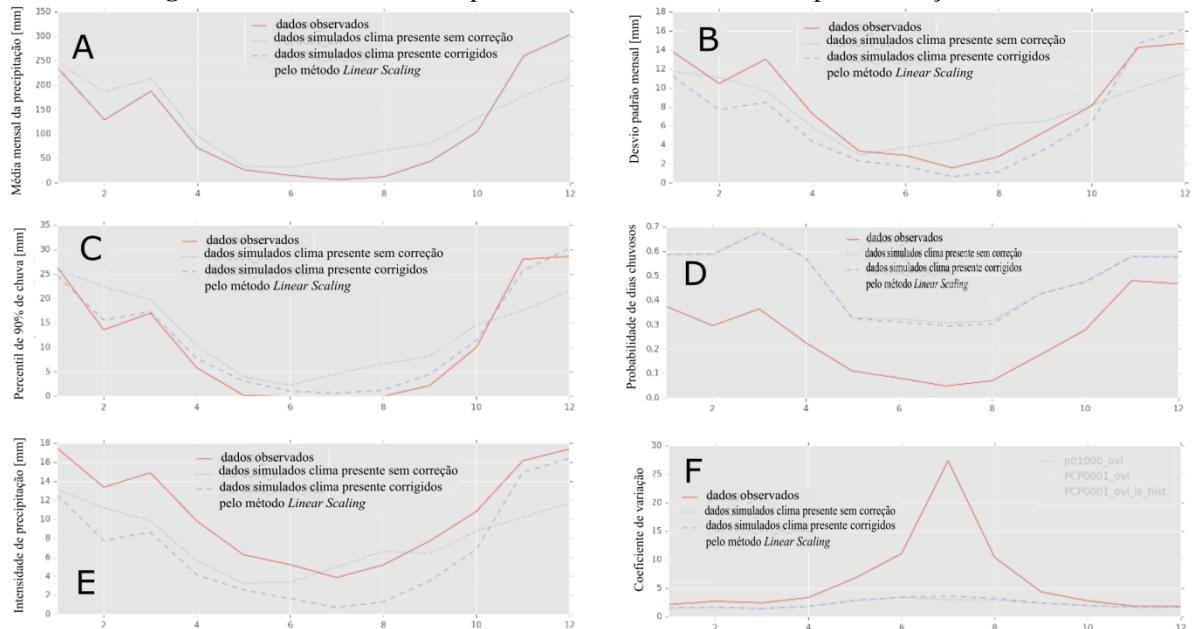
Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

Pode-se notar, por meio da Tabela 3, que a parte mais baixa da bacia foi a que apresentou o maior tempo de concentração entre as três áreas analisadas. Isso se deve ao fato desta parte da bacia apresentar menor desnível no curso d'água e o maior trecho do córrego Carneirinhos.

6.4.3 Correção de viés

Após a realização da correção do viés no *software* CMhyd, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 26. A partir deles, foi possível observar a qualidade da correção efetuada.

Figura 26: Resultado dos comportamentos dos dados antes e após a correção de viés



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A partir dos gráficos gerados, observou-se que a média mensal de precipitação (mm) corrigida resultou em um bom ajuste aos dados observados (Figura 26A). Nota-se também uma melhoria no desvio padrão e no percentil de 90% de chuva (Figuras 26B e 26C). Contudo, as diferenças entre os dados observados e simulados são ainda significativas nos meses chuvosos (Figura 26D) e, neste caso, a correção praticamente não fez efeito, indicando que as precipitações simuladas pelo modelo ETA-HADGEM2-ES tendem a apresentar uma probabilidade maior de dias chuvosos.

Apesar de haver melhoria na representação da intensidade de precipitação (Figura 26E), ainda existem diferenças notáveis entre os dados observados e simulados, com subestimação na intensidade de precipitação no caso da série temporal corrigida.

Finalmente, o coeficiente de variação (Figura 26F) também apresenta diferenças nos meses de estiagem (junho a agosto) entre os dados simulados e os observados, e a correção

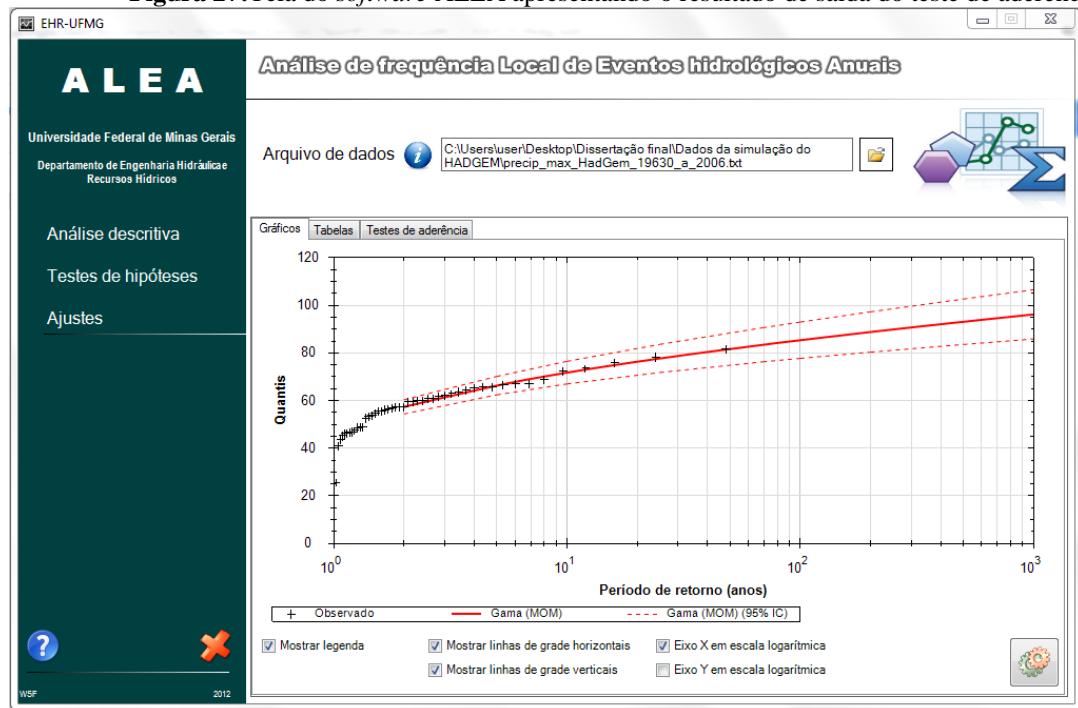
praticamente não produz efeito. Os meses de estiagem apresentam uma variação maior em termos do número de dias com chuvas do que os períodos chuvosos que apresentam certa regularidade neste quesito. Talvez pelo fato de o modelo ETA-HADGEM2-ES apresentar maior probabilidade de dias chuvosos, o coeficiente de variação é pequeno e praticamente constante no decorrer do ano.

6.4.4 Resultados das análises estatísticas e testes de aderência

A análise estatística e o teste de aderência indicaram que a distribuição que melhor representa todas as séries de dados analisados é a de Gumbel (Figura 27). Assim, esta foi utilizada como o modelo de distribuição de eventos extremos máximos, por meio do *software* ALEA para análise dos eventos extremos nos tempos de retorno TR 05, TR 10, TR 15, TR 20, TR 25, TR 30, TR 50 e TR 100, para as durações de 0, 10, 20, 30, 40, ..., 350 e 360 minutos, respectivamente. Segundo Tucci (2009), esse modelo de distribuição é o mais utilizado para eventos hidrológicos.

Uma vez definido o modelo de distribuição de frequência, foi executado o teste de aderência, em que foi adotado o Método de Komolgorov-Smirnov, que é o mais empregado nos estudos sobre precipitações.

Figura 27:Tela do *software* ALEA apresentando o resultado de saída do teste de aderência



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Após o tratamento dos dados no *software* Alea, averiguou-se que a distribuição Gama (MOM) apresentou a melhor aderência junto aos dados observados. Para os dados simulados para o clima do presente e do futuro, a distribuição que melhor os representou foi a Gama, com a adoção do método da máxima verossimilhança (MMV) e a posição de plotagem empregada foi a de Weibull. O intervalo de confiança das análises foi de 95%, apresentando resultado significativo para todos os fatores citados.

A Tabela 8 apresenta os resultados da desagregação, distribuição e ordenamento das precipitações com tempo de retorno de 5 anos (TR 05), seguindo o método dos blocos alternados.

Tabela 8: Resultados da desagregação das chuvas com TR 05

ORDE M	T (min)	P ACUM (mm)*	P INCREMENTAL (mm)**	P REARRANJO (mm)***
1	10	18,97	18,97	0,51
2	20	31,56	12,59	0,54
3	30	38,93	7,37	0,58
4	40	44,15	5,23	0,62
5	50	48,21	4,05	0,66
6	60	51,52	3,31	0,71
7	70	54,32	2,80	0,77
8	80	56,75	2,43	0,85
9	90	58,89	2,14	0,93
10	100	60,80	1,91	1,04
11	110	62,53	1,73	1,17
12	120	64,11	1,58	1,35
13	130	65,57	1,45	1,58
14	140	66,91	1,35	1,91
15	150	68,17	1,25	2,43
16	160	69,34	1,17	3,31
17	170	70,44	1,10	5,23
18	180	71,48	1,04	7,37
19	190	72,46	0,98	18,97
20	200	73,39	0,93	12,59
21	210	74,28	0,89	4,05
22	220	75,13	0,85	2,8
23	230	75,93	0,81	2,14
24	240	76,71	0,77	1,73
25	250	77,45	0,74	1,45
26	260	78,16	0,71	1,25
27	270	78,85	0,69	1,1
28	280	79,51	0,66	0,98
29	290	80,14	0,64	0,89
30	300	80,76	0,62	0,81
31	310	81,36	0,60	0,74
32	320	81,93	0,58	0,69
33	330	82,49	0,56	0,64
34	340	83,03	0,54	0,6

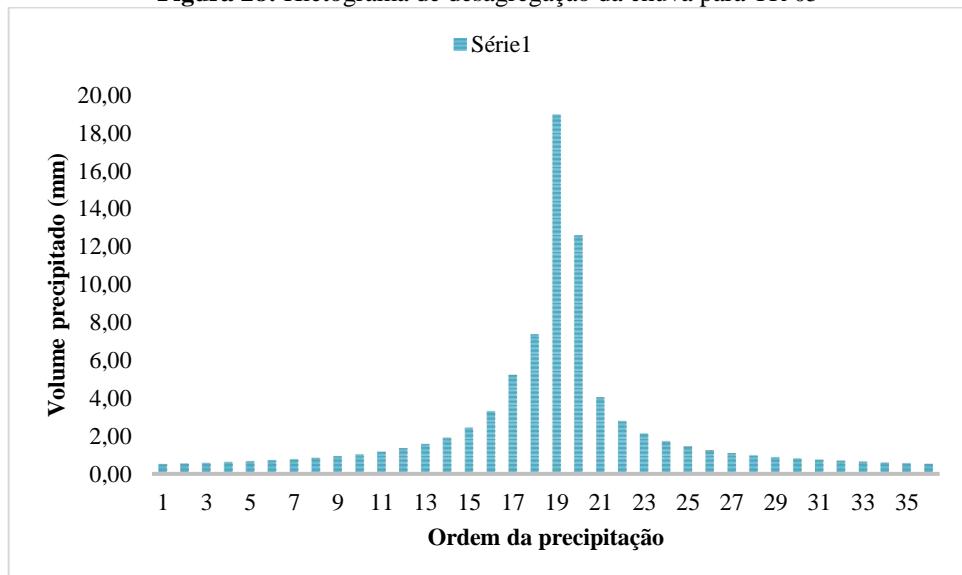
35	350	83,56	0,53	0,56
36	360	84,07	0,51	0,53

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

*precipitação acumulada em mm; **precipitação incremental em mm; ***precipitação reordenadas conforme o método dos blocos alternados

O intervalo de tempo entre as chuvas foi de 10 em 10 minutos, e o total acumulado foi de 84,07 mm em 06 horas de precipitação. A chuva foi reordenada de modo que a máxima precipitação ocorresse na metade do intervalo de tempo de duração das chuvas, aproximadamente 03 horas após o início, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28: Hietograma de desagregação da chuva para TR 05



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

O hietograma representado pela Figura 28 aponta a distribuição das precipitações com TR05, seguindo a metodologia dos blocos alternados, onde se posicionou a maior precipitação no centro do hietograma e alternou as demais precipitações.

O procedimento de desagregação das chuvas e elaboração do hietograma foi repetido para todos os tempos de retorno analisados nesta pesquisa.

6.4.4.1 Simulações no HEC-HMS

Com o objetivo de obter as condições mais extremas, ou seja, a maior e a menor solicitação de escoamento suportado pelas galerias do córrego Carneirinhos, realizaram-se simulações, variando-se a espacialidade das precipitações no tempo e na área de estudo. O Quadro 7 apresenta a descrição das combinações das variáveis empregadas nas simulações.

Quadro 7: Combinações das variáveis de ocorrência de precipitação simuladas

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO
TR (ano)	Considera precipitações distribuídas uniformemente ao longo de toda bacia (alto, médio e baixo)
TR (ano) A	Considera a concentração das precipitações no alto Carneirinhos
TR (ano) M	Considera a concentração das precipitações no médio Carneirinhos
TR (ano) B	Considera a concentração das precipitações no baixo Carneirinhos
TR (ano) AM	Considera a concentração das precipitações no alto e médio Carneirinhos
TR (ano) AB	Considera a concentração das precipitações no alto e baixo Carneirinhos
TR (ano) MB	Considera a concentração das precipitações no médio e baixo Carneirinhos

Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

Realizaram-se as simulações com os dados observados e simulados para o clima do presente e do futuro. Ao todo, foram obtidos 504 resultados a partir das combinações de precipitações e distribuição ao longo da bacia, os quais são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Compilado dos resultados obtidos durante as simulações hidrológicas com o modelo HEC-HMS

Combinação	Sub-bacia	DADOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA		PRESENTE MODELO HADGEM		FUTURO MODELO HADGEM			VIÉS PERCENTUAL VAZÃO		VIÉS PERCENTUAL PRECIPITAÇÃO	
		Vazão de pico	Precipitação (mm)	Vazão de pico	Precipitação (mm)	Vazão de pico	Precipitação (mm)	Hora do pico	Modelo (presente) - observado	Futuro-presente	Modelo (presente)-observado	Futuro-presente
TR05	Alto	84,50	84,07	65,70	71,87	48,60	59,67	3:10	-22,25%	-26,03%	-14,51%	-16,98%
	Médio	119,20	84,07	93,10	71,87	69,10	59,67	3:40	-21,90%	-25,78%	-14,51%	-16,98%
	Baixo	138,30	84,07	106,90	71,87	78,40	59,67	3:50	-22,70%	-26,66%	-14,51%	-16,98%
TR05 A	Alto	84,50	84,07	65,70	71,87	48,60	59,67	3:10	-22,25%	-26,03%	-14,51%	-16,98%
	Médio	82,10	0,00	63,90	0,00	47,30	0,00	3:40	-22,17%	-25,98%	-	-
	Baixo	82,10	0,00	63,90	0,00	47,30	0,00	4:20	-22,17%	-25,98%	-	-
TR05M	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
	Médio	95,60	84,07	74,20	71,87	54,70	59,67	3:10	-22,38%	-26,28%	-14,51%	-16,98%
	Baixo	95,60	0,00	74,20	0,00	54,70	0,00	3:50	-22,38%	-26,28%	-	-
TR05 B	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
	Médio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
	Baixo	55,60	84,07	39,50	71,87	25,90	59,67	3:20	-28,96%	-34,43%	-14,51%	-16,98%
TR05 AM	Alto	84,50	84,07	65,70	71,87	48,60	59,67	3:10	-22,25%	-26,03%	-14,51%	-16,98%
	Médio	119,20	84,07	93,10	71,87	69,10	59,67	3:40	-21,90%	-25,78%	-14,51%	-16,98%
	Baixo	119,20	0,00	93,10	0,00	69,10	0,00	4:20	-21,90%	-25,78%	-	-

Continua

		Alto	84,50	84,07	65,70	71,87	48,60	59,67	3:10	-22,25%	-26,03%	-14,51%	-16,98%
TR05 AB	Médio	82,10	0,00	63,90	0,00	47,30	0,00	3:40	-22,17%	-25,98%	-	-	-
	Baixo	97,30	84,07	75,30	71,87	55,20	59,67	4:20	-22,61%	-26,69%	-14,51%	-16,98%	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
TR05 MB	Médio	95,60	84,07	74,20	71,87	54,70	59,67	3:10	-22,38%	-26,28%	-14,51%	-16,98%	-
	Baixo	124,80	84,07	95,70	71,87	69,20	59,67	3:50	-23,32%	-27,69%	-14,51%	-16,98%	-
	Alto	103,50	95,92	75,90	78,81	62,50	69,83	3:10	-26,67%	-17,65%	-17,84%	-11,39%	-
TR10	Médio	145,50	95,92	107,50	78,81	88,80	69,83	3:40	-26,12%	-17,40%	-17,84%	-11,39%	-
	Baixo	170,80	95,92	124,20	78,81	101,70	69,83	3:50	-27,28%	-18,12%	-17,84%	-11,39%	-
	Alto	103,50	95,92	75,90	78,81	62,50	69,83	3:10	-26,67%	-17,65%	-17,84%	-11,39%	-
TR10 A	Médio	100,50	0,00	73,90	0,00	60,80	0,00	3:40	-26,47%	-17,73%	-	-	-
	Baixo	100,50	0,00	73,90	0,00	60,80	0,00	4:20	-26,47%	-17,73%	-	-	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
TR10 M	Médio	117,50	95,92	85,80	78,81	70,50	69,83	3:10	-26,98%	-17,83%	-17,84%	-11,39%	-
	Baixo	117,50	0,00	85,80	0,00	70,50	0,00	3:50	-26,98%	-17,83%	-	-	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
TR10 B	Médio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
	Baixo	72,80	95,92	48,30	78,81	36,90	69,83	3:20	-33,65%	-23,60%	-17,84%	-11,39%	-
	Alto	103,50	95,92	75,90	78,81	62,50	69,83	3:10	-26,67%	-17,65%	-17,84%	-11,39%	-
TR10AM	Médio	145,50	95,92	107,50	78,81	88,80	69,83	3:40	-26,12%	-17,40%	-17,84%	-11,39%	-
	Baixo	145,50	0,00	107,50	0,00	88,80	0,00	4:20	-26,12%	-17,40%	-	-	-
	Alto	103,50	95,92	75,90	78,81	62,50	69,83	3:10	-26,67%	-17,65%	-17,84%	-11,39%	-
TR10 AB	Médio	100,50	0,00	73,90	0,00	60,80	0,00	3:40	-26,47%	-17,73%	-	-	-
	Baixo	119,60	95,92	87,40	78,81	71,60	69,83	4:20	-26,92%	-18,08%	-17,84%	-11,39%	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
TR10 MB	Médio	117,50	95,92	85,80	78,81	70,50	69,83	3:10	-26,98%	-17,83%	-17,84%	-11,39%	-
	Baixo	154,60	95,92	111,60	78,81	90,80	69,83	3:50	-27,81%	-18,64%	-17,84%	-11,39%	-
	Alto	114,60	102,60	80,60	81,89	71,20	75,78	3:10	-29,67%	-11,66%	-20,19%	-7,46%	-
TR 15	Médio	160,90	102,60	114,10	81,89	101,00	75,78	3:40	-29,09%	-11,48%	-20,19%	-7,46%	-
	Baixo	190,10	102,60	132,10	81,89	116,30	75,78	3:50	-30,51%	-11,96%	-20,19%	-7,46%	-
	Alto	114,60	102,60	80,60	81,89	71,20	75,78	3:10	-29,67%	-11,66%	-20,19%	-7,46%	-
TR15 A	Médio	111,20	0,00	78,40	0,00	69,30	0,00	3:40	-29,50%	-11,61%	-	-	-
	Baixo	111,20	0,00	78,40	0,00	69,30	0,00	4:20	-29,50%	-11,61%	-	-	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
TR15 M	Médio	130,30	102,60	91,20	81,89	80,40	75,78	3:10	-30,01%	-11,84%	-20,19%	-7,46%	-
	Baixo	130,30	0,00	91,20	0,00	80,40	0,00	3:50	-30,01%	-11,84%	-	-	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
TR15 B	Médio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
	Baixo	83,20	102,60	52,40	81,89	44,30	75,78	3:20	-37,02%	-15,46%	-20,19%	-7,46%	-
	Alto	114,60	102,60	80,60	81,89	71,20	75,78	3:10	-29,67%	-11,66%	-20,19%	-7,46%	-
TR15 AM	Médio	160,90	102,60	114,10	81,89	101,00	75,78	3:40	-29,09%	-11,48%	-20,19%	-7,46%	-
	Baixo	160,90	0,00	114,10	0,00	101,00	0,00	4:20	-29,09%	-11,48%	-	-	-
	Alto	114,60	102,60	80,60	81,89	71,20	75,78	3:10	-29,67%	-11,66%	-20,19%	-7,46%	-
TR15 AB	Médio	111,20	0,00	78,40	0,00	69,30	0,00	3:40	-29,50%	-11,61%	-	-	-
	Baixo	132,60	102,60	92,90	81,89	81,90	75,78	4:20	-29,94%	-11,84%	-20,19%	-7,46%	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	-
TR15 MB	Médio	130,30	102,60	91,20	81,89	80,40	75,78	3:10	-30,01%	-11,84%	-20,19%	-7,46%	-
	Baixo	172,20	102,60	118,90	81,89	104,30	75,78	3:50	-30,95%	-12,28%	-20,19%	-7,46%	-
	Alto	122,40	107,26	83,40	83,76	77,50	80,00	3:10	-31,86%	-7,07%	-21,91%	-4,49%	-
TR 20	Médio	171,70	107,26	118,10	83,76	109,80	80,00	3:40	-31,22%	-7,03%	-21,91%	-4,49%	-
	Baixo	203,80	107,26	136,90	83,76	126,90	80,00	3:50	-32,83%	-7,30%	-21,91%	-4,49%	-

TR20 A	Alto	122,40	107,26	83,40	83,76	77,50	80,00	3:10	31,86%	-7,07%	-21,91%	-4,49%
	Médio	118,80	0,00	81,10	0,00	75,40	0,00	3:40	31,73%	-7,03%	-	-
TR20 M	Baixo	118,80	0,00	81,10	0,00	75,40	0,00	4:20	31,73%	-7,03%	-	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
TR20 B	Médio	139,30	107,26	94,40	83,76	87,60	80,00	3:10	32,23%	-7,20%	-21,91%	-4,49%
	Baixo	139,30	0,00	94,40	0,00	87,60	0,00	3:50	32,23%	-7,20%	-	-
TR20 AM	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
	Médio	122,40	107,26	83,40	83,76	77,50	80,00	3:10	31,86%	-7,07%	-21,91%	-4,49%
TR20AM	Baixo	171,70	107,26	118,10	83,76	109,80	80,00	3:40	31,22%	-7,03%	-21,91%	-4,49%
	Alto	171,70	0,00	118,10	0,00	109,80	0,00	4:20	31,22%	-7,03%	-	-
TR20 AB	Alto	122,40	107,26	83,40	83,76	77,50	80,00	3:10	31,86%	-7,07%	-21,91%	-4,49%
	Médio	118,80	0,00	81,10	0,00	75,40	0,00	3:40	31,73%	-7,03%	-	-
TR20 MB	Baixo	141,70	107,26	96,20	83,76	89,30	80,00	4:20	32,11%	-7,17%	-21,91%	-4,49%
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
TR20 MB	Médio	139,30	107,26	94,40	83,76	87,60	80,00	3:10	32,23%	-7,20%	-21,91%	-4,49%
	Baixo	184,60	107,26	123,40	83,76	114,20	80,00	3:50	33,15%	-7,46%	-21,91%	-4,49%
TR 25	Alto	128,50	110,85	85,40	85,05	82,50	83,27	3:10	33,54%	-3,40%	-23,27%	-2,09%
	Médio	180,10	110,85	120,90	85,05	116,90	83,27	3:40	32,87%	-3,31%	-23,27%	-2,09%
TR25 A	Baixo	214,50	110,85	140,30	85,05	135,50	83,27	3:50	34,59%	-3,42%	-23,27%	-2,09%
	Alto	128,50	110,85	85,40	85,05	82,50	83,27	3:10	33,54%	-3,40%	-23,27%	-2,09%
TR25 M	Médio	124,70	0,00	83,00	0,00	80,30	0,00	3:40	33,44%	-3,25%	-	-
	Baixo	124,70	0,00	83,00	0,00	80,30	0,00	4:20	33,44%	-3,25%	-	-
TR25 B	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
	Médio	146,40	110,85	96,60	85,05	93,40	83,27	3:10	34,02%	-3,31%	-23,27%	-2,09%
TR25AM	Baixo	146,40	0,00	96,60	0,00	93,40	0,00	3:50	34,02%	-3,31%	-	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
TR25 AB	Médio	180,10	110,85	120,90	85,05	116,90	83,27	3:40	32,87%	-3,31%	-23,27%	-2,09%
	Baixo	180,10	0,00	120,90	0,00	116,90	0,00	4:20	32,87%	-3,31%	-	-
TR25 MB	Alto	128,50	110,85	85,40	85,05	82,50	83,27	3:10	33,54%	-3,40%	-23,27%	-2,09%
	Médio	146,40	110,85	96,60	85,05	93,40	83,27	3:40	34,02%	-3,31%	-23,27%	-2,09%
TR30	Baixo	96,50	110,85	56,70	85,05	56,70	83,27	3:20	41,24%	0,00%	-23,27%	-2,09%
	Alto	128,50	110,85	85,40	85,05	82,50	83,27	3:10	33,54%	-3,40%	-23,27%	-2,09%
TR30 A	Médio	180,10	110,85	120,90	85,05	116,90	83,27	3:40	32,87%	-3,31%	-23,27%	-2,09%
	Baixo	180,10	0,00	120,90	0,00	116,90	0,00	4:20	32,87%	-3,31%	-	-
TR30 M	Alto	133,50	113,77	86,80	86,02	86,70	85,94	3:10	34,98%	-0,12%	-24,39%	-0,09%
	Médio	187,00	113,77	122,90	86,02	122,70	85,94	3:40	34,28%	-0,16%	-24,39%	-0,09%
TR30 B	Baixo	223,40	113,77	142,80	86,02	142,60	85,94	3:50	36,08%	-0,14%	-24,39%	-0,09%
	Alto	133,50	113,77	86,80	86,02	86,70	85,94	3:10	34,98%	-0,12%	-24,39%	-0,09%
TR30 AB	Médio	129,50	0,00	84,40	0,00	84,30	0,00	3:40	34,83%	-0,12%	-	-
	Baixo	129,50	0,00	84,40	0,00	84,30	0,00	4:20	34,83%	-0,12%	-	-
TR30 M	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-
	Médio	152,20	113,77	98,30	86,02	98,10	85,94	3:10	35,41%	-0,20%	-24,39%	-0,09%
TR30 B	Baixo	152,20	0,00	98,30	0,00	98,10	0,00	3:50	35,41%	-0,20%	-	-
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-

		Alto	133,50	113,77	86,80	86,02	86,70	85,94	3:10	34,98%	-0,12%	-24,39%	-0,09%
TR30AM	Médio	187,00	113,77	122,90	86,02	122,70	85,94	3:40	34,28%	-0,16%	-24,39%	-0,09%	
	Baixo	187,00	0,00	122,90	0,00	122,70	0,00	4:20	34,28%	-0,16%	-	-	
	Alto	133,50	113,77	86,80	86,02	86,70	85,94	3:10	34,98%	-0,12%	-24,39%	-0,09%	
TR30 AB	Médio	129,50	0,00	84,40	0,00	84,30	0,00	3:40	34,83%	-0,12%	-	-	
	Baixo	154,80	113,77	100,30	86,02	100,10	85,94	4:20	35,21%	-0,20%	-24,39%	-0,09%	
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
TR30 MB	Médio	152,20	113,77	98,30	86,02	98,10	85,94	3:10	35,41%	-0,20%	-24,39%	-0,09%	
	Baixo	202,30	113,77	128,80	86,02	128,60	85,94	3:50	36,33%	-0,16%	-24,39%	-0,09%	
	Alto	147,40	121,88	90,30	88,36	98,60	93,43	3:10	38,74%	9,19%	-27,50%	5,74%	
TR50	Médio	206,20	121,88	127,90	88,36	139,30	93,43	3:40	37,97%	8,91%	-27,50%	5,74%	
	Baixo	248,10	121,88	149,00	88,36	163,00	93,43	3:50	39,94%	9,40%	-27,50%	5,74%	
	Alto	147,40	121,88	90,30	88,36	98,60	93,43	3:10	38,74%	9,19%	-27,50%	5,74%	
TR50 A	Médio	142,90	0,00	87,80	0,00	95,80	0,00	3:40	38,56%	9,11%	-	-	
	Baixo	142,90	0,00	87,80	0,00	95,80	0,00	4:20	38,56%	9,11%	-	-	
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
TR50 M	Médio	168,30	121,88	102,30	88,36	111,80	93,43	3:10	39,22%	9,29%	-27,50%	5,74%	
	Baixo	168,30	0,00	102,30	0,00	111,80	0,00	3:50	39,22%	9,29%	-	-	
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
TR50 B	Médio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
	Baixo	115,10	121,88	61,20	88,36	68,60	93,43	3:20	46,83%	12,09%	-27,50%	5,74%	
	Alto	147,40	121,88	90,30	88,36	98,60	93,43	3:10	38,74%	9,19%	-27,50%	5,74%	
TR50AM	Médio	206,20	121,88	127,90	88,36	139,30	93,43	3:40	37,97%	8,91%	-27,50%	5,74%	
	Baixo	206,20	0,00	127,90	0,00	139,30	0,00	4:20	37,97%	8,91%	-	-	
	Alto	147,40	121,88	90,30	88,36	98,60	93,43	3:10	38,74%	9,19%	-27,50%	5,74%	
TR50 AB	Médio	142,90	0,00	87,80	0,00	95,80	0,00	3:40	38,56%	9,11%	-	-	
	Baixo	171,10	121,88	104,50	88,36	114,10	93,43	4:20	38,92%	9,19%	-27,50%	5,74%	
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
TR50 MB	Médio	168,30	121,88	102,30	88,36	111,80	93,43	3:10	39,22%	9,29%	-27,50%	5,74%	
	Baixo	224,40	121,88	134,40	88,36	147,30	93,43	3:50	40,11%	9,60%	-27,50%	5,74%	
	Alto	162,20	132,63	91,40	90,63	112,40	103,60	3:10	43,65%	22,98%	-31,67%	14,31%	
TR100	Médio	231,30	132,63	131,00	90,63	160,30	103,60	3:40	43,36%	22,37%	-31,67%	14,31%	
	Baixo	278,10	132,63	152,60	90,63	189,30	103,60	3:50	45,13%	24,05%	-31,67%	14,31%	
	Alto	147,40	132,63	90,30	90,63	98,60	103,60	3:10	38,74%	9,19%	-31,67%	14,31%	
TR100 A	Médio	142,90	0,00	87,80	0,00	95,80	0,00	3:40	38,56%	9,11%	-	-	
	Baixo	142,90	0,00	87,80	0,00	95,80	0,00	4:20	38,56%	9,11%	-	-	
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
TR100 M	Médio	168,30	132,63	102,30	90,63	111,80	103,60	3:10	39,22%	9,29%	-31,67%	14,31%	
	Baixo	168,30	0,00	102,30	0,00	111,80	0,00	3:50	39,22%	9,29%	-	-	
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
TR100 B	Médio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
	Baixo	115,10	132,63	61,20	90,63	68,60	103,60	3:20	46,83%	12,09%	-31,67%	14,31%	
	Alto	147,40	132,63	90,30	90,63	98,60	103,60	3:10	38,74%	9,19%	-31,67%	14,31%	
TR100AM	Médio	206,20	132,63	127,90	90,63	139,30	103,60	3:40	37,97%	8,91%	-31,67%	14,31%	
	Baixo	206,20	0,00	127,90	0,00	139,30	0,00	4:20	37,97%	8,91%	-	-	
	Alto	147,40	132,63	90,30	90,63	98,60	103,60	3:10	38,74%	9,19%	-31,67%	14,31%	
TR100 AB	Médio	142,90	0,00	87,80	0,00	95,80	0,00	3:40	38,56%	9,11%	-	-	
	Baixo	171,10	132,63	104,50	90,63	114,10	103,60	4:20	38,92%	9,19%	-31,67%	14,31%	
	Alto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0:00	-	-	-	-	
TR100 MB	Médio	185,40	132,63	102,30	90,63	127,60	103,60	3:10	44,82%	24,73%	-31,67%	14,31%	
	Baixo	250,00	132,63	134,40	90,63	170,50	103,60	3:50	46,24%	26,86%	-31,67%	14,31%	

Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A partir da análise dos resultados e do comportamento das vazões de pico para os tempos de retorno, averiguou-se que o tempo de retorno TR05 foi suficiente para indicar a ocorrência de transbordamento no canal, mesmo em condições de mínima solicitação do escoamento e com precipitações que podem ser consideradas recorrentes.

A condição mais extrema, ou seja, menos favorável para o sistema de drenagem atual, foi aquela em que houve a precipitação com maior tempo de retorno, ou seja, 100 anos (TR 100), distribuída de forma uniforme ao longo de toda a bacia. A maior vazão de pico, nesta condição, a partir das simulações dos dados observados, foi de 278,10 m³/s e a precipitação referente a esta vazão foi de 132,63 mm. No caso dos dados simulados para o clima do presente, a vazão de pico foi de 152,60 m³/s e a precipitação é de 90,63mm. Para o clima do futuro, o valor da vazão de pico foi de 189,30 m³/s e a precipitação de 103,60mm. A vazão de pico nos três cenários ocorre após 03 horas e 50 minutos do início das chuvas.

A condição mais favorável, ou seja, onde ocorre a mais rápida remoção de água da bacia, foi aquela onde houve a concentração da precipitação apenas na região do baixo Carneirinhos (TR05 B). Nesse contexto, para a simulação, considerando os dados observados, a vazão de pico foi de 55,60 m³/s e a precipitação de 84,07 mm. Para o clima do presente, a vazão de pico foi de 39,50 m³/s e a precipitação de 71,87 mm. Para o clima do futuro, o valor da vazão de pico foi de 25,90 m³/s e a precipitação de 59,67 mm. Em todos os cenários, a vazão de pico ocorre após 03 horas e 20 minutos do início das chuvas. Entretanto, é importante ressaltar que, em diversos casos, mesmo esta condição ultrapassa os limites atuais suportados pelo canal. Partindo-se das combinações simuladas nos dados observados para a região do baixo Carneirinhos, 56 no total, verificou-se que apenas 1,79% do total não ultrapassou o limite máximo suportado pela galeria.

Quando são avaliadas as combinações a partir dos dados simulados para o clima do presente, há uma redução na probabilidade de ocorrências de transbordamentos do canal, pois 8 entre as 56 combinações possíveis para esta condição (14,30%) não atingiram a capacidade máxima do canal. Ao se observar esta condição, nos resultados obtidos nas simulações para o clima do futuro, verifica-se que em somente 17,86% dos casos o canal suporta as vazões de pico.

Quanto ao viés corrigido das séries históricas, pode-se observar que o modelo subestima as precipitações em relação à série observada no caso de TR inferior a 50 anos. As projeções para o futuro, no caso de precipitações com TR inferior a 50 anos, possuem valores abaixo do

observado no clima do presente; isto é evidenciado por meio do sinal negativo. Isto também pode ser observado em relação aos valores de vazão. Quando os valores projetados pelo modelo são superiores ao observado na série histórica do município, o valor da correção do viés passa a ser positivo.

Além disso, por meio da correção do viés, notou-se que, de forma geral, o modelo apresenta erros, com valores abaixo daqueles obtidos junto aos dados observados tanto para as simulações do presente quanto para o futuro.

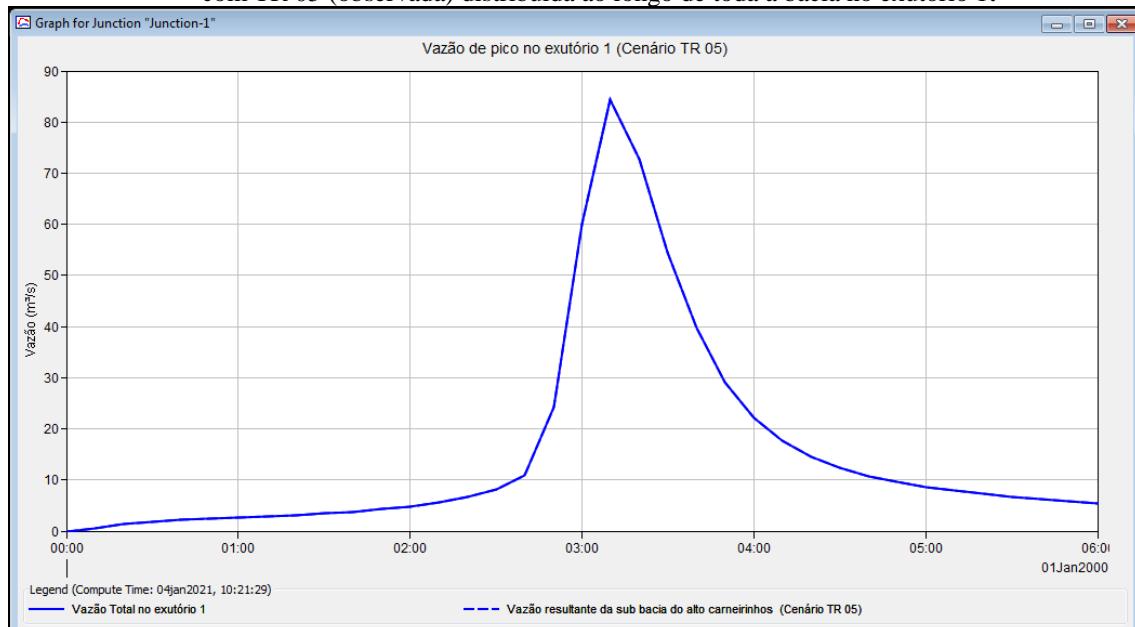
6.5 Resultados das simulações para os dados pluviométricos observados

Neste tópico, serão analisados os comportamentos das vazões de pico em função da distribuição da precipitação na sub-bacia, para um tempo de retorno de 5 anos, a partir dos gráficos obtidos nas simulações realizadas com o modelo HEC-HMS para as precipitações observadas.

6.5.1 Cenário TR 05

Para avaliar este cenário TR 05, foi considerada a ocorrência de uma precipitação com tempo de retorno de 5 anos (TR05), distribuída uniformemente ao longo de toda a bacia do córrego Carneirinhos.

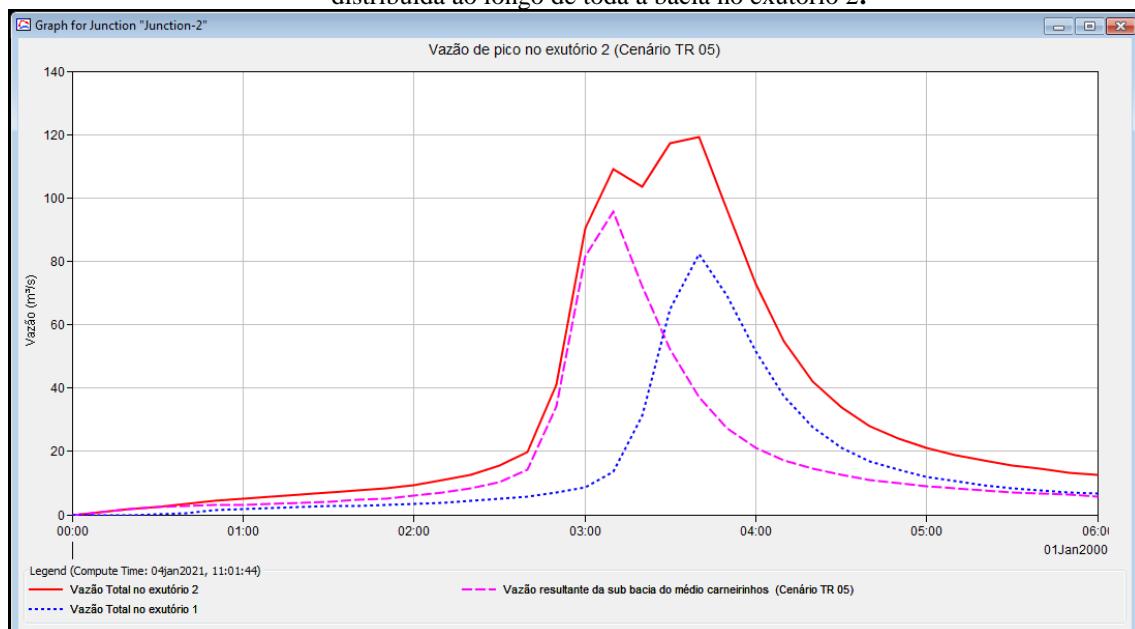
Figura 29: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva (observada) com TR 05 (observada) distribuída ao longo de toda a bacia no exutório 1.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico, produzida por uma chuva com tempo de retorno de 5 anos para as condições atuais de ocupação do solo no Alto da sub-bacia do córrego Carneirinhos (Alto Carneirinhos), é de $84,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e ocorre 3 horas e 10 minutos após o seu início conforme apresentado na Figura 29.

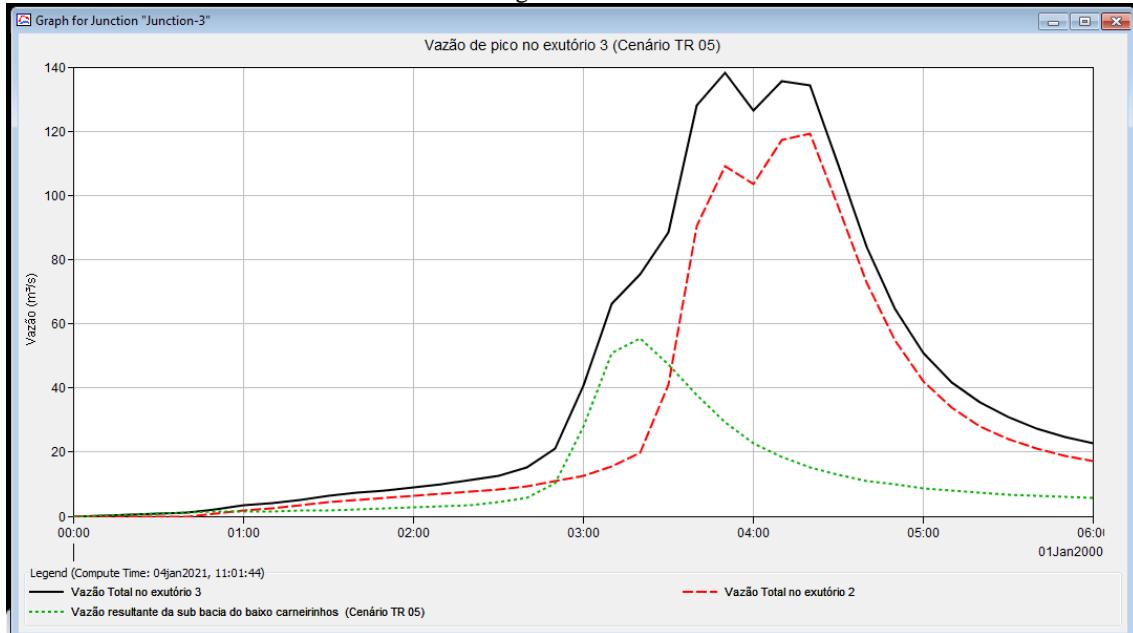
Figura 30: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05(observada) distribuída ao longo de toda a bacia no exutório 2.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico, produzida apenas pela região do médio Carneirinhos por uma chuva com tempo de retorno de 5 anos, é de $95 \text{ m}^3/\text{s}$ e ocorre após 3 horas e 10 minutos do seu início. Desse modo, a vazão de pico acumulada no exutório da sub-bacia do médio Carneirinhos, para as condições atuais de ocupação do solo no alto e médio Carneirinhos, é de aproximadamente $119,2 \text{ m}^3/\text{s}$ e ocorre após 3 horas e 40 minutos do seu início, conforme apresentado na Figura 30.

Figura 31: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05(observada) distribuída ao longo de toda a bacia no exutório 3.



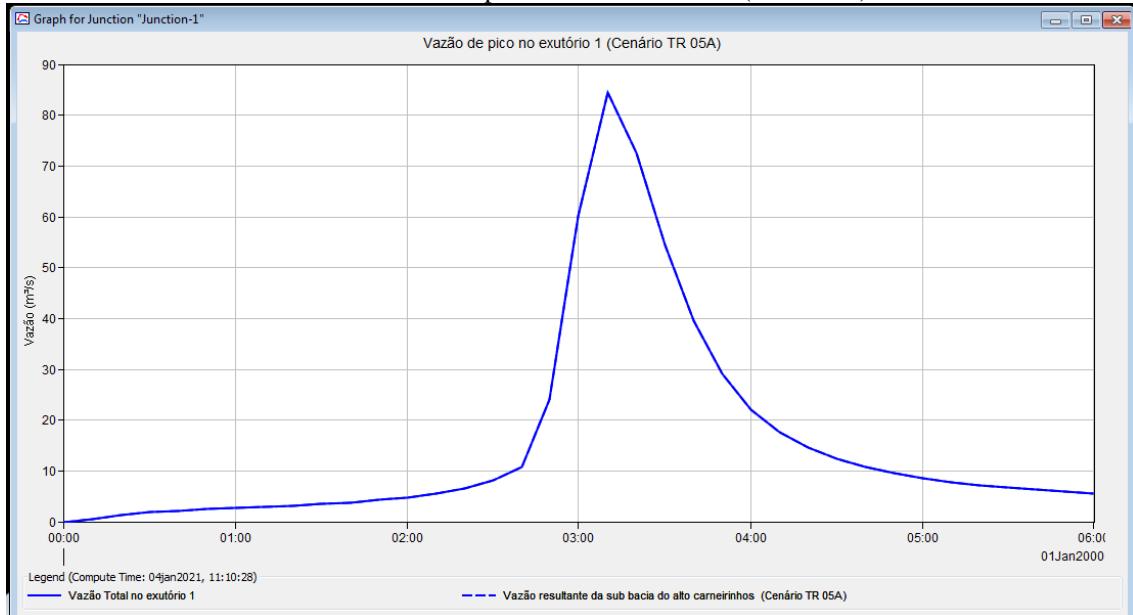
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida por uma chuva, com tempo de retorno de 5 anos, para as condições atuais de ocupação do solo no alto da sub-bacia do córrego Carneirinhos (baixo Carneirinhos), é de aproximadamente 138,3 m³/s e ocorre após as 3 horas e 50 minutos do seu início. Vale observar que, para estas condições, ocorre um duplo pico de vazão, ocasionado, assim, um período maior de máxima vazão. Neste período, a sub-bacia do baixo Carneirinhos produz uma vazão de contribuição de 55 m³/s que, somada ao acumulado pelas sub-bacias do médio e alto (119 m³/s), produz uma vazão total que passa pelo exutório da bacia, conforme apresentado na Figura 31.

6.5.2 Cenário TR 05A

No cenário TR 05A, considerou-se a possibilidade da ocorrência da chuva apenas na porção mais alta da bacia, além de se considerar que a bacia não sofreu nenhuma alteração no seu contorno, variando-se apenas a distribuição espacial da chuva dentro da bacia.

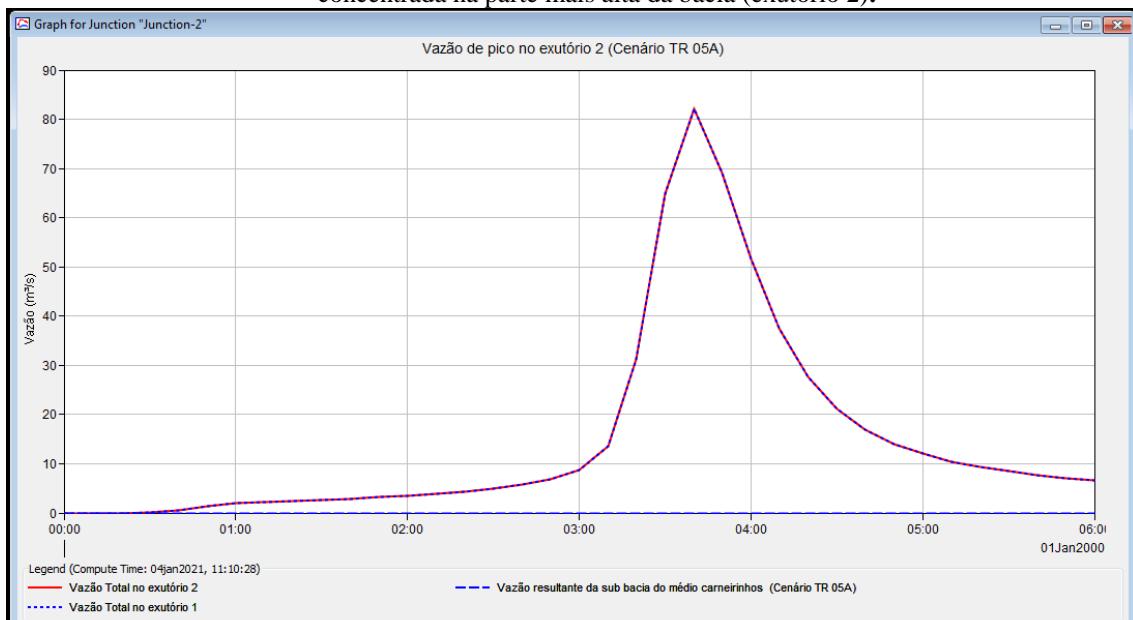
Figura 32: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A (observada) concentrada na parte mais alta da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para a chuva, observada com TR 05, localizada apenas na porção do alto Carneirinhos, foi possível notar que a vazão produzida por esta parte da bacia foi de 84,5 m³/s, sendo esta atingida a 3 horas e 10 minutos após o início da chuva, conforme apresentado na Figura 32.

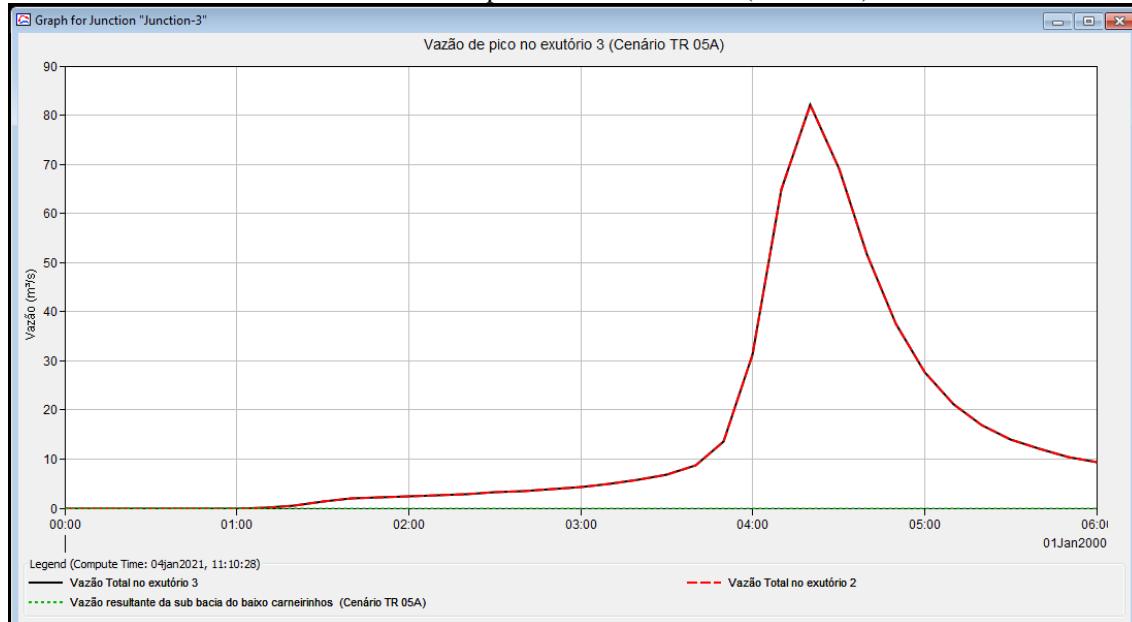
Figura 33: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A (observada) concentrada na parte mais alta da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na porção intermediária da bacia não houve formação de vazão, visto que não houve precipitação nesta parte, assim, a vazão de pico produzida pela sub-bacia do alto Carneirinhos foi a mesma que passou pelo exutório da sub-bacia. Além disso, foi possível notar que houve um pequeno amortecimento da vazão ao passar por esta parte da bacia ($82,1 \text{ m}^3/\text{s}$). A vazão de pico atingiu o exutório desta sub-bacia 35 minutos após passar pelo exutório do alto Carneirinhos, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 34: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A (observada) concentrada na parte mais alta da bacia (exutório 3).



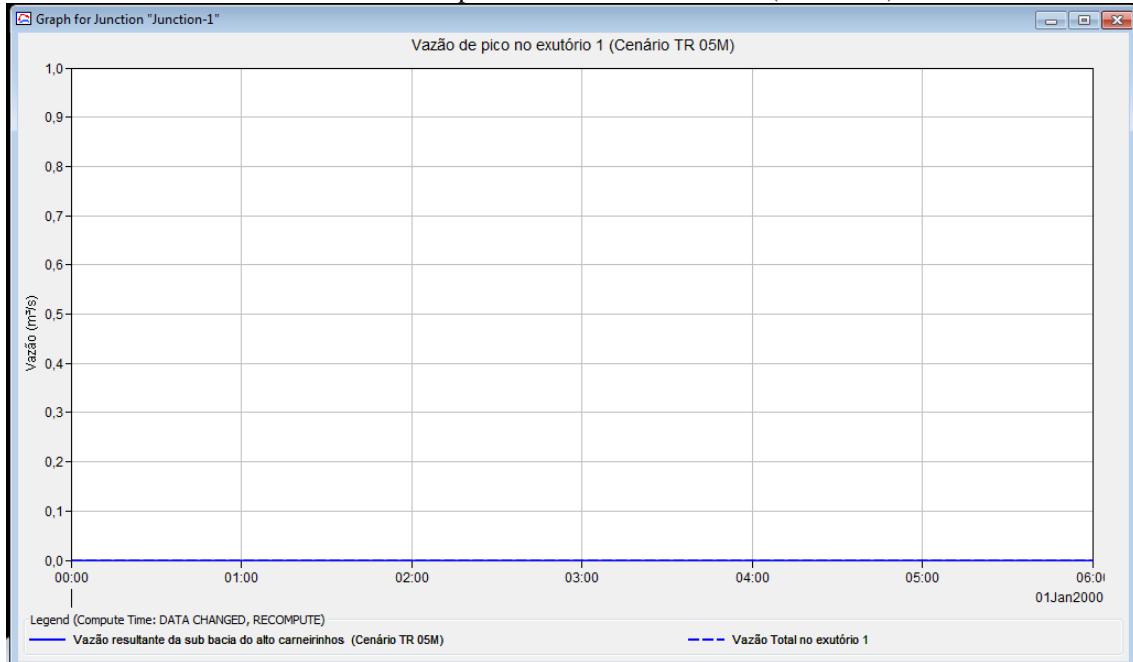
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Neste cenário também não houve formação de vazão na sub-bacia do baixo Carneirinhos. A vazão de pico, produzida pela porção do alto Carneirinhos, atingiu o exutório do baixo Carneirinhos 4 horas e 20 minutos após o início das chuvas e atingiu o volume de $83 \text{ m}^3/\text{s}$, visto que uma parte da vazão foi amortecida pelas duas sub-bacias onde não houve ocorrência de precipitação, conforme apresentado na Figura 34.

6.5.3 Cenário TR 05M

No cenário TR 05M, considerou-se a possibilidade da ocorrência da chuva apenas na porção intermediária da bacia.

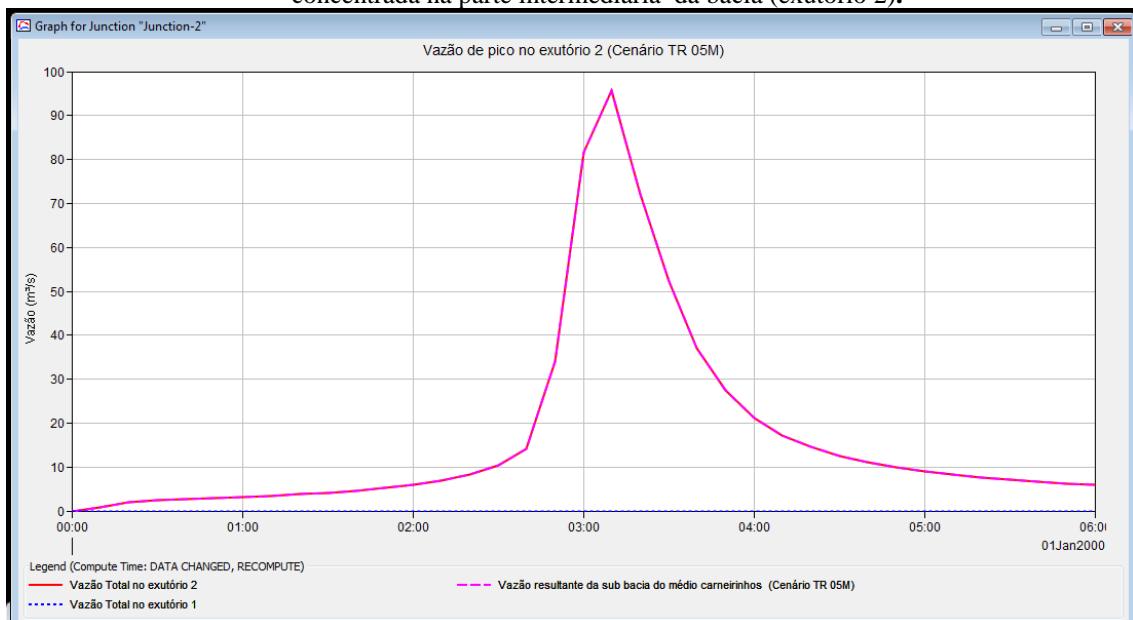
Figura 35: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M (observada) concentrada na parte intermediária da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para esta condição não houve precipitação na parte alta da bacia do Carneirinhos, sendo assim, não houve vazão de pico nesta área, conforme apresentado na Figura 35.

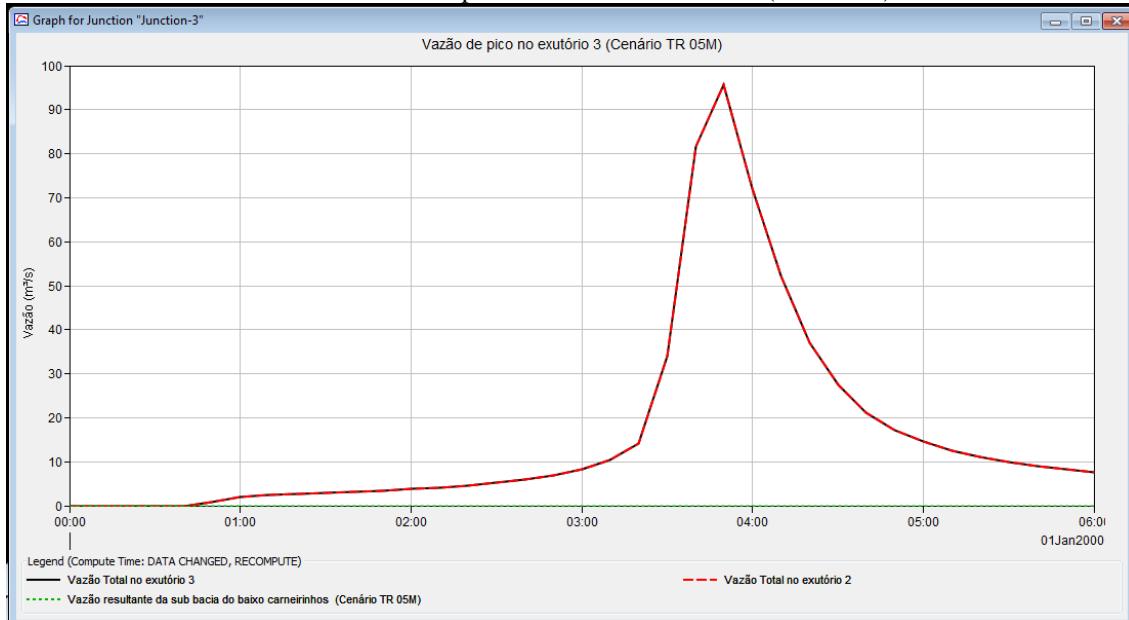
Figura 36: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M (observada) concentrada na parte intermediária da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na porção do médio Carneirinhos, uma precipitação com TR 05, distribuída apenas nesta porção da bacia, produz uma vazão de pico de 95,6 m³/s após 3 horas e 10 minutos do início da chuva. Não houve contribuição de vazão da sub-bacia do alto Carneirinhos, conforme apresentado na Figura 36.

Figura 37: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M (observada) concentrada na parte intermediária da bacia (exutório 3).



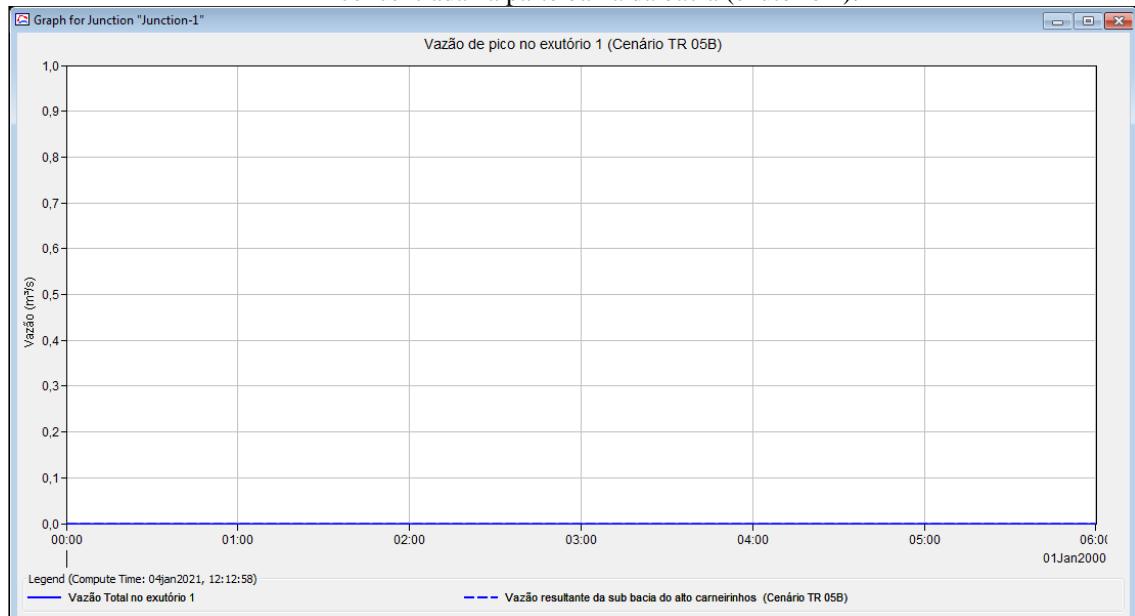
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na sub-bacia do baixo Carneirinhos, não houve precipitação, logo, a vazão de pico que atingiu esta área foi a produzida pela sub-bacia do médio Carneirinhos, 3 horas e 40 minutos após o início das chuvas, com uma vazão de 95,6 m³/s, conforme apresentado na Figura 37.

6.5.4 Cenário TR 05B

No cenário TR 05B, considerou-se a possibilidade da ocorrência da chuva apenas na porção mais baixa da bacia, variando-se apenas a distribuição espacial da chuva dentro da bacia.

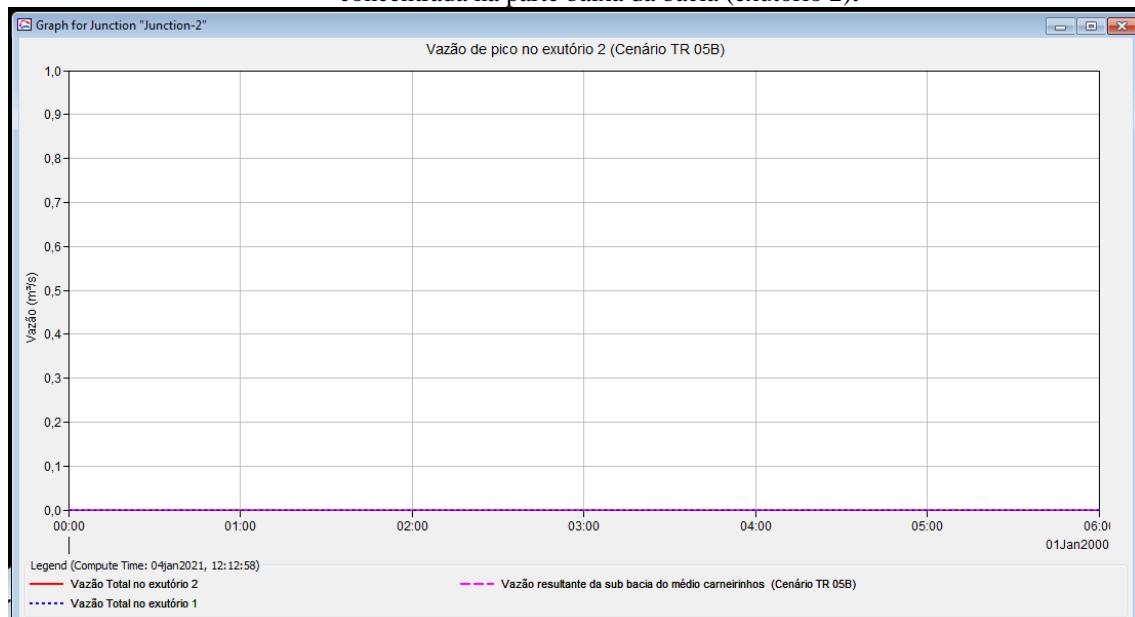
Figura 38: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B (observada) concentrada na parte baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para esta condição não houve precipitação na parte alta da bacia do Carneirinhos, assim, não houve vazão de pico nesta área, conforme apresentado na Figura 38.

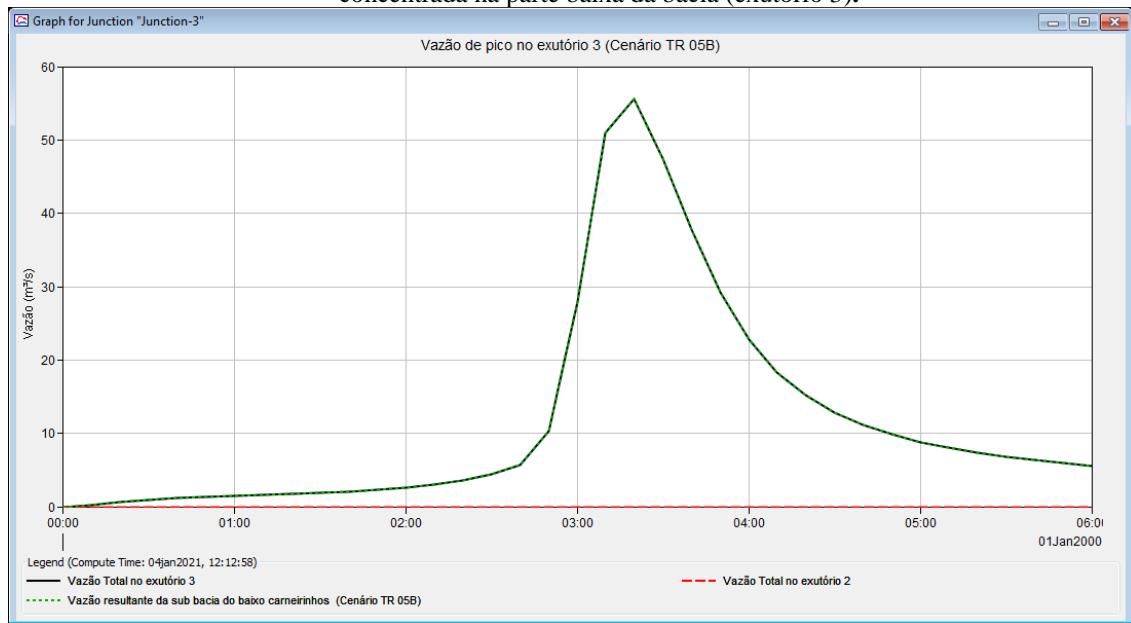
Figura 39: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B (observada) concentrada na parte baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Neste cenário não houve precipitação na parte intermediária da bacia, assim, também não houve vazão de pico nesta área, conforme apresentado na Figura 39.

Figura 40: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B (observada) concentrada na parte baixa da bacia (exutório 3).



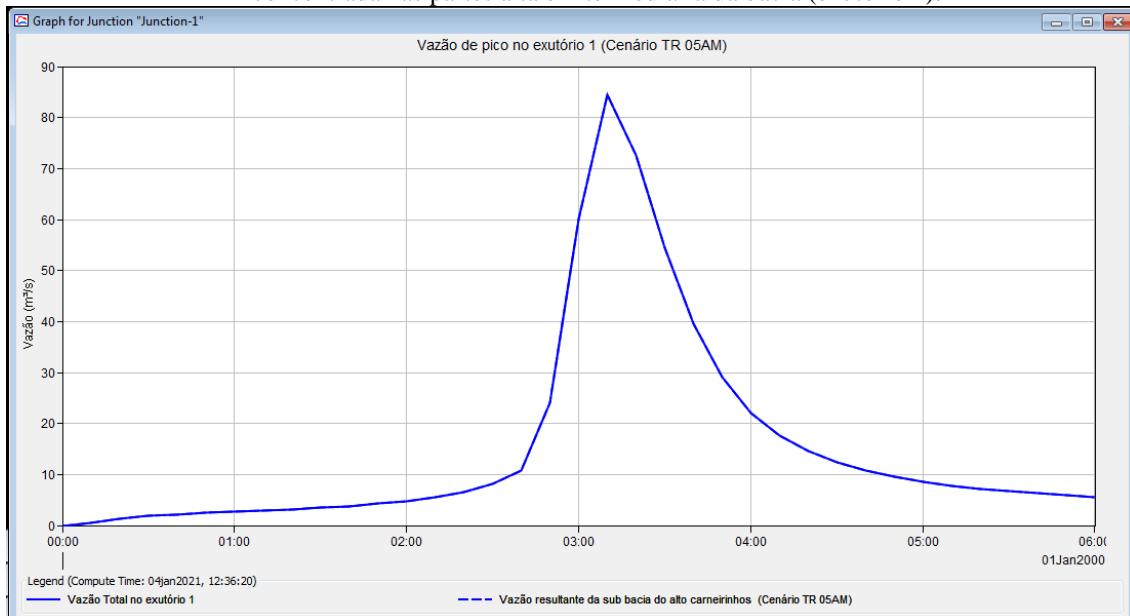
Fonte: Autor deste estudo (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia do baixo Carneirinhos, considerando a ocorrência de precipitação com TR 05, apenas nesta área, foi de $55,6 \text{ m}^3/\text{s}$, atingindo o exutório da bacia 3 horas e 20 minutos após o início das chuvas, conforme apresentado na Figura 40.

6.5.5 Cenário TR 05AM

No cenário TR 05AM, considerou-se a possibilidade da ocorrência da chuva apenas nas porções alta e média da bacia, além de considerar que a sub-bacia não sofreu nenhuma alteração no seu contorno, variando-se apenas a distribuição espacial da chuva dentro da sub-bacia.

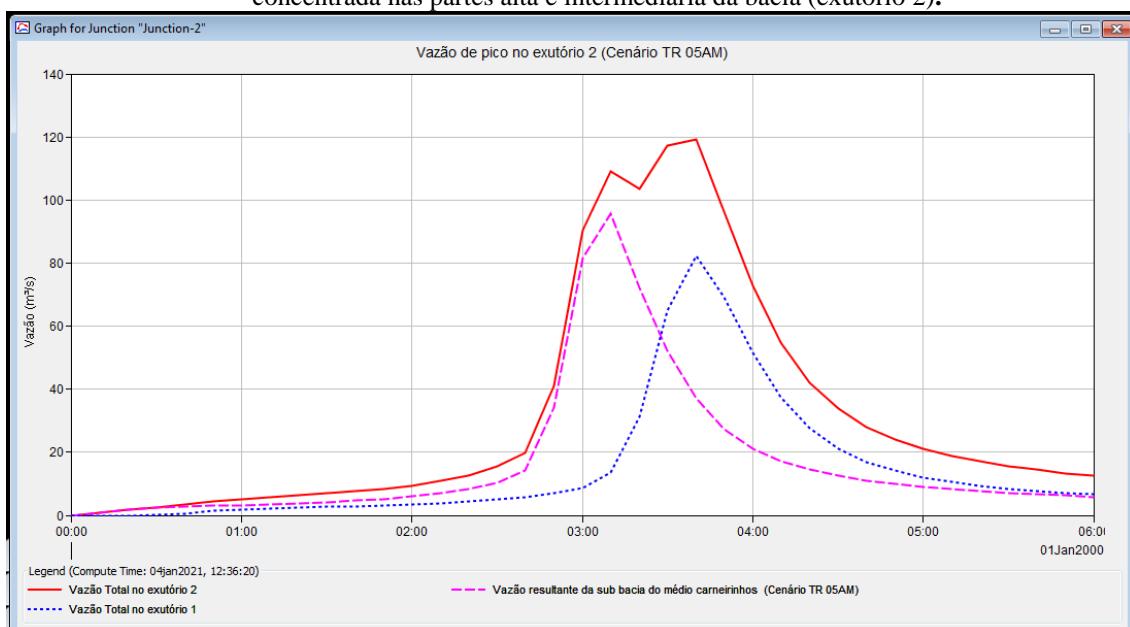
Figura 41: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM (observada) concentrada nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Nesta condição, pode-se notar que a vazão de pico produzida pela ocorrência da chuva com TR 05 sobre a porção alta da bacia do alto Carneirinhos foi de 84,55 m³/s e ocorreu 3 horas e 10 minutos após o início da chuva, conforme apresentado na Figura 41.

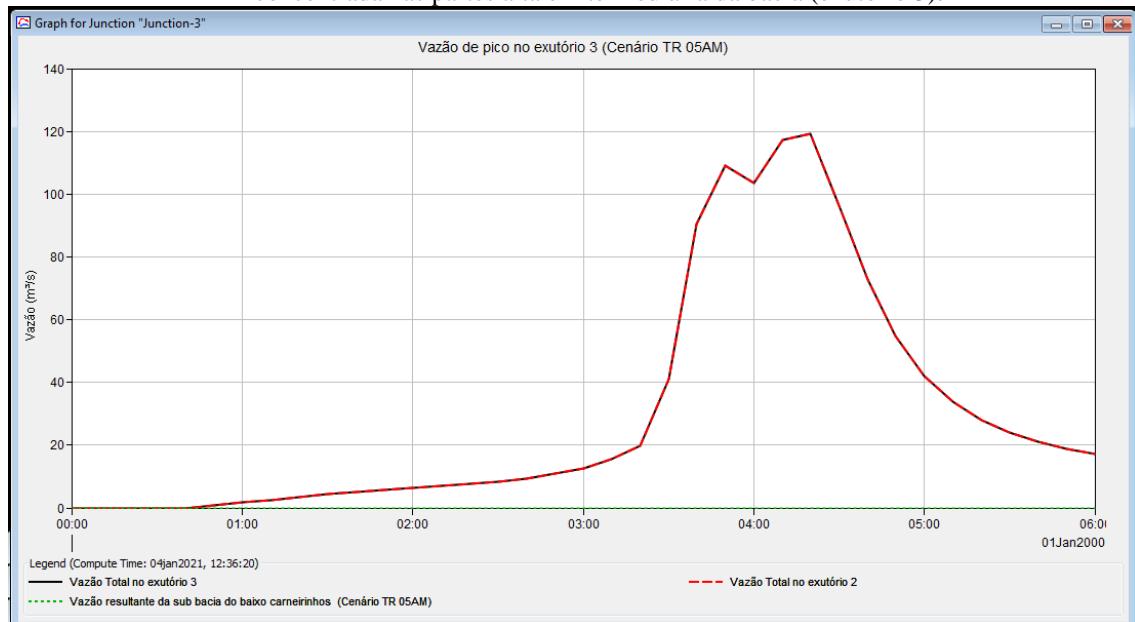
Figura 42: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM (observada) concentrada nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de contribuição da sub-bacia do médio Carneirinhos para a vazão de pico, que atingiu o exutório da sub-bacia, foi de $95 \text{ m}^3/\text{s}$, ocorrendo 3 horas e 10 minutos após o início das chuvas. O somatório desta vazão mais a produzida pelo alto Carneirinhos resulta em uma vazão de pico de $119,20 \text{ m}^3/\text{s}$, 03 horas e 40 minutos após o início da chuva, conforme apresentado na Figura 42.

Figura 43: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM (observada) concentrada nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 3).



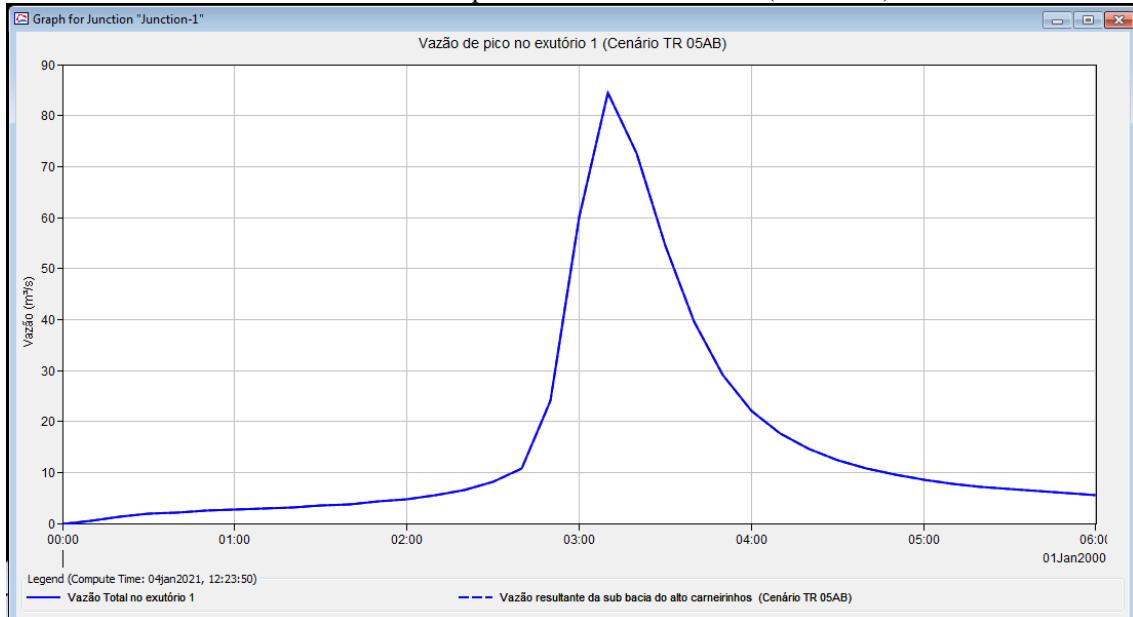
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para esta condição, não houve precipitação na parte baixa da bacia do Carneirinhos, porém, a vazão de pico que passou pelo exutório foi de $119,20 \text{ m}^3/\text{s}$, atingindo o exutório da bacia 4 horas e 20 minutos após o início das chuvas, conforme apresentado na Figura 43.

6.5.6 Cenário TR 05AB

No cenário TR 05AB, considerou-se a possibilidade da ocorrência da chuva apenas nas porções alta e baixa da bacia, com variação apenas da distribuição espacial das chuvas dentro da bacia.

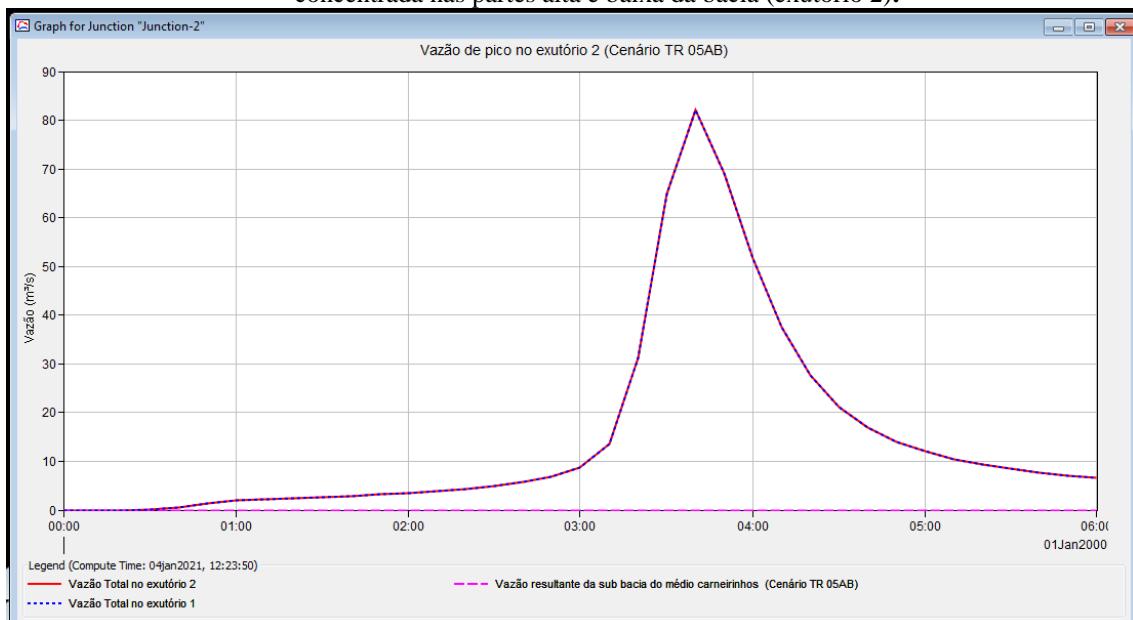
Figura 44: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB (observada) concentrada nas partes alta e baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Nesta condição, pode-se observar que a vazão de pico, produzida pela ocorrência de uma chuva de TR 05, sobre o alto Carneirinhos, foi de 84,50 m³/s e ocorreu 3 horas e 10 minutos após o início da chuva, conforme apresentado na Figura 44.

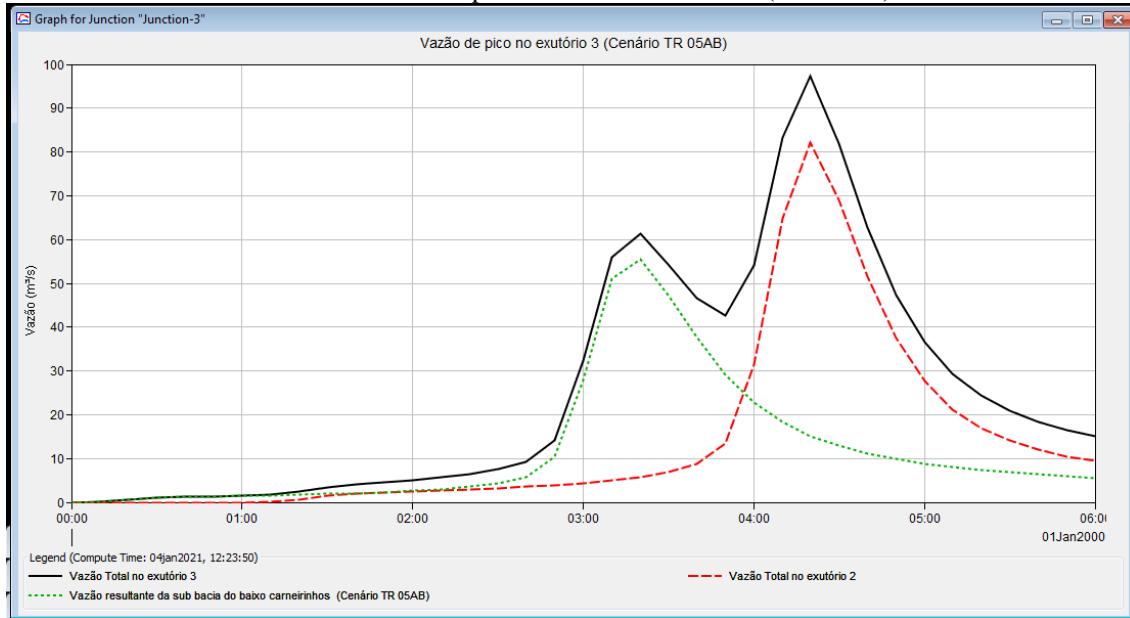
Figura 45: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB (observada) concentrada nas partes alta e baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para esta condição, não houve precipitação na parte média da bacia do Carneirinhos, porém, a vazão de pico que passou pelo seu exutório foi de 82,10 m³/s, proveniente da vazão de pico do alto Carneirinhos, atingiu o exutório da bacia às 3 horas e 40 minutos após o início das chuvas, conforme apresentado na Figura 45.

Figura 46: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB (observada) concentrada nas partes alta e baixa da bacia (exutório 3).



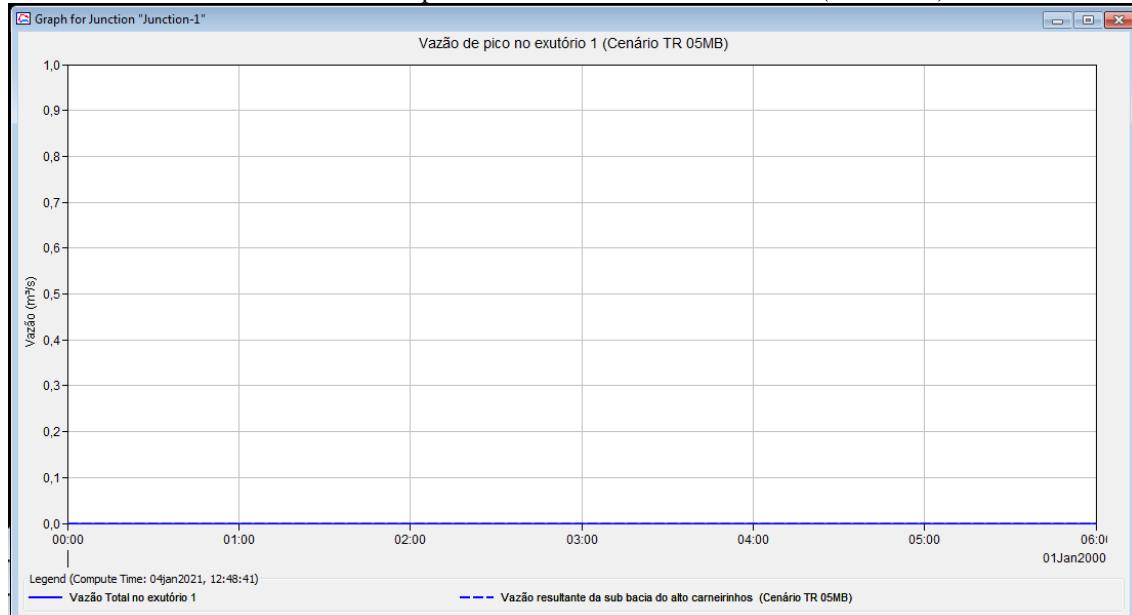
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia do baixo Carneirinhos foi de 55 m³/s, 3 horas e 10 minutos após o início das chuvas. Por outro lado, a vazão de pico que passou pelo seu exutório foi de 97,30 m³/s, 4 horas e 20 minutos após o início da chuva. A mesma situação ocorreu devido à soma da vazão produzida pelo alto Carneirinhos mais a vazão produzida pelo baixo Carneirinhos. Vale ressaltar que houve dois picos de vazão neste exutório, sendo que o primeiro coincide com o período da máxima vazão produzida por esta parte da bacia, conforme apresentado na Figura 46.

6.5.7 Cenário TR 05MB

No cenário TR 05MB, considerou-se a possibilidade da ocorrência da chuva apenas nas porções média e baixa da bacia, além de considerar que a bacia não sofreu nenhuma alteração no seu contorno, conforme mencionado em todos os outros cenários.

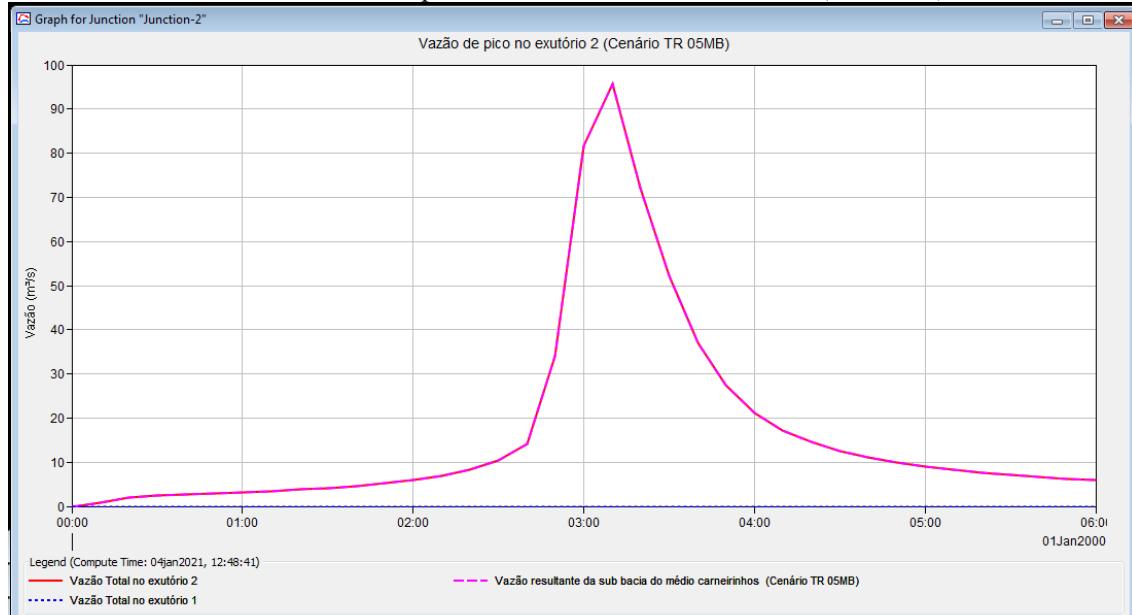
Figura 47: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05MB (observada) concentrada nas partes intermediária e baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para esta condição não houve precipitação na parte alta da bacia do Carneirinhos, assim, não houve vazão de pico nesta área, conforme apresentado na Figura 47.

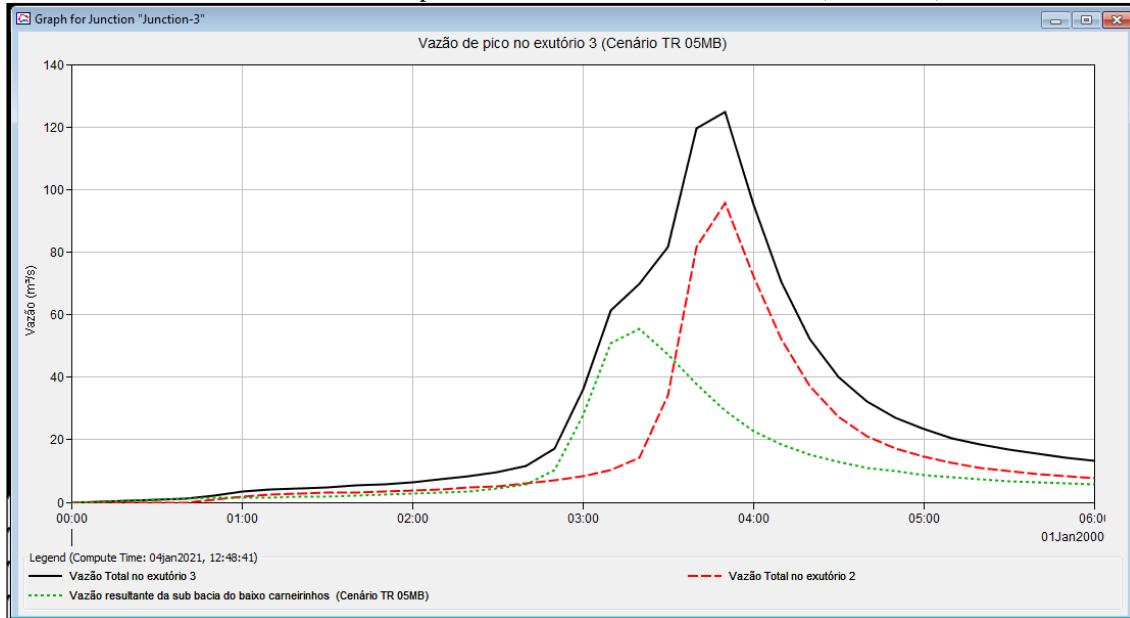
Figura 48: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB (observada) concentrada nas partes intermediária e baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela chuva na sub-bacia, na porção intermediária da bacia foi de 95,60 m³/s às 3 horas e 10 minutos do início da chuva, conforme apresentado na Figura 48.

Figura 49: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB (observada) concentrada nas partes intermediária e baixa da bacia (exutório 3).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela chuva na sub-bacia, na porção mais baixa da bacia, foi de 55 m³/s às 3 horas e 10 minutos do início da chuva. A vazão de pico total que passou pelo exutório da bacia foi de 124,80 m³/s às 3 horas e 40 minutos após o início da chuva e foi resultado do somatório da vazão produzida pela sub-bacia do médio e baixo Carneirinhos, conforme apresentado na Figura 49.

6.6 Resultados das simulações hidrológicas para as precipitações geradas para o clima do presente a partir dos modelos HADGEM2-ES e ETA

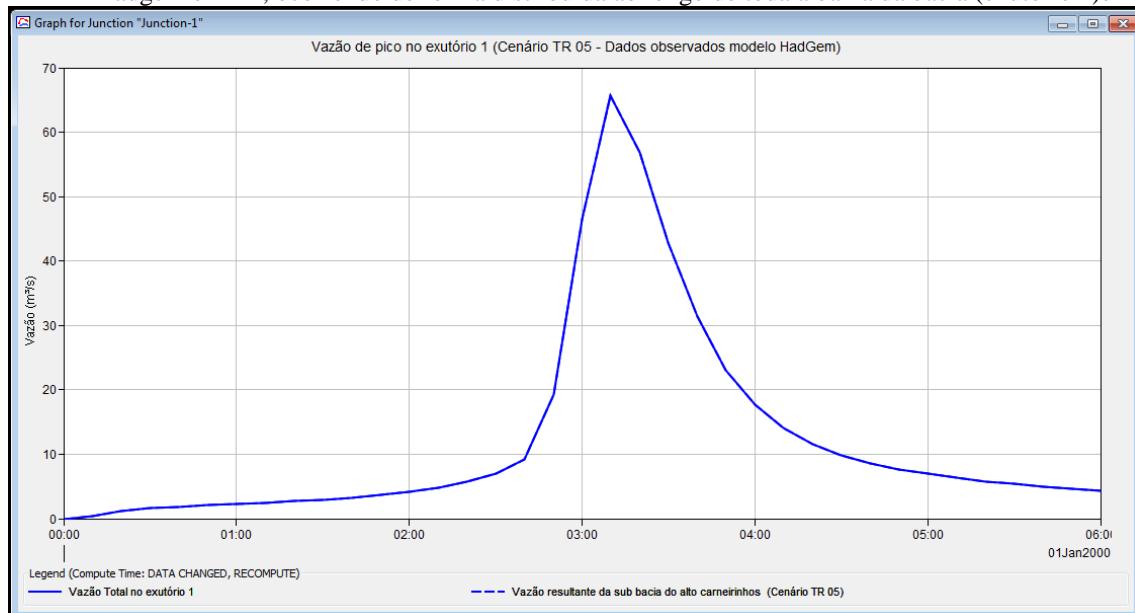
Neste item, serão analisados os resultados dos gráficos gerados para as precipitações simuladas para o clima do presente por meio dos modelos HadGEM2-ES e ETA. Esta seção tratará apenas das precipitações com tempo de retorno de 5 anos.

Em tempo, nos títulos dos gráficos, foi adotada a nomenclatura “modelo Hadgem” para representar os dados produzidos pelos modelos ETA e HadGEM2-ES.

6.6.1 Cenário TR05

Para cenário TR05, considerou-se que as mudanças climáticas já estão ocorrendo, porém, em menor intensidade quando comparado com as projeções futuras. Para isto, avaliou-se apenas seus efeitos sobre as chuvas com TR05.

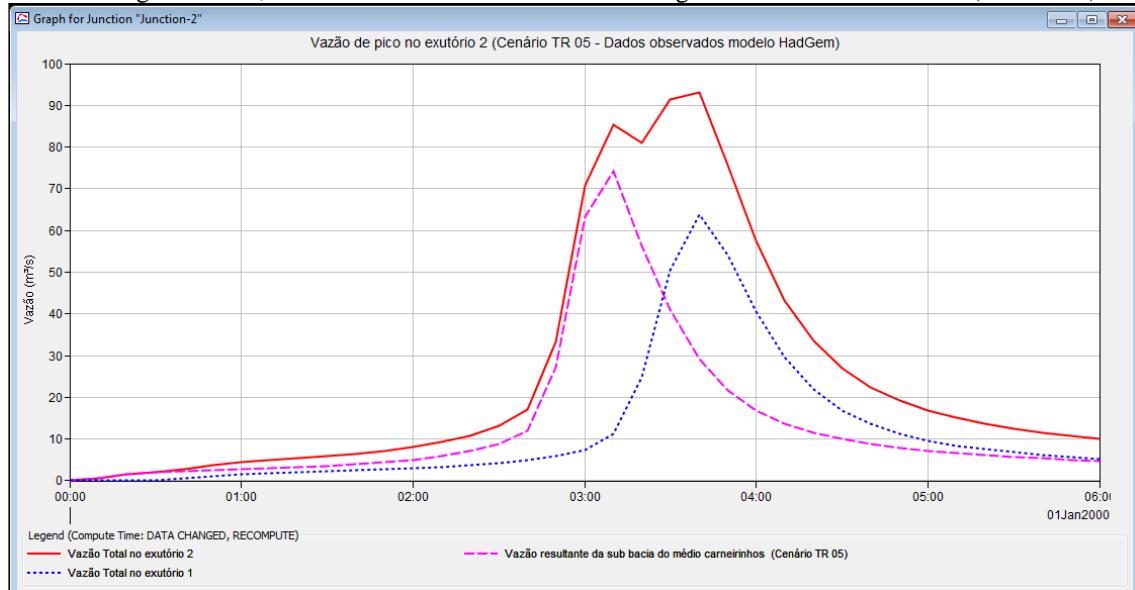
Figura 50: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela chuva simulada no presente com TR 05 foi de 65,70 m³/s e ocorre 3 horas e 10 minutos após o início das precipitações, conforme apresentado na Figura 50.

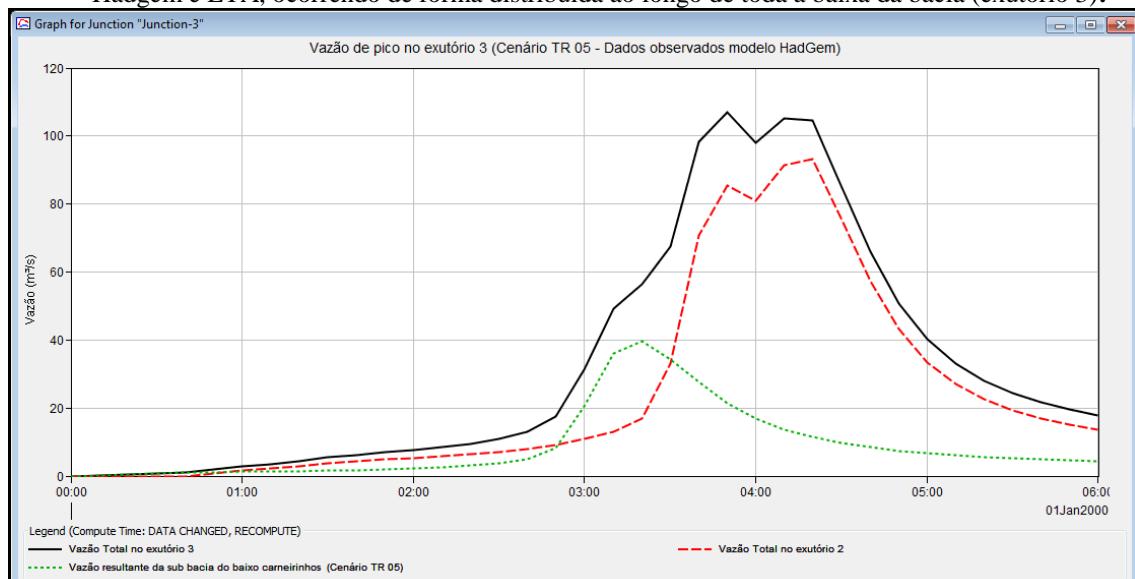
Figura 51: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia do médio Carneirinhos foi de 75 m³/s e seu pico ocorreu às 3 horas e 10 minutos após o início da chuva. Logo, a vazão máxima de pico que passa pelo exutório desta sub-bacia foi de 93,10 m³/s, 3 horas e 40 minutos após o início das precipitações. Esta vazão ocorre devido ao somatório das vazões dos alto e médio carneirinhos, desse modo, é possível notar a ocorrência de 2 picos de vazão, sendo o primeiro ocorrido no momento da máxima vazão da sub-bacia e o segundo, alguns minutos após isto (Figura 51).

Figura 52: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a baixa da bacia (exutório 3).



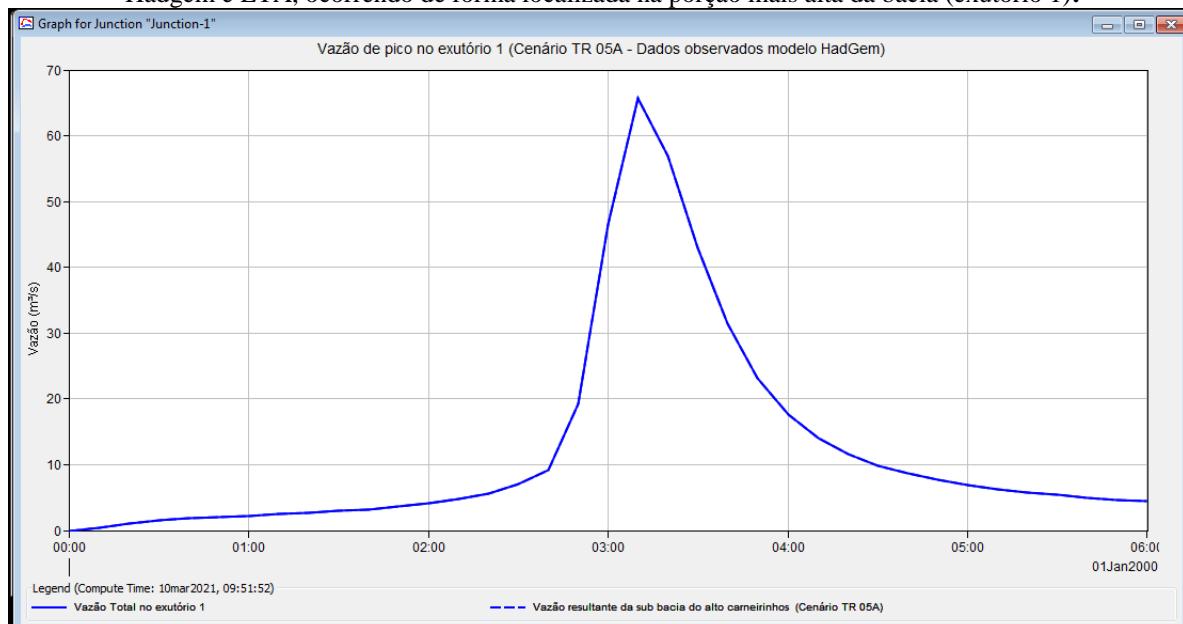
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

No exutório do baixo Carneirinhos passa a maior vazão produzida pela precipitação na bacia, visto que ocorre a somatória das vazões produzidas pela sub-bacia baixo Carneirinhos ($40 \text{ m}^3/\text{s}$ às 3 horas e 10 minutos) com o somatório da sub-bacias do médio e alto Carneirinhos ($93,1 \text{ m}^3/\text{s}$, 4 horas e 20 minutos após o início das chuvas). Desse modo, a máxima vazão que passa por este ponto é de $106,90 \text{ m}^3/\text{s}$ e ocorre 3 horas e 50 minutos após o início das precipitações, conforme apresentado na Figura 52.

6.6.2 Cenário TR 05A

Para o cenário TR 05A, considerou-se a ocorrência da chuva apenas na porção mais alta da bacia, de modo a avaliar a sua contribuição e efeito para as demais partes da bacia.

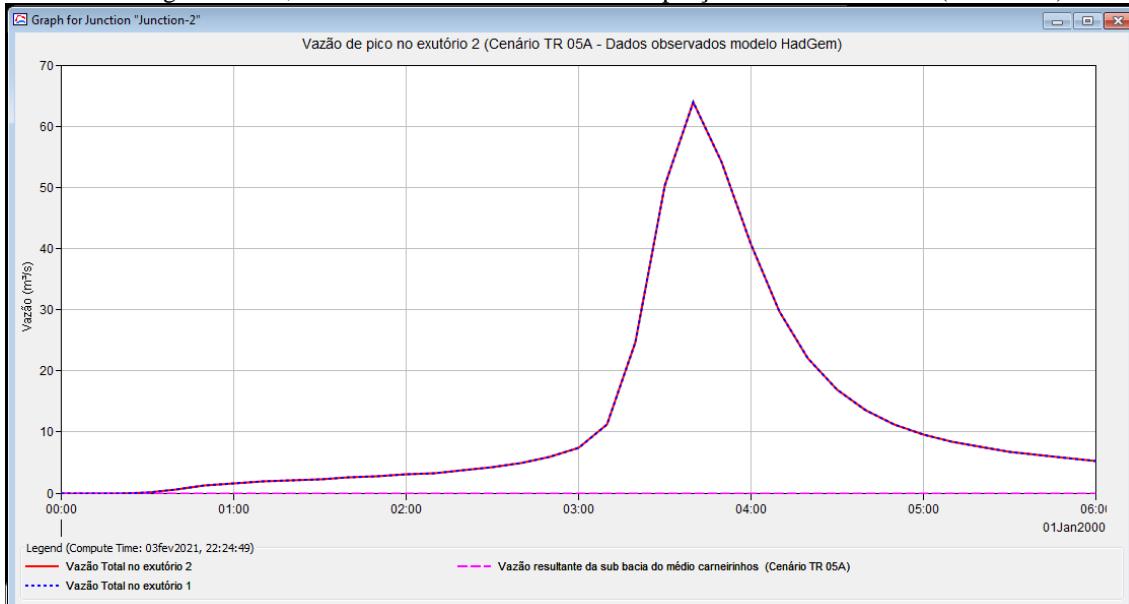
Figura 53: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção mais alta da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia para esta condição de combinação foi de $65,70 \text{ m}^3/\text{s}$ e ocorrerá 3 horas e 10 minutos após o início das precipitações (Figura 53).

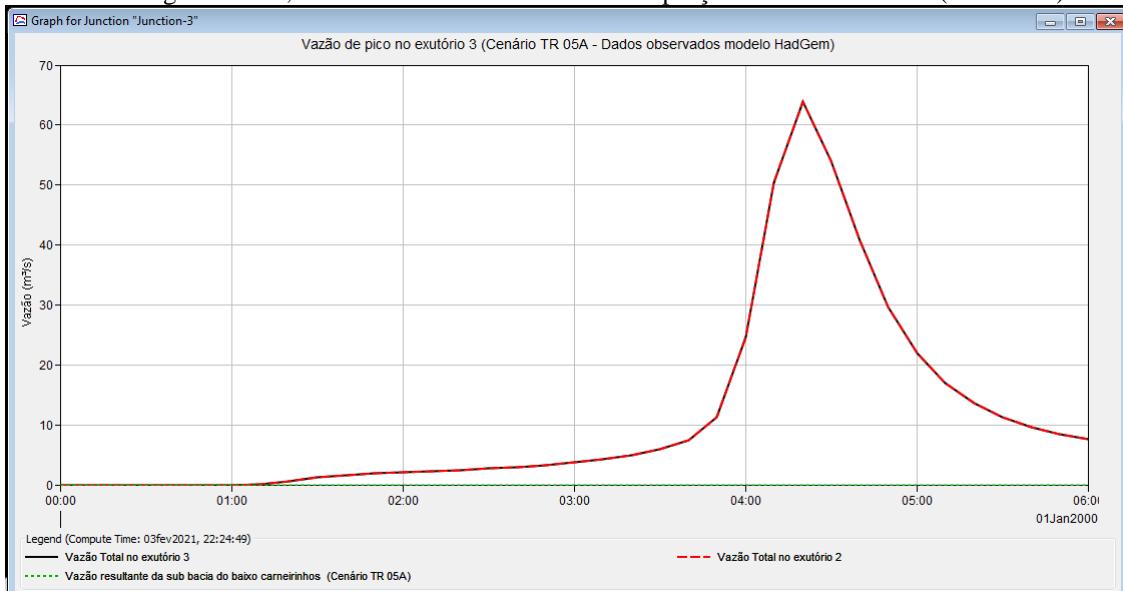
Figura 54: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção mais alta da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A sub-bacia do médio Carneirinhos não produzirá contribuição para a vazão de pico, assim, a máxima vazão que passará pelo seu exutório é de 63,90 m³/s às 3 horas e 40 minutos após o início da chuva, vazão esta proveniente do alto Carneirinhos (Figura 54).

Figura 55: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção mais alta da bacia (exutório 3).



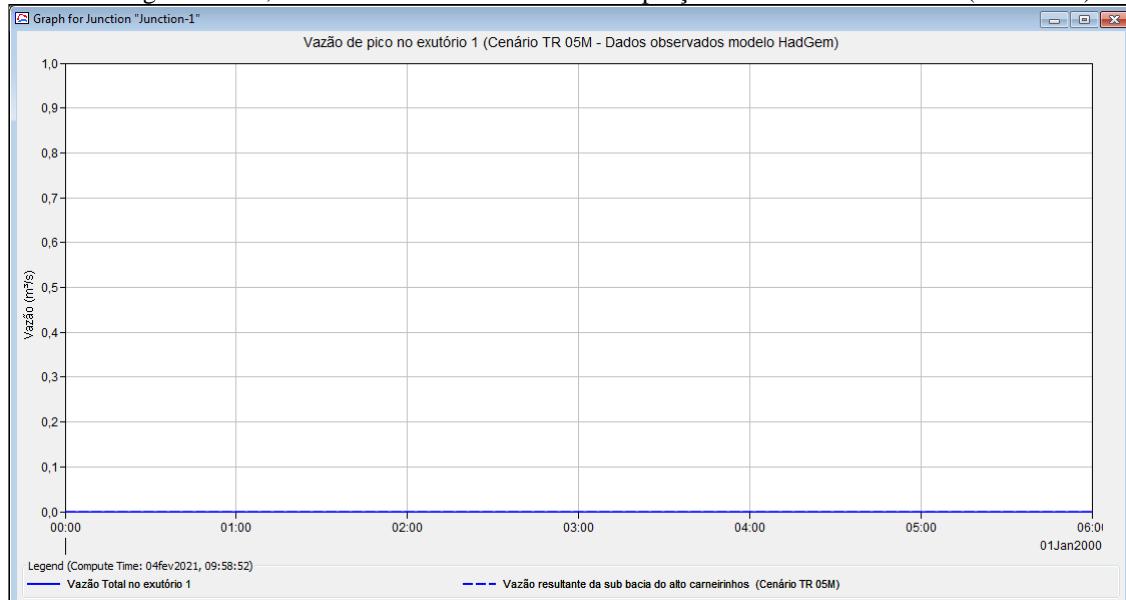
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A sub-bacia do baixo Carneirinhos não produzirá contribuição para a vazão de pico, assim, a máxima vazão que passará pelo seu exutório é de 63,90 m³/s às 4 horas e 20 minutos após o início da chuva (Figura 55).

6.6.3 Cenário TR 05M

Para esta condição de simulação, considerou-se a ocorrência da chuva das projetadas pelo modelo apenas na porção intermediária da bacia.

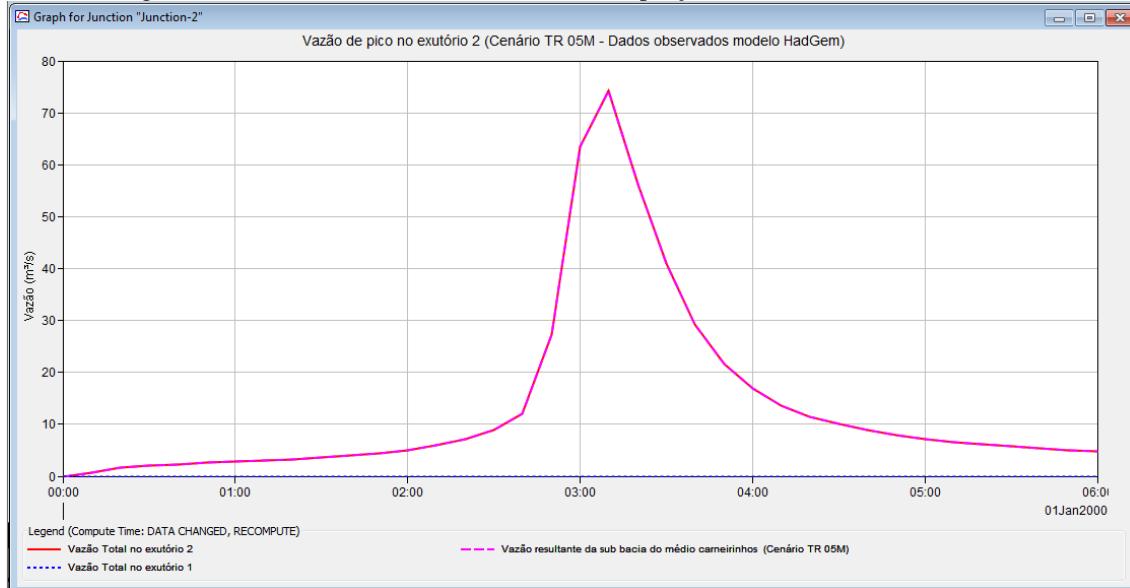
Figura 56: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção intermediária da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na parte alta da bacia não ocorre precipitação, assim, a vazão de pico que passa pelo exutório desta é nula (Figura 56).

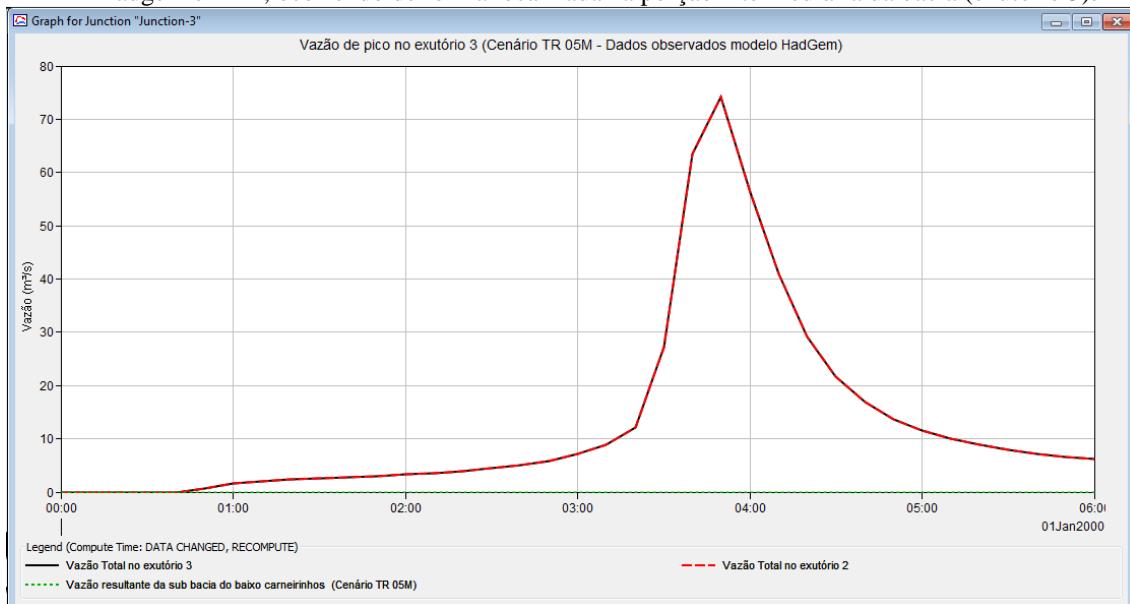
Figura 57: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção intermediária da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela precipitação, localizada na parte intermediária da bacia é de 74,20 m³/s e ocorre 3 horas e 10 minutos após o início das precipitações (Figura 57).

Figura 58: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção intermediária da bacia (exutório 3).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

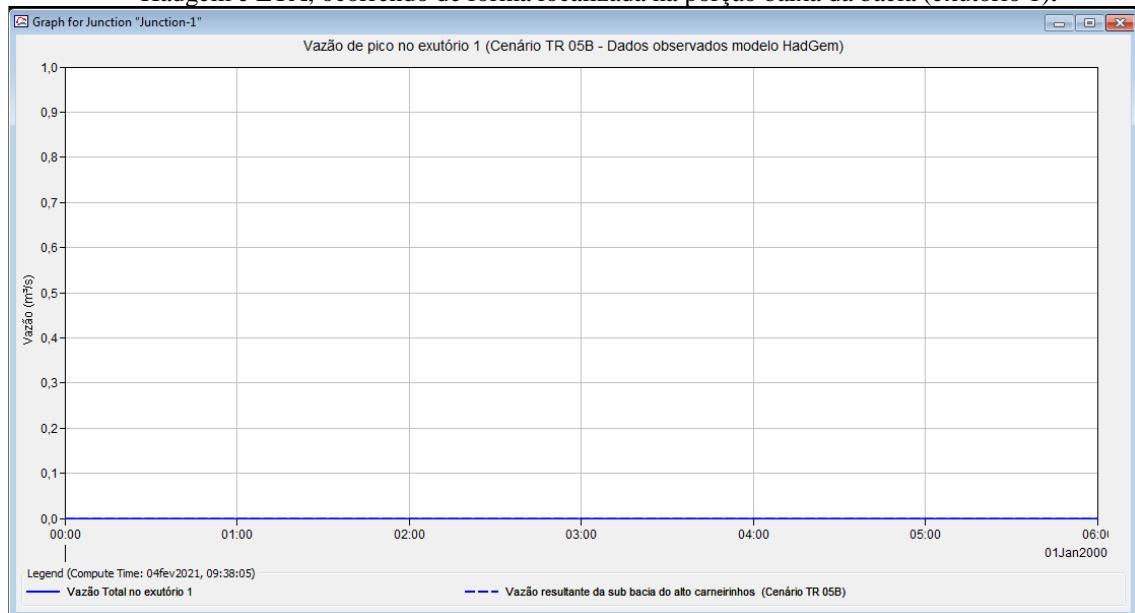
Na sub-bacia do baixo Carneirinhos, não ocorre a contribuição da vazão por esta parte da bacia, assim, a vazão máxima que passa por este exutório equivale à vazão de pico produzida

pela sub-bacia do médio Carneirinhos ($74,20 \text{ m}^3/\text{s}$), esta passa pelo exutório da bacia 4 horas e 20 minutos após o início das chuvas (Figura 58).

6.6.4 Cenário TR 05B

Para esta condição de precipitação, considerou-se a ocorrência da chuva distribuída uniformemente apenas na parte baixa da bacia.

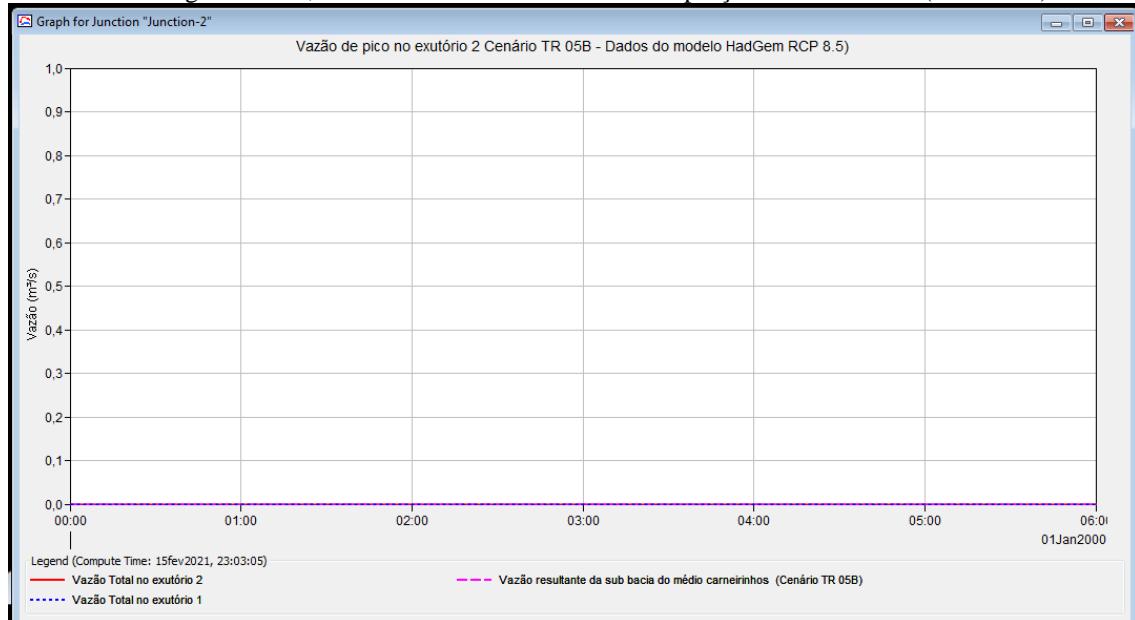
Figura 59: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Não houve a produção de vazão nesta parte da bacia.

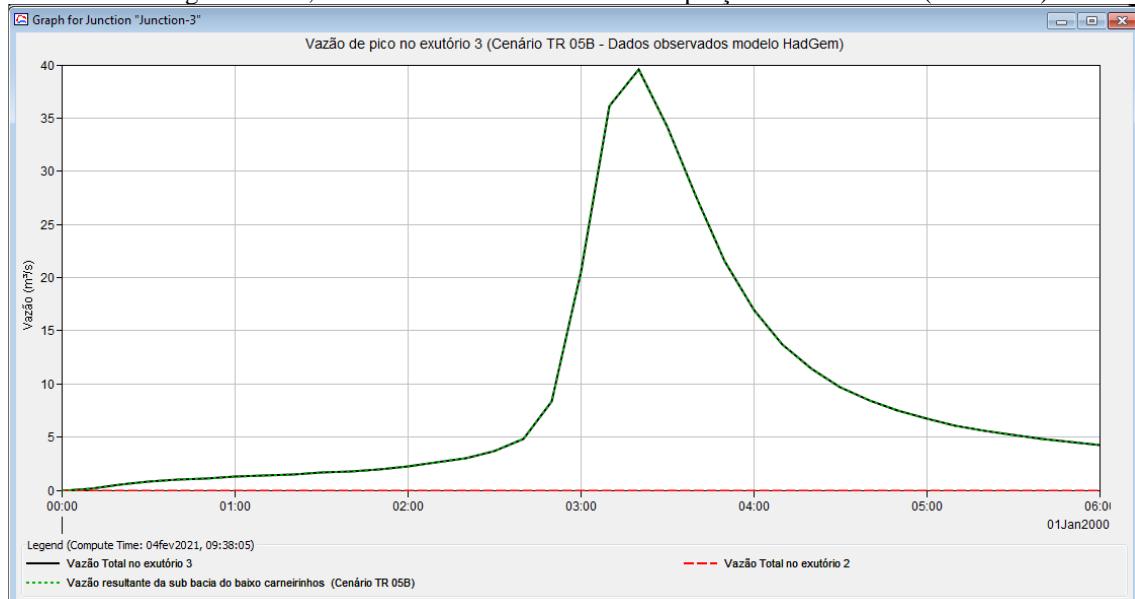
Figura 60: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Não houve a produção de vazão nesta parte da bacia.

Figura 61: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na porção baixa da bacia (exutório 3).



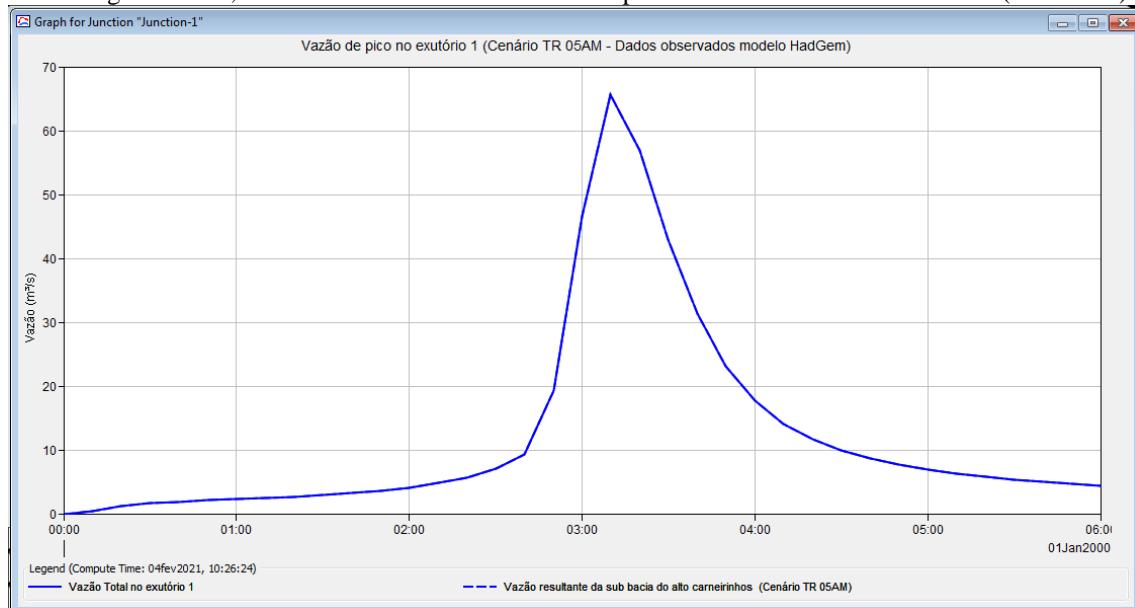
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico, ocorrida nesta parte da bacia, foi de 39,50 m³/s às 3 horas e 10 minutos após o início da chuva (Figura 61).

6.6.5 Cenário TR 05AM

Para esta condição de simulação, considerou-se que a precipitação ocorreria uniformemente apenas nas partes alta e intermediária da bacia.

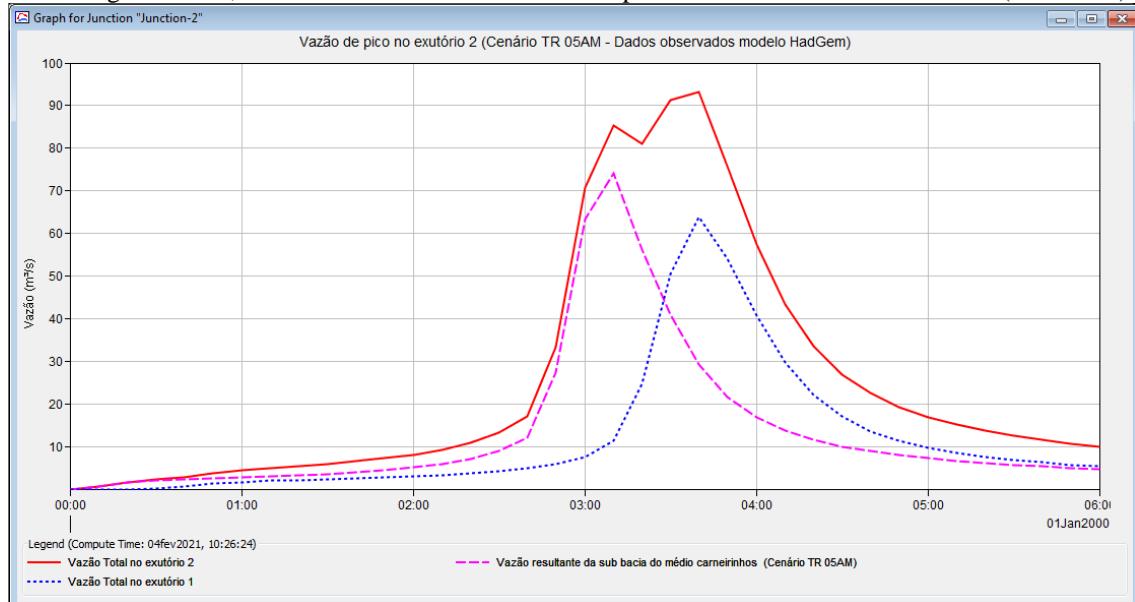
Figura 62: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia foi de 65,70 m³/s e ocorreu 3 horas e 10 minutos após o início da chuva (Figura 62).

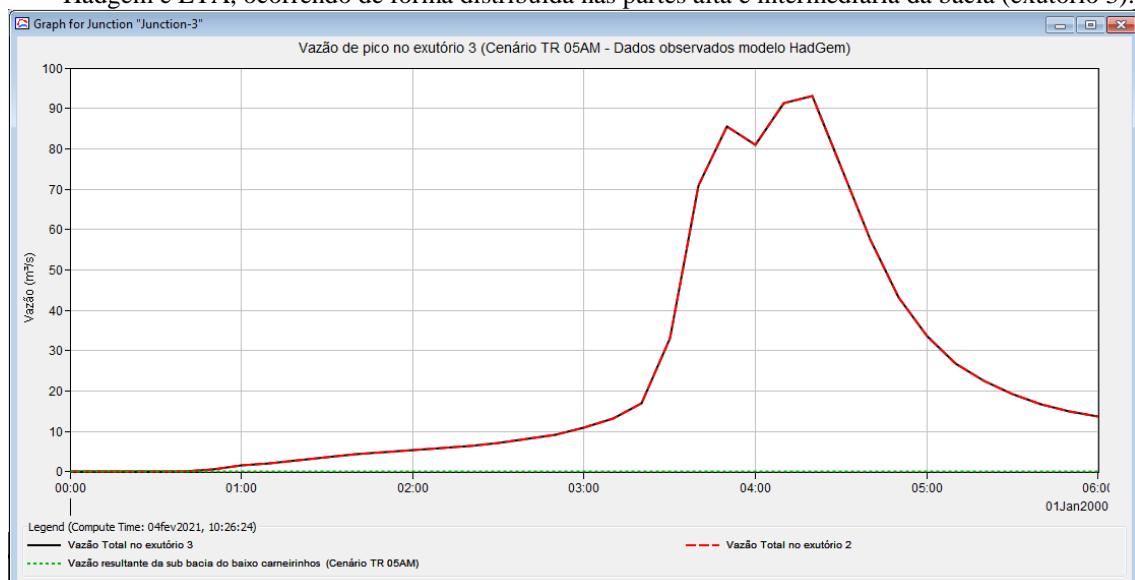
Figura 63: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia do médio Carneirinhos foi de 75 m³/s e ocorreu 3 horas e 10 minutos após o início da chuva. A vazão de pico que passou pelo exutório da bacia foi de 93,10 m³/s, 3 horas e 40 minutos e foi resultante do somatório das vazões do alto e médio Carneirinhos (Figura 63).

Figura 64: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 3).



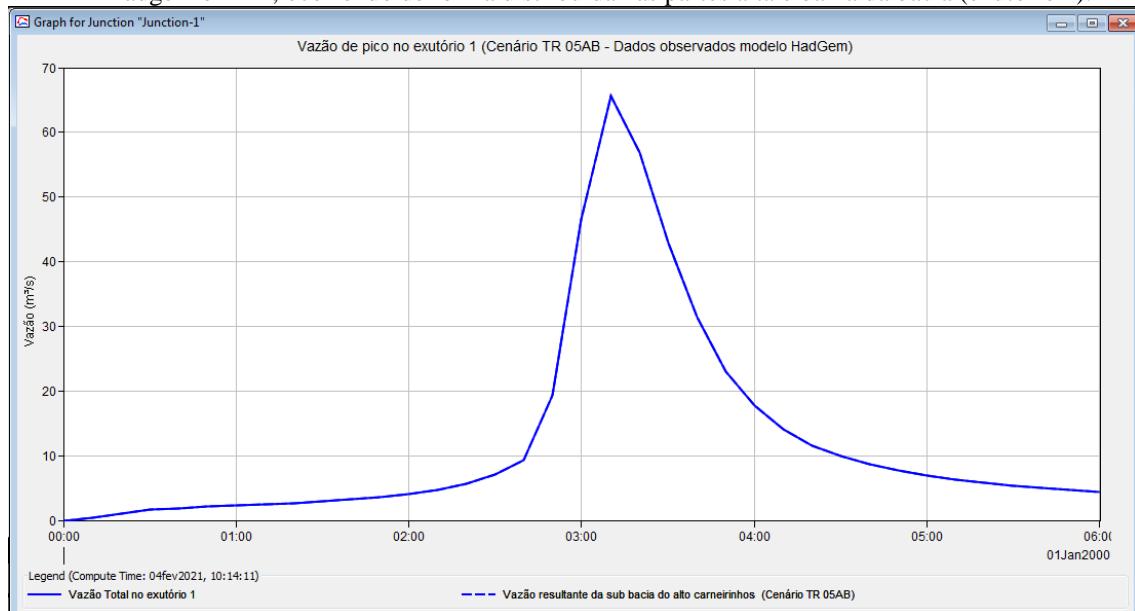
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na parte baixa da bacia, não houve a produção de vazão; logo, a vazão de pico que passou no exutório foi a acumulada nas sub-bacias anteriores ($93,10 \text{ m}^3/\text{s}$), atingindo assim seu pico 4 horas e 20 minutos após o início da chuva (Figura 64).

6.6.6 Cenário TR 05AB

Para esta condição de simulação, considerou-se que a precipitação ocorreria uniformemente apenas nas partes alta e baixa da bacia.

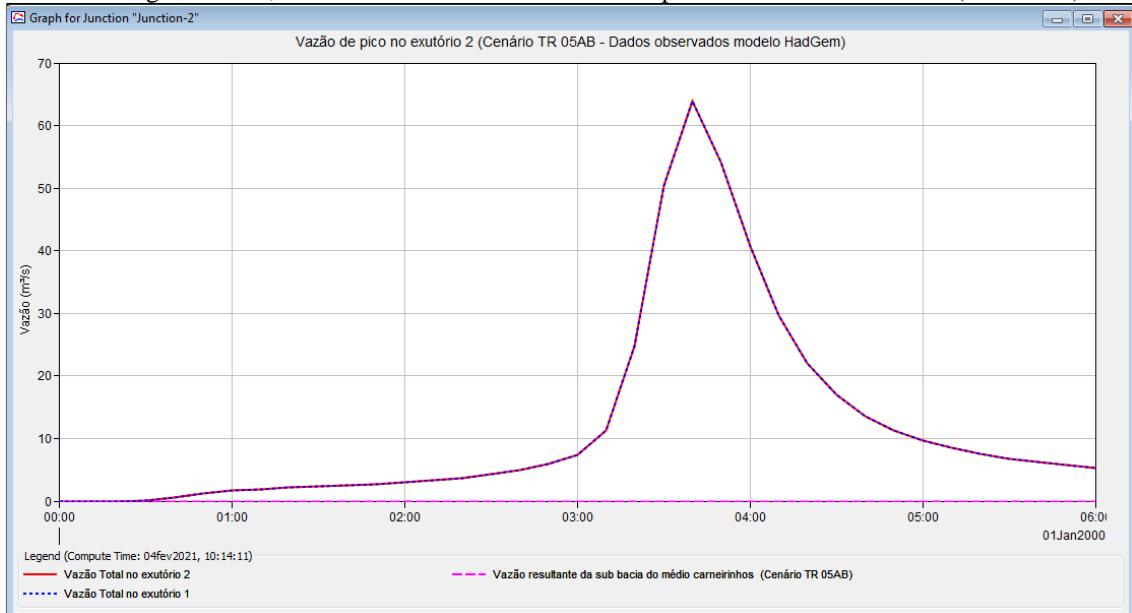
Figura 65: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes alta e baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico foi de $65,70 \text{ m}^3/\text{s}$ e ocorreu 3 horas e 10 minutos, ultrapassando a capacidade de escoamento das galerias da bacia (Figura 65).

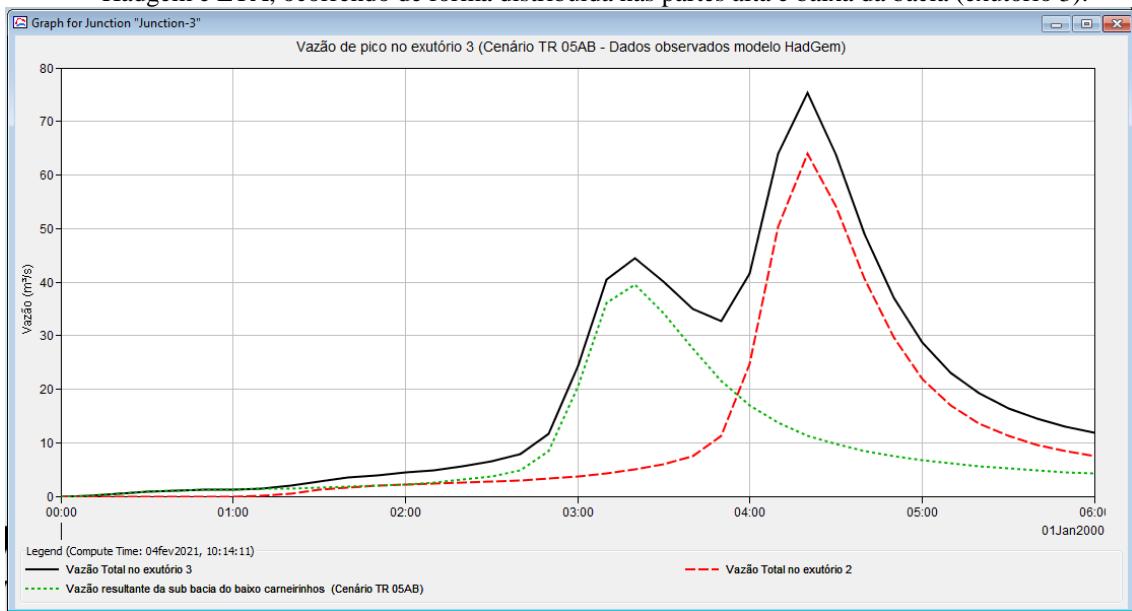
Figura 66: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes alta e baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na parte intermediária da bacia não houve contribuição de vazão; logo, a vazão de pico ocorrida na bacia foi resultante da sub-bacia do alto Carneirinhos devido a sua propagação pela bacia, assim, a vazão de pico no médio Carneirinhos ocorreu 3 horas e 40 minutos e com uma vazão de 63,90 m³/s (Figura 66).

Figura 67: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes alta e baixa da bacia (exutório 3).



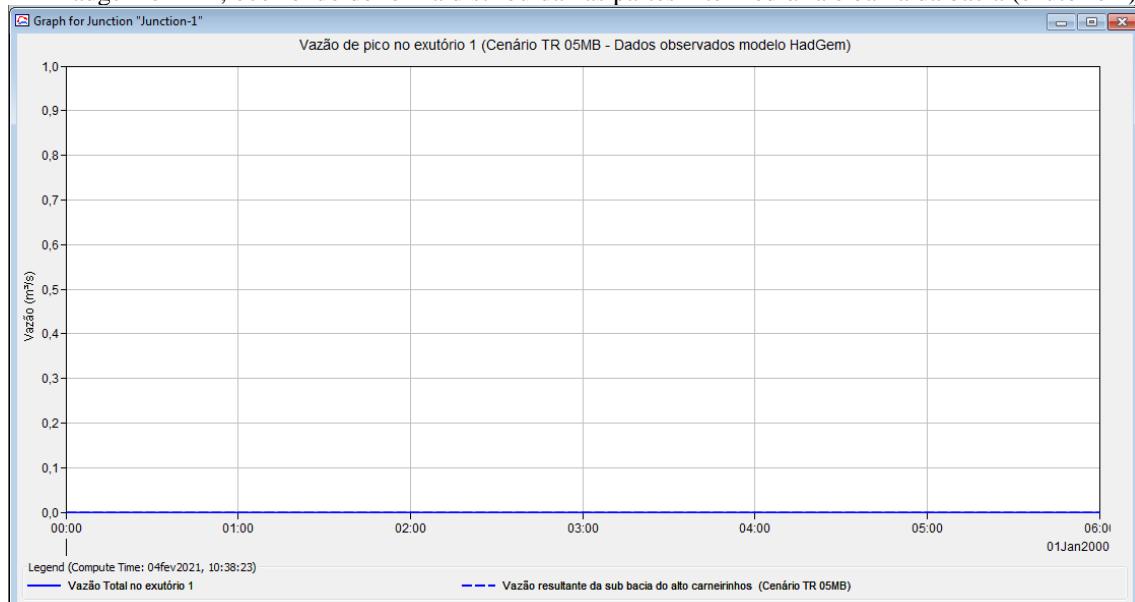
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico propagada da sub-bacia do alto Carneirinhos atingiu o baixo Carneirinhos 4 horas e 20 minutos após o início da chuva, com uma vazão de 63,9 m³/s. Somando-se à vazão de pico, produzida pelo baixo Carneirinhos de 40 m³/s, 3 horas e 10 minutos após o início das chuvas, produziu uma vazão de pico acumulada na bacia de 75,30 m³/s, 4 horas e 20 minutos a contar do início da precipitação (Figura 67).

6.6.7 Cenário TR 05MB

Para esta condição de simulação, considerou-se que a precipitação ocorreria uniformemente apenas nas partes intermedíaria e baixa da bacia.

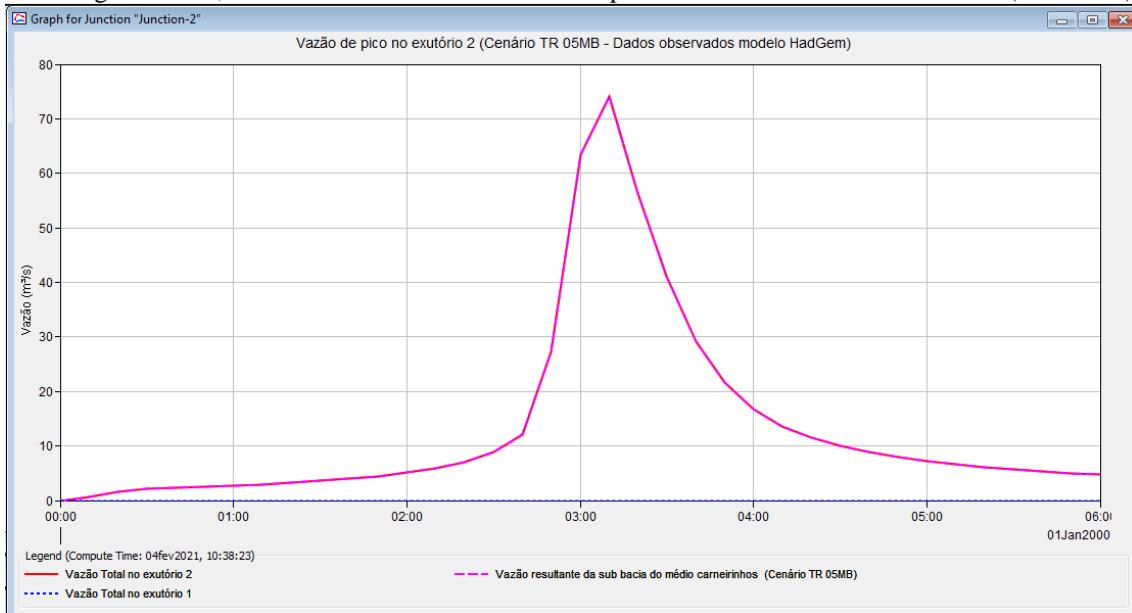
Figura 68: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05MB projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes intermedíaria e baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para a condição em que é proposta a distribuição das chuvas, apenas na parte média e baixa da bacia não há a formação de vazão de pico no alto Carneirinhos (Figura 68).

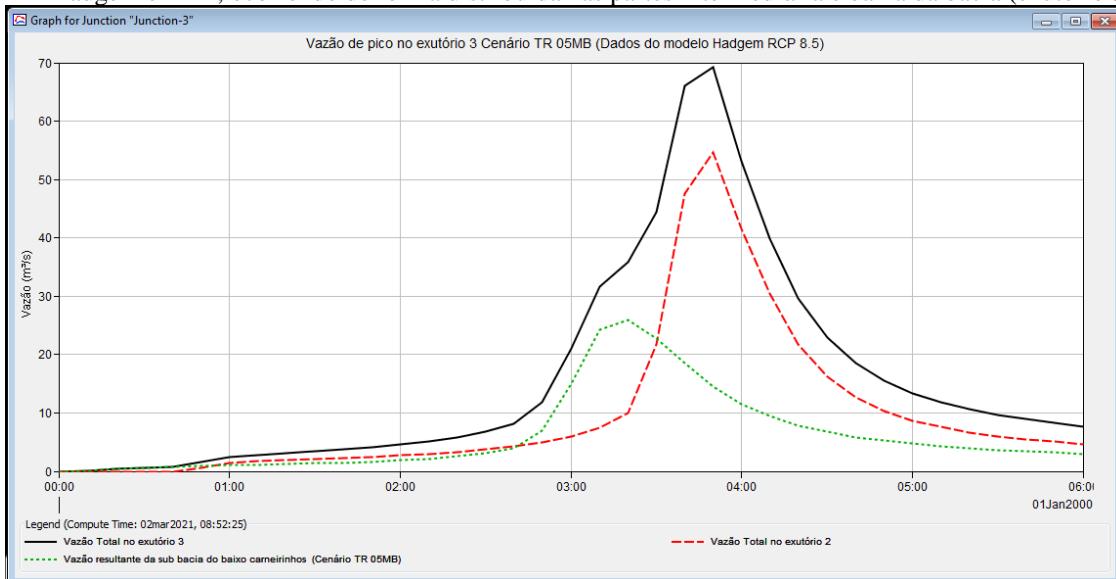
Figura 69: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05MB projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes intermediária e baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na porção média da bacia, a vazão de pico é de 74,20 m³/s e ocorre 3 horas e 10 minutos após o início das chuvas (Figura 69).

Figura 70: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05MB projetada pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes intermediária e baixa da bacia (exutório 3).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico propagada da sub-bacia do médio Carneirinhos atingiu o baixo Carneirinhos 4 horas e 20 minutos após o início das chuvas, com uma vazão de 74,20 m³/s, somada à vazão de pico produzida pelo baixo Carneirinhos de 40 m³/s 3 horas e 10 minutos,

produzindo assim uma vazão de pico acumulada na bacia de $95,70 \text{ m}^3/\text{s}$, 3 horas e 50 minutos após o início das chuvas (Figura 70).

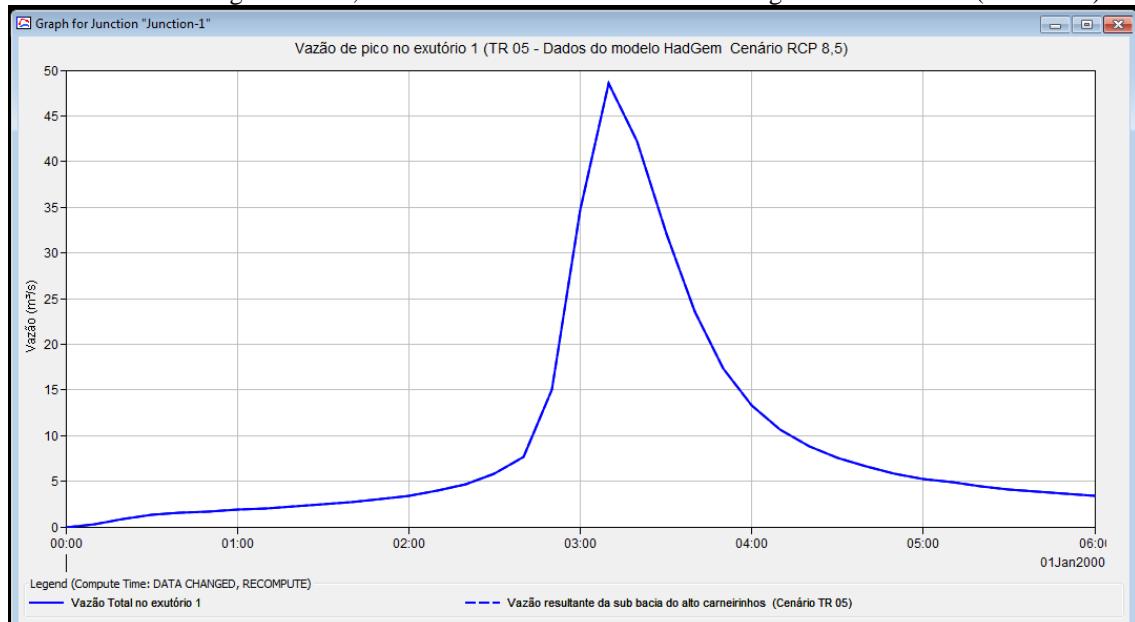
6.7 Resultados das simulações hidrológicas para as precipitações no clima do futuro

As análises contempladas nesta subseção foram realizadas a partir dos resultados obtidos com as simulações hidrológicas, considerando as precipitações simuladas para o clima do futuro com tempo de retorno de 5 anos.

6.7.1 Cenário TR 05

Como anteriormente, para o cenário TR 05, foi considerado que as mudanças climáticas existem em uma intensidade maior quando comparada com as projeções do clima do presente. Para isso, avaliaram-se apenas seus efeitos sobre as chuvas com TR05.

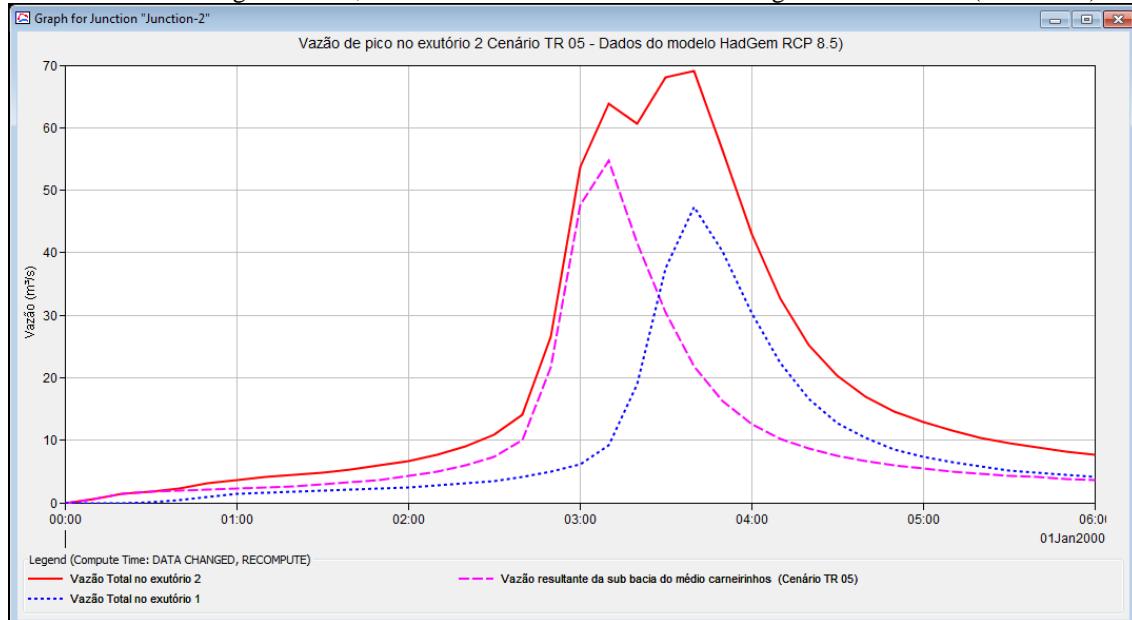
Figura 71: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a bacia. (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela chuva de TR 05, para o cenário futuro, foi de $48,6 \text{ m}^3/\text{s}$ e ocorre 3 horas e 10 minutos após o início das precipitações (Figura 71).

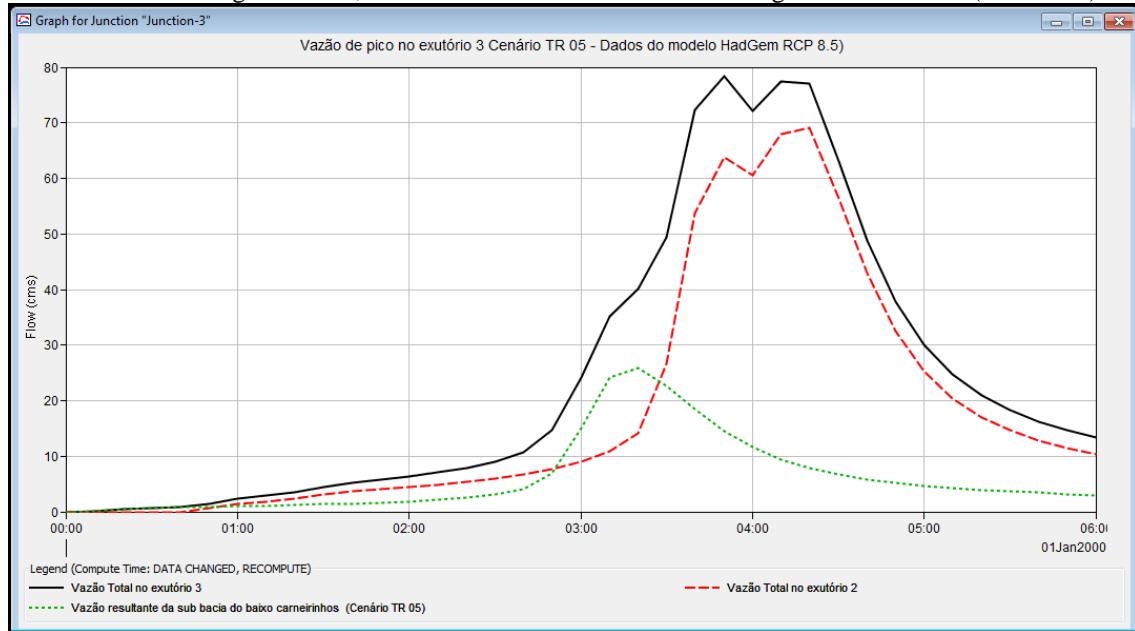
Figura 72: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia do médio Carneirinhos foi de 55 m³/s e seu pico ocorreu 3 horas e 10 minutos após o início da chuva. Logo, a vazão máxima de pico que passa pelo exutório desta sub-bacia é de 69,10 m³/s, 3 horas e 40 minutos após o início das precipitações. Esta vazão pode ser justificada pelo somatório das vazões do alto e médio Carneirinhos; assim, é possível notar a ocorrência de 2 picos de vazão, sendo o primeiro no momento da máxima vazão da sub-bacia e o segundo, alguns minutos após isto (Figura 72).

Figura 73: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída ao longo de toda a bacia (exutório 3).



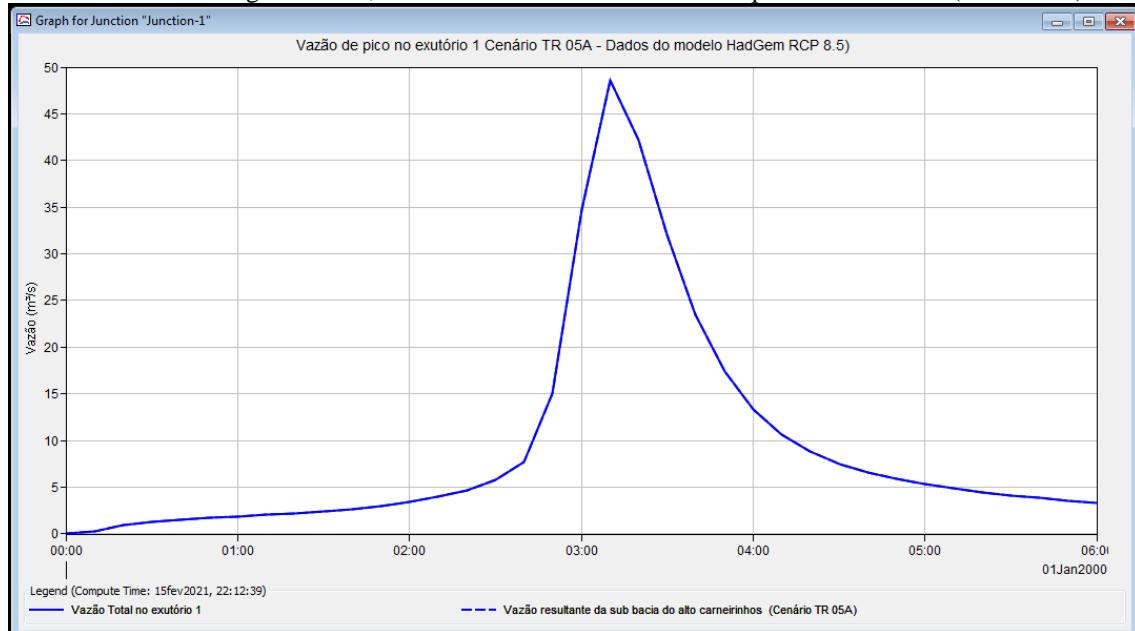
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

No baixo Carneirinhos, passa a maior vazão produzida pela precipitação na bacia, desse modo, a máxima vazão que passa por este ponto é de 78,40 m³/s e ocorre 3 horas e 50 minutos após o início das precipitações (Figura 73).

6.7.2 Cenário TR 05A

Para o cenário TR 05A, considerou-se a ocorrência da chuva apenas na porção mais alta da bacia.

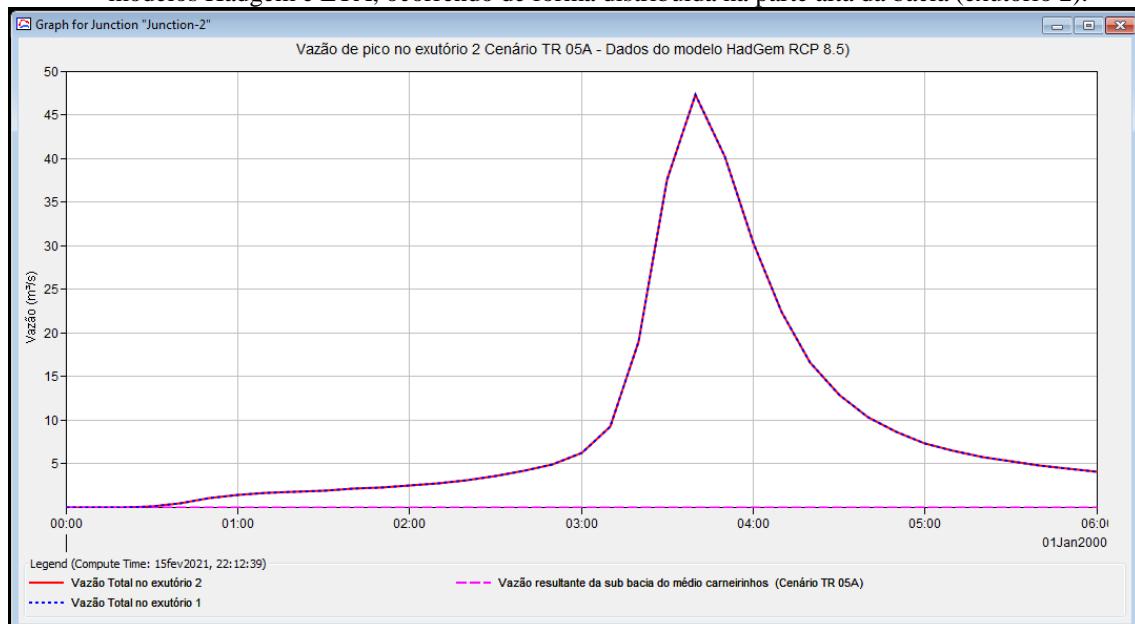
Figura 74: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída na parte alta da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia, para esta condição de combinação, foi de 48,60 m^3/s e ocorre 3 horas e 10 minutos após o início das precipitações (Figura 74).

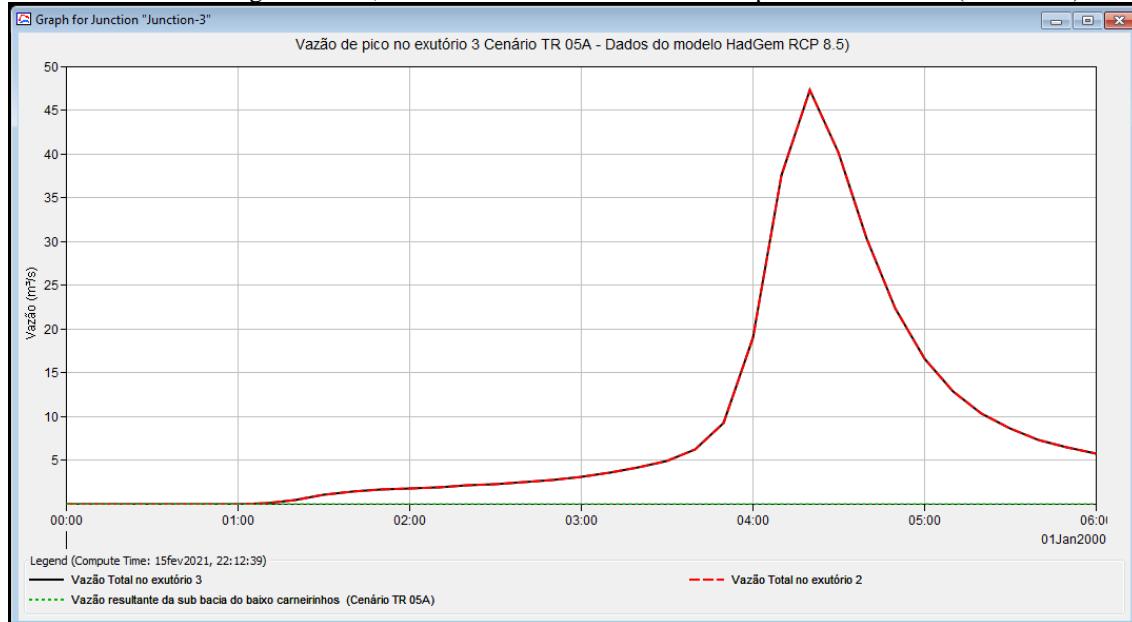
Figura 75: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída na parte alta da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia, para esta condição de combinação, foi de 47,30 m³/s e ocorre 3 horas e 10 minutos após o início das precipitações (Figura 75).

Figura 76: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05A projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída na parte alta da bacia (exutório 3).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A sub-bacia do médio Carneirinho não produzirá contribuição para a vazão de pico, assim, a máxima vazão que passará pelo seu exutório é de 47,30 m³/s, 3 horas e 40 minutos após o início da chuva, sendo a vazão proveniente do alto Carneirinhos (Figura 76).

6.7.3 Cenário TR 05M

Para o cenário TR 05M, considerou-se a ocorrência da chuva apenas na porção mais intermediária da bacia.

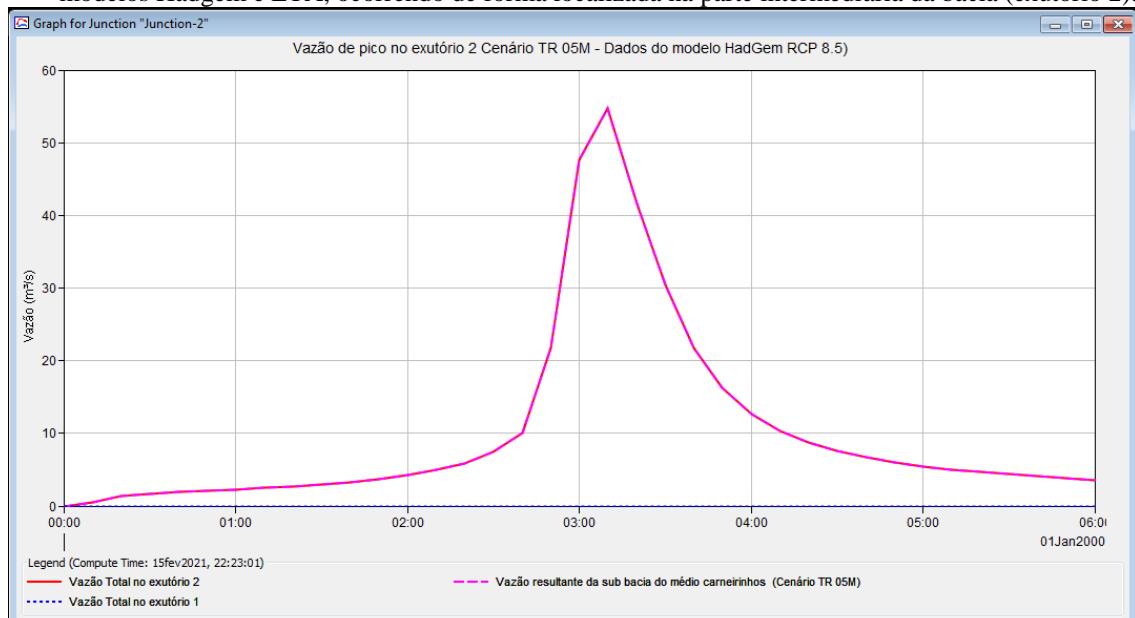
Figura 77: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte intermediária da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para a condição em que é proposta a distribuição das chuvas apenas na parte média da bacia não há a formação de vazão de pico no alto Carneirinhos (Figura 77).

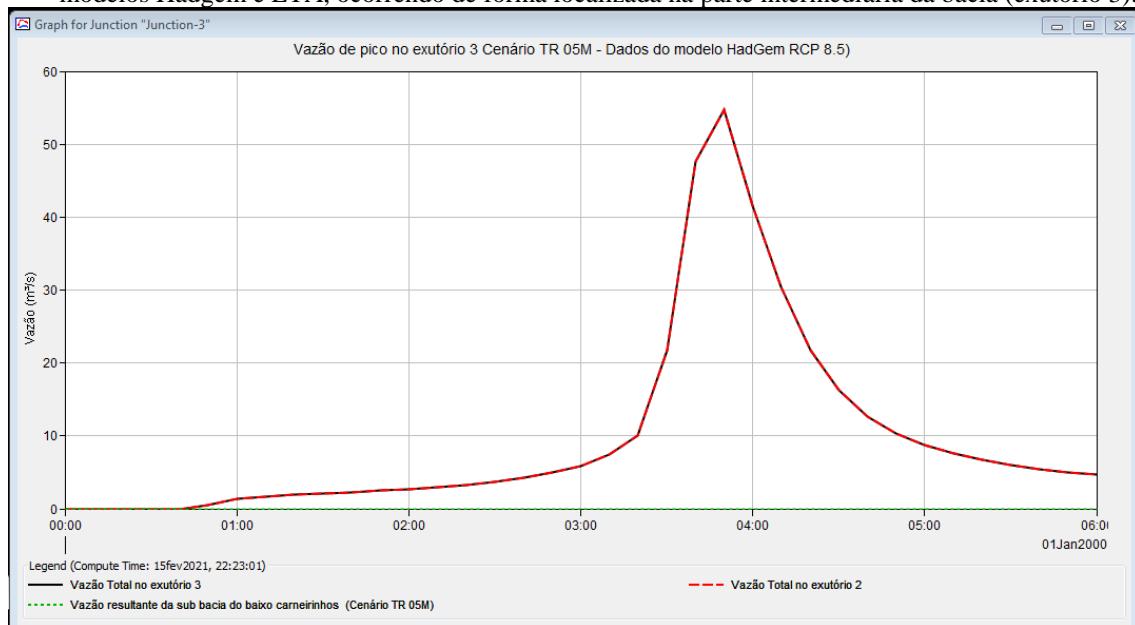
Figura 78: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte intermediária da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela precipitação, localizada na porção média da bacia, é de 54,70 m³/s e ocorre 3 horas e 10 minutos após o início das precipitações (Figura 78).

Figura 79: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05M projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte intermediária da bacia (exutório 3).



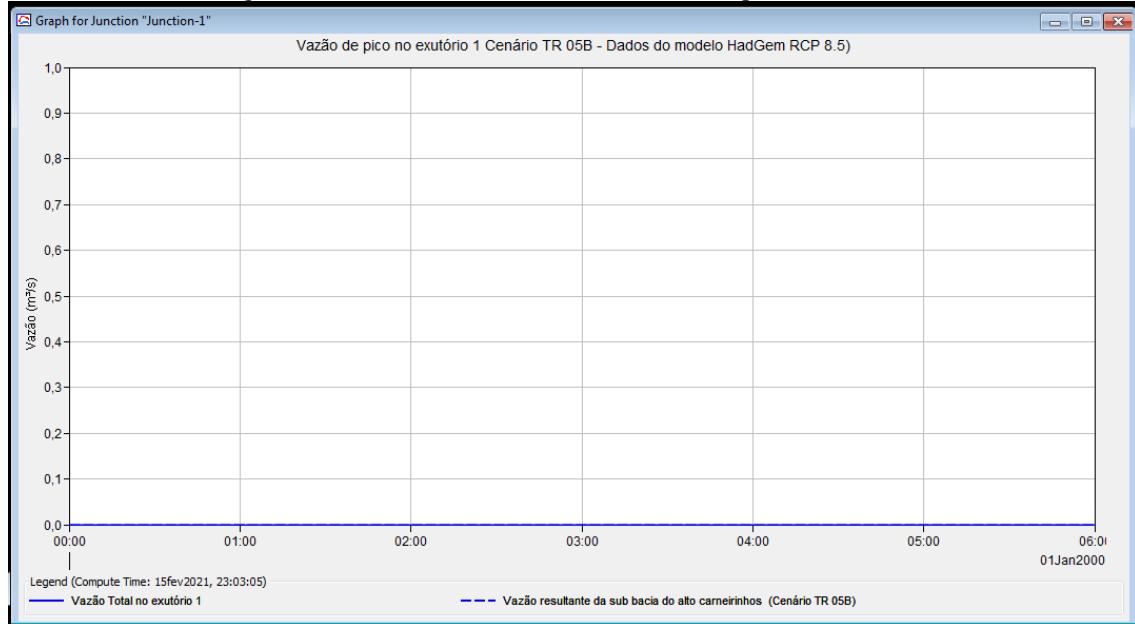
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão de pico produzida pela sub-bacia do médio Carneirinhos é de 54,70 m³/s passa pelo exutório da bacia 3 horas e 50 minutos após o início das chuvas (Figura 79).

6.7.4 Cenário TR 05B

Para o cenário TR 05B, considerou-se a ocorrência da chuva apenas na porção mais baixa da bacia.

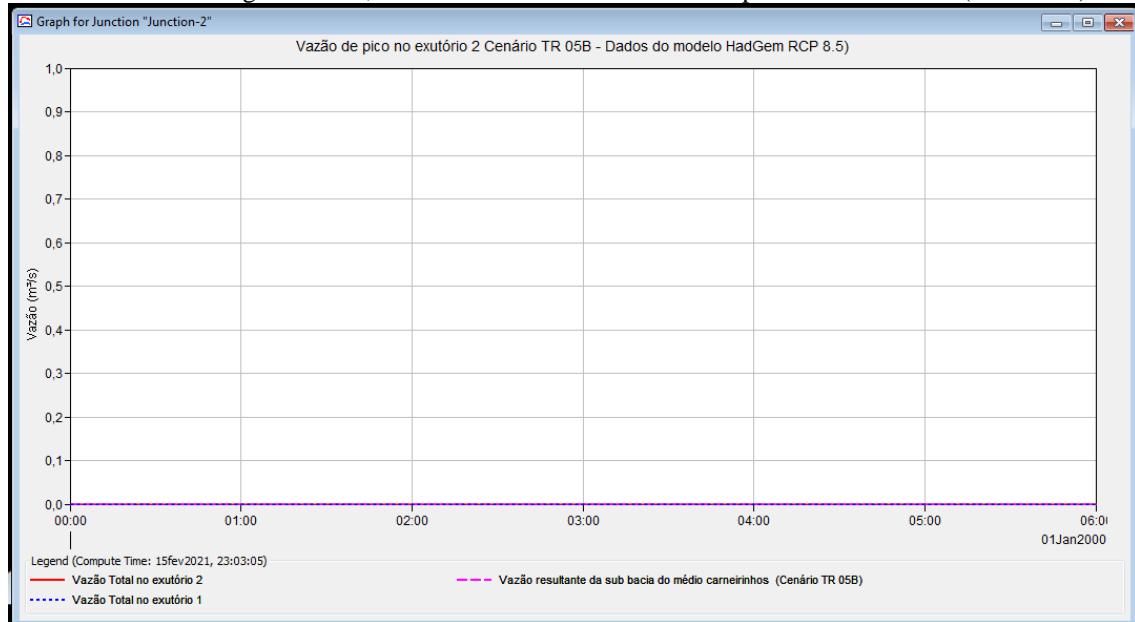
Figura 80: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para a condição em que é proposta a distribuição das chuvas apenas na parte baixa da bacia não há a formação de vazão de pico no alto Carneirinhos (Figura 80).

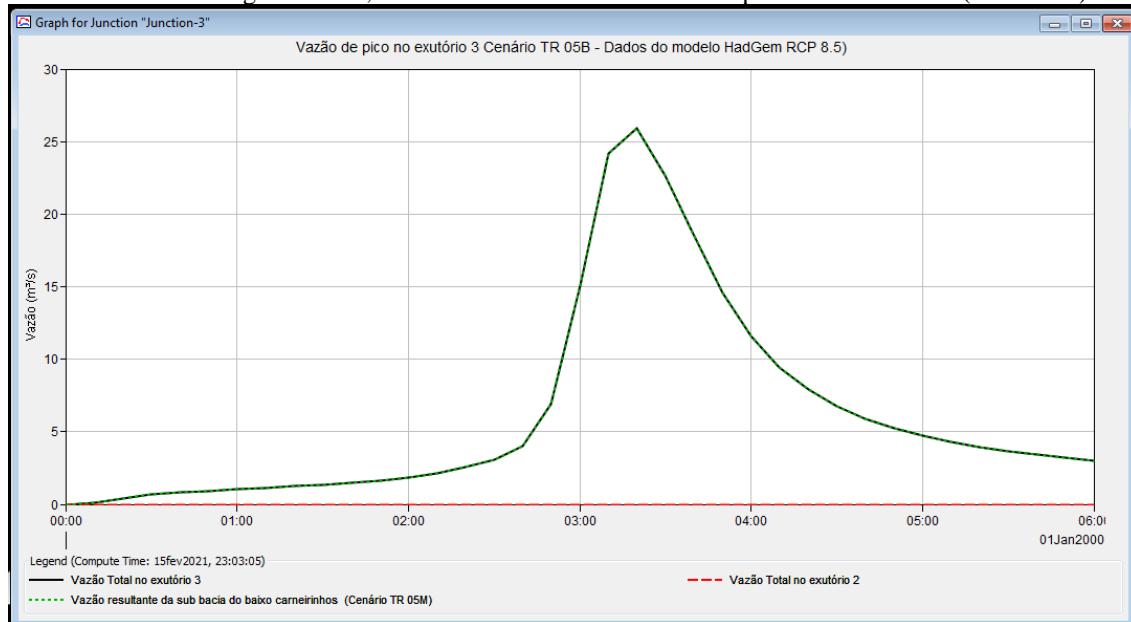
Figura 81: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para a condição em que é proposta a distribuição das chuvas apenas na parte baixa da bacia não há a formação de vazão de pico no alto e médio Carneirinhos (Figura 81).

Figura 82: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05B projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma localizada na parte baixa da bacia (exutório 3).



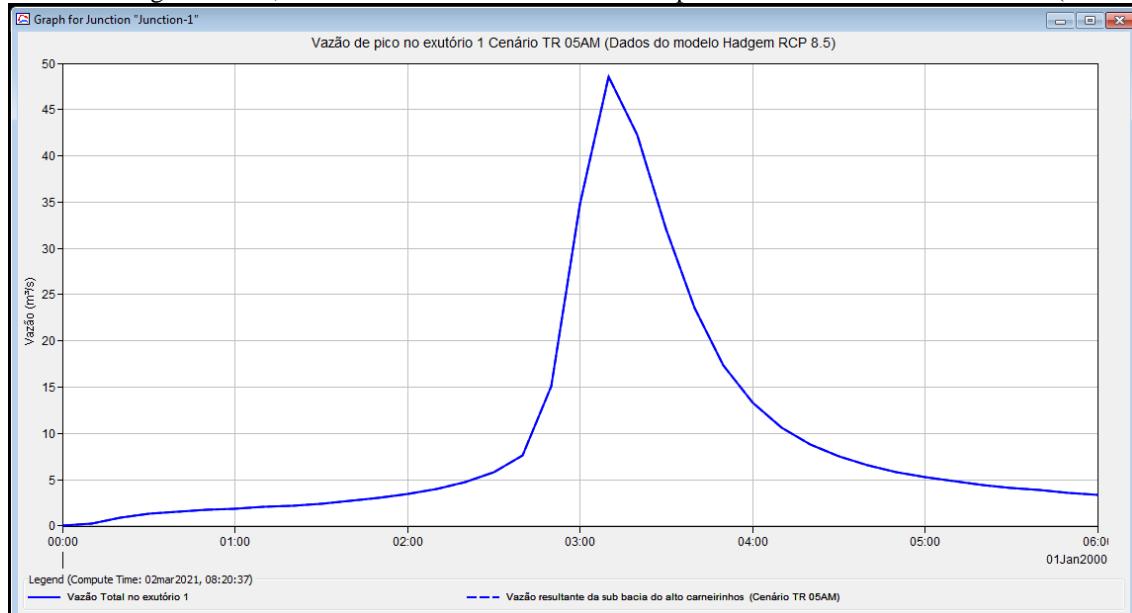
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Neste cenário, a vazão de pico que alcançou o exutório da bacia do córrego Carneirinhos foi 25,90m³/s, 3 horas e 20 minutos após o início das chuvas (Figura 82).

6.7.5 Cenário TR 05AM

Para o cenário TR 05AM, considerou-se a ocorrência da chuva distribuída na parte alta e intermediária da bacia.

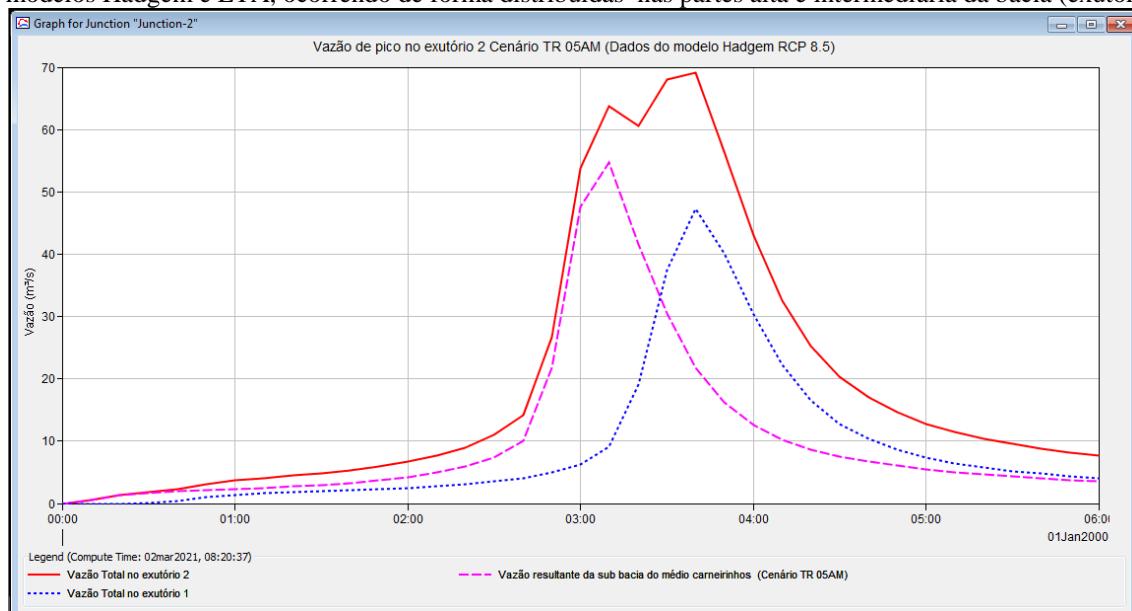
Figura 83: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AM projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Neste cenário, com precipitações ocorrendo nas porções do alto e médio Carneirinhos, a vazão de pico no exutório 1 foi de 48,60m³/s, 3 horas e 10 minutos após o início das chuvas (Figura 83).

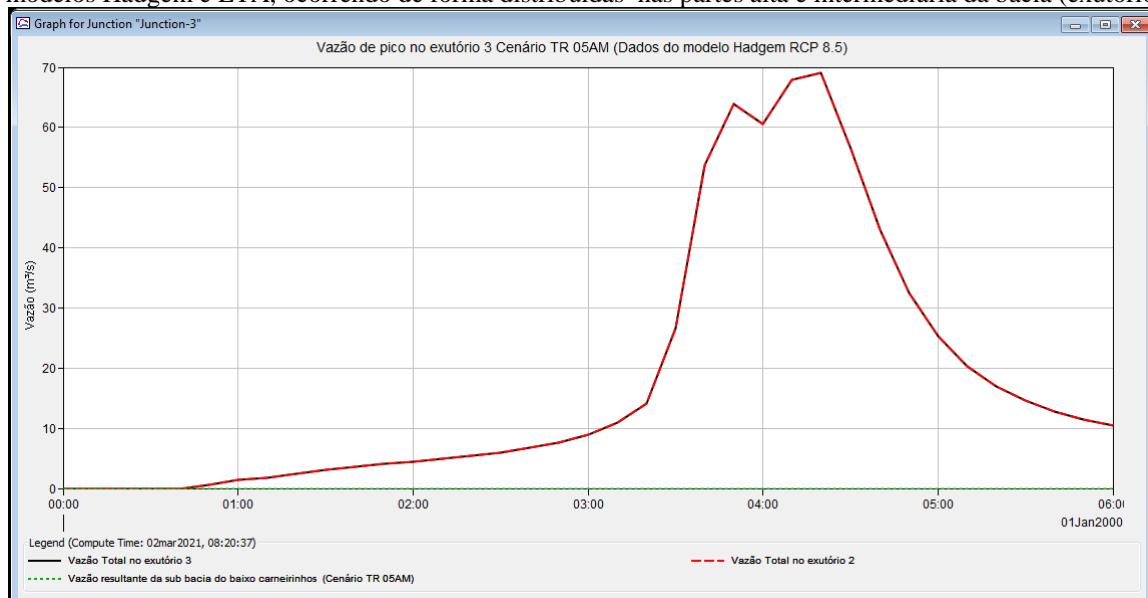
Figura 84: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 AM projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

No exutório 2, a vazão de pico foi 69,10m³/s, 3 horas e 40 minutos após o início das chuvas (Figura 84).

Figura 85: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 AM projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuída nas partes alta e intermediária da bacia (exutório 3).



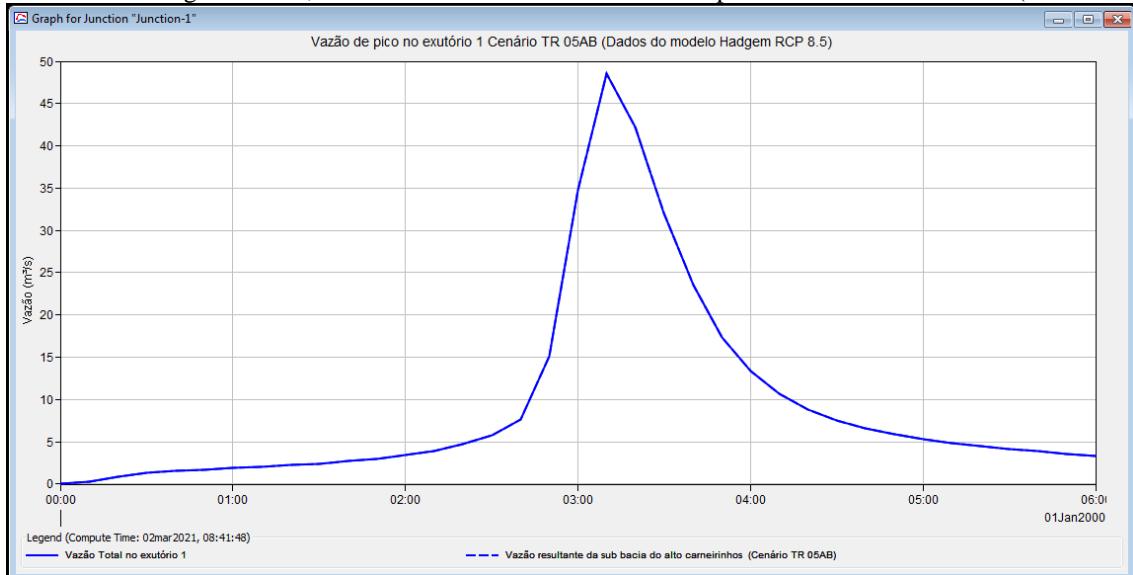
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A resultante das vazões acumuladas que passou no exutório 3 foi de 69,10 m³/s após 4 horas e 20 minutos do início das chuvas (Figura 85).

6.7.6 Cenário TR 05AB

Para o cenário TR 05AB, considerou-se a ocorrência da chuva distribuída nas parte alta e baixa da bacia.

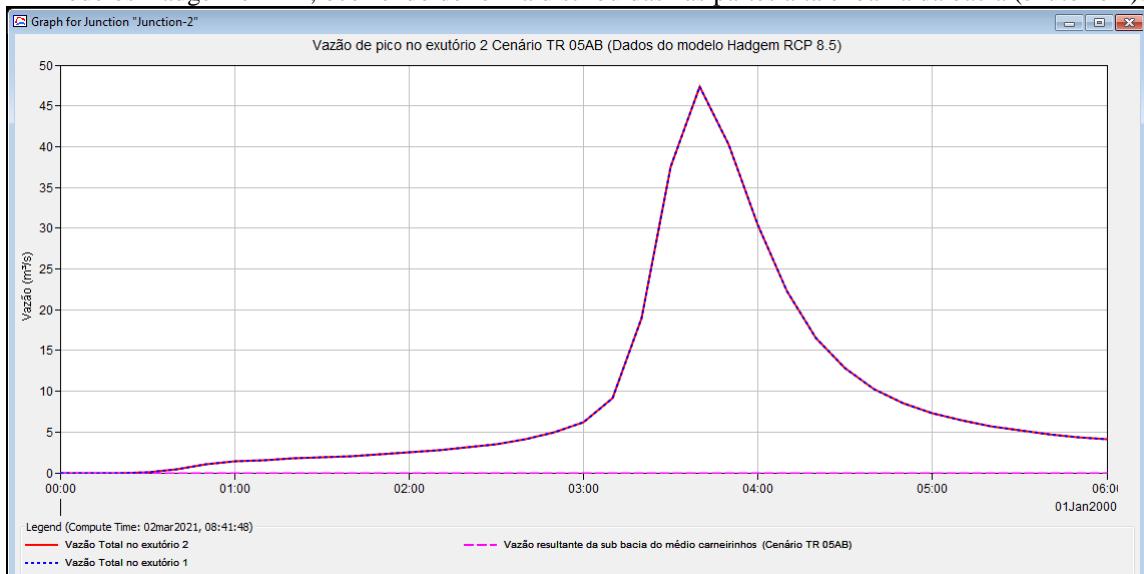
Figura 86: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 AB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

No cenário onde há a concentração das precipitações nas regiões alta e baixa da bacia, a vazão de pico no alto Carneirinhos foi de 48,60 m³/s, 3 horas e 10 minutos após o início das chuvas (Figura 86).

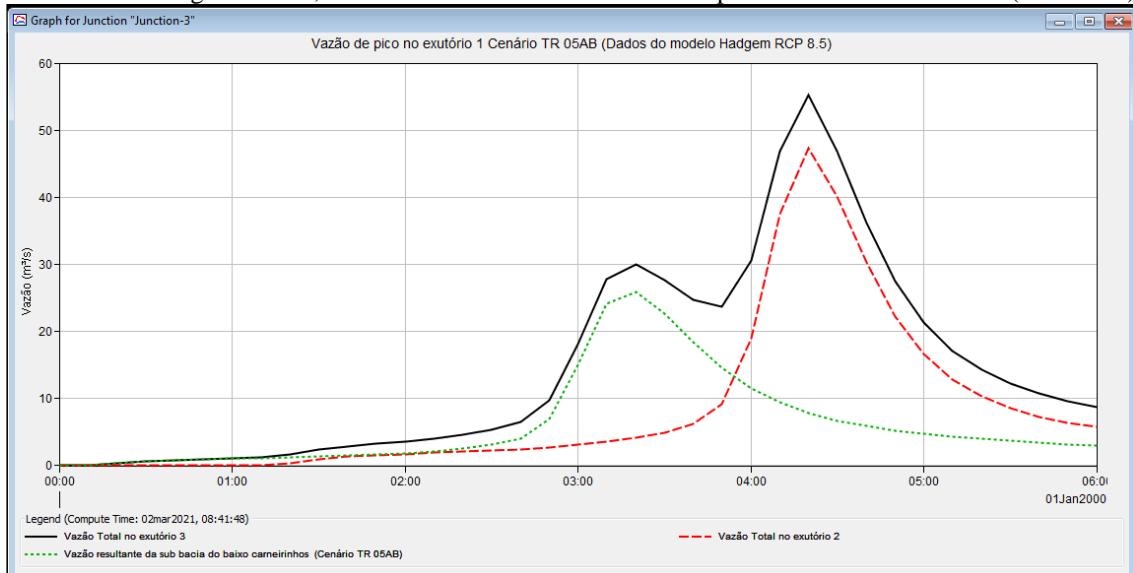
Figura 87: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05AB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Não houve contribuição de vazão na porção média da bacia, assim, o amortecimento de uma parte da vazão resultou em uma vazão de pico de 47,30 m³/s, 3 horas e 40 minutos após o início das chuvas (Figura 87).

Figura 88: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 AB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes alta e baixa da bacia (exutório 3).



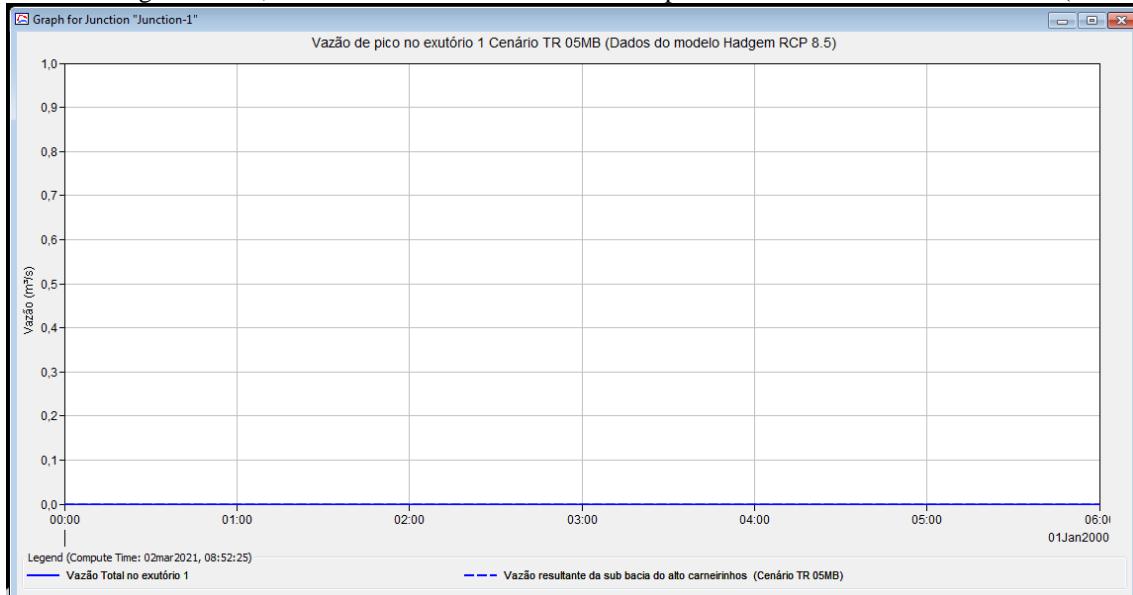
Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

A vazão que atingiu o exutório da bacia foi de 55,20 m³/s, 4 horas e 20 minutos após o início das chuvas (Figura 88).

6.7.7 Cenário TR 05MB

Para o cenário TR 05MB, considerou-se a ocorrência da chuva distribuída nas partes intermediárias e baixa da bacia.

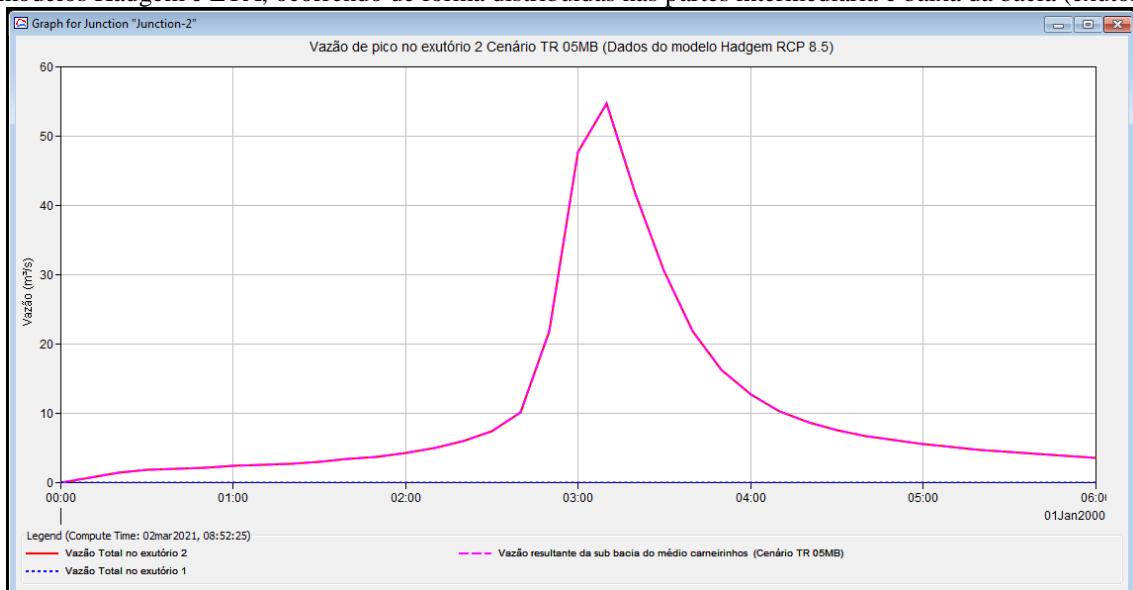
Figura 89: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes intermediaria e baixa da bacia (exutório 1).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Para a condição em que é proposta a distribuição das chuvas apenas nas partes média e baixa da bacia não há a formação de vazão de pico no alto Carneirinhos (Figura 89).

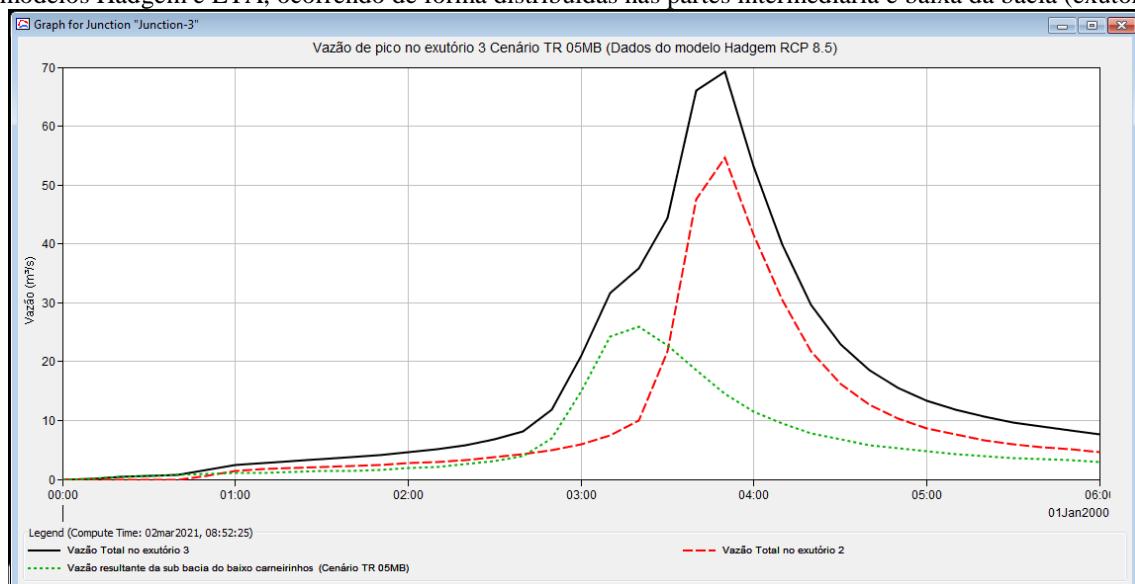
Figura 90: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes intermediaria e baixa da bacia (exutório 2).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Na porção média da bacia, a vazão é de 54,70m³/s, 3 horas e 10 minutos após o início das chuvas (Figura 90).

Figura 91: Hietograma da vazão de pico produzida por uma chuva com TR 05 MB projetada para o futuro pelos modelos Hadgem e ETA, ocorrendo de forma distribuídas nas partes intermediaria e baixa da bacia (exutório 3).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Nesta condição, a vazão que chegou até o exutório da bacia foi de 69,20 m^3/s , 3 horas e 50 minutos após o início das chuvas (Figura 91).

6.8 Análise das combinações de ocorrência de precipitações na bacia

A premissa de análise desta pesquisa considera que o canal do córrego Carneirinhos suporta 62 m^3/s , conforme Franco et al. (2016). Considera-se que os valores de vazão superiores à capacidade do canal são responsáveis por seu transbordamento e pela inundação das áreas adjacentes. Assim, foram realizadas diversas combinações de ocorrência de precipitação na área da bacia.

A partir das simulações hidrológicas realizadas, constatou-se que as sub-bacias do alto e médio Carneirinhos são responsáveis por mais de 84% de todo o escoamento superficial formado durante a ocorrência de chuva distribuída uniformemente em toda a bacia. Além disso, pode-se verificar que mesmo as precipitações com baixo tempo de retorno (TR 05) provocam inundações na bacia do córrego Carneirinhos.

Considerando o tempo de retorno de 5 anos nas simulações realizadas com os dados observados e simulados para o clima do presente, averiguou-se que as chuvas concentradas, apenas na região do alto Carneirinhos, são suficientes para ocasionar inundações nas partes

média e baixa da bacia, visto que apresentaram volumes superiores ao máximo suportado pelas galerias, 62 m³/s.

Os dados de precipitação simulados, considerando o clima do futuro, projetam inicialmente uma redução nas precipitações máximas. Porém, a partir de um tempo de retorno de 50 anos, esta projeção se inverte. Mesmo considerando a redução inicial, a partir da combinação das chuvas localizadas nas porções do alto e médio Carneirinhos, foi observado que chuvas com TR 05 foram suficientes para ultrapassar o limite máximo de escoamento suportado pelas galerias, provocando assim inundações na bacia.

Os dados de precipitação simulados, considerando o clima do presente, apresentaram diferenças em relação aos dados observados que, provavelmente ocorrem em função das incertezas relacionadas com a representação imperfeita do sistema climático nos modelos e nas parametrizações de processos físicos que ocorrem em escala inferior à da grade dos modelos. O modelo ETA-HADGEM2_ES subestima a intensidade de precipitação, mesmo no caso da série temporal corrigida. Entretanto, após a correção do viés, verificou-se que os volumes precipitados, acumulados, ao longo de um ano hidrológico, nas séries observadas e nas séries simuladas para o presente e futuro foram próximos. Além disso, a série observada apresentou precipitações máximas diárias maiores que as projetadas pelo modelo.

Dessa forma, o modelo apresenta maior probabilidade de dias chuvosos, indo de encontro com as tendências de mudanças hidrológicas futuras projetadas pelo IPCC, onde é previsto um aumento da ocorrência das precipitações para a região sudeste do Brasil.

Os resultados desta pesquisa também mostraram que os dados simulados estão mais próximos dos observados quando se consideram tempos de retorno superiores a 50 anos. Além disso, nesse período foi possível verificar um aumento de aproximadamente 10% nos volumes precipitados, agravando-se assim a frequência de ocorrência de inundações.

Após as simulações, foi possível atestar que o atual sistema de drenagem da bacia do córrego Carneirinhos não suporta precipitações com tempo de retorno superiores a 5 anos. O “Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais” (CETESB, 2012) e as “Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana” (RAMOS et. al., 1999) recomendam que os sistemas de drenagem urbana devem suportar as solicitações de precipitação com tempo de retorno estimada entre 25 a 100 anos. Desse modo, as galerias do córrego Carneirinhos não atendem mais a esse requisito construtivo.

6.8.1 Precipitação acumulada após 06 horas

Um dos resultados obtidos durante as simulações, realizadas no modelo HEC-HMS, foi o volume acumulado de precipitação após 6 horas de chuva para cada cenário e tempos de retorno. Estas informações foram sintetizadas na Tabela 10:

Tabela 10 - Precipitação acumulada no intervalo de 6 horas para cada um dos cenários

FONTE DOS DADOS	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM 06 HORAS (MM)							
	TR 05	TR 10	TR 15	TR 20	TR 25	TR 30	TR 50	TR 100
OBSERVADOS	84,07	95,92	102,60	107,26	110,85	113,77	121,88	132,63
CLIMA DO PRESENTE	71,87	78,81	81,89	83,76	85,05	86,02	88,36	90,63
CLIMA DO FUTURO	59,67	69,83	75,78	80,00	83,27	85,94	93,43	103,60

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

Nota-se, a partir dos dados agrupados na Tabela 10, que há uma tendência de redução nos volumes acumulados precipitados em 6 horas, comparando os dados simulados para o futuro com os dados para o presente e observados para as chuvas com tempo de retorno inferior a 50 anos. Quando se comparam os dados simulados para o presente e o futuro para TR50 e TR100, verifica-se que há um acréscimo de 5,43% e 12,52% nos volumes totais precipitados em 6 horas. Pressupõe-se que este comportamento esteja atrelado aos efeitos das mudanças climáticas que foram considerados no modelo, ou seja, o incremento de 8,5W/m² de energia proveniente da radiação solar e da emissão de GEEs na atmosfera que seriam suficientes para alterar a distribuição da precipitação na região.

O volume total do acumulado em 6 horas de precipitação diminuiu, entretanto, o volume acumulado dentro do ano hidrológico cresceu, provocando, assim, o aumento do número de dias chuvosos que, consequentemente, podem ser considerados um fator desencadeador de eventos de inundações.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos, constatou-se que a bacia hidrográfica do córrego Carneirinhos possui uma suscetibilidade natural entre média e grande à ocorrência de inundações. Esta situação é potencializada pelo uso e ocupação do solo, principalmente pela existência de grandes áreas impermeabilizadas que dificultam a infiltração da água no solo.

As áreas construídas encontram-se tanto nas partes mais baixas da bacia, quanto nas partes mais altas. Desse modo, as ocupações nas partes baixas, encontram-se, nas antigas áreas de planície de inundaçao do córrego Carneirinhos. Vale ressaltar também que o uso do solo sem considerar as características geomorfológicas da bacia pode potencializar a suscetibilidade natural da bacia a situações de inundações.

Diversos eventos de inundaçao foram registrados no córrego Carneirinhos durante as últimas décadas, sendo que as mudanças climáticas e suas consequentes alterações nos padrões hidrológicos, aliados às características morfométricas da bacia, uso e ocupação do solo, a canalização do córrego, possíveis falhas no dimensionamento do projeto do sistema de drenagem da bacia e/ou a combinação de todos estes elementos são alguns possíveis fatores que podem explicar o grande número e a recorrência destes eventos.

Foi constatado também que, desde a implantação da canalização do córrego Carneirinhos, na década de 1970, não houve ampliações ou revitalização neste sistema, logo, ele foi se tornando obsoleto e não conseguiu mais atender à solicitação de escoamento gerada pelas chuvas. Um dos fatores que pode ter contribuído para isso foi o aumento da população da região, visto que esta dobrou de 1970 até 2020. Somado a isto, ainda contribui a geologia da sub-bacia, que apresenta predominância de Cambissolos, que são solos jovens e que favorecem a formação de escoamento superficial.

O controle das inundações em uma bacia hidrográfica é tarefa complexa, visto que envolve diversas variáveis, que, em muitos dos casos, não podem ser mensuradas em quantidades mínimas (por exemplo, dados de precipitação horária, classificação dos solos em boa escala, entre outros).

Verificou-se que, ano após ano, o município registra perdas financeiras elevadas, especialmente porque a região pesquisada concentra seu principal centro comercial. Além disso, também há registro de perdas de vidas humanas que não poderão ser restituídas.

Por fim, recomenda-se que sejam realizados trabalhos com o objetivo de avaliar o dimensionamento estrutural do sistema de drenagem existente no município, abordando sua

adequação frente às mudanças climáticas futuras, uma vez que os eventos de inundaçāo estão aumentando sua frequēcia. Bem como adotar medidas de contenção dos escoamentos superficiais, como bacias de detenção, aumento das áreas permeáveis e/ou implantação de outro sistema de drenagem, de modo que a capacidade de suporte das galerias seja ampliada, seguindo as recomendações técnicas do manual de drenagem da FEAM e CETESB.

Além disso, sugere-se que seja criado um sistema de alerta, a partir do monitoramento da duração das chuvas, visto que chuvas com duração superior a 3h10min e precipitação superiores a 43mm são capazes de originar inundações severas na bacia, considerando-se que estas chuvas ocorrem após um período de seca. Caso ocorram em um período chuvoso, o intervalo mencionado pode diminuir devido à saturação do solo.

REFERÊNCIAS

- ABATTI, B. H.; et al. Modelagem hidrológica da bacia do rio Itajaí do Sul. **27º Seminário de Iniciação Científica da Universidade do Estado de Santa Catarina**, p. 3, 2017.
- ABES, Associação de Engenharia Sanitária e Ambiental (Minas Gerais). **Brasil desenvolve modelo próprio de análise de mudança climática**. 2013. Disponível em: <http://www.abes-mg.org.br/visualizacao-de-clipping/ler/3943/brasil-desenvolve-modelo-proprio-de-analise-de-mudanca-climatica>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- ABREU, F. G. de; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 239–250, 2017.
- ALVES, José Eustáquio Diniz. **As emissões globais de combustíveis fósseis batem recorde em 2018**. 2018. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2018/12/12/as-emissoes-globais-de-combustiveis-fosseis-batem-recorde-em-2018-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- ANA, Agência Nacional de Águas ANA (Brasil). **Hidroweb**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- ARAÚJO, José Carlos de. **Resgate cultural de João Monlevade, História e Arquitetura**. 2011. Disponível em: <http://ec1uemg.blogspot.com/2011/08/resgate-cultural-de-joao-monlevade.html>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- BACK, Á. J.; OLIVEIRA, J. L. R.; HENN, A. Relações entre precipitações intensas de diferentes durações para desagregação da chuva diária em Santa Catarina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 391–398, 2012.
- BARCELLOS, et al. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 18, n. 3, p. 285–304, set. 2009. Brasília.
- BAYLISS, A. C.; REED, D. W. *The use of historical data in flood frequency estimation*. Manual (Centre for Ecology and Hydrology - Natural Environment Research Council), March 2001, p. 87, 2001. Disponível em: <<http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/8060/1/BaylissRepN008060CR.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- BELLOUIN, N.; et al. *Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate*. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, 2011.
- BEMFICA, D. D. C. **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre**, (Dissertação - Mestrado) 1999. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 5-16, 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v5n4.p5-16>.

BRANDÃO, T. F.; SANTOS, R. L.; CARELLI, L. Eventos Hidrológicos Extremos na Cidade de Salvador-BA: Análise Espacial de Ocorrências de Alagamentos. **Investigaciones Geográficas**, , n. 51, p. 115, 2016.

BRASIL. **Sistema Integrado de Informações sobre Desastres**. 2021. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/>. Acesso em: 24 jul. 2021.

BRITO, A. L. et al.. Avaliação do Desempenho dos Modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de Indicadores de Extremos Climáticos de Precipitação para a Bacia Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 165–177, 2019.

CARLA, Ana. et al. Regionalização de vazões mínimas: breve revisão teórica. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil - REEC**, v. 14, n. 2, p. 60-70, 2018. Universidade Federal de Goias. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v14i2.47105>. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/47105>. Acesso em: 24 jul. 2021.

CASAGRANDE, B. G.; ALVAREZ, C. E. de. Ambiente Construído avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações Preparation of future weather files to evaluate the. **Ambiente Construído**, v. 13, p. 1–13, 2013. Porto Alegre.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Climanálise: Boletim de monitoramento e análise climática**. Cachoeira Paulista, 2006.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Climanálise: Boletim de monitoramento e análise climática**. Cachoeira Paulista, 2009.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Climanálise: Boletim de monitoramento e análise climática**. Cachoeira Paulista, 2012.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Infoclima: boletim de informações climáticas do CPTEC/INPE**. Cachoeira Paulista, 2015.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Infoclima: boletim de informações climáticas do CPTEC/INPE**. Cachoeira Paulista, 2016.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Infoclima: boletim de informações climáticas do CPTEC/INPE**. Cachoeira Paulista, 2017.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Infoclima: boletim de informações climáticas do CPTEC/INPE**. Cachoeira Paulista, 2018.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Análise sinótica**.

CETESB, C. A. do E. de S. P. **Manual de aspectos tecnológicos: fundamentos**. São Paulo: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano, 2012.

CHIMENE, C. A. **Cheia de Projeto: equacionando os períodos de retorno obtidos de cheias de projeto com hietograma sintético a cheia de projeto obtido de chuvas observadas**,

(Tese - Doutorado), 2019. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

CHOU, S.-C.; Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (Cptec); Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE). Modelo regional ETA. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>>. Acesso em:

CHOU, S. C. et al. *Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. American Journal of Climate Change*, v. 03, n. 05, p. 438–454, 2014.

CHRISTOFIDIS, D. et al. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, v. 43, p. 94–108, 2019. Rio de Janeiro.

CPTEC. ETA Model. Disponível em: <<http://etamodel.cptec.inpe.br/history/>>.

CRUZ, L. G. D. A. **Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do rio tibagi letícia giese de andrade cruz modelagem hidrológica hec-hms da bacia hidrográfica do rio**, 2019. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8008>. Acesso em: 24 jul. 2021.

DAMÉ, R. de C. F. et al. Hietograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 46–54, 2010.

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos – SP. Dissertação (Mestrado)**, 2012. Universidade de São Paulo.

DEFATO ONLINE. Chuva causa estragos em João Monlevade.

Departamento de Água e Esgoto João Monlevade. Dados climatológicos de João Monlevade.

DIÁRIO DO AÇO. Chuva causa inundaçāo em João Monlevade.

DICKEL, M. E. G. Eventos climáticos extremos na sub-bacia hidrográfica do Rio Ribeira do Iguape e Litoral Sul , SP : Defesa Civil e capacidade operacional para a gestão de riscos (Tes.),, 2016.

DISCONZI, P. B. et al. **Desempenho dos métodos dos momentos e da máxima verossimilhança na estimativa de parâmetros da distribuição Gama ii**. 2013.

DNIT, D. N. de I. de T. **Manual de drenagem de rodovias**. Rio de Janeiro, 2006.

DUARTE, C. C. **As respostas de saídas destes modelos contêm informações sobre os cenários futuros de mudanças climáticas**, 2009. Universidade Federal de Pernambuco.

ENGECORPS, Engenharia. **Elaboração dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSBs) dos Municípios de Antônio Dias, Bela Vista de Minas, Jaguaraçu, Marliéria,**

Nova Era e Rio Piracicaba. 2015. Disponível em: <http://www.cbhpiracicabamg.org.br/wp-content/uploads/2014/04/1246-IBA-05-SA-RT-0003-R2_NovaEra.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2018

FÁTIMA, M. de. Impactos da drenagem urbana na saúde pública em municípios de pequeno porte no estado do rio grande do norte, nordeste do brasil, 2013. Universidade Federal De Pernambuco.

FERREIRA, M. G. DE B. análise regional da distribuição temporal de precipitações sub diárias para o estado de Minas Gerais, 2015. Universidade Federal de Minas Gerais.

FONTOURA, J. R. Jéssica Ribeiro Fontoura, 2019. Universidade Federal de Santa Catarina.

FRANCO, E. S. et al. Canalização do Córrego Carneirinhos e sua relação com os alagamentos em João Monlevade/MG. **Revista Científica Vozes dos Vales**, v. 10, p. 1–16, 2016.

FURTADO, A. P. F. V. plano de segurança da barragem de contenção de cheias do córrego bonsucesso,Belo Horizonte -MG, 2018. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

G1 MG GLOBO NOTÍCIAS. Chuva provoca alagamentos em João Monlevade, na Região Central de MG.

GIRNIUS, L. D. S. Análise comparativa do efeito da distribuição espaço-tempo em eventos pluviométricos intensos na formação de vazões em bacias urbanas, 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e Diretoria de Geociências. Coordenacão de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Manual técnico de pedologia. IBGE, 2007.

INMET, I. N. DE. NORMAIS CLIMATOLOGICAS DO BRASIL, PERIZODO 1982-2010.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Estimativa de população. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Boletim agroclimatológico mensal. Brasília, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Boletim agroclimatológico mensal. Brasília, 2020.

IPCC. Climate Change 2007. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

IPCC. Climate Change 2014 Part A: Global and Sectoral Aspects. 2014.

IPCC, I. P. ON C. C. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. .

IPCC, I. P. ON C. C. Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change. 2014b.

KIM, Y.-M. et al. Spatially resolved estimation of ozone-related mortality in the United States under two representative concentration pathways (RCPs) and their uncertainty. **Climatic Change**, v. 128, n. 1–2, p. 71–84, 2015.

LEITE, F. F. D. O. **Aplicação do modelo hidrológico hec-hms na análise da influência do uso e ocupação do solo nas vazões de bacias hidrográficas**, 2015. Universidade Federal de Itajubá.

LEITE, J. C. Controvérsias na climatologia: o IPCC e o aquecimento global antropogênico. **Scientiae Studia**, v. 13, n. 3, p. 643–677, 2015.

LI, Y.; HUANG, H.; JU, H.; et al. Assessing vulnerability and adaptive capacity to potential drought for winter-wheat under the RCP 8.5 scenario in the Huang-Huai-Hai Plain. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 209, p. 125–131, 2015.

LOPES, D. de C. **Avaliação preliminar da relação intensidade-duração-frequência pelo método Kimbal e obtenção dos coeficientes de desagregação para diferentes durações de precipitação Estudo de caso: Coronel Pacheco – MG**, 2017. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA.

LORDELO, V. C. **Gestão da drenagem e manejo de águas pluviais urbanas no município de cruz das almas-ba: uma avaliação a partir do ordenamento legal, institucional e técnico-operacional.**, 2019. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

MACEDO, R. L. **Estudo hidrológico da bacia do rio Negrinho-SC Utilizando o HEC-HMS**, 2010. Universidade Federal de Santa Catarina.

MARENGO, J. A. Mudanças cliMáticas e eventos extreMos no Brasil PreFácio Fbds. **mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**, p. 4- 19 76p., 2009.

MENEGUZZI, N. L. G. **Mudanças climáticas, saúde e trabalho: o direito ante o ambiente em transformação**, 2011. Universidade de Caxias do Sul.

MOREIRA, A. Á. C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio granjeiro – crato-ce: composição do cenário atual e simulações de uso e ocupação do solo.**, 2013. Universidade Federal do Ceará.

MOREIRA, L. L. **Análise do Impacto da Evolução Urbanística Sobre o Sistema de Drenagem Urbana**, 2014. Universidade Federal do Espírito Santo.

MOTA, P. V. M. DA; CRUZ, M. A. S. VII Seminário de Iniciação Científica e Pós-Graduação da Embrapa Tabuleiros Costeiros. In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Org.); **Anais**. p.30, 2017. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

MOTA, T. Chuva forte alaga região central de João Monlevade.

MOTA, T. et al. *Combination of the SCS-CN and the GRADEX models to maximum flow estimation. RBRH*, v. 23, 2018.

OMM, O. M. M. *Calculation of monthly and annual 30-year standard normals.* .

PADILHA, V. L. et al.. Aplicação do modelo hec-hms na modelagem hidrológica orientada por eventos para transferência de vazões. **xxii Símposio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–8, 2017.

PBMC, P. B. de M. C. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação: Primeiro relatório de avaliação nacional - Volume 2**. 2014.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, REGINA LUIZA GOUVÊA SEVERO, D. L. Revista Brasileira de Meteorologia da região sul do Brasil *Trend on precipitation time series in southern Brazil*. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 0102–7786, p. 1–7, 2013.

QUADRO, M. F. L. de. Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 2–3, p. 210–210, 1999.

RADESCA, F. D. **Uso de sistemas unitários de esgoto e drenagem como estratégia alternativa e escalonada no tempo para o saneamento ambiental**, 2018. Cambridge: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RAMOS, C. L. et al. Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo.

RATHJENS, H.; BIEGER, K.; SRINIVASAN, R.; CHAUBEY, I.; ARNOLD, J.G. CMhyd *User Manual—Documentation for Preparing Simulated Climate Change Data for Hydrologic Impact Studies*. 2016, p. 16. Available online: https://swat.tamu.edu/media/115265/bias_cor_man.pdf Acesso em: 21 dez. 2018.

REBOITA, M. S.; CORRÊA, M. de P.; RODRIGUES, M.; SILVA, J. P. R. DA. *Balance of the atmospheric sciences graduation course in the south of Minas Gerais State: teaching, research, extension and benefits to society*. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 7, 2016.

REIS, A. L.; SILVA, M. S.; REGIS, M. V.; et al. Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais (*Climatology and extreme rainfall events in the state of Minas Gerais*). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 2, p. 652–660, 2018.

RIAHI, K.; RAO, S.; KREY, V.; et al. RCP 8.5—*A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions*. **Climatic Change**, v. 109, n. 1–2, p. 33–57, 2011.

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S. **Mudanças Climáticas e Cidades: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro, 2016.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, 2004.

SAAVEDRA, M. A. A. E O. C. Modelagem hidrológica da bacia de Maylanco usando HEC-HMS. **Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 18, n. 1, p. 1–17, 2018.

SALES, D. C.; COSTA, A. A.; SILVA, E. M. da; et al. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 435–456, 2015.

SAMPAIO, G.; SILVA, D. L. da. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. **REVISTA USP**, p. 41–54, 2014. São Paulo.

SANTOS, C.A.S et al. 2019. *Using a Hydrologic Model to Assess the Performance of Regional Climate Models in a Semi-Arid Watershed in Brazil*. Water, 11, 170; doi:10.3390/w11010170.

SANTOS, H. G. et al. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Embrapa Solos. Documentos, 130.) 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000.

Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123772/1/DOC-130-O-novo-mapa-de-solos-do-Brasil.pdf>, Acesso em:

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5.ed. revista e Ampliada, Embrapa, 2018.(<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003?mode=simple>). Acesso em:

SANTOS, K. R. dos. Inundações Urbanas: um passeio pela literatura. **Rev. Geo. UEG**, v. 1, p. 177–190, 2012.

SANTOS, L. C. C. **Estimativa de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos**, 2010. Universidade Federal do Espírito Santo.

SANTOS, R. B. dos, et al. **Construção e aplicação de um índice de vulnerabilidade humana à mudança do clima para o contexto brasileiro**: a experiência do estado do Espírito Santo. **Saúde e Sociedade**, v. 3, p. 299–321, 2019a. Espírito Santo.

SANTOS, R. B. dos. et al. **Construção e aplicação de um índice de vulnerabilidade humana à mudança do clima para o contexto brasileiro**: a experiência do estado do Espírito Santo. **Saúde e Sociedade**, v. 28, n. 1, p. 299–321, 2019b.

SANTOS, W. CHEIA DA LAJE COMPLETA 50 ANOS: tromba d’água arrasou a cidade de São José da Laje no fatídico dia 14 de março de 1969.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de alerta contra enchentes na bacia do rio Doce**. 2009.

SIDRA: SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO. **Censo Demográfico: população residente, por cor ou raça**

SILVA, João Batista Lopes da. **Modelos de previsão de enchentes em tempo real para o município de Nova Era**. 2006. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3607/textocompleto.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 nov. 2019.

SILVA, B. MARCIONILO. **Chuvas intensas em localidades do estado de Pernambuco**, 2009. Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA, F. D. dos S. **Cenários Climáticos Atuais e Futuros da Produtividade do Algodão Herbáceo no Nordeste do Brasil**, 2014. Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, F. DAS N. R. da. **Projeções climáticas regionalizadas para a América do Sul com ênfase nos impactos hidrometeorológicos na bacia do Rio Grande – região sudeste do Brasil**, 2016. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, J. J. R. et al. Análise de eventos de inundação na sub-bacia do córrego Carneirinhos, João Monlevade, Minas Gerais. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 6, p. e33963383, 2020b. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/3383>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

SILVA, J. J. R. et al. Influência da expansão urbana aliada às características morfométricas nas ocorrências de inundações: estudo de caso no município de João Monlevade-MG. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 2, p. 136922101, 2020.

SILVA, Mirna Karla Amorim da. **Modelagem hidrológica aplicada ao estudo da vazão da bacia hidrográfica do rio Araguari - MG, a partir das mudanças do uso da terra e cobertura vegetal nativa**. 2014. 196 f. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15994>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

SILVA, N. de L. **Correlação entre pluviosidade e movimentos gravitacionais de massa no alto ribeirão do Carmo/MG**, (Dissertação - Mestrado), 2014. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFOP_efb6e85437eaf1914ff2196731a7cd85>. Acesso em: 24 jul. 2021.

SILVA, P. O. da. **Análise de técnicas compensatórias de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub-bacia do rio Jiquiá no Recife**, (Dissertação - Mestrado), 2010. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5401>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

SILVEIRA, A.; BEMFICA, D.; GOLDENFUM, J. **Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a porto alegre**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 4, p. 5–16, 2000.

SILVEIRA, C. et al. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura / *Climate change in the São Francisco river basin: analysis of precipitation and temperature*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416–428, 2016.

SOUZA, Maria Cristina Oliveira. **Mudanças climáticas e energia um estudo sobre contribuições brasileiras diante de um novo regime climático**. 2017. 215 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Política Científica e Tecnológica, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/324987/1/Souza_MariaCristinaOliveira_M.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2021.

SOUZA, P. M. B. de et al. Influence of climate change on working conditions in the late 21st

century. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, 2020.

SOUZA, R. M.; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial – caso de estudo bacia do Córrego Samambaia. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 5, n. 2, p. 1–11, 2012.

SOUZA, T. C. T. **Avaliação de vazões máximas estimadas a partir dos modelos hec-hms e swmm – estudo de caso para o núcleo urbano e região periurbana de Muniz Freire**, 2017. Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/9534>>. Acesso em: 24 jul. 2021

SOUZA, V. B. de; DAL FARRA, R. Á. Estudo do *Software Hec-Hms* Para Aplicação Da Modelagem. **revista de iniciação da Ulbra**, v. 15, p. 116–128, 2017.

SUDERHSA, S. **Manual de drenagem urbana**. Toledo, 2017.

TILIO NETO, P. de. As mudanças climáticas na ordem ambiental internacional. **Centro Edelstein de Pesquisas Sociais**, p. 37–81, 2010b.

TILIO NETO, P. de. Ecopolítica das mudanças climáticas o IPCC e o ecologismo dos pobres. **Centro Edelstein de Pesquisas Sociais**, p. 155, 2010a. Rio de Janeiro.

TONETO JUNIOR, R.; PINHO, M. **Economia de Baixo Carbono: Impactos de Novos Marcos Regulatórios e Tecnologias Sobre a Economia Brasileira**. São Paulo: Funpep, 2015.

TUCCI, C. E. M. DRENAGEM URBANA. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. DRENAGEM URBANA, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004.

TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas. In: ABRH (Org.); **Inundações e drenagem urbana**. p.106, 2017.

UNITED NATIONS. The World 's Cities in 2018. **The World's Cities in 2018 - Data Booklet (ST/ESA/ SER.A/417)**, p. 34, 2018.

USACEUS. **SOFTWARE Hydrologic Modeling System, HEC-HMS**.

USDA, S. *Urban Hydrology for Small. Soil Conservation*, n. Technical Release 55 (TR-55), p. 164, 1986.

VIA COMERCIAL. Forte chuva alga avenidas e ruas no bairro Carneirinhos.

VITAL, M. H. F. MEIO AMBIENTE AQUECIMENTO GLOBAL: Acordos Internacionais , Emissões de CO2 e o Surgimento dos Mercados de Carbono no Mundo. **BNDES Set**, v. 24, n. 48, p. 167–244, 2018.

WARD, S.; BUTLER, D.; MEMON, F. A. *Rainwater harvesting: Model-based design evaluation*. **Water Science & Technology**, p. 85–96, 2010.

WESCHENFELDER, Adriana Burin et al. Geração de Curvas IDFs para Cenários Projetados na Cidade de Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 34, n. 2, p.201-216, jun. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863340026>.

ZILLI, M. T. et al. *comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil*. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017.